ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Προσομοίωση λειτουργίας δεξαμενής αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος σε εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων»

ΤΖΙΑΝΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια

***Αναπλ. Καθ.* ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΚΑΤΣΙΒΕΛΑ**

ΧΑΝΙΑ 2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπλ. Καθ. Ελευθερία Κατσίβελα, εκπαιδευτικό του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Παραρτήματος Χανίων του Τ.Ε.Ι. Κρήτης για την ανάθεση του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας και τον Δρ. Ευάγγελο Τερζή για τη διάθεση του προγράμματος προσομοίωσης STELLA 7.0.1, δίνοντάς μου έτσι τη δυνατότητα να ολοκληρώσω επιτυχώς τις σπουδές μου με την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την κυρία Κοτσιφάκη Χριστίνα, Χημικό Μηχανικό στην ΕΕΑΑ της ΔΕΥΑ Χανίων για την ευγενική παραχώρηση δεδομένων και παραμέτρων των δεξαμενών αερισμού και καθίζησης της εγκατάστασης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους εκπαιδευτικούς του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Παραρτήματος Χανίων του Τ.Ε.Ι. Κρήτης για την απόκτηση των γνώσεων κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου οι οποίες συνέβαλλαν σημαντικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθ. Ελευθερία Κατσίβελα
Καθ. Εφαρμ. Νικόλαος Λυδάκης
Δρ. Δημήτριος Καλδέρης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζεται η προσομοίωση της λειτουργίας μιας δεξαμενής αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος σε μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Αστικών Αποβλήτων (ΕΕΑΑ). Σκοπός της εργασίας είναι η προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Η/Υ) των λειτουργιών και των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια δεξαμενή αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία οδηγούν στην καλύτερη κατανόηση των λειτουργιών και κατά συνέπεια στον καλύτερο σχεδιασμό της μονάδας.

Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε (1) η διάσπαση του οργανικού φορτίου σαν χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) και (2) η ανάπτυξη της βιομάζας σε μια δεξαμενή αερισμού με ανακυκλοφορία ιλύος από μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης. Τα λύματα εισέρχονται από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης στη δεξαμενή αερισμού, όπου γίνεται η βιολογική επεξεργασία και στη συνέχεια οδηγούνται στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης όπου καθιζάνουν τα στερεά που έχουν απομείνει. Στη συνέχεια το καθαρό πλέον υγρό οδηγείται στις εγκαταστάσεις απολύμανσης ώστε να διατεθεί στο περιβάλλον και η ιλύς που έχει καθιζάνει στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος για να μεταφερθεί τελικά στους χώρους απόθεσης ή να επεξεργαστεί περαιτέρω σαν εδαφοβελτιωτικό ή δομικό υλικό.

Η προσομοίωση έγινε με το πρόγραμμα STELLA 7.0.1 με τις παρακάτω παραδοχές:

- Η διαδικασία μηχανικού αερισμού διατηρεί τη συγκέντρωση οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού σε ένα σταθερό επίπεδο.
- Ο ρυθμός αύξησης της ετερότροφης βιομάζας εξαρτάται από το υπόστρωμα και τη συγκέντρωση του οξυγόνου. Οι σχέσεις υπόστρωμα – ρυθμός αύξησης ετερότροφης βιομάζας και συγκέντρωση οξυγόνου - ρυθμός αύξησης ετερότροφης βιομάζας είναι σύμφωνες με την κινητική που έχει περιγράψει ο Monod (Monod Kinetics).
- Η διάσπαση των κυττάρων (λύση) μετατρέπει την ετερότροφη βιομάζα σε/στο υπόστρωμα με κινητική χημικής αντίδρασης πρώτης τάξης και δεν καταναλώνει οξυγόνο.
- Τοποθετήθηκαν σταθερές τιμές στις δεκαπέντε παραμέτρους που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7.5.3.
- Δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία της νιτροποίησης και η ανάπτυξη της αυτότροφης βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού.
- Δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία της απονιτροποίησης σε ανοξικές δεξαμενές.
- Δεν ελήφθη υπόψη η εσωτερική ανακυκλοφορία της δεξαμενής αερισμού και της ανοξικής δεξαμενής.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε εδώ με δεδομένα από την ΕΕΑΑ της Δημοτικής Επιχείρισης Ύδρευσης Αποχέτευσης (ΔΕΥΑ) Χανίων παρουσίασε μια μείωση του οργανικού φορτίου κατά 100% και μια σταθεροποίηση της ετερότροφης βιομάζας στη σταθερή κατάσταση.

Επίσης εξετάστηκαν η ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας και η κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος σε σχέση με τις μεταβολές των τιμών των παρακάτω παραμέτρων : ροή (παροχή) λυμάτων – flow, συγκέντρωση οξυγόνου - So, Σταθερά κορεσμού οξυγόνου – Ko, Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής - Substrate conc Sin, Θερμοκρασία – Temperature.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι:

1) Το μοντέλο είναι αξιόπιστο και παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα σε μεγάλο εύρος μεταβολής παραμέτρων.
2) Η εφαρμογή του χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα, ως σταθερές τιμές, από την ΕΕΑΑ της ΔΕΥΑ Χανίων έδειξε ότι καταλήγει σε σωστά αποτελέσματα.
3) Η ενσωμάτωση εξισώσεων της διαδικασίας νιτροποίησης και απονιτροποίησης σε μελλοντικές εργασίες θα βελτίωνε το παρόν μοντέλο.

Simulation of the operation process of an aeration tank by heterotrophic biomass with recirculation of activated sludge in a Waste Water Treatment Plant

ABSTRACT

In the present thesis, the operation simulation of an aeration tank of heterotrophic biomass with recirculation of activated sludge in a Waste Water Treatment Plant (WWTP) is presented. The aim of the current work is the computer simulation of the operations and the processes that take place in an aeration tank of heterotrophic biomass with recirculation of activated sludge. This will allow for the quantitative determination of the parameters which will lead to the optimum planning of the unit.

In particular, (1) the reduction of organic loading as chemical oxygen demand (COD) and (2) the growth of heterotrophic biomass in an aeration tank with recirculation of sludge from a secondary settling tank were examined. The sewage enter from the primary settling tank in the aeration tank, where they are biologically treated and then they are led to the secondary settling tank where the remaining solids precipitate. Then the treated liquid is moved to the disinfection installation and is finally released to the environment. The sludge that has settled in the previous installation is finally transported for deposition or is processed further in order to be used as amendment soil or structural material.

The simulation was performed using the computer program STELLA 7.0.1 with the following assumptions:

- The process of mechanical aeration keeps the oxygen's concentration in the aeration tank at a constant level.
- The rate of increase of heterotrophic biomass depends on the substrate and the oxygen's concentration. The relation between substrate - rhythm of increase of heterotrophic biomass and oxygen's concentration - rhythm of increase of heterotrophic biomass conform with the kinetics that Monod has described (Monod Kinetics).
- The degradation of the heterotrophic biomass cells (lysis) in the substrate proceeds through first degree kinetics and does not consume oxygen.
- Constant values were used for the fifteen parameters which are presented in section 7.5.3.
- The process of nitrification and the growth of autotrophic biomass in the aeration tank were not taken into consideration.
- The process of denitrification in the anoxic tanks was not taken into consideration.
- The internal recirculation in the aeration and anoxic tanks, was not taken into consideration.

The model was developed using data from the WWTP of Municipal Enterprise for Water and Sewage (MEWS) of Chania city showed a reduction of organic loading of 100% and a stabilisation of heterotrophic biomass in the steady state.

The growth of heterotrophic biomass and the consumption of dissolved organic substrate were also examined versus the following parameters: flow of sewages – flow, oxygen's concentration – So, Michael Menten saturation constant for oxygen - Ko, Concentration of influent substrate - Substrate conc Sin, Temperature.

The results of the simulation showed that:

1) The model is reliable and presents high stability for a wide range of parameters.
2) The model's application using real data, as constant values, from the WWTP of MEWS of Chania city showed that it leads to reliable results.
3) The incorporation of equations for the processes of nitrification and denitrification in future work may improve the present model.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3
ABSTRACT 4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ 9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ 10
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ 11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 15
Εισαγωγή 15
1.1 Η ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ 15
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ 16
1.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ – ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΛΥΣ 16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 17
Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων 17
2.1 ΓΕΝΙΚΑ 17
2.2 ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ 18
2.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ 20
2.3.1 Πρωτοβάθμια επεξεργασία 22
2.3.1.1 Προκαταρκτική επεξεργασία 22
2.3.1.1.1 Εσχάρωση 22
2.3.1.1.2 Εξάμμωση – Λιποσυλλογή 23
2.3.1.1.3 Μέτρηση παροχής 24
2.3.1.1.4 Υποδοχή βοθρολυμάτων 25
2.3.1.2 Πρωτοβάθμια καθίζηση 27
2.3.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία 27
2.3.2.1 Αερισμός 27
2.3.2.2 Δευτεροβάθμια καθίζηση 29
2.3.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία 31
2.3.3.1 Απολύμανση 31
2.3.3.1.1 Χλωρίωση – Αποχλωρίωση 31
2.3.3.1.2 Απολύμανση με όζον 32
2.3.3.1.3 Απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία UV 32
2.3.4 Επεξεργασία της περίσσειας λάσπης 33
2.3.4.1 Πάχυνση 33
2.3.4.2 Αφυδάτωση 33
2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ 34
2.4.1 Παροχές 35
2.4.2 Φυσικά χαρακτηριστικά 35
2.4.2.1 Στερεά συστατικά 35
2.4.2.2 Χρώμα 35
2.4.2.3 Οσμή 36
2.4.2.4 Θερμοκρασία 36
2.4.3 Οργανικά συστατικά 36
2.4.4 Άζωτο 38
2.4.5 Φώσφορος 39
2.4.6 Παθογόνοι μικροοργανισμοί 39

2.4.7 pH και αλκαλικότητα ... 39
2.4.8 Άλλα χαρακτηριστικά ... 40
2.4.8.1 Χλωριούχα ... 40
2.4.8.2 Θείο ... 40
2.4.8.3 Βαρέα μέταλλα ... 40
2.5 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΛΑΣΠΗΣ – ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ... 40
2.5.1 Χαρακτηριστικά επεξεργασμένων αποβλήτων και παραγόμενης λάσπης – Οδηγίες ΕΟΚ ... 41
2.5.2 Ελληνική νομοθεσία ... 42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ... 45
Κινητική Μικροβιακής Ανάπτυξης ... 45
3.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ... 45
3.1.1 Σκοπός ... 45
3.1.2 Μικροβιακός πληθυσμός στις εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος ... 46
3.1.3 Ανάπτυξη μικροοργανισμών ... 49
3.1.4 Δράσεις μικροοργανισμών ... 50
3.2 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ... 50
3.2.1 Συστήματα ασυνεχούς τροφοδοσίας ... 50
3.2.2 Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας ... 52
3.2.3 Εμπειρικά μεγέθη συστήματος ... 53
3.2.4 Κινητική – Εξισώσεις ανάπτυξης μικροοργανισμών ... 54
3.2.5 Κινητική πολλαπλών υποστρωμάτων ... 56
3.2.6 Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα με ανακυκλοφορία ιλύος ... 57
3.2.7 Παρεμπόδιση υποστρώματος – Κινητική αύξησης μικροοργανισμών παρουσία παρεμποδιστή ... 61
3.2.8 Επίδραση θερμοκρασίας ... 62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ... 63
Κινητική Μικροβιακής Ανάπτυξης ειδικά στη Δεξαμενή Αερισμού ... 63
4.1 ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ... 63
4.1.1 Στοιχειομετρία ... 63
4.1.2 Ρυθμός αύξησης βιομάζας ... 64
4.1.3 Παραγωγή βιομάζας. Ηλικία λάσπης ... 64
4.2 ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ... 65
4.2.1 Στοιχειομετρία ... 65
4.2.2 Ταχύτητα νιτροποίησης ... 65
4.2.3 Παραγωγή βιομάζας. Ηλικία λάσπης ... 67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ... 69
Μαθηματικά Μοντέλα ... 69
5.1 ΣΚΟΠΟΣ ... 69
5.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΩΝ ... 71
5.2.1 Γενικά ... 71
5.2.1.1 Διαφορική μορφή εξισώσεων των μοντέλων ... 71
5.2.1.2 Αριθμητική μορφή εξισώσεων των μοντέλων ... 72
5.2.2 Μοντέλο μηδενικής διάστασης Activated Sludge Model (ASM1) [3,4] ... 74
5.2.2.1 Ποιοτικές παράμετροι ... 74
5.2.2.2 Διεργασίες και εξισώσεις περιγραφής τους ... 76
5.2.2.3 Εξισώσεις διεργασιών ποιοτικών παραμέτρων ... 84

5.2.2.4 Συντελεστές εξισώσεων 85
5.2.3 Εμπορικά προγράμματα 86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 87
Πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA 87
6.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ STELLA 87
6.2 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 89
6.2.1 Αποθέματα (stocks) 89
6.2.2 Ροές (flows) 89
6.2.3 Μετατροπείς (converters) 90
6.2.4 Σύνδεσμοι (connectors) 90
6.2.5. Γραφικές παραστάσεις 92
6.2.6 Συσκευές Εισαγωγής Δεδομένων 94
6.3 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 97
Δημιουργία Μοντέλου Προσομοίωσης για μια Δεξαμενή Αερισμού ετερότροφης βιομάζας με Ανακυκλοφορία Ενεργού Ιλύος – Αποτελέσματα Μέρος Ι 97
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 97
7.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ 98
7.3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 99
7.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ STELLA 100
7.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 112
7.5.1 Διαφορικές εξισώσεις στη γλώσσα προγραμματισμού του προγράμματος STELLA 112
7.5.2 Υπόλοιπες μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν μοντέλο του προγράμματος STELLA 112
7.5.3 Σταθερές τιμές παραμέτρων 113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 116
Εφαρμογή Μοντέλου Προσομοίωσης – Αποτελέσματα Μέρος ΙΙ 116
8.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΕΡΙΣΜΟΥ 116
8.2 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 118
8.2.1 Ροή (Flow) 118
8.2.2 Συγκέντρωση οξυγόνου (So) 120
8.2.3 Σταθερά κορεσμού οξυγόνου (Ko) 122
8.2.4 Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής (Substrate conc Sin) 125
8.2.5 Θερμοκρασία (Temperature) 127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 129
Συμπεράσματα 129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 133

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση των λειτουργιών μιας δεξαμενής αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών αποβλήτων (ΕΕΑΑ) στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος της ενεργού ιλύος με ανακυκλοφορία.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας και Βιοχημικών Διεργασιών του Τομέα Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας στο Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Παραρτήματος Χανίων του ΤΕΙ Κρήτης κατά το ακαδημαϊκό έτος 2007-2008.

Ακολουθεί μια μικρή αναφορά στα περιεχόμενα κάθε κεφαλαίου:

- ✓ Κεφάλαιο 1

  Τονίζεται η αξία και αναγκαιότητα του νερού για τον άνθρωπο, γίνεται μια μικρή αναφορά στην ιστορία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και τέλος, αναφέρεται η χρησιμότητα των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης και η μέθοδος ενεργού ιλύος.

- ✓ Κεφάλαιο 2

  Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και η σύνθεση των υγρών αποβλήτων, τα στάδια επεξεργασίας σε μια ΕΕΑΑ, καθώς και η νομοθεσία σε ευρωπαϊκό και ελληνικό επίπεδο που αφορά τις προδιαγραφές των επεξεργασμένων λυμάτων πριν την διάθεσή τους στο υδάτινο οικοσύστημα.

- ✓ Κεφάλαιο 3

  Αναφέρεται η μέθοδος ενεργού ιλύος, περιγράφεται ο μικροβιακός πληθυσμός στις δεξαμενές και η κινητική ανάπτυξής του.

- ✓ Κεφάλαιο 4

  Αναλύεται η κινητική ανάπτυξης των μικροοργανισμών ειδικά στη δεξαμενή αερισμού.

- ✓ Κεφάλαιο 5

  Εδώ παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για τα μαθηματικά μοντέλα, το σκοπό τους και τη χρησιμότητα τους και τέλος αναλύεται το Μοντέλο Ενεργού ιλύος No.1 (Activated Sludge Model No.1) στο οποίο στηρίζεται το μοντέλο που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.

- ✓ Κεφάλαιο 6

  Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια περιληπτική παρουσίαση του προγράμματος προσομοίωσης STELLA με το οποίο δημιουργήθηκε το μοντέλο της εργασίας.

- ✓ Κεφάλαιο 7

  Περιέχει το μοντέλο εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος, το οποίο αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αναλυτικά τα τμήματα από τα οποία αποτελείται και τις εξισώσεις που το απαρτίζουν.

- ✓ Κεφάλαιο 8 και Κεφάλαιο 9

  Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της προσομοίωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ASM1	Μοντέλο ενεργού ιλύος Νο1 (Activated Sludge Model no1)
BOD	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand)
COD	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand)
DC	Αποσυνθετικοί οργανισμοί (Decomposers)
DIM	Διαλυμένες ανόργανες ουσίες (Dissolved Inorganic Matter)
DO	Διαλυμένο οξυγόνο (Dissolved Oxygen)
DOM	Διαλυμένες οργανικές ουσίες (Dissolved Organic Matter)
DS	Διαλυμένα στερεά (Dissolved Solids)
F/M	Λόγος τροφής – μικροοργανισμών (Food/Microorganisms)
FC	Κολοβακτήρια κοπρικής προέλευσης (Faecal Coliforms)
FS	Ανόργανα ή αδρανή, σταθερά ή μη εξαερώσιμα στερεά- (Non-Volatile ή Fixed Solids)
MLSS	Αιωρούμενα στερεά του ανάμικτου υγρού (Mixrd Liquor Suspended Solids)
MLVSS	Οργανικό μέρος των ιωρούμενων στερεών του ανάμικτου υγρού
POM	Σωματιδιακές οργανικές ουσίες (Particulate Organic Matter)
PP	Πρωτοβάθμιοι παραγωγικοί οργανισμοί (Primary Producers)
SC	Δευτεροβάθμιοι καταναλωτικοί οργανισμοί (Secondary Consumers)
SS	Αιωρούμενα στερεά (Suspended Solids)
TC	Ολικά κολοβακτήρια (Total Coliforms)
TKN	Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (Total Kjeldahl Nitrogen)
TOC	Ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon)
TS	Ολικά στερεά συστατικά (Total Solids)
UV	Υπεριώδης (Ultra Violet)
VOC_S	Πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds)
VS	Οργανικά ή εξαερώσιμα στερεά (Volatile Solids)
VSS	Οργανικά ή εξαερώσιμα αιωρούμενα στερεά (Volatile suspended solids)

ΒΑ	Βιολογικός αντιδραστήρας
ΔΑ	Δεξαμενή αερισμού
ΔΔΚ	Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης
ΔΕΥΑ	Δημοτική επιχείρηση ύδρευσης αποχέτευσης
ΔΚ	Δεξαμενή καθίζησης
ΔΧΛ	Δεξαμενή χλωρίωσης
ΕΕΑΑ	Εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών αποβλήτων
ΕΙ	Ενεργός ιλύς
ΕΟΚ/ΕΕ	Ευρωπαϊκή οικονομική κοινότητα/Ευρωπαϊκή Ένωση
Η/Υ	Ηλεκτρονικός υπολογιστής
Η-Μ	Ηλεκτρομηχανολογικός
ΚΥΑ	Κοινή υπουργική απόφαση
μ/ο	Μικροοργανισμοί
ΟΦ	Οργανική φόρτιση
ΠΔ	Προεδρικό διάταγμα
ΠΥΣ	Πράξη υπουργικού συμβουλίου
ΥΑ	Υπουργική απόφαση
ΦΕΚ	Φύλλο εφημερίδος κυβερνήσεως

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

$a = \frac{Q_r}{Q}$	Ποσοστό ανακύκλωσης βιομάζας (τιμές συνήθως μικρότερες της μονάδας).
$C = \frac{X_r}{X}$	Συντελεστής συμπύκνωσης της βιομάζας ή ενεργού ιλύος (τιμές μεγαλύτερες της μονάδας).
$(dx/dt)_{20}$	Ταχύτητα αύξησης βιομάζας στους 20 °C.
$(dx/dt)_T$	Ταχύτητα αύξησης στους T °C.
b_H	Σταθερά ρυθμού διάσπασης (σήψης) ετερότροφης βιομάζας
C	Άνθρακας
Ca	Ασβέστιο
D	Αναλογία αραίωσης ή παροχή ανά μονάδα όγκου (Q/V). Αντίστροφο του υδραυλικού χρόνου παρακράτησης θ.
D = Q/V	Αναλογία αραίωσης ή παροχή ανά μονάδα όγκου, είναι το αντίστροφο του υδραυλικού χρόνου παραμονής θ
dS/dt	Ταχύτητα κατανάλωσης υποστρώματος
dX/dt	Ταχύτητα αύξησης βιομάζας
Fe	Σίδηρος
H	Υδρογόνο

K	Ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος
K	Κάλιο
K_1	Συντελεστής παρεμπόδισης για συγκεκριμένη ουσία (συγκέντρωση παρεμπόδισης που προκαλεί το ½ της μέγιστης παρεμπόδισης)
k_d	Συντελεστής αποσύνθεσης μικροοργανισμών
$k_{d,B}$	Συντελεστής αποσύνθεσης ετερότροφων βακτήριων
$k_{d,N}$	Συντελεστής αποσύνθεσης νιτροποιητικών βακτήριων
K_m	Ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος που αντιστοιχεί στη μ_m
K_o	Συντελεστής-σταθερά κορεσμού για οξυγόνο του Michael Menten
K_s	Συγκέντρωση υποστρώματος όταν $\mu = 1/2\ \mu_m$. Σταθερά κορεσμού για το οργανικό υπόστρωμα (Saturation constant for substrate) του Michaelis Menten
Mg	Μαγνήσιο
N	Άζωτο
Na	Νάτριο
O	Οξυγόνο
P	Φώσφορος.
Q	Παροχή εισόδου (του βιοαντιδραστήρα)
Q_r	Παροχή ανακυκλοφορίας της ιλύος
Q_w	Παροχή της απομακρυνόμενης ιλύος (περίσσεια ιλύος)
r_{Bu}	Ρυθμός κατανάλωσης της πηγής άνθρακα από τους μικροοργανισμούς
r_d	Ρυθμός φθοράς των μικροοργανισμών
r_g	Ρυθμός αύξησης της μάζας των μικροοργανισμών
r_s	Ταχύτητα χρήσης υποστρώματος
RS	Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα
RS_2	Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα
r_x	Ρυθμός ολικής αύξησης των μικροοργανισμών
S	Συγκέντρωση υποστρώματος
S_{AL}	Ολική αλκαλικότητα
S_e	Συγκέντρωση του υποστρώματος στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα
S_I	Αδρανής (μη βιοδιασπάσιμη-βιολογικά αδρανής) διαλυμένη οργανική ύλη
S_i	Συγκέντρωση του υποστρώματος στην είσοδο του βιοαντιδραστήρα
S_{in}	Συγκέντρωση υποστρώματος στα εισρέοντα (ρευστά)

S_{ND}	Οργανικό άζωτο
S_{NH}	Αμμωνιακό άζωτο
S_{NO}	Νιτρικό άζωτο
S_o	Συγκέντρωση οξυγόνου
S_O	Διαλυμένο οξυγόνο
S_S	Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
SS	Συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού υποστρώματος
V	Όγκος του δοχείου βιολογικής αύξησης
$V_{ΔA}$	Όγκος δεξαμενής αερισμού
X	Συγκέντρωση βιομάζας, μάζα των μικροοργανισμών
X_{BA}	Αυτότροφη βιομάζα
X_{BH}	Ετερότροφη βιομάζα
X_e	Συγκέντρωση της βιομάζας στην έξοδο της δεξαμενής καθίζησης
X_I	Αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη
X_m	Μέγιστη συγκέντρωση βιομάζας.
X_{ND}	Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο
X_P	Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας
X_r	Η βιομάζα στην απομακρυνόμενη ενεργό ιλύ (περίσσεια ιλύος)
X_S	Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη
XH	Συγκέντρωση ετερότροφης βιομάζας
X_o	Βιομάζα για χρονική στιγμή t = 0.
Y	Συντελεστής παραγωγής βιομάζας. Δηλώνει τη βιομάζα που παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιημένου υποστρώματος.
A	Αδρανή αιωρούμενα στερεά
B	Συγκέντρωση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εκροή
B_{rem}	Μάζα βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου που απομακρύνεται (οξειδώνεται) στη μονάδα του χρόνου
B_o	Συγκέντρωση βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου στην εισροή
ΔX	Σύνολο της παραγόμενης βιομάζας από τις διαδικασίες της οξείδωσης των οργανικών ενώσεων άνθρακα και της νιτροποίησης
$ΔX_B$	Παραγωγή της ετερότροφης βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού
$ΔX_N$	Παραγωγή βιομάζας των νιτροποιητικών βακτήριων στη δεξαμενή αερισμού
E	Απόδοση συστήματος

Θ	Συντελεστής θερμοκρασίας.
$\theta = V/Q$	Μέσος υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερισμού.
θ_c	Μέση ηλικία της βιομάζας, μέσος χρόνος παραμονής των κυττάρων στη δεξαμενή αερισμού.
$\theta_{C,N}$	Απαραίτητη ηλικία λάσπης για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης
K_B	Ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος από ετερότροφους μικροοργανισμούς
μ	Ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των μικροοργανισμών
μ'	Φαινόμενη Ειδική ταχύτητα αύξησης (που παρατηρείται). Περιλαμβάνει δηλαδή και την απώλεια βιομάζας λόγω αποδόμησης της ίδιας της βιομάζας
μ_m = muMax	Μέγιστη δυνατή τιμή του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των μικροοργανισμών
$\mu_{m,N}$	Μέγιστος ρυθμός αύξησης των νιτροποιητικών βακτήριων
μ_B	Ειδικός ρυθμός αύξησης της βιομάζας των ετερότροφων βακτήριων
μ_N	Ρυθμός νιτροποίησης
ν	Ποσοστό νιτροποιητικών βακτήριων στη βιομάζα της δεξαμενής αερισμού
N_{ox}	Μάζα του αζώτου που οξειδώνεται στη μονάδα του χρόνου
T	Σύνολο των αιωρούμενων στερεών
TN_o	Συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εισροή
Y_B	Συντελεστής παραγωγής ετερότροφης βιομάζας
Y_N	Συντελεστής παραγωγής βιομάζας από νιτροποιητικά βακτήρια
Y_o	Φαινομενικός Συντελεστής απόδοσης αύξησης. Δηλώνει τη βιομάζα που παρατηρείται να παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιημένου υποστρώματος (Παρατηρούμενος συντελεστής μετατροπής του υποστρώματος σε βιομάζα).
$Y_{o,B}$	Ολικός συντελεστής παραγωγής ετερότροφης βιομάζας
X_B	Συγκέντρωση των ετερότροφων βακτήριων
X_N	Συγκέντρωση των νιτροποιητικών βακτήριων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Μια από τις μεγαλύτερες τεχνολογικές προκλήσεις της εποχής μας είναι η αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών που παρατηρούνται πλέον σε ολόκληρο τον πλανήτη, για τις οποίες σημαντικό ρόλο θεωρείται ότι έχει η ρύπανση του περιβάλλοντος. Μία από τις επιβαρύνσεις που δέχεται το περιβάλλον είναι η ρίψη ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων στους υδάτινους αποδέκτες του οικοσυστήματός μας.

1.1 Η ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ

Η αλόγιστη ρίψη ανεπεξέργαστων αποβλήτων στο υδάτινο σύστημα μιας περιοχής (λίμνες, ποτάμια κλπ) επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα αφενός στο περιβάλλον και αφετέρου στον άνθρωπο αφού η ποιότητα ζωής, αλλά και η υγεία του τελευταίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την ύπαρξη καθαρού νερού. Το νερό ως συστατικό όλων των ζωντανών οργανισμών συνδέεται με την ύπαρξή τους. Είναι το βασικότερο συστατικό της φύσης, μετά τον ατμοσφαιρικό αέρα, για τη διατήρηση της ζωής και αποτελεί το 60-65% του βάρους του ανθρώπινου οργανισμού. Η πρώτη μορφή ζωής, όπως μας πληροφορούν οι βιολόγοι σχηματίστηκε μέσα στο νερό και από εκεί, μέσα από την εξελικτική διαδικασία, αναπτύχθηκε στον στερεό φλοιό της Γης. Η ιστορική πορεία του ανθρώπου επάνω στη Γη εξαρτήθηκε άμεσα από τη σχέση του με το νερό, αφού δεν μπορεί να ζήσει περισσότερες από πέντε ημέρες χωρίς αυτό. Από τις απαρχές της ύπαρξής του ο άνθρωπος ζούσε κοντά στο νερό, γιατί ήταν απαραίτητο όχι μόνο για τη δική του επιβίωση, αλλά και για τη διατήρηση των υπόλοιπων φυτικών και ζωικών οργανισμών στη φύση. Αντιλαμβανόμενος λοιπόν ο άνθρωπος καθ’ όλη τη διάρκεια της εξέλιξής του την αναγκαιότητα του νερού, τον απασχολούσε ανέκαθεν η εξασφάλιση αυτού του πολύτιμου αγαθού και στη συνέχεια η απομάκρυνση του ακάθαρτου νερού.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Μέθοδοι απομάκρυνσης των λυμάτων υπήρχαν από τα αρχαία χρόνια κυρίως στους ανεπτυγμένους πολιτισμούς. Υπόνομοι βρέθηκαν σε ερείπια προϊστορικών πόλεων, σε διάφορα μέρη, όπως στην Κρήτη και στη Συρία. Υπόνομοι οι οποίοι εξυπηρετούσαν την απομάκρυνση της βροχής στην αρχαία Ρώμη λειτουργούν ακόμα και σήμερα. Κατά τον Μεσαίωνα άρχιζαν να χτίζονται και βόθροι. Όταν γέμιζαν οι εργάτες έπρεπε να τους αδειάζουν με χρέωση του ιδιοκτήτη. Ύστερα απομακρύνονταν σε θαλάσσιες περιοχές και σε λίμνες ή ποτάμια. Κατά το $19^{ο}$ αιώνα άρχιζαν να χτίζονται καλύτερα αποχετευτικά συστήματα, τα οποία βελτίωσαν την ποιότητα της ζωής. Τον $20^{ο}$ αιώνα πολλές πόλεις και βιομηχανίες κατάλαβαν ότι η απομάκρυνση των λυμάτων απευθείας σε ποτάμια και λίμνες προκαλούσε πολλά προβλήματα υγείας, όπως χολέρα. Αυτό οδήγησε στην κατασκευή εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Κατά το 1950 και το 1960 άρχιζαν να χτίζονται οι πρώτες εγκαταστάσεις [11].

1.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ – ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΛΥΣ

Σήμερα εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας των λυμάτων ανάλογα με τις ανάγκες κάθε περιοχής και του εκάστοτε αποδέκτη. Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι μέθοδοι επεξεργασίας και το νομοθετικό πλαίσιο που τις διέπει. Καθοριστική είναι η συμβολή των ηλεκτρονικών υπολογιστών (Η/Υ), οι οποίοι με τις συνεχώς αυξανόμενες δυνατότητές τους βοηθούν στον καλύτερο σχεδιασμό, στην ομαλότερη, αλλά και οικονομικότερη λειτουργία και τέλος στην έγκαιρη και ορθότερη αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων. Αυτά επιτυγχάνονται με τη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων με τα οποία γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Αποβλήτων (ΕΕΑΑ). Προσομοιώνοντας τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια ΕΕΑΑ, είναι δυνατό να προβλεφθούν αλλαγές στη λειτουργία της ΕΕΑΑ στην περίπτωση μεταβολής οποιουδήποτε χαρακτηριστικού (όπως π.χ. της παροχής ή της θερμοκρασίας) με αποτέλεσμα την έγκαιρη πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων και την επίλυσή τους. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η μέθοδος ενεργού ιλύος με ανακυκλοφορία και δημιουργείται μαθηματικό μοντέλο μιας δεξαμενής αερισμού (ΔΑ) ετερότροφης βιομάζας σε Η/Υ με το πρόγραμμα STELLA.

Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου ενεργού ιλύος με ανακυκλοφορία είναι η επιστροφή ιλύος από τη ΔΚ στη ΔΑ με στόχο την ύπαρξη επαρκούς ποσότητας μικροοργανισμών (μ/ο) στη ΔΑ ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν όλες οι απαραίτητες βιολογικές διεργασίες που αποσκοπούν στον καθαρισμό των λυμάτων. Αναλυτικότερα αναπτύσσεται η μέθοδος της ενεργού ιλύος καθώς και η κινητική ανάπτυξης των μικροοργανισμών που λαμβάνουν μέρος σε αυτήν, στα κεφάλαια 3 και 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Επεξεργασία Αστικών Υγρών Αποβλήτων

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την υγεία των ανθρώπων είναι η παροχή νερού και στη συνέχεια η απομάκρυνση και διάθεση των υγρών αποβλήτων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η ποιότητα των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων και γενικά των υδάτινων αποδεκτών (θάλασσα, λίμνες, ποτάμια). Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η επεξεργασία των λυμάτων πριν την διάθεσή τους όχι μόνο για λόγους υγείας, αλλά και για να προστατευτεί η ποιότητα του αποδέκτη από

α) ελάττωση του διαλυμένου οξυγόνου και αλλοίωση του οικοσυστήματος
β) αισθητική υποβάθμιση (οσμές, μη διαύγεια κτλ)
γ) φαινόμενα ευτροφισμού (υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών)
δ) φαινόμενα τοξικότητας (βαρέα μέταλλα, κτλ)

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αντιμετώπισης της ρύπανσης των υδάτινων πόρων από τα απόβλητα είναι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Αστικών Αποβλήτων (ΕΕΑΑ). Η Επεξεργασία λυμάτων έχει στόχο την απομάκρυνση από τα λύματα των διαφόρων ρυπαντικών ουσιών ώστε αυτά να διατεθούν ακίνδυνα στο περιβάλλον αποσκοπώντας έτσι στην προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Ρυπαντικές ουσίες είναι τα ογκώδη αντικείμενα, η άμμος, τα μικρού μεγέθους στερεά που αιωρούνται στη μάζα των αποβλήτων (αιωρούμενα στερεά), τα οργανικά-φυσικά συστατικά (π.χ. υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη), οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα θρεπτικά στοιχεία (άζωτο και φώσφορος).

Αν τα απόβλητα διοχετευτούν χωρίς επεξεργασία οι διάφοροι τύποι ρυπαντών που περιέχονται σε αυτά μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα ρύπανσης αρχικά στον υδάτινο αποδέκτη (θάλασσες, ποτάμια, λίμνες) και κατ’ επέκταση στις ακτές , το έδαφος και τους υπόγειους υδροφορείς.

Τα ογκώδη στερεά, η άμμος και τα αιωρούμενα στερεά προκαλούν περισσότερο αισθητική δυσαρέσκεια παρά ουσιαστική ρύπανση του υδάτινου φορέα. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι υπεύθυνοι για τη μετάδοση ασθενειών στον άνθρωπο και σε άλλους οργανισμούς. Η παρουσία τους διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα που επιφέρουν στον άνθρωπο, όπως π.χ. δερματικές και άλλες μολύνσεις. Αυτοί χρησιμοποιούνται συχνά ως το βασικότερο κριτήριο για την καταλληλότητα ή όχι μιας ακτής για κολύμβηση. Τα οργανικά συστατικά, το άζωτο και ο φώσφορος, είναι όμως τα περισσότερο υπεύθυνα για τις δυσάρεστες καταστάσεις ρύπανσης. Και αυτό γιατί κάθε υδάτινος φορέας, αλλά και τα ίδια τα απόβλητα περιέχουν μικροοργανισμούς που καταναλώνουν τα οργανικά συστατικά των αποβλήτων, καθώς και το άζωτο και το φώσφορο, για να τραφούν και να πολλαπλασιαστούν καταναλώνοντας παράλληλα το οξυγόνο (δηλ. αναπνέοντας), που βρίσκεται διαλυμένο στο νερό του φορέα μέχρι να το εξαφανίσουν τελείως. Το άζωτο και ο φώσφορος μπορεί να δημιουργήσουν το λεγόμενο φαινόμενο του ευτροφισμού, που εκδηλώνεται με την υπερβολική ανάπτυξη των φυκιών στον υδάτινο φορέα. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η ύπαρξη ΕΕΑΑ στοχεύοντας στη μείωση της ρύπανσης των υδάτινων πόρων συμβάλλοντας έτσι σε ένα καλύτερο βιοτικό επίπεδο [20].



Εικόνα 2.1 Διάθεση ανεπεξέργαστων υγρών απόβλητων σε ελληνική θάλασσα [7].

2.2 ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Για να επιτευχθούν όμως τα επιθυμητά αποτελέσματα μιας ΕΕΑΑ πρέπει να καθοριστούν οι απαιτήσεις επεξεργασίας των λυμάτων οι οποίες διαμορφώνονται από την ευαισθησία και το είδος του αποδέκτη και να γίνει σωστός σχεδιασμός της μονάδας. Ο ορθός σχεδιασμός των συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, προϋποθέτει γνώση των βασικών ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των υγρών αποβλήτων, τον καθορισμό του βέλτιστου βαθμού συγκέντρωσης μέσω των αποχετευτικών δικτύων και την ορθή επιλογή συστήματος επεξεργασίας. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η τυπική σύνθεση των ανεπεξέργαστων αστικών υγρών αποβλήτων.

Πίνακας 2.1 Τυπική σύνθεση των ανεπεξέργαστων οικιακών υγρών αποβλήτων [7].

Συστατικά	**Μονάδα**	**Συγκέντρωση**		
		Χαμηλή	**Μέση**	**Υψηλή**
Ολικά στερεά (TS)	Mg/L	350	720	1200
Αιωρούμενα στερεά (SS)	Mg/L	100	220	350
Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5)	Mg/L	110	220	400
Ολικά ενεργός άνθρακας (TOC)	Mg/L	80	160	290
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	Mg/L	250	500	1000
Άζωτο (ολικό ως N)	Mg/L	20	40	85
Οργανικό	Mg/L	8	15	35
Ελεύθερη αμμωνία	Mg/L	12	25	50
Φώσφορος (ολικός ως P)	Mg/L	4	8	15
Οργανικός	Mg/L	1	3	5
Ανόργανος	Mg/L	3	5	10
Χλωρικά[α]	Mg/L	30	50	100
Θειϊκά[α]	Mg/L	20	30	50
Αλκαλικότητα (ως $CaCO_3$)	Mg/L	50	100	200
Λίπη	Mg/L	50	100	150
Ολικά κολοβακτήρια (TC)	N/100 mL	10^6-10^7	10^7-10^8	10^7-10^9
Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)	μg/L	<100	100-400	>400

[α] Οι τιμές θα πρέπει να προσαυξάνουν αναλογικά της παροχής νερού για αστική χρήση των επιμέρους κοινοτήτων καθώς μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται θεαματική πρόοδος στις τεχνολογίες επεξεργασίας. Αυτό οφείλεται: (α) στην αναγνώριση των σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις ανεπεξέργαστες ή πλημμελώς επεξεργασμένες εκροές υγρών αποβλήτων και (β) στην έλλειψη ή στη χαμηλή ποιότητα του διαθέσιμου νερού για την κάλυψη των διαφόρων αναγκών σε πολλές περιοχές του κόσμου.

2.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

Υπάρχουν συνήθως τέσσερα στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων:

Α. Πρωτοβάθμια επεξεργασία
1. Προκαταρκτική επεξεργασία
   α. Εσχάρωση
   β. Εξάμμωση – Λιποσυλλογή
   γ. Μέτρηση παροχής
   δ. Υποδοχή βοθρολυμάτων

2. Πρωτοβάθμια καθίζηση

Β. Δευτεροβάθμια επεξεργασία
1. Αερισμός (βιολογική επεξεργασία- σύστημα ενεργού ιλύος)
2. Δευτεροβάθμια καθίζηση

Γ. Τριτοβάθμια επεξεργασία
1. Απομάκρυνση αζώτου
   α. Αερισμός
   β. Ανοξική διεργασία

2. Απομάκρυνση φωσφόρου
   α. Αναερόβια διεργασία
   β. Αερισμός

3. Απολύμανση
   α.. Χλωρίωση – Αποχλωρίωση
   ή β. Απολύμανση με όζον
   ή γ. Απολύμανση με ακτινοβολία UV

Δ. Επεξεργασία της περίσσειας λάσπης
1. Πάχυνση
2. Αφυδάτωση



Εικόνα 2.2 Αεροφωτογραφία της ΕΕΑΑ Θεσσαλονίκης [23].

Να σημειωθεί επίσης ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα λύματα πρέπει αρχικά να ανυψωθούν, ώστε μετά, φυσικά με βαρύτητα να οδηγηθούν στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Αυτό γίνεται συνήθως με κοχλιωτές αντλίες τύπου Αρχιμήδη είτε ανοιχτές είτε σκεπασμένες.



Εικόνα 2.3 Αντλιοστάσιο εισόδου εγκατάστασης [13].

Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά οι παραπάνω διαδικασίες.

2.3.1 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

2.3.1.1 Προκαταρκτική επεξεργασία

2.3.1.1.1 Εσχάρωση

Σκοπός των εσχαρών είναι η συγκράτηση σε αυτές και η απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων (κομμάτια ξύλων, πλαστικά, κλαδιά κ.α.) που θα δημιουργούσαν προβλήματα (π.χ. φράξιμο, φθορά) σε αγωγούς και αντλίες της ΕΕΑΑ.

Τα βασικά είδη εσχαρών είναι δύο, οι απλές χειροκίνητες που καθαρίζονται με τα χέρια και οι μηχανικές – αυτοκαθαριζόμενες.



Εικόνα 2.4 Διάταξη μηχανικής εσχάρας [23].

Οι ποσότητες των εσχαρισμάτων ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εσχάρας, το είδος του αποχετευτικού συστήματος και την παρουσία βιομηχανικών αποβλήτων. Μια αντιπροσωπευτική τιμή ποσότητας εσχαρισμάτων είναι 30 l/m^3 λυμάτων. Η αποθήκευση των εσχαρισμάτων γίνεται συνήθως σε κλειστούς κάδους απορριμμάτων, συμβατών με αυτούς της αποκομιδής των στερεών απορριμμάτων του δήμου. Η τελική διάθεσή τους γίνεται συνήθως σε χωματερές.



Εικόνα 2.5 Εσχάρωση λυμάτων [23].

Για λόγους αποφυγής περιβαλλοντικών οχλήσεων οι εσχάρες εγκαθίστανται συνήθως σε κτίριο. Εξαίρεση αποτελούν οι μικρές ΕΕΑΑ που βρίσκονται μακριά από κατοικημένες περιοχές [20].

2.3.1.1.2 Εξάμμωση – Λιποσυλλογή

Σκοπός της εξάμμωσης είναι η απομάκρυνση των κόκκων άμμου, των σωματιδίων αργίλου ή των άλλων σωματιδίων γεωλογικής ή όχι υφής, με διάμετρο μεγαλύτερη από 200μm που δεν είναι οργανικά και έχουν ταχύτητες καθίζησης σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες των οργανικών στερεών. Η απομάκρυνση των σωματιδίων αυτών είναι απαραίτητη, γιατί η παρουσία τους δημιουργεί προβλήματα, όπως εναπόθεση φερτών υλών στον πυθμένα των αγωγών, φράξιμο των σωληνώσεων, φθορά του Η-Μ εξοπλισμού (αντλίες κ.λ.π.) και μείωση της απόδοσης των επόμενων μονάδων επεξεργασίας [20].

Η άμμος που καθιζάνει έχει χαρακτηριστικά που εξαρτώνται έντονα από το είδος και την απόδοση του εξαμμωτή, το είδος και την κατάσταση του αποχετευτικού συστήματος και την παρουσία βιομηχανικών αποβλήτων. Μια αντιπροσωπευτική τιμή ποσότητας άμμου είναι 30 l/m^3 λυμάτων.

Η αποθήκευση της άμμου γίνεται σε δοχεία, όμοια με αυτά των εσχαρισμάτων. Η τελική διάθεση της άμμου μπορεί να γίνει σε χωματερές ή σε δρόμους ως υλικό επίχωσης.



Εικόνα 2.6 Δεξαμενή εξάμμωσης – αφαίρεσης λιπών [13].

Σκοπός της λιποσυλλογής είναι η απομάκρυνση των ελαίων και των λιπών για την αποφυγή προβλημάτων στο στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας.

Τα λίπη που επιπλέουν στις επιφάνειες (λωρίδες) λιποσυλλογής οδηγούνται σε παρακείμενα φρεάτια λιπών με κατάλληλη διάταξη. Στο φρεάτιο συλλογής των λιπών γίνεται με κατάλληλα διάταξη σωλήνων «Τ» η απομάκρυνση των νερών, ενώ τα λίπη παραμένουν στην επιφάνεια και απομακρύνονται με απορρόφηση [20].

2.3.1.1.3 Μέτρηση παροχής

Σκοπός της μέτρησης παροχής είναι ο υπολογισμός της παροχής που διέρχεται από την ΕΕΑΑ, με βάση την οποία ρυθμίζεται η λειτουργία σημαντικών μονάδων.
Με το σήμα της παροχής ρυθμίζεται συνήθως η λειτουργία της διάταξης συλλογής, απομάκρυνσης και στράγγισης της άμμου του αεριζόμενου εξαμμωτή, των αντλιών ανακυκλοφορίας και των μονάδων που χρησιμοποιούν χημικά (π.χ. συνδυασμένη βιολογική – χημική απομάκρυνση φωσφόρου, απολύμανση κ.α.) [20].

2.3.1.1.4 Υποδοχή βοθρολυμάτων

Για τα βοθρολύματα απαιτείται ειδική διαχείριση. Η ύπαρξή τους είναι αναπόφευκτη καθώς το αποχετευτικό δίκτυο δεν είναι δυνατό να εξυπηρετήσει απομακρυσμένες κατοικίες. Τα βοθρολύματα φέρουν υψηλότερο ρυπαντικό φορτίο σε σχέση με τα υγρά απόβλητα που φτάνουν με τα δίκτυα αποχέτευσης. Μέσες μηνιαίες τιμές βοθρολυμάτων και ανεπεξέργαστης εισροής στο αποχετευτικό δίκτυο, για BOD_5 και SS δίδονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Μηνιαίες τιμές συγκεντρώσεων (mg/L) BOD_5 και SS μεταξύ αστικών και βοθρολυμάτων στην ΕΕΑΑ του Ηρακλείου [7].

	BOD_5			**SS**		
	Αστικά	**Βοθρολύματα**	**Διαφορά (%)**	**Αστικά**	**Βοθρολύματα**	**Διαφορά (%)**
Ιανουάριος	588	1898	323	360	2050	569
Φεβρουάριος	328	1741	531	314	2582	822
Μάρτιος	358	1835	513	186	1100	591
Απρίλιος	393	1400	356	277	853	308
Μάιος	447	1254	281	328	1433	437
Ιούνιος	450	1547	344	380	2119	558
Ιούλιος	445	1326	298	325	820	252
Αύγουστος	433	800	185	320	1140	356
Σεπτέμβριος	520	1202	231	485	1125	232
Οκτώβριος	502	894	178	600	700	117
Νοέμβριος	446	1196	268	399	986	247
Δεκέμβριος	375	528	141	260	915	352
Μέσες τιμές	**440**	**1302**	**296**	**353**	**1260**	**357**

Στον πίνακα 2.3 σημειώνονται και κάποια άλλα χαρακτηριστικά βοθρολυμάτων.

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά βοθρολυμάτων [20].

Παράμετρος	**Συγκέντρωση (mg/l)**	
	Όρια	**Τυπική τιμή**
BOD_5	2000-30000	6000
TS	4000-100000	40000
SS	2000-200000	15000
VSS	1200-14000	7000
Ολικό N	100-1600	700
NH_3-N	100-800	400
Ολικός P	50-800	250
Λίπη	5000-1000	8000
Βαρέα μέταλλα	100-1000	300

Σκοπός της υποδοχής βοθρολυμάτων είναι η παραλαβή των βοθρολυμάτων από τα βυτιοφόρα, η αποθήκευσή τους και η διοχέτευσή τους στην ΕΕΑΑ χωρίς να δημιουργούνται περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διαταραχές στη λειτουργία της ΕΕΑΑ.



Εικόνα 2.7 Μονάδα υποδοχής και προεπεξεργασίας βοθρολυμάτων [7].

Η διάταξη υποδοχής βοθρολυμάτων αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη [20]:

- Χώρος εκκένωσης των βοθρολυμάτων.

Αυτός πρέπει να είναι κοντά στα έργα προκαταρκτικής επεξεργασίας και να καταλαμβάνει ικανή έκταση, ώστε να πραγματοποιούνται με άνεση οι απαραίτητοι ελιγμοί των βυτιοφόρων. Συνιστάται στο χώρο αυτό να υπάρχει και διάταξη έκπλυσης.

- Φρεάτια υποδοχής

Πρέπει να έχουν διατάξεις στεγανής σύνδεσης με τις σωληνώσεις των βυτιοφόρων ώστε να εξασφαλίζεται η χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκκένωση των βυτιοφόρων.

- Δεξαμενή εξισορρόπησης βοθρολυμάτων

Σε αυτή καταλήγουν τα βοθρολύματα από τα φρεάτια υποδοχής. Πρέπει να είναι κλειστή για να μην εκλύονται οσμές, να έχει τοιχώματα που να μην επιτρέπουν την απόθεση στερεών σε αυτά και να διευκολύνουν την έκπλυσή τους με κατάλληλα ακροφύσια.

- Αντλίες βοθρολυμάτων

Χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση της ΕΕΑΑ με βοθρολύματα από τη δεξαμενή εξισορρόπησης.

2.3.1.2 Πρωτοβάθμια καθίζηση

Οι περισσότερες από τις αιωρούμενες ουσίες στα λύματα είναι μικρού μεγέθους και περνούν από τον εσχάρωση. Η συγκέντρωση και απομάκρυνσή τους επιτυγχάνεται μέσα στις δεξαμενές καθίζησης.
Τα στερεά καθιζάνουν λόγω βαρύτητας και το υγρό απομακρύνεται από τους υπερχειλιστές και οδηγείται στις δεξαμενές αερισμού.



Εικόνα 2.8 Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης [23].

2.3.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

2.3.2.1 Αερισμός

Βιολογική επεξεργασία - σύστημα ενεργού ιλύος

Ο βιολογικός καθαρισμός των λυμάτων ή πιο απλά η διαδικασία αποικοδόμησης των οργανικών και μετατροπή τους σε ανόργανα με τη βοήθεια αερόβιων βακτήριων, γίνεται με μια σειρά από βιολογικές αερόβιες διεργασίες μέσα σε βιολογικούς αντιδραστήρες, όπως μια δεξαμενή αερισμού.



Εικόνα 2.9 Δεξαμενή αερισμού [23].

Τα βακτήρια είναι απλά, άχρωμα, μονοκύτταρα φυτά που χρησιμοποιούν διαλυμένη τροφή και είναι ικανά για αυτό-αναπαραγωγή, χωρίς την παρουσία ηλιακού φωτός. Το μέγεθός τους κυμαίνεται μεταξύ του 0.5 και 5μm. και, επομένως, είναι ορατά μόνο με μικροσκόπιο. Αναπαράγονται με διπλή σχάση, δηλαδή ένα κύτταρο διαιρείται σε δύο νέα κύτταρα,. Καθένα από τα οποία ωριμάζει και διαιρείται εκ νέου. Η σχάση πραγματοποιείται κάθε 15 ως 30 λεπτά σε ιδανικό περιβάλλον όπου υπάρχει επαρκής τροφή, οξυγόνο και άλλα θρεπτικά [24].

Τα βακτήρια διακρίνονται σε δύο βασικές ομάδες, ετερότροφα και αυτότροφα, ανάλογα με την πηγή της τροφής τους. Τα ετερότροφα διακρίνονται, περαιτέρω, σε 3 ομάδες, ανάλογα με την αντίδρασή τους στο ελεύθερο οξυγόνο.

α) Τα αερόβια απαιτούν ελεύθερο διαλυμένο οξυγόνο για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης, προκειμένου να εξασφαλίσουν ενέργεια για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους.

β) Τα αναερόβια οξειδώνουν την οργανική ύλη, με πλήρη απουσία διαλυμένου οξυγόνου, χρησιμοποιώντας οξυγόνο δεσμευμένο σε άλλες ενώσεις όπως τα νιτρικά και φωσφορικά άλατα.

γ) Τα βακτήρια που είναι δυνατό να προσαρμόζονται σε διαφορετικές συνθήκες αποτελούν μια ομάδα που χρησιμοποιεί ελεύθερο διαλυμένο οξυγόνο, όταν αυτό είναι διαθέσιμο, αλλά που μπορούν επίσης να ζουν, απουσία αυτού, εξασφαλίζοντας ενέργεια από αναερόβιες διεργασίες [24].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο βιολογικός καθαρισμός των λυμάτων γίνεται από αερόβια βακτήρια.

Οι βιολογικές διεργασίες είναι μια σειρά αντιδράσεων όπου το προϊόν της μιας αντίδρασης είναι τροφή της επόμενης. Υπάρχει δηλαδή μια συνεχής σχέση κυνηγού και θηράματος για τους μικροοργανισμούς που παράγονται κατά τις βιολογικές δράσεις.

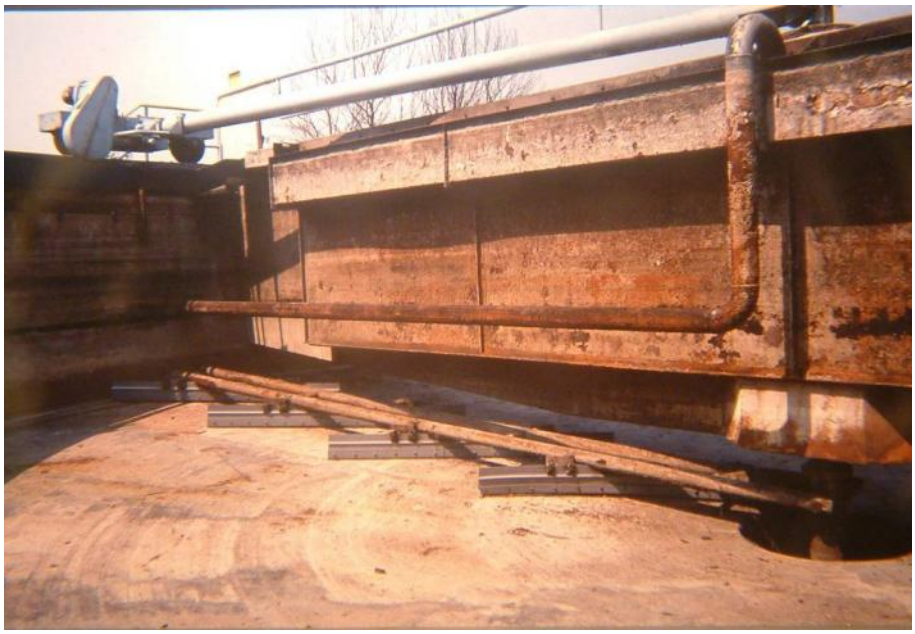
Εκτός όμως από τη δημιουργία βιομάζας η κατανάλωση της οργανικής ύλης που προέρχεται από τα λύματα αποθηκεύεται σαν ενέργεια στη βιομάζα, ενώ καταναλώνει οξυγόνο για να αναπνέει και να συντηρείται. Οι αντιδράσεις αυτές γίνονται συγχρόνως με αποτέλεσμα την αποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων και τη μετατροπή τους σε μη οχλούσες ανόργανες.

2.3.2.2 Δευτεροβάθμια καθίζηση

Το υγρό ανάμιξης των λυμάτων και της ανακυκλούμενης λάσπης μετά από τις δεξαμενές αερισμού μπαίνει στις δεξαμενές τελικής καθίζησης όπου η λάσπη κατακάθεται ενώ το εκρέον υγρό οδηγείται στις εγκαταστάσεις απολύμανσης, πριν καταλήξει στο φυσικό αποδέκτη. Σημαντική διαφορά των δεξαμενών πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης είναι ότι στις δεύτερες το φορτίο των αιωρούμενων στερεών (SS) είναι μικρότερο.



Εικόνα 2.10 Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης [13].



Εικόνα 2.11 Ξέστρα συλλογής ιλύος σε δεξαμενή καθίζησης [23].



Εικόνα 2.12 Διάταξη εισροής λυμάτων και απομάκρυνσης ιλύος σε δεξαμενή καθίζησης [23].

2.3.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Περιλαμβάνεται η απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου καθώς και η απολύμανση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων. Παρακάτω αναπτύσσεται μόνο η απολύμανση.

2.3.3.1 Απολύμανση

Σκοπός της απολύμανσης είναι η καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών (μ/ο), ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση ασθενειών με τα νερά του αποδέκτη, στα οποία διοχετεύονται τα απόβλητα. Οι συνηθέστερες μέθοδοι απολύμανσης είναι η χλωρίωση με υποχλωριώδες νάτριο, η χρήση όζοντος και η χρήση ακτινοβολίας UV [20].

2.3.3.1.1 Χλωρίωση – Αποχλωρίωση

Η χλωρίωση γίνεται συνήθως με υποχλωριώδες νάτριο (NaOCl) σε υγρή μορφή. Σήμερα γίνονται διάφορες προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης της χλωρίωσης, ώστε να αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη χρήση και σπατάλη του χλωρίου, το οποίο επιδρά δυσμενώς στο υδάτινο περιβάλλον που διοχετεύονται τα χλωριωμένα απόβλητα. Η επίδραση αυτή εκδηλώνεται άμεσα στις διάφορες μορφές ζωής (π.χ. ψάρια), εξαιτίας της τοξικότητας του χλωρίου ή έμμεσα με το σχηματισμό οργανοχλωριούχων ενώσεων, που πιθανολογείται ότι είναι καρκινογόνες. Στις προσπάθειες μείωσης του χλωρίου περιλαμβάνονται διάφορες τεχνικές, όπως η μέτρηση υπολειμματικού χλωρίου ή δραστικότερα μέτρα, όπως η αποχλωρίωση, η οποία γίνεται συνήθως με διοξείδιο του θείου και σπανιότερα με ενεργό άνθρακα.

Η επαφή του NaOCl με τα λύματα γίνεται στη δεξαμενή χλωρίωσης που καλείται και δεξαμενή επαφής. Η ΔΧΛ πρέπει να εξασφαλίζει τον απαραίτητο χρόνο επαφής με τα απόβλητα ($\Theta_{\Delta\Chi\Lambda}$), ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός βαθμός απομάκρυνσης των παθογόνων μ/ο. Συνήθως, για αστικά απόβλητα ο χρόνος παραμονής είναι $\Theta_{\Delta\Chi\Lambda}$ = 20-30 mins στην παροχή αιχμής και η μέση συγκέντρωση του χλωρίου στη ΔΧΛ είναι ίση με 5-8 mg/l.
Για την αποχλωρίωση δε χρειάζονται ειδικές δεξαμενές αφού οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα γίνονται σχεδόν ακαριαία [20].



Εικόνα 2.13 Δεξαμενή χλωρίωσης [13].

2.3.3.1.2 Απολύμανση με όζον

Το όζον έχει πολύ ισχυρότερη και ταχύτερη (300-3000 φορές) απολυμαντική και οξειδωτική δράση από το χλώριο για διάφορες τιμές θερμοκρασιών και pH, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει αποτελεσματικότερη καταστροφή των ιών. Είναι όμως ασταθές και έτσι έχει μικρή διάρκεια απολυμαντικής δράσης με αποτέλεσμα να μην αφήνει υπολειμματικό όζον, αλλά και να απαιτεί την παρουσία της εγκατάστασης παραγωγής του στην ΕΕΑΑ.

Κατά την απολύμανση με όζον δε δημιουργείται πρόβλημα τοξικότητας στον αποδέκτη που διοχετεύονται τα καθαρισμένα απόβλητα γιατί το υπολειμματικό όζον είναι ελάχιστο και διασπάται μέχρι τα επεξεργασμένα απόβλητα καταλήξουν στον αποδέκτη. Το ίδιο ισχύει και για τις ισχυρά ασταθείς τοξικές ουσίες, που είναι πιθανόν να δημιουργηθούν κατά την οζόνωση. Παράλληλα, εξαιτίας της ισχυρής οξειδωτικής του δράσης μειώνονται οι οσμές, η θολότητα και το χρώμα, αυξάνεται το διαλυμένο οξυγόνο (DO) του αποδέκτη και καταστρέφονται επικίνδυνες οργανικές ενώσεις, που τυχόν περιέχονται στα απόβλητα, όπως π.χ. το μαλαθίο.

Η οζόνωση εφαρμόζεται συνήθως σε απόβλητα που έχουν υποστεί νιτροποίηση, αλλά και διήθηση. Οι συγκεντρώσεις του όζοντος που συνιστώνται για την επίτευξη συγκεντρώσεων κολοβακτήριων 200, 70 και 2.2 ανά 100ml είναι αντίστοιχα 3-5, 5-10 και 15-20 mg/l [20].

2.3.3.1.3 Απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία UV

Η υπεριώδης (UV) ακτινοβολία διαπερνά την κυτταρική μεμβράνη των μ/ο και απορροφάται από τα κυτταρικά συστατικά τους (π.χ. τα DNA και RNA) εξοντώνοντάς τους ή καθιστώντας τους ανίκανους να πολλαπλασιαστούν. Η ακτινοβολία UV αποτελεί ένα φυσικό τρόπο απολύμανσης χωρίς να αναμένονται περιβαλλοντικές επιπτώσεις, γιατί δεν πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις.
Η μέθοδος αυτή βρίσκεται στα αρχικά βήματα της εφαρμογής της και έτσι είναι νωρίς να διατυπωθούν σαφή πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της.

Για να είναι αποδοτική η ακτινοβολία UV θα πρέπει να έχουν αφαιρεθεί σε υψηλά ποσοστά από τα απόβλητα τα αιωρούμενα στερεά, ώστε να μην παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής της ακτινοβολίας και των μ/ο και να λειτουργούν έτσι ως «ασπίδες των μ/ο». για το λόγο αυτό συνιστάται πριν την απολύμανση η διαδικασία της διύλισης για την απομάκρυνση – συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών που απέμειναν στα απόβλητα μετά τη βιολογική επεξεργασία. Τέλος, να σημειωθεί ότι ο απαιτούμενος χρόνος «επαφής» της ακτινοβολίας με τους μ/ο είναι συνήθως μικρότερος από 1min και η επαφή γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένη δεξαμενή [20].

2.3.4 Επεξεργασία της περίσσειας λάσπης

Σκοπός της επεξεργασίας της περίσσειας λάσπης είναι α) η μείωση του όγκου της για να μειωθεί το κόστος επεξεργασίας και διάθεσής της και β) η σταθεροποίησή της, δηλ. η μετατροπή της σε μια αδρανή (βιολογικά σταθερή) μάζα, ώστε η διάθεσή της στο περιβάλλον να είναι ακίνδυνη. Όταν η παραγόμενη λάσπη έχει μεγάλη ηλικία είναι σταθεροποιημένη, περιέχει ποσοστό οργανικών στερεών 50-60%, και δεν απαιτεί πρόσθετη σταθεροποίηση, αλλά μόνο μείωση του όγκου της που γίνεται με τις διεργασίες α) της πάχυνσης και β) της αφυδάτωσης [20].

2.3.4.1 Πάχυνση

Σκοποί της πάχυνσης είναι α) η μείωση του όγκου της απομακρύνοντας μέρος του νερού που περιέχει και β) η βελτίωση των χαρακτηριστικών της για να είναι περισσότερο αποτελεσματική η αφυδάτωσή της [20].



Εικόνα 2.14 Εγκατάσταση μηχανικής πάχυνσης λάσπης [13].

2.3.4.2 Αφυδάτωση

Σκοπός της αφυδάτωσης είναι είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών που περιέχει σε πολύ υψηλά επίπεδα (18-25%), ώστε να μεταφερθεί και να διατεθεί στο χώρο διάθεσης οικονομικότερα και ευκολότερα και χωρίς να προκαλεί ρύπανση του εδάφους, αν διατεθεί σε αυτό, εξαιτίας της αποστράγγισης [20].



Εικόνα 2.15 Εγκατάσταση αφυδάτωσης της λάσπης [23].

2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων τα οποία καθορίζουν τον σχεδιασμό μιας ΕΕΑΑ είναι τα ακόλουθα:

i. Παροχές
ii. Φυσικά χαρακτηριστικά
   - Στερεά συστατικά
   - Χρώμα
   - Οσμή
   - Θερμοκρασία
iii. Οργανικά συστατικά
iv. Άζωτο
v. Φώσφορος
vi. Παθογόνοι μικροοργανισμοί
vii. pH και αλκαλικότητα
viii. Άλλα χαρακτηριστικά
   - Χλωριούχα
   - Θείο
   - Βαρέα μέταλλα

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αυτά.

2.4.1 Παροχές

Διακρίνονται 5 είδη παροχών που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μιας ΕΕΑΑ [20].

1. Μέση ημερήσια παροχή (Q_m σε m^3/d), η οποία είναι ίση με τον όγκο των αποβλήτων που καταλήγει σε ένα έτος στην ΕΕΑΑ για επεξεργασία διαιρεμένο με 365.
2. Μέγιστη ημερήσια παροχή (Q_{max} σε m^3/d), η οποία είναι ίση με τη μέγιστη τιμή των ημερήσιων παροχών του έτους.
3. Ελάχιστη ημερήσια παροχή(Q_{min} σε m^3/d), η οποία είναι ίση με την ελάχιστη τιμή των ημερήσιων παροχών του έτους.
4. Μέγιστη ωριαία παροχή ή παροχή αιχμής (Q_h σε m^3/h),η οποία παρατηρείται κατά το 24ωρο της Q_{max}.
5. Ελάχιστη ωριαία παροχή (minQ σε m^3/h), οποία παρατηρείται κατά το 24ωρο της Q_{min}.

2.4.2 Φυσικά χαρακτηριστικά

2.4.2.1 Στερεά συστατικά

Τα ολικά στερεά συστατικά (Total Solids, TS) βρίσκονται αιωρημένα (αιωρούμενα στερεά-Suspended Solids, SS) ή διαλυμένα (διαλυμένα στερεά-Dissolved Solids, DS) στη μάζα των αποβλήτων και αποτελούνται από οργανικά (ή εξαερώσιμα) στερεά (Volatile Solids, VS) και ανόργανα (αδρανή, σταθερά ή μη εξαερώσιμα- Non-Volatile ή Fixed Solids- FS) στερεά.

Από άποψη ρύπανσης του υδάτινου περιβάλλοντος μεγάλη σημασία έχουν τα SS, γιατί αυτά είναι που είτε θα συνεχίσουν να αιωρούνται (ελαφρύτερα) είτε θα καθιζάνουν κάπου (βαρύτερα) σχηματίζοντας στρώμα λάσπης και ανεπιθύμητες αναερόβιες συνθήκες για το οικοσύστημα του φορέα. Τα DS προκαλούν θολότητα του υδάτινου αποδέκτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 40% των στερεών σε ένα μέσο νερό υπονόμου είναι αιωρούμενα στερεά [20].

2.4.2.2 Χρώμα

Το χρώμα είναι ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εκτιμήσουμε τη γενική κατάσταση των αποβλήτων. Αν το χρώμα είναι ανοιχτό καφέ, το νερό είναι λιγότερο από έξι ώρες παλιό. Ένα χρώμα ανοιχτό γκρι είναι χαρακτηριστικό των αποβλήτων που έχουν υποστεί κάποια αποσύνθεση, ή έχουν παραμείνει στο δίκτυο συλλογής για αρκετό χρόνο. Αν το χρώμα είναι σκούρο γκρι ή μαύρο, το νερό είναι τυπικά σηπτικό, έχοντας υποστεί εκτεταμένη βακτηριακή αποσύνθεση κάτω από αναερόβιες συνθήκες (απουσία οξυγόνου). Το μαύρο χρώμα του νερού οφείλεται συχνά στο σχηματισμό διαφόρων σουλφιδίων, ιδιαίτερα σουλφιδίων του σιδήρου. Αυτό οφείλεται στο σχηματισμό υδρόθειου, που παράγεται κάτω από αναερόβιες συνθήκες και ενώνεται με ένα δισθενές μέταλλο όπως ο σίδηρος [20].

2.4.2.3 Οσμή

Ο προσδιορισμός της οσμής έχει γίνει στις μέρες μας πολύ σημαντικός, καθώς το κοινό επηρεάζεται πολύ περισσότερο από αυτή παρά από τη σωστή λειτουργία των εγκαταστάσεων καθαρισμού. Η οσμή των φρέσκων λυμάτων συνήθως δεν είναι ενοχλητική, καθώς όμως αυτά αποσυντίθενται βιολογικά κάτω από αναερόβιες συνθήκες, ελευθερώνεται μια ποικιλία ενώσεων που έχουν διάφορες οσμές. Ειδική φροντίδα απαιτείται κατά το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων καθαρισμού, προκειμένου να αποφευχθούν οι συνθήκες που θα επιτρέψουν την ανάπτυξη οσμών [20].

2.4.2.4 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία των αποβλήτων είναι ένας σημαντικός παράγοντας του βιολογικού και χημικού χαρακτήρα τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει γρηγορότερη ανάπτυξη των μικροοργανισμών και κατά συνέπεια επιτάχυνση των βιοχημικών αντιδράσεων. Παράλληλα, επιφέρει και μείωση του βαθμού διαλυτότητας των αερίων (π.χ. του διαλυμένου οξυγόνου) στη μάζα των αποβλήτων.

Από άποψη ρύπανσης του περιβάλλοντος η διοχέτευση θερμών αποβλήτων σε ένα υδάτινο φορέα οδηγεί σε σοβαρή μείωση του διαλυμένου οξυγόνου του φορέα (τόσο εξαιτίας της μειωμένης διαλυτότητας του οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, όσο και εξαιτίας του αυξημένου ρυθμού κατανάλωσής του στις βιολογικές διεργασίες), αλλά και επιδρά αρνητικά στο οικοσύστημα του φορέα (θάνατος οργανισμών, ανάπτυξη ανεπιθύμητων οργανισμών).

Η θερμοκρασία των αποβλήτων είναι γενικά μεγαλύτερη από εκείνη του νερού ύδρευσης λόγω των θερμών αποβλήτων κατοικιών, βιομηχανιών κ.λ.π. και εξαρτάται από την περίοδο, καθώς και από τη γεωγραφική θέση. Στις ψυχρές περιοχές η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ των 7^o και των 18^oC., ενώ σε θερμότερες περιοχές μεταξύ των 13^o και των 24^oC [20].

2.4.3 Οργανικά συστατικά

Τα κυριότερα οργανικά συστατικά των αποβλήτων είναι τα ακόλουθα [20]:

i. Πρωτείνες: Είναι μακρομοριακές ασταθείς ενώσεις αποτελούμενες κυρίως από άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και άζωτο που αποσυντίθενται εύκολα από τους μικροοργανισμούς.

ii. Υδρογονάνθρακες: Περιέχουν άνθρακα, υδρογόνο και οξυγόνο. Ορισμένοι (ζάχαρες) διασπώνται εύκολα από μικροοργανισμούς, ενώ άλλοι (άμυλο) δυσκολότερα.

iii. Λιπίδια: Αποτελούν συστατικά των τροφών του ανθρώπου. Βρίσκονται και στα νερά των επιφανειακών απορροών από την έκπλυση των δρόμων (λάδια, πετρέλαια κ.λ.π.). Είναι ενώσεις που αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες, που δεν διαλύονται στη μάζα των αποβλήτων. Τα πιο σημαντικά λιπίδια είναι τα λάδια (υγρά λιπίδια) και τα λίπη (στερεά λιπίδια).

Η τυπική σύσταση των αποβλήτων είναι 40-60% πρωτείνες, 25-50% υδρογονάνθρακες και τα 10% λιπίδια.

iv. Επιφανειακά ενεργές ουσίες: Περιέχονται στα αστικά απόβλητα ως συστατικά των απορρυπαντικών, σαπουνιών κ.λ.π. Είναι μακρομοριακές ενώσεις διαλυτές στη μάζα των αποβλήτων και δρουν στη διαχωριστική επιφάνεια υγρού-αέρα δημιουργώντας αφρούς. Ορισμένες δεν διασπώνται από μικροοργανισμούς, ενώ άλλες είναι παράλληλα και τοξικές.

v. Φαινόλες (C_6H_5OH): Περιέχονται σε βιομηχανικά απόβλητα. Δεν διασπώνται από μικροοργανισμούς σε μεγάλες συγκεντρώσεις (>500mg/l).

vi. Εντομοκτόνα και φυτοφάρμακα: Είναι τοξικές ενώσεις επικίνδυνες για όλες τις μορφές ζωής και καταλήγουν στο αποχετευτικό σύστημα με τις απορροές γεωργικών περιοχών.

Από άποψη ρύπανσης του περιβάλλοντος, όταν οι οργανικές ουσίες διοχετευτούν σε ένα υδάτινο φορέα, οι μικροοργανισμοί που περιέχονται στα απόβλητα ή στο φορέα τις χρησιμοποιούν ως τροφή καταναλώνοντας παράλληλα το διαλυμένο οξυγόνο του φορέα. Όταν ο ρυθμός κατανάλωσης του διαλυμένου οξυγόνου ξεπεράσει την ικανότητα επανοξυγόνωσης του φορέα και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου γίνει μικρότερη από μια ορισμένη τιμή, ανατρέπεται η ισορροπία του οικοσυστήματος του φορέα με αποτέλεσμα το θάνατο ψαριών και τη δημιουργία σηπτικών συνθηκών. Η μείωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι λοιπόν η κύρια επίπτωση της διοχέτευσης οργανικών ουσιών στο περιβάλλον. Άλλα προβλήματα είναι η δημιουργία επιφανειακού αντιαισθητικού στρώματος από τα λιπίδια, το οποίο παράλληλα δυσκολεύει τη μεταφορά του οξυγόνου και του ηλιακού φωτός στο φορέα, η δημιουργία αφρών από τις επιφανειακά ενεργές ουσίες και ο άμεσος θάνατος οργανισμών από τις τοξικές ουσίες [20].

Η μέτρηση των οργανικών συστατικών των αποβλήτων είναι πρακτικά αδύνατη εξαιτίας της πολύπλοκης σύστασής τους. Έτσι, ως μέτρο των οργανικών συστατικών, αλλά και γενικότερα του ρυπαντικού φορτίου τους, χρησιμοποιείται η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να οξειδώσει πλήρως τα οργανικά συστατικά τους, που εκφράζεται συνήθως ως BOD ή COD.

Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand) ή BOD είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση των οργανικών συστατικών των αποβλήτων από μικροοργανισμούς (μ/ο) σε αερόβιες συνθήκες. Η οξείδωση αυτή δίνεται παραστατικά από την αντίδραση

$$\text{Οργ.ενώσεις} + O_2 + \mu/o \rightarrow \text{Νέοι } \mu/o + CO_2 + NH_3 + H_2O + \text{ενέργεια}$$

Η διαδικασία αυτή είναι σχετικά αργή και ολοκληρώνεται πρακτικά (οξείδωση σε τελικά προϊόντα 95 – 99%) σε 20 ημέρες, οπότε το προσδιοριζόμενο απαιτούμενο οξυγόνο καλείται τελικό BOD (BOD_L). Στη συνηθισμένη πρακτική έχει επικρατήσει ο προσδιορισμός του BOD στις 5 ημέρες (BOD_5), στις οποίες οξειδώνονται οι απλές οργανικές ουσίες που αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό 60 – 70% των συνολικών οργανικών ουσιών.

Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand) ή COD είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη χημική οξείδωση των οργανικών συστατικών των αποβλήτων σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, από ισχυρό οξειδωτικό μέσο (διχρωμικό κάλιο) σε όξινες συνθήκες.

2.4.4 Άζωτο

Το άζωτο είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ζώντων οργανισμών και περιέχεται στα αστικά απόβλητα στις παρακάτω μορφές [20]:

- Οργανικό άζωτο (πρωτείνες, ουρία και αμινοξέα)
- Αμμωνιακό άζωτο (αμμωνιακά άλατα ή αμμωνία)

Ως προϊόν οξείδωσης των προηγούμενων μορφών το άζωτο μπορεί να υπάρχει ως νιτρικά και νιτρώδη.

Οι κυριότερες μετατροπές που υφίστανται οι παραπάνω μορφές αζώτου κατά τη διοχέτευσή τους σε κάποιο υδάτινο φορέα ή στις μονάδες μιας ΕΕΑΑ είναι οι παρακάτω [20]:

i. Μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμωνιακό από αερόβια ή αναερόβια βακτήρια.
ii. Οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρώδη από ειδικά αερόβια-νιτροποιητικά βακτήρια (Nitrosomonas).
iii. Περαιτέρω οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά από ειδικά αερόβια-νιτροποιητικά βακτήρια (Nitrobacter).
iv. Αναγωγή των νιτρικών σε νιτρώδη και τελικά σε αέριο άζωτο από αερόβια-αναερόβια βακτήρια. Η αναγωγή γίνεται κυρίως σε αέριο άζωτο σε αναερόβιες συνθήκες και σε μικρό ποσοστό σε αμμωνία.

Οι μετατροπές (ii) και (iii) αποτελούν τη νιτροποίηση και η (iv) την απονιτροποίηση.

Από άποψη επίδρασης στο περιβάλλον η διοχέτευση αποβλήτων που περιέχουν αμμωνιακό άζωτο σε ένα υδάτινο φορέα δημιουργεί απαίτηση οξυγόνου για την οξείδωσή του σε νιτρώδη και νιτρικά. Επίσης, η αμμωνία είναι τοξική στα ψάρια, ενώ τα νιτρικά χρησιμοποιούνται από τα φύκια και διάφορα υδρόβια φυτά του φορέα για την ανάπτυξή τους. Έτσι, μεγάλες συγκεντρώσεις αζώτου σε υδάτινους φορείς σε συνδυασμό με την παρουσία φωσφόρου, μπορεί να οδηγήσουν σε κατάσταση που ευνοεί την υπερβολική ανάπτυξη των φυκιών και των διαφόρων υδρόβιων φυτών (ευτροφισμός), με αποτέλεσμα την έμφραξη του φορέα (π.χ. σε ποταμό), την εμφάνιση επιπλεόντων, την αύξηση της θολότητας, την αδυναμία χρήσης του νερού για ύδρευση, τη συσσώρευση φυκιών στις ακτές, τη δημιουργία αισθητικών προβλημάτων κ.λ.π. Το άζωτο εκφράζεται συνήθως ως οργανικό άζωτο ($N_{οργ}$), ως ολικό άζωτο (ολικό Ν ή ΤΚΝ) και ως νιτρικά (NO_3-N) ή νιτρώδη (NO_2-N) [20].

2.4.5 Φώσφορος

Ο φώσφορος είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ζώντων οργανισμών και περιέχεται στα απόβλητα στις παρακάτω μορφές [20]:

- Ανόργανος φώσφορος, κυρίως ως ορθοφωσφορικά (PO_4^{-3} , HPO_4^{-3} , $H_2PO_4^{-1}$) ή και ως πολυφωσφορικά (π.χ. $P_3O_{10}^{-5}$, $P_2O_7^{-4}$).
- Οργανικός φώσφορος, σε μικρότερες ποσότητες απ' ότι ο ανόργανος.

Τα πολυφωσφορικά σε υδατικό διάλυμα υδρολύονται σε ορθοφωσφορικά που μπορούν να καταναλωθούν απ' ευθείας από διάφορους μικροοργανισμούς. Η διοχέτευση αποβλήτων που περιέχουν φώσφορο σε ένα υδάτινο φορέα ευνοεί, σε συνδυασμό με την παρουσία αζώτου, το φαινόμενο του ευτροφισμού. Σημειώνεται ότι συχνά ο φώσφορος είναι ο καθοριστικός παράγοντας του φαινομένου του ευτροφισμού και έτσι η απομάκρυνσή του από τα απόβλητα έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία, ιδίως εξαιτίας της αυξανόμενης χρήσης του στην παραγωγή απορρυπαντικών. Ο φώσφορος εκφράζεται ως ολικός φώσφορος (οργανικός και ανόργανος) και ως ανόργανος φώσφορος (ορθοφωσφορικά και πολυφωσφορικά).

2.4.6 Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί περιέχονται στα αστικά απόβλητα ως προϊόντα αποβολών ασθενειών ή φορέων ασθενειών και μπορούν να μεταφέρουν και να προκαλέσουν ασθένειες μέσω του νερού στον άνθρωπο, όπως χολέρα, δυσεντερία, τυφοειδή πυρετό, ηπατίτιδα κ.λ.π. οι παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι κυρίως βακτήρια, αλλά και πρωτόζωα και ιοί [20].

2.4.7 pH και αλκαλικότητα

Το pH είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των αποβλήτων, από το οποίο εξαρτάται ένα πλήθος φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στο υδάτινο περιβάλλον. Οι αυξομειώσεις του μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις διεργασίες αυτές δημιουργώντας ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Η αλκαλικότητα οφείλεται στην παρουσία ιόντων HCO_3^- , CO_3^{-2} , ή OH^- , που βρίσκονται ενωμένα με τα Ca, Mg, Na ή K. Η παρουσία των παραπάνω ιόντων στα αστικά απόβλητα οφείλεται στο πόσιμο νερό και στις εισροές στο αποχετευτικό σύστημα [20].

2.4.8 Άλλα χαρακτηριστικά

2.4.8.1 Χλωριούχα

Περιέχονται στα αστικά απόβλητα από το πόσιμο νερό και τα ανθρώπινα απόβλητα, αλλά και σε ορισμένα βιομηχανικά απόβλητα. Η διοχέτευσή τους σε ένα υδάτινο φορέα οδηγεί στην ένωσή τους με ορισμένα οργανικά συστατικά. Το προϊόν της αντίδρασης αυτής είναι τοξικές ενώσεις που έχουν μακροπρόθεσμα αρνητικά αποτελέσματα στην ποιότητα των νερών του φορέα. Η παρουσία τους σε μεγάλες συγκεντρώσεις, και όταν το νερό του φορέα χρησιμοποιείται για ύδρευση, δίνει στο νερό υφάλμυρη γεύση [20].

2.4.8.2 Θείο

Το θείο είναι βασικό συστατικό των ζώντων οργανισμών και βρίσκεται στα αστικά απόβλητα σε διάφορες μορφές. Η σημαντικότερη από τις ενώσεις του θείου είναι τα θειϊκά, γιατί η παρουσία τους στα απόβλητα δημιουργεί προβλήματα που οφείλονται στο σχηματισμό υδρόθειου και θειϊκού οξέος. Σε αναερόβιες συνθήκες τα θειϊκά ανάγονται σε θειούχα και στη συνέχεια σε υδρόθειο και θειϊκό οξύ από ειδικά βακτήρια [20].

2.4.8.3 Βαρέα μέταλλα

Περιέχονται κυρίως στα βιομηχανικά, αλλά και στα αστικά απόβλητα (εξαιτίας του πόσιμου νερού). Διάφορα ιόντα, όπως π.χ. Cu, Pb, Cr, As, Bo, Ag, Ni, Mn, Cd, Zn, Fe, Hg, σε ορισμένες συγκεντρώσεις είναι τοξικά για διάφορους οργανισμούς, όπως και διάφορες οργανικές ενώσεις που περιέχονται σε εντομοκτόνα, φυτοφάρμακα κ.λ.π. Σημειώνεται πάντως ότι πολλά από τα παραπάνω ιόντα σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις όχι μόνο δεν είναι τοξικά, αλλά είναι και απαραίτητα για τη ζωή σημαντικών ειδών μικροοργανισμών. Η διοχέτευση βαρέων μετάλλων σε ένα οικοσύστημα (υδάτινος φορέας ή μονάδα βιολογικής επεξεργασίας) μπορεί να επιφέρει το θάνατο πολλών οργανισμών με τις ανάλογες συνέπειες [20].

2.5 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΛΑΣΠΗΣ – ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια μικρή αναφορά στις προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα επεξεργασμένα απόβλητα πριν τη διάθεσή τους στον τελικό αποδέκτη, καθώς και στη νομοθεσία που αφορά το περιβάλλον και ειδικότερα την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τη διάθεση των λυμάτων.

2.5.1 Χαρακτηριστικά επεξεργασμένων αποβλήτων και παραγόμενης λάσπης – Οδηγίες ΕΟΚ

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, σε ισχύ είναι η Οδηγία (19/3/92) για τον καθαρισμό των αστικών αποβλήτων, στην οποία προβλέπεται ότι θα πρέπει να εγκατασταθούν ΕΕΑΑ σε όλες τις πόλεις της Κοινότητας, την οποία εξέδωσε το Συμβούλιο Υπουργών Περιβάλλοντος της ΕΟΚ το 1992.

Συγκεκριμένα, προτείνεται η κατασκευή εγκατάστασης βιολογικού καθαρισμού σε όλες τις πόλεις με πληθυσμό μεγαλύτερο από 15000 κατοίκους μέχρι το 2000 και για τις μικρότερες μέχρι το 2005.

Όπως αναφέρει και η οδηγία της ΕΟΚ, μια ΕΕΑΑ χαρακτηρίζεται από το βαθμό καθαρισμού, ο οποίος καθορίζεται από το ποια βλαβερά συστατικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως απομακρύνει. Τα ογκώδη στερεά, η άμμος και τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται σχεδόν πάντα σε μια ΕΕΑΑ, οπότε ο καθαρισμός χαρακτηρίζεται ως πρωτοβάθμιος. Ο δευτεροβάθμιος ή συχνά αποκαλούμενος βιολογικός καθαρισμός αποσκοπεί στην απομάκρυνση και των οργανικών συστατικών και συχνά των παθογόνων μικροοργανισμών. Ο τριτοβάθμιος αφορά την απομάκρυνση και των θρεπτικών στοιχείων (φώσφορο και άζωτο) [20].

Τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων αποβλήτων και της παραγόμενης λάσπης για μια συγκεκριμένη ΕΕΑΑ καθορίζονται συνήθως από Οδηγίες ΕΟΚ, Νομαρχιακές Αποφάσεις, Προεδρικά Διατάγματα, ή άλλης μορφής νομοθετήματα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αποδέκτη των λυμάτων και της λάσπης. Ιδιαίτερη σημασία για τη χώρα μας έχει η Οδηγία 91/271 της ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, που αφορά τη συλλογή, την επεξεργασία και την απόρριψη αστικών λυμάτων και την επεξεργασία και την απόρριψη λυμάτων από ορισμένους βιομηχανικούς τομείς. Τα σημαντικότερα σημεία της Οδηγίας αυτής περιέχονται στα άρθρα 3, 4 και 5 και στα Παραρτήματα Ι και ΙΙ. Συνοπτικά αναφέρεται ότι για τη διάθεση λυμάτων σε «ευαίσθητες περιοχές» θα πρέπει να γίνεται και τριτοβάθμια επεξεργασία, ώστε τα επεξεργασμένα λύματα να πληρούν τις προδιαγραφές του πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 Προδιαγραφές επεξεργασμένων αποβλήτων για διάθεση σε «ευαίσθητες περιοχές» [20].

Παράμετρος	**Μέγιστη συγκέντρωση (mg/l)**
BOD_5	25
COD	125
SS	35
Ολικό-N	10 - 15
Ολικός-P	1 - 2

Όσον αφορά τη διάθεση της παραγόμενης λάσπης στο έδαφος, κυρίως για γεωργικούς σκοπούς, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Οδηγία 86/278 της ΕΟΚ, που καθορίζει μεταξύ των άλλων και οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στη λάσπη.

Κατά το σχεδιασμό μιας ΕΕΑΑ στην Ελλάδα ορίζονται συνήθως μέγιστες συγκεντρώσεις των χαρακτηριστικών στην εκροή της εγκατάστασης, κυρίως για τα BOD_5, COD, SS, Ολικό –N, ολικός –P και FC (ή TC), ενώ σπανιότερα (για διάθεση κυρίως σε αποδέκτες «πτωχούς» σε διαλυμένο οξυγόνο) επιβάλλεται μια ελάχιστη τιμή (π.χ. 70% της συγκέντρωσης κορεσμού) της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, που εξασφαλίζεται με φυσικό ή τεχνητό αερισμό.

Η παραγόμενη λάσπη θα πρέπει να είναι σταθεροποιημένη και αφυδατωμένη σε ποσοστό 18 - 22%.

2.5.2 Ελληνική νομοθεσία

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ο Νόμος 1650 της 15/16.10.86 «Για την προστασία του περιβάλλοντος».

Σκοπός του νόμου αυτού είναι «η θέσπιση θεμελιωδών κανόνων και η καθιέρωση κριτηρίων και μηχανισμών για την προστασία του περιβάλλοντος, έτσι ώστε ο άνθρωπος, ως άτομο και ως μέλος του κοινωνικού συνόλου, να ζει σε ένα υψηλής ποιότητας περιβάλλον, μέσα στο οποίο να προστατεύεται η υγεία του και να ευνοείται η ανάπτυξη της προσωπικότητάς του.
Η προστασία του περιβάλλοντος, θεμελιώδες και αναπόσπαστο μέρος της πολιτιστικής και αναπτυξιακής διαδικασίας και πολιτικής, υλοποιείται κύρια μέσα από το δημοκρατικό προγραμματισμό» [8].

Αναλυτικότερα μερικές από τις επιδιώξεις του παραπάνω νόμου είναι «η προστασία των επιφανειακών και υπόγειων νερών θεωρούμενων...», «η προστασία των ακτών των θαλασσών, των οχθών των ποταμών, των λιμνών, του βυθού αυτών και των νησίδων…» και «ο καθορισμός της επιθυμητής και της επιτρεπόμενης ποιότητας των φυσικών αποδεκτών καθώς και των κάθε είδους επιτρεπόμενων εκπομπών αποβλήτων, με την καθιέρωση και χρησιμοποίηση κατάλληλων παραμέτρων και οριακών τιμών, ώστε να μην προκαλείται υποβάθμιση του περιβάλλοντος…» [8].

Παρακάτω αναφέρονται και μερικές άλλες νομοθετικές διατάξεις μαζί με το αντίστοιχο ΦΕΚ και τι αφορούν [12, 16]:

(όπου, ΚΥΑ, κοινή υπουργική απόφαση – ΠΥΣ, πράξη υπουργικού συμβουλίου - ΥΑ, υπουργική απόφαση – Ν., νόμος – ΠΔ, προεδρικό διάταγμα)

- ΚΥΑ 5673/400/97 (ΦΕΚ 192Β) - Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων.

Ειδικές διατάξεις για την επεξεργασία αστικών λυμάτων. Επίσης αφορά ορισμένα βιομηχανικά απόβλητα που περιέχουν κυρίως οργανικό φορτίο και τα οποία μπορούν να διοχετευτούν σε αποχετευτικά δίκτυα και σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων, αφού προηγουμένως έχουν υποβληθεί σε προκαταρκτική επεξεργασία.

- Υγειονομική Διάταξη Ε1β 221/65 (ΦΕΚ 138/Β) - Περί διαθέσεως λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων», όπως τροποποιήθηκε με την Υ.Α. Γ1/17831/71 (ΦΕΚ 986/Β) και Υ.Α. Γ4/1305/74 (ΦΕΚ 801/Β).

Περιέχει στις διατάξεις του ορισμούς για τα απόβλητα και την διάθεση αλλά και τα επιτρεπόμενα όρια σε τοξικά και άλλους ρύπους, μικροοργανισμούς, pH κ.α.

- ΚΥΑ 55648/2210/91 (ΦΕΚ 323Β) - Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος και ειδικότερα καθορισμός οριακών τιμών και επικίνδυνων ουσιών στα υγρά απόβλητα

Στο παράρτημα του νομοθετήματος περιέχονται τα επιτρεπόμενα όρια για την παραγωγή και διάθεση συγκεκριμένων επικίνδυνων ρύπων καθώς και ορισμοί.

- ΠΥΣ 144/87 (ΦΕΚ 197/Α) – Προστασία υδάτινου περιβάλλοντος από τη ρύπανση που προκαλείται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που εκχέονται σε αυτό και ειδικότερα καθορισμός οριακών τιμών ποιότητας του νερού σε κάδμιο, υδράργυρο και εξαχλωροκυκλοεξάνιο.

Εφαρμόζεται για την διάθεση υγρών ρύπων στα εσωτερικά επιφανειακά και εσωτερικά παράκτια ύδατα και αφορά σε συγκεκριμένες ενώσεις που δίνονται στο παράρτημα.

- ΚΥΑ 18186/271/88 (ΦΕΚ 126/Β) - Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος και ειδικότερα καθορισμός οριακών τιμών των επικινδύνων ουσιών στα υγρά απόβλητα.

Αφορά κυρίως χημικές βιομηχανίες που διαθέτουν υγρά απόβλητα τα οποία περιέχουν τους αναφερόμενους επικίνδυνους ρύπους σε εσωτερικά επιφανειακά και παράκτια ύδατα.

- ΚΥΑ 26857/553/88 (ΦΕΚ 196/Β) - Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία των υπόγειων νερών από απόρριψη επικίνδυνων ουσιών.

Αφορά όλες τις απορρίψεις επικίνδυνων ουσιών και των ενώσεών τους. Εξαιρούνται οι εγκαταστάσεις των οποίων έχει εγκριθεί η μελέτη περιβαλλοντικών όρων.

- Ν. 743/77 (ΦΕΚ 319/Α) - Περί προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος και ρυθμίσεις συναφών θεμάτων.

Γενικές διατάξεις για την προστασία της θάλασσας από απορρίψεις απορριμμάτων, διάθεση αποβλήτων και αντιμετώπιση ατυχημάτων.

- ΠΥΣ 2/1-2-2001 (ΦΕΚ 15/ 2001) - Καθορισμός των κατευθυντήριων και οριακών τιμών ποιότητας των νερών από απορρίψεις ορισμένων επικίνδυνων ουσιών που υπάγονται στον Κατάλογο ΙΙ της οδηγίας 76/464/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 4ης Μαΐου 1976.

Εναρμόνιση της ελληνικής με την κοινοτική νομοθεσία για ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που αναγράφονται στο παράρτημα της ΠΥΣ. Αφορά οποιαδήποτε εγκατάσταση χρησιμοποιεί υδάτινο αποδέκτη για τη διοχέτευση των υγρών αποβλήτων που προκύπτουν από την παραγωγική δραστηριότητα.

- ΠΔ 55 (ΦΕΚ 58Α/20-3-98) - Προστασία του Θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Σε περίπτωση ρύπανσης ακτών από παραγωγικές δραστηριότητες, εφαρμόζεται ο συγκεκριμένος νόμος.

- ΚΥΑ 805668/4225/91 (ΦΕΚ 641Β/1991) - Μέθοδοι, όροι και περιορισμοί για την χρησιμοποίηση στην γεωργία της ιλύος που προέρχεται από την επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων.

Να σημειωθεί ότι υπάρχει και μια σειρά από ΥΑ, ΠΔ και νομαρχιακές αποφάσεις που περιέχουν ειδικές διατάξεις που αφορούν την διάθεση αποβλήτων και ανώτατα όρια ρύπων σε συγκεκριμένους αποδέκτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Κινητική Μικροβιακής Ανάπτυξης

3.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ

3.1.1 Σκοπός

Η μέθοδος της ενεργού ιλύος, ΕΙ, είναι η περισσότερο διαδεδομένη σήμερα μέθοδος επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ένα αριθμό παραλλαγών που παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και κάθε φορά επιλέγεται, με βάση τις ιδιαιτερότητες κάθε έργου, η καταλληλότερη.

Ο σκοπός του συστήματος ΕΙ, είναι η απομάκρυνση των διαλυμένων οργανικών ουσιών των αποβλήτων με βιοχημικές διαδικασίες.

Οι κύριες συνιστώσες ενός συστήματος ΕΙ είναι [20]:
α) Βιολογικός αντιδραστήρας, ΒΑ, που είναι κυρίως η δεξαμενή αερισμού, ΔΑ, όπου οι μικροοργανισμοί, μ/ο, που βρίσκονται σε αιώρηση αναπτύσσονται καταναλώνοντας τα συστατικά των αποβλήτων (π.χ. οργανικές ουσίες, αμμωνία) και
β) Δεξαμενή καθίζησης, ΔΚ, όπου καθιζάνουν και διαχωρίζονται οι μ/ο από τα υγρά απόβλητα.

Η βασική ιδέα της μεθόδου στηρίζεται στην επιστροφή της βιομάζας από τον πυθμένα της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης, ΔΚ, στην δεξαμενή αερισμού (σχήμα 3.1), ΔΑ, με στόχο τη διατήρηση υψηλής συγκέντρωσης μ/ο στη ΔΑ. Η συγκέντρωση των μ/ο στη ΔΑ είναι μια λειτουργική παράμετρος ελέγχου, η οποία επιτρέπει τη ρύθμιση της λειτουργίας της διεργασίας. Έτσι, η ελεγχόμενη αυξομείωση της συγκέντρωσης των μ/ο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτυγχάνεται απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες εισόδου. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός συστήματος ΕΙ.

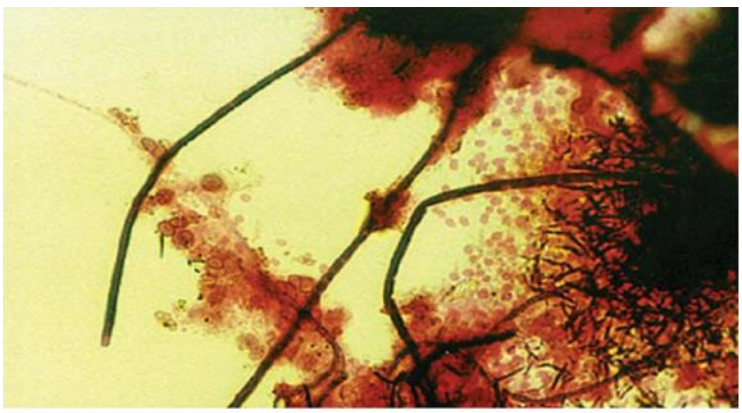


Σχήμα 3.1 Σχηματική διάταξη συστήματος ενεργού ιλύος [20].

3.1.2 Μικροβιακός πληθυσμός στις εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος

Το περιεχόμενο ενός ΒΑ ΕΙ είναι ένα αιώρημα ενεργής βιομάζας (ενεργός ιλύς) από συσσωματωμένες κροκίδες από μ/ο (κυρίως από ετερότροφα βακτήρια, ζωντανά ή νεκρά), νερό, αδρανή στερεά (που δεν συμμετέχουν στις βιολογικές διεργασίες), βιοδιασπάσιμα ή μη βιοδιασπάσιμα, διαλυμένα, αιωρούμενα και κολλοειδή συστατικά. Συνυπάρχουν ακόμα τα φύκη, οι μύκητες, τα πρωτόζωα, μερικές φορές τα νηματώδη και τα ροτίφερα. Η κατανάλωση της οργανικής ύλης και η δημιουργία βιολογικών συσσωματωμάτων οφείλεται κυρίως στα βακτήρια.

Τα βακτήρια (εικόνα 3.1) είναι απλοί μονοκύτταροι προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί με μικρό μέγεθος της τάξης του 1μm που περικλείονται από κυτταρικό τοίχωμα ή από μία εξωτερική μεμβράνη. Αναπαράγονται με διχοτόμηση, δηλ. το κύτταρο μεγαλώνει και μετά χωρίζεται σε δύο ίσα κύτταρα.



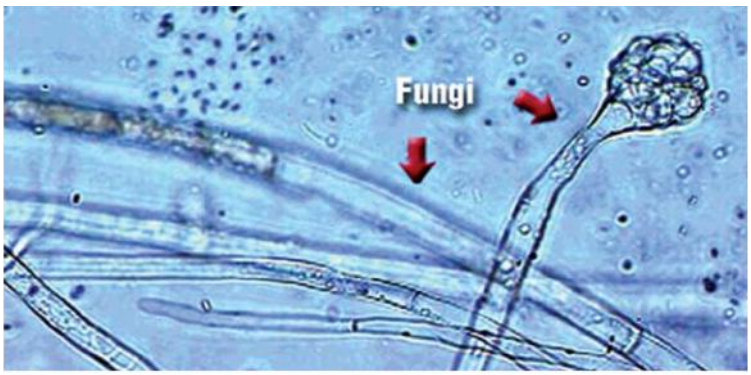
Εικόνα 3.1 Βακτήρια [17].

Τα σημαντικότερα είδη βακτήριων που υπάρχουν σε ένα σύστημα ΕΙ είναι τα Acinetobacter, Arthrobacter, Achromobacter, Alkaligenes, Bacillus, Citromonas, Chromobacterium, Flavobacterium, Flexibacter, Micrococcus, Pseudomonas, Zooglea και τα νιτροποιητικά βακτήρια Nitrosomonas και Nitrobacter. Άλλα είδη βακτήριων που συναντώνται λιγότερο συχνά είναι τα θειοβακτήρια Beggiatoa και Thiotrix και τα νηματοειδή Sphaerotilus, Haliscomenobacter, Microthrix και Nostocoida (που δημιουργούν προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος ΕΙ, όπως δύσκολη καθίζηση της βιομάζας στη ΔΔΚ και τη δημιουργία αφρών στην επιφάνεια των ΔΚ) [20].

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χημική σύσταση των οργανικών ουσιών που περιέχονται στα απόνερα επηρεάζει την οικολογική ισορροπία του αντιδραστήρα, και καθορίζει πολλές φορές την υπέρμετρη ανάπτυξη ορισμένων βακτηριακών ειδών σε βάρος άλλων. Η υψηλή συγκέντρωση λευκωμάτων, για παράδειγμα, ευνοεί την επικράτηση των Alcalingenes, Flavobacterium και των Bacillus. Η υψηλή συγκέντρωση σακχάρων ευνοεί την ανάπτυξη των Pseudomonas και η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, DO, όταν είναι χαμηλή η συγκέντρωση της οργανικής ύλης, ευνοεί την ανάπτυξη των Nitrosomonas και των Nitrobacter [10].

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας των βιολογικών αντιδραστήρων που λειτουργούν με ενεργό ιλύ, η παρουσία φυκών και μυκήτων είναι τυχαίο και

ανεπιθύμητο περιστατικό. Τα φύκη, αν και δεν προκαλούν βλάβες στη βιολογική ισορροπία, με την υπέρμετρη ανάπτυξη που παρουσιάζουν συγκεντρώνονται στα τοιχώματα του αντιδραστήρα και απαιτούν για να απομακρυνθούν την επέμβαση προσωπικού. Οι μύκητες, αντίθετα, επηρεάζουν τις μικροβιολογικές διεργασίες γιατί σχηματίζουν ινώδεις μορφές. Παρεμποδίζεται έτσι και ο σχηματισμός των συσσωματωμάτων των μ/ο και δυσχεραίνεται η καθίζηση της βιομάζας στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Όταν σε έναν αντιδραστήρα υπερισχύουν οι πληθυσμοί μυκήτων αυτό οφείλεται συνήθως σε υψηλή συγκέντρωση στα απόβλητα υδατανθράκων, προϊόντων σύνθεσης, σε χαμηλό πεδίο ροής και σε τροφικές πενίες (κυρίως αζώτου) [10].



Εικόνα 3.2 Μύκητες [17].

Τα πρωτόζωα, παρόλο που δε συμμετέχουν αποφασιστικά στην αποικοδόμηση του ρυπαντικού φορτίου, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική διαύγαση του νερού, αφού «συλλαμβάνουν» ελεύθερα βακτήρια, αποικίες και άλλα αιωρούμενα σωματίδια. Στην τροφική αλυσίδα του βιολογικού αντιδραστήρα, τα πρωτόζωα κατέχουν θέση ανώτερου καταναλωτή. Δεν μπορούν να τραφούν από διαλυμένη οργανική ουσία, αλλά μόνο από οργανισμούς ή βιολογικά υλικά. Τα πρωτόζωα που συναντώνται συχνότερα είναι: Vorticella, Opercularia και Epistylis [10].



Εικόνα 3.3 Πρωτόζωα [17].

Τα ροτίφερα δεν έχουν συνήθως σημαντική αριθμητική παρουσία στους βιολογικούς αντιδραστήρες, εκτός των περιπτώσεων όπου το μείγμα είναι πολύ καλά αερισμένο και αρκετά σταθερές οι συνθήκες ισορροπίας της βιομάζας. Τα ροτίφερα τρέφονται από σχετικά μεγάλα συσσωματώματα οργανικής ύλης και τα βιοσυσσωματώματα της ενεργού ιλύος [10].



Εικόνα 3.4 Ροτίφερα [17].

Οι μικροβιακοί πληθυσμοί στους βιολογικούς αντιδραστήρες, που επεξεργάζονται απόβλητα, μεταβάλλονται σε συνάρτηση και με την ηλικία της βιομάζας, δηλαδή του χρόνου που τα βιοσυσσωματώματα παραμένουν στον αντιδραστήρα. Ταξινόμηση και αρίθμηση του μικροβιακού πληθυσμού επιτρέπει εκτίμηση της ποιότητας της βιομάζας ως προς την απορρυπαντική της ικανότητα και τις ιδιότητές της προς διαχωρισμό κατά τη φάση της επεξεργασίας στη δεξαμενή καθίζησης [10].

Θεωρητικά, από χημικής άποψης η βιομάζα αποτελείται από κύτταρα που μπορεί να παρασταθούν με τον τύπο $C_5H_7NO_2$, σύμφωνα με τον οποίο τα κύτταρα αποτελούνται από 60/113=53.1% άνθρακα, 7/113=6.2% υδρογόνο, 14/113=12.4% άζωτο και 32/113=28.3% οξυγόνο. Από πρακτικής άποψης το ξηρό μέρος του αιωρήματος της βιομάζας αποτελείται τυπικά από 70-90% οργανικά στερεά (CHONP) και 10-30% ανόργανα στερεά όπως K, Na, Mg, Ca, Fe και άλλα ιχνοστοιχεία [20].

3.1.3 Ανάπτυξη μικροοργανισμών

Για την ανάπτυξή τους οι μ/ο χρειάζονται [20]:

α) Πηγή άνθρακα για τη σύνθεση νέων κυττάρων. Οι πιο συνηθισμένες πηγές άνθρακα είναι οι οργανικές ενώσεις (οργανοτροφικοί ή ετεροτροφικοί μ/ο) ή το διοξείδιο του άνθρακα, CO_2, (αυτοτροφικοί μ/ο). Η μετατροπή του CO_2 σε κυτταρική μάζα είναι μια διαδικασία αναγωγής που απαιτεί ενέργεια. Έτσι, οι αυτοτροφικοί μ/ο χρησιμοποιούν την περισσότερη από την ενέργεια που τους διατίθεται για σύνθεση νέων κυττάρων με αποτέλεσμα να έχουν αργότερους ρυθμούς ανάπτυξης απ' ότι οι ετεροτροφικοί.

β) Πηγή ενέργειας για τη σύνθεση νέων κυττάρων. Αυτή μπορεί να προέρχεται από μια χημική αντίδραση οξείδωσης (χημικοτροφικοί μ/ο) ή και το φως (φωτοτροφικοί μ/ο). Οι χημικοτροφικοί μ/ο μπορεί να είναι αυτοτροφικοί (όπως τα νιτροποιητικά βακτήρια) ή ετεροτροφικοί (όπως τα περισσότερα βακτήρια, τα πρωτόζωα και οι μύκητες). Όμοια, οι φωτοτροφικοί μ/ο μπορεί να είναι αυτοτροφικοί (άλγη και φωτοσυνθετικά βακτήρια) ή ετεροτροφικοί (ορισμένα θειοβακτήρια).

γ) Θρεπτικά συστατικά για τη σύνθεση των κυττάρων τους, που βρίσκονται στη βιομάζα τους σε σχετικά μεγάλες ποσότητες (όπως π.χ.C, O, H, N, P) ή σε μικρές ποσότητες (όπως π.χ. Fe, Ca, Mg, K).
Οι μ/ο έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν στη μάζα τους ενώσεις πλούσιες σε ενέργεια, άνθρακα και θρεπτικά συστατικά. Τις ενώσεις αυτές τις χρησιμοποιούν για να αναπτυχθούν σε περιόδους που αυτό ευνοείται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες ή και για να επιζήσουν σε περιόδους ανεπάρκειας πηγών ενέργειας, άνθρακα και θρεπτικών χρησιμοποιώντας τις ως εσωτερικές πηγές (ενδογενής μεταβολισμός).

δ) Πηγή οξυγόνου, ως αποδέκτη ηλεκτρονίων και ως θρεπτικό συστατικό. Σε αερόβιες συνθήκες, που έχουμε εδώ, πηγή οξυγόνου είναι το διαλυμένο οξυγόνο.

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των βακτήριων παίζουν και άλλοι παράγοντες, όπως π.χ. η θερμοκρασία και το pH. Τα κύτταρα μεγαλώνουν γρηγορότερα όταν η θερμοκρασία αυξάνεται. Υπάρχει όμως μια ελάχιστη καθώς και μια μέγιστη θερμοκρασία οι οποίες καθορίζουν το εύρος στο οποίο οι μ/ο μπορούν να επιτελέσουν τις λειτουργίες τους. Γενικά οι μ/ο μπορούν να αναπτυχθούν μεταξύ 30-40^{o}C. Όσον αφορά το pH οι περισσότεροι μ/ο αναπτύσσονται μεταξύ των τιμών 5 και 9.

Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών οδηγεί σε αύξηση του αριθμού τους όταν τα κύτταρα πολλαπλασιάζονται με διαίρεση. Στην περίπτωση αυτή τα κύτταρα αυξάνουν σε μέγεθος και διαιρούνται σε δύο θυγατρικά κύτταρα περίπου ίσου μεγέθους. Η μελέτη της ανάπτυξης των κυττάρων λοιπόν δεν ακολουθεί την παρακολούθηση του μεγέθους τους (λόγο του μικρού τους μεγέθους), αλλά την παρακολούθηση της αύξησης του αριθμού τους.

3.1.4 Δράσεις μικροοργανισμών

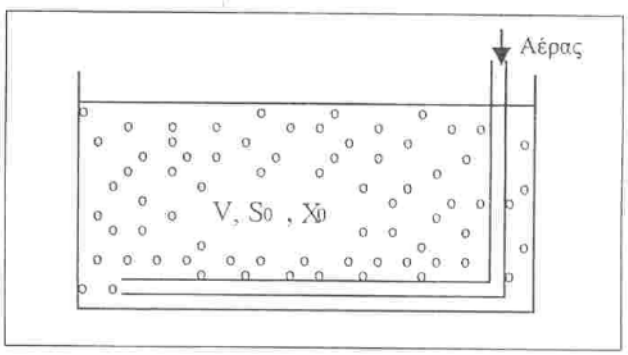
Οι κυριότερες δράσεις που πραγματοποιούν οι μ/ο είναι [20]:

α) Ταχεία πρόσληψη μικρών οργανικών μορίων και βραχυπρόθεσμη αποθήκευσή τους στα κύτταρα. Τα μόρια αυτά θα χρησιμοποιηθούν από τους μ/ο ως πηγή ενέργειας σε ιδανικές εξωτερικές συνθήκες, δηλ. όταν βρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις.
β) Βραδεία πρόσληψη μεγάλων οργανικών μορίων (πολυσακχαχαρίτες, λιπίδια, πολυφωσφορικά).
γ) Ταχεία προσρόφηση κολλοειδών και αιωρούμενων ουσιών των αποβλήτων στη βιομάζα και στη συνέχεια αργή χρησιμοποίησή τους ως τροφή (υδρόλυση).
δ) Ανάπτυξη και φθορά των κυττάρων των μ/ο.

3.2 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι μ/ο αυξάνονται με την κατανάλωση οργανικών ενώσεων και θρεπτικών συστατικών. Η κατανόηση των διεργασιών αύξησης της βιομάζας είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των ΕΕΑΑ. Παράμετροι όπως το βάρος της παραγόμενης βιομάζας ανά μονάδα μάζας υποστρώματος, η ηλικία βιομάζας, η ταχύτητα θανάτου των μ/ο είναι σημαντικές για τον σχεδιασμό των ΕΕΑΑ.

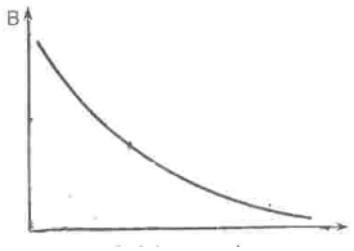
3.2.1 Συστήματα ασυνεχούς τροφοδοσίας



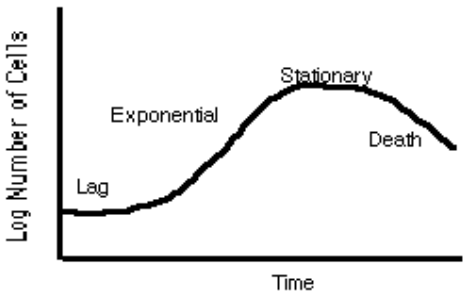
Σχήμα 3.2 Δοχείο ασυνεχούς λειτουργίας – Περιορισμένο υπόστρωμα [15].

Η παρακολούθηση της ανάπτυξης των μικροοργανισμών γίνεται μέσω της καμπύλης ανάπτυξης της μικροβιακής καλλιέργειας. Όταν οι μικροοργανισμοί καλλιεργούνται σε υγρά θρεπτικά μέσα, συνήθως σε κλειστά συστήματα ασυνεχούς λειτουργίας (batch cultures),το οποίο παριστάνεται στο σχήμα 3.2, δεν υπάρχει προσθήκη νέου θρεπτικού μέσου. Θεωρούμε δηλαδή ότι στη ΔΑ διοχετεύονται απόβλητα για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα που περιέχουν ένα μόνο είδος μ/ο

και οργανικές ουσίες άμεσα βιοδιασπάσιμες από τους μ/ο. Παροχή οξυγόνου υπάρχει διαρκώς ώστε να μην δημιουργηθεί έλλειψή του που θα εμποδίσει τη βιολογική δράση των αερόβιων μ/ο. Έτσι λοιπόν, η συγκέντρωση των θρεπτικών μειώνεται (σχήμα 3.3), ενώ η συγκέντρωση των προϊόντων μεταβολισμού αυξάνει (σχήμα 3.4). Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών που πολλαπλασιάζονται με κυτταρική διαίρεση μπορεί να παρασταθεί ως ο λογάριθμος του αριθμού των κυττάρων σε σχέση με τον χρόνο. Η μορφή της καμπύλης που προκύπτει έχει τέσσερις διακριτές περιοχές [14, 20].



Σχήμα 3.3 Καμπύλη (Β) μεταβολής συγκέντρωσης τροφής (υποστρώματος) [20].



Σχήμα 3.4 Καμπύλη (Χ) αύξησης βακτήριων σε περιορισμένο υπόστρωμα (κλειστό σύστημα ασυνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα- batch cultures) [1].

(α) <u>Φάση προσαρμογής (Lag phase)</u>

Όταν οι μικροοργανισμοί προστίθενται σε νέο θρεπτικό μέσο, συνήθως δεν παρατηρείται αύξηση του αριθμού τους για κάποιο χρονικό διάστημα. Το στάδιο αυτό ονομάζεται φάση προσαρμογής. Αν και τα κύτταρα στην φάση αυτή δεν διαιρούνται και δεν υπάρχει καθαρή αύξηση της κυτταρικής τους μάζας, τα κύτταρα συνθέτουν νέα συστατικά Το στάδιο αυτό πριν την έναρξη της διαδικασίας διαίρεσης των κυττάρων είναι απαραίτητο για διάφορους λόγους, όπως για παράδειγμα η προσαρμογή στην διαφορετική σύσταση του θρεπτικού μέσου καλλιέργειας, η ανάγκη ανάπτυξης ενζύμων για τον μεταβολισμό των θρεπτικών κλπ. Η διάρκεια της φάσης προσαρμογής, εξαρτάται από την «κατάσταση» στην οποία βρίσκονται τα κύτταρα, την φύση και την θερμοκρασία του θρεπτικού μέσου κλπ [14].

(β) Φάση εκθετικής ανάπτυξης (Exponential phase)

Κατά την διάρκεια της εκθετικής φάσης ανάπτυξης οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται και πολλαπλασιάζονται με έναν μέγιστο σταθερό ρυθμό ανάπτυξης σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Επειδή κάθε κύτταρο διαιρείται σε διαφορετική χρονική στιγμή η μορφή της καμπύλης ανάπτυξης είναι ομαλή χωρίς να παρατηρείται απότομη βηματική αύξηση [14].

(γ) Φάση στασιμότητας (Stationary phase)

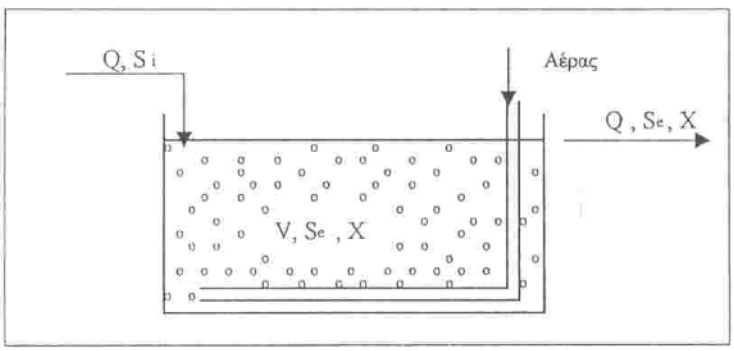
Μετά το πέρας της εκθετικής φάσης η ανάπτυξη των κυττάρων σταματά και η καμπύλη ανάπτυξης γίνεται οριζόντια. Στην φάση στασιμότητας ο πληθυσμός των ζωντανών κυττάρων παραμένει σταθερός με εξισορρόπηση των ρυθμών ανάπτυξης και θανάτου. Η φάση στασιμότητας παρατηρείται στην βακτηριακή ανάπτυξη όταν ο πληθυσμός των κύτταρων είναι περίπου 109 ανά mL ενώ στα πρωτόζωα και στα φύκη η τιμή αυτή φθάνει περίπου 106 ανά mL.

Ο μικροβιακός πληθυσμός εισέρχεται στην φάση στασιμότητας για διαφόρους λόγους. Ένας προφανής λόγος είναι η έλλειψη των θρεπτικών από το μέσο καλλιέργειας ή η μείωση ενός σημαντικού θρεπτικού παράγοντα. Στις περιπτώσεις αερόβιας καλλιέργειας το διαλυμένο οξυγόνο είναι ο περιοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης διότι το οξυγόνο έχει χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και δεν επαρκεί για να διατηρήσει την μικροβιακή καλλιέργεια σε ρυθμούς εκθετικής ανάπτυξης. Η ανάπτυξη των κυττάρων δύναται επίσης να σταματήσει λόγω της συσσώρευσης «τοξικών» μεταβολικών προϊόντων στο μέσο ανάπτυξης [14].

(δ) Φάση θανάτου, απόπτωσης (Death phase)

Η μείωση των θρεπτικών παραγόντων και η αύξηση των «τοξικών» συστατικών στο μέσο ανάπτυξης οδηγούν την καλλιέργεια στη φάση θανάτου. Ο θάνατος των κυττάρων όπως και η ανάπτυξη είναι συνήθως λογαριθμική δηλαδή σταθερό ποσοστό κυττάρων νεκρώνεται κάθε ώρα. Αυτή η σχέση ισχύει ακόμη και όταν ο συνολικός αριθμός των κυττάρων παραμένει σταθερός εξαιτίας της μη λύσης των νεκρών κυττάρων [14].

3.2.2 Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας



Σχήμα 3.5 Σύστημα συνεχούς καλλιέργειας πλήρους ανάμιξης – Απεριόριστο υπόστρωμα [15].

Τα συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα (continuous culture) είναι ένας εναλλακτικός τρόπος ανάπτυξης μικροβίων. Διαφέρει από ένα σύστημα ασυνεχούς τροφοδοσίας (batch culture) στο ότι είναι ένα ανοιχτό σύστημα το οποίο τροφοδοτείται συνεχώς με υπόστρωμα και ο όγκος της τροφοδοσίας είναι ίσος με την υπερχείλιση. Σε αυτό το σύστημα τα κύτταρα θα αυξάνονται εκθετικά για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Στην πράξη εφαρμόζονται συνήθως συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας, αφού η εισροή αποβλήτων στη ΔΑ γίνεται με συνεχή ρυθμό, ενώ παράλληλα υπάρχουν πολυάριθμα είδη μ/ο για τα οποία μπορεί να κατασκευαστούν αντίστοιχες καμπύλες ανάπτυξης. Για την ικανοποιητική περιγραφή του συστήματος ΕΙ, μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει μια αντιπροσωπευτική καμπύλη ανάπτυξης για τους μ/ο και μια καμπύλη κατανάλωσης της τροφής από τους μ/ο που κυριαρχούν στο σύστημα της ΕΙ. Στη μαθηματική περιγραφή των καμπυλών αυτών στηρίζεται ο θεωρητικός σχεδιασμός ενός συστήματος ΕΙ, καθόσον οι κλίσεις των καμπυλών Χ (σχήμα 3.4) και Β (σχήμα 3.3) (r_x και r_{Bu} αντίστοιχα)αποτελούν τους ρυθμούς μεταβολής των Χ και Β αντίστοιχα. Παρακάτω παρουσιάζονται εξισώσεις υπολογισμού των ρυθμών μεταβολής [20].

Ως μέτρο των οργανικών ουσιών σε ένα σύστημα ΕΙ για αστικά απόβλητα χρησιμοποιείται συνήθως το BOD_5 (Β και B_o).

Ως μέτρο των μ/ο (Χ) στη ΔΑ χρησιμοποιείται το οργανικό μέρος (VSS) των αιωρούμενων στερεών (SS) της βιομάζας. Το σύνολο των SS (Τ), δηλ. το σύνολο των οργανικών (Χ) και των αδρανών (Α) SS καλείται «αιωρούμενα στερεά (SS) του ανάμικτου υγρού (Mixed Liquor Suspended Solids)» ή συνοπτικά MLSS και υπολογίζεται από την εξίσωση (3.1):

$$T = X + A \tag{3.1}$$

Το οργανικό μέρος (Χ) των MLSS καλείται MLVSS.

3.2.3 Εμπειρικά μεγέθη συστήματος

Εκτός από την θεωρητική περιγραφή του συστήματος ΕΙ μπορεί να χρησιμοποιηθούν και τα εμπειρικά μεγέθη F/M (λόγος τροφής – μ/ο ή Food/Microorganisms) και ΟΦ (οργανική φόρτιση), που ορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{F}{M} = \frac{Q \cdot B_o}{X \cdot V_{\Delta A}} \tag{3.2}$$

$$\text{ΟΦ} = \frac{Q \cdot B_o}{V_{\Delta A}} = \left(\frac{F}{M}\right) \cdot X \tag{3.3}$$

Εφαρμόζοντας ισοζύγια μάζας για τα Β και Χ στη ΔΑ προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις συσχέτισης των θεωρητικών και εμπειρικών μεγεθών :

$$r_s = E \cdot \text{ΟΦ} \tag{3.4}$$

όπου $\text{E} = 1 - \frac{\text{B}}{\text{B}_o}$ (3.5)

είναι η απόδοση του συστήματος
B, η συγκέντρωση του BOD_5 στην εκροή
B_o, η συγκέντρωση του BOD_5 στην εισροή

3.2.4 Κινητική – Εξισώσεις ανάπτυξης μικροοργανισμών

Η αύξηση των μ/ο σε ένα ΒΑ μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύεται από την εξίσωση:

$$\frac{dX}{dt} = r_g = \mu \cdot \text{X} \tag{3.6}$$

όπου
r_g , ρυθμός αύξησης της μάζας των μ/ο στο ΒΑ
μ , ειδικός ρυθμός ανάπτυξης
X , μάζα των μ/ο

ή αλλιώς: $r_g = \frac{dX}{dt} = \mu \cdot \text{X}$

$$\ln X = \mu t$$

$$\frac{X}{X_o} = e^{\mu t}$$

$X = X_o\, e^{\mu t}$ (3.7)

όπου X_o , βιομάζα τη χρονική στιγμή t = 0

Η χρήση του υποστρώματος συνδέεται με την παραγωγή βιομάζας με την εξίσωση:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{dS}{dt} \tag{3.8}$$

όπου
Y , συντελεστής παραγωγής βιομάζας (βιομάζα που παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιημένου υποστρώματος)

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.6) και (3.8) προκύπτει η εξίσωση (3.9) η οποία συσχετίζει τη χρήση υποστρώματος με τη συγκέντρωση της βιομάζας

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\mu}{Y} \cdot X$$

ή

$$\frac{dS}{dt} = K \cdot X \qquad (3.9)$$

όπου

$K = \frac{\mu}{Y}$, η ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος (σταθερά αναλογίας χρήσης, αύξηση μάζας μ/ο ανά μονάδα μάζας υποστρώματος και χρόνου)

Ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας διάφορες κινητικές, από τις οποίες συνιστάται η κινητική Monod πρώτης ή μεγαλύτερης τάξης.

$$\mu = \mu_m \left(\frac{S}{K_s + S} \right) = \frac{K_m \cdot Y \cdot S}{K_s + S} \qquad (3.10)$$

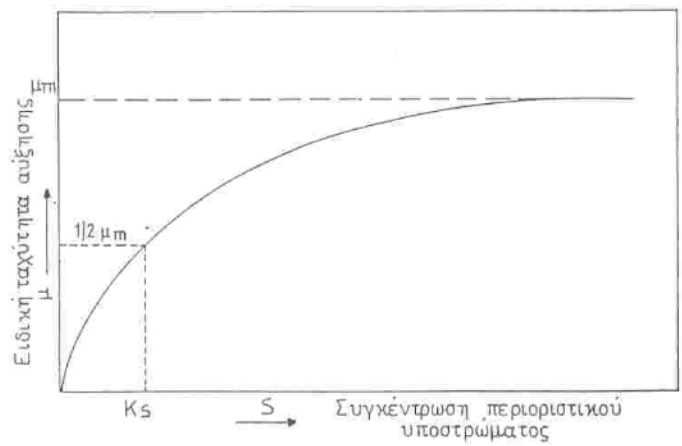
όπου

S , η συγκέντρωση του υποστρώματος

μ_m , η μέγιστη δυνατή τιμή του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης

K_S , η συγκέντρωση του υποστρώματος όταν $\mu = ½ \mu_m$

K_m , η ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος που αντιστοιχεί στη μ_m



Σχήμα 3.6 Ειδική ταχύτητα αύξησης ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του υποστρώματος [15].

3.2.5 Κινητική πολλαπλών υποστρωμάτων

Στα πραγματικά συστήματα όμως τον κανόνα αποτελεί η χρήση περισσότερων του ενός υποστρωμάτων. Για δύο υποστρώματα π.χ. η εξίσωση (3.1) μας δίνει τη μορφή :

$$\mu = \mu_m \left(\frac{S_1}{K_1 + S_1} \right) \cdot \left(\frac{S_2}{K_2 + S_2} \right) \tag{3.11}$$

Στην περίπτωση δύο υποστρωμάτων όταν $S_1 = K_1$ και $S_2 = K_2$

$$\mu = \frac{\mu_m}{4} \tag{3.12}$$

Γενικότερα, για περισσότερα από ένα υπόστρωμα ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης υπολογίζεται από την κινητική Monod k-τάξης, η οποία έχει το πλεονέκτημα ότι εκφράζει την επίδραση του περιορισμού των συγκεντρώσεων των k απαραίτητων συστατικών για την ανάπτυξη (π.χ. πηγών άνθρακα, ενέργειας, οξυγόνου, θρεπτικών συστατικών).

$$\mu = \mu_m \cdot \sum_{i=1}^{k} \frac{B_i}{K_{Bi} + B_i} \tag{3.13}$$

Ο ρυθμός αύξησης r_g της μάζας των μ/ο μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος του ρυθμού κατανάλωσης r_{Bu} της πηγής άνθρακα (B, π.χ. των οργανικών ουσιών) από τους μ/ο, δηλ.

$r_g = -Y\, r_{Bu}$ (3.14)

όπου
Y , συντελεστής παραγωγής βιομάζας (το πρόσημο – εκφράζει μείωση του B)

Σε περιόδους ανεπάρκειας εξωτερικής διαθέσιμης πηγής άνθρακα οι μ/ο χρησιμοποιούν τον άνθρακα των κυττάρων τους (ενδογενής μεταβολισμός) για να επιζήσουν ή πεθαίνουν ή καταναλίσκονται από άλλους μ/ο. Στη φάση του ενδογενούς μεταβολισμού είναι προφανές ότι μειώνεται τόσο η μάζα του των βακτήριων όσο και ο αριθμός τους και επομένως και η συνολική βιομάζα. Η διαδικασία αυτή της φθοράς- αποσύνθεσης των μ/ο μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση:

$r_d = -k_d\, X$ (3.15)

όπου
r_d , ο ρυθμός φθοράς της μάζας των μ/ο
k_d , ο συντελεστής αποσύνθεσης

Η εξίσωση (3.15) μπορεί να δώσει μια σχέση ανάλογη της (3.7)

$$X = X_m \cdot e^{-k_d t} \tag{3.16}$$

όπου

X_m , μέγιστη συγκέντρωση βιομάζας

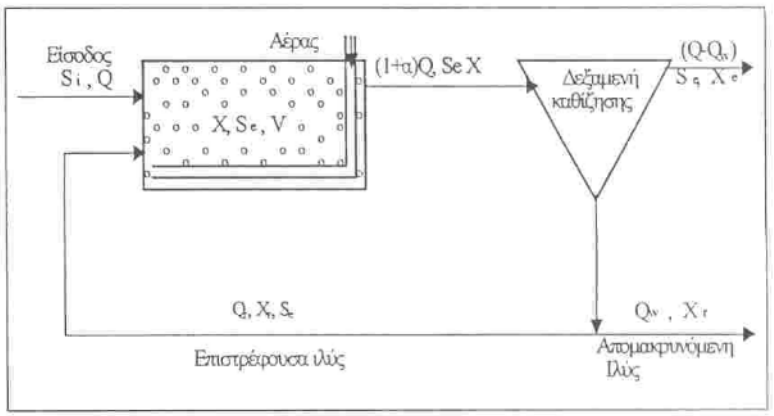
Με βάση τις (3.6) και (3.14) ο ρυθμός ολικής αύξησης των μ/ο r_x στον ΒΑ προκύπτει ίσος με

$$r_x = \mu X - k_d X = (\mu - k_d) X \tag{3.17}$$

οπότε μπορεί να οριστεί ένας νέος ολικός συντελεστής παραγωγής βιομάζας Y_o που λαμβάνει υπόψη και την αποσύνθεση των κυττάρων σύμφωνα με την εξίσωση

$$r_x = Y_o \, r_{Bu} \tag{3.18}$$

3.2.6 Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα με ανακυκλοφορία ιλύος



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα για ένα σύστημα πλήρους ανάμιξης με ανακύκλωση της βιομάζας [15].

Στα συστήματα με ανακυκλοφορία ή ανακύκλωση ιλύος, με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, έχουμε δύο νέες λειτουργικές παραμέτρους ελέγχου της διαδικασίας:

$a = \frac{Q_r}{Q}$, το ποσοστό ανακύκλωσης, που έχει συνήθως τιμές μικρότερες από τη μονάδα

και

$C = \frac{X_r}{X}$, ο συντελεστής συμπύκνωσης της βιομάζας ή ενεργού ιλύος, που έχει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας

Για τη μαθηματική περιγραφή του συστήματος του σχήματος 3.7, που είναι και η συνηθέστερη διάταξη στην πράξη, γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- ✓ Πρόκειται για βιοαντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης
- ✓ Βιολογική αύξηση γίνεται μόνο στη ΔΑ
- ✓ Ο όγκος της ΔΚ θεωρείται αμελητέος
- ✓ Ο μέσος υδραυλικός χρόνος παραμονής στη ΔΑ είναι:

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{1}{D} \tag{3.19}$$

όπου
V , ο όγκος του βιοαντιδραστήρα, δηλ. της ΔΑ
Q , η παροχή εισόδου
D = Q/V ,

Στην παραπάνω εξίσωση καταλήγουμε λόγω των συνθηκών πλήρους ανάμιξης που έχουν ως αποτέλεσμα η προσθήκη μιας ποσότητας υποστρώματος να διασκορπίζεται άμεσα σε όλο τον όγκο της ΔΑ. Επομένως το εισερχόμενο υπόστρωμα διαλύεται σύμφωνα με τον συντελεστή Q/V, ο οποίος ονομάζεται αναλογία αραίωσης ή παροχή ανά μονάδα όγκου και συμβολίζεται με D που είναι το αντίστροφο του υδραυλικού χρόνου παραμονής θ, δηλ. Q/V = D = 1/θ

- ✓ Ο μέσος χρόνος παραμονής των κυττάρων στη ΔΑ, που ονομάζεται ηλικία λάσπης, ορίζεται ως ο λόγος της βιομάζας του βιοαντιδραστήρα δια της βιομάζας που απομακρύνεται στη μονάδα του χρόνου:

$$\theta_C = \frac{V \cdot X}{Q_w \cdot X_r + (Q - Q_w) \cdot X_e} \tag{3.20}$$

Μια άλλη εξίσωση που ορίζει την ηλικία λάσπης είναι:

$$\theta_C = \frac{X}{r_x} = \frac{1}{\mu - k_d} \tag{3.21}$$

Το ισοζύγιο μάζας για το σύστημα του σχήματος 3.7 μας δίνει:

Ταχύτητα μεταβολής της συγκέντρωσης της βιομάζας του βιοαντιδραστήρα	=	Ταχύτητα εισόδου της βιομάζας στο σύστημα	-	Ταχύτητα απομάκρυνσης της βιομάζας από το σύστημα	+	Καθαρή ταχύτητα αύξησης της βιομάζας στο σύστημα

$$\frac{dX}{dt}\cdot V = 0 - \left[Q_w \cdot X_r + \left(Q - Q_w\right)\cdot X_e\right] + \left[\left(Y\frac{dS}{dt} - k_d \cdot X\right)\cdot V\right] \tag{3.22}$$

Η ταχύτητα εισόδου λαμβάνεται μηδέν, επειδή θεωρείται αμελητέα η βιομάζα εισόδου.

Για σταθερή κατάσταση $\frac{dX}{dt} = 0$ η εξίσωση (3.22) γίνεται:

$$Q_w \cdot X_r + \left(Q - Q_w\right)\cdot X_e = \left(Y \cdot \frac{dS}{dt} - k_d \cdot X\right)\cdot V \tag{3.23}$$

$$\frac{Q_w \cdot X_r + \left(Q - Q_w\right)\cdot X_e}{V \cdot X} = Y\frac{dS}{dt}\cdot\frac{1}{X} - k_d \tag{3.24}$$

$$\frac{1}{\theta_C} = Y\frac{dS}{dt}\cdot\frac{1}{X} - k_d \tag{3.25}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}\left(S_i - S_e\right) = \frac{S_i - S_e}{\theta} \tag{3.26}$$

και η εξίσωση (3.25) γίνεται:

$$\frac{1}{\theta_C} = Y\frac{S_i - S_e}{\theta}\cdot\frac{1}{X} - k_d \tag{3.27}$$

οπότε λύνοντας την (3.27) ως προς Χ προκύπτει:

$$X = \frac{\theta_C \cdot Y \cdot \left(S_i - S_e\right)}{\theta \cdot \left(1 + k_d \cdot \theta_C\right)} \tag{3.28}$$

Η εξίσωση (3.28) είναι μια σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της βιομάζας Χ στο βιοαντιδραστήρα, της συγκέντρωσης του υποστρώματος στην είσοδο S_i, και στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα, S_e, του υδραυλικού χρόνου παραμονής θ, της μέσης

ηλικίας της βιομάζας θ_C και των σταθερών Y και k_d. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του βιοαντιδραστήρα (δεξαμενή αερισμού) των εγκαταστάσεων βιολογικής επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

Εάν πάρουμε το ισοζύγιο για το υπόστρωμα έχουμε:

$$\frac{dS}{dt}\cdot V = Q\cdot S_i - Q_w\cdot S_e - \left(Q - Q_w\right)\cdot S_e - \frac{\mu\cdot \mathrm{X}}{\mathrm{Y}}\cdot V \qquad (3.29)$$

και για σταθερή κατάσταση $\frac{dS}{dt} = 0$ έχουμε:

$$Q\cdot S_i - Q\cdot S_e = \frac{\mu\cdot \mathrm{X}}{\mathrm{Y}}\cdot V \qquad (3.30)$$

Από την εξίσωση (3.27) έχουμε:

$$\frac{S_i - S_e}{\theta} = \frac{X}{\theta_C\cdot Y} + \frac{k_d\cdot X}{Y} \qquad (3.31)$$

και η εξίσωση (3.30) γίνεται:

$$\frac{\mu\cdot X}{Y} = \frac{Q}{V}\left(S_i - S_e\right) = \frac{S_i - S_e}{\theta} = \frac{X}{\theta_C\cdot \mathrm{Y}} + \frac{k_d\cdot X}{Y} \qquad (3.32)$$

ή

$$\mu = \frac{1}{\theta_C} + k_d \qquad (3.33)$$

αντικαθιστώντας την ειδική ταχύτητα αύξησης $\mu = \frac{K_m\cdot Y\cdot S}{K_s + S}$ (3.10)

(ο συντελεστής μ = μ’ + k_d περιέχει και το παραγόμενο υπόστρωμα από την ενδογενή αναπνοή) εχουμε:

$$\frac{K_m\cdot Y\cdot S_e}{K_s + S_e} = \frac{1}{\theta_C} + k_d \qquad (3.35)$$

$$K_m\, Y\, S_e\, \theta_c = K_s + S_e + K_s\, k_d\, \theta_c + S_e\, k_d\, \theta_c \qquad (3.36)$$

$$S_e\,(K_m\, Y\, \theta_c - 1 - \theta_c\, k_d) = K_s\,(1 + \theta_c\, k_d) \qquad (3.37)$$

$$S_e = \frac{K_s\left(1 + \theta_C\cdot k_d\right)}{\theta_C\left(K_m\cdot Y - k_d\right) - 1} \qquad (3.38)$$

Επίσης ισχύει:

$$Y_o = \frac{\frac{X}{\theta_C}}{\frac{S_i - S_e}{\theta}} \tag{3.39}$$

Επειδή η ανά ημέρα παραγόμενη βιομάζα $\frac{X}{\theta_C}$ και το υπόστρωμα που αντιστοιχεί σε αυτή τη βιομάζα είναι $\frac{S_i - S_e}{\theta}$ με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.28) έχουμε:

$$Y_o = \frac{Y}{1 + k_d \cdot \theta_C} \tag{3.40}$$

3.2.7 Παρεμπόδιση υποστρώματος – Κινητική αύξησης μικροοργανισμών παρουσία παρεμποδιστή

Πολλές ουσίες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν από τους μ/ο σε μικρές συγκεντρώσεις, ενώ σε μεγάλες έχουν τοξικές επιδράσεις και παρεμποδίζουν την αύξησή τους.

Πολλές εξισώσεις έχουν προταθεί, αλλά εκείνη που χρησιμοποιήθηκε περισσότερο από τους ερευνητές είναι η εξίσωση Haldane η οποία είναι και η απλούστερη:

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S}{\left(K_s + S + \frac{S^2}{K_1}\right)} \tag{3.41}$$

όπου

K_1 , ο συντελεστής παρεμπόδισης για τη συγκεκριμένη ουσία

Ο $\frac{S^2}{K_1}$ είναι ο όρος παρεμπόδισης που σε χαμηλές συγκεντρώσεις S επηρεάζει λίγο την τιμή του μ, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές μειώνει σημαντικά την τιμή του μ. Βέβαια και η τιμή του K_1, η οποία εξαρτάται από την συγκεκριμένη ουσία, καθορίζει τις τιμές του S στις οποίες αρχίζει η παρεμπόδιση καθώς και το ποσό της έντασής της, δηλ. τη μείωση του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης μ. Μικρές τιμές του συντελεστή παρεμπόδισης συνεπάγονται μεγαλύτερη παρεμπόδιση, ενώ μεγαλύτερες τιμές έχουν ως αποτέλεσμα μικρή παρεμπόδιση. Όταν ο K_1 τείνει στο άπειρον η εξίσωση Haldane (3.41) καταλήγει στην εξίσωση Monod (3.10).

Από την εξίσωση (3.41) προκύπτει η τιμή του μ ως συνάρτηση του S αρχικά αυξάνει και στη συνέχεια μειώνεται. Στην εξίσωση αυτή έχουμε ένα μοναδικό υπόστρωμα, το οποίο από μια συγκέντρωση και πάνω προκαλεί παρεμπόδιση. Υπάρχει η δυνατότητα να εκφραστούν σχέσεις και για τις περιπτώσεις εκείνες, όπου υπάρχει κοινό υπόστρωμα που δεν προκαλεί παρεμπόδιση και μία άλλη ουσία που προκαλεί παρεμπόδιση, δηλ. η παρεμπόδιση προκαλείται από άλλη ουσία, διαφορετική του υποστρώματος. Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$\mu = \mu_m \left(\frac{S}{K_s + S} \right) \cdot \left(\frac{K_I}{K_I + I} \right) \tag{3.42}$$

3.2.8 Επίδραση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία έχει άμεση επίδραση στις βιοχημικές δράσεις και επομένως στις ταχύτητες αύξησης της βιομάζας.

$$(dx/dt)_T = (dx/dt)_{20}\, \Theta^{(T - 20)} \tag{3.43}$$

όπου
$(dx/dt)_T$, η ταχύτητα αύξησης στους T ^oC
$(dx/dt)_{20}$, η ταχύτητα αύξησης στους 20 ^oC
Θ , ο συντελεστής θερμοκρασίας που για την ενεργό ιλύ παίρνει τιμή 1.04

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Κινητική Μικροβιακής Ανάπτυξης ειδικά στη Δεξαμενή Αερισμού

Σε ένα σύστημα ενεργού ιλύος ΕΙ, όταν επικρατούν αερόβιες συνθήκες, δηλ. στη δεξαμενή αερισμού ΔΑ, μπορεί να πραγματοποιηθούν από τα βακτήρια οι ακόλουθες δράσεις, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω:

- Ανάπτυξη ετερότροφων βακτήριων με οξείδωση των οργανικών ενώσεων του άνθρακα.
- Ανάπτυξη αυτότροφων βακτήριων (νιτροποιητικά βακτήρια) με οξείδωση (νιτροποίηση) των ενώσεων αζώτου (αμμωνίας).

4.1 ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

4.1.1 Στοιχειομετρία

Τα αερόβια, χημικοτροφικά, ετερότροφα βακτήρια που βρίσκονται στα απόβλητα αναπτύσσονται στη ΔΑ σε συνθήκες επάρκειας πηγής άνθρακα και θρεπτικών συστατικών [20]:
α) χρησιμοποιώντας ως πηγή άνθρακα τις οργανικές ενώσεις των αποβλήτων (COHNS) για να συνθέσουν νέα κύτταρα ($C_5H_7NO_2$) και
β) λαμβάνοντας ενέργεια από την οξείδωση των οργανικών ενώσεων του άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση

$$COHNS + O_2 + \text{θρεπτικά} + \text{βακτήρια} \rightarrow C_5H_7NO_2 + \\ + CO_2 + NH_3 + H_2O + \text{άλλα τελικά προϊόντα} \quad (4.1)$$

Σε περιόδους ανεπάρκειας διαθέσιμων οργανικών ενώσεων τα βακτήρια οξειδώνουν τα κύτταρά τους (ενδογενής μεταβολισμός) για να εξασφαλίσουν την απαραίτητη ενέργεια για να επιζήσουν, σύμφωνα με την αντίδραση

$$C_5H_7NO_2 + 5O_2 + \text{βακτήρια} \rightarrow 5CO_2 + \\ + NH_3 + 2H_2O + \text{άλλα σταθερά τελικά προϊόντα} \quad (4.2)$$

από την οποία υπολογίζεται ότι για την οξείδωση 1g κυττάρου (ως $C_5H_7NO_2$) απαιτούνται 5*32/113 = 1.42g O_2.

4.1.2 Ρυθμός αύξησης βιομάζας

Ο ειδικός ρυθμός αύξησης της βιομάζας των ετερότροφων βακτήριων (μ_B) από την οξείδωση των ενώσεων άνθρακα σε μια ΔΑ όγκου $V_{\Delta A}$ μπορεί να εκφραστεί με απλή κινητική Monod, όπου θεωρείται ότι ο ειδικός ρυθμός αύξησης επηρεάζεται από την πηγή άνθρακα, δηλ. τα οργανικά συστατικά των αποβλήτων που εκφράζονται από τη συγκέντρωση του BOD_5 (B στην εκροή και B_o στην εισροή) ως ακολούθως

$$\mu_B = \mu_{m,B} \frac{B}{K_B + B} \tag{4.3}$$

4.1.3 Παραγωγή βιομάζας. Ηλικία λάσπης

Η παραγωγή (ολική αύξηση) της βιομάζας των ετερότροφων βακτήριων ΔX_B στη ΔΑ προκύπτει από συνδυασμό των σχέσεων (3.14), (3.17) και (3.18) ίση με

$$\Delta X_B = r_x V_{\Delta A} = \mu_B X_B V_{\Delta A} - k_{d,B} X_B V_{\Delta A} = \\ = Y_B Q (B_o - B) - k_{d,B} X_B V_{\Delta A} = Y_{o,B} Q (B_o - B) \tag{4.4}$$

όπου Q είναι η παροχή σχεδιασμού και X_B η συγκέντρωση των ετερότροφων βακτήριων.

Συχνά τίθεται

$$B_{rem} = Q (B_o - B) \tag{4.5}$$

όπου B_{rem} είναι η μάζα του BOD_5 που απομακρύνεται (οξειδώνεται) στη μονάδα του χρόνου, οπότε η εξίσωση 4.4 γίνεται

$$\Delta X_B = Y_B B_{rem} - k_{d,B} X_B V_{\Delta A} = Y_{o,B} B_{rem} \tag{4.6}$$

Ο συντελεστής παραγωγής βιομάζας Y_B έχει σχετικά σταθερή μέση τιμή (0.65) και κυμαίνεται από 0.60 μέχρι 0.70 kg VSS/kgBOD_5. Όμοια και ο συντελεστής αποσύνθεσης $k_{d,B}$ έχει σχετικά σταθερή μέση τιμή (0.06) και κυμαίνεται από 0.05 μέχρι 0.08d^{-1}. Σε αντίθεση με τους συντελεστές Y_B και $k_{d,B}$, οι συντελεστές $\mu_{max,B}$ και K_B παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις των τιμών τους.

Ο ολικός συντελεστής παραγωγής βιομάζας ($Y_{o,B}$) και η (αερόβια) ηλικία της λάσπης στη ΔΑ ($\theta_{c,\Delta A}$) υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$Y_{o,B} = \frac{Y_B}{1 + k_{d,B} \cdot \theta_{C,\Delta A}} \tag{4.7}$$

$$\theta_{C,\Delta A} = \frac{X_B}{r_X} = \frac{X_B \cdot V_{\Delta A}}{\Delta X_B} \tag{4.8}$$

4.2 ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

4.2.1 Στοιχειομετρία

Τα αερόβια, χημικοτροφικά, αυτότροφα βακτήρια Nitrosomonas και Nitrobacter που βρίσκονται στα απόβλητα αναπτύσσονται στη ΔΑ [20]:
α) χρησιμοποιώντας ως πηγή άνθρακα το CO2 (που βρίσκεται στα απόβλητα από την οξείδωση των οργανικών ενώσεων άνθρακα) για να συνθέσουν νέα κύτταρα ($C_5H_7NO_2$) σύμφωνα με την αντίδραση

$$NH_4^+ + HCO_3^- + 4CO_2 + H_2O \rightarrow C_5H_7NO_2 + 5O_2 \quad (4.9)$$

β) και λαμβάνοντας ενέργεια από την οξείδωση των αμμωνιακών (NH_4^+) σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:

$$NH_4^+ + 1.5O_2 + \text{Nitrosomonas} \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O + 250\ \text{kj}$$

$$NO_2^- + 0.5O_2 + \text{Nitrobacter} \rightarrow NO_3^- + 75\ \text{kj}$$

Συνολικά $NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O + 325\ \text{kj}$ (4.10)

Αγνοώντας την ποσότητα του αζώτου που χρησιμοποιείται στη σύνθεση νέων κυττάρων (2-5% των NH_4-N), η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση 14g N ως NH_4-N είναι ίση με 2*32=64g, δηλ. απαιτούνται 64/14=4.57g O_2/g νιτροποιούμενου NH_4-N.

Μια συνολική αντίδραση που λαμβάνει υπόψη και τη σύνθεση νέων κυττάρων είναι η ακόλουθη:

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3^- \rightarrow 0.021C_5H_7NO_2 + 0.98\ NO_3^- + 1.041\ H_2O + 1.88H_2CO_3 \quad (4.11)$$

από την οποία υπολογίζεται ότι για την οξείδωση 1g N ως NH_4-N απαιτούνται 1.83*32/14=4.2g O_2 και καταστρέφονται 1.98*61/14=8.6g αλκαλικότητας ως HCO_3^-, ενώ παράγονται 0.021*113/14=0.17g κυττάρων βιομάζας.

4.2.2 Ταχύτητα νιτροποίησης

Η ταχύτητα νιτροποίησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου DO και το pH.

Η θερμοκρασία των αποβλήτων επηρεάζει έντονα την ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτήριων. Όταν η θερμοκρασία των αποβλήτων αυξηθεί κατά 1^oC (μέχρι και $30\ ^oC$) η ταχύτητα νιτροποίησης αυξάνεται κατά 9-10%.

Κατά τη νιτροποίηση παράγονται ιόντα υδρογόνου (και καταναλίσκεται αλκαλικότητα) με αποτέλεσμα την πτώση του pH. Σε μικρές τιμές του pH η νιτροποίηση μπορεί να σταματήσει και για το λόγο αυτό απαιτείται η άμεση αύξηση του pH με απονιτροποίηση ή εξουδετέρωση, εκτός αν η ποσότητα της αρχικής αλκαλικότητας στα απόβλητα είναι αρκετή και λειτουργεί ρυθμιστικά (buffer) διατηρώντας το pH σε σταθερά επίπεδα. Σημειώνεται, επίσης, ότι η νιτροποίηση μπορεί να σταματήσει και σε μεγάλες τιμές του pH, στις οποίες το εισερχόμενο άζωτο βρίσκεται σε μορφή αμμωνίας (και όχι ιόντων αμμωνίου), η οποία είναι τοξική στα νιτροποιητικά βακτήρια. Ως βέλτιστη περιοχή του pH θεωρείται η 7.5-8.5 [20].

Η επίδραση της συγκέντρωσης του DO παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και οι απόψεις που εκφράζονται από διάφορους ερευνητές διαφέρουν σημαντικά. Οι Downing et al και Wild et al πραγματοποιώντας έρευνες με ενεργό ιλύ διαπίστωσαν ότι η ταχύτητα νιτροποίησης δεν εξαρτάται από τη συγκέντρωση του DO, όταν η συγκέντρωση του DO είναι μεγαλύτερη από 1mg/l. Ο Wuhrman διαπίστωσε ότι η ταχύτητα νιτροποίησης δεν επηρεάζεται για συγκεντρώσεις DO 4-7mg/l, αλλά όμως η ταχύτητα νιτροποίησης για DO=1mg/l είναι ίση με το 90% της ταχύτητας που παρατηρήθηκε στις μεγάλες συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τους Stenstrom and Song η επίδραση της συγκέντρωσης του DO δεν αναμένεται να είναι σημαντική σε μικρές οργανικές φορτίσεις (δηλ. σε μεγάλες ηλικίες λάσπης), όπου οι κροκίδες της ενεργού ιλύος είναι μικρού μεγέθους και δεν υπάρχει δυσκολία διέλευσης του DO από την υγρή φάση (ανάμικτο υγρό) στη στερεά μάζα του εσωτερικού των κροκίδων που βρίσκονται τα νιτροποιητικά βακτήρια. Μετά από τις παραπάνω παρατηρήσεις συνιστάται να εξασφαλίζεται κατά τη νιτροποίηση στη ΔΑ μια ελάχιστη συγκέντρωση DO της τάξης των 1-2mg/l [20].

Με βάση τους παράγοντες που αναφέρθηκαν ότι επηρεάζουν τη νιτροποίηση ο ειδικός ρυθμός αύξησης των νιτροποιητικών βακτήριων μπορεί σε μια πολύ γενική περίπτωση να εκφραστεί από μια εξίσωση κινητικής Monod τρίτης τάξης ως συνάρτηση των συγκεντρώσεων του CO_2 (πηγή άνθρακα), του DO και της αμμωνίας στην εκροή της ΔΑ. Στην εξίσωση αυτή θα μπορεί να υπάρχει και η επίδραση της τιμής του pH. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις συστημάτων ΕΙ για αστικά απόβλητα δεν αναμένεται να υπάρχει επίδραση του pH και της συγκέντρωσης του CO_2 (που βρίσκεται σε αφθονία), οπότε ο ρυθμός νιτροποίησης μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη εξίσωση κινητικής Monod δεύτερης τάξης

$$\mu_N = \mu_{m,N} \frac{AM}{K_N + AM} \cdot \frac{DO}{K_{DO} + DO} \qquad (4.12)$$

όπου ο μέγιστος ρυθμός αύξησης των νιτροποιητικών βακτήριων ($\mu_{max,N}$) μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας από διάφορες εξισώσεις, όπως π.χ. αυτή του Hultman

$$\mu_{m,N} = 0.50 \cdot 10^{0.033(T-20)} \qquad (4.13)$$

Ο συντελεστής K_N μπορεί να τεθεί ίσος με 0.50mg/l, ενώ υπάρχουν και σχέσεις που εκφράζουν την επίδραση της θερμοκρασίας, όπως π.χ. των Knowles et al. Για τον συντελεστή K_{DO} συνιστώνται τιμές από 1mg/l μέχρι 1.3mg/l.

Ο συντελεστής αποσύνθεσης των νιτροποιητικών βακτήριων μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση

$$k_{d,N} = 0.50 \cdot 1.022^{T-20} \quad (4.14)$$

4.2.3 Παραγωγή βιομάζας. Ηλικία λάσπης

Σε αναλογία με τη σχέση (3.21), που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η απαραίτητη ηλικία λάσπης για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\theta_{C,N} = \frac{1}{\mu_N - k_d} \quad (4.15)$$

Σε αντιστοιχία με την εξίσωση (4.4) η παραγωγή βιομάζας των νιτροποιητικών βακτήριων στη ΔΑ προκύπτει ίση με

$$\Delta X_N = \mu_N X_N V_{\Delta A} - k_{d,N} X_N V_{\Delta A} = Y_N Q (AM_o - AM) - k_{d,N} X_N V_{\Delta A} \quad (4.16)$$

όπου X_N είναι η συγκέντρωση των νιτροποιητικών βακτήριων και AM_o η συγκέντρωση της αμμωνίας στην εισροή της ΔΑ.

Σε αντιστοιχία με την εξίσωση (4.5) τίθεται

$$N_{ox} = Q (AM_o - AM) \quad (4.17)$$

όπου N_{ox} είναι η μάζα του αζώτου (δηλ. της αμμωνίας) που οξειδώνεται (νιτροποιείται) στη μονάδα του χρόνου.

Μια ορθότερη έκφραση για τον προσδιορισμό του N_{ox}, που λαμβάνει υπόψη και τη μάζα του αζώτου που δεσμεύεται στη βιομάζα των ετερότροφων βακτήριων (που αποτελεί συνήθως ένα ποσοστό 10% αυτής), είναι η ακόλουθη

$$N_{ox} = Q (AM_o - AM) - 0.10 \Delta X_B \quad (4.18)$$

Με βάση την εξίσωση (4.18) η εξίσωση (4.16) γράφεται

$$\Delta X_N = Y_N N_{ox} - k_{d,N} X_N V_{\Delta A} \quad (4.19)$$

Ο συντελεστής παραγωγής βιομάζας Y_N έχει σχετικά σταθερή μέση τιμή (0.20) και κυμαίνεται από 0.10 μέχρι 0.30 kg VSS/ kg NH_4-N.

Το σύνολο της παραγόμενης βιομάζας από τις διαδικασίες της οξείδωσης των οργανικών ενώσεων άνθρακα και της νιτροποίησης προκύπτει ως άθροισμα των (4.6) και (4.19), δηλ.

$$\Delta X = \Delta X_B + \Delta X_N = (\nu\text{-}1)\,\Delta X + \nu\,\Delta X_o \qquad \text{ή} \tag{4.20α}$$

$$X = X_B + X_N = (\nu\text{-}1)\,X + \nu\,X \tag{4.20β}$$

όπου ν είναι το ποσοστό των νιτροποιητικών βακτήριων στη βιομάζα της ΔΑ, δηλ.

$$\nu = \frac{X_N}{X} \quad \text{και} \quad 1-\nu = \frac{X_B}{X} \tag{4.20γ}$$

Συνήθως το X_N (αντίστοιχα το $\Delta X_{o,N}$) αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό (3-5%) του X (αντίστοιχα του ΔX_o). Ενδεικτικές τιμές του ν για διάφορους λόγους B_o/TN_o, όπου TN_o είναι η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εισροή (συχνά θεωρείται $TN_o = AM_o$) παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Ποσοστό των νιτροποιητικών βακτήριων για διάφορους λόγους B_o/TN_o [20].

B_o/TN_o	4	5	6	7	8	9
$\nu=X_N/X$	0.064	0.054	0.043	0.037	0.033	0.029

Η ηλικία λάσπης θ_C στη ΔΑ για τα νιτροποιητικά βακτήρια σε αναλογία με την (4.8) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\theta_{C,\Delta A} = \frac{X_N \cdot V_{\Delta A}}{\Delta X_N} \tag{4.21}$$

και για το σύνολο της βιομάζας (από την οξείδωση των ενώσεων του άνθρακα και την νιτροποίηση) από την εξίσωση

$$\theta_{C,\Delta A} = \frac{X \cdot V_{\Delta A}}{\Delta X} \tag{4.22}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.8), (4.20), (4.21) και (4.22) προκύπτει η εξίσωση

$$\Delta X_N = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) \cdot \Delta X_B \tag{4.23}$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί της (4.19) στον υπολογισμό του ΔX_N.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μαθηματικά Μοντέλα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα μοντέλα ποιότητας νερών και το μοντέλο μηδενικής διάστασης ενεργού ιλύος (activated sludge model - ASM1) [20].

5.1 ΣΚΟΠΟΣ

Στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών αποβλήτων (ΕΕΑΑ), όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιούνται διεργασίες οι οποίες έχουν στόχο τον «καθαρισμό» των λυμάτων, δηλ. την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συστατικών από τη μάζα των λυμάτων.
Οι περισσότερες διεργασίες καθαρισμού είναι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν σε έναν υδάτινο αποδέκτη, όπως π.χ. η καθίζηση, η οξείδωση των ενώσεων του άνθρακα και του αζώτου, η απονιτροποίηση, ο αερισμός (από την ατμόσφαιρα) και η φθορά-θάνατος των παθογόνων μικροοργανισμών από την ηλιακή ακτινοβολία. Αρκετές διεργασίες σε μια ΕΕΑΑ πραγματοποιούνται τεχνητά με την προσθήκη

(α) χημικών, όπως π.χ. η κροκκίδωση, η χλωρίωση και η οζόνωση
(β) οξυγόνου, όπως ο τεχνητός αερισμός
(γ) ενέργειας-ακτινοβολίας, όπως π.χ. η θερμική επεξεργασία ή η απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία [20].

Οι μονάδες μιας ΕΕΑΑ είναι συνήθως δεξαμενές-αντιδραστήρες. Τα μαθηματικά μοντέλα ποιότητας νερών (ή απόδοσης) των μονάδων αυτών διαφέρουν από τα μοντέλα επιφανειακών νερών (σε λίμνες, ταμιευτήρες, ποταμούς και εκβολές ποταμών) στα ακόλουθα σημεία [20]:

1. Οι διαστάσεις των μονάδων επεξεργασίας είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των επιφανειακών νερών, εκτός από ορισμένες εξαιρέσεις, όπως π.χ. λίμνες σταθεροποίησης.
2. Οι διεργασίες στις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας γίνονται ελεγχόμενα και κατά κανόνα με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από τις αντίστοιχες σε ένα υδάτινο σώμα. Οι κύριοι μικροοργανισμοί που λαμβάνουν μέρος είναι τα βακτήρια, εκτός από ορισμένες εξαιρέσεις, όπως π.χ. στις φωτοσυνθετικές λίμνες.

Τα δυο αυτά σημεία δείχνουν ότι σε μια μονάδα ΕΕΑΑ παρέχεται η δυνατότητα επέμβασης, δηλ. ελέγχου και ρύθμισης των διεργασιών, γεγονός που είναι ιδιαίτερα δύσκολο και συχνά αδύνατο σε ένα υδάτινο σώμα. Η πρώτη επέμβαση γίνεται κατά το στάδιο του σχεδιασμού των μονάδων με την επιλογή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του εξοπλισμού (π.χ. ανάμιξης και αερισμού). Στη συνέχεια, κατά τη λειτουργία γίνονται συνεχείς επεμβάσεις στο ρυθμό πραγματοποίησης των βιολογικών διεργασιών «καθαρισμού» από τους χειριστές των ΕΕΑΑ, όπως π.χ. στην οξείδωση των ενώσεων του άνθρακα και στη νιτροποίηση, οι οποίες πραγματοποιούνται γρηγορότερα με την αύξηση της παροχής οξυγόνου, στην καθίζηση με την προσθήκη χημικών κ.ο.κ.

Τα μαθηματικά μοντέλα μονάδων ΕΕΑΑ εφαρμόζονται για τους ακόλουθους σκοπούς [20]:

1. Για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας ή περισσότερων μονάδων επεξεργασίας.
   Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται με την επιλογή
   α) των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (διαστάσεων, διατάξεων εισροής και εκροής, θέσης πετασμάτων κ.α.) και των χαρακτηριστικών του εξοπλισμού της μονάδας και
   β) των χαρακτηριστικών των ποιοτικών παραμέτρων (π.χ. συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών, διαλυμένου οξυγόνου, χλωρίου), οι οποίες οδηγούν στην επιθυμητή απόδοση μιας μονάδας (π.χ. απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σε δεξαμενή καθίζησης, απομάκρυνση οργανικού φορτίου και νιτροποίηση σε δεξαμενή αερισμού, θάνατος παθογόνων μικροοργανισμών σε δεξαμενή χλωρίωσης) με το ελάχιστο αρχικό κόστος ή/και κόστος λειτουργίας.

2. Για τη βέλτιστη λειτουργία και έλεγχο μιας ή περισσότερων μονάδων επεξεργασίας. Συνήθως, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, όπως π.χ. της ενέργειας για αερισμό και των χημικών.

Ένα μαθηματικό μοντέλο μονάδας ΕΕΑΑ μπορεί να είναι [20]:

1. Μηδενικής διάστασης (0-D), όπου η μονάδα θεωρείται πλήρους ανάμιξης. Εφαρμόζεται συχνά σε δεξαμενές με επιφανειακό αερισμό ή ανάμιξης, όπου η ροή τείνει να λάβει τη θεωρητική μορφή της πλήρους ανάμιξης.

2. Μιας διάστασης (1-D), όταν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές των ποιοτικών χαρακτηριστικών μόνο κατά μια διεύθυνση, π.χ. του μήκους, ή του βάθους. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι η μονάδα αποτελείται από τμήματα-στρώματα πλήρους ανάμιξης.

3. Δυο διαστάσεων (2-D), όταν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές των ποιοτικών χαρακτηριστικών κατά 2 διευθύνσεις, συνήθως κατά τη διεύθυνση του βάθους και του μήκους.

4. Τριών διαστάσεων (3-D), όταν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές των ποιοτικών χαρακτηριστικών και κατά τις 3 διευθύνσεις.

5.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΩΝ

5.2.1 Γενικά

5.2.1.1 Διαφορική μορφή εξισώσεων των μοντέλων

Οι εξισώσεις ενός μοντέλου ποιότητας νερών μιας μονάδας ΕΕΑΑ σε πραγματικές συνθήκες για μια παράμετρο ποιότητας συγκέντρωσης Φ (g/m^3) έχει την ακόλουθη γενική διαφορική μορφή των 3-D εξισώσεων μεταφοράς-διάχυσης-διεργασιών (δηλ. ισοζυγίου μάζας) κατά τις διευθύνσεις x, y και z [20].

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}+\frac{\partial (u\Phi)}{\partial x}+\frac{\partial (v\Phi)}{\partial y}+\frac{\partial (w\Phi)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E_y\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(E_z\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)+S_\Phi \quad (5.1)$$

όπου
t = χρόνος (day)
u = ταχύτητα ροής (m/day) κατά τη διεύθυνση x
v = ταχύτητα ροής (m/day) κατά τη διεύθυνση y
w = ταχύτητα ροής (m/day) κατά τη διεύθυνση z
E_x = συντελεστής διάχυσης (m^2/day) κατά τη διεύθυνση x
E_y = συντελεστής διάχυσης (m^2/day) κατά τη διεύθυνση y
E_z = συντελεστής διάχυσης (m^2/day) κατά τη διεύθυνση z
S_Φ = σταθερός όρος της εξίσωσης (g/m^3day)

Ο σταθερός όρος περιλαμβάνει όλες τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, εκτός των διεργασιών μεταφοράς και διάχυσης.

Οι κατανομές των τιμών των 3 συνιστωσών της ταχύτητας και των 3 συντελεστών διάχυσης προσδιορίζονται υπολογιστικά με κατάλληλο υδροδυναμικό μοντέλο. Οι εξισώσεις (5.1) έχουν σημαντικές ομοιότητες με τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε μαθηματικά μοντέλα ποιότητας νερών 3-D αποδεκτών, όπως π.χ. θαλάσσιων περιοχών και λιμνών.

Οι εξισώσεις (5.1) μπορεί να ολοκληρωθούν σε μια διάσταση, έστω κατά y, οπότε προκύπτει η ακόλουθη 2-D διαφορική μορφή τους

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}+\frac{\partial (u\Phi)}{\partial x}+\frac{\partial (w\Phi)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)+S_\Phi \quad (5.2)$$

όπου
t = χρόνος (day)
u = μέση ταχύτητα ροής (m/day) κατά τη διεύθυνση x
w = μέση ταχύτητα ροής (m/day) κατά τη διεύθυνση z
D_x = συντελεστής διασποράς (m^2/day) κατά τη διεύθυνση x
D_z = συντελεστής διασποράς (m^2/day) κατά τη διεύθυνση z

Οι κατανομές των τιμών των 2 συνιστωσών της ταχύτητας ταχυτήτων και των 2 συντελεστών διασποράς υπολογίζονται με κατάλληλο υδροδυναμικό μοντέλο. Οι εξισώσεις (5.2) έχουν σημαντικές ομοιότητες με τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε μαθηματικά μοντέλα ποιότητας νερών 2-D αποδεκτών, όπως π.χ. σε παράκτιες περιοχές.

Οι εξισώσεις (5.2) μπορεί να ολοκληρωθούν και σε δεύτερη διάσταση, έστω κατά z, οπότε προκύπτει η ακόλουθη 1-D διαφορική μορφή

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial (u\Phi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + S_{\Phi} \qquad (5.3)$$

όπου
u = μέση ταχύτητα ροής (m/day) κατά τη διεύθυνση x
D = συντελεστής διασποράς (m^2/day) κατά τη διεύθυνση x

Τα μεγέθη u και D προσδιορίζονται ή υπολογίζονται με διάφορες μεθόδους.

Οι εξισώσεις (5.3) έχουν σημαντικές ομοιότητες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε μαθηματικά μοντέλα ποιότητας νερών 1-D αποδεκτών, όπως π.χ. σε ποταμούς και εκβολές ποταμών.

Αγνοώντας την πραγματική (ακριβή ή προσεγγιστική) μορφή του πεδίου ροής και θεωρώντας τη θεωρητική μορφή ροής της πλήρους ανάμιξης στη μονάδα προκύπτει η ακόλουθη 0-D διαφορική μορφή

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = +S_{\Phi} \qquad (5.4)$$

5.2.1.2 Αριθμητική μορφή εξισώσεων των μοντέλων

Η διαφορική εξίσωση (5.4) μιας ποιοτικής παραμέτρου Φ (g/m^3) στον όγκο V (m^3) μιας 0-D μονάδας ή στρώματος-τμήματος που διαιρείται μια 1-D μονάδα (εξίσωση 5.3) γράφεται στην ακόλουθη μορφή [20]

$$\frac{d\Phi}{dt} \cdot V = M_{in} - M_{out} \pm M_d + M_p \qquad (5.5)$$

όπου
dt = διαφορικό χρόνου (day)
M_{in} = φορτίο εισροής στη μονάδα ή το στρώμα (g/day)
M_{out} = φορτίο εκροής από τη μονάδα ή το στρώμα (g/day)
M_d = ρυθμός μεταφοράς μάζας της ποιοτικής παραμέτρου εξαιτίας διάχυσης ή διασποράς (g/day)
M_p = ρυθμός μεταβολής μάζας της ποιοτικής παραμέτρου (g/day) εξαιτίας φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών

Η εξίσωση (5.5) ολοκληρώνεται στους όγκους του κάθε στρώματος και εφαρμόζοντας ρητό σχήμα χρονικής ολοκλήρωσης προκύπτει η ακόλουθη αριθμητική εξίσωση

$$\Phi_i = \Phi_i^0 + \left(M_{in} - M_{out} \pm M_d + M_p\right)^0 \cdot \frac{dt}{dV_i} = \Phi_i^0 + \left(M_{in} - M_{out} \pm M_d\right)^0 \cdot \frac{dt}{dV_i} + M_p^0 \cdot \frac{dt}{dV_i} \quad (5.6)$$

όπου
Φ_i^0 = συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)
Φ_i = συγκέντρωση της ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή t +Δt (g/m^3)
dt = χρονικό βήμα (days)
dV_i = όγκος της μονάδας ή του στρώματος i (m^3)

Το δεξιό μέλος της εξίσωσης (5.6) αναφέρεται στη χρονική στιγμή t, δηλ. είναι γνωστό. Στη συνέχεια και χάριν απλότητας παραλείπεται ο συμβολισμός της χρονικής στιγμής t με εκθέτη 0 από τα φορτία, οπότε η εξίσωση (5.6) γράφεται

$$\Phi_i = \Phi_i^0 + \left(M_{in} - M_{out} \pm M_d\right) \cdot \frac{dt}{dV_i} + M_p \frac{dt}{dV_i} \quad (5.6)$$

Τα φορτία εισροής στη μονάδα M_{in}, θεωρούνται ως δεδομένα.

Τα φορτία εκροής, M_{out}, υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση

$$M_{out} = Q_{out} \cdot \Phi_{out}^0 \quad (5.7)$$

όπου
Φ^0_{out} = συγκέντρωση της παραμέτρου στην εκροή τη χρονική στιγμή t (g/m^3)
Q_{out} = παροχή εκροής από τη μονάδα (m^3/day)

Τα φορτία M_p, δηλ. οι ρυθμοί μεταβολής μάζας των ποιοτικών παραμέτρων (g/day) εξαιτίας φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, υπολογίζονται από κατάλληλες εξισώσεις που περιγράφονται παρακάτω, βλ. εξισώσεις (5.16) μέχρι (5.28).

5.2.2 Μοντέλο μηδενικής διάστασης Activated Sludge Model (ASM1) [3,4]

Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα μαθηματικά μοντέλα μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και ειδικότερα μονάδων ενεργού ιλύος βασίζονται στο μοντέλο ASM1 [3,4] της IAWQ. Με το μοντέλο αυτό προσομοιώνονται τα συστήματα ενεργού ιλύος, στα οποία πραγματοποιούνται α) οξείδωση των ενώσεων άνθρακα, β) νιτροποίηση και γ) απονιτροποίηση.

Στη συνέχεια περιγράφονται α) οι ποιοτικές παράμετροι του μοντέλου, β) οι διεργασίες και εξισώσεις περιγραφής τους και γ) οι συντελεστές των εξισώσεων.

5.2.2.1 Ποιοτικές παράμετροι

Στο μοντέλο ASM1 χρησιμοποιούνται οι ποιοτικές παράμετροι με τους συμβολισμούς και την αρίθμηση του Πίνακα 5.1 Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και το είδος της ποιοτικής παραμέτρου ακολουθώντας τη διάκριση σχετικής βιβλιογραφίας:
1) Διαλυμένες ανόργανες ουσίες (Dissolved Inorganic Matter, DIM)
2) Διαλυμένες οργανικές ουσίες (Dissolved Organic Matter, DOM)
3) Σωματιδιακές οργανικές ουσίες (Particulate Organic Matter, POM)
4) Πρωτοβάθμιοι παραγωγικοί οργανισμοί (Primary Producers, PP)
5) Δευτεροβάθμιοι καταναλωτικοί οργανισμοί (Secondary Consumers, SC)
6) Αποσυνθετικοί οργανισμοί (Decomposers, DC)

Πίνακας 5.1: Ποιοτικές παράμετροι του μοντέλου ASM1 [20].

Αρίθμηση	Ποιοτική παράμετρος	Σύμβολο	Είδος
i=1	Αδρανής (μη βιοδιασπάσιμη-βιολογικά αδρανής) διαλυμένη οργανική ύλη	S_I	DOM
i=2	Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη	S_S	DOM
i=3	Αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη	X_I	POM
i=4	Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη	X_S	POM
i=5	Ετερότροφη βιομάζα	X_{BH}	DC
i=6	Αυτότροφη βιομάζα	X_{BA}	DC
i=7	Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα αποσύνθεσης της βιομάζας	X_P	POM
i=8	Διαλυμένο οξυγόνο	S_O	DIM
i=9	Νιτρικό άζωτο	S_{NO}	DIM
i=10	Αμμωνιακό άζωτο	S_{NH}	DIM
i=11	Οργανικό άζωτο	S_{ND}	DOM
i=12	Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο	X_{ND}	POM
i=13	Ολική αλκαλικότητα	S_{AL}	DIM

Από τον πίνακα 5.1 διαπιστώνεται ότι δεν χρησιμοποιούνται στο μοντέλο πρωτοβάθμιοι παραγωγικοί οργανισμοί (Primary Producers, PP) και δευτεροβάθμιοι καταναλωτικοί οργανισμοί (Secondary Consumers, SC), αλλά θεωρούνται μόνο αποσυνθετικοί οργανισμοί (Decomposers, DC), οι οποίοι εκπροσωπούνται από την ετερότροφη και την αυτότροφη βιομάζα.

Έτσι, θεωρούνται οι ακόλουθες ποιοτικές παράμετροι της μονάδας ενεργού ιλύος:

(1) Χημικές ποιοτικές παράμετροι

(α) Διαλυμένες ανόργανες ουσίες (DIM). Χρησιμοποιούνται οι μορφές i) του νιτρικού αζώτου και ii) του αμμωνιακού αζώτου, iii) του διαλυμένου οξυγόνου και iv) της ολικής αλκαλικότητας.

- Το νιτρικό άζωτο S_{NO} (i=9) παράγεται κατά την αερόβια ανάπτυξη των αυτότροφων βακτήριων και απομακρύνεται με τη διεργασία της απονιτροποίησης (ανοξική ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας).
- Το αμμωνιακό άζωτο S_{NH}, (i=10) δημιουργείται με την αμμωνιοποίηση του διαλυμένου βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου και απομακρύνεται κατά την ανάπτυξη της βιομάζας. Μεγαλύτερη απομάκρυνση γίνεται κατά την χρησιμοποίησή του ως πηγής ενέργειας στη διεργασία της απονιτροποίησης (αερόβια ανάπτυξη της αυτότροφη βιομάζας).
- Το διαλυμένο οξυγόνο S_O (i=8) καταναλώνεται με την αερόβια ανάπτυξη των ετερότροφων και αυτότροφων βακτήριων.
- Η ολική αλκαλικότητα S_{AL} (i=13) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ισχύος της παραδοχής του σταθερού pH που γίνεται στο μοντέλο. Έτσι, όταν δεν είναι επαρκής η ρυθμιστική ικανότητα των λυμάτων κατά τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση, αναμένονται μεταβολές στις τιμές της αλκαλικότητας.

(β) Διαλυμένες οργανικές ουσίες (DOM). Θεωρούνται οι ακόλουθες μορφές:

- Αδρανής (μη βιοδιασπάσιμη-βιολογικά αδρανής) διαλυμένη οργανική ύλη S_I (i=1), η οποία δεν λαμβάνει μέρος στις βιολογικές διεργασίες και εξέρχεται με συγκέντρωση ίση με τη συγκέντρωση εισροής .
- Εύκολα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη S_S (i=2), η οποία βρίσκεται σε διαλυμένη μορφή και αποτελείται από απλά μόρια. Καταναλώνεται κατά την ανάπτυξη των ετερότροφων βσκτηριδίων (σε αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες) και δημιουργείται κατά τη διεργασία της υδρόλυσης της σωματιδιακής οργανικής ύλης (η οποία δεσμεύεται στις κροκίδες).
- Οργανικό άζωτο S_{ND} (i=11), το οποίο δημιουργείται κατά την υδρόλυση του σωματιδιακού οργανικού αζώτου και απομακρύνεται κατά την αμμωνιοποίηση (μετατροπή του σε αμμωνιακό άζωτο).

(γ) Σωματιδιακές οργανικές ουσίες (POM). Θεωρούνται οι ακόλουθες μορφές:

- Αδρανής αιωρούμενη οργανική ύλη X_I (i=3), η οποία δεσμεύεται στην ενεργό ιλύ και απομακρύνεται με την περίσσεια ιλύος. Δεν λαμβάνει μέρος στις βιολογικές διεργασίες.
- Αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη X_S (i=4), η οποία βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή και αποτελείται από σύνθετα μόρια. Απομακρύνεται με τη διεργασία της υδρόλυσης και παράγεται κατά την αποσύνθεση της ετερότροφης και αυτότροφης βιομάζας.
- Σωματιδιακά μη βιοδιασπάσιμα προϊόντα της αποσύνθεσης της βιομάζας X_P (i=7), τα οποία θεωρούνται ότι είναι αδρανή και δεν συμμετέχουν στις βιολογικές διεργασίες.
- Σωματιδιακό βιοδιασπάσιμο οργανικό άζωτο X_{ND} (i=12), το οποίο αυξάνεται κατά την αποσύνθεση της ετερότροφης και αυτότροφης βιομάζας, i_{XB}, εκτός της ποσότητας η οποία συσχετίζεται με τα αδρανή σωματιδιακά προϊόντα, f_{PiXP}, και μειώνεται κατά την αμμωνιοποίηση.

(2) Βιολογικές ποιοτικές παράμετροι. Θεωρούνται οι ακόλουθες μορφές βιομάζας:

- Η ετερότροφη βιομάζα, X_{BH} (i=5), η οποία αυξάνεται κατά την κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης τροφής σε αερόβιες ή ανοξικές συνθήκες.
- Η αυτότροφη βιομάζα, X_{BA} (i=6), η οποία αυξάνεται κατά τη νιτροποίηση κα μειώνεται κατά τις διεργασίες αποσύνθεσης, όπως ενδογενούς μεταβολισμού, θανάτου και κατανάλωσης από ανώτερους οργανισμούς.

Οι συγκεντρώσεις των ποιοτικών παραμέτρων (με εξαίρεση τα $S_{NO,}$ S_{NH} και S_{AL}) έχουν μονάδες συγκέντρωσης COD (g/m^3 COD). Η συγκέντρωση των VSS στο σύστημα ενεργού ιλύος είναι ίση με το άθροισμα των ακόλουθων ποιοτικών χαρακτηριστικών: $X_{S,}$ X_{BH}, $X_{BA,}$ X_P, και X_I. Για τη μετατροπή από μονάδες COD σε μονάδες VSS εφαρμόζεται κατάλληλος στοιχειομετρικός συντελεστής.

5.2.2.2 Διεργασίες και εξισώσεις περιγραφής τους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι 8 διεργασίες του μοντέλου ASM1, οι οποίες συμβολίζονται ως Δ1 μέχρι Δ8 (Διεργασία 1 μέχρι 8), ακολουθώντας την αρίθμηση του μοντέλου ASM1 (j=1 μέχρι 8). Οι ρυθμοί πραγματοποίησης των διεργασιών συμβολίζονται με ρ_1 μέχρι ρ_8 (g/day).

Δ1. Αερόβια ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας (j=1).Περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\rho_1 = \mu_H \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O}\right) \cdot X_{BH} \quad (5.8)$$

όπου
μ_H = μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης της ετερότροφης βιομάζας (1/day)
K_S = συντελεστής (σταθερά ημικορεσμού) ανάπτυξης της ετερότροφης βιομάζας (g /m^3 COD)
K_{OH} = συντελεστής ημικορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για την ετερότροφη βιομάζα (g /m^3 COD)

Οι συντελεστές K_{OH} και K_S λειτουργούν ως «διακόπτες», που «ανοίγουν» ή «κλείνουν» επιτρέποντας ή όχι την αερόβια ανάπτυξη της βιομάζας, ανάλογα με τις τιμές των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου και της τροφής.

Κατά τη διεργασία αυτή πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

(1) Ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας

$$AER_{XBH} = +1\rho_1 \quad (5.8α)$$

(2) Κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης S_S

$$AER_{SS} = -\frac{1}{Y_H}\rho_1 \quad (5.8β)$$

όπου
Y_H = συντελεστής παραγωγής ετερότροφων βακτήριων (g κυτταρικού COD που σχηματίζεται/g COD που οξειδώνεται), ο οποίος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης τροφής και των ετερότροφων βακτήριων

(3) Κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου

$$AER_{SO} = -\frac{1-Y_H}{Y_H}\rho_1 \quad (5.8γ)$$

(4) Ενσωμάτωση αμμωνιακού αζώτου στην κυτταρική μάζα

$$AER_{SNH} = -i_{XB}\rho_1 \quad (5.8δ)$$

όπου
i_{XB} = περιεκτικότητα της βιομάζας σε άζωτο (g N/g COD βιομάζας). Θεωρώντας ότι η κυτταρική μάζα περιγράφεται από τον τύπο $C_5H_7O_2N$ υπολογίζεται ότι ο i_{XB} έχει τιμή ίση με 0.086.

(5) Μεταβολή της αλκαλικότητας

$$AER_{SAL} = -\frac{i_{XB}}{14}\rho_1 \quad (5.8\varepsilon)$$

Δ2. Ανοξική ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας (j=2).Περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\rho_2 = \mu_H \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right) \cdot \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O}\right) \cdot \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{SNO}}\right) \cdot n_g \cdot X_{BH} \quad (5.9)$$

όπου
K_{NO} = συντελεστής ημικορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για τα νιτρικά (g NO_3-N/m^3)
n_g = ποσοστό βιομάζας που πραγματοποιεί τη νιτροποίηση (-)

Κατά τη διεργασία αυτή πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

(1)Ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας

$$ANO_{XBH} = +1\rho_2 \quad (5.9\alpha)$$

(2) Κατανάλωση της εύκολα βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης S_S

$$ANO_{SS} = -\frac{1}{Y_H}\rho_2 \quad (5.9\beta)$$

(3) Κατανάλωση νιτρικών

$$ANO_{SNO} = -\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}\rho_2 \quad (5.9\gamma)$$

(4) Ενσωμάτωση αμμωνιακού αζώτου στην κυτταρική μάζα

$$ANO_{SNH} = -i_{XB} \cdot \rho_2 \qquad (5.9\delta)$$

(5) Μεταβολή της αλκαλικότητας

$$ANO_{SAL} = +\left(\frac{1-Y_H}{14\times 2.86\times Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}\right)\rho_2 \qquad (5.9\varepsilon)$$

Δ3. Αερόβια ανάπτυξη της αυτότροφη βιομάζας (j=3).Περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\rho_3 = \mu_A \cdot \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}}\right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O}\right) \cdot X_{BA} \qquad (5.10)$$

όπου
μ_A = μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης της αυτότροφης βιομάζας (1/day)
K_{NH} = συντελεστής (σταθερά ημικορεσμού) ανάπτυξης της αυτότροφης βιομάζας (g NH_3-N /m^3)
K_{OA} = συντελεστής ημικορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου για την αυτότροφη βιομάζα (g COD/m^3)

Οι συντελεστές K_{OA} και K_{NH} λειτουργούν ως «διακόπτες», που «ανοίγουν» ή «κλείνουν» επιτρέποντας ή όχι την αερόβια ανάπτυξη της αυτότροφης βιομάζας, ανάλογα με τις τιμές των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου και του αμμωνιακού αζώτου.

Κατά τη διεργασία αυτή πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

(1) Ανάπτυξη της αυτότροφης βιομάζας

$$NIT_{XBA} = +1\rho_3 \qquad (5.10\alpha)$$

(2) Αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών

$$NIT_{SNO} = +\frac{1}{Y_A}\rho_3$$

(5.10β)

όπου
Y_A = συντελεστής παραγωγής αυτότροφων βακτήριων (g κυτταρικού COD που σχηματίζεται/g N που οξειδώνεται). Ο συντελεστής Y_A αναφέρεται στη συνδυασμένη ανάπτυξη της Νιτροσομονάδας και του Νιτροβακτηριδίου. Η θεωρητική τιμή του Y_A είναι ίση με 0.24 και υπολογίζεται θεωρώντας ότι απαιτούνται 4.33g οξυγόνου ανά 1g νιτρικού αζώτου που σχηματίζεται.

(3) Κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου

$$NIT_{SO} = -\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}\rho_3 \qquad (5.10\gamma)$$

(4) Κατανάλωση του αμμωνιακού αζώτου (ως πηγή ενέργειας) για την ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτήριων και ενσωμάτωση ποσότητάς του στη βιομάζα

$$NIT_{SNH} = -\frac{1}{Y_A}\rho_3 - i_{XB}\rho_3 \qquad (5.10\delta)$$

(5) Μεταβολή της αλκαλικότητας

$$NIT_{SAL} = \left(-\frac{i_{XB}}{14} + \frac{1}{7 \times Y_A}\right)\rho_3 \qquad (5.10\varepsilon)$$

Δ4. Αποσύνθεση ετερότροφης βιομάζας (j=4). Περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\rho_4 = +b_H x_{BH} \qquad (5.11)$$

όπου
b_H = ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης της ετερότροφης βιομάζας (1/day)

Η αποσύνθεση της ετερότροφης βιομάζας έχει αποτέλεσμα τη μετατροπή της σε συνδυασμό σωματιδιακών προϊόντων και αργά βιοδιασπάσιμου υποστρώματος, δηλ. πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

(1) Αποσύνθεση της ετερότροφης βιομάζας

$$DECH_{XBH} = -1\rho_4 \quad (5.11\alpha)$$

(2) Αύξηση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης

$$DECH_{XS} = (1 - f_P) \cdot \rho_4 \quad (5.11\beta)$$

όπου
f_P = συντελεστής σχηματισμού αδρανών σωματιδιακών προϊόντων (-)

(3) Αύξηση των σωματιδιακών μη βιοδιασπάσιμων προϊόντων αποσύνθεσης της βιομάζας

$$DECH_{XP} = +f_P\rho_4 \quad (5.11\gamma)$$

(4) Αύξηση του σωματιδιακού βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου

$$DECH_{XND} = +(i_{XB} - f_P i_{XP}) \cdot \rho_4 \quad (5.11\delta)$$

όπου
i_{XP} = περιεκτικότητα της ενδογενούς βιομάζας σε άζωτο (g N/g COD στην ενδογενή βιομάζα). Θεωρώντας ότι η ενδογενής βιομάζα περιέχει λιγότερο άζωτο, μπορεί να τεθεί i_{XP} =0.06.

Δ5. Αποσύνθεση αυτότροφης βιομάζας (j=5). Η διεργασία αντιμετωπίζεται όπως η Δ4 και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\rho_5 = +b_A x_{BA} \quad (5.12)$$

όπου
b_A = ειδικός ρυθμός αποσύνθεσης της αυτότροφης βιομάζας (1/day)

Η διεργασία αυτή έχει αποτέλεσμα τη μετατροπή της βιομάζας σε σωματιδιακά προϊόντα και αργά βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα, δηλ. πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

(1) Αποσύνθεση της ετερότροφης βιομάζας

$$DECA_{XBA} = -1\rho_5 \quad (5.12\alpha)$$

(2) Αύξηση της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης

$$DECA_{XS} = (1 - f_P)\cdot \rho_5 \quad (5.12\beta)$$

(3) Αύξηση των σωματιδιακών μη βιοδιασπάσιμων προϊόντων αποσύνθεσης της βιομάζας

$$DECA_{XP} = +f_P\rho_5 \quad (5.12\gamma)$$

(4) Αύξηση του σωματιδιακού βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου

$$DECA_{XND} = +(i_{XB} - f_P i_{XP})\rho_5 \quad (5.12\delta)$$

Δ6. Αμμωνιοποίηση (j=6). Το διαλυμένο οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνιακό άζωτο σύμφωνα με την ακόλουθη εμπειρική εξίσωση

$$\rho_6 = K_\alpha S_{ND} X_{BH} \quad (5.13)$$

όπου
K_α = ρυθμός αμμωνιοποίησης (m^3 COD/g day)

Οι εξισώσεις μεταβολής των συγκεντρώσεων του οργανικού αζώτου και της αμμωνίας εκφράζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$AMO_{SND} = -1\rho_6 \quad (5.13\alpha)$$

$$AMO_{SNH} = +1\rho_6 \quad (5.13\beta)$$

Κατά τη διεργασία αυτή παρατηρείται αύξηση της αλκαλικότητας, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση

$$AMO_{SAL} = +\frac{1}{14}\rho_6 \quad (5.13\gamma)$$

Δ7. Υδρόλυση αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης (j=7). Περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\rho_7 = K_H \cdot \left(\frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \frac{X_S}{X_{BH}}} \right) \cdot \left[\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + n_h \cdot \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \cdot \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_O} \right) \right] \cdot X_{BH} \quad (5.14)$$

όπου

K_H = μέγιστος ειδικός ρυθμός υδρόλυσης (g αργά βιοδιασπάσιμου COD/g κυτταρικού COD day)

n_h = συντελεστής (-), ο οποίος εκφράζει την επίδραση του ρυθμού υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης σε ανοξικές συνθήκες, σε σύγκριση με τις αντίστοιχης σε αερόβιες συνθήκες

K_X = συντελεστής ημικορεσμού για την υδρόλυση (g αργά βιοδιασπάσιμου COD/g κυτταρικού COD)

Οι εξισώσεις μεταβολής των συγκεντρώσεων των X_S και S_S είναι οι ακόλουθες

$$HYD_{XS} = -1\rho_7 \quad (5.14\alpha)$$

$$HYD_{SS} = +1\rho_7 \quad (5.14\beta)$$

Δ8. Υδρόλυση βιοδιασπάσιμου οργανικού αζώτου (j=8). Θεωρείται ότι το οργανικό άζωτο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στην αργά βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, οπότε ο ρυθμός υδρόλυσης του προσροφημένου οργανικού αζώτου είναι ανάλογος του ρυθμού υδρόλυσης της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης, δηλ.

$$\rho_8 = \rho_8 \cdot \left(\frac{X_{ND}}{X_S} \right) \quad (5.15)$$

Η μεταβολή των συγκεντρώσεων των X_{ND} και S_{ND} εκφράζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$HYD_{XND} = -1\rho_8 \quad (5.15\alpha)$$

$$HYD_{SND} = +1\rho_8 \quad (5.15\beta)$$

5.2.2.3 Εξισώσεις διεργασιών ποιοτικών παραμέτρων

Με βάση τα παραπάνω ο όρος των διεργασιών της γενικής εξίσωσης (5.6) για κάθε μια από τις 13 ποιοτικές παραμέτρους του μοντέλου γράφεται ως εξής:

S_I $$M_{p,SI}\frac{dt}{dV_i}=0 \quad (5.16)$$

S_S $$M_{p,SS}\frac{dt}{dV_i}=AER_{SS}+ANO_{SS}HYD_{SS} \quad (5.17)$$

X_I $$M_{p,XI}\frac{dt}{dV_i}=0 \quad (5.18)$$

X_S $$M_{p,XS}\frac{dt}{dV_i}=DECH_{XS}+DECA_{XS}+HYD_{XS} \quad (5.19)$$

X_{BH} $$M_{p,XBH}\frac{dt}{dV_i}=AER_{XBH}+ANO_{XBH}+DECH_{XBH} \quad (5.20)$$

X_{BA} $$M_{p,XBA}\frac{dt}{dV_i}=NIT_{XBA}+DECA_{XBA} \quad (5.21)$$

X_P $$M_{p,XP}\frac{dt}{dV_i}=DECH_{XP}+DECA_{XP} \quad (5.22)$$

S_O $$M_{p,SO}\frac{dt}{dV_i}=AER_{SO}+NIT_{SO} \quad (5.23)$$

S_{NO} $$M_{p,SNO}\frac{dt}{dV_i}=ANO_{SNO}+NIT_{SNO} \quad (5.24)$$

S_{NH} $$M_{p,SNH}\frac{dt}{dV_i}=AER_{SNH}+ANO_{SNH}+NIT_{SNH}+AMO_{SNH} \quad (5.25)$$

S_{ND} $$M_{p,SND}\frac{dt}{dV_i}=AMO_{SND}+HYD_{SND} \quad (5.26)$$

X_{ND} $$M_{p,XND}\frac{dt}{dV_i}=DECH_{XND}+DECA_{XND}+HYD_{XND} \quad (5.27)$$

S_{AL} $$M_{p,SAL}\frac{dt}{dV_i}=AER_{SAL}+ANO_{SAL}+NIT_{SAL}+AMO_{SAL} \quad (5.28)$$

5.2.2.4 Συντελεστές εξισώσεων

Οι 17 συντελεστές των εξισώσεων του μοντέλου μπορούν να υπολογιστούν πειραματικά ή από εμπειρικές και θεωρητικές εξισώσεις.

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για τους συντελεστές. Οι πρώτοι 4 συντελεστές αποτελούν τους στοιχειομετρικούς συντελεστές και οι υπόλοιποι 13 τις κινητικές παραμέτρους. Οι τιμές του πίνακα 5.2 αφορούν λύματα με θερμοκρασία 10-20^{o}C και σταθερό pH κοντά στην ουδέτερη περιοχή.

Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές των συντελεστών του μοντέλου ASM1 [20].

Συντελεστής (μονάδες)	**Εύρος τιμών**
Y_A (g κυτταρικού COD που σχηματίζεται/g N που οξειδώνεται)	0.07 – 0.28
Y_H (g κυτταρικού COD που σχηματίζεται/g COD που οξειδώνεται)	0.46 – 0.69
f_P (-)	0.08
i_{XB} (g N/g COD βιομάζας)	0.086
i_{XP} (g N/g COD ενδογενούς βιομάζας)	0.06
μ_H (1/day)	3.0 – 13.2
K_S (g/m^3 COD)	10 – 180
K_{OH} (g/m^3 COD)	0.01 – 0.15
b_A (1/day)	0.05 – 0.15
K_{NO} (g NO^3-N/m^3)	0.1 – 2.0
b_H (1/day)	0.20 – 0.62
n_g (-)	0.6 – 1.0
n_h (-)	0.4
K_H (g αργά βιοδιασπάσιμου COD/g κυτταρικού COD day)	1.0 – 3.0
K_X (g αργά βιοδιασπάσιμου COD/g κυτταρικού COD)	0.01 – 0.03
μ_A (1/day)	0.34 – 0.65
K_{NH} (g NH^3-N/m^3)	0.6 – 3.6
K_{OA} (g/m^3 COD)	0.5 – 2.0
K_α (m^3 COD/g.day)	0.08

Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού πραγματοποίησης των διεργασιών, η οποία εκφράζεται με την αύξηση των τιμών, κυρίως των συντελεστών μ, b ή k_h. Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης Arrhenius.

5.2.3 Εμπορικά προγράμματα

Στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφορα προγράμματα-κώδικες, στα οποία εφαρμόζονται μαθηματικά μοντέλα τύπου ASM1, για σκοπούς σχεδιασμού, λειτουργίας, έρευνας κ.α. όπως [20]:

- Σχεδιασμός νέων ΕΕΑΑ.
- Βελτιστοποίηση λειτουργίας υφιστάμενων ΕΕΑΑ με ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας, κυρίως του κόστους αερισμού.
- Εξέταση σεναρίων επέμβασης σε υφιστάμενες ΕΕΑΑ για τον περιορισμό του κόστους ή την αντιμετώπιση προβλημάτων.
- Διερεύνηση συμπεριφοράς υφιστάμενων ή νέων ΕΕΑΑ σε περίπτωση μη λειτουργίας ορισμένων μονάδων.
- Εκπαίδευση υπευθύνων και λοιπού προσωπικού λειτουργίας ΕΕΑΑ.
- Πραγματοποίηση έρευνας σε ερευνητικά ιδρύματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

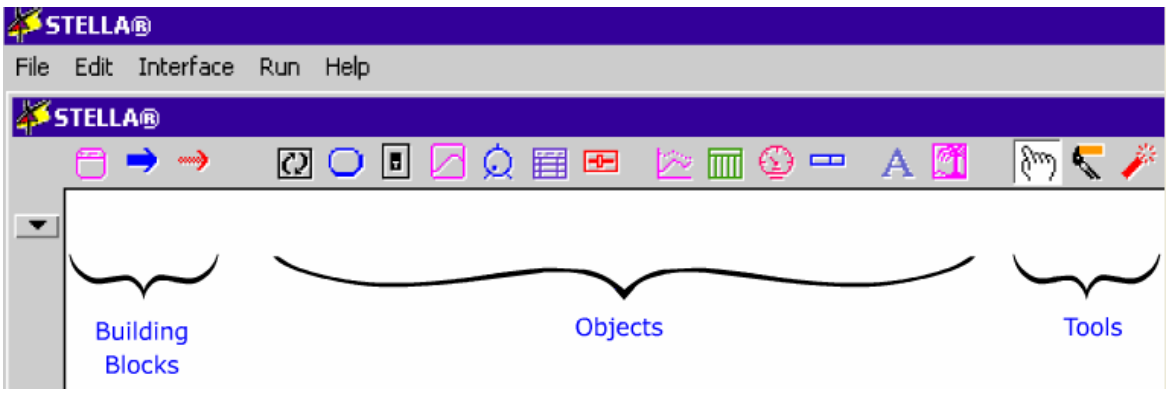
Πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA

Το πρόγραμμα STELLA (Structural Thinking, Experiential Learning Laboratory with Animation) [5,6] είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης χρήσιμο για την κατανόηση δυναμικών φαινομένων, όπως π.χ. της δυναμικής πληθυσμών ή ακόμα και των χημικών αντιδράσεων, το οποίο παρέχει μια απλή, βασισμένη σε εικόνες «γλώσσα» πετυχαίνοντας έτσι την κατανόηση των φαινομένων.

6.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ STELLA

Το πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα:
α) επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας»
β) επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» και
γ) επίπεδο «εξισώσεις».

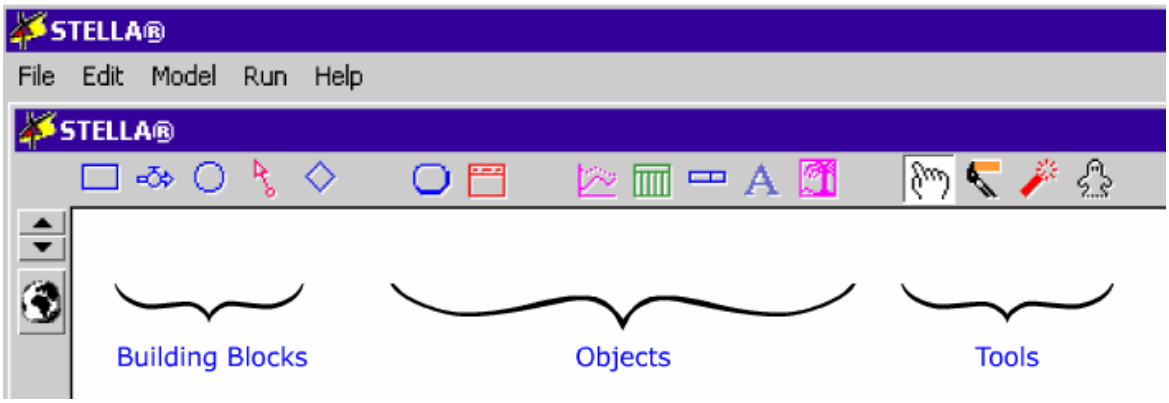
α) Επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας»
Σε αυτό το επίπεδο (σχήμα 6.1) βρίσκουμε τα εργαλεία που χρειάζονται για να «σχεδιάσουμε» με λεπτομέρειες το μοντέλο μας. Μπορούμε π.χ. να εισάγουμε δεδομένα, να μεταβάλλουμε τιμές παραμέτρων και να παρακολουθούμε έτσι την πρόοδο του μοντέλου. Καθώς η προσομοίωση προχωρά ο χρήστης μπορεί να επεμβαίνει όποτε θελήσει και έτσι αλληλεπιδρά με το μοντέλο. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο μετατρέπεται σε ένα εργαλείο μάθησης και κατανόησης. Εδώ, δηλαδή, βλέπουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που κάνουμε χρησιμοποιώντας γραφήματα, πίνακες, εργαλεία μεταβολής τιμών παραμέτρων κ.α.



Σχήμα 6.1 Το Επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» (interface level) του προγράμματος προσομοίωσης STELLA [6].

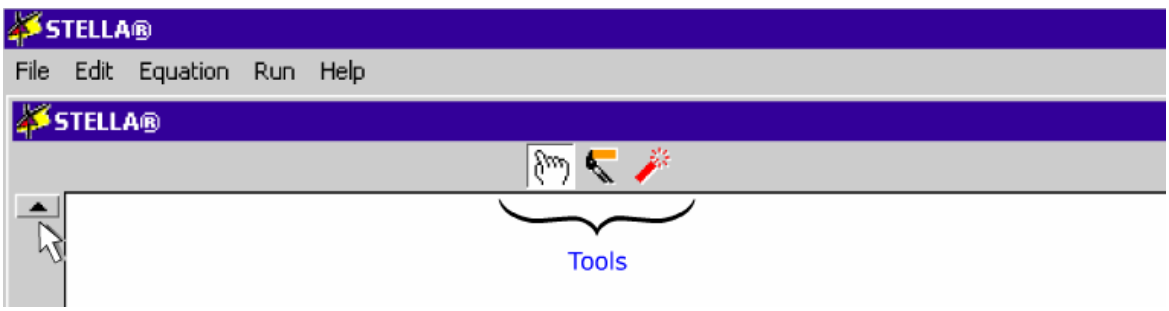
β) Επίπεδο «χάρτης/μοντέλο»: Κάτω από το επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» υπάρχει το

επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (σχήμα 6.2). Το πρόγραμμα ανοίγει στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο». Σε αυτό το επίπεδο αναπτύσσεται το μοντέλο με τη μορφή χάρτη, τον οποίο μετατρέπουμε σε μοντέλο το οποίο μπορεί να προσομοιωθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Εδώ θα εισάγουμε κάποιες εξισώσεις και κάποιες τιμές και το μοντέλο είναι έτοιμο.



Σχήμα 6.2 Το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (map/model level) του προγράμματος προσομοίωσης STELLA [6].

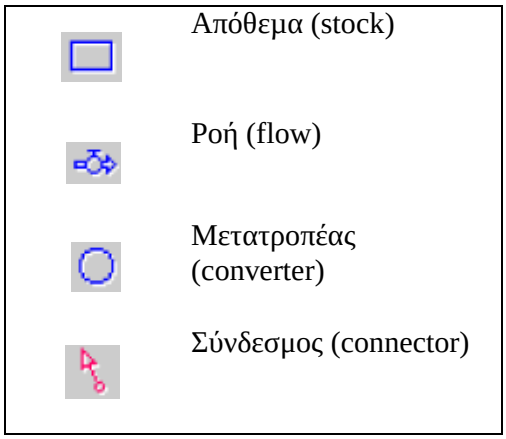
γ) Κατώτερο επίπεδο ή επίπεδο «εξισώσεις»: Τέλος, κάτω από το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» βρίσκεται το επίπεδο «εξισώσεις» (σχήμα 6.3). Όσο κατασκευάζουμε ένα χάρτη-μοντέλο το πρόγραμμα δημιουργεί εξισώσεις βασισμένες στην εικόνα που δημιουργούμε. Αυτό το επίπεδο περιέχει την λίστα των εξισώσεων που αποτελούν το μοντέλο, αυτές που δημιουργεί το πρόγραμμα, αλλά και αυτές που προσθέτουμε εμείς. Είναι ένα επίπεδο, το οποίο σπάνια χρειάζεται να ανοίξουμε.



Σχήμα 6.3 Το επίπεδο «εξισώσεις» (Equations) του προγράμματος προσομοίωσης STELLA [6].

6.2 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Μερικά από τα βασικά εργαλεία του προγράμματος (σχήμα 6.4) είναι:



Σχήμα 6.4 Βασικά εργαλεία του προγράμματος [6].

6.2.1 Αποθέματα (stocks)

Τα αποθέματα (σχήμα 6.5) χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν υλικά που συσσωρεύονται. Συσσωρεύουν ό,τι εισέρχεται σε αυτά και αφαιρούν ό,τι εξέρχεται. Τα αποθέματα μπορεί να συσσωρεύουν φυσικά και μη φυσικά υλικά. Τα υλικά είναι κάτι το οποίο μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και να προσδιοριστεί, αλλά και λιγότερο προσδιορίσιμες έννοιες. Έτσι το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα τα υλικά να είναι π.χ. χρήματα, πληθυσμός οργανισμών, αλλά και η ευτυχία.



α) β)

Σχήμα 6.5 Το απόθεμα (stock) α) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA και β) στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο»[6].

6.2.2 Ροές (flows)

Οι ροές (σχήμα 6.6) γεμίζουν (εισροές) και αδειάζουν (εκροές) τα αποθέματα. Θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν αγωγοί που μεταφέρουν τα υλικά από και προς τα αποθέματα.

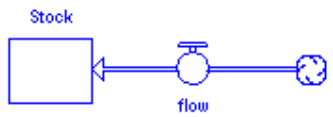


α) β)

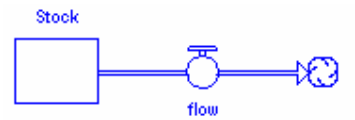
Σχήμα 6.6 Η ροή (flow) α) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA και β) στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» [6].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δυνατότητες σύνδεσης αποθέματος και ροής:

α) εισροή (inflow):



β) εκροή (outflow):



6.2.3 Μετατροπείς (converters)

Οι μετατροπείς (σχήμα 6.7) χρησιμοποιούνται ως εργαλεία προσδιορισμού. Περιέχουν πληροφορίες, οι οποίες μέσω των ροών επηρεάζουν το μοντέλο.

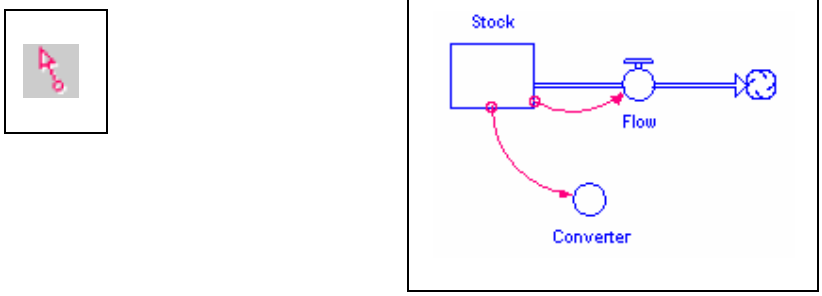


α) β)

Σχήμα 6.7 Ο μετατροπέας (converter) α) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA και β) στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» [6].

6.2.4 Σύνδεσμοι (connectors)

Οι σύνδεσμοι (σχήμα 6.8), όπως φανερώνει και το όνομά τους, συνδέουν τα στοιχεία του μοντέλου μεταξύ τους. Θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ηλεκτρικά καλώδια, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες από το ένα σημείο στο άλλο.

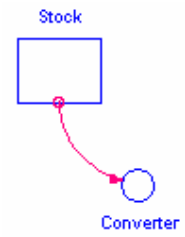


α) β)

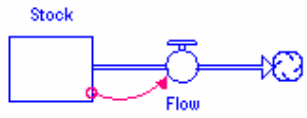
Σχήμα 6.8 Ο σύνδεσμος (connector) α) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA και β) στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο», σε συνδυασμό με άλλα εργαλεία του συστήματος [6].

Παρακάτω φαίνονται οι τέσσερις διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης που υπάρχουν.

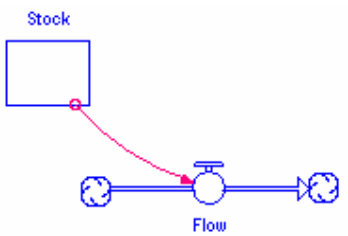
α) Σύνδεση αποθέματος (stock) με μετατροπέα (converter).



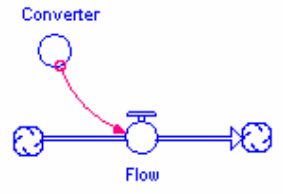
β) Σύνδεση αποθέματος (stock) με ροή (flow).



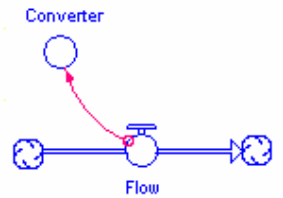
ή



γ) Σύνδεση μετατροπέα (converter) με ροή (flow).



δ) Σύνδεση ροής (flow)με μετατροπέα (converter).



Πρέπει να σημειωθεί ότι σύνδεση μετατροπέα απευθείας με ένα απόθεμα δεν είναι εφικτή. Ο σωστός τρόπος σύνδεσης είναι μέσω μιας ροής.

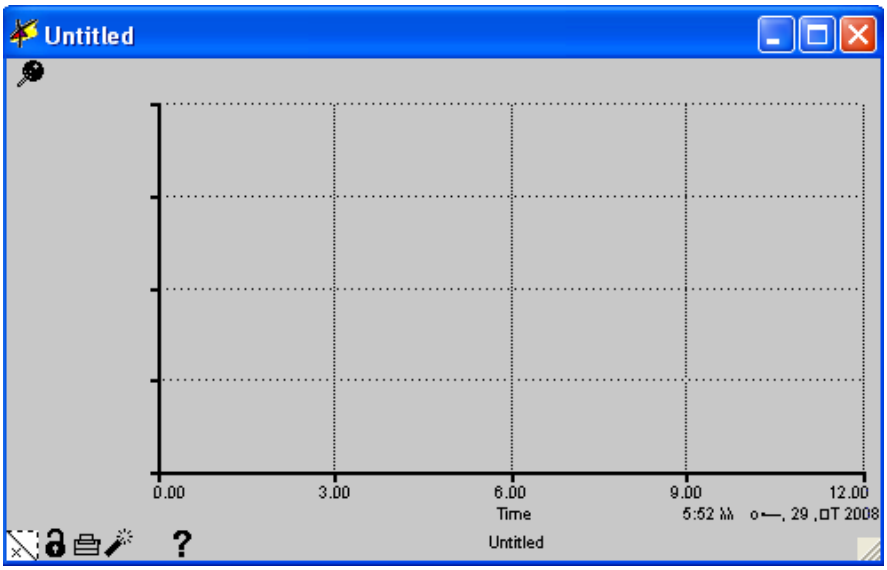
6.2.5. Γραφικές παραστάσεις

Για να δημιουργήσουμε ένα νέο γράφημα όταν βρισκόμαστε στο επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» επιλέγουμε κάνοντας ένα «κλικ» την εικόνα του γραφήματος (σχήμα 6.9) από το βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA και το τοποθετούμε ξανά με ένα «κλικ» στη λευκή επιφάνεια.



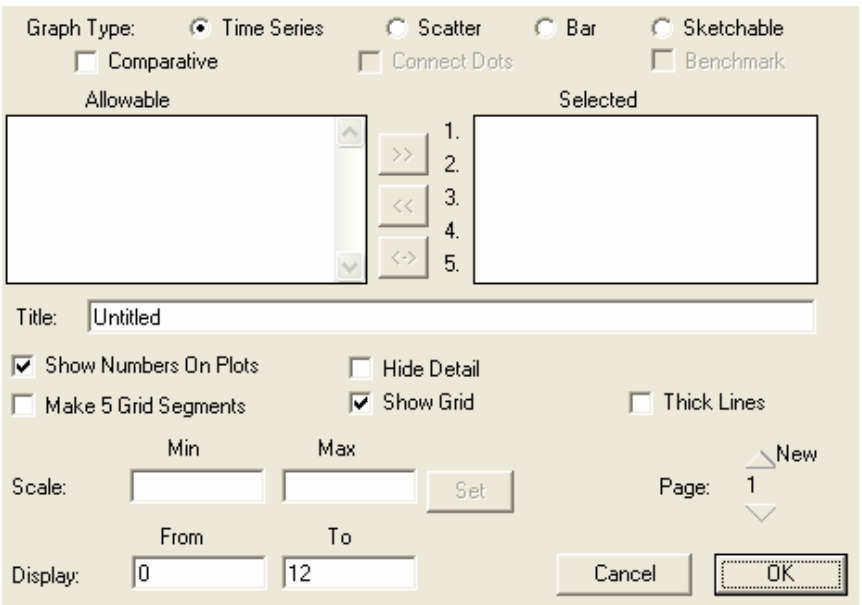
Σχήμα 6.9 Το γράφημα στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA [6].

Έτσι, προκύπτει το ακόλουθο κενό γράφημα (σχήμα 6.10):



Σχήμα 6.10 Δημιουργία νέου κενού γραφήματος στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» [6].

Κάνοντας διπλό «κλικ» στο κενό γράφημα, ανοίγει ένα νέο παράθυρο (σχήμα 6.11).

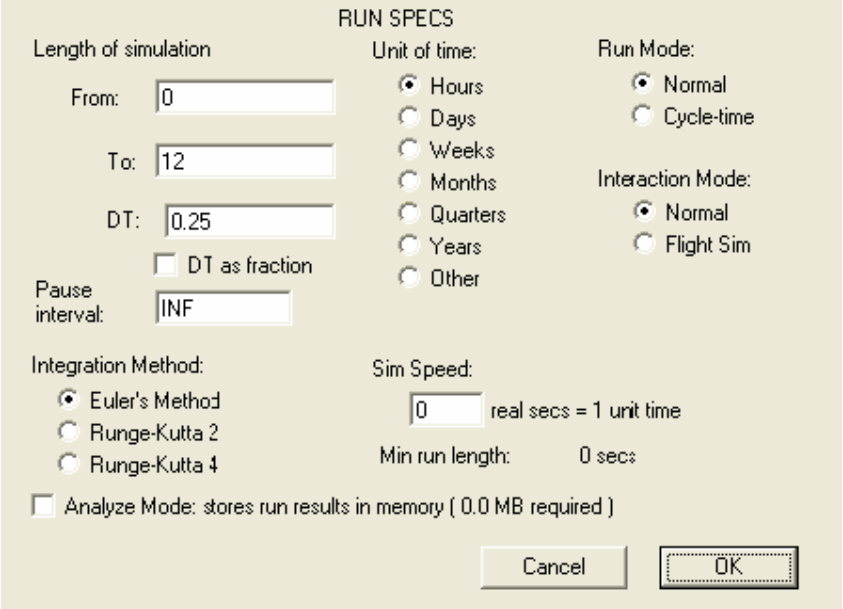


Σχήμα 6.11 Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων γραφήματος [6].

Από την λίστα με τα επιτρεπόμενα (allowable) επιλέγουμε αυτά με τα οποία θέλουμε να δημιουργήσουμε γραφικές παραστάσεις. Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας διάφορων ειδών γραφημάτων. Σε ένα γράφημα χρόνου (time series) π.χ. οι μεταβλητές σχεδιάζονται σε συνάρτηση του χρόνου. Σε ένα συγκριτικό γράφημα μπορούμε να δούμε στους ίδιους άξονες τα αποτελέσματα περισσότερων από ένα μοντέλο.

Από το μενού επάνω στην οθόνη επιλέγουμε Run – Run Specs και εμφανίζεται το

παράθυρο του σχήματος 6.12.

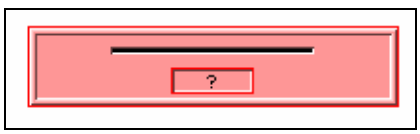


Σχήμα 6.12 Παράθυρο επιλογής χαρακτηριστικών προσομοίωσης [6].

Εδώ μπορούμε μεταξύ άλλων να επιλέξουμε τη μονάδα χρόνου στην οποία θέλουμε να γίνεται η προσομοίωση και το πόσο θα διαρκεί, καθώς και το «βήμα» (DT).

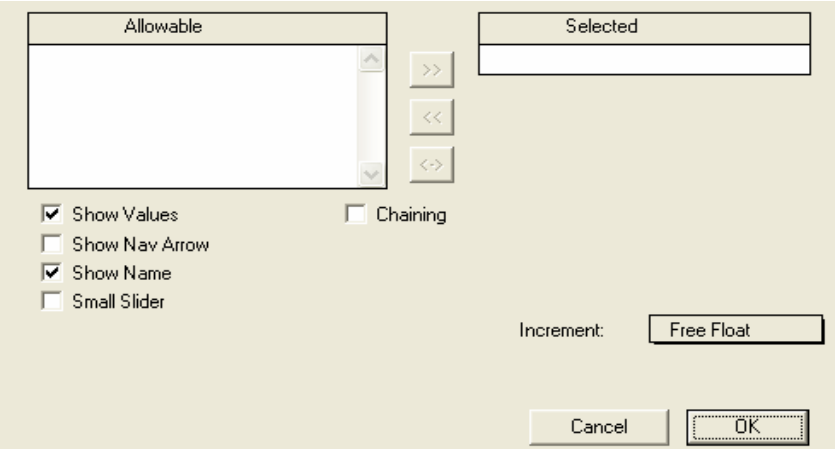
6.2.6 Συσκευές Εισαγωγής Δεδομένων

Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο είναι η συσκευή εισαγωγής δεδομένων με την μορφή κλίμακας (slider input device) (σχήμα 6.13). Η συσκευή αυτή αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές που υπάρχουν στο μοντέλο με κλίμακα τέτοια ώστε να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές τιμές της μεταβλητής και να βλέπουμε κάθε φορά τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας.



Σχήμα 6.13 Η συσκευή εισαγωγής δεδομένων με την μορφή κλίμακας (slider input device) όπως απεικονίζεται στο επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» του προγράμματος προσομοίωσης STELLA [6].

Κάνοντας διπλό κλικ στην εικόνα του σχήματος 6.13 εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 6.14.



Σχήμα 6.14 Παράθυρο ρυθμίσεων συσκευής εισαγωγής δεδομένων με την μορφή κλίμακας (slider input device) [6].

Σε αυτό το παράθυρο επιλέγουμε για ποια παράμετρο θέλουμε να υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της τιμής και αν θέλουμε να αυξομειώνεται με ορισμένο βήμα ή να είναι ελεύθερο (free float).

Ένα άλλο εργαλείο είναι το «numeric display» (σχήμα 6.15) με το οποίο επιλέγουμε για ποια παράμετρο του μοντέλου θα εμφανίζεται η τελική αριθμητική τιμή της προσομοίωσης μας.



Σχήμα 6.15 Το numeric display στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA [6].

Τέλος με το εργαλείο «Dynamite» (σχήμα 6.16) αφαιρούμε ό, τι δε θέλουμε είτε στο μοντέλο είτε στα γραφήματα, στους πίνακες κλπ.



Σχήμα 6.16 Το εργαλείο Dynamite στο μενού του προγράμματος STELLA [6].

6.3 ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την εκκίνηση του μοντέλου και την προβολή των αποτελεσμάτων της

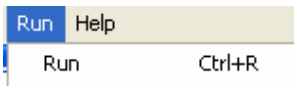
προσομοίωσης υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο τρόποι:

α) Χρησιμοποιώντας το ακόλουθο μενού:

«Κλικ» στο «Run Controller», το οποίο εμφανίζει το διπλανό παράθυρο επιλογών έναρξης, παύσης κ.λ.π.



β) Κάνοντας «κλικ» στο run από το μενού στο πάνω μέρος της οθόνης ή πληκτρολογώντας Ctrl+R.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Δημιουργία Μοντέλου Προσομοίωσης για μια Δεξαμενή Αερισμού ετερότροφης βιομάζας με Ανακυκλοφορία Ενεργού Ιλύος – Αποτελέσματα Μέρος Ι

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο που αναπτύσσεται εδώ είναι ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης των λειτουργιών και των χημικών διαδικασιών – μετατροπών που λαμβάνουν χώρα σε μια δεξαμενή αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος μιας ΕΕΑΑ.

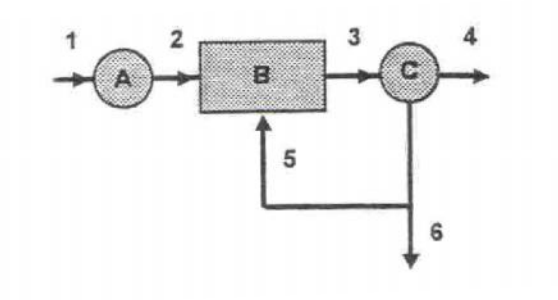
Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος και της ετερότροφης βιομάζας αρχικά με τιμές μεταβλητών που ορίσαμε εμείς λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά αριθμητικά δεδομένα και στοιχεία που προέρχονται από την ΔΕΥΑ Χανίων και στη συνέχεια με διαφορετικές τιμές ορισμένων παραμέτρων (όπως π.χ. της ροής) ώστε να μελετηθεί η επίδραση των αλλαγών αυτών στο μοντέλο. Αυτό το μοντέλο βασίστηκε σε μια εισαγωγή στο «Activated Sludge Model No1», (Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No.1) που έγραψαν οι W. Gujer και M. Henze (1990). Επιπλέον η εφαρμογή του βασίστηκε στην βιβλιογραφία της εκπαιδευτικής προσομοίωσης WAZUSIM, H. in ‘t Veld (1994).

Μια πραγματική εγκατάσταση λυμάτων περιλαμβάνει μια σειρά διασυνδεδεμένων δεξαμενών δευτεροβάθμιας και τριτοβάθμιας επεξεργασίας, οι οποίες είναι κυρίως οι δεξαμενές αερισμού, οι ανοξικές δεξαμενές και οι δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης, στις οποίες λαμβάνουν χώρα κυρίως οι διαδικασίες διάσπασης του COD, της νιτροποίησης, της απονιτροποίησης και της καθίζησης. Το «Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No.1», όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 5, περιγράφει τις διαδικασίες μεταξύ άλλων της διάσπασης του COD, της νιτροποίησης και απονιτροποίησης σε μια σειρά διασυνδεδεμένων δεξαμενών αερισμού (βλέπε κεφάλαιο 5). Το μοντέλο διαχωρίζει μια σειρά ειδών υποστρώματος και βιομάζας (πίνακας 5.1).

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται εδώ στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής περιγράφει τη διάσπαση του COD ενός είδους υποστρώματος από έναν τύπο βιομάζας σε μια δεξαμενή αερισμού με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος από μια δεξαμενή καθίζησης.

7.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ

Η αποσύνθεση οργανικής ύλης-συστατικών από μικροοργανισμούς είναι η βάση της επεξεργασίας της ενεργού ιλύος στις δεξαμενές αερισμού των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Για την εφαρμογή του μοντέλου λήφθηκε υπόψη η απλοποιημένη επεξεργασία λυμάτων που περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1 Σχηματική αναπαράσταση μιας απλοποιημένης εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων ενεργού ιλύος [2].
Α= πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, Β= δεξαμενή αερισμού, C= δευτεροβάθμια ή τελική δεξαμενή καθίζησης, 1= εισροή, 2= εκροή πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης 3= εκροή δεξαμενής αερισμού 4=τελική εκροή, 5= ιλύς ανακυκλοφορίας, 6= περίσσεια ιλύος (waste sludge).

Τα λύματα (1) ρέουν διαμέσω μίας πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης (Α). Ο σκοπός της επεξεργασίας μέσω καθίζησης είναι, όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο 2, η εύκολη-γρήγορη αφαίρεση των στερεών που καθιζάνουν και των υλικών που επιπλέουν. Αυτή η διαδικασία μειώνει τα αιωρούμενα στερεά που περιέχονται στα λύματα. Η εκροή της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης (2) ρέει προς την δεξαμενή αερισμού (Β). Η δεξαμενή αερισμού περιέχει ομάδες βακτήριων, την ενεργό ιλύ. Μια μηχανική διαδικασία διοχετεύει αέρα μέσα στη δεξαμενή. Ο αέρας παρέχει το οξυγόνο που χρειάζονται τα βακτήρια της ενεργού ιλύος για να αναπτυχθούν. Τα βακτήρια μειώνουν τη συγκέντρωση των οργανικών συστατικών του νερού, μετρημένη σε χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD). Τα βακτήρια καταναλώνουν τμήμα των οργανικών συστατικών, παράγοντας νερό και διοξείδιο του άνθρακα και επίσης χρησιμοποιούν ένα τμήμα των οργανικών συστατικών για την ανάπτυξη των κυττάρων τους. Τα βακτήρια σχηματίζουν ομάδες με ειδικό βάρος ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό του νερού [2].

Μετά την επεξεργασία στη δεξαμενή αερισμού τα υγρά απόβλητα (3) ρέουν προς την τελική δεξαμενή καθίζησης (C). Στην τελική δεξαμενή καθίζησης οι ομάδες των βακτήριων της ενεργού ιλύος κατακάθονται στον πυθμένα της δεξαμενής. Δευτεροβάθμια επεξεργασμένο-καθαρό νερό φεύγει από την δεξαμενή αυτή σαν το τελικό εκρέον υγρό (4). Το περιεχόμενο της δεξαμενής αερισμού διατηρείται σε σταθερό όγκο. Έτσι η εισροή από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης ισοδυναμεί με την εκροή προς την τελική δεξαμενή καθίζησης. Εάν αυτές ήταν οι μόνες ροές στο

σύστημα το ποσό της ενεργού ιλύος στη δεξαμενή αερισμού θα μειωνόταν. Έτσι θα υπήρχαν πολύ λίγα βακτήρια για να συνεχιστεί η διαδικασία. Στην τελική δεξαμενή καθίζησης η ενεργός ιλύς καθιζάνει. Η ροή μέρους της ενεργού ιλύος που έχει καθιζάνει από την τελική δεξαμενή καθίζησης πίσω στην δεξαμενή αερισμού διατηρεί τη διαδικασία ενεργού ιλύος. Η ιλύς αυτή ονομάζεται ιλύς ανακυκλοφορίας (5) [2].

Η εισροή θρεπτικών μέσω νέων λυμάτων προκαλεί την αύξηση των βακτήριων στη δεξαμενή αερισμού. Γι' αυτόν το λόγο δεν επιστρέφεται όλη η ιλύς, που καθιζάνει στην τελική δεξαμενή καθίζησης στη δεξαμενή αερισμού. Τμήμα αυτής της ιλύος εξέρχεται του συστήματος σαν περίσσεια ιλύος (waste sludge) για περαιτέρω επεξεργασία (6). Αυτή η ιλύς ρέει από την τελική δεξαμενή καθίζησης σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας ιλύος [2].

7.3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για τη δημιουργία του μοντέλου έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Η διαδικασία μηχανικού αερισμού διατηρεί τη συγκέντρωση οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού σε ένα σταθερό επίπεδο. Αυτή η διαδικασία καταγράφει τη συγκέντρωση του οξυγόνου και διαρκώς προσαρμόζει τον αερισμό στην απαίτηση οξυγόνου μέσα στη δεξαμενή. Οπότε σε αυτό το μαθηματικό μοντέλο η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μια σταθερά. Πιο ρεαλιστικά και πολύπλοκα μοντέλα ενεργού ιλύος περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση του οξυγόνου σαν μεταβλητή (state variable).
- Ο ρυθμός αύξησης της ετερότροφης βιομάζας εξαρτάται από το υπόστρωμα και τη συγκέντρωση του οξυγόνου. Οι σχέσεις υπόστρωμα – ρυθμός αύξησης ετερότροφης βιομάζας και συγκέντρωση οξυγόνου - ρυθμός αύξησης ετερότροφης βιομάζας είναι σύμφωνες με την κινητική που έχει περιγράψει ο Monod (Monod Kinetics), (κεφάλαιο 3.2.4). Δεν μοντελοποιούμε την κατανάλωση του οξυγόνου αυτής της διαδικασίας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας μηχανισμός ελέγχου του αερισμού διατηρεί τη συγκέντρωση του οξυγόνου σταθερή.
- Η διάσπαση των κυττάρων μετατρέπει την ετερότροφη βιομάζα σε/στο υπόστρωμα με κινητική χημικής αντίδρασης πρώτης τάξης και δεν καταναλώνει οξυγόνο.
- Τοποθετήθηκαν σταθερές τιμές στις δεκαπέντε παραμέτρους που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7.5.3.
- Δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία της νιτροποίησης και η ανάπτυξη της αυτότροφης βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού.
- Δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία της απονιτροποίησης σε ανοξικές δεξαμενές που επεξεργάζονται τα εξερχόμενα απόβλητα από την δεξαμενή αερισμού πριν την είσοδό τους στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.
- Δεν ελήφθη υπόψη η εσωτερική ανακυκλοφορία της δεξαμενής αερισμού και της ανοξικής δεξαμενής.

7.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ STELLA

Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από τα εξής τμήματα:

1. **Τρεις μεταβλητές κατάστασης.**
   1.1. Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (Substrate conc SS) με συγκέντρωση Ss [g COD/m3].
   1.2. Ετερότροφη βιομάζα (Heterotrophic biomass XH) με συγκέντρωση XH [g COD/m3].
   1.3. Τελική δεξαμενή καθίζησης (Final settling tank) με συγκέντρωση ιλύος [g COD/m3].

Οι μεταβλητές 1.1 και 1.2 ανήκουν στη δεξαμενή αερισμού και στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι αυτές που την αποτελούν.

2. **Τέσσερις διαδικασίες μετατροπής.**
   2.1. Την αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας με κατανάλωση οργανικού υποστρώματος (XH gowth).
   2.2. Τη διάσπαση-αποδόμηση της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis).
   2.3. Τη διάσπαση-αποδόμηση του υποστρώματος από την ετερότροφη βιομάζα (S breakdown).
   2.4.Την αύξηση του οργανικού υποστρώματος εξαιτίας των παραγόμενων από τη διάσπαση-λύση της ετερότροφης βιομάζας προϊόντων (Lysis products).

3. **Εφτά διαδικασίες μεταφοράς.**
   3.1. Εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (S inflow).
   3.2. Εκροή υποστρώματος (λυμάτων) από τη δεξαμενή αερισμού, (S outflow).
   3.3. Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (RS2).
   3.4. Εκροή ιλύος προς τελική δεξαμενή καθίζησης (XH outflow).
   3.5. Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα (RS).
   3.6. Εκροή περίσσσειας ιλύος προς εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Waste sludge outflow).
   3.7. Εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης (Water outflow).

4. **Την επίδραση της θερμοκρασίας (Temperature) [^{o}C].**

5. **Την επίδραση του ρυθμού ολικής ανάπτυξης μ/ο (rx) [1/days].**

6. **Την επίδραση της ηλικίας ιλύος (sludge age) [days].**

Αναλυτικότερα:

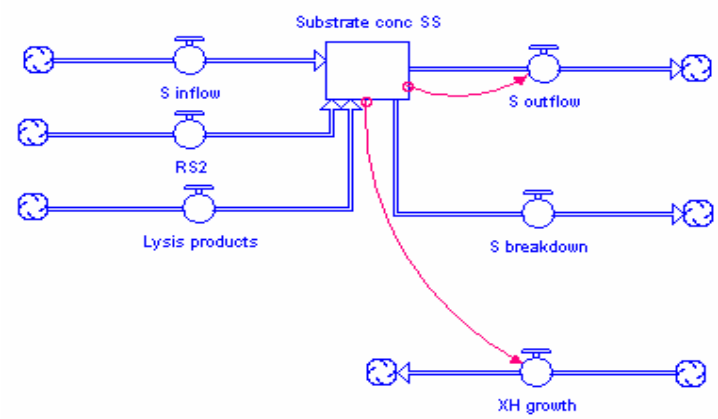
1. Μεταβλητές κατάστασης.

1.1. Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (Substrate conc SS) με συγκέντρωση Ss [g COD/m3].

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος αυξάνεται από (σχήμα 7.2):
α) την εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από την δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (S inflow)
β) τα προϊόντα της διάσπασης της ετερότροφης βιομάζας (Lysis products) και
γ) την εισροή της ιλύος ανακυκλοφορίας (RS2)

και μειώνεται από
α) την εκροή υποστρώματος (S outflow) και
β) την αποδόμηση του ίδιου του υποστρώματος (S breakdown).

Τέλος, το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα επηρεάζει την αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας και την ροή εκροής του υποστρώματος

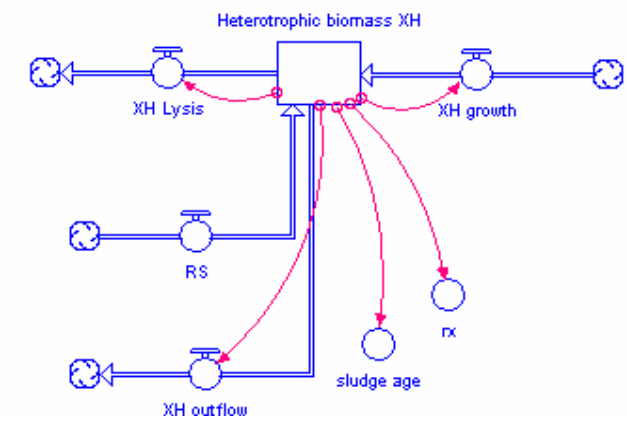


Σχήμα 7.2 Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (Substrate conc SS).

1.2. Ετερότροφη βιομάζα (Heterotrophic biomass XH) με συγκέντρωση XH [g COD/m3].

Η συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας αυξάνεται από (σχήμα 7.3):
α) την κατανάλωση οργανικού υποστρώματος, την ανάπτυξή της δηλαδή (XH growth) και
β) την εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα (RS)
γ) την αρχική συγκέντρωση της βιομάζας, η οποία ορίστηκε σταθερή και ίση με 340 $gCOD/m^3$

και μειώνεται εξαιτίας:
α) της εκροής ιλύος προς την τελική δεξαμενή καθίζησης (XH outflow) και
β) της διάσπασης-αποδόμησης της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis)



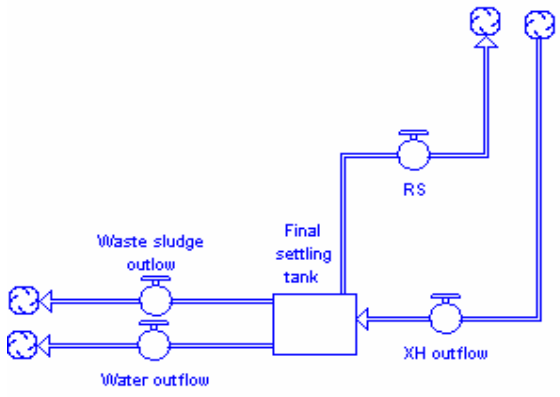
Σχήμα 7.3 Ετερότροφη βιομάζα (Heterotrophic biomass XH).

Τέλος, η ετερότροφη βιομάζα επηρεάζει την ηλικία ιλύος (sludge age) και το ρυθμό ολικής ανάπτυξης των μ/ο (rx).

1.3. Τελική δεξαμενή καθίζησης (Final settling tank) με συγκέντρωση ιλύος [g COD/m3].

Η συγκέντρωση ιλύος στην τελική δεξαμενή καθίζησης (σχήμα 7.4) αυξάνεται από την εκροή ιλύος προς την τελική δεξαμενή καθίζησης από την ετερότροφη βιομάζα (XH outflow)

και μειώνεται από:
α) την εκροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα της δεξαμενής αερισμού (RS)
β) την εκροή περίσσσειας ιλύος προς εγαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Waste sludge outflow).
γ) την εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης (Water outflow).



Σχήμα 7.4 Τελική δεξαμενή καθίζησης (Final settling tank).

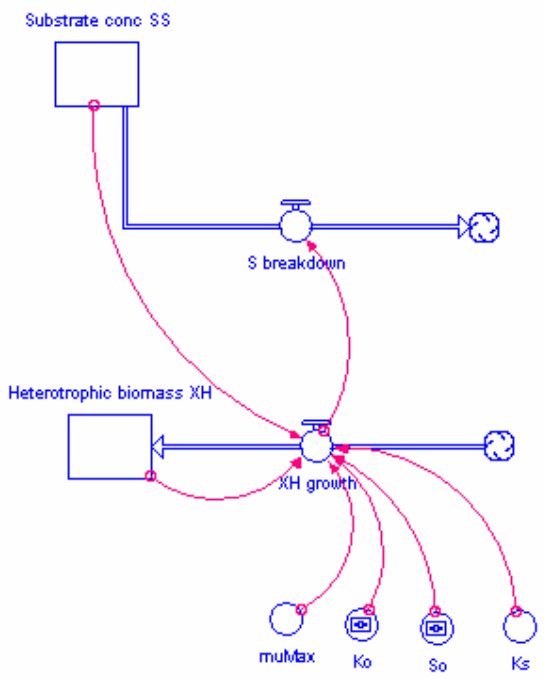
2. Τέσσερις διαδικασίες μετατροπής.

2.1. Αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας με κατανάλωση οργανικού υποστρώματος (XH growth).

Η αύξηση της συγκέντρωσης της βιομάζας εξαρτάται από (σχήμα 7.5):
α) το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης βιομάζας (muMax)
β) τη σταθερά κορεσμού οξυγόνου Ko (Michaelis Menten saturation constant for oxygen)
γ) τη συγκέντρωση οξυγόνου (So)
δ) τη σταθερά κορεσμού του οργανικού υποστρώματος Ks (Saturation constant for substrate)

και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την εκάστοτε συγκέντρωση:
α) του υποστρώματος και
β) της βιομάζας

Τέλος, επηρεάζει την αποδόμηση του υποστρώματος.

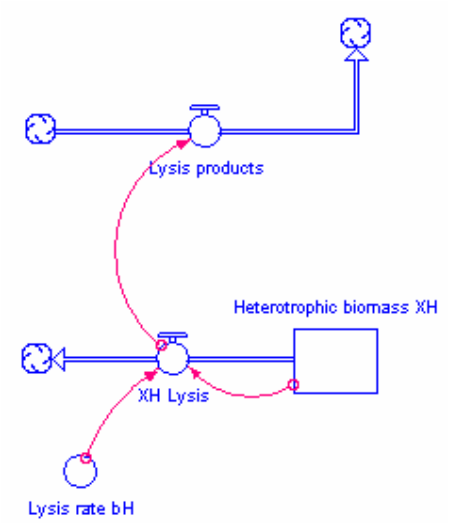


Σχήμα 7.5 Αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας (XH growth).

2.2. Διάσπαση - αποδόμηση της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis).

Η διάσπαση – αποδόμηση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 7.6) μειώνει τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας αυξάνοντας ταυτόχρονα τα προϊόντα διάσπασης (Lysis products), ενώ εξαρτάται από τον ρυθμό διάσπασης (Lysis rate bH) και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την εκάστοτε συγκέντρωση της βιομάζας.

Να σημειωθεί ότι η διάσπαση- αποδόμηση συνοψίζει όλες τις διαδικασίες που μετατρέπουν την ετερότροφη βιομάζα σε υπόστρωμα. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τη σήψη, τη διάσπαση-αποδόμηση (lysis), την υδρόλυση, τη «θήρευση» (predation), και τον ενδογενή μεταβολισμό.

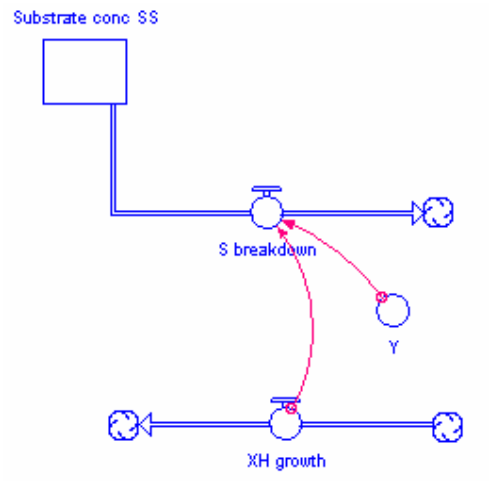


Σχήμα 7.6 Διάσπαση-αποδόμηση της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis).

2.3. Διάσπαση-αποδόμηση του υποστρώματος από την ετερότροφη βιομάζα (S breakdown).

Η αποδόμηση του υποστρώματος, δηλαδή η μείωση της συγκέντρωσής του, εξαρτάται από (σχήμα 7.7):
α) τον εμπειρικό συντελεστή παραγωγής ετερότροφης βιομάζας (empirical heterotrophic yield coefficient) Y και
β) την αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας

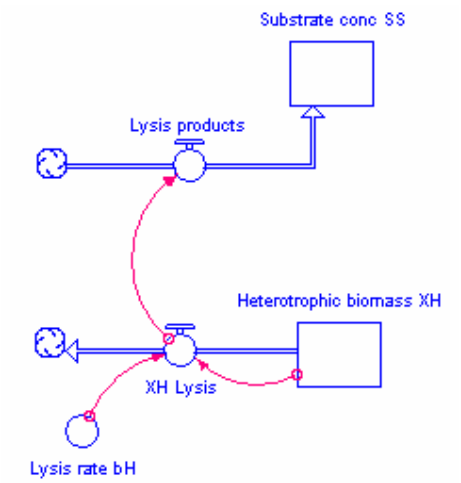
Ο εμπειρικός συντελεστής ετερότροφης παραγωγής Y δείχνει την απόδοση της μετατροπής του υποστρώματος σε ετερότροφη βιομάζα .



Σχήμα 7.7 Αποδόμηση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος (S breakdown).

2.4. Αύξηση του οργανικού υποστρώματος εξαιτίας των παραγόμενων από τη διάσπαση-λύση της ετερότροφης βιομάζας προϊόντων (Lysis products).

Τα προϊόντα της διάσπασης της βιομάζας (σχήμα 7.8) αυξάνουν τη συγκέντρωση του υποστρώματος και εξαρτώνται καθαρά από τη διάσπαση της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis).



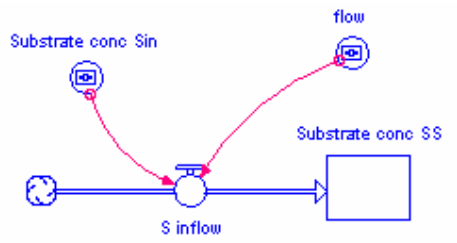
Σχήμα 7.8 Αύξηση του οργανικού υποστρώματος εξαιτίας των παραγόμενων από τη διάσπαση-λύση της ετερότροφης βιομάζας προϊόντων (Lysis products).

Τέλος, η λύση της ετερότροφης βιομάζας επηρεάζεται από τη συγκέντρωσή της και από το ρυθμό διάσπασής της.

3. Εφτά διαδικασίες μεταφοράς.

3.1. Εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (S inflow).

Η εισροή υποστρώματος (λυμάτων) (σχήμα 7.9) αυξάνει τη συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος και εξαρτάται από τη ροή (παροχή) των εισρέοντων λυμάτων και από τη συγκέντρωση του υποστρώματος στα εισρέοντα λύματα (Substrate conc Sin).

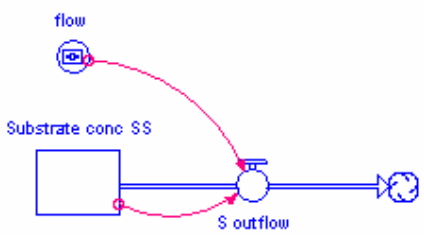


Σχήμα 7.9 Εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (S inflow).

3.2. Εκροή υποστρώματος (λυμάτων), (S outflow).

Η εκροή υποστρώματος από τη δεξαμενή αερισμού (σχήμα 7.10) μειώνει τη συγκέντρωση του υποστρώματος και εξαρτάται από τη ροή (παροχή) των εκρέοντων λυμάτων, ενώ υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την εκάστοτε συγκέντρωση του υποστρώματος στην δεξαμενή αερισμού.

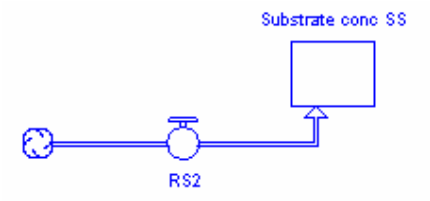
Να σημειωθεί ότι τα λύματα εισέρχονται και εξέρχονται με την ίδια ροή (flow).



Σχήμα 7.10 Εκροή υποστρώματος (λυμάτων), (S outflow).

3.3. Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (RS2).

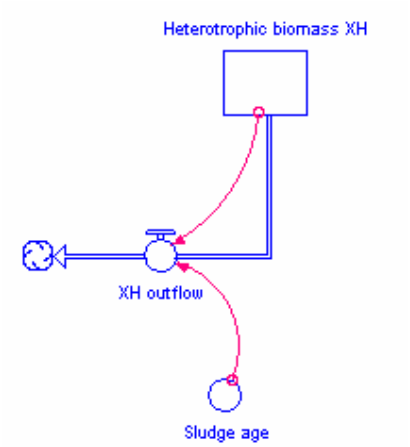
Η εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας (RS2) (σχήμα 7.11) αυξάνει την συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος. Δεν επηρεάζεται από τη ροή γιατί έχει οριστεί ως σταθερή και ίση με 25.900 g COD/m^3 hr.



Σχήμα 7.11 Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (RS2).

3.4. Εκροή ιλύος προς τελική δεξαμενή καθίζησης (XH outflow).

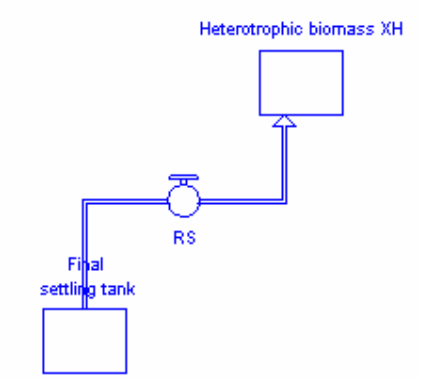
Η εκροή ιλύος (σχήμα 7.12) μειώνει τη συγκέντρωσης της βιομάζας, εξαρτάται από την ηλικία της ιλύος και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας.



Σχήμα 7.12 Εκροή ιλύος προς τελική δεξαμενή καθίζησης (XH outflow).

3.5. Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα στη δεξαμενή αερισμού (RS).

Η εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας (RS) από τη δεξαμενή καθίζησης στη δεξαμενή αερισμού (σχήμα 7.13) αυξάνει τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας. Δεν επηρεάζεται από τη ροή γιατί έχει οριστεί ως σταθερή και ίση με 4.200 g COD/m^3 hr.



Σχήμα 7.13 Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα (RS).

3.6. Εκροή περίσσειας ιλύος προς εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Waste sludge outflow).

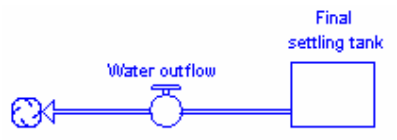
Η εκροή περίσσειας ιλύος προς εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (σχήμα 7.14) μειώνει τη συγκέντρωση της ιλύος στην τελική δεξαμενή καθίζησης. Δεν επηρεάζεται από τη ροή γιατί έχει οριστεί ως σταθερή και ίση με 125*10^5 g COD/m^3 hr.



Σχήμα 7.14 Εκροή περίσσσειας ιλύος προς εγαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Waste sludge outflow).

3.7. Εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης (Water outflow).

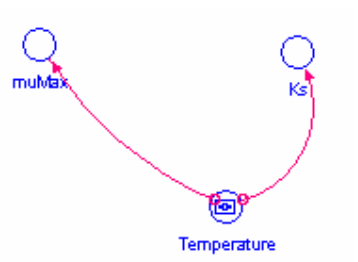
Η εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης (σχήμα 7.15) μειώνει τη συγκέντρωση στην τελική δεξαμενή καθίζησης. Δεν επηρεάζεται από τη ροή γιατί έχει οριστεί ως σταθερή και ίση με $750*10^6$ g COD/m^3 hr.



Σχήμα 7.15 Εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης (Water outflow).

4. Επίδραση της θερμοκρασίας (Temperature).

Το μοντέλο επηρεάζεται από την θερμοκρασία (σχήμα 7.16). Από την θερμοκρασία εξαρτάται
α) ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας (muMax) και
β) η σταθερά κορεσμού υποστρώματος Ks (Saturation constant for substrate)
Όπως έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο 5.2.2.4 οι συντελεστές των χρησιμοποιούμενων στο μοντέλο εξισώσεων ισχύουν μόνο για θερμοκρασίες 10 - 20 ^oC και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία σταθερή θερμοκρασία 15 ^oC.

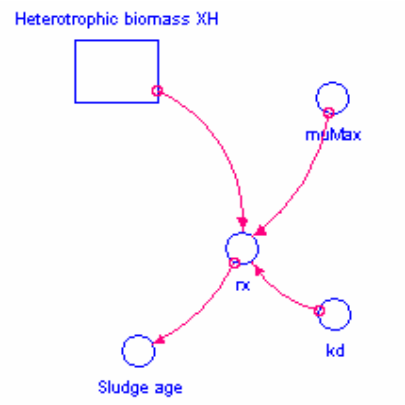


Σχήμα 7.16 Θερμοκρασία (Temperature).

5. Επίδραση του ρυθμού ολικής ανάπτυξης μ/ο (rx).

Το μοντέλο επηρεάζεται και από το ρυθμό ολικής ανάπτυξης των μ/ο (σχήμα 7.17). Ο ρυθμός ολικής ανάπτυξης των μ/ο εξαρτάται από:
α) το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης της ετερότροφης βιομάζας (muMax)
β) το συντελεστή αποσύνθεσης των μ/ο (kd) και
γ) την εκάστοτε συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας

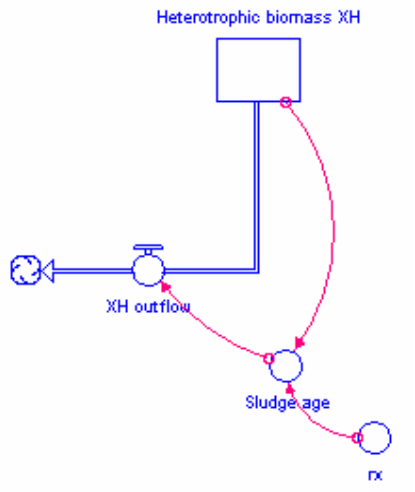
και επηρεάζει την ηλικία ιλύος.



Σχήμα 7.17 Ρυθμός ολικής ανάπτυξης μ/ο (rx).

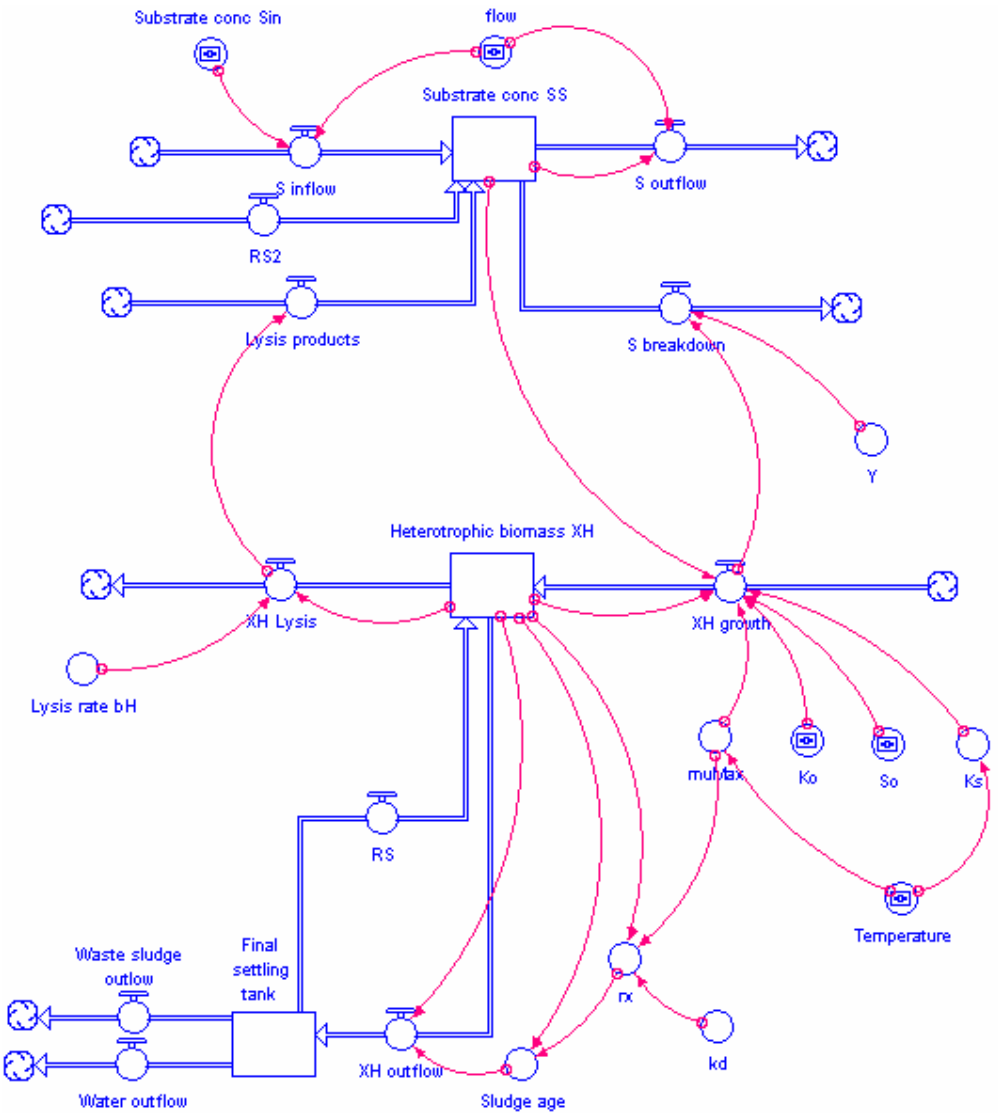
6. Επίδραση της ηλικίας ιλύος (sludge age).

Η ηλικία ιλύος (σχήμα 7.18) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας και το ρυθμό ολικής ανάπτυξης των μ/ο ενώ επηρεάζει την εκροή ιλύος προς την τελική δεξαμενή καθίζησης.



Σχήμα 7.18 Ηλικία ιλύος (sludge age).

Το παρακάτω σχήμα (7.19) απεικονίζει το ολοκληρωμένο μοντέλο που προκύπτει από τα παραπάνω.



Σχήμα 7.19 Ολοκληρωμένο μοντέλο δεξαμενής αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος όπως απεικονίζεται στο επίπεδο «χάρτης – μοντέλο» του προγράμματος προσομοίωσης STELLA.

7.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

7.5.1 Διαφορικές εξισώσεις στη γλώσσα προγραμματισμού του προγράμματος STELLA

- **Συγκέντρωση ιλύος τελικής δεξαμενής καθίζησης (Final settling tank):**

Final_settling_tank(t)= Final_settling_tank(t-dt)+(XH_outflow-Water_outflow-Waste_sludge_outflow-RS)*dt

- **Συγκέντρωση ετερότροφης βιομάζας (Heterotrophic biomass XH):**

Heterotrophic_biomass_XH(t) = Heterotrophic_biomass_XH(t - dt) + (XH_gowth - XH_Lysis - XH_outflow) * dt

- **Συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού υποστρώματος (Substrate conc SS):**

Substrate_conc_SS(t) = Substrate_conc_SS(t - dt) + (S_inflow + Lysis_products - S_outflow - S_breakdown) * dt

7.5.2 Υπόλοιπες μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν μοντέλο του προγράμματος STELLA

- **Εκροή ιλύος προς τελική δεξαμενή καθίζησης (XH outflow):**

XH_outflow =1/ Sludge_age* Heterotrophic_biomass_XH

- **Αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας με κατανάλωση οργανικού υποστρώματος (XH gowth):**

XH_gowth = muMax*(Substrate_conc_SS/(Ks+ Substrate_conc_SS))*(So/(Ko+So))* Heterotrophic_biomass_XH

- **Διάσπαση-αποδόμηση της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis):**

XH_Lysis = Lysis_rate_bH* Heterotrophic_biomass_XH

- **Εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (S inflow):**

S_inflow = flow*Substrate_conc_Sin

- **Αύξηση του οργανικού υποστρώματος εξαιτίας των παραγόμενων από τη διάσπαση-λύση της ετερότροφης βιομάζας προϊόντων (Lysis products):**

Lysis_products = XH_Lysis

- **Εκροή υποστρώματος (λυμάτων), (S outflow):**

S_outflow = flow* Substrate_conc_SS

- **Διάσπαση-αποδόμηση του υποστρώματος από την ετερότροφη βιομάζα (S breakdown):**

S_breakdown = (1/Y)* XH_gowth

- **Συντελεστής Ks (Saturation constant for substrate):**

Ks = 40*0.96^(Temperature-20)

- **Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας (Maximum gowth rate - muMax):**

muMax = 3*1.028^(Temperature-20)

- **Ρυθμός ολικής ανάπτυξης μ/ο (r_x):**

rx = (muMax* Heterotrophic_biomass_XH)-(kd* Heterotrophic_biomass_XH)

- **Ηλικία ιλύος (Sludge age):**

Sludge_age = Heterotrophic_biomass_XH/ rx

7.5.3 Σταθερές τιμές παραμέτρων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες ορίστηκαν ως σταθερές στην παρούσα εργασία.

1. **Αρχική συγκέντρωση ιλύος δεξαμενής τελικής καθίζησης (INIT Final settling tank):**
   INIT Final settling tank = $676*10^7$ g COD/m^3

2. **Αρχική ετερότροφη βιομάζα (INIT Heterotrophic biomass XH):**
   INIT Heterotrophic biomass XH = 340 g COD/m^3

3. **Εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης (Water outflow):**
   Water outflow = $750*10^6$ g COD/m^3hr

4. **Εκροή περίσσσειας ιλύος προς εγαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Waste sludge outflow):**
   Waste sludge outflow = $125*10^5$ g COD/m^3hr

5. **Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα (RS):**
   RS = 4200 g COD/m^3 hr

6. **Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (RS2):**
   RS2 = 25900 g COD/m^3 hr

7. **Ροή λυμάτων (flow):**
   Flow = 750 m^3/h

8. **Συντελεστής αποσύνθεσης των μ/ο (kd):**
   kd = 0.06 1/days

9. **Αρχικό διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (INIT Substrate conc SS):**
   INIT Substrate conc SS = 540 g COD/m^3

10. **Σταθερά κορεσμού οξυγόνου (Ko):**
    Ko = 0.1 g/m^3

11. **Ρυθμός διάσπασης της βιομάζας (Lysis rate bH):**
    Lysis rate bH = 0.6 1/days

12. **Συγκέντρωση οξυγόνου (So):**
    So = 2 g/m^3

13. **Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής (Substrate conc Sin):**
    Substrate conc Sin = 540 g COD/m^3

14. **Θερμοκρασία (Temperature):**
    Temperature =15 ^oC

15. **Εμπειρικός συντελεστής ετερότροφης παραγωγής (Y):**
    Y = 0.667 kgVSS/kgBOD_5

Οι τιμές 1 ως 8 ελήφθησαν από τα πραγματικά δεδομένα της ΕΕΑΑ της ΔΕΥΑ Χανίων.

Όλες οι εξισώσεις καθώς και όλα τα αριθμητικά δεδομένα του μοντέλου παρουσιάζονται στο επίπεδο «εξισώσεις» του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (σχήμα 7.20).

Final__settling__tank(t) = Final__settling__tank(t - dt) + (XH_outflow - Water_outflow - Waste_sludge__outlow - RS) * dt
INIT Final__settling__tank = 676*10^7
INFLOWS:
XH_outflow = 1/Sludge_age*Heterotrophic_biomass_XH
OUTFLOWS:
Water_outflow = 750*10^6
Waste_sludge__outlow = 125*10^5
RS = 4200

Heterotrophic_biomass_XH(t) = Heterotrophic_biomass_XH(t - dt) + (XH_growth + RS - XH_Lysis - XH_outflow) * dt
INIT Heterotrophic_biomass_XH = 340
INFLOWS:
XH_growth = muMax*(Substrate_conc_SS/(Ks+Substrate_conc_SS))*(So/(Ko+So))*Heterotrophic_biomass_XH
RS = 4200
OUTFLOWS:
XH_Lysis = Lysis_rate_bH*Heterotrophic_biomass_XH
XH_outflow = 1/Sludge_age*Heterotrophic_biomass_XH

Substrate_conc_SS(t) = Substrate_conc_SS(t - dt) + (S_inflow + Lysis_products + RS2_ - S_outflow - S_breakdown) * dt
INIT Substrate_conc_SS = 540
INFLOWS:
S_inflow = flow*Substrate_conc_Sin
Lysis_products = XH_Lysis
RS2_ = 25900
OUTFLOWS:
S_outflow = flow*Substrate_conc_SS
S_breakdown = (1/Y)*XH_growth

flow = 750
kd = 0.06
Ko = 0.1
Ks = 40*0.96^(Temperature-20)
Lysis_rate_bH = 0.6
muMax = 3*1.028^(Temperature-20)
rx = (muMax*Heterotrophic_biomass_XH)-(kd*Heterotrophic_biomass_XH)
Sludge_age = Heterotrophic_biomass_XH/rx
So = 2
Substrate_conc_Sin = 540
Temperature = 15
Y = 0.667

Σχήμα 7.20 Το σύνολο των εξισώσεων και παραμέτρων όπως εμφανίζονται στο επίπεδο «εξισώσεις» του προγράμματος προσομοίωσης STELLA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

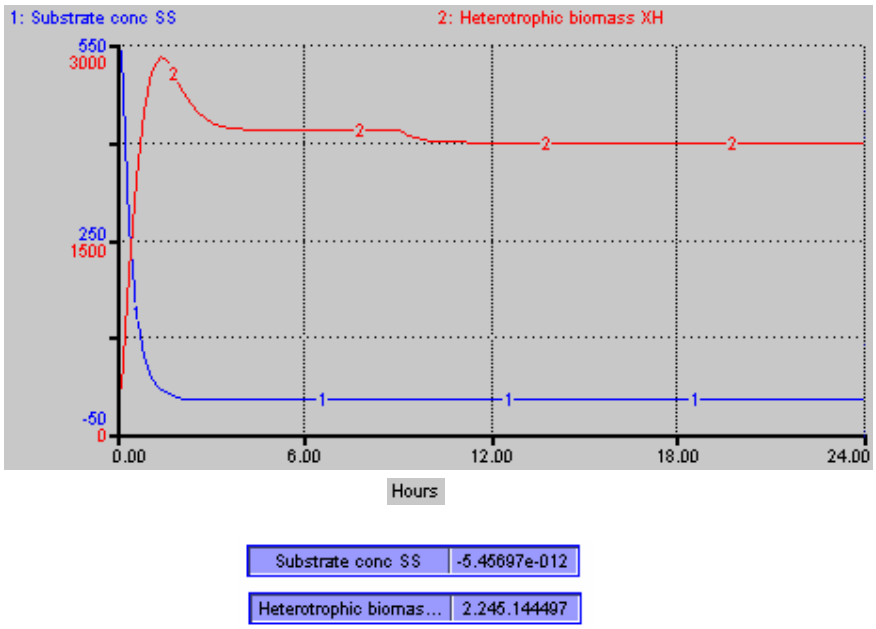
Εφαρμογή Μοντέλου Προσομοίωσης – Αποτελέσματα Μέρος ΙΙ

8.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου εξετάστηκαν σε συνάρτηση με το χρόνο:
α) το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα και
β) η ετερότροφη βιομάζα (σχήμα 8.1)

Για την προσομοίωση έχουν οριστεί οι παρακάτω αρχικές τιμές:

- Αρχική ετερότροφη βιομάζα - INITIAL XH = 340 g COD/m^3
- Αρχικό υπόστρωμα στη δεξαμενή αερισμού - INITIAL SS = 540 g COD/m^3
- Αρχική συγκέντρωση ιλύος δεξαμενής τελικής καθίζησης – Final settling tank = 676*10^7 g COD/m^3
- Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής - Substrate conc Sin = 540 g COD/m^3
- Συγκέντρωση οξυγόνου - So = 2 g/m^3
- Ροή (παροχή) λυμάτων - Flow = 750 m^3/h
- Σταθερά κορεσμού οξυγόνου - Ko = 0.1 g/m^3
- Θερμοκρασία - Temperature = 15 ^oC
- Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στην ετερότροφη βιομάζα - RS = 4.200 g COD/m^3 hr
- Εισροή ιλύος ανακυκλοφορίας στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα - RS_2 = 25.900 g COD/m^3 hr
- Περίσσεια ιλύος – Waste sludge outflow = 125*10^5 g COD/m^3hr
- Εκροή επεξεργασμένου-καθαρού υγρού προς εγκαταστάσεις απολύμανσης– Water outflow = 750*10^6 g COD/m^3hr



Σχήμα 8.1 Καμπύλες διαλυμένου οργανικού υποστρώματος (Substrate conc SS) και ετερότροφης βιομάζας (Heterotrophic biomass XH) σε συνάρτηση με το χρόνο.

<u>Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα</u>:

Το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα στη δεξαμενή αερισμού ξεκινά με αρχική τιμή 540 g COD/m^3. Μειώνεται απότομα φτάνοντας την τιμή των 8 g COD/m^3 μετά από 1,50h και τελικά μηδενίζεται (0 g COD/m^3) ήδη μετά από 3 ώρες. Παρατηρήθηκε λοιπόν μείωση κατά 100% σε σχέση με την αρχική του συγκέντρωση.

<u>Ετερότροφη βιομάζα</u>:

Η ετερότροφη βιομάζα ξεκινά με αρχική τιμή 340 g COD/m^3. Αυξάνεται εκθετικά με μεγάλο ρυθμό και λίγο μετά την πρώτη ώρα (1,25h) παίρνει τη μέγιστη τιμή της που είναι 2.907 g COD/m^3. Στη συνέχεια, προφανώς λόγω έλλειψης θρεπτικού υποστρώματος, διανύει μια πολύ σύντομη στατική φάση περνώντας στη φάση της απόπτωσης στο χρονικό διάστημα μεταξύ 1,25 – 3,00h. Μετά από 3 ώρες περνα σε μια δεύτερη στατική φάση στα 2.392 g COD/m^3 και στη συνέχεια μειώνεται όλο και πιο λίγο με αποτέλεσμα τη σταθεροποίησή της μετά από 12 ώρες (12,50h) στα 2.245 g COD/m^3.

Η βιομάζα χρειάζεται το υπόστρωμα ως τροφή για να αναπτυχθεί και αυτό εξηγεί το ότι η βιομάζα αυξάνεται εκθετικά και παράλληλα το υπόστρωμα μειώνεται αντίστοιχα γρήγορα. Στη συνέχεια λόγω του μειωμένου διαθέσιμου υποστρώματος (μειωμένη τροφή) αρχίζει η μείωση της ανάπτυξης της βιομάζας, η οποία τελικά φθάνει σε μια σταθερή κατάσταση (steady state) αφού το υπόστρωμα μηδενίζεται και δεν υπάρχει πλέον τροφή για την ανάπτυξή της.

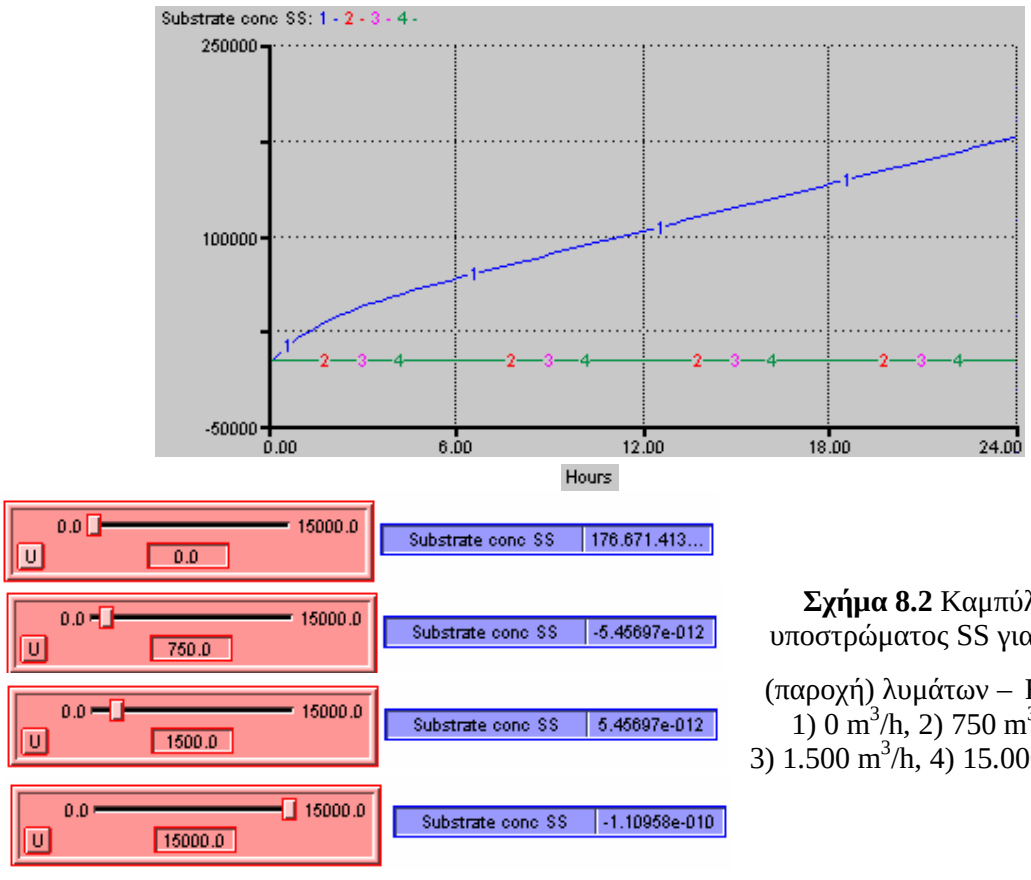
8.2 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Μετά τη διαπίστωση της σταθερότητας της προσομοιωμένης λειτουργίας της δεξαμενής αερισμού στο κεφάλαιο 8.1, σε αυτή την παράγραφο θα εξεταστεί η ευαισθησία του μοντέλου στις μεταβολές ορισμένων παραμέτρων από αυτές που ήταν σταθερές στο κεφάλαιο 8.1. Αυτό που θα διερευνηθεί, δηλαδή, είναι κατά πόσο επηρεάζεται η συμπεριφορά και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα του μοντέλου όταν αλλάζουν τιμές σημαντικές παράμετροι, οι οποίες είχαν τεθεί προηγούμενα στο κεφάλαιο 8.1 ως σταθερές . Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να δούμε κατά πόσο το μοντέλο είναι προσαρμόσιμο σε διαφορετικές συνθήκες, όπως π.χ. ροής, θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να μπορεί να εφαρμοστεί σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες μιας ΕΕΑΑ.

Οι παράμετροι που θα εξεταστούν είναι:
α) η ροή (Flow)
β) η συγκέντρωση οξυγόνου (So)
γ) η σταθερά κορεσμού οξυγόνου (Ko)
δ) η συγκέντρωση υποστρώματος εισροής (Substrate conc Sin)
ε) η θερμοκρασία (Temperature)

8.2.1 Ροή (Flow)

Εξετάζουμε το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα για τρεις διαφορετικές παροχές λυμάτων: Flow = 0 m^3/h (καμπύλη1), 750 m^3/h, τιμή που ορίστηκε στην παράγραφο 8.1 ως σταθερή, (καμπύλη2), 1.500 m^3/h (καμπύλη3) και 15.000 m^3/h (καμπύλη 4).



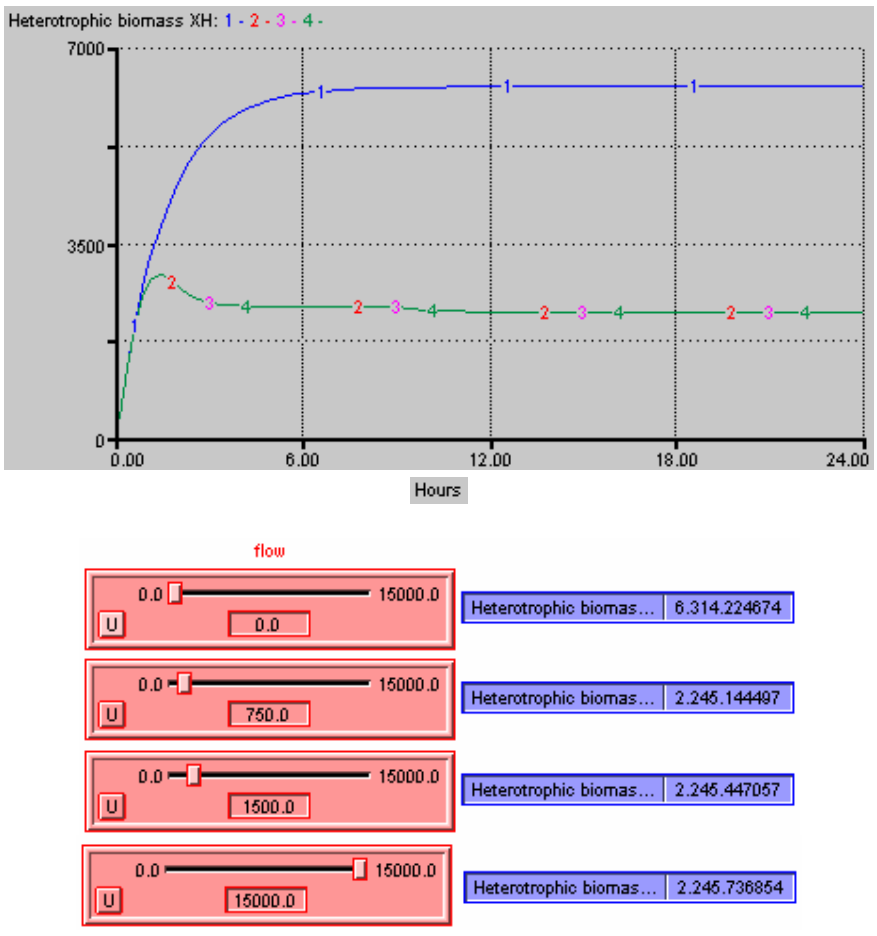
Σχήμα 8.2 Καμπύλη υποστρώματος SS για ροή (παροχή) λυμάτων – Flow: 1) 0 m^3/h, 2) 750 m^3/h, 3) 1.500 m^3/h, 4) 15.000 m^3/h

Παρατηρούμε ότι για ροή 0 m^3/h το υπόστρωμα ξεκινά από την αρχική τιμή των 540 g COD/m^3 και αυξάνεται συνεχώς μέχρι την 24η ώρα όπου παίρνει την τελική τιμή 176.671 g COD/m^3. Διαφέρει πολύ από τις καμπύλες 2, 3 και 4 (για 750 m^3/h, 1.500 m^3/h και 15.000 m^3/h αντίστοιχα) οι οποίες ταυτίζονται. Εδώ το υπόστρωμα ξεκινά επίσης από τα 540 g COD/m^3 και μειώνεται γρήγορα αφού πέφτει στη μισή τιμή κάθε τέταρτο της ώρας ώσπου τελικά μηδενίζεται (0 g COD/m^3) λίγο πριν την τρίτη ώρα (2,75h).

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το μοντέλο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα όσον αφορά τις μεταβολές της ροής ακόμη και μετά από τον διπλασιασμό της ροής που είχαμε αρχικά θέσει ως σταθερά.

Η αύξηση του υποστρώματος χωρίς εισροή νέων λυμάτων (0 m^3/h) οφείλεται προφανώς στην αρχική ανάπτυξη και λύση της ετερότροφης βιομάζας.

Ομοίως εξετάζουμε την ετερότροφη βιομάζα για παροχές λυμάτων: Flow = 0 m^3/h (καμπύλη1), 750 m^3/h, τιμή που ορίστηκε στην παράγραφο 8.1 ως σταθερή, (καμπύλη2), 1.500 m^3/h (καμπύλη3) και 15.000 m^3/h (καμπύλη 4).



Σχήμα 8.3 Καμπύλη ετερότροφης βιομάζας XH για ροή (παροχή) λυμάτων – Flow: 1) 0 m^3/h, 2) 750 m^3/h, 3) 1.500 m^3/h, 4) 15.000 m^3/h

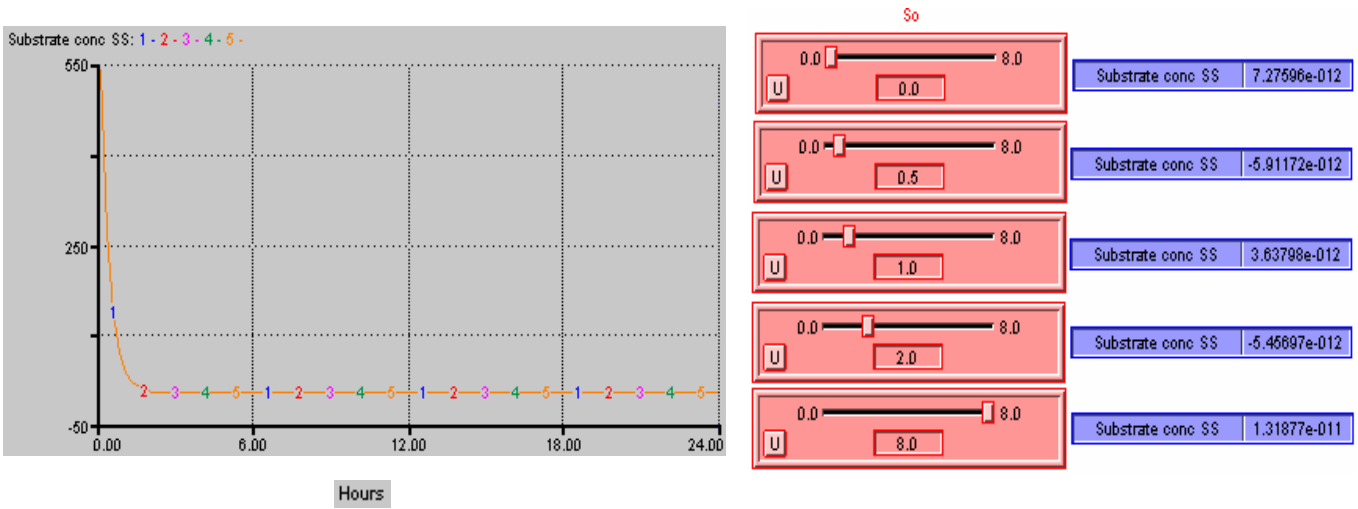
Η ετερότροφη βιομάζα ξεκινά και στις τρεις περιπτώσεις από τα 340 g COD/m^3 και αυξάνεται με τη διαφορά ότι για 0 m^3/h (καμπύλη 1) η αύξηση είναι πολύ μεγαλύτερη. Για ροή 0 m^3/h έχουμε εκθετική αύξηση μέχρι την τιμή των 5.873 g COD/m^3 στις τέσσερις ώρες (4,00h) και στη συνέχεια ομαλοποιείται και αυξάνεται με συνεχώς μικρότερο ρυθμό μέχρι που φτάνει στην τελική τιμή 6.314 g COD/m^3 μετά την εικοστή πρώτη ώρα (21,50h). Για ροή 750 m^3/h η αύξηση είναι εκθετική μέχρι την τιμή 2.907 g COD/m^3 στη 1,25h και μετά ομαλοποιείται μέχρι την τελική τιμή 2.245 g COD/m^3 στις12,50h. Για διπλάσια ροή 1.500 m^3/h η ανάπτυξη ακολουθεί τη μορφή της καμπύλης για ροή 750 m^3/h, σχεδόν ταυτίζονται. Η αύξηση είναι εκθετική μέχρι τα 2.908 g COD/m^3 στη 1,25h και στη συνέχεια με πιο αργό ρυθμό φθάνει στη σταθερή κατάσταση στην τελική τιμή 2.245 g COD/m^3 στις 13,50h. Για εικοσαπλάσια ροή 15.000 m^3/h η καμπύλη 4 έχει επίσης τη μορφή των καμπύλων 2 και 3 με ελάχιστη διαφορά σε τιμές. Εδώ, η βιομάζα αυξάνεται εκθετικά μέχρι την τιμή των 2.908 g COD/m^3 στη 1,25h και στη συνέχεια μειώνεται, ομαλοποιείται και φθάνει στην τελική τιμή 2.246 g COD/m^3 στις 12,00h.

Το μοντέλο όσον αφορά την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα στον διπαλασιαμό και τον εικοσαπαλασιασμό της ροής εισροής των λυμάτων στη δεξαμενή αερισμού.

Η αύξηση της ετερότροφης βιομάζας με μηδενική ροή οφείλεται στην κατανάλωση του αρχικού οργανικού υποστρώματος των 540 g COD/m^3.

8.2.2 Συγκέντρωση οξυγόνου (So)

Όσον αφορά τη συγκέντρωση του οξυγόνου εξετάζουμε το μοντέλο για πέντε τιμές: So = 0,0 g/m^3(καμπύλη1) , 0,5 g/m^3 (καμπύλη 2), 1,0 g/m^3 (καμπύλη 3), 2,0 g/m^3, τιμή που ορίστηκε στην παράγραφο 8.1 ως σταθερή, (καμπύλη 4) και 8,00 g/m^3 (καμπύλη 5).

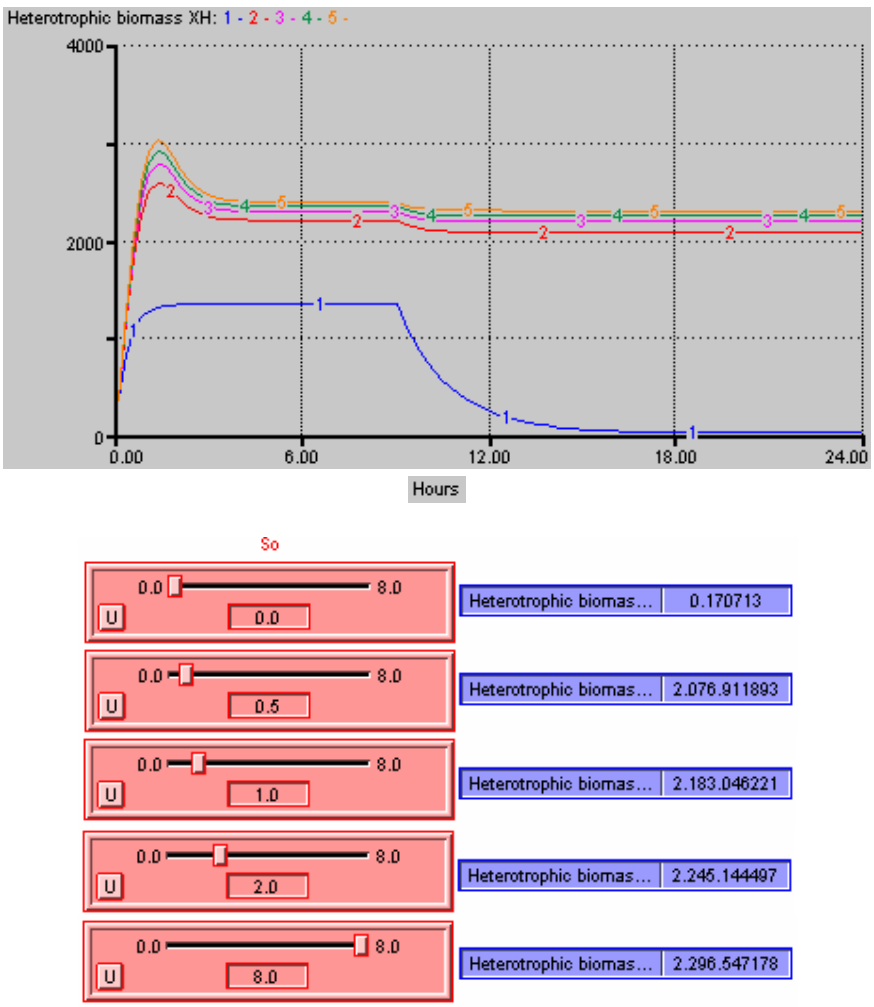


Σχήμα 8.4 Καμπύλη υποστρώματος SS για συγκέντρωση οξυγόνου - So:
1) 0,0 g/m^3, 2) 0,5 g/m^3, 3) 1,0 g/m^3, 4) 2,0 g/m^3, 5) 8,0 g/m^3

Οι καμπύλες 1, 2, 3, 4 και 5 του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος (σχήμα 8.4) για τις συγκεντρώσεις οξυγόνου So = 0,0 g/m^3, 0,5 g/m^3 , 1,0 g/m^3, 2,0 g/m^3 και 8,0 g/m^3 αντίστοιχα, ταυτίζοναι. Πιο συγκεκριμένα η συγκέντρωση του υποστρώματος ξεκινά από την αρχική τιμή των 540 g COD/m^3 που έχουμε ορίσει και μειώνεται απότομα με αποτέλεσμα το μηδενισμό της (0 grCOD/m^3) στις 2,75h.

Το μοντέλο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος δεν παρουσιάζει ευαισθησία όσον αφορά τις μεταβολές της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου από 0 έως 8 g/m^3.

Παρόλο που με μηδενική συγκέντρωση οξυγόνου (So) δεν φαίνεται ουσιαστική διαφορά στην καμπύλη του υποστρώματος, στην καμπύλη της χρονικής εξέλιξης της βιομάζας φαίνεται η ολική και οριστική της απόπτωση μετά από 22,25h. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η βιομάζα καταναλώνει αρχικά μέχρι πλήρους εξαντλήσεώς του το οργανικά συνδεδεμένο οξυγόνο.



Σχήμα 8.5 Καμπύλη ετερότροφης βιομάζας XH για συγκέντρωση οξυγόνου - So: 1) 0,0 g/m^3, 2) 0,5 g/m^3, 3) 1,0 g/m^3, 4) 2,0 g/m^3, 5) 8,0 g/m^3

Όσον αφορά τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 8.5) βλέπουμε ότι διαφέρει αρκετά η καμπύλη 1 για συγκέντρωση οξυγόνου, δηλαδή, So = 0,0 g/m^3 ενώ για συγκεντρώσεις So = 0,5 g/m^3, 1,0 g/m^3, 2,0 g/m^3 και 8,0 g/m^3 οι καμπύλες 2, 3, 4 και 5 ακολουθούν την ίδια μορφή.

Για So = 0,0 g/m^3 αρχικά έχουμε μια μικρή εκθετική αύξηση στη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας από την αρχική της τιμή που είναι 340 g COD/m^3 στη μέγιστη τιμή της στα 1.332 g COD/m^{3}στις πρώτες τρεις ώρες (3,00h). Μετά περνάει στη στατική φάση, όπου διατηρείται σταθερή μέχρι τις εννέα ώρες (9,00h) και στη συνέχεια περνάει στη φάση της απόπτωσης, όπου μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί τελικά αμέσως μετά την εικοστή δεύτερη ώρα (22,25h).

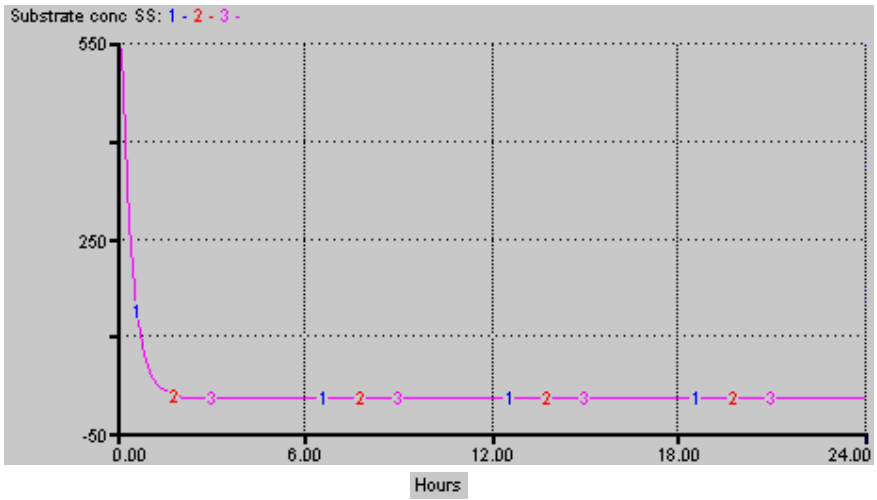
Για So = 0,5 g/m^3, 1,0 g/m^3, 2,0 g/m^3 και 8,0 g/m^3 παρατηρούμε ότι η τιμή της συγκέντρωσης της ετερότροφης βιομάζας είναι ελαφρώς λίγο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου, δηλαδή στην καμπύλη 5 για So = 8,0 g/m^3 παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης από τις καμπύλες 2,3 και 4 για So = 0,5 g/m^3, 1,0 g/m^3 και 2,0 g/m^3 αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα για So = 0,5 g/m^3 η συγκέντρωση μεγιστοποιείται με εκθετική αύξηση λίγο μετά την πρώτη ώρα (1,25h) στα 2.576 g COD/m^3, στη συνέχεια μειώνεται ώσπου φτάνει στην τελική σταθερή της τιμή 2.077 g COD/m^3 στις 12,25h. Για So = 1,0 g/m^3 η συγκέντρωση της βιομάζας αυξάνεται εκθετικά μέχρι τη μέγιστη τιμή 2.780 g COD/m^3 στις 1,25h και μετά μειώνεται μέχρι την τελική σταθερή της τιμή 2.183 g COD/m^3 στις 12,25h. Για So = 2,0 g/m^3 έχουμε εκθετική αύξηση της συγκέντρωσης μέχρι τη μέγιστη τιμή 2.907 g COD/m^3 στις 1,25h και στη συνέχεια μείωση μέχρι την τελική σταθερή της τιμή 2.245 g COD/m^3 στις 12,50h. Για So = 8,0 g/m^3 η συγκέντρωση της βιομάζας αυξάνεται εκθετικά μέχρι τη μεγιστοποίησή της στα 3.018 g COD/m^3 στις 1,25h και έπειτα μειώνεται ώσπου παίρνει την τελική σταθερή της τιμή 2.297 g COD/m^3 στις 11,75h.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μοντέλο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος και τη σταθεροποίηση της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού παρουσιάζει μηδαμινή ευαισθησία σε μεταβολές της συγκέντρωσης του οξυγόνου μεγαλύτερες από 2 g/m^3. Αυτό δείχνει ότι μια αύξηση του αερισμού δεν οδηγεί σε ουσιαστική βελτίωση της διεργασίας.

8.2.3 Σταθερά κορεσμού οξυγόνου (Ko)

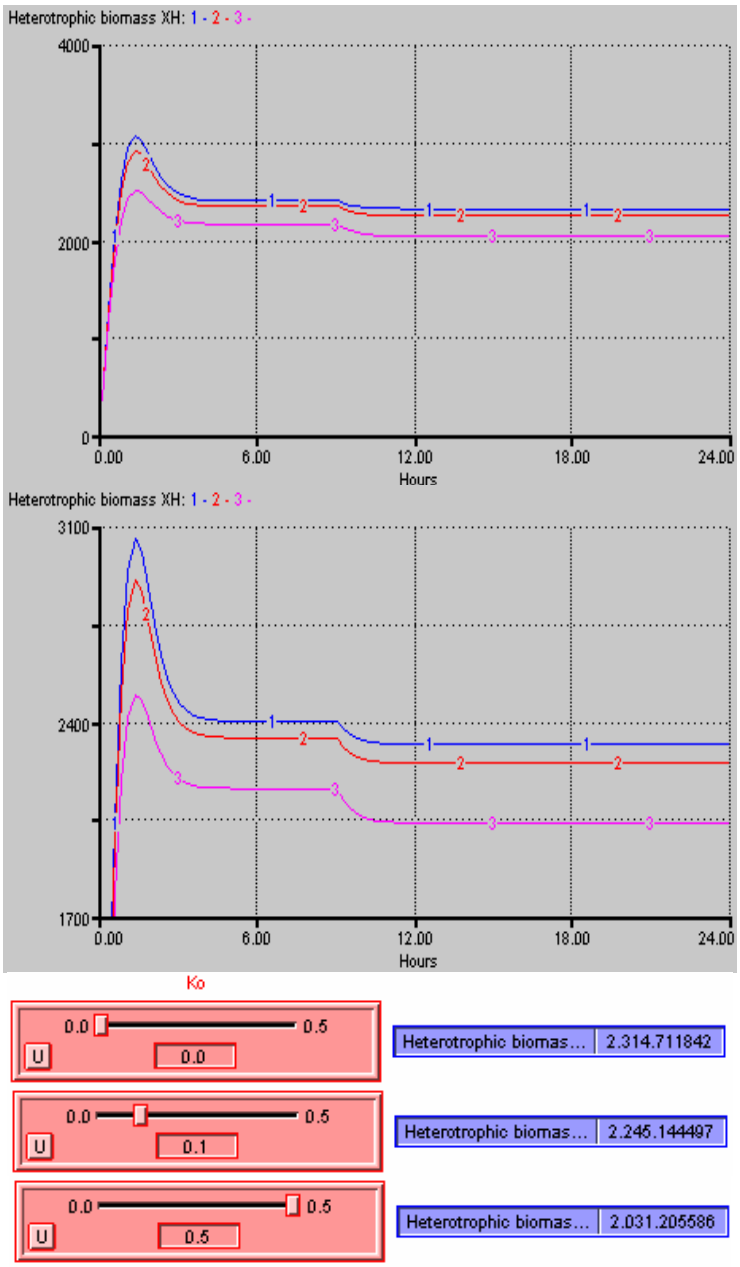
Θα εξετάσουμε τρεις περιπτώσεις με σταθερά κορεσμού οξυγόνου Ko = 0,0 g/m^3 (καμπύλη 1), 0,1 g/m^3, τιμή που ορίστηκε στην παράγραφο 8.1 ως σταθερή, (καμπύλη 2) και 0,5 g/m^3 (καμπύλη 3).



Σχήμα 8.6 Καμπύλη υποστρώματος SS για σταθερά κορεσμού οξυγόνου - Ko: 1) 0,0 g/m^3 , 2) 0,1 g/m^3 , 3) 0,5 g/m^3

Οι καμπύλες του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος (σχήμα 8.6) σχεδόν ταυτίζονται και για τις τρεις τιμές σταθεράς κορεσμού οξυγόνου Ko και είναι όμοιες με αυτές του σχήματος 8.4. Η συγκέντρωση του υποστρώματος ξεκινά από την αρχική τιμή των 540 g COD/m^3 που έχουμε ορίσει και μειώνεται απότομα με αποτέλεσμα το μηδενισμό της στις 2,75h.

Το μοντέλο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος δεν παρουσιάζει ευαισθησία όσον αφορά τις μεταβολές της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου από 0 έως 0,5 g/m^3.



Σχήμα 8.7 Καμπύλη ετερότροφης βιομάζας XH για σταθερά κορεσμού οξυγόνου - Ko:
1) 0,0 g/m^3 , 2) 0,1 g/m^3 , 3) 0,5 g/m^3

Οι καμπύλες 1, 2 και 3 ακολουθούν την ίδια μορφή και παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας είναι καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου μεγαλύτερη για σταθερά κορεσμού οξυγόνου Ko = 0,0 g/m^3, μικρότερη για Ko = 0,1 g/m^3 και ακόμα μικρότερη για Ko = 0,5 g/m^3. Ξεκινά με αρχική συγκέντρωση 340 g COD/m^3 και αυξάνεται εκθετικά μέχρι να πάρει τη μέγιστη τιμή της στις 1,25h: 3.058 g COD/m^3 για Ko = 0,0 g/m^3, 2.907 g COD/m^3 για Ko = 0,1 g/m^3 και 2.494 g COD/m^3 για Ko = 0,5 g/m^3. Έπειτα μειώνεται και διατηρείται σταθερή μέχρι την ένατη ώρα και μειώνεται λίγο ακόμα φθάνοντας την

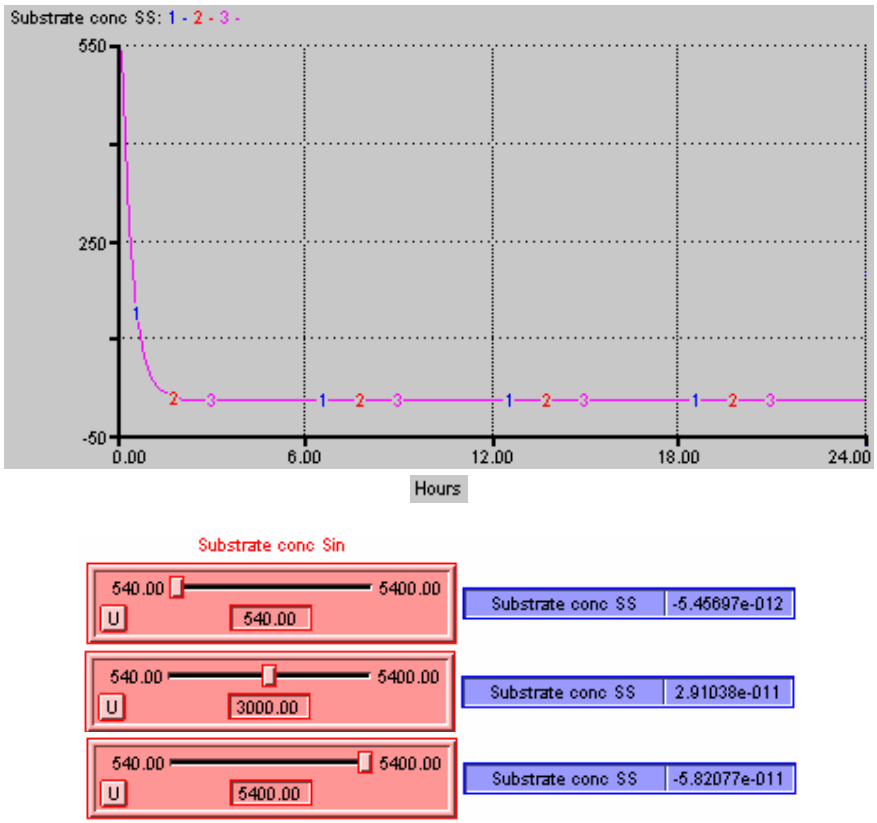
σταθερή τελική της τιμή: 2.315 g COD/m^3 για Ko = 0,0 g/m^3 στις 12,00h, 2.245 g COD/m^3 για Ko = 0,1 g/m^3 και 2.031 g COD/m^3 για Ko = 0,5 g/m^3 στις 12,50h.

Η οριοθέτηση της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου Ko σε μικρότερες τιμές από 0,5 g/m^3 ακόμη και σε μηδενική οδηγεί στην απεξάρτηση της αύξησης της ετερότροφης βιομάζας από αυτή την παράμετρο (βλέπε εξίσωση 5.8). Επίσης φαίνεται η αντιστρόφως ανάλογη σχέση του ρυθμού ανάπτυξης της βιομάζας με την σταθερά κορεσμού οξυγόνου Ko.

Το μοντέλο για την ανάπτυξη της ετερότροφης παρουσιάζει μια μικρή ευαισθησία στις μεταβολές της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου για τιμές 0 έως 0,5 g/m^3 .

8.2.4 Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής (Substrate conc Sin)

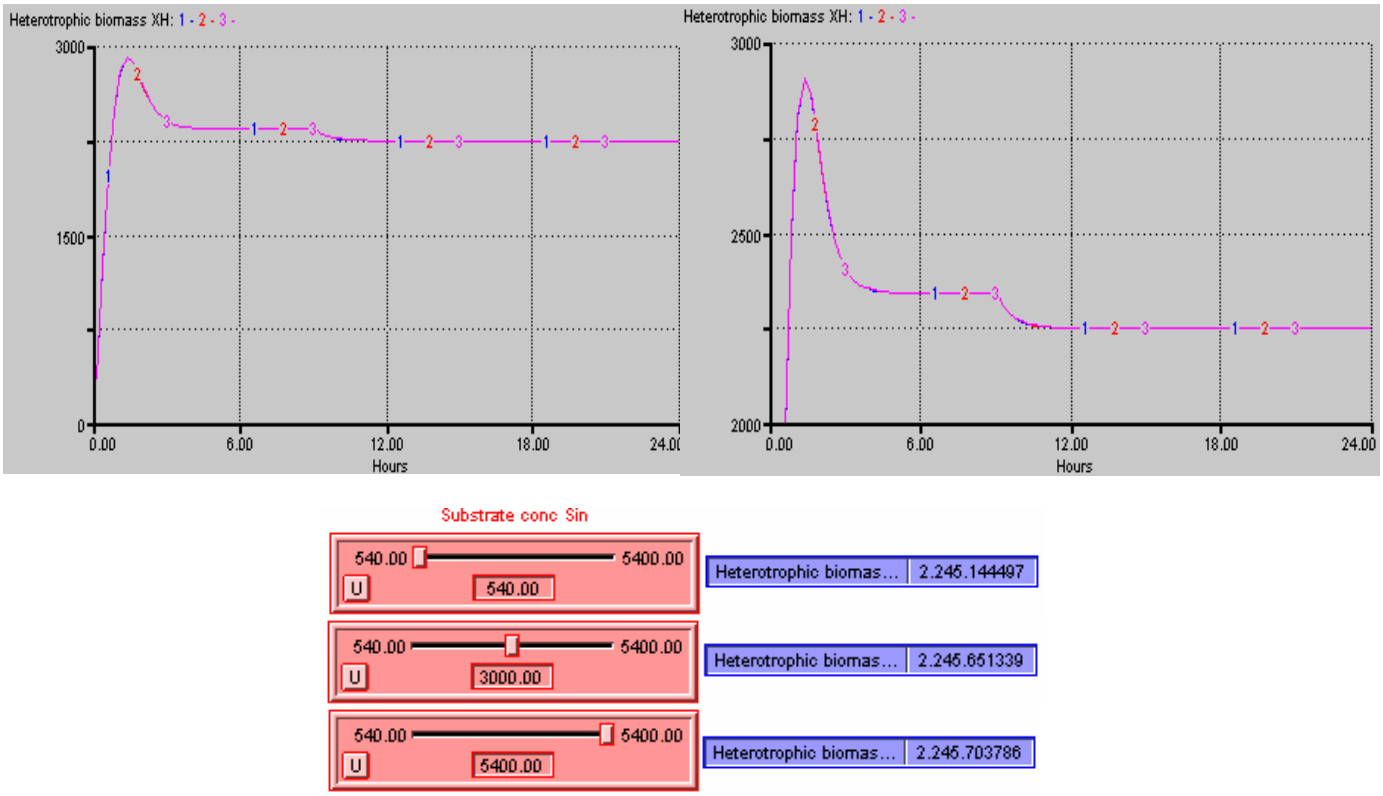
Οι τρεις τιμές συγκέντρωσης υποστρώματος εισροής με τις οποίες θα εξετάσουμε το μοντέλο είναι Substrate conc Sin = 540 g COD/m^3, τιμή που ορίστηκε στην παράγραφο 8.1 ως σταθερή, (καμπύλη 1), 3.000 g COD/m^3 (καμπύλη 2) και 5.400 g COD/m^3 (καμπύλη 3).



Σχήμα 8.8 Καμπύλη υποστρώματος SS για συγκέντρωση υποστρώματος εισροής - Substrate conc Sin:
1) 540 g COD/m^3 ,2) 3.000 g COD/m^3 ,3) 5.400 g COD/m^3

Οι καμπύλες 1, 2 και 3 για το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (σχήμα 8.8) ταυτίζονται. Σε όλες τις περιπτώσεις η συγκέντρωση του υποστρώματος ξεκινά από τα 540 g COD/m^3 και μειώνεται μέσα σε πολύ λίγο χρόνο ώσπου μηδενίζεται λίγο πριν την τρίτη ώρα (2,75h).

Το μοντέλο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος δεν παρουσιάζει ευαισθησία όσον αφορά τις μεταβολές της συγκέντρωσης υποστρώματος εισροής που κυμαίνεται από 540 έως 5.400 g COD/m^3 .



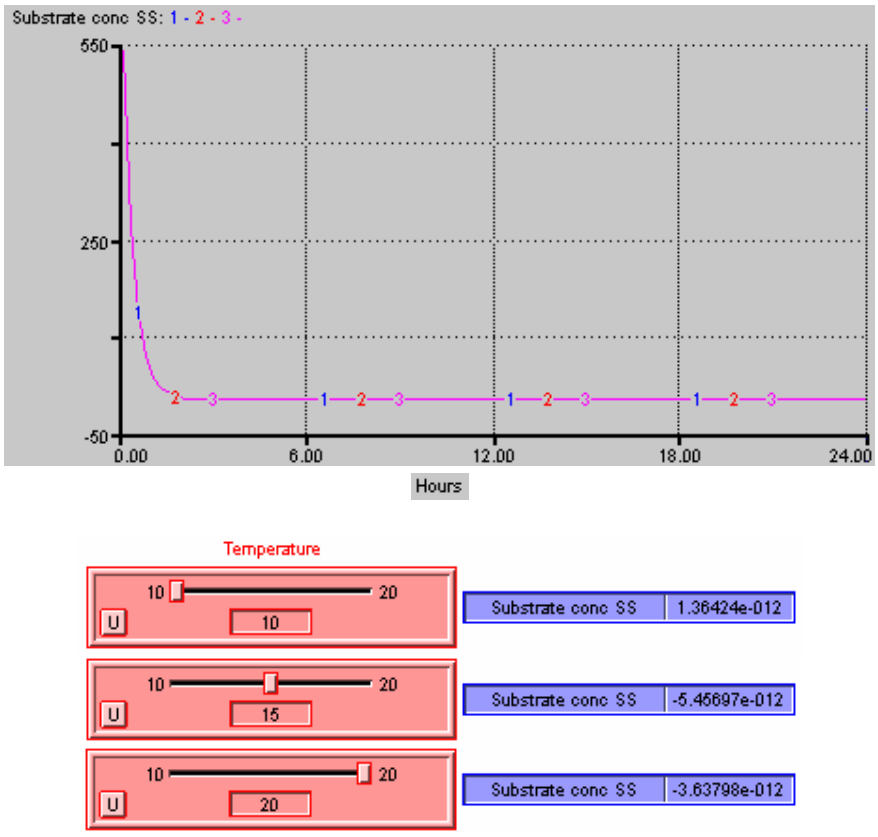
Σχήμα 8.9 Καμπύλη ετερότροφης βιομάζας XH για συγκέντρωση υποστρώματος εισροής - Substrate conc Sin:
1) 540 g COD/m^3 ,2) 3.000 g COD/m^3 ,3) 5.400 g COD/m^3

Οι καμπύλες 1, 2 και 3 για τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 8.9) σχεδόν ταυτίζονται. Η μέγιστη τιμή στο τέλος της εκθετικής φάσης που παίρνει η συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας για συγκέντρωση εισερχόμενου υποστρώματος Substrate conc Sin = 540 g COD/m^3 είναι 2.907 g COD/m^3, για 3.000 g COD/m^3 και για 5.400 g COD/m^3 μέγιστη τιμή 2.909 g COD/m^3 λίγο μετά την πρώτη ώρα (1,25h) και στις τρεις περιπτώσεις. Οι καμπύλες 2 και 3 ταυτίζονται απόλυτα. Οι τελικές τιμές στη σταθερή κατάσταση διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους: 2.245 g COD/m^3 (12,50h) για την καμπύλη 1, 2.246 g COD/m^3 (12,00h) για τις καμπύλες 2 και 3.

Το μοντέλο για την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας δεν παρουσιάζει ευαισθησία όσον αφορά τις μεταβολές της συγκέντρωσης υποστρώματος εισροής από 540 έως 5.400 g COD/m^3. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε είναι σταθερό ακόμη και για εισροή δεκαπλάσιου οργανικού υποστρώματος στη δεξαμενή αερισμού.

8.2.5 Θερμοκρασία (Temperature)

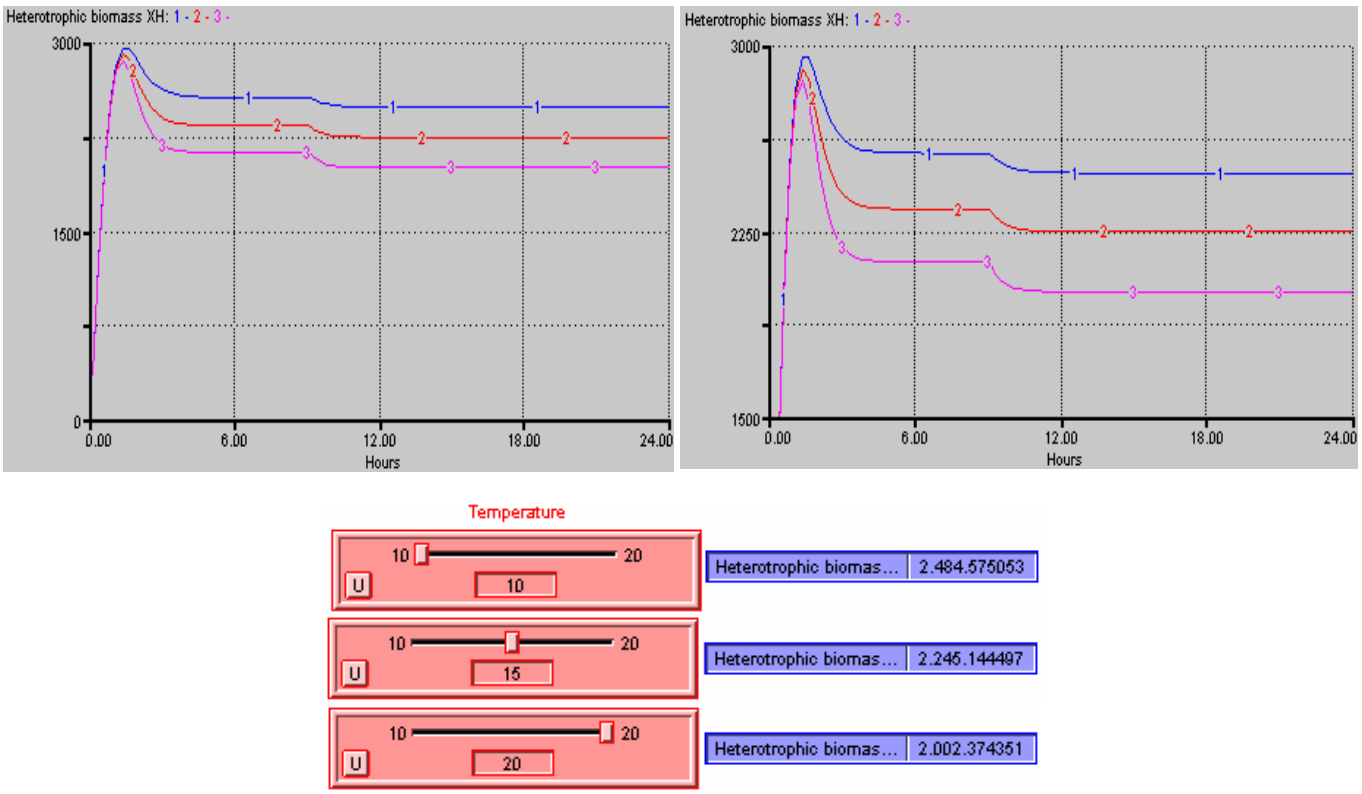
Θα εξετάσουμε το μοντέλο με θερμοκρασίες: Temperature = 10 ^oC (καμπύλη 1), 15 ^oC, τιμή που ορίστηκε στην παράγραφο 8.1 ως σταθερή, (καμπύλη 2) και 20 ^oC (καμπύλη 3). Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.2.2.4 οι συντελεστές των χρησιμοποιούμενων στο μοντέλο εξισώσεων ισχύουν μόνο για θερμοκρασίες 10 - 20 ^oC και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία σταθερή θερμοκρασία 15 ^oC.



Σχήμα 8.10 Καμπύλη υποστρώματος SS για θερμοκρασία – Temperature:
1) 10 ^oC, 2) 15 ^oC, 3) 20 ^oC

Βλέπουμε ότι και οι τρεις καμπύλες για το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (σχήμα 8.10) ταυτίζονται απόλυτα. Από την αρχική τιμή 540 g COD/m^3 η συγκέντρωση του υποστρώματος μειώνεται απότομα ώσπου μηδενίζεται τελικά πριν την τρίτη ώρα (2,75h).

Το μοντέλο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος παρουσιάζει σταθερότητα όσον αφορά τις μεταβολές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 8.11 Καμπύλη ετερότροφης βιομάζας XH για θερμοκρασία – Temperature: 1) 10 ^oC, 2) 15 ^oC, 3) 20 ^oC

Για τη συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 8.11) παρατηρούμε διαφορές στις τρεις καμπύλες για τις διαφορετικές τιμές θερμοκρασιών. Στους 10 ^oC η συγκέντρωση γίνεται μέγιστη, ίση με 2.960 g COD/m^3 λίγο πριν τη μιάμιση ώρα (1,25h). Μετά μειώνεται με γρήγορο ρυθμό μέχρι την τρίτη ώρα, ομαλοποιείται ώσπου τελικά σταθεροποιείται στα 2.485 g COD/m^3 στις 12,50h. Στους 15 ^oC η μέγιστη τιμή είναι 2.907 g COD/m^3 λίγο μετά την πρώτη ώρα (1,25h), έπειτα η συγκέντρωση μειώνεται με γρήγορο ρυθμό μέχρι την τρίτη ώρα, ομαλοποιείται και τελικά σταθεροποιείται στα 2.245 g COD/m^3 (12,50h). Στους 20 ^oC η συγκέντρωση της βιομάζας μεγιστοποιείται στην τιμή των 2.858 g COD/m^3 (1,25h) και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τις τρεις ώρες από όπου αρχίζει να σταθεροποιείται και φθάνει στην τελική τιμή 2.002 g COD/m^3 στις 12,50h.

Το μοντέλο για την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας παρουσιάζει ευαισθησία όσον αφορά τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η ανάπτυξη και εφαρμογή υπό ορισμένες συνθήκες και δεδομένους περιορισμούς ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης των λειτουργιών και των μικροβιακών διαδικασιών – μετατροπών που λαμβάνουν χώρα σε μια δεξαμενή αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος από μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης μιας ΕΕΑΑ.

Ως βάση για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η εξής απλοποιημένη διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων: Τα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή αερισμού από την πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, όπου γίνεται η βιολογική επεξεργασία και στη συνέχεια οδηγούνται στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης όπου καθιζάνουν τα στερεά που έχουν απομείνει. Έπειτα το καθαρό πλέον υγρό οδηγείται στις εγκαταστάσεις απολύμανσης ώστε να διατεθεί στο περιβάλλον. Μέρος της ιλύος που έχει καθιζάνει επιστρέφει στη δεξαμενή αερισμού (ιλύς ανακυκλοφορίας) και η υπόλοιπη οδηγείται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος για να μεταφερθεί τελικά στους χώρους τελικής απόθεσης ή περαιτέρω επεξεργασίας.

Η προσομοίωση έγινε με το πρόγραμμα «STELLA 7.0.1» της εταιρίας High Performance Systems Inc. με τις παρακάτω παραδοχές:

- Η διαδικασία μηχανικού αερισμού διατηρεί τη συγκέντρωση οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού σε ένα σταθερό επίπεδο. Αυτή η διαδικασία καταγράφει τη συγκέντρωση του οξυγόνου και διαρκώς προσαρμόζει τον αερισμό στην απαίτηση οξυγόνου μέσα στη δεξαμενή.
- Ο ρυθμός αύξησης της ετερότροφης βιομάζας εξαρτάται από το υπόστρωμα και τη συγκέντρωση του οξυγόνου. Οι σχέσεις υπόστρωμα – ρυθμός αύξησης ετερότροφης βιομάζας και συγκέντρωση οξυγόνου - ρυθμός αύξησης ετερότροφης βιομάζας είναι σύμφωνες με την κινητική που έχει περιγράψει ο Monod.
- Η διάσπαση των κυττάρων μετατρέπει την ετερότροφη βιομάζα σε/στο υπόστρωμα με κινητική χημικής αντίδρασης πρώτης τάξης και δεν καταναλώνει οξυγόνο.
- Τοποθετήθηκαν σταθερές τιμές στις δεκαπέντε παραμέτρους που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7.5.3.
- Δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία της νιτροποίησης και η ανάπτυξη της αυτότροφης βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού.
- Δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία της απονιτροποίησης σε ανοξικές δεξαμενές που επεξεργάζονται τα εξερχόμενα απόβλητα από την δεξαμενή αερισμού πριν την είσοδό τους στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.
- Δεν ελήφθη υπόψη η εσωτερική ανακυκλοφορία της δεξαμενής αερισμού και της ανοξικής δεξαμενής.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν η ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας και η κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος σε συνάρτηση με το χρόνο και σε σχέση με τις μεταβολές των τιμών των παρακάτω παραμέτρων :

1. Ροή (παροχή) λυμάτων - flow
2. Συγκέντρωση οξυγόνου - So
3. Σταθερά κορεσμού οξυγόνου – Ko
4. Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής - Substrate conc Sin
5. Θερμοκρασία – Temperature

Μεταβάλλοντας λοιπόν κάθε φορά διαφορετική παράμετρο από τις παραπάνω παρατηρήσαμε τα αποτελέσματα των αλλαγών αυτών στην εφαρμογή του μοντέλου.

Κρατώντας σταθερές όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους 1-5 στις τιμές που αναφέρονται στο κεφάλαιο 8 διαπιστώθηκε ότι με παροχή 750 m^3/h, αρχική συγκέντρωση ετερότροφης βιομάζας 340 g COD/m^3 και συγκέντρωση υποστρώματος 540 g COD/m^3 ήδη μετά από 3 ώρες και τελικά μετά από 12 ώρες η βιομάζα διατηρείται σε σταθερή κατάσταση στα 2.245 g COD/m^3, ενώ το οργανικό υπόστρωμα διατηρείται σταθερό στα 0 g COD/m^3. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το οργανικό υπόστρωμα δείχνει μια μείωση κατά 100% σε σχέση με την αρχική εισερχόμενή του συγκέντρωση στη δεξαμενή αερισμού.

1. Μηδενίζοντας την παροχή των λυμάτων (flow) παρατηρούμε ότι η ετερότροφη βιομάζα αυξάνεται καταναλώνοντας το αρχικό οργανικό υπόστρωμα (540 g COD/m^3) με πιο αργό ρυθμό όμως, σε περίπου 21 ώρες αντί σε πεντέμισι ώρες. Το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται πάρα πολύ στις 24 ώρες. Αυξάνοντας τη ροή, συγκεκριμένα κάνοντάς την διπλάσια και εικοσαπλάσια, η βιομάζα παραμένει σταθερή μια ώρα αργότερα στην περίπτωση του διπλασιασμού της ροής και ένα τέταρτο νωρίτερα στην περίπτωση του εικοσαπλασιασμού της ροής, ενώ το υπόστρωμα δεν επηρεάζεται καθόλου.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το μοντέλο στον διπλασιασμό και τον εικοσαπλασιασμό της ροής παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος και για την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας.

2. Η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου (So) από 0 έως 2 g/m^3 προκαλεί σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης της παραγόμενης βιομάζας. Μια αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου μεγαλύτερη από 2 g/m^3 δεν οδηγεί σε βελτίωση της διαδικασίας αερισμού στην δεξαμενή αερισμού λόγω της μη ουσιαστικής αύξησης της συγκέντρωσης της παραγόμενης βιομάζας. Αντίθετα σε περίπτωση ύπαρξης μηδενικής συγκέντρωσης οξυγόνου, η βιομάζα καταλήγει στο μηδενισμό της μετά τις 22 ώρες ανάπτυξης. Στο υπόστρωμα δεν παρατηρείται καμία μεταβολή.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι σε μεταβολές της συγκέντρωσης του οξυγόνου μεγαλύτερες από 2 g/m^3 το μοντέλο δεν παρουσιάζει ευαισθησία για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος, ενώ η ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας δεν παρουσιάζει ουσιαστικές αλλαγές.

3. Όταν μειώνεται η σταθερά κορεσμού οξυγόνου (Ko) από 0,5 σε 0 g/m^3 η μέγιστη τιμή της βιομάζας αυξάνεται ελαφρά κατά 70 μονάδες φθάνοντας σε αυτή την τιμή μισή ώρα νωρίτερα. Κατά την στατική φάση η βιομάζα μειώνεται κατά 214 μονάδες συνολικά για αύξηση της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου (Ko) από 0 σε 0,5 g/m^3. Το υπόστρωμα δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου.

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο, όσον αφορά τις μεταβολές της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου, για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος δεν παρουσιάζει ευαισθησία, ενώ για την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας παρουσιάζει ευαισθησία, αφού ο ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας (εξίσωση 5.8) είναι αντιστρόφως ανάλογος της σταθεράς κορεσμού οξυγόνου (Ko).

4. Αύξηση της αρχικής συγκέντρωσης του υποστρώματος εισροής (540 g COD/m^3) κατά 6 (3.000 g COD/m^3) και 10 φορές (5.400 g COD/m^3) προκαλεί μόνο μία ελάχιστη αύξηση κατά 1 μονάδα της συγκέντρωσης της βιομάζας μισή ώρα νωρίτερα. Επίδραση στο υπόστρωμα δεν παρατηρείται.

Το μοντέλο στις μεταβολές της συγκέντρωσης υποστρώματος εισροής από 540 έως 5.400 g COD/m^3 παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα τόσο για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος όσο και για την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας.

5. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 10 σε 20 ^oC οδηγεί σε ελαφρά μείωση της παραγόμενης βιομάζας κατά 240 g COD/m^3 στην σταθερή κατάσταση. Καμία επίδραση δεν παρατηρείται στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα.

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο, όσον αφορά τις μεταβολές της θερμοκρασίας από 10 έως 20 ^oC, παρουσιάζει σταθερότητα για την κατανάλωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος, ενώ αντίθετα για την ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας παρουσιάζει ευαισθησία.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτει ο πίνακας 9.1.

Πίνακας 9.1 Πίνακας επίδρασης παραμέτρων του μοντέλου στο διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα και στην ανάπτυξη της ετερότροφης βιομάζας.

Παράμετρος	**Εύρος**	**Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα**	**Ετερότροφη βιομάζα**	**Σταθερότητα μοντέλου για υπόστρωμα/βιομάζα**
Ροή (flow)	0 m^3/h 750 – 15.000 m^3/h	Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση Μείωση μέχρι την σταθερή κατάσταση	Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση	όχι/όχι ναι/ναι
Συγκέντρωση οξυγόνου (So)	0 – 8 g/m^3	Μείωση μέχρι την σταθερή κατάσταση	Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση (αυξομείωση για 0 g/m^3)	ναι/όχι
Σταθερά κορεσμού οξυγόνου (Ko)	0 – 0,5 g/m^3	Μείωση μέχρι την σταθερή κατάσταση	Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση	ναι/όχι
Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής (Substrate conc Sin)	540 – 5.400 g COD/m^3	Μείωση μέχρι την σταθερή κατάσταση	Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση	ναι/ναι
Θερμοκρασία (Temperature)	10 – 20 ^oC	Μείωση μέχρι την σταθερή κατάσταση	Αύξηση μέχρι την σταθερή κατάσταση	ναι/όχι

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία συμπεραίνεται ότι:

1) Το μοντέλο είναι αξιόπιστο και παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα σε μεγάλο εύρος μεταβολής παραμέτρων, όπως φαίνεται και στον πίνακα 9.1.
2) Η εφαρμογή του χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα, ως σταθερές τιμές, από την ΕΕΑΑ της ΔΕΥΑ Χανίων έδειξε ότι καταλήγει σε σωστά αποτελέσματα.
3) Η ενσωμάτωση εξισώσεων της διαδικασίας νιτροποίησης και απονιτροποίησης σε μελλοντικές εργασίες θα βελτίωνε το παρόν μοντέλο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Companion website, *Biology of Microorganisms* [online]. Διαθέσιμο από: http://cwx.prenhall.com/bookbind/pubbooks/brock/chapter5/deluxe.html [προσβάσιμο στις 28 Μαρτίου 2008]
2. Habekotte B., Lutjeboer H., 1995, *Environmental Modelling with STELLA*, Van Hall Institute. Goningen, The Netherlands.
3. Henze, M., Leslie Grady, Jr C.P., Gujer, W., Marais, G.V.R. and Matsuo, T.:Activated Sludge Model No 1. IAWPRC, Scientific and Technical Reports No 1, London, 1987
4. Henze, M., Leslie Grady, Jr C.P., Gujer, W., Marais, G.V.R. and Matsuo, T.: A General Model for Single-Sludge Wastewater Treatment Systems', Wat.Res., Vol.21, No.5, pp. 405-515, 1987.
5. HPS (High Performance Systems), 2001, STELLA Manual, Hanover, USA.
6. HPS (High Performance Systems), STELLA 7.0.1 Research, *A Getting Started Guide*, Hanover, USA.
7. http://www.envi-e.g [προσβάσιμο στις 28 Φεβρουαρίου 2008].
8. kk-Engineering, *Νόμος 1650 της 15/16.10.86. Για την προστασία του περιβάλλοντος* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.kkengineering.g/legislation/poleodomika/additional/N1650-FEKA160-15_16.10.1986.txt [προσβάσιμο στις 26 Μαϊου 2008].
9. Piet van Schaick Zillesen ,1995, *STELLA Introduction*, Van Hall Institute, Goningen, The Netherlands.
10. Βαβίζος Γ., 1985, Βιολογικός Καθαρισμός, Εκδόσεις Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας (ΕΛ.ΚΕ.ΠΑ.), Αθήνα, Ελλάδα.
11. Βικιπαίδεια, *Επεξεργασία λυμάτων* [online]. Διαθέσιμο από: http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%80%CE%B5%CE%BE%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1_%CE%BB%CF%85%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD [προσβάσιμο στις 18 Μαρτίου 2008]
12. Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων (ΔΕΥΑΧ), *Ελληνική νομοθεσία για τα αστικά απόβλητα* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.deyax.org.g/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=86 [προσβάσιμο στις 26 Μαϊου 2008].
13. Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων (ΔΕΥΑΧ), *Φωτογραφίες-Εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.deyax.org.g/index.php?option=com_zoom&Itemid=79&catid=2 [προσβάσιμο στις 28 Μαϊου 2008].
14. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, *Παρακολούθηση ανάπτυξης μικροβιακής καλλιέργειας σε υγρό υπόστρωμα* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.metal.ntua.g/uploads/2995/askhsh1.pdf [προσβάσιμο στις 26 Μαρτίου 2008]
15. Λέκκας Θ., 2001, *Περιβαλλοντική Μηχανική ΙΙ:* Διαχείριση *υγρών αποβλήτων*, Κόσμος Πεμερ ΕΠΕ, Αθήνα, Ελλάδα.

16. Πανεπιστήμιο Αιγαίου- Τμήμα Περιβάλλοντος - Εργαστήριο Διαχείρισης Αποβλήτων – EnviroHelp for business, *Υγρά απόβλητα* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.aegean.g/environment/eda/Envirohelp/geece/regulations/RegulationsDirectWasteWater.html [προσβάσιμο στις 26 Μαϊου 2008].
17. Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας - Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωροταξίας, 2006, *Οδηγός εσωτερικού ελέγχου λειτουργίας και συντήρησης μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων*, Εταιρεία Περιβαλλοντικών Μελετών Α.Ε., Αθήνα [online]. Διαθέσιμο από: http://www.rcm.g/resourceview.cfm?id=F67287FE-145E-4521-43416FBADDEF72D1 [προσβάσιμο στις 28 Μαϊου 2008].
18. Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – Εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής & Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας, *Αρχές Βιοχημικής Μηχανικής Σημειώσεις Μαθήματος Τεχνικής Βιοχημικών Διεργασιών* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.enveng.tuc.g/Downloads/MP423/TBD_Lecture%20Notes_2003_INTRODUCTION.pdf [προσβάσιμο στις 26 Μαρτίου 2008]
19. Πράξη, Τεχνολογία *επεξεργασίας επικινδύνων υγρών αποβλήτων με χρήση ηλιακής ενέργειας* [online]. Διαθέσιμο από:.http://dbserver.forthnet.g/Praxis/servlet/praxis.PServlet?s=praxis.TMSowPublic?id=122&l=el [προσβάσιμο στις 18 Μαρτίου 2008]
20. Στάμου Α.Ι., 2004, *Βιολογικός Καθαρισμός Αστικών Αποβλήτων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα.
21. Ταμιωλάκης Γ.ΙΩ., 2005, *Ιστορία της Αποχέτευσης της Θεσσαλονίκης*, Ελληνικές Εκδόσεις, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
22. ΤΕΙ Κρήτης, *Επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων* [online]. Διαθέσιμο από: http://www.teicrete.g/TEI/LAB/downloads/waste_treatment/wwt.ppt#1 [προσβάσιμο στις 19 Μαρτίου 2008]
23. Τζιάνα Α.Α, 2005, *Προσωπικό αρχείο φωτογραφιών*, Πρακτική άσκηση, Ε.Υ.Α.Θ. Α.Ε, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
24. Τσόγκας Χ.ΕΡ, 1998, *Δίκτυα Αποχέτευσης και Επεξεργασία Λυμάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, Ελλάδα.