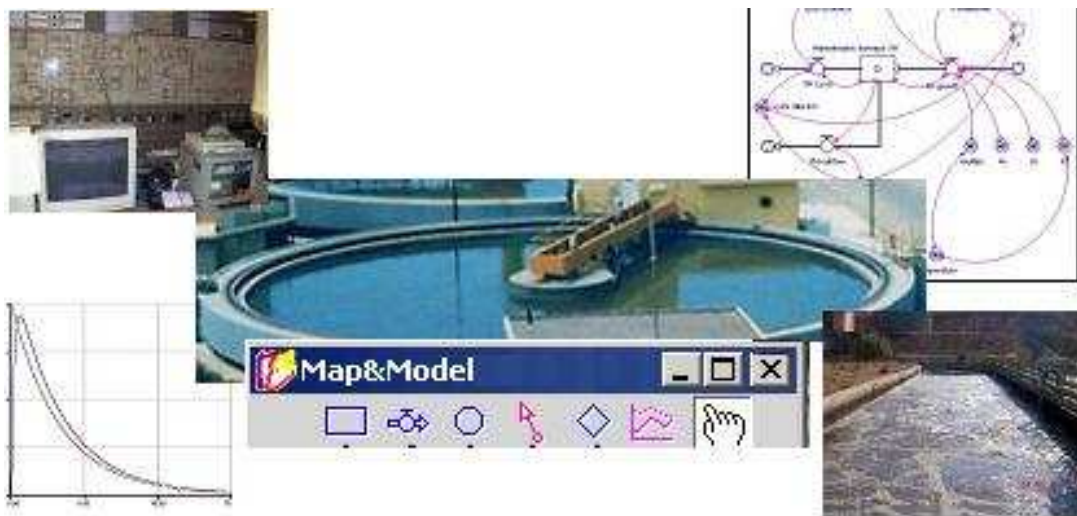


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



## **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ**

**ΠΕΤΡΟΧΕΙΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**2006**

# **Προσομοίωση Λειτουργίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων**

**Πετρόχειλος Κωνσταντίνος**

**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος**

**Χανιά**

**2006**

Εξεταστική Επιτροπή:  
Αναπλ. Καθ. Ε. Κατσίβελα  
Επικ. Καθ. Π. Σουπιός  
Καθ. Εφαρμ. Ν. Λυδάκης

Επιβλέποντες Καθηγητές:  
Αναπλ. Καθ. Ελευθερία Κατσίβελα  
Δρ. Ευάγγελος Τερζής

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εκπαιδευτικό του Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης, Δρ. Ευάγγελο Τερζή για την ευγενική παραχώρηση του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας και του προγράμματος προσομοίωσης STELLA έκδοση 7.0.1. Την επίβλεψη της πτυχιακής εργασίας είχε αναλάβει αρχικά ο Δρ. Ευάγγελος Τερζής. Η πτυχιακή εργασία ολοκληρώθηκε κατά 95% με τη βοήθεια του κ. Τερζή, για αυτό και θα ήθελα σε αυτό το σημείο να τον ευχαριστήσω για τη συμβολή του. Την επίβλεψη της πτυχιακής εργασίας ανέλαβε αργότερα η Δρ. Ελευθερία Κατσίβελα, χάρη στην οποία κατάφερα να την ολοκληρώσω.

Θα ήθελα επίσης να αναφέρω, ότι τον Φεβρουάριο του 2005 στο Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος του Παραρτήματος Χανίων του ΤΕΙ Κρήτης, ο σπουδαστής Βασίλειος Αποστολόπουλος παρουσίασε την πτυχιακή του εργασία, η οποία αφορούσε την: «Προσομοίωση μηχανισμών ρύπανσης και μεταφορά επίμονων οργανικών ρυπαντών στο υδάτινο περιβάλλον». Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε επίσης με το πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA. Η πτυχιακή εργασία του συνάδερφου καθώς και η παρούσα πτυχιακή εργασία ξεκίνησαν και αναπτύχθηκαν - μέχρις ενός σημείου - παράλληλα με επιβλέποντα καθηγητή τον Δρ. Ευάγγελο Τερζή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους εκπαιδευτικούς του Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος του Παραρτήματος Χανίων του ΤΕΙ Κρήτης, χάρη στους οποίους απέκτησα κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου όλη την απαιτούμενη γνώση που χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο για την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ένα απλό, ευέλικτο και ευκολονόητο μοντέλο προσομοίωσης σε μια δεξαμενή αερισμού μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (ΕΕΑΛ) και να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητά του, έτσι ώστε να αποτελέσει πιθανή βάση για τη δημιουργία πολυπλοκότερων μοντέλων προσομοίωσης που θα λαμβάνουν υπόψη τους και άλλους παράγοντες και που θα περιλαμβάνουν στην προσομοίωση και άλλα τμήματα μιας ΕΕΑΛ, όπως οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης.

Για την εφαρμογή της προσομοίωσης ελήφθη ως δεδομένη η απλοποιημένη επεξεργασία λυμάτων που περιγράφεται παρακάτω. Τα λύματα εισέρχονται σε μια πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης όπου αφαιρείται μεγάλο μέρος αιωρούμενων σωματιδίων που καθιζάνουν ή επιπλέουν. Τα υγρά απόβλητα έπειτα εισέρχονται στη δεξαμενή αερισμού όπου μειώνεται το οργανικό τους φορτίο. Αμέσως μετά ρέουν προς την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης όπου καθιζάνει η δευτεροβάθμια λάσπη (βιομάζα). Το επεξεργασμένο πια νερό της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης εξέρχεται του συστήματος. Τμήμα της λάσπης που καθιζάνει στην δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης επιστρέφει στην δεξαμενή αερισμού (ιλύς ανακυκλοφορίας), ενώ το υπόλοιπο τμήμα της λάσπης αυτής εξέρχεται του συστήματος σαν περίσσεια ιλύος.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης ελήφθησαν υπόψη οι εξής παραδοχές:

- α) Η συγκέντρωση του οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού διατηρείται σταθερή.
- β) Δεν λαμβάνεται υπόψη η ανακυκλοφορία ιλύος, αλλά η «ηλικία ιλύος».
- γ) Οι σχέσεις υποστρώματος-ρυθμού αύξησης βιομάζας και συγκέντρωσης οξυγόνου-ρυθμού αύξησης βιομάζας είναι σύμφωνες με την κινητική του Monod και δεν αλλάζουν την συγκέντρωση οξυγόνου, αφού την διατηρούμε σταθερή.
- δ) Η διάσπαση-λύση (lysis) των κυττάρων είναι χημική αντίδραση με κινητική πρώτης τάξης (first order chemical reaction kinetics) και κατά τη διαδικασία αυτή η συγκέντρωση του οξυγόνου παραμένει σταθερή.
- ε) Η συγκέντρωση του εισρέοντος (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος είναι σταθερή και ίση με  $540 \text{ gr/m}^3$  σε όλες τις εφαρμογές του προγράμματος εκτός από την εφαρμογή που ορίζεται ως μεταβλητή η  $S_{in}$  (παράγραφοι 7.1.5 & 8.5).

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 7.0.1 του προγράμματος προσομοίωσης "STELLA" της εταιρίας High Performance Systems Inc.

Στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης εξετάστηκαν ως προς την επίδραση τους στην κατανάλωση του υποστρώματος και στην παραγωγή ετερότροφης βιομάζας οι εξής έξι παράμετροι:

- α) Η ροή ( $f$ ) των εισρέοντων στην δεξαμενή αερισμού λυμάτων [ $\text{m}^3/\text{ημέρα}$ ].
- β) Η συγκέντρωση οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού ( $S_o$ ) [ $\text{gr/m}^3$ ].
- γ) Ο συντελεστής κορεσμού για οξυγόνο ( $K_o$ ) (Michael Menten saturation constant for oxygen) [ $\text{gr/m}^3$ ].
- δ) Η ηλικία ιλύος [ημέρες].
- ε) Η συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος ( $S_{in}$ ) [ $\text{gr/m}^3$ ].
- στ) Η θερμοκρασία στη δεξαμενή αερισμού [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Πρέπει να αναφερθεί ότι κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκαν οι προαναφερθείσες παράμετροι (εκτός ελαχίστων περιπτώσεων) μετά από ένα χρονικό διάστημα οι συγκεντρώσεις του υποστρώματος και της βιομάζας κατέληγαν σε δυναμική ισορροπία. Πιο συγκεκριμένα κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκαν, οι έξι παράμετροι προκαλούν τα ακόλουθα στο σημείο της δυναμικής ισορροπίας (Οι μηδενικές τιμές των παραμέτρων δεν ελήφθησαν υπόψη):

- Η αύξηση της ροής αυξάνει τη συγκέντρωση της βιομάζας ενώ δεν έχει επίδραση στο υπόστρωμα. Η μείωση της ροής μειώνει τη συγκέντρωση της βιομάζας ενώ δεν έχει επίδραση σε αυτή του υποστρώματος.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου μέχρι ενός ορίου αυξάνει τη βιομάζα και μειώνει το υπόστρωμα. Περαιτέρω αύξηση δεν επιφέρει αλλαγές. Η μείωση του οξυγόνου προκαλεί την αντίθετη συμπεριφορά.
- Η αύξηση του συντελεστή  $K_o$  προκαλεί αύξηση του υποστρώματος και μείωση της βιομάζας. Η μείωση του συντελεστή  $K_o$  προκαλεί τα αντίθετα αποτελέσματα.
- Η αύξηση της ηλικίας ιλύος προκαλεί αύξηση της βιομάζας και μείωση του υποστρώματος. Αντίστοιχα η μείωση της ηλικίας ιλύος προκαλεί τα αντίστροφα αποτελέσματα.
- Η αύξηση του εισρέοντος υποστρώματος αυξάνει την βιομάζα ενώ δεν επηρεάζει το υπόστρωμα. Η μείωση του εισρέοντος υποστρώματος προκαλεί μείωση της βιομάζας ενώ δεν επηρεάζει το υπόστρωμα.
- Τέλος η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της βιομάζας και μείωση του υποστρώματος, ενώ η μείωση της προκαλεί τα αντίστροφα αποτελέσματα.

## **ABSTRACT**

The aim of the present diploma thesis was to develop and to apply a simple, flexible and easy to understand simulation model in the aeration tank of a domestic wastewater (sewage) treatment plant and to test its efficiency. In addition, this application should stand as a ground base for creating more complex simulation models that can take under consideration even more parameters and that can simulate additionally also other parts of a sewage treatment plant, such as the primary and secondary settling-sedimentation tanks.

The simplified sewage treatment layout that is described hereafter was used in order to create the simulation model. Sewage enters in the primary settling tank, in which removal of floating and settling suspended solids takes place. Wastewater then flows in the aeration tank where a part of its organic load is removed. Later on it enters in the secondary sedimentation tank where the secondary sludge (biomass) settles. The secondary treated water exits from the system. A part of the secondary sludge returns to the aeration tank (recirculation sludge) and the rest of the secondary sludge exits from the system (waste sludge).

The following assumptions-considerations were applied in order to apply the simulation model:

- a) Oxygen's concentration in the aeration tank is constantly maintained stable.
- b) Recirculation sludge is not taken under consideration. "Sludge age" is used instead.
- c) The substrate - biomass growth rate and the oxygen's concentration - biomass growth rate associations act in accordance to the Monod Kinetics and do not alter the oxygen's concentration, since it is maintained stable.
- d) Lysis of cells is accomplished with first order chemical reaction kinetics. During the lysis process the oxygen's concentration remains constant.

The "STELLA" simulation program, version 7.0.1 (copyright: High Performance Systems Inc.) was used to simulate the model in a personal computer.

The results-consequences of the following 6 parameters to substrate "consumption" and to biomass "growth" were studied and evaluated in this simulation model:

- a) Wastewater's flow ( $f$ ) that enters the aeration tank [ $m^3/day$ ].
- b) Oxygen's concentration in aeration tank ( $S_o$ ) [ $gr/m^3$ ].
- c) Michael Menten saturation constant for oxygen ( $K_o$ ) [ $gr/m^3$ ].
- d) Sludge age [days].
- e) Concentration of influent substrate (that enters the aeration tank) ( $S_{in}$ ) [ $gr/m^3$ ].
- f) Temperature in aeration tank [ $^{\circ}C$ ].

It must be noted that the substrate's and the biomass's concentrations -under all circumstances (apart from few exceptions) that have been applied to these 6 parameters in this simulation model- always reached a dynamic equilibrium (steady state) at a point of time. In particular, under the circumstances (values) that have been applied in this simulation model, the 6 parameters cause the following variations at the dynamic equilibrium point of time (The zero values of the parameters were not taken under consideration):

- a) The increase of the flow causes an increase in the concentration of biomass, while it does not affect the substrate. In contrast, the decrease of the flow causes a decrease of biomass, while it still does not affect the substrate.
- b) Increasing the oxygen's concentration, up to a certain point, causes an increase in biomass and decreases the amount of the substrate. A further increase does not cause any changes. Decreasing the oxygen's concentration causes the opposite effects.
- c) An increase of the saturation constant ( $K_o$ ) causes an increase of substrate and a decrease of biomass. In contrast, a decrease in saturation constant produces the opposite effects.
- d) An increase of the sludge age causes an increase of biomass and a decrease of substrate, while a decrease in sludge age causes the opposite effects.
- e) Increasing the influent (incoming) substrate causes an increase of biomass while it does not affect the substrate. Decreasing the influent substrate causes a decrease of biomass while it still does not affect the substrate.
- f) An increase in temperature leads to an increase of biomass and a decrease of substrate's concentration. A decrease in temperature leads to the opposite effects.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	3
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ/ ABSTRACT</b> .....	4
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	7
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	9
<b>Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	10
<b>Κεφάλαιο 2: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ</b> .....	11
2.1. Βασικές μονάδες επεξεργασίας .....	11
2.2. Συνοπτική περιγραφή της εγκατάστασης .....	12
2.2.1. Προκαταρκτική επεξεργασία ή προεπεξεργασία .....	12
2.2.1.1. Φρεάτιο άφιξης-Εσχάρες .....	12
2.2.1.2. Αεριζόμενοι εξαμμωτές-λιποσυλλέκτες .....	13
2.2.1.3. Διάυλος μέτρησης παροχής .....	13
2.2.2. Βιολογική Επεξεργασία – Σύστημα ενεργού ιλύος .....	13
2.2.2.1. Δεξαμενή Επιλογής Βακτηριδίων (ΔΕΒ) .....	14
2.2.2.2. Φρεάτιο Διανομής 1 (ΦΔ1) .....	14
2.2.2.3. Ανοξικές Δεξαμενές (ΑΟΔ)-Δεξαμενές Αερισμού (ΔΑ) .....	14
2.2.2.4. Φρεάτιο διανομής 2 (ΦΔ2) .....	15
2.2.2.5. Δεξαμενές Καθίζησης (ΔΚ) .....	15
2.2.2.6. Αντλιοστάσιο λάσπης (ΑΝΛ) .....	16
2.2.2.7. Αντλιοστάσιο ανάμικτου υγρού (ΑΝΑΥ) .....	16
2.2.3. Χλωρίωση (ΔΧΛ) .....	16
2.2.4. Επεξεργασία λάσπης .....	16
2.2.4.1. Πάχυνση λάσπης σε δεξαμενές πάχυνσης (ΔΠΧ) .....	17
2.2.4.2. Αφυδάτωση λάσπης με ταινιοφιλτρόπρεσες (ΤΦ) .....	17
2.2.5. Αντλιοστάσιο στραγγιδίων .....	17
2.3. Εναλλακτικές μονάδες επεξεργασίας .....	18
2.3.1. Αναερόβια δεξαμενή φωσφόρου (βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου) (ΑΝΔ) ...	18
2.3.2. Οξειδωτικές τάφροι (ΟΤ) .....	18
2.3.3. Αφυδάτωση της λάσπης σε κλίνες ξήρανσης (ΚΞ) .....	18
<b>Κεφάλαιο 3: ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ</b> .....	19
3.1. Συστήματα ασυνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα – περιορισμένο υπόστρωμα (μια αρχική ποσότητα υποστρώματος) .....	19
3.1.1. Φάσεις αύξησης μιας μονοκαλλιέργειας βακτηρίων με περιορισμό υποστρώματος .....	23
3.1.2. Μαθηματική παράσταση της καμπύλης αύξησης του πληθυσμού των βακτηρίων σε περιορισμένο υπόστρωμα .....	24
3.1.3. Παρεμπόδιση ανάπτυξης – Κινητική αύξησης μικροοργανισμών παρουσία αναστολέα .....	27
3.1.4. Κινητική πολλαπλών υποστρωμάτων .....	28
3.2. Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα (απεριόριστο υπόστρωμα) χωρίς ανακυκλοφορία ιλύος .....	29
3.3. Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας υποστρώματος με ανακυκλοφορία ιλύος .....	34
<b>Κεφάλαιο 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ</b> .....	38
4.1. Είδη μοντέλων προσομοίωσης .....	38
4.2. Ιστορική εξέλιξη .....	39
4.3. Οργάνωση μοντέλου προσομοίωσης διακριτών γεγονότων .....	39

4.4. Πλεονεκτήματα, Μειονεκτήματα και Δυσκολίες της Προσομοίωσης .....	41
4.5. Αντικείμενο της Περιβαλλοντικής Μοντελοποίησης .....	42
4.6. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του Μοντέλου .....	44
<b>Κεφάλαιο 5: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ STELLA</b> .....	47
5.1. Περιληπτική σύνοψη του περιβάλλοντος του προγράμματος προσομοίωσης STELLA .....	47
5.2. Βασικά εργαλεία του προγράμματος .....	48
5.2.1. Αποθέματα (stocks) .....	49
5.2.2. Ροές (flows) .....	49
5.2.3. Μετατροπείς (converters) .....	50
5.2.4. Σύνδεσμοι (connectors) .....	50
5.2.5. Γραφήματα .....	52
5.2.6. Πίνακες .....	53
5.2.7. Συσκευές Εισαγωγής Δεδομένων .....	55
5.3. Εκκίνηση Προσομοίωσης Μοντέλου .....	56
<b>Κεφάλαιο 6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ (ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ)</b> .....	57
6.1. Εισαγωγή - Σκοπός του μοντέλου .....	57
6.2. Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο .....	57
6.3. Παραδοχές και περιορισμοί του μοντέλου .....	59
6.4. Εφαρμογή του μοντέλου στο πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA .....	59
6.5. Εξισώσεις του μοντέλου .....	66
6.5.1. Διαφορικές Εξισώσεις .....	66
6.5.2. Λοιπές Εξισώσεις .....	66
6.5.3. Παράμετροι που εμείς ορίζουμε .....	66
<b>Κεφάλαιο 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b> .....	68
7.1. Ανάλυση «Ευαισθησίας» του Μοντέλου .....	69
7.1.1. Ροή .....	69
7.1.2. Συγκέντρωση οξυγόνου ( $S_o$ ) .....	72
7.1.3. Συντελεστής $K_o$ .....	74
7.1.4. Ηλικία ιλύος .....	76
7.1.5. Συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος (Substrate conc $S_{in}$ ) .....	78
7.1.6. Θερμοκρασία .....	80
<b>Κεφάλαιο 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	82
8.1. Ροή .....	83
8.2. Συγκέντρωση Οξυγόνου ( $S_o$ ) .....	85
8.3. Συντελεστής $K_o$ (Michaelis Menten saturation constant for oxygen) .....	87
8.4. Ηλικία ιλύος .....	89
8.5. Συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος (Substrate conc $S_{in}$ ) .....	90
8.6. Θερμοκρασία .....	92
8.7. Αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης .....	93
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	94
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	95



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας και Βιοχημικών Διεργασιών κατά το ακαδημαϊκό έτος 2005-2006, στα πλαίσια της φοίτησης μου στο Τμήμα **Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος** του Παραρτήματος Χανίων του ΤΕΙ Κρήτης.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιάσει με απλοποιημένο τρόπο μια προσομοίωση (με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή) της λειτουργίας μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (ΕΕΑΛ). Πιο συγκεκριμένα προσομοιώθηκαν οι λειτουργίες και οι χημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια δεξαμενή αερισμού μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (ΕΕΑΛ). Αναλυτικότερα:

- Το κεφάλαιο 1 αναφέρεται περιληπτικά στο σκοπό των ΕΕΑΛ, τα βλαβερά συστατικά των αποβλήτων και τη σχέση ετερότροφης βιομάζας - διαλυμένου οργανικού υποστρώματος, των δύο κύριων παραγόντων μιας δεξαμενής αερισμού.
- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ένα υπόδειγμα Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων.
- Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η αύξηση των βακτηρίων (ετερότροφη βιομάζα) μέσα από τη θεωρία της κινητικής της βιολογικής αύξησης.
- Το κεφάλαιο 4 αναφέρεται στις περιβαλλοντικές προσομοιώσεις.
- Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει το πρόγραμμα προσομοίωσης (σε ηλ. υπολογιστή) “STELLA” (έκδοση 7.0.1).
- Το κεφάλαιο 6 παρουσιάζει και αναλύει το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας μιας ΕΕΑΛ.
- Το κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
- Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα της προσομοίωσης.

## Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αντιμετώπισης της ρύπανσης των υδάτινων πόρων από τα υγρά απόβλητα είναι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (ΕΕΑΛ). Οι ΕΕΑΛ έχουν ως σκοπό τον καθαρισμό (διαχωρισμό) των αστικών αποβλήτων από τα «βλαβερά» συστατικά που περιέχουν, ώστε αυτά να διατεθούν ακίνδυνα στο περιβάλλον.

Ως «βλαβερά» συστατικά των αποβλήτων θεωρούνται 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, τα θρεπτικά στοιχεία (όπως το άζωτο και ο φώσφορος), τα βαρέα μέταλλα κ.α.

Αν τα απόβλητα διοχετευθούν χωρίς επεξεργασία σε έναν υδάτινο αποδέκτη δημιουργούν διάφορα προβλήματα. 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 των 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 (δηλαδή αναπνέοντας), που βρίσκεται διαλυμένο στο νερό του φορέα μέχρι να το εξαντλήσουν τελείως, δημιουργώντας τελικά αναερόβιες συνθήκες. Το άζωτο και ο φώσφορος μπορεί να δημιουργήσουν το λεγόμενο φαινόμενο του ευτροφισμού, που εκδηλώνεται με την υπερβολική ανάπτυξη φυκών στον υδάτινο φορέα, τη μείωση της βιοποικιλότητας και τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών και δυσάρεστων οσμών (Στάμου, 1995).

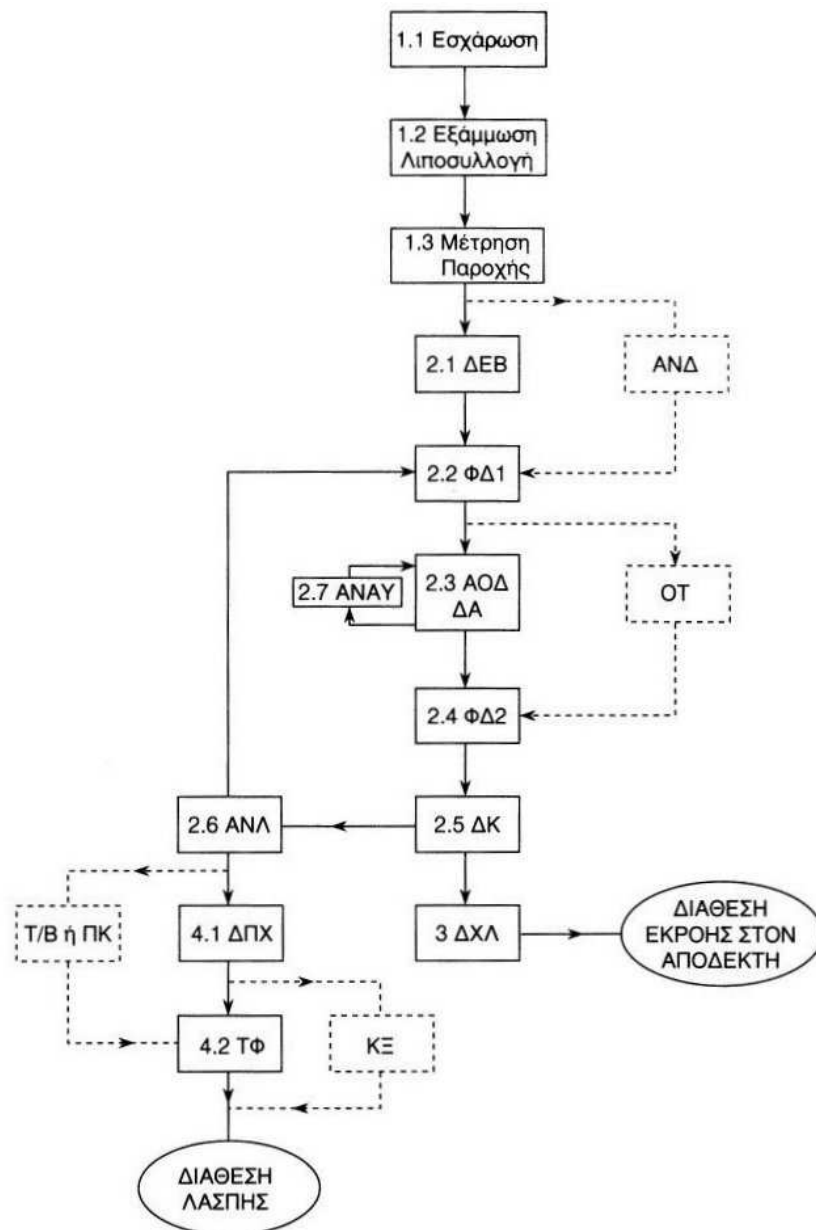
Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός συστήματος βιολογικού καθαρισμού (ΕΕΑΛ). Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η δεξαμενή αερισμού μιας ΕΕΑΛ, που αποτελεί τον πυρήνα της και το πιο σημαντικό κομμάτι της, αφού εκεί πραγματοποιείται η μείωση του οργανικού φορτίου των λυμάτων. Επίσης αναλύθηκε η σχέση **διαλυμένου οργανικού υποστρώματος – ετερότροφης βιομάζας**, των δύο βασικών παραγόντων σε μια δεξαμενή αερισμού. Το υπόστρωμα, που δεν είναι άλλο από το οργανικό φορτίο των λυμάτων, αποτελεί την «τροφή» της ετερότροφης βιομάζας, που αποτελείται από τους μικροοργανισμούς που αποδομούν ή μετασχηματίζουν τις «βλαβερές» οργανικές ενώσεις που περιέχονται στα αστικά λύματα που προκαλούν προβλήματα σε ένα οικοσύστημα.

## Κεφάλαιο 2: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα υπόδειγμα Εγκατάστασης Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων (Στάμου, 1995).

### 2.1. Βασικές μονάδες επεξεργασίας.

Η ΕΕΑΛ του υποδείγματος σχεδιασμού αποτελείται από τις ακόλουθες μονάδες:



Σχήμα 2.1. Βασικές και εναλλακτικές μονάδες του υποδείγματος σχεδιασμού (Στάμου, 1995).

- ❖ Προκαταρκτική επεξεργασία
  - Φρεάτιο άφιξης – εσχάρες
  - Αεριζόμενοι εξαμμωτές – λιποσυλλέκτες
  - Δίαυλος μέτρησης παροχής
- ❖ Βιολογική επεξεργασία

- Δεξαμενή επιλογής βακτηριδίων (ΔΕΒ)
- Φρεάτιο διανομής Νο1 (ΦΔ1)
  - Παράλληλη λειτουργία αναερόβιας δεξαμενής (ΑΝΔ)
- Ανοξικές δεξαμενές (ΑΟΔ) – δεξαμενές αερισμού (ΔΑ)
  - Εναλλακτικά: Οξειδωτική τάφρος (ΟΤ)
- Φρεάτιο διανομής Νο2 (ΦΔ2)
- Δεξαμενές καθίζησης (ΔΚ)
- Αντλιοστάσιο λάσπης (ΑΝΛ)
- Αντλιοστάσιο ανάμικτου υγρού (ΑΝΑΥ)
- ❖ Απολύμανση με χλωρίωση (ΔΧΛ)
- ❖ Επεξεργασία λάσπης
  - Πάχυνση λάσπης σε δεξαμενές πάχυνσης (ΔΠΧ)
  - Αφυδάτωση λάσπης με ταινιοφιλτρόπρεςες (ΤΦ)
    - Εναλλακτικά: Ταινίες βαρύτητας (Τ/Β) ή περιστρεφόμενοι κύλινδροι πάχυνσης λάσπης (ΠΚ) ή κλίνες ξήρανσης (ΚΞ).
- ❖ Αντλιοστάσιο στραγγιδίων

## 2.2. Συνοπτική περιγραφή της εγκατάστασης.

### 2.2.1. Προκαταρκτική επεξεργασία ή προεπεξεργασία.

Στην προκαταρκτική επεξεργασία γίνεται η απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων (εσχάρωση), της άμμου (εξάμμωση) και των λιπών και ελαίων (λιποσυλλογή) από την υγρή μάζα των αποβλήτων, η μέτρηση της παροχής και η υποδοχή των βοθρολυμάτων.

#### Υποδοχή βοθρολυμάτων

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

Η διάταξη υποδοχής βοθρολυμάτων αποτελείται από: α) τον χώρο εκκένωσης των βοθρολυμάτων, β) τα φρεάτια υποδοχής (με διατάξεις στεγανής σύνδεσης με τις σωληνώσεις των βυτιοφόρων), γ) τη δεξαμενή εξισορρόπησης βοθρολυμάτων και δ) τις αντλίες βοθρολυμάτων.

#### 2.2.1.1. Φρεάτιο άφιξης-Εσχάρες.

Σκοπός των εσχάρων είναι η συγκράτηση σε αυτές και στη συνέχεια η απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων (κομμάτια ξύλων, πλαστικά, κλαδιά, κουρέλια κλπ.) για να προστατευθεί από το φράξιμο και τη φθορά ο εξοπλισμός της ΕΕΑΛ. Συνήθως τοποθετούνται μια ή δύο μηχανικές (αυτοκαθαριζόμενες) εσχάρες και μια παρακαμπτήρια χειροκίνητη (καθαρίζεται με τα χέρια). Σε κανονική λειτουργία λειτουργούν μόνο οι μηχανικές εσχάρες, ενώ σε περίπτωση έμφραξης ή διακοπής της λειτουργίας τους τα λύματα υπερχειλίζουν αυτόματα προς την παρακαμπτήρια εσχάρα.

Τα λύματα φτάνουν μέσω του κεντρικού αποχετευτικού αγωγού (ΚΑΑ) στο φρεάτιο άφιξης της ΕΕΑΛ και από εκεί με βαρύτητα σε δύο τύπους εσχάρων (στις αυτόματες τοξωτές εσχάρες και στις απλές χειροκίνητες παρακαμπτήριες εσχάρες). Τα εσχαρίσματα οδηγούνται στο πάνω μέρος των μηχανικών εσχάρων με χρήση ξέστρων και από εκεί με ένα κοχλία-πρέσα αφυδάτωσης μεταφέρονται σε δοχεία αποθήκευσης προς αποκομιδή. Τα στραγγίδια επιστρέφουν στο φρεάτιο άφιξης με την παρεμβολή του αντλιοστασίου στραγγιδίων. Οι εσχάρες βρίσκονται μέσα σε κτίριο με σύστημα εξαερισμού-απόσμησης.

### **2.2.1.2. Αεριζόμενοι εξαμμωτές-λιποσυλλέκτες.**

Σκοπός της εξάμμωσης είναι η απομάκρυνση των κόκκων άμμου, των σωματιδίων αργίλου ή των άλλων σωματιδίων γεωλογικής ή όχι υφής, με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 μm 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 ηλεκτρομηχανικού (H-M) εξοπλισμού (αντλίες κλπ.) και μείωση της απόδοσης των επόμενων μονάδων επεξεργασίας.

Τα βασικά είδη των εξαμμωτών είναι δύο: Οι εξαμμωτές με σταθερή ταχύτητα ροής (η ταχύτητα ροής παραμένει σταθερή (περίπου 0,30 m/s) ανεξάρτητα από την παροχή των λυμάτων) και οι αεριζόμενοι εξαμμωτές. Οι αεριζόμενοι εξαμμωτές συνδυάζονται και με λιποσυλλέκτες.

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

Σε σύγχρονες ΕΕΑΛ τα λύματα οδηγούνται στο δίδυμο αεριζόμενο εξαμμωτή-λιποσυλλέκτη. Ο αερισμός παρέχεται από φυσητήρες (που βρίσκονται στο κτίριο εσχάρων ή σε αυτόνομο κτίριο) μέσω μιας σειράς διαχυτήρων σε κάθε εξαμμωτή. Η άμμος καθιζάνει σε χοάνες στον πυθμένα των εξαμμωτών, απ' όπου αντλείται και απομακρύνεται με σταθερές αεραντλίες (που λειτουργούν με πρόσθετους φυσητήρες) προς τον κοχλιωτό διαχωριστή άμμου και από εκεί καταλήγει στα δοχεία αποθήκευσης της άμμου (όμοια με αυτά των εσχαρασμάτων) προς αποκομιδή. Τα στραγγίδια επιστρέφουν στο ΦΔ1 με την παρεμβολή του αντλιοστασίου στραγγιδίων. Τα λίπη από τις επιφάνειες λιποσυλλογής οδηγούνται με την βοήθεια του υπερχειλιστή εκροής λιπών και μιας σειράς επιφανειακών διαχυτήρων προς το φρεάτιο λιπών, όπου στραγγίζουν τα υγρά και τα λίπη αφαιρούνται με διάταξη απορρόφησης.

Ανάντη και κατάντη των καναλιών των εσχάρων καθώς και ανάντη των εξαμμωτών, υπάρχουν χειροκίνητα θυροφράγματα απομόνωσης. Σε περίπτωση βλάβης ή έμφραξης της μηχανικής εσχάρας γίνεται αυτόματη υπερχειλίση των λυμάτων προς το κανάλι της χειροκίνητης εσχάρας. Στην περίπτωση που κλείσουν τα θυροφράγματα της μηχανικής εσχάρας τα λύματα υπερχειλίζουν ηθελημένα προς την παρακαμπτήρια εσχάρα. Στην περίπτωση που κλείσουν τα θυροφράγματα και των δύο εσχάρων ανεβαίνει η στάθμη των αποβλήτων στο φρεάτιο άφιξης και τα λύματα υπερχειλίζουν προς τον παρακαμπτήριο αγωγό. Τα θυροφράγματα των εξαμμωτών χρησιμοποιούνται για ηθελημένη παράκαμψη των εξαμμωτών.

### **2.2.1.3. Δίαυλος μέτρησης παροχής.**

Σκοπός της μέτρησης παροχής είναι ο υπολογισμός της παροχής που διέρχεται από την ΕΕΑΛ, με βάση την οποία ρυθμίζεται η λειτουργία σημαντικών μονάδων. Η μέτρηση της παροχής γίνεται σε ανοικτούς (π.χ. δίαυλος με στένωση Parshall) ή κλειστούς αγωγούς (π.χ. σωλήνας Pitot).

Στο δίαυλο Parshall μετρείται το βάθος ροής με διάταξη υπερήχων, υπολογίζεται αυτόματα και καταγράφεται η παροχή των λυμάτων στον κύριο πίνακα ελέγχου.

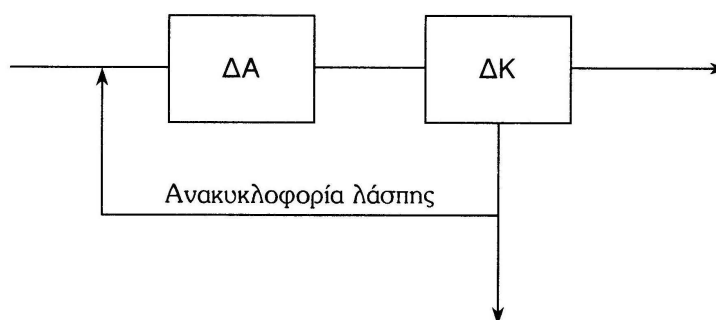
Με το σήμα της παροχής ρυθμίζεται συνήθως η λειτουργία της διάταξης συλλογής, απομάκρυνσης και στράγγισης της άμμου του αεριζόμενου εξαμμωτή, των αντλιών ανακυκλοφορίας και των μονάδων που χρησιμοποιούν χημικά (π.χ. συνδυασμένη βιολογική – χημική απομάκρυνση φωσφόρου, απολύμανση κ.α.).

### **2.2.2. Βιολογική επεξεργασία – Σύστημα ενεργού ιλύος.**

Ο σκοπός του συστήματος ενεργού ιλύος (EI) είναι η απομάκρυνση των διαλυμένων οργανικών ουσιών των αποβλήτων με βιοχημικές διαδικασίες.

Οι κυριότερες συνιστώσες ενός συστήματος ΕΙ (σχήμα 2.2) είναι: (α) ο βιολογικός αντιδραστήρας (ΒΑ), που είναι κυρίως η δεξαμενή αερισμού (ΔΑ), όπου οι μικροοργανισμοί (μ/ο) που βρίσκονται σε αιώρηση αναπτύσσονται καταναλώνοντας συστατικά των αποβλήτων (π.χ. οργανικές ουσίες, αμμωνία) και (β) η δεξαμενή καθίζησης (ΔΚ), όπου καθιζάνουν και διαχωρίζονται τα αιωρούμενα στερεά που περιέχουν και οι μ/ο από τα υγρά απόβλητα. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.2.

Ένα σύστημα ΕΙ μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει και άλλους ΒΑ, όπως π.χ. ανοξικές δεξαμενές (ΑΟΔ) για απονιτροποίηση (βιολογική απομάκρυνση αζώτου), αναερόβιες δεξαμενές (ΑΝΔ, βλ. 2.3.1. Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου) και δεξαμενές επιλογής βακτηριδίων (ΔΕΒ) για τον περιορισμό της ανάπτυξης συγκεκριμένων ειδών βακτηριδίων.



*Σχήμα 2.2. Σχηματική διάταξη συστήματος ενεργού ιλύος (Στάμου, 1995).*

### **2.2.2.1. Δεξαμενή Επιλογής Βακτηριδίων (ΔΕΒ).**

Τα λύματα οδηγούνται στη δεξαμενή επιλογής βακτηριδίων (ή εναλλακτικά στην ΑΝΔ) μετά το διάυλο μέτρησης παροχής. Σκοπός των ΔΕΒ είναι η δημιουργία συνθηκών σε αυτές, οι οποίες αποθαρρύνουν την ανάπτυξη των νηματοειδών βακτηριδίων και ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των βακτηριδίων που σχηματίζουν κροκίδες, οι οποίες καθιζάνουν εύκολα στις ΔΚ. Η ΔΕΒ χρησιμοποιείται κυρίως για τον περιορισμό των πιθανοτήτων εμφάνισης του φαινομένου της διόγκωσης της λάσπης. Οι κατάλληλες συνθήκες σε μια ΔΕΒ μπορεί να είναι αερόβιες, αναερόβιες ή ανοξικές, οπότε οι ΔΕΒ εφοδιάζονται με τον κατάλληλο εξοπλισμό αερισμού ή/και ανάμιξης.

### **2.2.2.2. Φρεάτιο Διανομής 1 (ΦΔ1).**

Στο ΦΔ1 η ροή ισοκατανέμεται προς τις γραμμές βιολογικής απομάκρυνσης οργανικών ενώσεων άνθρακα και αζώτου (ΑΟΔ-ΔΑ) με κατάλληλους υπερχειλιστές λεπτής στέγης. Στο ΦΔ1 υπάρχει και κατάλληλο θυρόφραγμα που οδηγεί τα απόβλητα προς τον παρακαμπτήριο αγωγό σε περίπτωση ηθελημένης παράκαμψης της βιολογικής επεξεργασίας (ΑΟΔ-ΔΑ-ΔΚ).

### **2.2.2.3. Ανοξικές Δεξαμενές (ΑΟΔ)-Δεξαμενές Αερισμού (ΔΑ).**

Σκοπός των ανοξικών δεξαμενών ή περιοχών (ΑΟΔ) είναι η πραγματοποίηση της απονιτροποίησης, δηλαδή η μετατροπή των νιτρικών ιόντων σε αέριο άζωτο, που εκλύεται στην ατμόσφαιρα απομακρυνόμενο έτσι από την υγρή μάζα των αποβλήτων. Οι μ/ο της βιομάζας που πραγματοποιούν την απονιτροποίηση αναπτύσσονται σε ανοξικές συνθήκες, δηλαδή χωρίς διαλυμένο οξυγόνο (DO) (ή με  $DO < 0,5 \text{ mg/L}$ ), αλλά με παρουσία νιτρικών ιόντων σε συγκέντρωση τουλάχιστον  $1 \text{ mg/L}$  (που παράγονται κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης στις ΔΑ) και με ικανή ποσότητα οργανικών ενώσεων.

Σκοπός των διατάξεων ανάμιξης στις ΑΟΔ είναι η διατήρηση των στερεών της βιομάζας σε αιώρηση, αλλά χωρίς να αερίζεται η βιομάζα.

Σκοπός των δεξαμενών αερισμού (ΔΑ) είναι η βιολογική απομάκρυνση από την υγρή μάζα των αποβλήτων των διαλυμένων οργανικών ενώσεων άνθρακα και των ενώσεων αζώτου και φωσφόρου με μ/ο. Οι βιοαποικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις προσδιορίζονται σαν βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD). Οι μ/ο που αναπτύσσονται σε αερόβιες συνθήκες στις ΔΑ δεσμεύουν στην κυτταρική τους μάζα τις ενώσεις αυτές και τις μετατρέπουν σε στερεή βιομάζα, η οποία στη συνέχεια απομακρύνεται στις ΔΚ από την υγρή μάζα των αποβλήτων.

Σκοποί των διατάξεων αερισμού στις ΔΑ είναι α) η εξασφάλιση αερόβιων συνθηκών με την παροχή της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου στους μ/ο για την κατανάλωση των οργανικών ενώσεων και του οργανικού και αμμωνιακού αζώτου και β) η διατήρηση καθεστώτος ανάμιξης στις ΔΑ ώστε να μην καθιζάνει η βιομάζα στον πυθμένα, αλλά και να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των μ/ο, του οξυγόνου και των διάφορων ενώσεων στο σύνολο του όγκου των ΔΑ (για ΒΑ πλήρους ανάμιξης). Δύο είναι οι βασικές διατάξεις αερισμού οι επιφανειακοί – μηχανικοί αεριστήρες και οι διαχυτήρες.

Κάθε γραμμή επεξεργασίας αποτελείται συνήθως από τρία διαμερίσματα ίσου όγκου. Το πρώτο διαμέρισμα αποτελεί την ΑΟΔ, όπου γίνεται η απονιτροποίηση και τα επόμενα δύο αποτελούν τη ΔΑ, όπου γίνεται η οξείδωση των ενώσεων άνθρακα και η νιτροποίηση. Τα απαραίτητα νιτρικά επιστρέφουν από τις ΔΑ στις ΑΟΔ με τις αντλίες του ανάμικτου υγρού (ΑΝΑΥ).

Τα διαμερίσματα των ΔΑ είναι εξοπλισμένα με επιφανειακούς αεριστήρες ενώ αυτά των ΑΟΔ με αναμικτήρες. Η λειτουργία των αεριστήρων και η ρύθμιση της παροχής οξυγόνου γίνεται με την βοήθεια οξυγονόμετρων (ένα σε κάθε διαμέρισμα ΔΑ) και μηχανικών υπερχειλιστών στάθμης (ένα σε κάθε γραμμή).

#### **2.2.2.4. Φρεάτιο διανομής 2 (ΦΔ2).**

Τα απόβλητα από τις ΔΑ οδηγούνται στο ΦΔ2 και από εκεί κατανέμονται σε ΔΚ με κατάλληλους υπερχειλιστές λεπτής στέψης. Στο ΦΔ2 υπάρχει μετρητής συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων ανάμικτου υγρού (MLSS) για τη ρύθμιση της λειτουργίας των αντλιών ανακυκλοφορίας λάσπης.

#### **2.2.2.5. Δεξαμενές Καθίζησης (ΔΚ).**

Σκοπός των δεξαμενών καθίζησης (ΔΚ) είναι (α) η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (βιομάζα και αδρανή στερεά) των ΔΑ, ώστε η εκροή του συστήματος ΔΑ-ΔΚ να είναι απαλλαγμένη από στερεά (που συμβάλλουν στο συνολικό BOD) και (β) η συμπύκνωση των στερεών, ώστε να διατηρείται εύκολα η επιθυμητή υψηλή συγκέντρωση των MLSS στη ΔΑ με την ανακυκλοφορία και έτσι να είναι οικονομική η επεξεργασία της περίσσειας λάσπης, εξαιτίας του μικρότερου όγκου της.

Στις ΔΚ καθιζάνει η λάσπη και συγκεντρώνεται με τη βοήθεια ξέστρων στις χοάνες συγκέντρωσης. Από εκεί καταλήγει με βαρύτητα στο ΑΝΛ. Τα επεξεργασμένα απόβλητα οδηγούνται προς την περιφέρεια των δεξαμενών, όπου υπερχειλίζουν προς τα περιφερειακά κανάλια εκροής απαλλαγμένα από τα στερεά και καταλήγουν στα φρεάτια εκροής που βρίσκονται στην περιφέρεια των ΔΚ. Από εκεί οδηγούνται για απολύμανση. Τα επιπλέοντα στερεά και οι αφροί οδηγούνται με κατάλληλη διάταξη στη χοάνη συλλογής αφρών και από εκεί καταλήγουν με βαρύτητα στο φρεάτιο αφρών, απ' όπου απομακρύνονται.

Στις ΔΚ υπάρχουν ανιχνευτές στάθμης της λάσπης για την ρύθμιση των αντλιών περίσσειας λάσπης.

#### **2.2.2.6. Αντλιοστάσιο λάσπης (ΑΝΛ).**

Σκοπός του αντλιοστασίου λάσπης (ΑΝΛ) είναι α) η ανακυκλοφορία-επιστροφή του ανάμικτου υγρού (βιομάζας) από τις ΔΚ όπου καθίζησε προς τις ΔΑ με τις αντλίες ανακυκλοφορίας (βλέπε σχήμα 2.2) για να αυξηθεί η συγκέντρωση των αιωρούμενων οργανικών στερεών ανάμικτου υγρού (MLVSS) σε υψηλά επίπεδα και να αποφευχθεί η συσσώρευση της λάσπης στις ΔΚ και β) η απομάκρυνση από το σύστημα ΔΑ-ΔΚ μέρους της λάσπης με τις αντλίες περίσσειας λάσπης για να μην αυξάνεται συνέχεια η συγκέντρωση των μ/ο στις ΔΑ (εξαιτίας της ανακυκλοφορίας) και να διατηρείται στην επιθυμητή σταθερή τιμή.

Από τις ΔΚ, η λάσπη μεταφέρεται στο ΑΝΛ, από όπου το 25% αυτής αντλείται προς τις ΔΑ, ως ανακυκλοφορία λάσπης και το υπόλοιπο αντλείται για επεξεργασία (πάχυνση και αφυδάτωση) ως περίσσεια λάσπης. Το ΑΝΛ αποτελείται από δυο υγρούς θαλάμους. Κάθε θάλαμος εξυπηρετεί μία ΔΚ και είναι εξοπλισμένος με δυο αντλίες (μια εφεδρική) ανακυκλοφορίας και δυο αντλίες (μια εφεδρική) περίσσειας λάσπης.

#### **2.2.2.7. Αντλιοστάσιο ανάμικτου υγρού (ΑΝΑΥ).**

Σκοπός του αντλιοστασίου ανακυκλοφορίας ανάμικτου υγρού (ΑΝΑΥ) είναι η επιστροφή του ανάμικτου υγρού (βιομάζας) που περιέχει νιτρικά από τις ΔΑ προς τις ΑΟΔ για την εξασφάλιση της απαραίτητης συγκέντρωσης νιτρικών στις ΑΟΔ. Το ΑΝΑΥ χρησιμοποιείται στη μέθοδο ανακυκλοφορίας.

Με τις αντλίες του ΑΝΑΥ που είναι τρεις για κάθε γραμμή (δυο εφεδρικές) ανακυκλοφορεί το ανάμικτο υγρό από τις ΔΑ προς τις ΑΟΔ για την εξασφάλιση της απαραίτητης ποσότητας νιτρικών στις ΑΟΔ.

#### **2.2.3. Χλωρίωση (ΔΧΛ).**

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. Είναι το μοναδικό στάδιο στην επεξεργασία των αποβλήτων με αποκλειστικό σκοπό την καταστροφή των παθογόνων μ/ο, αν και μερική απομάκρυνση ή καταστροφή τους γίνεται και στα άλλα στάδια επεξεργασίας. Η περισσότερο διαδεδομένη μέθοδος απολύμανσης σε μια ΕΕΑΛ είναι η χλωρίωση με υποχλωριώδες νάτριο. Άλλες μέθοδοι είναι η απολύμανση με όζον και η απολύμανση με ακτινοβολία UV (υπεριώδης ακτινοβολία).

Πιο συγκεκριμένα στη χλωρίωση τα επεξεργασμένα απόβλητα μετά τις ΔΚ οδηγούνται στη δεξαμενή χλωρίωσης (ΔΧΛ) η οποία είναι μαιανδρικής κάτοψης αποτελούμενη από πολλές λωρίδες, όπου υφίστανται απολύμανση με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου. Η διοχέτευση του διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου γίνεται με βάση τα σήματα από το μετρητή παροχής και το μετρητή υπολειμματικού χλωρίου με δυο δοσομετρικές αντλίες (μια εφεδρική). Η τροφοδότηση των αντλιών γίνεται από τα δυο δοχεία ημερήσιας κατανάλωσης, τα οποία παροχετεύονται από τη δεξαμενή μηνιαίας αποθήκευσης του υποχλωριώδους νατρίου. Πριν τη διοχέτευση των απολυμασμένων επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στον υδάτινο αποδέκτη ακολουθεί η διαδικασία της αποχλωρίωσης, η οποία επιτυγχάνεται με διοχέτευση διοξειδίου του θείου συνήθως τοπικά στο φρεάτιο εκροής.

#### **2.2.4. Επεξεργασία λάσπης.**

Οι γενικοί στόχοι των διεργασιών της επεξεργασίας της περίσσειας λάσπης είναι α) η μείωση του όγκου της για να μειωθεί το κόστος επεξεργασίας και διάθεσης της και β) η σταθεροποίηση της, δηλαδή η μετατροπή της σε μια αδρανή (βιολογικά σταθερή) μάζα, ώστε η διάθεση της στο περιβάλλον να είναι ακίνδυνη.



Στην περίπτωση του παρατεταμένου αερισμού η παραγόμενη λάσπη εξαιτίας των μεγάλων ηλικιών λάσπης είναι σταθεροποιημένη και περιέχει ποσοστό οργανικών στερεών 50-60%. Επομένως, η περίσσεια λάσπης δεν απαιτεί πρόσθετη σταθεροποίηση, αλλά μόνο μείωση του όγκου της που γίνεται με τις διεργασίες (α) της πάχυνσης και (β) της αφυδάτωσης. Έτσι η επεξεργασία της λάσπης περιλαμβάνει πάχυνση σε ΔΠΧ και αφυδάτωση με ΤΦ. Τα στραγγίδια (υπερχειλίσσεις) και τα νερά έκπλυσης από τις διαδικασίες αυτές επιστρέφουν στο ΦΔ1 με την παρεμβολή του αντλιοστασίου στραγγιδίων.

Στην περίπτωση του συμβατικού αερισμού η περίσσεια λάσπης απαιτεί σταθεροποίηση, η οποία πραγματοποιείται συνήθως σε αναερόβιους χωνευτές. Μετά ακολουθεί πάχυνση και αφυδάτωση και σε αυτήν την περίπτωση.

#### **2.2.4.1. Πάχυνση λάσπης σε δεξαμενές πάχυνσης (ΔΠΧ).**

Σκοποί της πάχυνσης της λάσπης 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 αφυδάτωση της. Η πάχυνση της λάσπης γίνεται συνήθως (α) με βαρύτητα σε δεξαμενές πάχυνσης, (β) με επίπλευση σε δεξαμενές επίπλευσης ή (γ) με μηχανικά μέσα.

Η πάχυνση της λάσπης με βαρύτητα μέχρι ποσοστό στερεών 3% γίνεται σε μια ΔΠΧ εξοπλισμένη με κατάλληλο ξέστρο. Από εκεί η λάσπη αντλείται με δυο κοχλιωτές αντλίες παχυμένης λάσπης προς την εγκατάσταση αφυδάτωσης.

Η πάχυνση της λάσπης με μηχανικά μέσα γίνεται με μια ταινία βαρύτητας (ΤΒ) ή με ένα περιστρεφόμενο κύλινδρο (ΠΚ), που βρίσκεται στο κοινό κτίριο πάχυνσης-αφυδάτωσης. Υπάρχει συμβατότητα των διατάξεων μηχανικής πάχυνσης και μηχανικής αφυδάτωσης, αλλά και με τις αντλίες περίσσειας λάσπης, που είναι κοχλιωτές, ξηρού τύπου και μεταβαλλόμενης παροχής.

Το σύστημα μηχανικής πάχυνσης-αφυδάτωσης είναι εφοδιασμένο με κοινή διάταξη προετοιμασίας-τροφοδοσίας πολυμερούς, καθώς και με διάταξη έκπλυσης.

#### **2.2.4.2. Αφυδάτωση λάσπης με ταινιοφιλτράρες (ΤΦ).**

Σκοπός της αφυδάτωσης της λάσπης 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. Η αφυδάτωση της λάσπης γίνεται συνήθως με έναν από τους ακόλουθους τρόπους: α) Με μηχανικά μέσα (π.χ. με ΤΦ) ή β) με κλίνες ξήρανσης.

Η εγκατάσταση αφυδάτωσης με μηχανικά μέσα είναι εγκατεστημένη μέσα σε κτίριο αφυδάτωσης, το οποίο είναι εξοπλισμένο με σύστημα εξαερισμού. Η παχυμένη λάσπη αφυδατώνεται με ΤΦ σε ποσοστό στερεών 18%. Το σύστημα αφυδάτωσης, είναι εφοδιασμένο με διάταξη προετοιμασίας-τροφοδοσίας πολυμερούς, καθώς και με διάταξη έκπλυσης των ΤΦ. Στη συνέχεια η αφυδατωμένη λάσπη μεταφέρεται με κοχλιωτούς μεταφορείς στο χώρο αποθήκευσής της.

#### **2.2.5. Αντλιοστάσιο στραγγιδίων.**

Τα στραγγίδια, οι υπερχειλίσσεις και τα νερά έκπλυσης από τις μονάδες προκαταρκτικής επεξεργασίας και επεξεργασίας λάσπης, τα λύματα από τις εγκαταστάσεις υγιεινής οδηγούνται με βαρύτητα στο αντλιοστάσιο στραγγιδίων από όπου αντλούνται με δύο αντλίες στραγγιδίων προς το φρεάτιο εισόδου της ΕΕΑΛ.

## **2.3. Εναλλακτικές μονάδες επεξεργασίας.**

### **2.3.1. Αναερόβια δεξαμενή φωσφόρου (βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου) (ΑΝΔ).**

Η βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου (με ΑΝΔ) χρησιμοποιείται για να επιτυγχάνεται αυξημένη απομάκρυνση του φωσφόρου (P). Σε μη «ευαίσθητες» περιοχές τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα πρέπει να έχουν συγκέντρωση σε P στην εκροή μικρότερη ή ίση με 5 mg/L. Για ακόμα μικρότερες συγκεντρώσεις P, σε «ευαίσθητες» περιοχές (1-2 mg/L) είναι απαραίτητη συνήθως και η προσθήκη χημικών. Στην περίπτωση βιολογικής απομάκρυνσης του φωσφόρου η πάχυνση και η αφυδάτωση της περίσσειας λάσπης συνιστάται να γίνεται με μηχανικά μέσα.

Η ΑΝΔ είναι κατάλληλα διαμορφωμένη σε διαμερίσματα και σε κάθε διαμέρισμα είναι τοποθετημένος ένας αργόστροφος αναμικτήρας, ο οποίος εξασφαλίζει την ανάδευση των λυμάτων.

### **2.3.2. Οξειδωτικές τάφροι (ΟΤ).**

Εναλλακτικά του συνδυασμού ΑΟΔ-ΔΑ μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι ΟΤ στην περίπτωση του παρατεταμένου αερισμού. Στις ΟΤ αμέσως κατάντη των ρότορων (περιοχή ΔΑ) πραγματοποιείται η οξείδωση των οργανικών ενώσεων άνθρακα και η νιτροποίηση, και μακριά από τους ρότορες (περιοχή ΑΟΔ) η (ενδογενής) απονιτροποίηση με τη βοήθεια αναμικτήρα. Σε κάθε ΟΤ η λειτουργία των ρότορων και η ρύθμιση της παροχής οξυγόνου γίνεται με τη βοήθεια δυο οξυγονόμετρων και ενός μηχανικού υπερχειλιστή εκροής.

### **2.3.3. Αφυδάτωση της λάσπης σε κλίνες ξήρανσης (ΚΞ).**

Εναλλακτικά των ΤΦ μπορεί να χρησιμοποιηθούν κλίνες ξήρανσης (ΚΞ). Οι ΚΞ μπορεί να αποτελούν και εφεδρική μέθοδο αφυδάτωσης στην περίπτωση βλάβης στη λειτουργία της ΤΦ.

## Κεφάλαιο 3: ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η αύξηση των βακτηρίων, που αποτελούν την ετερότροφη βιομάζα (σε μάζα και αριθμό). Οι μικροοργανισμοί αυξάνονται με την κατανάλωση οργανικών ενώσεων και θρεπτικών συστατικών (οργανικό υπόστρωμα). Η κατανόηση των διεργασιών αύξησης της βιομάζας είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των ΕΕΑΛ. Παράμετροι όπως το βάρος της παραγόμενης βιομάζας ανά μονάδα μάζας υποστρώματος, η ηλικία της βιομάζας, η ταχύτητα θανάτου των μικροοργανισμών είναι σημαντικές για τον σχεδιασμό των ΕΕΑΛ.

Στο κεφάλαιο αυτό η βιολογική αύξηση εξετάζεται κάτω από συνθήκες (Λέκκας, 2001):

- Ασυνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα – περιορισμένο υπόστρωμα
- Συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα χωρίς ανακυκλοφορία ιλύος
- Συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα με ανακυκλοφορία της ιλύος.

### 3.1. Συστήματα ασυνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα – περιορισμένο υπόστρωμα (μια αρχική ποσότητα υποστρώματος).

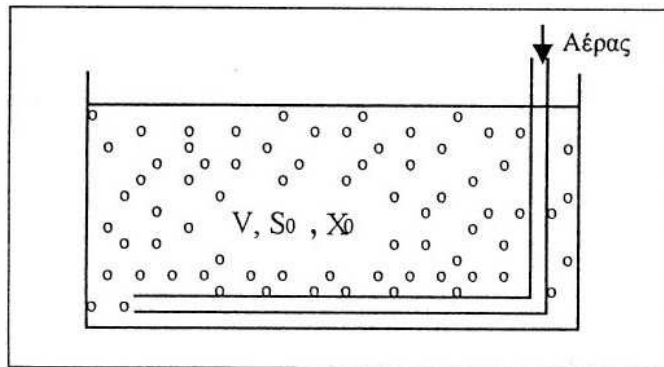
Αν θεωρηθεί ότι εξετάζεται η ανάπτυξη ενός μόνο είδους μ/ο, τότε η μορφή της καμπύλης αύξησης των βακτηρίων εξαρτάται από το εάν λαμβάνονται υπόψη όλα τα βακτήρια που αναπτύχθηκαν (δηλαδή και τα νεκρά) ή μόνο τα ζωντανά. Η περίπτωση ασυνεχούς λειτουργίας του περιορισμένου υποστρώματος παριστάνεται στο *σχήμα 3.1*, όπου  $V$  ο όγκος του δοχείου βιολογικής αύξησης,  $X_0$  η βιομάζα τη χρονική στιγμή  $t = 0$  και  $S_0$  το υπόστρωμα την χρονική στιγμή  $t = 0$ .

Η καμπύλη αύξησης του *σχήματος 3.2* αποκτάται αν έχουμε περιορισμένη τροφή και υποβάλουμε τη μονοκαλλιέργεια σε σταθερή θερμοκρασία, π.χ. σε θάλαμο επώασης. Το εάν θα σχεδιάσουμε την καμπύλη ( $\alpha$ ) ή την καμπύλη ( $\beta$ ) του *σχήματος 3.2* εξαρτάται από τον τρόπο μέτρησης των μικροοργανισμών.

Στην τεχνική μέτρησης των ζωντανών βακτηρίων (Viable count technique) μετρώνται μόνο τα βακτήρια που μπορούν να αυξηθούν και να δημιουργήσουν αποικίες. Εκείνα που είναι νεκρά ή δεν μπορούν να αυξηθούν, δεν μετρώνται. Επίσης κάνουμε την παραδοχή ότι κάθε αποικία προέρχεται από ένα βακτήριο, που μπορεί να μην είναι και ακριβής. Η εξέλιξη του αριθμού των ζωντανών βακτηρίων παριστάνεται από την *καμπύλη 3.2(α)*.

Στην τεχνική μέτρησης του ολικού αριθμού βακτηρίων (Total count direct-technique) μετρώνται όλα τα βακτήρια, ζωντανά και νεκρά. Η εξέλιξη του ολικού αριθμού των βακτηρίων παριστάνεται από την *καμπύλη 3.2(β)*.

Όταν έχουμε ένα μίγμα βακτηρίων και θέλουμε να μετρήσουμε τα ζώντα, μερικά είναι ενδεχόμενο να μην αυξηθούν, είτε γιατί το υπόστρωμα δεν είναι κατάλληλο, είτε επειδή οι οξειδοαναγωγικές συνθήκες δεν είναι κατάλληλες.



**Σχήμα 3.1.** Δοχείο ασυνεχούς λειτουργίας – Περιορισμένο υπόστρωμα. ( $V$ : ο όγκος του δοχείου βιολογικής αύξησης,  $X_0$ : η βιομάζα τη χρονική στιγμή  $t = 0$  και  $S_0$ : το υπόστρωμα την χρονική στιγμή  $t = 0$ ) (Λέκκας, 2001).

Η πειραματική μελέτη των συστημάτων ασυνεχούς τροφοδοσίας γίνεται με ένα δοχείο αντίδρασης, όπου επικρατούν αερόβιες συνθήκες (όπως σχηματικά φαίνεται στο *σχήμα 3.1*). Στο δοχείο προσθέτουμε μικροοργανισμούς από υγρά λύματα ή από το έδαφος. Το υπόστρωμα αύξησης των μικροοργανισμών δεν είναι παρά μια ποσότητα από αστικά υγρά απόβλητα που περιέχουν υδατοδιαλυτές οργανικές ενώσεις, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετική ικανότητα αποδόμησης από τους μικροοργανισμούς. Συνυπάρχουν δηλαδή οργανικές ενώσεις που αποδομούνται με διαφορετικές ταχύτητες από τους μικροοργανισμούς. Από την αρχή του πειράματος συλλέγονται δείγματα σε τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία διηθούνται σε φίλτρα και μετράται η οργανική ύλη που έχει απομείνει. Στο διήθημα μετράται το COD που αντιπροσωπεύει την οργανική ύλη, δηλαδή το υπόστρωμα. Επίσης μετράται και το ξηρό βάρος των μικροοργανισμών. Αυτό επιτυγχάνεται με το να διηθείται το δείγμα και να υπολογίζεται η διαφορά στο βάρος του φίλτρου, πριν και μετά τη διήθηση, η οποία αντιπροσωπεύει τη βιομάζα. Από τη σχεδίαση της συγκέντρωσης του υποστρώματος  $S$  συναρτήσει του χρόνου εξάγεται η καμπύλη του *σχήματος 3.2(γ)*. Εάν μετρηθεί και η κατανάλωση οξυγόνου και σχεδιαστεί επίσης σε συνάρτηση του χρόνου εξάγεται η καμπύλη του *σχήματος 3.3(β)*, ενώ η καμπύλη *3.3(α)* παρέχει τη συγκέντρωση της βιομάζας  $X$  σε συνάρτηση του χρόνου, (όπως και η *3.2(α)*).

Η καμπύλη των ζωντανών βακτηρίων (*3.2(α)* & *3.3(α)*) παρουσιάζει βέβαια το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

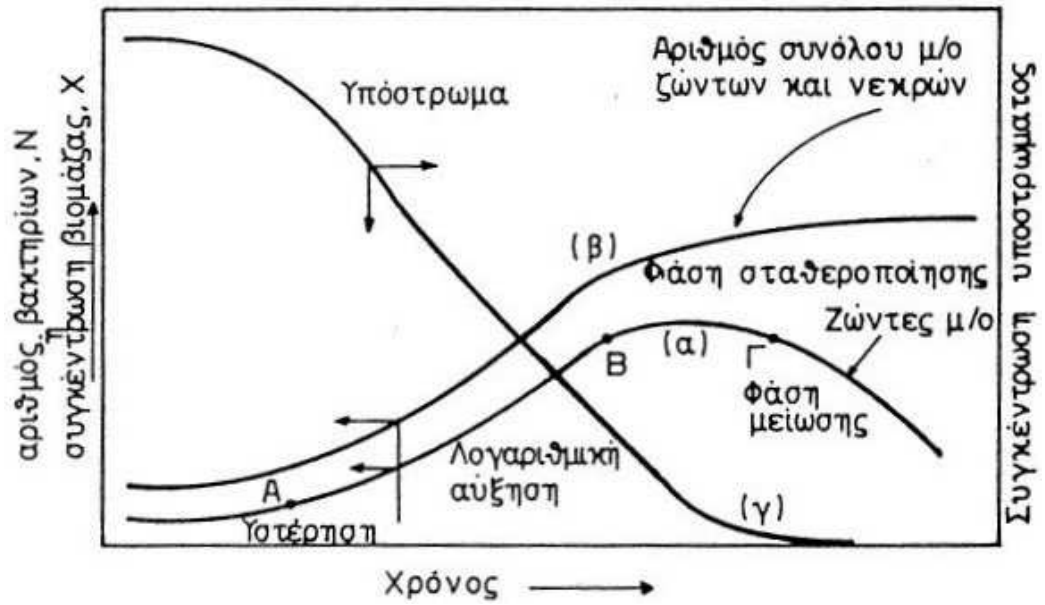
Η αύξηση των  $\mu$ ο συνήθως παριστάνεται με μια διαφορική εξίσωση της μορφής της *εξίσωσης 3.1*.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (3.1)$$

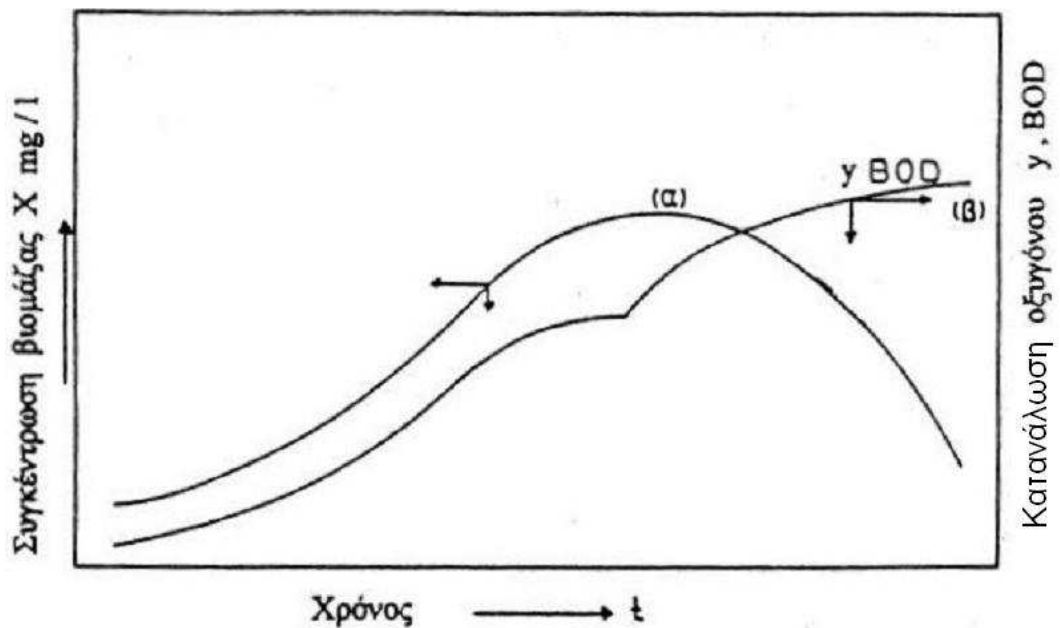
όπου

$X$  = Η συγκέντρωση της βιομάζας [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

$\mu$  = Η ειδική ταχύτητα αύξησης (σταθερά αναλογίας αύξησης : αύξηση μάζας  $\mu$ ο ανά μονάδα μάζας  $\mu$ ο και χρόνου) [ $\text{s}^{-1}$ ].



**Σχήμα 3.2.** Καμπύλη αύξησης ενός μόνο είδους βακτηρίων σε περιορισμένο υπόστρωμα.  
 (α) Εξέλιξη αριθμού ζωντανών βακτηρίων  
 (β) Εξέλιξη ολικού αριθμού βακτηρίων  
 (γ) Μεταβολή συγκέντρωσης υποστρώματος με τον χρόνο  
 (Λέκκας, 2001).



**Σχήμα 3.3.** Καλλιέργεια ενός μ/ο περιορισμένου υποστρώματος.  
 (α) Αύξηση ζωντανής βιομάζας  
 (β) κατανάλωση οξυγόνου  
 (Λέκκας, 2001).

Η χρήση του υποστρώματος συνδέεται με την παραγωγή βιομάζας με την εξίσωση 3.2.

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt} \quad (3.2)$$

όπου

$Y =$  ο συντελεστής απόδοσης αύξησης (growth yield), ο οποίος δηλώνει τη βιομάζα που παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιημένου υποστρώματος [ $\text{kg VSS} / \text{kg BOD}_5$ ].

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.1 και 3.2 προκύπτει η εξίσωση 3.3, η οποία συσχετίζει την κατανάλωση υποστρώματος με τη συγκέντρωση της βιομάζας.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\mu}{Y} X \quad (3.3)$$

$$\text{ή} \quad \frac{dS}{dt} = K X$$

όπου

$K = \frac{\mu}{Y}$  = η ειδική ταχύτητα κατανάλωσης υποστρώματος (σταθερά αναλογίας κατανάλωσης προς την αύξηση μάζας  $\mu$  ο ανά μονάδα μάζας υποστρώματος και χρόνου) [ $\text{s}^{-1}$ ].

Μια έκφραση συσχετισμού της ειδικής ταχύτητας αύξησης και του περιορισμένου υποστρώματος που έχει δοθεί από τον Monod βάσει των πειραμάτων του και που φαίνεται γραφικά στο σχήμα 3.4 είναι η ακόλουθη:

$$\mu = \mu_m \left( \frac{S}{K_s + S} \right) = \frac{K_m Y S}{K_s + S} \quad (3.4)$$

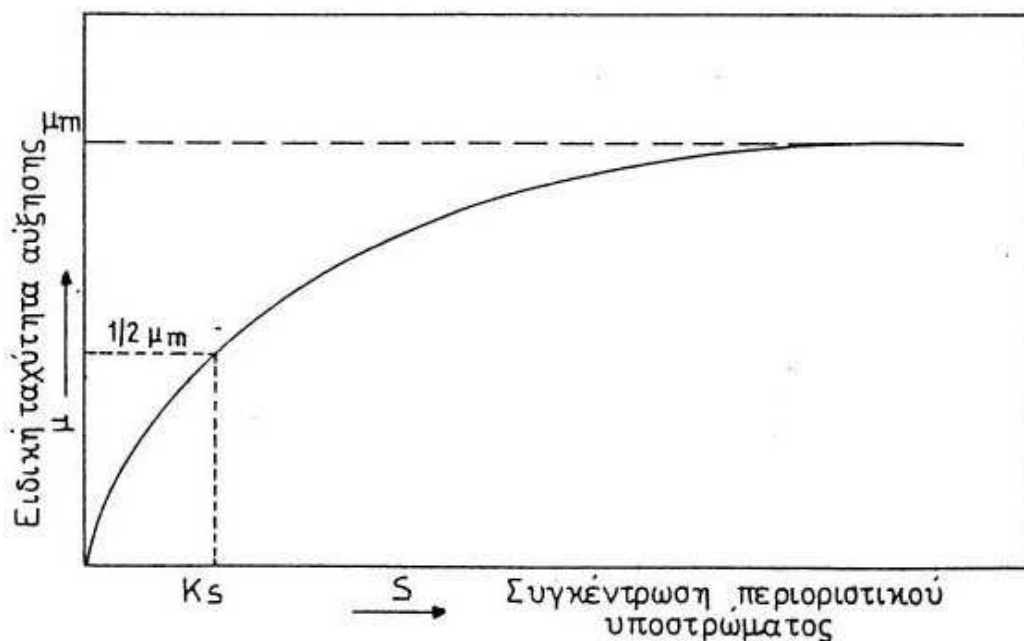
όπου

$S =$  η συγκέντρωση του υποστρώματος [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

$\mu_m =$  η μέγιστη δυνατή τιμή της ειδικής ταχύτητας αύξησης [ $\text{s}^{-1}$ ].

$K_s =$  η συγκέντρωση του υποστρώματος όταν  $\mu = 1/2 \mu_m$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

$K_m =$  η ειδική ταχύτητα κατανάλωσης υποστρώματος που αντιστοιχεί στη  $\mu_m$  [ $\text{s}^{-1}$ ].



Σχήμα 3.4. Ειδική ταχύτητα αύξησης ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του υποστρώματος (Λέκκας, 2001).

Η εξίσωση 3.4 σε συνδυασμό με την 3.1 δίνει την εξίσωση 3.5:

$$r_g = \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m SX}{K_s + S} \quad (3.5)$$

όπου  $r_g$  = ταχύτητα βακτηριακής αύξησης [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].  
Έχουμε επίσης τον συνδυασμό με την 3.2 και 3.3:

$$r_s = \frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y} \frac{dX}{dt} = \frac{1}{Y} \frac{\mu_m SX}{K_s + S} = \frac{K_m SX}{K_s + S} \quad (3.6)$$

όπου  $r_s$  = ταχύτητα κατανάλωσης υποστρώματος [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].

### 3.1.1. Φάσεις αύξησης μιας μονοκαλλιέργειας βακτηρίων με περιορισμό υποστρώματος.

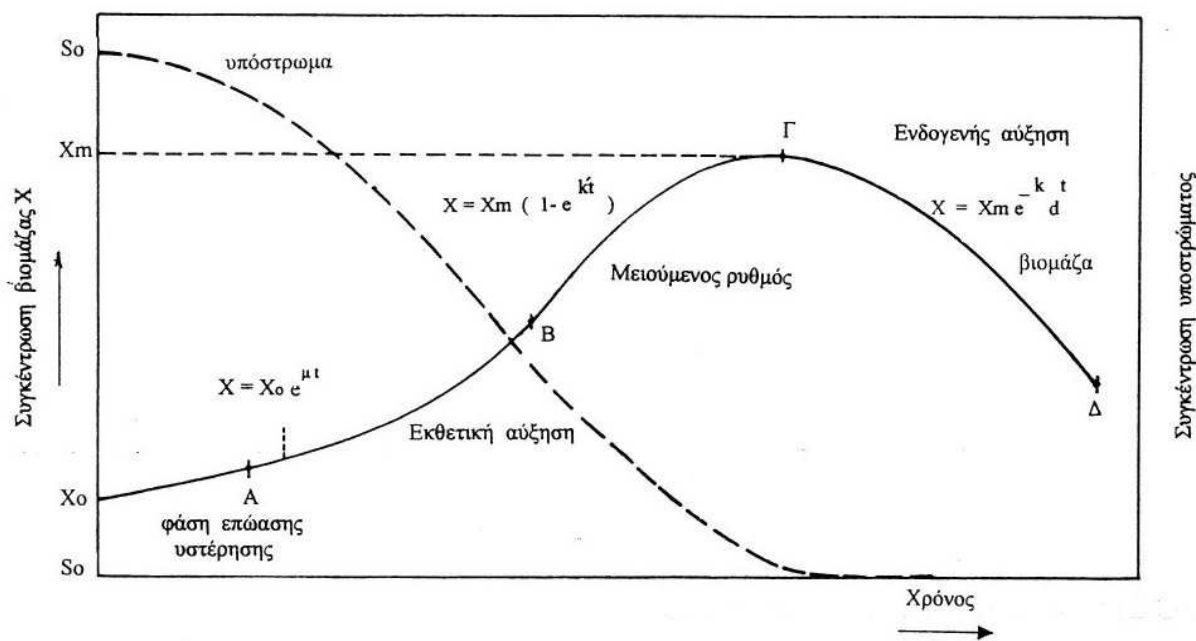
Στην καμπύλη του σχήματος 3.5 παριστάνονται αναλυτικότερα οι σημαντικότερες φάσεις αύξησης της βιομάζας ενός μόνο είδους μ/ο σε περιορισμένο υπόστρωμα. Για τις φάσεις αυτές μπορούμε να εξειδικεύσουμε την εξίσωση 3.2 όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

**Φάση υστέρησης (Lag phase).** Στη φάση αυτή που η καμπύλη είναι οριζόντια, τα βακτήρια προσαρμόζουν τον εαυτό τους στο νέο περιβάλλον. Συνήθως τότε έχουμε πολύ μεγάλα κύτταρα. Τα βακτήρια παίρνουν πρωτεΐνη και μεγαλώνουν περισσότερο από το κανονικό.

Η διάρκεια αυτής της φάσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ένας από τους σημαντικότερους είναι πόσα βακτήρια βάζουμε αρχικά στο υπόστρωμα για την καλλιέργεια. Εάν βάλουμε 1.000 βακτήρια σε 100 ml υποστρώματος αύξησης θα έχουμε μια μακρά φάση υστέρησης. Εάν βάλουμε  $10^6$  βακτήρια σε 100 ml η φάση υστέρησης θα βραχυυνθεί πολύ, ενώ εάν βάλουμε  $10^8$  βακτήρια σε 100 ml μπορεί να εξαλειφθεί τελείως η φάση αυτή. Εκτός του αριθμού των βακτηρίων σημαντικό ρόλο παίζει και η προέλευσή τους και κυρίως εάν έχουν αναπτυχθεί σε παρόμοιο ή τελείως διαφορετικό υπόστρωμα.

**Εκθετική φάση (Log phase).** Μετά από μια σύντομη φάση επιτάχυνσης, τα βακτήρια αναπτύσσονται εκθετικά. Κατά την εκθετική φάση τα βακτήρια παρουσιάζουν τη μέγιστη αύξηση. Αυτή είναι βιοχημικά η περισσότερο ενεργός φάση. Είναι επιθυμητό κατά τις βιολογικές διεργασίες μείωσης του οργανικού φορτίου, να αναπτύσσονται τα βακτήρια της βιομάζας στην εκθετική φάση. Η διάρκεια της εκθετικής φάσης μπορεί να είναι σύντομη ή εκτεταμένη. Αυτό εξαρτάται από παράγοντες όπως το υπόστρωμα, η θερμοκρασία κ.ά.

Η κλίση της καμπύλης στην εκθετική περιοχή αύξησης μπορεί να είναι μεγάλη ή μικρή. Η κλίση αυτή είναι μέτρο του χρόνου αναπαραγωγής των μ/ο.



**Σχήμα 3.5.** Φάσεις αύξησης μιας μονοκαλλιέργειας βακτηρίων όταν το υπόστρωμα είναι περιορισμένο (Λέκκας, 2001).

(Σημείωση: Οι φάσεις αύξησης στο σχήμα αυτό διαφέρουν από εκείνες του σχήματος 3.2 για την καλύτερη μαθηματική έκφραση της εκθετικής αύξησης που έχει διακεκριμένες περιοχές.)

Τα προϊόντα μεταβολισμού των βακτηρίων μπορούν να δηλητηριάζουν άλλα βακτήρια. Η εξάντληση επίσης του θρεπτικού υποστρώματος σταματά την αύξηση. Εάν προμηθεύουμε τους μ/ο συνέχεια με θρεπτικά συστατικά, όπως συμβαίνει στην καλλιέργεια απεριόριστου υποστρώματος (που αναπτύσσεται πιο κάτω στο κεφάλαιο αυτό) και απομακρύνουμε τα προϊόντα του μεταβολισμού, συντηρούμε την καλλιέργεια στην περιοχή της εκθετικής αύξησης.

**Ενδογενής αύξηση.** Κατά το τέλος της εκθετικής αύξησης ο αριθμός των ζώντων και ο αριθμός του συνόλου των βακτηρίων συγκλίνουν. Έτσι λοιπόν μετά από μια σύντομη φάση επιβράδυνσης ακολουθεί η στατική φάση, όπου η καμπύλη είναι οριζόντια. Στο οριζόντιο τμήμα της καμπύλης ο αριθμός των παραγόμενων είναι ίσος με τον αριθμό εκείνων που πεθαίνουν. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση του ενδογενούς μεταβολισμού και της απόπτωσης. Ο μεν συνολικός αθροιστικός αριθμός των μ/ο που αναπτύχθηκαν αυξάνει, ο δε αριθμός των ζώντων μειώνεται.

Στο τμήμα αυτό της καμπύλης μετά το μέγιστο έχουμε μείωση του αριθμού των βακτηρίων, τα οποία μεταβολίζουν τα νεκρά κύτταρα λόγω έλλειψης άλλου υποστρώματος.

### 3.1.2. Μαθηματική παράσταση της καμπύλης αύξησης του πληθυσμού των βακτηρίων σε περιορισμένο υπόστρωμα (Σχήμα 3.5).

**Περιοχή B: Εκθετική αύξηση.** Στην αρχή της καλλιέργειας υπάρχει διαθέσιμο υπόστρωμα για τη μέγιστη αύξηση. Ο μόνος περιοριστικός παράγοντας είναι η ικανότητα των μικροοργανισμών να αναπαράγονται.

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_g = \mu X \quad (3.7)$$

όπου



$(dX/dt)_g$	=	η ταχύτητα αύξησης της βιομάζας: μάζα / (μονάδα όγκου x χρόνος) [kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\mu$	=	η ειδική ταχύτητα αύξησης (σταθερά αναλογίας αύξησης: αύξηση μάζας μ/ο ανά μονάδα μάζας μ/ο και χρόνου) [s <sup>-1</sup> ]
$X$	=	η συγκέντρωση της βιομάζας [kg m <sup>-3</sup> ]
$g$	=	ο συντελεστής αυτός σημαίνει αύξηση (growth)

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

$$\ln X = \mu t$$

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

$$\text{και} \quad X = X_o e^{\mu t} \quad (3.8)$$

όπου  $X_o$  = βιομάζα τη χρονική στιγμή  $t = 0$ .

**Περιοχή ΒΓ : Μειούμενη ταχύτητα αύξησης.** Όταν παραχθεί ικανός αριθμός μ/ο παρατηρείται έλλειψη υποστρώματος εφόσον το υπόστρωμα είναι περιορισμένο. Η ταχύτητα αναπαραγωγής μειώνεται μέχρις ότου φθάσει στο σημείο να έχουμε σταθερό αριθμό βακτηρίων. Αυτό σημαίνει ότι όσα βακτήρια παράγονται στη μονάδα του χρόνου τόσα και πεθαίνουν. Η ολική βιομάζα είναι μεγαλύτερη από τη ζωντανή.

Στο σημείο Γ του σχήματος 3.5 η βιομάζα έχει τη μέγιστη τιμή  $X_m$  και ισχύει η σχέση:

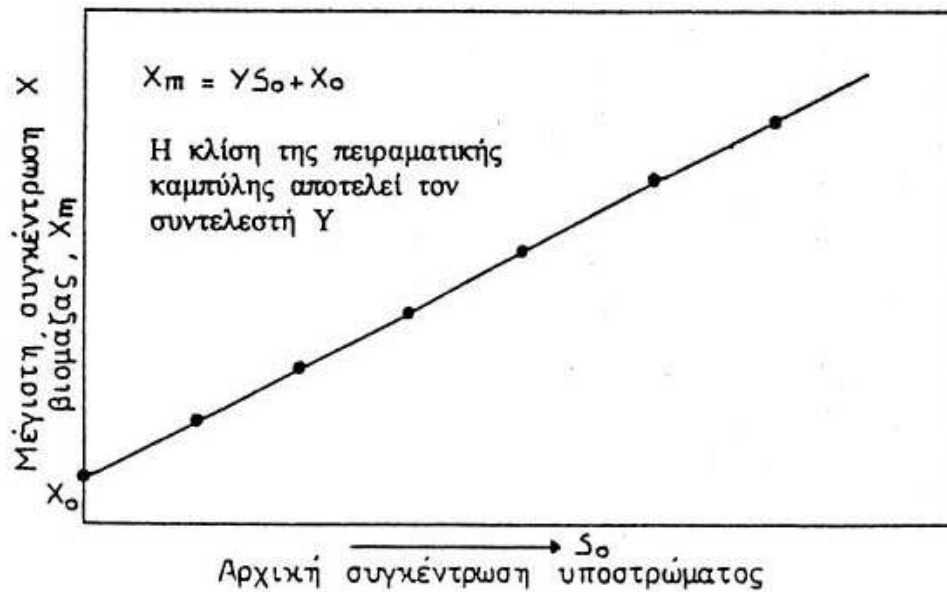
$$X_m - X_o = Y(S_o - S_m)$$

όμως στο σημείο Γ έχει εξαντληθεί το υπόστρωμα και  $S_m = 0$

$$\text{Επομένως} \quad X_m - X_o = YS_o \quad (3.9)$$

Όπου  $Y$  είναι ο συντελεστής απόδοσης αύξησης (growth yield), ο οποίος δηλώνει τη βιομάζα που παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιούμενου υποστρώματος, (χρησιμοποιήθηκε ήδη στις σχέσεις 3.2, 3.3 κλπ.)

Η χρήση της εξίσωσης 3.9 επιτρέπει τη μέτρηση του συντελεστή  $Y$  με μια σειρά πειραμάτων που έχουν ως ανεξάρτητη μεταβλητή την αρχική συγκέντρωση του υποστρώματος ( $S_o$ ) και ως εξαρτημένη μεταβλητή τη μέγιστη συγκέντρωση της βιομάζας. Τα πειράματα ξεκινούν με την ίδια αρχική συγκέντρωση βιομάζας  $X_o$ . Στο σχήμα 3.6 παριστάνεται η γραφική παράσταση τέτοιων δεδομένων και ο υπολογισμός του  $Y$  που είναι η κλίση της πειραματικής καμπύλης.



**Σχήμα 3.6.** Σχέση υποστρώματος  $S$  με τη βιομάζα  $X_m$ . Υπολογισμός του συντελεστή  $Y$  (Λέκκας, 2001).

Είναι δυνατόν να εξάγουμε μια άλλη σχέση για τη συγκέντρωση της βιομάζας:

$$\frac{dX}{dt} = K'(X_m - X)$$

όπου  $K' = \mu$  συντελεστής αναλογίας ανάλογος του  $\mu$ ,

$$\frac{dX}{X_m - X} = K' dt$$

$$\frac{d(X_m - X)}{X_m - X} = -K' dt$$

Ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$\ln(X_m - X) = -K' t$$

μεταξύ των σημείων	$t = 0$	$X = X_0$
και	$t = t$	$X = X$

Έχουμε:

$$\ln \frac{X_m - X}{X_m - X_0} = -K' t$$

Θεωρώντας το  $X_0 \ll X_m$  έχουμε:

$$\frac{X_m - X}{X_m} = e^{-K' t}$$

$$-\frac{X}{X_m} + 1 = e^{-K't}$$

$$X = X_m(1 - e^{-K't}) \quad (3.10)$$

**Περιοχή ΓΔ: Μείωση της βιομάζας. Ενδογενής φάση αύξησης (Endogenous growth phase).** Στη φάση αυτή που δεν υπάρχει άλλο υπόστρωμα, τα βακτήρια χρησιμοποιούν το ίδιο το πρωτόπλασμα των κυττάρων τους ή άλλων νεκρών κυττάρων για επιβίωση. Τα νεκρά υδρολύονται ελευθερώνοντας θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται από τα επιζώντα βακτήρια. Στην ενδογενή φάση αύξησης είναι προφανές, ότι μειώνεται τόσο η μάζα των βακτηρίων όσο και ο αριθμός των βακτηρίων και επομένως και η συνολική βιομάζα.

Ταχύτητα μείωσης βιομάζας:

$$r_d = \left( \frac{dX}{dt} \right)_d = -K_d X \quad (3.11)$$

όπου

$K_d$  = ο συντελεστής της αποσύνθεσης των βακτηρίων ανάλογος του  $\mu$  [ $s^{-1}$ ]

$d$  = ο δείκτης  $d$  σημαίνει απόπτωση (death)

Η εξίσωση 3.11 μπορεί να δώσει μια σχέση ανάλογη της 3.8.

$$X = X_m e^{-K_d t} \quad (3.12)$$

Η μείωση της βιομάζας μπορεί να παρατηρείται και λόγω συσσώρευσης παρεμποδιστικού προϊόντος (αναστολέα) και όχι μόνο λόγω εξάντλησης του υποστρώματος.

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

$$\left( \frac{dx}{dt} \right)_T = \left( \frac{dx}{dt} \right)_{20} \Theta^{(T-20)} \quad (3.13)$$

όπου

$(dx/dt)_T$  = η ταχύτητα αύξησης στους  $T$  °C

$(dx/dt)_{20}$  = η ταχύτητα αύξησης στους 20 °C

$\Theta$  = ο συντελεστής θερμοκρασίας που παίρνει τιμές 1,04 για την ενεργό ιλύ, 1,08 για τις λίμνες αερισμού και 1,035 για τα βιολογικά φίλτρα.

### 3.1.3. Παρεμπόδιση ανάπτυξης – Κινητική αύξησης μικροοργανισμών παρουσία αναστολέα.

Πολλές ουσίες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν από τους  $\mu$ /ο σε μικρές συγκεντρώσεις, ενώ σε μεγάλες έχουν τοξικές επιδράσεις και παρεμποδίζουν την αύξηση τους.

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

$$\mu = \frac{\mu_m S}{\left( K_s + S + \frac{S^2}{K_1} \right)} \quad (3.14)$$

όπου

$K_1$  = Ο συντελεστής παρεμπόδισης για τη συγκεκριμένη ουσία (συγκέντρωση αναστολέα που προκαλεί το  $\frac{1}{2}$  της μέγιστης παρεμπόδισης) [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

Γενικά η εξίσωση *Haldane* έχει χρησιμοποιηθεί με μεγαλύτερη επιτυχία στην περιγραφή των αντιδράσεων νιτροποίησης σε υπόστρωμα με αναστολέα στην αναερόβια χώνευση και στην επεξεργασία αποβλήτων με φαινόλες.

Ο λόγος  $\frac{S^2}{K_1}$  είναι ο όρος παρεμπόδισης που σε χαμηλές συγκεντρώσεις  $S$  επηρεάζει

μόνο λίγο την τιμή του  $\mu$ , ενώ σε μεγαλύτερες τιμές μειώνει σημαντικά την τιμή του  $\mu$ . Βέβαια και η τιμή του  $K_1$ , η οποία εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ουσία καθορίζει τις τιμές του αναστολέα  $S$ , στις οποίες αρχίζει η παρεμπόδιση καθώς και το ποσό της έντασης της, δηλαδή η μείωση της ειδικής ταχύτητας αύξησης ( $\mu$ ). Μικρές τιμές του συντελεστή παρεμπόδισης  $K_1$  συνεπάγονται μεγαλύτερη παρεμπόδιση, ενώ μεγαλύτερες τιμές έχουν ως αποτέλεσμα μικρή παρεμπόδιση. Όταν ο  $K_1$  τείνει στο άπειρο η εξίσωση *Haldane* (3.14) καταλήγει στην εξίσωση *Monod* (3.4).

Από την εξίσωση 3.14 προκύπτει, ότι η τιμή του  $\mu$  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 υπόστρωμα που δεν προκαλεί παρεμπόδιση μαζί με μια άλλη ουσία που προκαλεί παρεμπόδιση, δηλαδή η παρεμπόδιση προκαλείται από άλλη ουσία διαφορετική του υποστρώματος. Στην περίπτωση αυτή ισχύει η εξίσωση 3.15:

$$\mu = \mu_{\max} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \left( \frac{K_1}{K_1 + I} \right) \quad (3.15)$$

### 3.1.4. Κινητική πολλαπλών υποστρωμάτων.

Στα πραγματικά συστήματα στη φύση τον κανόνα αποτελεί η χρήση περισσοτέρων του ενός υποστρωμάτων. Για δύο υποστρώματα η εξίσωση 3.16 δίνει τη μορφή, που παίρνει η εξίσωση *Monod*:

$$\mu = \mu_{\max} \left( \frac{S_1}{K_{S1} + S_1} \right) \left( \frac{S_2}{K_{S2} + S_2} \right) \quad (3.16)$$

Στην περίπτωση δύο υποστρωμάτων όταν  $S_1 = K_{S1}$  και  $S_2 = K_{S2}$ , η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{4} \quad (3.17)$$

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι η ειδική ταχύτητα αύξησης  $\mu$  είναι ο παράγοντας «κλειδί» για την περιγραφή της αύξησης της βιομάζας και της κατανάλωσης του υποστρώματος. Στην πραγματικότητα η παράμετρος αυτή είναι χρονικά μεταβαλλόμενη διότι επηρεάζεται από πολλούς φυσικοχημικούς ή βιολογικούς παράγοντες. Μεταξύ αυτών εκτός από τα προαναφερθέντα -συγκέντρωση υποστρώματος και παρεμπόδιση της μικροβιακής αύξησης- είναι η συγκέντρωση βιομάζας, το pH, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου καθώς και η ένταση του φωτισμού.

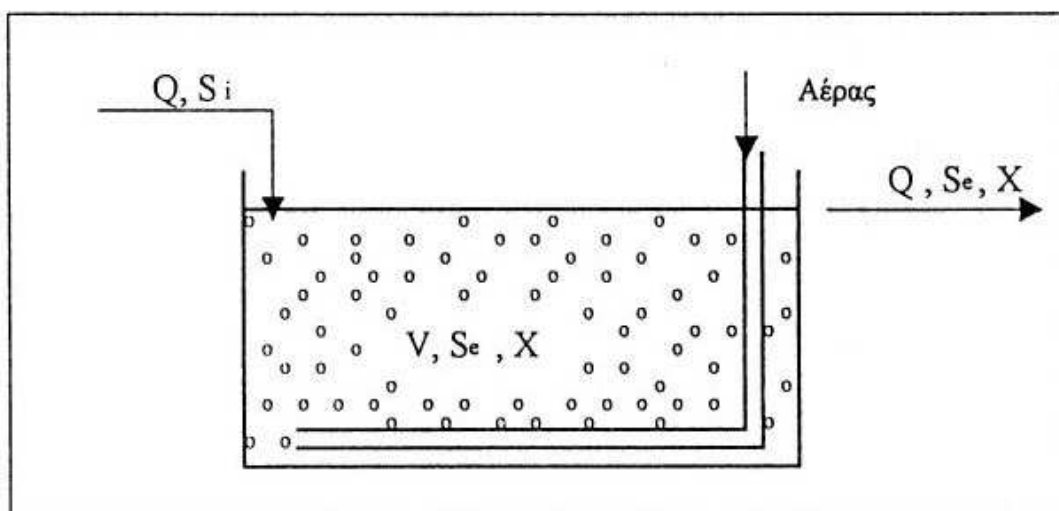
### 3.2. Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα (απεριόριστο υπόστρωμα) χωρίς ανακυκλοφορία ιλύος.

Θεωρούμε ένα δοχείο βιολογικής αύξησης όπου τροφοδοτούμε υπόστρωμα συνεχώς και ο όγκος της τροφοδοσίας είναι ίσος με την υπερχειλίση. Η βιολογική μάζα είναι εν αιωρήσει υπό συνθήκες πλήρους ανάμιξης, όπως σχηματικά φαίνεται στο *σχήμα 3.7*.

Οι συνθήκες ανάμιξης έχουν ως αποτέλεσμα η προσθήκη μιας ποσότητας υποστρώματος να διασκορπίζεται άμεσα σε όλο τον όγκο της καλλιέργειας. Επομένως το εισερχόμενο υπόστρωμα διαλύεται σύμφωνα με τον συντελεστή  $Q/V$ . Όπου  $Q$  η παροχή εισόδου και  $V$  ο όγκος του δοχείου βιολογικής αύξησης. Ο λόγος  $Q/V$  ονομάζεται αναλογία αραιώσης ή παροχή ανά μονάδα όγκου και συμβολίζεται με  $D$  που είναι το αντίστροφο του υδραυλικού χρόνου παρακράτησης  $\theta$ .

$$Q/V = D = 1/\theta \quad (3.18)$$

Λόγω της πλήρους ανάμιξης η έξοδος έχει την ίδια συγκέντρωση υποστρώματος και βιομάζας με το δοχείο ( $S_e$  και  $X$ ).



**Σχήμα 3.7.** Σύστημα συνεχούς καλλιέργειας πλήρους ανάμιξης. Απεριόριστο υπόστρωμα (Λέκκας, 2001).

Η αύξηση της συγκέντρωσης της βιομάζας στο δοχείο του *σχήματος 3.7* δίνεται από τη *σχέση 3.19*.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - DX \quad (3.19)$$

όπου

$dX/dt$  = η συνολική ταχύτητα αύξησης της βιομάζας [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].

$\mu X$  = η ταχύτητα αύξησης της βιομάζας που οφείλεται στην αναπαραγωγή και αύξηση των  $\mu/o$  [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].

$DX$  = η ταχύτητα απομάκρυνσης της βιομάζας λόγω της υπερχειλίσης [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].

Εάν έχουμε σταθερή κατάσταση (steady state) η συγκέντρωση της βιομάζας είναι σταθερή και επομένως  $dX/dt = 0$ .

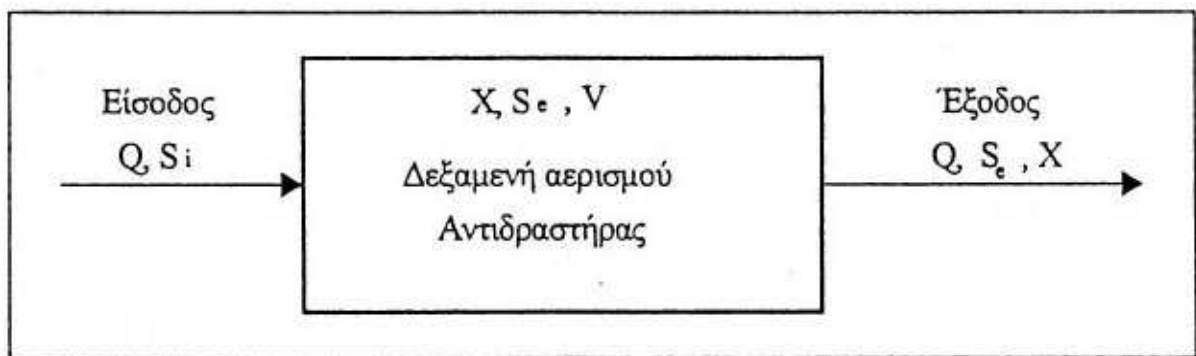
Τότε η εξίσωση 3.19 μετατρέπεται ως ακολούθως:  $\mu = D = Q/V = 1/\theta$  (3.20)

Η εξίσωση 3.20 είναι σημαντική διότι δείχνει, ότι η ειδική ταχύτητα αύξησης  $\mu$  μπορεί στα συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας με υπόστρωμα χωρίς ανακυκλοφορία να ελεγχθεί υδραυλικά.

**Συστήματα με διέλευση μιας κατεύθυνσης μη σταθερής κατάστασης ( $dX/dt \neq 0$ ).** Για ένα σύστημα όπως του σχήματος 3.8 γράφουμε το ισοζύγιο μάζας για τους  $\mu$ ο:

$$\begin{array}{l} \text{Ταχύτητα} \\ \text{αλλαγής μάζας} \\ \text{(αλλαγή του X)} \end{array} = \begin{array}{l} (+) \\ \text{αλλαγή που} \\ \text{οφείλεται} \\ \text{στην είσοδο} \end{array} + \begin{array}{l} (+) \\ \text{αλλαγή που} \\ \text{οφείλεται στην} \\ \text{αύξηση} \end{array} - \begin{array}{l} (-) \\ \text{αλλαγή που} \\ \text{οφείλεται} \\ \text{στην έξοδο} \end{array}$$

$$V \left( \frac{dX}{dt} \right) = 0 + \mu XV - QX \quad (3.21)$$



**Σχήμα 3.8.** Διάγραμμα για ένα σύστημα πλήρους ανάμιξης με διέλευση μιας κατεύθυνσης (χωρίς ανακυκλοφορία) (Λέκκας, 2001).

ή χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.4

$$V \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} XV - QX \quad (3.22)$$

Για σταθερή κατάσταση  $dX/dt = 0$  οι εξισώσεις 3.18 και 3.19 διαμορφώνονται ως ακολούθως:

$$\mu = D = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (3.23)$$

Λύνοντας την εξίσωση 3.23 ως προς  $S$  έχουμε:

$$S = S_e = K_s \left( \frac{D}{\mu_m - D} \right) \quad (3.24)$$

Εάν γράψουμε το ισοζύγιο μάζας για το υπόστρωμα έχουμε την εξίσωση 3.25:

$$V \frac{dS}{dt} = QS_i - QS_e - \frac{\mu X}{Y} V \quad (3.25)$$

Ο τελευταίος όρος παριστάνει την εξαφάνιση του υποστρώματος λόγω μετατροπής του σε βιομάζα.

Εάν διαιρέσουμε την εξίσωση 3.25 δια του V έχουμε:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} S_i - \frac{Q}{V} S_e - \frac{\mu X}{Y} \quad (3.26)$$

όπου  $S_i$  είναι η συγκέντρωση του υποστρώματος στην είσοδο και  $S_e$  στην έξοδο του συστήματος

Για την σταθερή κατάσταση  $\frac{dS}{dt} = 0$  και επειδή  $\mu = D = \frac{Q}{V}$  (3.19)

η εξίσωση 3.26 γίνεται:

$$DS_i - DS_e - D \frac{X}{Y} = 0 \quad (3.27)$$

ή

$$X = Y(S_i - S_e) \quad (3.28)$$

Η ανάλογη σχέση για την περίπτωση της αύξησης σε περιορισμένο υπόστρωμα είναι η εξίσωση 3.8.

**Ενδογενής αναπνοή.** Στα ισοζύγια μάζας που γράφτηκαν μέχρι τώρα δεν έχει ληφθεί υπόψη η μείωση της βιομάζας λόγω αποσύνθεσης. Αποσύνθεση της βιομάζας γίνεται λόγω έλλειψης υποστρώματος για την συντήρηση της ζωντανής βιομάζας, οπότε τα βακτήρια ενδογενώς αποδομούν βακτηριακή μάζα. Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο ισοζύγιο μάζας. Έτσι το ισοζύγιο μάζας πληρέστερα δίνεται από την εξίσωση 3.29.

$$V \frac{dX}{dt} = V\mu X - VK_d X - QX \quad (3.29)$$

όπου

$V(dX/dt)$  = η ολική ταχύτητα αλλαγής της βιομάζας X

$V\mu X$  = η ταχύτητα αλλαγής που οφείλεται στην αναπαραγωγή και αύξηση των  $\mu$ /ο

$VK_d X$  = η ταχύτητα αλλαγής που οφείλεται στην αποσύνθεση

$QX$  = η ταχύτητα αλλαγής που οφείλεται στην υπερχειλίση

$K_d$  = η ειδική ταχύτητα αποσύνθεσης [ $s^{-1}$ ]

Για τη σταθερή κατάσταση όπου  $dX/dt = 0$  η εξίσωση 3.29 διαμορφώνεται ως ακολούθως:

$$\mu = D + K_d \quad (3.30)$$

Το ισοζύγιο μάζας βασισμένο στο υπόστρωμα διαμορφώνεται ως ακολούθως:

$$V \frac{dS}{dt} = QS_i - QS_e - \frac{\mu X}{Y} V \quad (3.31)$$

Για τη σταθερή κατάσταση έχουμε:

$$X = \frac{YD(S_i - S_e)}{\mu} \quad (3.32)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 3.30 έχουμε:

$$X = \frac{YD(S_i - S_e)}{D + K_d} \quad (3.33)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση Monod 3.4 στη 3.30 έχουμε:

$$S = \frac{K_s(D + K_d)}{\mu_m - (D + K_d)} \quad (3.34)$$

Εάν στις εξισώσεις 3.33 & 3.34 αντικαταστήσουμε το  $D = 1/\theta$  και το  $\mu_m = K_m Y$  έχουμε:

$$X = \frac{Y(S_i - S_e)}{1 + (K_d \theta)} \quad (3.35)$$

και

$$S_e = \frac{K_s(1 + K_d \theta)}{\mu_m \theta - (1 + K_d \theta)} = \frac{K_s(1 + K_d \theta)}{\theta(K_m Y - K_d) - 1} \quad (3.36)$$

Στο σύστημα με διέλευση μιας κατεύθυνσης ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι ίσος με τη μέση ηλικία της βιομάζας.

$$\theta_c = \frac{\text{σύνολο βιομάζας στο βιοαντιδραστήρα}}{\text{βιομάζα που απομακρύνεται ημερησίως}} = \frac{VX}{QX} = \theta \quad (3.37)$$

Η εξίσωση 3.30 δίνει:

$$\mu' = \mu - K_d = \frac{1}{\theta} = D \quad (3.38)$$

όπου  $\mu'$  είναι η ειδική ταχύτητα αύξησης που παρατηρείται, δηλαδή περιλαμβάνει και την απώλεια βιομάζας λόγω αποδόμησης της ίδιας της βιομάζας.

Επίσης εάν παραστήσουμε την παρατηρούμενη στο βιοαντιδραστήρα μετατροπή του υποστρώματος σε βιομάζα στην εξίσωση 3.39 έχουμε:

$$Y_o = \frac{X}{S_i - S_e} \quad (3.39)$$

και αν αντικαταστήσουμε τη βιομάζα  $X$  από την εξίσωση 3.35 έχουμε μια σχέση μεταξύ του  $Y_o$ ,  $Y$ , του  $K_d$  και του  $\theta$ .

$$Y_o = \frac{Y(S_i - S_e)}{(1 + K_d \theta)(S_i - S_e)} = \frac{Y}{1 + K_d \theta} \quad (3.40)$$

Ο παρατηρούμενος συντελεστής μετατροπής του υποστρώματος σε βιομάζα  $Y_o$  είναι μικρότερος του πραγματικού  $Y$ , διότι δίνει τη βιομάζα που παρήχθη μειωμένη κατά το ποσοστό απώλειας λόγω αποσύνθεσης της βιομάζας.



Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.38 είναι δυνατόν να εξάγουμε μια σχέση για την ταχύτητα χρήσης του υποστρώματος ή την σχέση τροφής προς  $\mu$ , U:

$$\mu' = \frac{dX}{dt} \frac{1}{X} - K_d \quad (3.38\beta)$$

και επειδή  $\frac{dS}{dt} Y = \frac{dX}{dt}$  (3.2)

$$\mu' = Y \frac{dS}{dt} \frac{1}{X} - K_d \quad (3.41)$$

αλλά  $U = \frac{dS}{dt} \frac{1}{X}$  (ορισμός του U) (3.42)

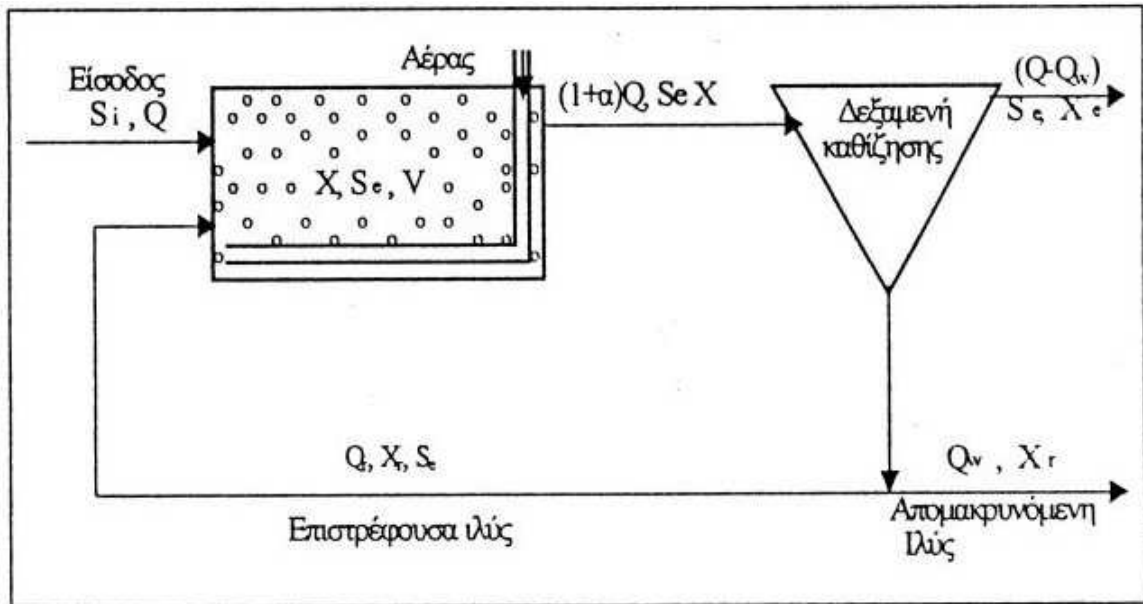
έχουμε  $\mu' = YU - K_d = \frac{1}{\theta}$  (3.43)

Ο πίνακας 3.1 συνοψίζει τις σημαντικότερες εξισώσεις που ισχύουν σε μια συνεχή καλλιέργεια χωρίς περιορισμό υποστρώματος και χωρίς ανακυκλοφορία.

**Πίνακας 3.1.** Ανακεφαλαίωση των εξισώσεων που ισχύουν σε συνεχή καλλιέργεια με διέλευση μιας κατεύθυνσης, με ή χωρίς αποσύνθεση της βιομάζας, χωρίς ανακυκλοφορία.

	$k_d = 0$	$k_d \neq 0$
Ειδική ταχύτητα αύξησης [ $s^{-1}$ ]	$\mu = D = \frac{1}{\theta} = \frac{1}{\theta_c}$	$\mu = D + K_d = \frac{1}{\theta} + K_d$
Καθαρή ειδική ταχύτητα αύξησης [ $s^{-1}$ ]	$\mu' = \mu$	$\mu' = \mu - K_d = \frac{1}{\theta} = \frac{1}{\theta_c}$
Υπόστρωμα αντιδραστήρα [ $kg\ m^{-3}$ ]	$S_e = \frac{K_s}{K_m Y \theta - 1}$	$S_e = \frac{K_s (1 + K_d \theta)}{\theta (K_m Y - K_d) - 1}$
Βιομάζα κυττάρων [ $kg\ m^{-3}$ ]	$X = Y(S_i - S_e)$	$X = \frac{Y(S_i - S_e)}{1 + K_d \theta}$

### 3.3. Συστήματα συνεχούς τροφοδοσίας υποστρώματος με ανακυκλοφορία ιλύος.



Σχήμα 3.9. Διάγραμμα για ένα συνεχές σύστημα πλήρους ανάμιξης με ανακυκλοφορία ιλύος (Λέκκας, 2001).

Στα συνεχή συστήματα με ανακυκλοφορία έχουμε δύο νέες λειτουργικές παραμέτρους ελέγχου της διεργασίας:

$a = \frac{Q_r}{Q}$  , το ποσοστό ανακύκλωσης, που έχει συνήθως τιμές μικρότερες από τη μονάδα.  $Q_r$  είναι η παροχή ανακυκλοφορίας της ιλύος [ $m^3/h$ ].

και

$C = \frac{X_r}{X}$  , ο συντελεστής συμπύκνωσης της βιομάζας ή ενεργού ιλύος, που έχει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.  $X_r$  είναι η βιομάζα στην απομακρυνόμενη ενεργό ιλύ (περίσσεια ιλύος) [ $kg/m^3$ ].

Οι παραδοχές που γίνονται για τη μαθηματική περιγραφή του συστήματος του σχήματος 3.9, που είναι και η συνηθέστερη διάταξη στην πράξη, είναι οι ακόλουθες:

- Πρόκειται για βιοαντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης.
- Βιολογική αύξηση γίνεται μόνο στη δεξαμενή αερισμού.
- Ο όγκος της δεξαμενής καθίζησης θεωρείται αμελητέος.
- Ο μέσος υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερισμού είναι

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{1}{D} \quad (3.18)$$

- Ο μέσος χρόνος παραμονής των κυττάρων στη δεξαμενή αερισμού ορίζεται ως ο λόγος της βιομάζας του βιοαντιδραστήρα δια της βιομάζας που απομακρύνεται στη μονάδα του χρόνου (συνήθως κάθε μέρα).

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_r + (Q - Q_w)X_e} \quad (3.44)$$

Όπου  $Q_w$  είναι η παροχή της απομακρυνόμενης ιλύος (περίσσεια ιλύος) και  $X_e$  η συγκέντρωση της βιομάζας στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα.

Το ισοζύγιο μάζας για το σύστημα του σχήματος 3.9 είναι το ακόλουθο:

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

$$\frac{dX}{dt}V = 0 - [(Q_w X_r + (Q - Q_w)X_e)] + \left[ \left( Y \frac{dS}{dt} - K_d X \right) V \right] \quad (3.45)$$

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

Για την σταθερή κατάσταση  $\frac{dX}{dt} = 0$  η εξίσωση 3.45 διαμορφώνεται ως εξής:

$$Q_w X_r + (Q - Q_w)X_e = \left( Y \frac{dS}{dt} - K_d X \right) V \quad (3.46)$$

$$\frac{Q_w X_r + (Q - Q_w)X_e}{VX} = Y \frac{dS}{dt} \frac{1}{X} - K_d \quad (3.47)$$

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \frac{dS}{dt} \frac{1}{X} - K_d \quad (3.48)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{S_i - S_e}{\theta} \quad (3.49)$$

και η εξίσωση 3.48 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \frac{S_i - S_e}{\theta} \frac{1}{X} - K_d \quad (3.50)$$

οπότε λύνοντας την 3.50 ως προς  $X$  προκύπτει:

$$\boxed{X = \frac{\theta_c Y (S_i - S_e)}{\theta (1 + K_d \theta_c)}} \quad (3.51)$$

Η εξίσωση 3.51 είναι μια σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της βιομάζας  $X$  στο βιοαντιδραστήρα, της συγκέντρωσης του υποστρώματος στην είσοδο  $S_i$  και στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα  $S_e$ , του υδραυλικού χρόνου παραμονής  $\theta$ , της μέσης ηλικίας της βιομάζας  $\theta_c$

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:

$$\frac{dS}{dt}V = QS_i - Q_w S_e - (Q - Q_w)S_e - \frac{\mu X}{Y}V \quad (3.52)$$

Όπου  $Q_w$  είναι η παροχή της απομακρυνόμενης ιλύος.

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

$$QS_i - QS_e = \frac{\mu X}{Y}V \quad (3.53)$$

Από την εξίσωση 3.50 έχουμε:

$$\frac{S_i - S_e}{\theta} = \frac{X}{\theta_c Y} + \frac{K_d X}{Y} \quad (3.54)$$

και η εξίσωση 3.53 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{\mu X}{Y} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{S_i - S_e}{\theta} = \frac{X}{\theta_c Y} + \frac{K_d X}{Y} \quad (3.55)$$

ή

$$\mu = \frac{1}{\theta_c} + K_d \quad (3.56)$$

Αντικαθιστώντας την ειδική ταχύτητα αύξησης  $\mu = \frac{K_m Y S}{K_s + S}$  (3.4)

(ο συντελεστής  $\mu = \mu' + K_d$  περιέχει και το παραγόμενο υπόστρωμα από την ενδογενή αναπνοή) έχουμε:

$$\frac{K_m Y S_e}{K_s + S_e} = \frac{1}{\theta_c} + K_d \quad (3.57)$$

$$K_m Y S_e \theta_c = K_s + S_e + K_s K_d \theta_c + S_e K_d \theta_c \quad (3.58)$$

$$S_e (K_m Y \theta_c - 1 - \theta_c K_d) = K_s (1 + \theta_c K_d) \quad (3.59)$$

$$S_e = \frac{K_s (1 + \theta_c K_d)}{\theta_c (K_m Y - K_d) - 1} \quad (3.60)$$

Επίσης ισχύει:

$$Y_o = \frac{X/\theta_c}{(S_i - S_e)/\theta} \quad (3.39\beta)$$

Επειδή η παραγόμενη ανά ημέρα βιομάζα  $X/\theta_c$  και το υπόστρωμα που αντιστοιχεί σε αυτή τη βιομάζα είναι  $(S_i - S_e)/\theta$  με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.51 έχουμε:

$$Y_o = \frac{Y}{1 + K_d \theta_c} \quad (3.61)$$

**Έλεγχος σχεδιασμού.** Ο σχεδιασμός μπορεί να βασιστεί στις εξισώσεις 3.51 & 3.60. Χρησιμοποιούνται όμως και οι ακόλουθες παράμετροι που η τιμή τους ελέγχει την ύπαρξη σωστού σχεδιασμού, ή την σωστή λειτουργία της μονάδας. Δηλαδή πριν προβούμε σε ένα σχεδιασμό βάσει ορισμένων παραδοχών και τιμών των σταθερών, ελέγχουμε την τιμή των παραμέτρων αυτών.

Η ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$U = \frac{-\frac{dS}{dt}}{X} = \frac{S_i - S_e}{\theta X} = \frac{Q}{V} \frac{S_i - S_e}{X} \quad (3.62)$$

Ο μέσος χρόνος παραμονής της βιομάζας του βιοαντιδραστήρα, ηλικία ιλύος, δίνεται από τη σχέση 3.50 εάν αντικαταστήσουμε το  $\frac{S_i - S_e}{\theta X}$ :

$$\frac{1}{\theta_c} = YU - K_d \quad (3.63)$$

Με την τιμή του  $\theta_c$  ελέγχουμε το σύστημα ευκολότερα, γιατί αυτή εξαρτάται από την ποσότητα της βιομάζας που απομακρύνουμε κάθε μέρα.

Από την εξίσωση 3.44 έχουμε την εξάρτηση του  $\theta_c$  από το  $Q_w$ . Σε αυτή την εξίσωση μπορούμε για λόγους απλούστευσης να θεωρήσουμε αμελητέα την ποσότητα της ιλύος που φεύγει με τα επεξεργασμένα απόβλητα.

Μερικές φορές χρησιμοποιείται και ο λόγος τροφή ανά μάζα  $\mu/o$

$$\frac{F}{M} = \frac{S_i}{\theta X} \quad (3.64)$$

## Κεφάλαιο 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

### 4.1. Είδη μοντέλων προσομοίωσης.

Έχοντας ένα μαθηματικό μοντέλο που πρέπει να μελετήσουμε με προσομοίωση (δηλαδή ένα *Μοντέλο Προσομοίωσης*), θα πρέπει να αναζητήσουμε κατάλληλα εργαλεία για το σκοπό αυτό. Στην προσπάθεια αυτή είναι χρήσιμο να ταξινομήσουμε τα Μοντέλα Προσομοίωσης με βάση τέσσερις διαφορετικές έννοιες σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Deaton & Winebrake, 2000):

1. **Στατικά ή Δυναμικά Μοντέλα Προσομοίωσης:** Ένα στατικό μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ή αναπαριστά ένα σύστημα στο οποίο ο χρόνος δεν έχει σημασία. Αντίθετα, ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου.

2. **Ντετερμινιστικά ή Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης:** Αν ένα μοντέλο προσομοίωσης δεν περιλαμβάνει "τυχαία" τμήματα (τυχαία γεγονότα), ονομάζεται ντετερμινιστικό. Για παράδειγμα, ένα πολύπλοκο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει μία χημική αντίδραση, μπορεί να είναι ένα τέτοιο μοντέλο. Στα ντετερμινιστικά μοντέλα, η έξοδος είναι καθορισμένη, με δεδομένο το σύνολο των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Όμως, πολλά συστήματα πρέπει να χρησιμοποιήσουν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης, δηλαδή μοντέλα που θα έχουν τουλάχιστον ορισμένα τμήματα με "τυχαία" είσοδο. Τα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα, που βασίζονται στα συστήματα αναμονής (queueing systems), χρησιμοποιούν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης.

3. **Αυτο-οδηγούμενα ή Ιχνο-οδηγούμενα Μοντέλα Προσομοίωσης:** Σε ένα αυτο-οδηγούμενο (self-driven) μοντέλο υπάρχει μία εσωτερική πηγή τυχαίων αριθμών. Οι τυχαίοι αριθμοί οδηγούν τα τμήματα του μοντέλου, δηλαδή χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των στιγμιαίων εμφανίσεων των γεγονότων του συστήματος. Το βασικό χαρακτηριστικό του αυτο-οδηγούμενου μοντέλου είναι ότι αποτελεί ένα αυτόνομο μοντέλο, το οποίο δεν χρειάζεται εξωτερικές εισόδους (inputs) για να λειτουργήσει. Αντίθετα, ένα ιχνο-οδηγούμενο (trace-driven) μοντέλο καθοδηγείται από ακολουθίες εισόδου που προέρχονται από δεδομένα (trace data) που έχουν δημιουργηθεί από τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος. Τέτοια δεδομένα μπορούν να παραχθούν στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα που διαθέτουν ενσωματωμένα προγράμματα ιχνηλάτησης (tracing programs) που παρακολουθούν και καταγράφουν τις δραστηριότητες του συστήματος. Τα ιχνο-οδηγούμενα μοντέλα έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι αποφεύγονται οι δυσκολίες της τυχαίας ανάλυσης που χρειάζεται για τη χρήση κατανομών στην περιγραφή των εισόδων του μοντέλου και επίσης το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά είναι εύκολο να επιβεβαιωθούν. Το πρόβλημα με τα ιχνο-οδηγούμενα μοντέλα είναι το μικρό εύρος εφαρμογών που μπορούν να αντιμετωπίσουν. Οι εφαρμογές αυτές πρακτικά περιορίζονται σε υπολογιστικά συστήματα και μάλιστα μόνο για τη μελέτη μετατροπών σε ένα σύστημα που ήδη λειτουργεί.

4. **Συνεχή ή Διακριτά Μοντέλα Προσομοίωσης:** Ο ορισμός των συνεχών και διακριτών μοντέλων προσομοίωσης είναι ανάλογος με τον ορισμό των συνεχών και διακριτών συστημάτων. Ένα συνεχές σύστημα εξετάζει άπειρο αριθμό στοιχείων (π.χ. ολοκλήρωμα, παράγωγος), ενώ ένα διακριτό σύστημα περιλαμβάνει πεπερασμένο αριθμό σημείων (π.χ. άθροισμα, διαφορά). Πάντως πρέπει να σημειωθεί ότι ένα διακριτό μοντέλο δεν χρησιμοποιείται μόνο για την αναπαράσταση ενός διακριτού συστήματος και ένα διακριτό σύστημα δεν αναπαριστάται μόνο από ένα διακριτό μοντέλο προσομοίωσης. Η απόφαση για τη χρήση ενός διακριτού ή ενός συνεχούς μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύστημα εξαρτάται από τους ιδιαίτερους στόχους της μελέτης.

Τα μοντέλα προσομοίωσης που απασχολούν την παρούσα πτυχιακή εργασία στη συνέχεια είναι τόσο δυναμικά όσο και στοχαστικά, αυτο-οδηγούμενα αλλά και διακριτά και ονομάζονται *Μοντέλα Προσομοίωσης Διακριτών Γεγονότων (discrete event simulation models)*. Μάλιστα, αφού τα ντετερμινιστικά μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ειδικές

περιπτώσεις των στοχαστικών μοντέλων, δεν θα έχουμε απώλεια της γενικότητας στη μελέτη των μοντέλων προσομοίωσης.

## 4.2. Ιστορική εξέλιξη.

Λόγω του δυναμικού χαρακτήρα των μοντέλων προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα αποθήκευσης της τρέχουσας τιμής του προσομοιωμένου χρόνου, ενώ χρειαζόμαστε και ένα μηχανισμό αύξησής του από μία τιμή σε μία άλλη. Η μεταβλητή του μοντέλου προσομοίωσης που δίνει την τρέχουσα τιμή του χρόνου, ονομάζεται *ρολόι προσομοίωσης (simulation clock)*. Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιεί το ρολόι είναι συνήθως η ίδια με αυτή που χρησιμοποιούν οι παράμετροι εισόδου, ενώ γενικά δεν υπάρχει η σχέση του χρόνου που καταγράφει το ρολόι, με το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση του προσομοιωτή στον υπολογιστή.

Ιστορικά έχουν επικρατήσει δύο βασικές μέθοδοι για την εξέλιξη του ρολογιού προσομοίωσης: Η *Εξέλιξη με βάση το Χρόνο του Επομένου Γεγονότος (next-event time advance)* και η *Εξέλιξη Σταθερής Αύξησης του Χρόνου (fixed-increment time advance)*. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήσαμε την πρώτη μέθοδο διότι είναι πιο διαδεδομένη και διότι η δεύτερη μπορεί να θεωρηθεί ειδική περίπτωση της πρώτης.

Στη μέθοδο *εξέλιξης με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος*, το ρολόι προσομοίωσης αρχίζει από το μηδέν και καθορίζονται οι στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Το ρολόι αναπροσαρμόζεται στο χρόνο εμφάνισης του πιο κοντινού στο μέλλον γεγονότος. Τη στιγμή αυτή η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται ώστε να λάβει υπ' όψη της το γεγονός που εμφανίστηκε, ενώ ενημερώνεται επίσης η γνώση για τις χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων. Στη συνέχεια, το ρολόι αναπροσαρμόζεται ώστε να δείχνει τη στιγμή εμφάνισης του νέου πιο κοντινού στο μέλλον γεγονότος, η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται, καθορίζονται οι χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή εξέλιξης του ρολογιού προσομοίωσης από το ένα γεγονός στο άλλο συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού της προσομοίωσης. Αφού όλες οι αλλαγές κατάστασης γίνονται μόνο στις χρονικές στιγμές εμφάνισης των γεγονότων, οι ενδιάμεσες ανενεργοί περίοδοι δεν λαμβάνονται υπ' όψη και το ρολόι μετακινείται αυτόματα στη στιγμή εμφάνισης του επομένου γεγονότος (Hannon & Ruth, 1994).

Όσον αφορά τη μέθοδο *εξέλιξης σταθερής αύξησης του χρόνου*, το ρολόι προσομοίωσης εξελίσσεται κάθε φορά με σταθερές και ίσες αυξήσεις μονάδων χρόνου ( $\Delta t$ ). Μετά από κάθε ενημέρωση του ρολογιού γίνεται ένας έλεγχος για να εξακριβωθεί εάν θα έπρεπε να έχουν εμφανισθεί κάποια γεγονότα κατά το προηγούμενο χρονικό διάστημα. Αν εμφανίσθηκαν γεγονότα στο διάστημα αυτό, θεωρούμε ότι αυτά εμφανίζονται στο τέλος του χρονικού διαστήματος και η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται κατάλληλα.

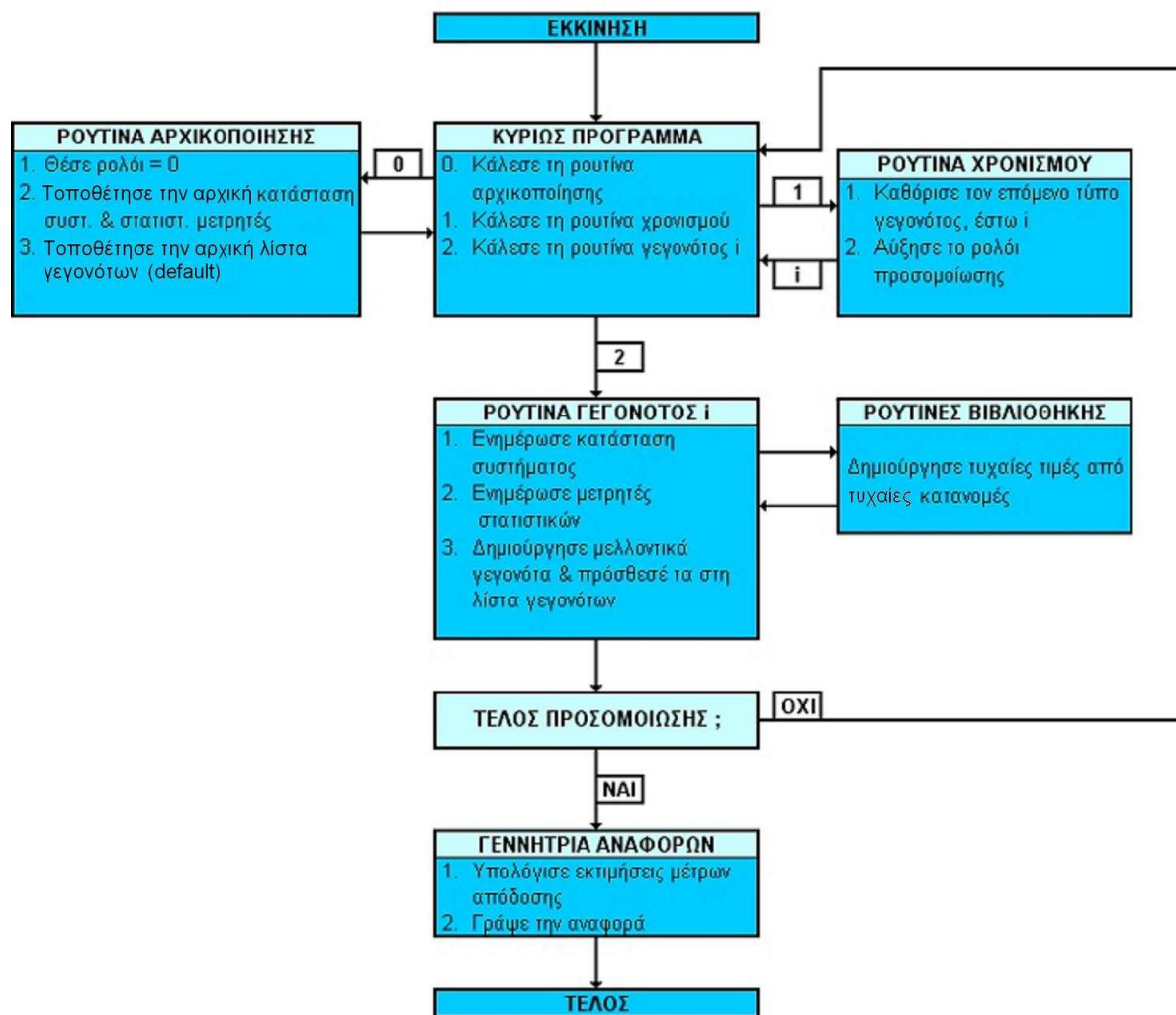
## 4.3. Οργάνωση μοντέλου προσομοίωσης διακριτών γεγονότων.

Τα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης διακριτών γεγονότων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο εξέλιξης με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος, περιλαμβάνουν τα παρακάτω τμήματα:

- *Κατάσταση Συστήματος (system state)*: Η συλλογή των μεταβλητών κατάστασης που είναι απαραίτητες για την περιγραφή του συστήματος σε μία χρονική στιγμή.
- *Ρολόι Προσομοίωσης (simulation clock)*: Μία μεταβλητή που περιέχει την τρέχουσα τιμή του προσομοιωμένου χρόνου.
- *Λίστα Γεγονότων (event list)*: Μία λίστα που περιέχει την επόμενη χρονική στιγμή εμφάνισης κάθε τύπου γεγονότος.
- *Μετρητές Στατιστικών (statistical counters)*: Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση στατιστικών μετρήσεων της απόδοσης του συστήματος.

- *Ρουτίνα Αρχικοποίησης (initialisation routine)*: Ένα υποπρόγραμμα που αρχικοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης τη χρονική στιγμή μηδέν.
- *Ρουτίνα Χρονισμού (timing routine)*: Ένα υποπρόγραμμα που αναγνωρίζει το επόμενο γεγονός από τη λίστα γεγονότων και ακολούθως αυξάνει το ρολόι προσομοίωσης στη χρονική στιγμή που το γεγονός αυτό θα εμφανισθεί.
- *Ρουτίνες Γεγονότων (event routines)*: Υποπρογράμματα που ενημερώνουν την κατάσταση συστήματος όταν εμφανίζεται ένα συγκεκριμένο είδος γεγονότος (υπάρχει μία τέτοια ρουτίνα για κάθε είδος γεγονότος).
- *Ρουτίνες Βιβλιοθήκης (library routines)*: Σύνολο υποπρογραμμάτων που δημιουργούν τυχαίες εμφανίσεις τιμών από πιθανολογικές κατανομές, που έχουν ορισθεί ως μέρος του μοντέλου προσομοίωσης.
- *Γεννήτρια Αναφορών (report generator)*: Υποπρόγραμμα που υπολογίζει εκτιμήσεις των επιθυμητών μέτρων απόδοσης από τους μετρητές στατιστικών και παράγει αναφορές όταν τελειώσει η εκτέλεση του προσομοιωτή.
- *Κυρίως Πρόγραμμα (main program)*: Το πρόγραμμα που ορίζει τη ρουτίνα χρονισμού για να καθοριστεί το επόμενο γεγονός και μετά μεταφέρει τον έλεγχο στην αντίστοιχη ρουτίνα γεγονότος για να ενημερωθεί κατάλληλα η κατάσταση του συστήματος. Ελέγχει επίσης αν πρέπει να τερματισθεί η προσομοίωση και ενεργοποιεί τότε τη γεννήτρια αναφορών.

Οι λογικές σχέσεις ανάμεσα στα παραπάνω τμήματα φαίνονται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί:



*Σχήμα 4.1. Διάγραμμα Ροής για την Εξέλιξη με βάση το Χρόνο Επομένου Γεγονότος (Hannon & Ruth, 1994).*



Ένα σύστημα είναι μια καλά ορισμένη συλλογή από οντότητες. Οι οντότητες χαρακτηρίζονται από τιμές δεδομένων που έχουν συγκεκριμένες *ιδιότητες (attributes)* και οι οποίες είναι μέρος της κατάστασης του συστήματος. Οι οντότητες που έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, συχνά ομαδοποιούνται σε λίστες (ή αρχεία ή σύνολα). Για κάθε οντότητα υπάρχει μια εγγραφή στη λίστα που αποτελείται από τις ιδιότητες της οντότητας, ενώ η σειρά με την οποία τοποθετούνται οι εγγραφές στη λίστα, εξαρτάται από κάποιο καθορισμένο κανόνα.

Η οργάνωση και η λειτουργία ενός προγράμματος προσομοίωσης διακριτών γεγονότων που χρησιμοποιεί το μηχανισμό εξέλιξης με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος, όπως περιγράφηκε παραπάνω, είναι τυπική για την ανάπτυξη προσομοιωτών με γλώσσες προγραμματισμού γενικού σκοπού όπως η C, η Pascal και η FORTRAN. Ονομάζεται *Προσέγγιση Χρονοδρομολόγησης Γεγονότων (event-scheduling approach)* στη μοντελοποίηση της προσομοίωσης, διότι οι χρονικές στιγμές εμφάνισης των μελλοντικών γεγονότων κωδικοποιούνται στο μοντέλο και προγραμματίζονται να εμφανισθούν στο προσομοιωμένο μέλλον. Η εναλλακτική προσέγγιση στο θέμα είναι η *Προσέγγιση Διαδικασίας (process approach)*, η οποία «βλέπει» την προσομοίωση σε σχέση με τις ξεχωριστές οντότητες που εμπλέκονται. Ο κώδικας που γράφεται εδώ, περιγράφει την «εμπειρία» μιας «τυπικής» οντότητας καθώς αυτή μετακινείται δια μέσου του συστήματος. Η κωδικοποίηση ενός προγράμματος προσομοίωσης με την προσέγγιση διαδικασίας γίνεται συνήθως με χρήση ειδικών γλωσσών προγραμματισμού για προσομοίωση, όπως η SIMULA, η GPSS, η SIMSCRIPT, η SIMAN, η SLAM κ.α. (Deaton & Winebrake, 2000).

#### **4.4. Πλεονεκτήματα, Μειονεκτήματα και Δυσκολίες της Προσομοίωσης.**

Η προσομοίωση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και συνεχώς όλο και πιο δημοφιλής μέθοδος για τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων. Έχει φυσικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, αλλά υπάρχουν και πολλές αιτίες εξ αιτίας των οποίων ορισμένες προσομοιώσεις δεν καταλήγουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ορισμένα πιθανά *πλεονεκτήματα* της χρήσης της μεθόδου της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω (Soltzberg, 1996):

- Τα περισσότερα σύνθετα συστήματα του πραγματικού κόσμου με «τυχαίες» παραμέτρους δεν μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά με κάποιο μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να λυθεί αναλυτικά. Έτσι η προσομοίωση είναι συχνά η μόνη διαθέσιμη μέθοδος μελέτης.
- Η προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης ενός υπάρχοντος συστήματος κάτω από κάποιο προβλεπόμενο σύνολο λειτουργικών συνθηκών.
- Μέσω της προσομοίωσης μπορούν να συγκριθούν εναλλακτικές προτεινόμενες σχεδιάσεις ή εναλλακτικές πολιτικές λειτουργίας του συστήματος, ώστε να προσδιορισθεί η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν ορισθεί.
- Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης μπορούμε να έχουμε καλύτερο έλεγχο στις συνθήκες των πειραμάτων σε σχέση με πιθανό πειραματισμό με το πραγματικό σύστημα.
- Η προσομοίωση επιτρέπει τη μελέτη ενός συστήματος που έχει μακρόχρονη εξέλιξη (π.χ. ένα οικονομικό σύστημα), σε πολύ μικρότερο χρόνο, ή τη μελέτη της λεπτομέρειάς του σε περισσότερο χρόνο.
- Είναι μια μέθοδος οικονομική, αφού είναι δυνατό να υλοποιηθεί πλέον σε μικρούς υπολογιστές με τη χρήση γλωσσών προγραμματισμού γενικού σκοπού όπως η C, η Pascal και η BASIC.
- Η προσομοίωση μπορεί να υλοποιηθεί από μηχανικούς που δεν είναι απαραίτητο να έχουν εκτεταμένες μαθηματικές γνώσεις, παρά μόνο τη δυνατότητα να κατανοούν βασικές έννοιες στατιστικής και να μπορούν να εφαρμόζουν ήδη έτοιμα μαθηματικά εργαλεία.

Ορισμένα *μειονεκτήματα* της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω (Soltzberg, 1996):

- Κάθε εκτέλεση ενός μοντέλου προσομοίωσης διακριτών γεγονότων παράγει μόνο εκτιμήσεις των πραγματικών χαρακτηριστικών του μοντέλου, για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων εισόδου. Έτσι είναι πιθανό να χρειασθούν πολλές διαφορετικές ανεξάρτητες εκτελέσεις του μοντέλου για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου που θα μελετηθεί. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση δεν είναι γενικά τόσο καλή μέθοδος για βελτιστοποίηση, όσο είναι για τη σύγκριση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων του συστήματος.
- Τα μοντέλα προσομοίωσης συχνά απαιτούν πολύ χρόνο και πόρους για να αναπτυχθούν. Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που παράγονται από μία μελέτη προσομοίωσης ή η εντύπωση που δημιουργούν οι τυχόν γραφικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων της, συχνά ενισχύουν μία τάση να δίνεται μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα αυτά από όσο πρέπει. Αν το μοντέλο δεν είναι μία αρκετά έγκυρη αναπαράσταση του συστήματος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανεξάρτητα του πόσο εντυπωσιακά είναι, θα προσθέσουν λίγη χρήσιμη πληροφορία για το πραγματικό σύστημα.

Από τη στιγμή που έχει ληφθεί η απόφαση να χρησιμοποιηθεί προσομοίωση για τη μελέτη ενός συστήματος, έχει παρατηρηθεί ότι μπορούν να εμφανισθούν αρκετά *προβλήματα* στην πορεία υλοποίησης ενός επιτυχημένου προσομοιωτή:

- Όχι καλά ορισμένοι στόχοι κατά την έναρξη της μελέτης.
- Ακατάλληλο επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου.
- Χειρισμός της μελέτης με προσομοίωση, σαν να ήταν βασικά μία δύσκολη άσκηση προγραμματισμού.
- Έλλειψη στοιχειωδών γνώσεων Επιχειρησιακής Έρευνας και Στατιστικής.
- Χρήση εμπορικών πακέτων προσομοιωτών που μπορεί να περιέχουν λάθη ή να μην υλοποιούν τη λογική του συστήματος.
- Αποτυχία στη σωστή καταγραφή των πηγών τυχαίων γεγονότων-τιμών του συστήματος.
- Χρήση αυθαίρετων κατανομών (π.χ. κανονική ή ομοιόμορφη) για την περιγραφή των εισόδων του προσομοιωτή.
- Ανάλυση των δεδομένων εξόδου από μία εκτέλεση του προσομοιωτή με τη χρήση στατιστικών τύπων που προϋποθέτουν ανεξαρτησία.
- Χρήση λανθασμένων μέτρων απόδοσης.

#### **4.5. Αντικείμενο της Περιβαλλοντικής Μοντελοποίησης.**

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται μια περιβαλλοντική μοντελοποίηση στη λειτουργία μιας δεξαμενής αερισμού σε μια ΕΕΑΛ. Οι λόγοι που αναπτύσσουμε το μοντέλο προσομοίωσης μιας δεξαμενής αερισμού μιας ΕΕΑΛ είναι οι εξής:

- Για να αποκτήσουμε μια καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών της μετατροπής και της αλληλεπίδρασης της ετερότροφης βιομάζας και του οργανικού υποστρώματος, με την ποσοτικοποίηση των αντιδράσεών τους, των μορφών, της μεταφοράς τους και της μετατροπής τους.
- Για να προσδιορίσουμε τις θεωρητικές συγκεντρώσεις του υποστρώματος (αλλά και της βιομάζας) ανάλογα με τις συνθήκες που εμείς ορίζουμε, και για κάθε χρονική φάση της προσομοίωσης.
- Για να προσδιορίσουμε τις μελλοντικές συνθήκες ή απαιτήσεις-προϋποθέσεις για διάφορα σενάρια επιβάρυνσης ή και εναλλακτικών ενεργειών διαχείρισης.

Στην πρώτη περίπτωση θέλουμε να αναλύσουμε τι ακριβώς γίνεται σε μια δεξαμενή αερισμού. Δηλαδή θέλουμε να αναλύσουμε-προσομοιώσουμε τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα. Οι διαδικασίες αυτές έχουν σχέση με τη μεταφορά, τη μετατροπή και την αλληλεπίδραση της ετερότροφης βιομάζας και του υποστρώματος.

Ο δεύτερος στόχος των περιβαλλοντικών μαθηματικών μοντέλων έχει στενή σχέση με την εκτίμηση των επιπτώσεων των επεξεργασμένων λυμάτων στα οικοσυστήματα και γενικότερα στο περιβάλλον. Κριτήρια ποιότητας νερού εφαρμόζονται για τον καθορισμό επιπέδων ασφάλειας για επιπτώσεις σε φυτικούς οργανισμούς (π.χ. ευτροφισμός). Επίσης ορίζονται επίπεδα ασφαλείας επικίνδυνων οργανικών ουσιών που μπορεί να περιέχουν τα λύματα και που μπορεί να έχουν βλαβερές συνέπειες και σε ζωικούς οργανισμούς, ακόμα και στον άνθρωπο (έμμεσα λόγω βιοσυσσώρευσης μέσω της τροφικής αλυσίδας). Για την ανάλυση της συμπεριφοράς των ουσιών αυτών απαιτείται ένα πιο πολύπλοκο μοντέλο προσομοίωσης που θα χωρίζει το υπόστρωμα σε κατηγορίες ενώσεων. Κάτι τέτοιο δεν είναι ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Τα κριτήρια αυτά συντείνουν στον καθορισμό ορίων ποιότητας νερού, τα οποία επιβάλλονται σε νομικό πλαίσιο και απαιτούν την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για τον εντοπισμό φορτίων ρύπανσης, για ανάλυση επικινδυνότητας και ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα κριτήρια καθορίζουν μια οριακή συγκέντρωση ενώσεων ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα όπως ο ευτροφισμός στα οικοσυστήματα. Επίσης ορίζονται επίπεδα συγκεντρώσεων για τη μη εμφάνιση βλαβερών επιπτώσεων σε φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς.

Τα κριτήρια ποιότητας νερού καθορίζουν, ότι οι υδρόβιοι οργανισμοί και οι χρήσεις τους δεν θα επηρεαστούν αρνητικά εάν ικανοποιούνται οι παρακάτω δυο συνθήκες:

- 1) Η μέση συγκέντρωση επί τέσσερις συνεχείς μέρες του οργανικού φορτίου (που προέρχεται από τα επεξεργασμένα απόβλητα) δεν υπερβαίνει το συνιστώμενο ανώτατο επιτρεπτό όριο παρά μια μόνο φορά κάθε τρία έτη κατά μέσο όρο.
- 2) Η μέση ωριαία συγκέντρωση δεν ξεπερνάει το όριο άμεσης έκθεσης συχνότερα από μια μόνο φορά κατά τρία έτη κατά μέσο όρο.

Τα κριτήρια αναγνωρίζουν ότι οι επιπτώσεις είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου και της διάρκειας έκθεσης του οργανισμού σε αυτή τη συγκέντρωση. Μια πολύ σύντομη έκθεση σε σχετικά υψηλή συγκέντρωση μπορεί να αποβεί λιγότερο επιζήμια από ότι μια παρατεταμένη σε χαμηλότερη συγκέντρωση. Μόνο μέσα από τη χρήση μοντέλων υδατικής χημείας μπορούν να μελετηθούν τέτοιες σχέσεις διάρκειας-συχνότητας και μόνο μέσω λεπτομερειακής γνώσης της υδατικής χημείας είναι δυνατόν να προταθούν τέτοια μοντέλα, να ελεγχθούν στην πράξη και να ερμηνευτούν σωστά.

Επίσης ίσως να είναι απαραίτητα κάποια κριτήρια πεδίου (site-specific criteria) ποιότητας νερού, τα οποία για τον καθορισμό των σταθερών (standards) ποιότητας των υδάτων θα απαιτούν τη βοήθεια μαθηματικής μοντελοποίησης. Για παράδειγμα, μια οργανική ένωση μπορεί να ενισχύει το φαινόμενο του ευτροφισμού σε μεγαλύτερο βαθμό σε επιτόπου δοκιμές σε σύγκριση με δοκιμές εργαστηρίου με βιοπειράματα (Soltzberg, 1996). Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οργανικού άνθρακα ποικίλουν πολύ στα φυσικά ύδατα και γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να αναπτυχθούν ειδικά κριτήρια πεδίου.

Ο τρίτος κύριος στόχος των μαθηματικών μοντέλων είναι η πρόβλεψη μελλοντικών συγκεντρώσεων του οργανικού φορτίου (του οργανικού υποστρώματος), σε διαφορετικά σενάρια φόρτισης ή εναλλακτικές δράσεις διαχείρισης. Σε αυτή τη κατηγορία εμπíπτουν οι κατανομές των φορτίων αποβλήτων και τα μοντέλα έκθεσης για την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Ανεξάρτητα από το πόσα δεδομένα έχουν καταγραφεί, θα είναι πάντα επιθυμητό να υπάρχουν κάποιες εκτιμήσεις των συγκεντρώσεων του οργανικού φορτίου σε διαφορετικές συνθήκες, κάποια αποτελέσματα σεναρίου για μελλοντική φόρτιση αποβλήτων ή ακόμα εκτιμήσεις σε κάποια άλλη τοποθεσία, για την οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Για όλους αυτούς τους λόγους, χρειαζόμαστε μοντέλα προσδιορισμού του οργανικού φορτίου των αστικών λυμάτων (πριν και μετά την επεξεργασία). Για να μοντελοποιήσουμε υδατικά συστήματα (στην παρούσα περίπτωση, μια δεξαμενή αερισμού μιας ΕΕΑΛ), ξεκινάμε με ένα απλό ισοζύγιο μάζας, βασισμένο στην αρχή της συνέχειας: η ύλη ούτε παράγεται, ούτε καταστρέφεται σε μακροσκοπικές χημικές, φυσικές και βιολογικές αλληλεπιδράσεις (Deaton & Winebrake, 2000).

#### 4.6. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του Μοντέλου.

Για την μαθηματική μοντελοποίηση μιας δεξαμενής αερισμού σε μια ΕΕΑΛ είναι απαραίτητα τέσσερα στοιχεία:

- α) δεδομένα πεδίου για τις συγκεντρώσεις των ενώσεων και τις εισροές μάζας
- β) μια διατύπωση ενός μαθηματικού μοντέλου
- γ) σταθερές ρυθμών και συντελεστές ισορροπίας για το μαθηματικό μοντέλο και τέλος
- δ) μερικά κριτήρια απόδοσης, με τα οποία θα εκτιμηθεί το μοντέλο.

Χωρίς τα δεδομένα πεδίου είναι αδύνατη η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του μοντέλου. Ανάλογα με τη χρήση του μοντέλου ποικίλει ο βαθμός αναγνώρισης του πεδίου. Εάν το μοντέλο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την έκδοση κανονισμών, θα πρέπει να υπάρχουν αρκετά δεδομένα πεδίου, ώστε να είμαστε βέβαιοι για τα αποτελέσματα του μοντέλου. Συνήθως, αυτό απαιτεί δυο σύνολα μετρήσεων πεδίου: ένα για την βαθμονόμηση του μοντέλου και ένα για την επαλήθευση σε ελαφρώς διαφορετικές συνθήκες (μετρήσεις από διαφορετική χρονιά ή σε άλλο μέρος).

Η βαθμονόμηση του μοντέλου περιλαμβάνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων πεδίου. Οι συντελεστές του μοντέλου και οι σταθερές ρυθμών θα πρέπει αρχικά να επιλεγθούν με βάση τη βιβλιογραφία ή από εργαστηριακές μελέτες. Για τη λειτουργία του μοντέλου είναι επίσης απαραίτητοι οι ρυθμοί των εισροών. Αφού πραγματοποιηθεί το μοντέλο, γίνεται μια στατιστική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις μεταβλητές κατάστασης (συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων) και των μετρήσεων πεδίου. Εάν τα σφάλματα κυμαίνονται μέσα σε ένα αποδεκτό επίπεδο ανοχής, το μοντέλο θεωρείται ως βαθμονομημένο. Εάν τα σφάλματα δεν είναι αποδεκτά, τότε οι σταθερές ρυθμού και οι συντελεστές θα πρέπει να μεταβληθούν συστηματικά (ρύθμιση του μοντέλου) μέχρι να επιτευχθεί μια αποδεκτή προσομοίωση. Οι παράμετροι δε θα πρέπει να καθοριστούν έξω από τα όρια των πειραματικά προσδιορισμένων τιμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτό βαθμονομείται το μοντέλο (Harte, 2001).

Στη συνέχεια αναφέρονται μερικοί χρήσιμοι ορισμοί που έχουν σχέση με την βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου:

*Μαθηματικό μοντέλο:* μια ποσοτική διατύπωση χημικών, φυσικών, βιολογικών διαδικασιών που προσομοιώνει το σύστημα.

*Μεταβλητή κατάστασης:* η εξαρτημένη μεταβλητή που μοντελοποιείται (π.χ. με αυτήν την έννοια μπορεί να είναι η συγκέντρωση μιας χημικής ένωσης - ουσίας).

*Παράμετροι μοντέλου:* συντελεστές του μοντέλου που χρησιμοποιούνται για τη διατύπωση μιας εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (π.χ. σταθερές ρυθμών, σταθερές ισορροπίας, στοιχειομετρικές αναλογίες).

*Είσοδοι του μοντέλου:* δρώσες συναρτήσεις ή σταθερές που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου (π.χ. ροή, συγκεντρώσεις χημικών ουσιών στην είσοδο, θερμοκρασία κ.α.).

*Βαθμονόμηση:* μια στατιστικά αποδεκτή σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου και των μετρήσεων πεδίου. Η ρύθμιση ή προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου επιτρέπει μέσα στα όρια των πειραματικών προσδιορισμένων τιμών που πάρθηκαν πειραματικά και στη βιβλιογραφία.

*Επαλήθευση:* μια στατιστικά αποδεκτή σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και ενός δεύτερου (ανεξάρτητου) συνόλου δεδομένων πεδίου, τα οποία αναφέρονται σε άλλη χρονιά ή σε διαφορετική τοποθεσία. Μετά από το στάδιο της βαθμονόμησης σταθεροποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου και δεν επιτρέπεται περαιτέρω ρύθμιση.

*Προσομοίωση:* χρήση του μοντέλου με οποιοδήποτε σύνολο δεδομένων εισόδου (ακόμα και υποθετικής εισόδου) χωρίς απαίτηση για βαθμονόμηση ή επαλήθευση με δεδομένα πεδίου.

*Έλεγχος αξιοπιστίας:* επιστημονική αποδοχή ότι: (1) το μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις βασικές και τις αξιοπρόσεκτες διαδικασίες, (2) οι διαδικασίες έχουν διατυπωθεί σωστά και (3) το μοντέλο περιγράφει με κατάλληλο τρόπο τα παρατηρούμενα φαινόμενα, σύμφωνα με τις ανάγκες χρήσης του.

*Ευρωστία:* χρησιμότητα του μοντέλου που έχει εδραιωθεί έπειτα από επανειλημμένες εφαρμογές υπό διαφορετικές συνθήκες και σε διαφορετικές τοποθεσίες.

*Λεπτομερής εξέταση περαιτέρω:* σύγκριση παλαιών προβλέψεων του μοντέλου με μετρήσεις πεδίου που γίνονται αυτή τη χρονική στιγμή.

*Ανάλυση ευαισθησίας:* προσδιορισμός της επίδρασης μιας μικρής μεταβολής των παραμέτρων του μοντέλου στα αποτελέσματα (μεταβλητή κατάστασης), είτε με αριθμητική προσομοίωση ή με μαθηματικές τεχνικές.

*Ανάλυση αβεβαιότητας:* προσδιορισμός της αβεβαιότητας (τυπική απόκλιση) της προβλεπόμενης τιμής της μεταβλητής κατάστασης (μέση) λόγω αβεβαιότητας στις παραμέτρους του μοντέλου, στις εισόδους ή στην αρχική κατάσταση, με χρήση τεχνικών στοχαστικής μοντελοποίησης.

Τα στατιστικά μοντέλα για την αποδοχή της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης ενός μοντέλου θα πρέπει να ορίζονται εξ αρχής, πριν ξεκινήσουν οι προσομοιώσεις. Το πόσο «καλά» είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου εξαρτάται από την επιθυμητή χρήση του μοντέλου ή των προβλέψεων. Ομοίως, τα κριτήρια για την αποδοχή κάποιας βαθμονόμησης ή επαλήθευσης εξαρτώνται από την επιθυμητή χρήση του μοντέλου. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο για την αποδοχή μιας βαθμονόμησης μοντέλου για το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να είναι το εξής: «η πρόβλεψη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου σε ένα ρέμα θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια του  $\pm 0,5$  mg/L, τουλάχιστον στο 90% των παρατηρήσεων». Με παρόμοιο τρόπο υπάρχουν αρκετοί τύποι στατιστικών κριτηρίων που μπορούν να δημιουργηθούν (Hannon & Ruth, 1994). Ένα παράδειγμα είναι τα στατιστικά κριτήρια «καταλληλότητας της προσομοίωσης», τα οποία χρησιμοποιούν την κατανομή  $\chi^2$  ή τα τεστ Kolmogorov-Smirnov (τεστ της κατανομής δειγματοληψίας της διακύμανσης). Ταυτόχρονες δοκιμές t ανά ζεύγη των παρατηρήσεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων από πεδίο (δοκιμή του μέσου) είναι απαραίτητες. Επίσης η γραμμική παρεμβολή δεδομένων ανά ζεύγη ενδείκνυται για προβλέψεις του μοντέλου και παρατηρήσεις πεδίου ταυτόχρονα.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρήσεις πεδίου και την κανονική τους απόκλιση (ή τη γεωμετρική απόκλιση, εάν είναι η κατάλληλη) πρέπει στη συνέχεια να εξετάζεται.

Επίσης υπάρχουν οι τεχνικές εκτίμησης παραμέτρων, όπως οι μη γραμμικές παλινδρομήσεις για την προσέγγιση καμπύλης (σταθμισμένες ή μη) ή τα φίλτρα Kalman, για το βέλτιστο προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου (π.χ. ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου των υπολειμμάτων).

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου είναι απαραίτητη μια στατιστική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και ενός δεύτερου συνόλου δεδομένων πεδίου. Οι συντελεστές και οι σταθερές ρυθμού δεν επιτρέπεται να αλλάξουν από τη στιγμή που γίνει η βαθμονόμηση. Η διαδικασία αυτή παρέχει μια βεβαιότητα, ότι το μοντέλο αποδίδει σε αποδεκτά επίπεδα. Τα κριτήρια απόδοσης μπορεί να είναι ελαστικά, όπως: «τα αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σε μια τάξη μεγέθους των συγκεντρώσεων πεδίου σε κάθε χρονική στιγμή», ή πολύ αυστηρά, όπως: «το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των υπολειμμάτων (διαφορά μεταξύ των μετρήσεων πεδίου και των αποτελεσμάτων του μοντέλου) θα πρέπει να είναι μια ελάχιστη προκαθορισμένη ή βέλτιστη τιμή».

Η αποδοχή της βαθμονόμησης του μοντέλου και της επαλήθευσης του δε σημαίνει απαραίτητα, ότι επαληθεύεται το ίδιο το μοντέλο. Είναι πιθανό το μοντέλο να λειτουργεί σωστά υπό ορισμένες προϋποθέσεις, αλλά λανθασμένα υπό άλλες. Όσο το μοντέλο εφαρμόζεται σε διαφορετικές καταστάσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες, αποκτάμε όλο και μεγαλύτερη εμπιστοσύνη σ' αυτό και στην ευρωστία του. Η ακριβής στιγμή κατά την οποία

το μοντέλο θεωρείται επαληθευμένο είναι τόσο δύσκολο να προσδιοριστεί, όσο και η στιγμή που ένας έφηβος γίνεται ενήλικος. Είναι μια σταδιακή διαδικασία. Όσο χρησιμοποιείται το μοντέλο, «κάμπτεται» όλο και περισσότερο και με διαφορετικούς τρόπους, θέτοντας σε δοκιμή την αξιοπιστία και την διατύπωσή του. Εκ των υστέρων η λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αποτελεί μια σημαντική δοκιμή της χρησιμότητάς του. Οι εξετάσεις αυτές γίνονται αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι προβλέψεις από το μοντέλο και καθώς τα δεδομένα γίνονται διαθέσιμα με την πάροδο του χρόνου. Ελάχιστα παραδείγματα μετέπειτα λεπτομερούς εξέτασης έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία και γι' αυτό θεωρείται ότι σίγουρα χρειάζεται να εξεταστούν περισσότερα (Huggett, 1993).

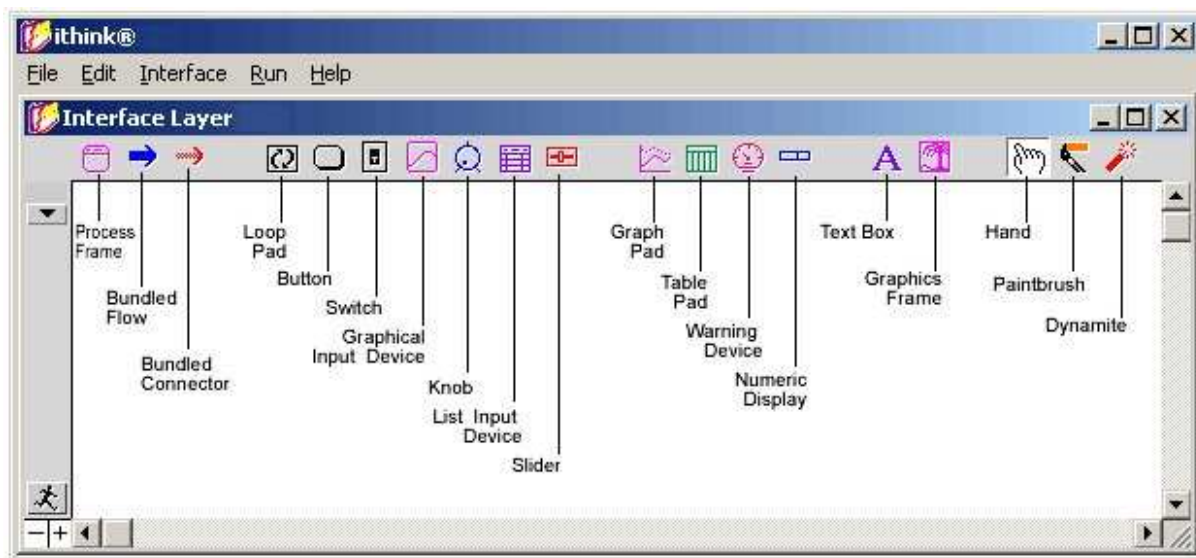
## Κεφάλαιο 5: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ STELLA

Το πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA είναι ένα πρόγραμμα που συνδυάζει την περιβαλλοντική γνώση και τον συμβολισμό των δυναμικών συστημάτων με άμεση και εύκολη προσομοίωση παρέχοντας ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον. Από εκπαιδευτικής άποψης το πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA είναι ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό εργαλείο που βοηθά τους σπουδαστές να αποκτήσουν τις κατάλληλες γνώσεις και εμπειρία που απαιτείται για την μαθηματική μοντελοποίηση (HPS, 2001).

### 5.1. Περιληπτική σύνοψη του περιβάλλοντος του προγράμματος προσομοίωσης STELLA.

Το πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα μοντελοποίησης. Το επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας», το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» και το επίπεδο «εξισώσεις».

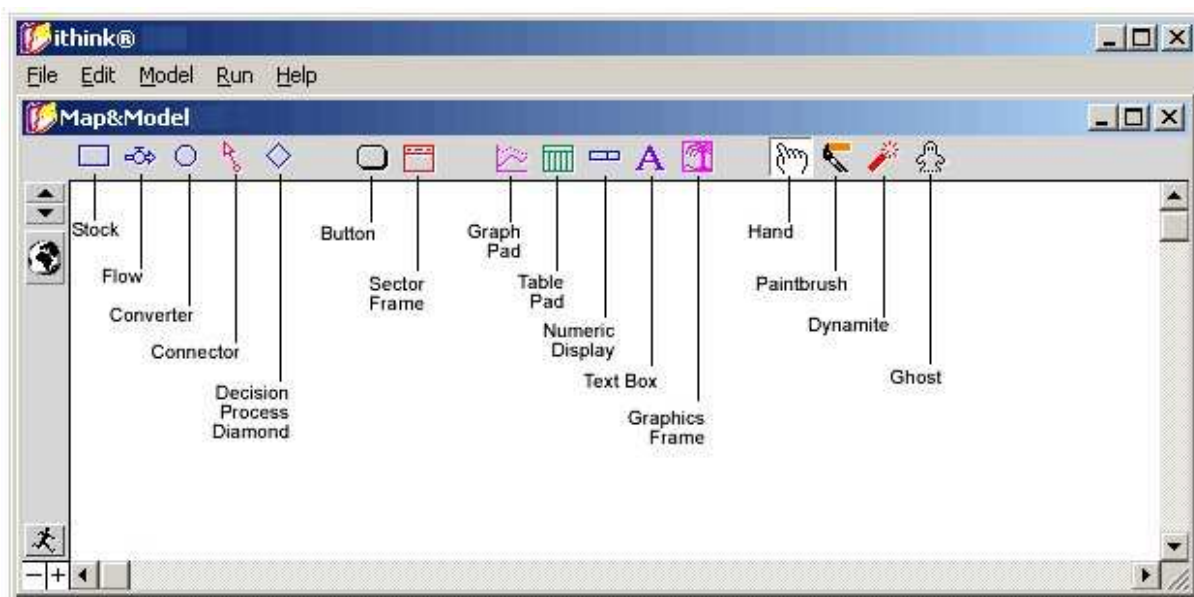
α) **Υψηλότερο επίπεδο ή επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας»:** Αυτό το επίπεδο σχεδίασης (σχήμα 5.1) παρέχει τα μέσα για τον λεπτομερή σχεδιασμό της συνολικής λογικής του μοντέλου όπως επίσης και συσκευές για να ελέγχουν και να παρακολουθούν την πρόοδο του μοντέλου. Όπως υποδηλώνει το όνομα του, το επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για να εισάγουμε λειτουργίες-εργαλεία τελικού χρήστη (λειτουργίες «εργασίας») στο μοντέλο. Για παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα εργαλεία αυτά για να δημιουργήσουμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης, μέσα στο οποίο ο χρήστης μπορεί να αλληλεπιδράσει με το μοντέλο καθώς η προσομοίωση προχωρά. Το επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» μεταμορφώνει ένα μοντέλο προσομοίωσης σε περιβάλλον μάθησης και κατανόησης.



*Σχήμα 5.1. Το Επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» (interface layer) του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (HPS, 2001).*

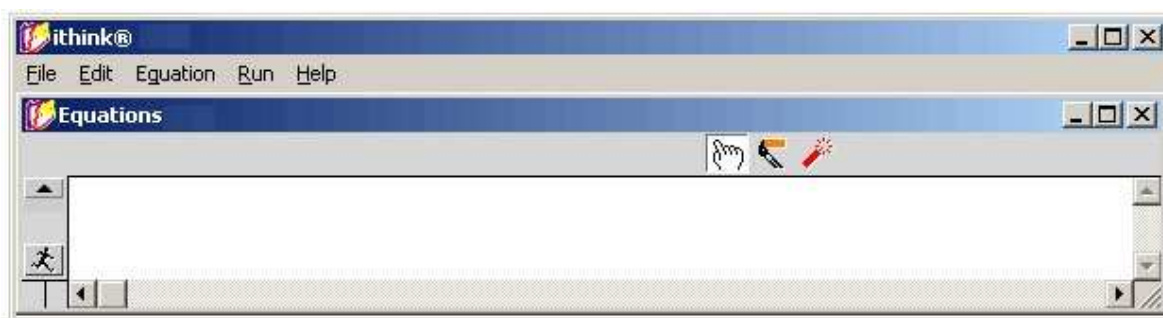
β) **Μέσο επίπεδο ή επίπεδο «χάρτης/μοντέλο»:** Κάτω από το επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» υπάρχει το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (σχήμα 5.2). Το λογισμικό ανοίγει στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο». Αυτό είναι το επίπεδο που αναπτύσσεται η λογική του μοντέλου με τη μορφή χάρτη. Σε αυτό το επίπεδο, θα μετατρέψουμε χάρτες σε μοντέλα που μπορούν να προσομοιωθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Άρα το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» είναι το

μηχανοστάσιο του μοντέλου που δημιουργούμε. Στο επίπεδο αυτό απεικονίζεται στην οθόνη το ακριβές μοντέλο που κατασκευάζουμε.



*Σχήμα 5.2. Το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (map/model) του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (HPS, 2001).*

γ) **Κατώτερο επίπεδο ή επίπεδο «εξισώσεις»:** Τέλος, κάτω από το επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» βρίσκεται το επίπεδο «εξισώσεις» (σχήμα 5.3). Αυτό το επίπεδο περιέχει την λίστα των εξισώσεων που αποτελούν το μοντέλο. Το επίπεδο «εξισώσεις» αποτελεί την βάση του επιπέδου κατασκευής μοντέλου. Παρόλο που σπάνια (εάν ποτέ χρειαστεί) χρειάζεται να ανοίγουμε το επίπεδο «εξισώσεις», καλό είναι να ξέρουμε ότι οι εξισώσεις είναι εύκολα προσβάσιμες.

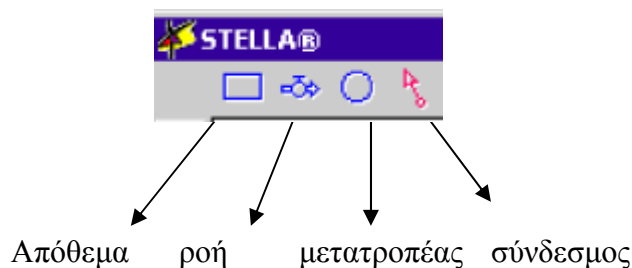


*Σχήμα 5.3. Το επίπεδο «εξισώσεις» (Equations) του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (HPS, 2001).*

## 5.2. Βασικά εργαλεία του προγράμματος.

Ανάμεσα στα βασικά εργαλεία του προγράμματος (σχήμα 5.4) περιλαμβάνονται τα αποθέματα (stocks), οι ροές (flows), οι μετατροπείς (converters) και οι σύνδεσμοι (connectors) (HPS, 2001).





**Σχήμα 5.4.** Βασικά εργαλεία του προγράμματος (HPS, 2001).

### 5.2.1. Αποθέματα (stocks).

Σκοπός των αποθεμάτων (σχήμα 5.5) είναι να συσσωρεύουν ότι εισέρχεται σε αυτά, αφαιρώντας ταυτόχρονα ότι εξέρχεται από αυτά. Τα αποθέματα (stocks) είναι τα εργαλεία εκείνα που συσσωρεύουν ή συγκεντρώνουν «υλικά» (stuff). Με τον όρο «υλικά» εννοούμε, ότι είναι απτό και αντιληπτό, ότι μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και να προσδιοριστεί σε κάθε χρονική στιγμή, αλλά και λιγότερο προσδιορισμένες έννοιες. Τα «υλικά» μπορεί να είναι χαρακτηριστικοί οργανισμοί, άτομα άνθρακα, χρήματα, λίτρα νερού, αλλά και η ευτυχία, η εμπιστοσύνη, η γνώση κτλ. Η δυναμική κίνηση και η αλλαγή των «υλικών» (stuff) βρίσκεται στο κέντρο κάθε συστήματος.



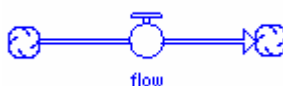
**Σχήμα 5.5.** Το απόθεμα (stock) όπως απεικονίζεται στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA & στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (HPS, 2001).

### 5.2.2. Ροές (flows).

Σκοπός των ροών (flows) (σχήμα 5.6 & 5.7) είναι να προμηθεύουν «υλικά» από ή προς τα αποθέματα. Μπορούμε να θεωρήσουμε τις ροές (flows) ως «αγωγούς» που μεταφέρουν «υλικά» και τον κύκλο που υπάρχει στον αγωγό ως την βαλβίδα που ρυθμίζει τον ρυθμό «ροής» των «υλικών».



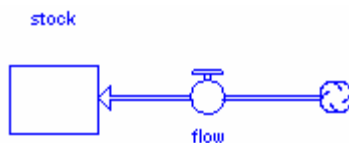
**Σχήμα 5.6.** Η ροή (flow) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA, (HPS, 2001).



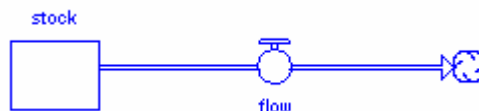
**Σχήμα 5.7.** Η ροή (flow) όπως απεικονίζεται στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (HPS, 2001).

Οι ροές (flows) και τα αποθέματα (stocks) μπορούν να συνδέονται με τους παρακάτω τρόπους:

α) εισροή (inflow):



β) εκροή (outflow):



### 5.2.3. Μετατροπείς (converters).

Σκοπός των μετατροπέων (σχήμα 5.8 & 5.9) είναι να χρησιμοποιούνται ως εργαλεία προσδιορισμού. Οι μετατροπείς (converters) περιέχουν πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής των «υλικών» στο μοντέλο. Προορίζονται για τον προσδιορισμό και την ερμηνεία των πληροφοριών. Ειδικότερα:

- α) προσδιορίζουν σταθερούς όρους
- β) ερμηνεύουν αλγεβρικές σχέσεις
- γ) ερμηνεύουν γραφικές σχέσεις
- δ) καθορίζουν εξωτερικές ποσότητες εισόδου (external inputs).



*Σχήμα 5.8. Ο μετατροπέας (converter) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (HPS, 2001).*



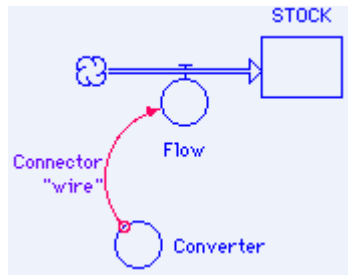
*Σχήμα 5.9. Ο μετατροπέας (converter) όπως απεικονίζεται στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (HPS, 2001).*

### 5.2.4. Σύνδεσμοι (connectors).

Όπως φαίνεται και από το όνομα τους, οι σύνδεσμοι (σχήμα 5.10 & 5.11) έχουν ως σκοπό να συνδέουν τα στοιχεία του μοντέλου. Οι σύνδεσμοι (connectors) είναι τα εργαλεία εκείνα που λειτουργούν όπως τα ηλεκτρικά καλώδια. Μεταφέρουν πληροφορίες από το ένα σημείο στο άλλο, πληροφορίες που μπορεί να είναι μια σταθερή αλγεβρική σχέση, μια γραφική συνάρτηση ή και ο προσδιορισμός της ποσότητας των «υλικών» του μοντέλου. Το πρόγραμμα δεν επιτρέπει την άμεση σύνδεση ενός συνδέσμου με ένα αποθέμα. Ο σωστός τρόπος για να αλλάξουμε την «ποσότητα» ενός αποθέματος είναι μέσω μιας ροής.



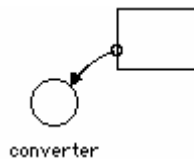
*Σχήμα 5.10. Ο σύνδεσμος (connector) στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (HPS, 2001).*



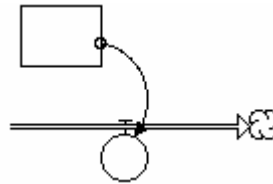
**Σχήμα 5.11.** Ο σύνδεσμος (connector) όπως στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο», συνδυαζόμενος με άλλα βασικά εργαλεία του συστήματος (HPS, 2001).

Παρακάτω μπορούμε να δούμε τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης που υπάρχουν.

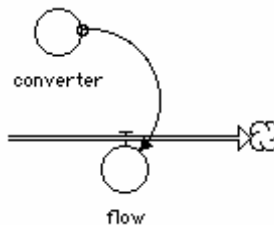
α) Σύνδεση αποθέματος (stock) με μετατροπέα (converter).



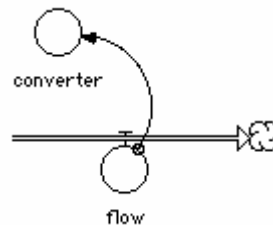
β) Σύνδεση αποθέματος (stock) με ροή (flow).



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



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



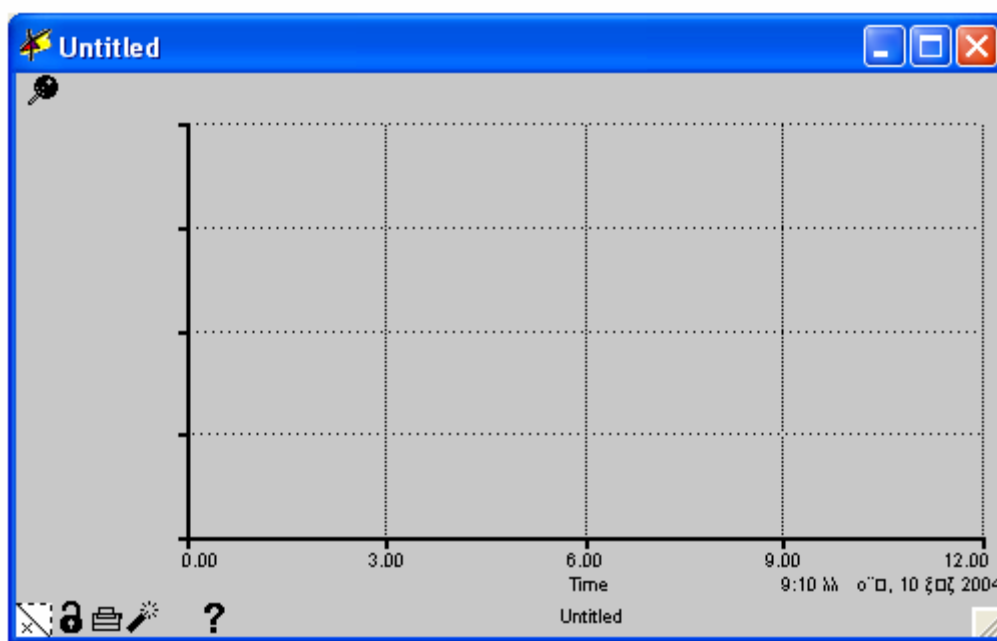
## 5.2.5. Γραφήματα.

Για να δημιουργήσουμε ένα νέο γράφημα απλά επιλέγουμε την εικόνα του γραφήματος (σχήμα 5.12) από το βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA.



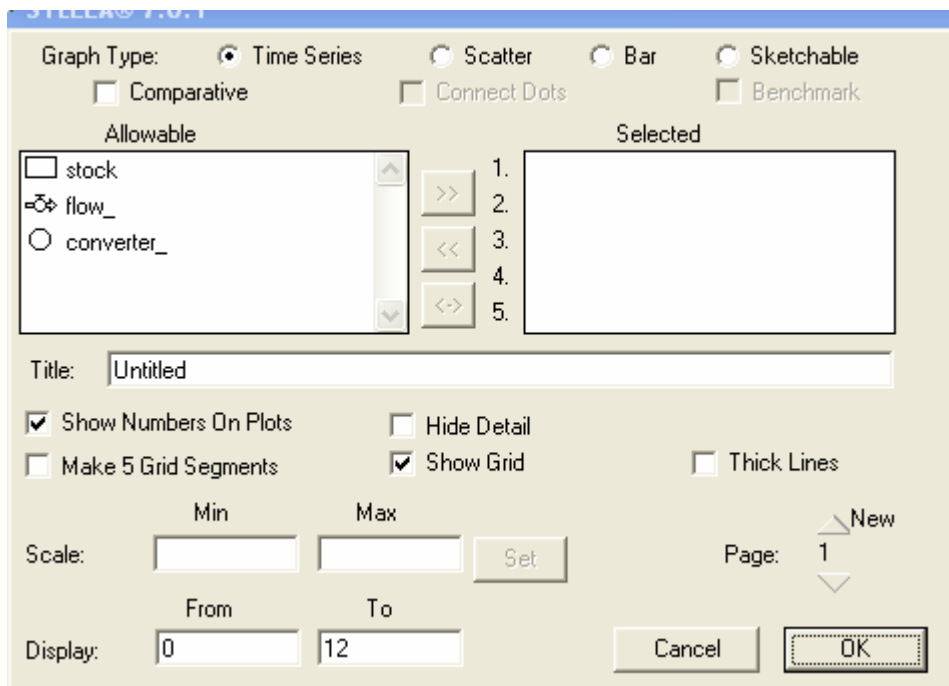
*Σχήμα 5.12. Το γράφημα στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (Habekotte & Lutjeboer, 1995).*

Τότε στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» θα προκύψει το ακόλουθο κενό γράφημα (σχήμα 5.13):



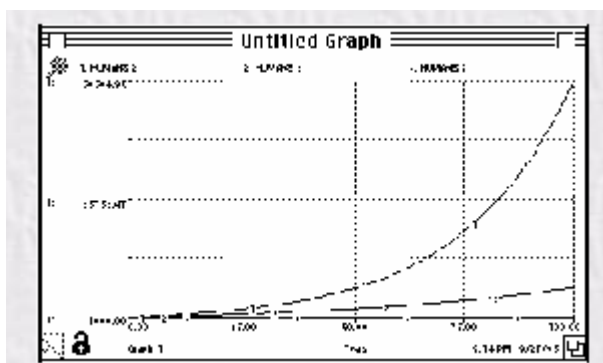
*Σχήμα 5.13. Δημιουργία νέου κενού γραφήματος στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (Habekotte & Lutjeboer, 1995).*

Κάνοντας διπλό «κλικ» με το mouse του υπολογιστή στο κενό γράφημα, ανοίγει ένα νέο παράθυρο (σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.14. Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων γραφήματος (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

Από την λίστα με τα επιτρεπόμενα είδη μπορούμε να επιλέξουμε αυτά, με τα οποία θέλουμε να δημιουργήσουμε γραφικές παραστάσεις. Μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ διαφόρων ειδών γραφημάτων. Σε ένα «διαχωρισμένο γράφημα» μια μεταβλητή σχεδιάζεται έναντι άλλης μεταβλητής. Σε γραφήματα χρόνου οι μεταβλητές σχεδιάζονται έναντι του χρόνου. Όπως συμβαίνει και με τους πίνακες μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις ώστε να δούμε τυχόν διαφορές μεταξύ διαφορετικών προσομοιώσεων. Ένα συγκριτικό γράφημα (σχήμα 5.15) αποτυπώνει τα αποτελέσματα δύο ή και περισσότερων μοντέλων που πραγματοποιούνται στους ίδιους άξονες. Πολλαπλές επιλογές της ίδιας «διαχωρισμένης» σχέσης μπορούν να αποτυπωθούν.



Σχήμα 5.15. Συγκριτικό γράφημα (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

### 5.2.6. Πίνακες.

Οι πίνακες (σχήμα 5.16) επιτρέπουν στον χειριστή του μοντέλου να κατασκευάσει σύνθετα και πολυποίκιλα σετ μεταφράζοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου.



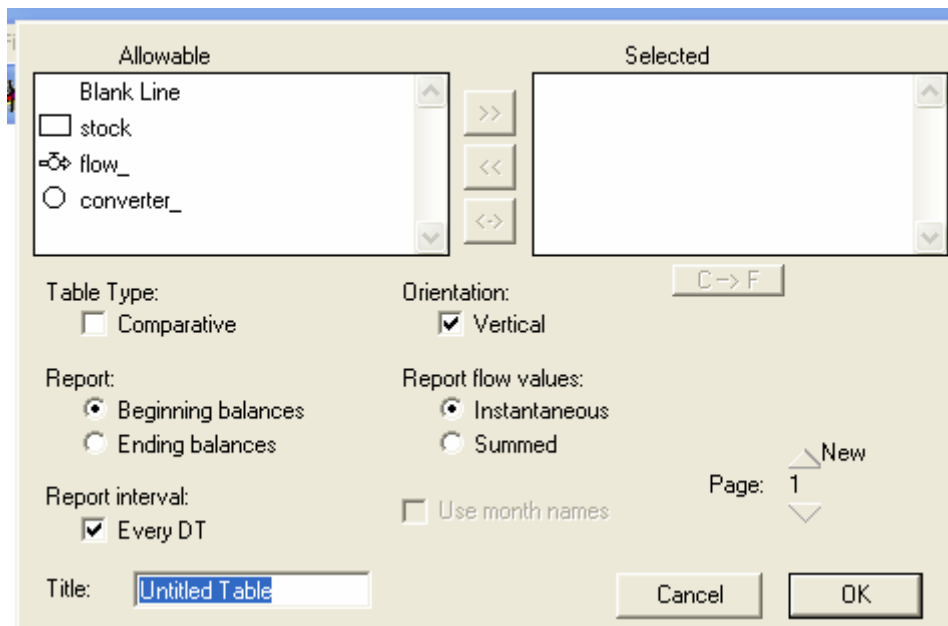
**Σχήμα 5.16.** Ο πίνακας στο βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

Για να επιλέξουμε έναν νέο πίνακα απλά επιλέγουμε την εικόνα του πίνακα από το βασικό μενού εργαλείων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA. Εάν το κάνουμε αυτό θα δούμε, ότι στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» θα προκύψει ο ακόλουθος κενός πίνακας (σχήμα 5.17).

Time						

**Σχήμα 5.17.** Δημιουργία ενός νέου κενού πίνακα στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

Κάνοντας διπλό «κλικ» με το mouse του υπολογιστή στο κενό πίνακα προκύπτει το ακόλουθο παράθυρο (σχήμα 5.18).

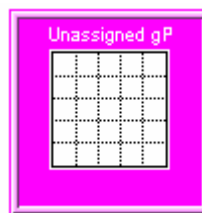


**Σχήμα 5.18.** Παράθυρο επιλογής ιδιοτήτων πίνακα (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

Ο προεπιλεγμένος πίνακας έχει κατακόρυφο σχήμα όπου απεικονίζεται κάθε τιμή από τις διαφορετικές επιτρεπόμενες μεταβλητές. Ένας συγκριτικός ωστόσο πίνακας φανερώνει μόνο μια επιτρεπόμενη μεταβλητή και χρησιμεύει για να συγκρίνει τα αποτελέσματα διαφορετικών προσομοιώσεων.

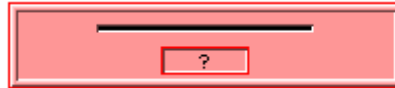
### 5.2.7. Συσκευές Εισαγωγής Δεδομένων.

Στο επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» υπάρχει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο που βοηθά στον αρχικό σχεδιασμό του μοντέλου. Λέγεται γραφική συσκευή εισαγωγής δεδομένων (graphical input device) (σχήμα 5.19) και αποτυπώνει γραφικά, δεδομένα και πληροφορίες από διάφορες μεταβλητές του μοντέλου.



**Σχήμα 5.19.** Η γραφική συσκευή εισαγωγής δεδομένων όπως απεικονίζεται στο επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» του μοντέλου (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

Εκτός από την γραφική συσκευή εισαγωγής δεδομένων ένα άλλο πολύ χρήσιμο εργαλείο είναι η συσκευή εισαγωγής δεδομένων με την μορφή κλίμακας (slider input device) (σχήμα 5.20). Η συσκευή αυτή αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές που υπάρχουν στο μοντέλο με κλίμακα τέτοια ώστε να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που ορίζονται από την κλίμακα.



**Σχήμα 5.20.** Η συσκευή εισαγωγής δεδομένων με την μορφή κλίμακας (slider input device) όπως απεικονίζεται στο επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» του προγράμματος προσομοίωσης STELLA (Habekotte & Lutjeboer, 1995).

### 5.3. Εκκίνηση Προσομοίωσης Μοντέλου.

Για την εκκίνηση του μοντέλου και την προβολή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο τρόποι:

α) Στο επίπεδο «χάρτης/μοντέλο» χρησιμοποιώντας το ακόλουθο μενού (Habekotte & Lutjeboer, 1995).



β) Στο επίπεδο «περιβάλλον λειτουργίας» του μοντέλου με το ακόλουθο μενού (Habekotte & Lutjeboer, 1995).





## **Κεφάλαιο 6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ (ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ)**

### **6.1. Εισαγωγή - Σκοπός του μοντέλου.**

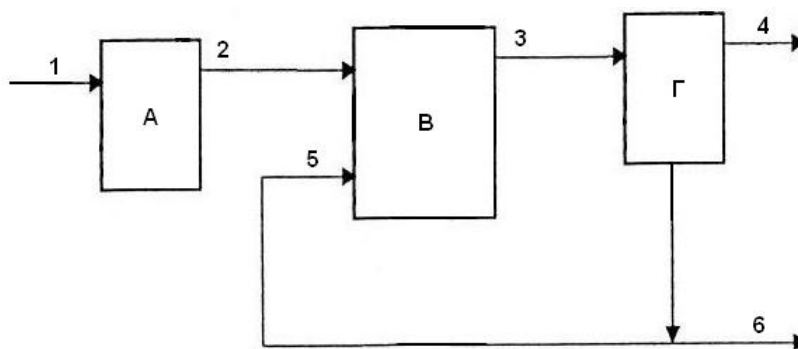
Το μοντέλο που αναπτύσσεται εδώ είναι ένα μαθηματικό μοντέλο των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια δεξαμενή αερισμού μιας ΕΕΑΛ. Ο σκοπός του μοντέλου είναι να προσομοιώσει τις λειτουργίες και τις χημικές διαδικασίες – μετατροπές που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Πιο συγκεκριμένα παρακολουθήσαμε τη συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος και της ετερότροφης βιομάζας. Αυτό το μοντέλο βασίστηκε στο βιβλίο “Activated Sludge Model No. 1” (Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No.1) που έγραψαν οι W. Gujer και M. Henze (1987). Επιπλέον η εφαρμογή του βασίστηκε στην βιβλιογραφία του προγράμματος εκπαιδευτικής προσομοίωσης WAZUSIM (1995). Μια πραγματική εγκατάσταση λυμάτων περιλαμβάνει μια σειρά διασυνδεδεμένων δεξαμενών αερισμού και ανοξικών δεξαμενών, στις οποίες λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες διάσπασης του COD, της νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Το «Μοντέλο Ενεργού Ιλύος No.1» περιγράφει αυτές ακριβώς τις διαδικασίες της διάσπασης του βιοχημικού COD, της νιτροποίησης και απονιτροποίησης σε μια σειρά διασυνδεδεμένων δεξαμενών αερισμού και ανοξικών δεξαμενών. Το μοντέλο διαχωρίζει ανάμεσα σε μια σειρά ειδών υποστρώματος και βιομάζας. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία περιγράφει μόνο τη διάσπαση του COD ενός είδους υποστρώματος από έναν τύπο βιομάζας σε μια δεξαμενή αερισμού. Έτσι το μοντέλο αυτό λειτουργεί σαν εισαγωγή σε πιο πολύπλοκα μοντέλα ενεργού ιλύος. Η ορολογία και τα σύμβολα (notation) είναι κοινά στη σχετική με το θέμα αυτό βιβλιογραφία.

Το μοντέλο είναι εξαιρετικά απλουστευμένο και αυτό έχει σαν θετικές συνέπειες το ότι μπορεί:

- α) να επιτευχθεί εύκολα.
- β) να προσαρμοστεί εύκολα σε κλίμακες άλλων σύνθετων οργανικών χημικών ενώσεων.
- γ) να αναγνωρίσει βασικές αρχές και πεδία εφαρμογών ειδικότερων και πολύπλοκότερων μοντέλων.
- δ) να αποφύγει την λανθασμένη εκτίμηση τυχόν αποτελεσμάτων (κάτι που μπορεί να συμβεί σε ένα περισσότερο πολύπλοκο μοντέλο) και
- ε) να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση παρόμοιων συνθηκών με σύνθετες οργανικές χημικές ενώσεις.

### **6.2. Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο.**

Η αποσύνθεση οργανικής ύλης-συστατικών από μικροοργανισμούς είναι η βάση της επεξεργασίας ενεργού ιλύος στις δεξαμενές αερισμού των σταθμών-εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Για την εφαρμογή του μοντέλου λήφθηκε υπόψη η απλοποιημένη επεξεργασία λυμάτων που περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1.** Σχηματική αναπαράσταση μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων ενεργού ιλύος. *A= πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης, B= δεξαμενή αερισμού, Γ= δευτεροβάθμια 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 (A). Ο σκοπός της επεξεργασίας μέσω καθίζησης είναι 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 (B). Η δεξαμενή αερισμού περιέχει ομάδες βακτηριδίων, την ενεργό ιλύ. Μια μηχανική διαδικασία διοχετεύει αέρα μέσα στη δεξαμενή. Αυτό διατηρεί τις ομάδες βακτηριδίων σταθεροποιημένες. Ο αέρας επίσης παρέχει το οξυγόνο που χρειάζονται τα βακτηρίδια της ενεργού ιλύος για να αναπτυχθούν. Τα βακτηρίδια μειώνουν τη συγκέντρωση των οργανικών συστατικών του νερού, μετρημένη σε χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD). Τα βακτηρίδια 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 βακτηρίδια σχηματίζουν ομάδες με ειδικό βάρος ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό του νερού.

Μετά την επεξεργασία στη δεξαμενή αερισμού τα υγρά απόβλητα (3) ρέουν προς τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης (Γ). Στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης οι ομάδες των βακτηριδίων της ενεργού ιλύος κατακάθονται στον πυθμένα της δεξαμενής. Δευτεροβάθμια επεξεργασμένο-καθαρισμένο 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 δευτεροβάθμια 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 βακτηρίδια για να συνεχιστεί η διαδικασία. Για να αποφευχθεί το «ξέπλυμα» της ενεργού ιλύος πραγματοποιείται η ανακυκλοφορία της. Έτσι ένα τμήμα της ενεργού ιλύος που έχει κατακαθίσει στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης ανακυκλοφορεί προς τη δεξαμενή αερισμού, διατηρώντας τη διαδικασία ενεργού ιλύος. Η ιλύς αυτή ονομάζεται ιλύς ανακυκλοφορίας (5). Η διαδικασία της ανακυκλοφορίας δεν ελήφθη υπόψη στην εφαρμογή του μοντέλου της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Η εισροή θρεπτικών μέσω νέων λυμάτων προκαλεί την αύξηση των βακτηριδίων στη δεξαμενή αερισμού. Γι' αυτόν το λόγο δεν επιστρέφεται όλη η ιλύς, που καθιζάνει στη δευτεροβάθμια 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 δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας ιλύος.

### 6.3. Παραδοχές και περιορισμοί του μοντέλου.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τις ακόλουθες απλοποιήσεις και υποθέσεις:

- ✓ 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 στο μαθηματικό αυτό μοντέλο η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μια σταθερά. Πιο ρεαλιστικά και πολύπλοκα μοντέλα ενεργού ιλύος περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση του οξυγόνου σαν μεταβλητή (state variable).
- ✓ Δεν μοντελοποιούμε τη ροή της ιλύος ανακυκλοφορίας στη δεξαμενή αερισμού σαν εισροή, αλλά δίνουμε στην ιλύ την επονομαζόμενη «ηλικία ιλύος». Η μέση ηλικία της ιλύος - μια παράμετρος του συστήματος - αντιπροσωπεύει ταυτόχρονα και την εισροή και την εκροή ιλύος. Το πρώτο (εισροή ιλύος) αναφέρεται στην εισροή από τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, ενώ το δεύτερο (εκροή ιλύος) στην εκροή προς τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Αυτή η απλοποίηση κάνει το μοντέλο της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης περιττό.
- ✓ 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 του Monod (συνώνυμη με το “Michael Menten Kinetics”, σχήμα 3.4). Δεν μοντελοποιούμε την κατανάλωση του οξυγόνου αυτής της διαδικασίας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θεωρούμε ότι ένας μηχανισμός ελέγχου του αερισμού διατηρεί τη συγκέντρωση του οξυγόνου σταθερή.
- ✓ Η διάσπαση-λύση (Lysis) των κυττάρων είναι η διαδικασία, η οποία μετατρέπει (returns) την ετερότροφη βιομάζα σε/στο υπόστρωμα με χημική αντίδραση με κινητική πρώτης τάξης (first order chemical reaction kinetics). Αυτή η διαδικασία δεν καταναλώνει οξυγόνο.
- ✓ Η συγκέντρωση του εισρέοντος (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος είναι σταθερή και ίση με  $540 \text{ gr/m}^3$  σε όλες τις εφαρμογές του προγράμματος εκτός από την εφαρμογή που ορίζεται ως μεταβλητή η  $S_{in}$  (παράγραφοι 7.1.5 & 8.5).

### 6.4. Εφαρμογή του μοντέλου στο πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA.

Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από τα εξής τμήματα:

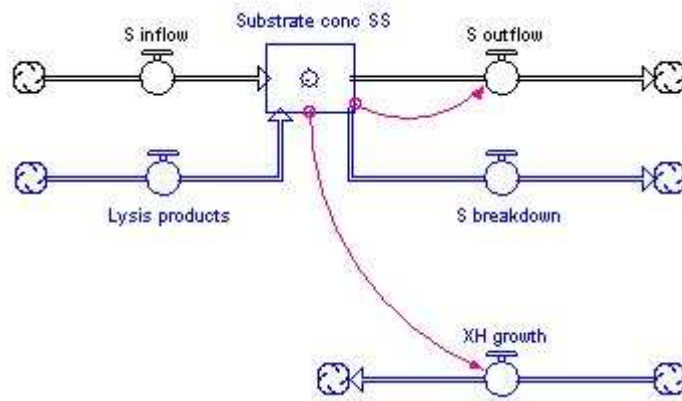
1. Δύο μεταβλητές κατάστασης (state variables).
2. Τέσσερις διαδικασίες μετατροπής.
3. Τρεις διαδικασίες μεταφοράς.
4. Την επίδραση της θερμοκρασίας.
5. Την αλληλεπίδραση του ρυθμού διάσπασης βιομάζας (Lysis rate bH), του συντελεστή Y και της ηλικίας ιλύος.

Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση του κάθε τμήματος.

#### 1. Το μοντέλο προσομοίωσης περιέχει δυο μεταβλητές κατάστασης (state variables):

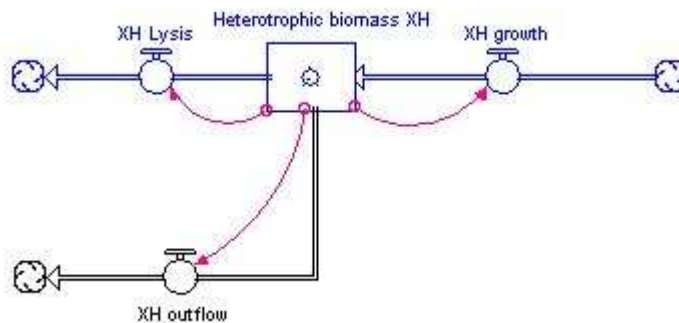
##### 1.1. Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα (Substrate conc SS) με συγκέντρωση $S_s$ [ $\text{g}_{\text{COD}}/\text{m}^3$ ].

Η συγκέντρωση του υποστρώματος αυξάνεται (α) από την εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από την δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης και (β) από τα παράγωγα της διάσπασης της ετερότροφης βιομάζας (μετατροπή της βιομάζας σε υπόστρωμα) και μειώνεται (α) από την εκροή υποστρώματος προς την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης και (β) από την αποδόμηση του ίδιου του υποστρώματος. Τέλος το διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα επηρεάζει την αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας και (β) την εκροή του υποστρώματος προς τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης (σχήμα 6.2).



**Σχήμα 6.2.** Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα  $S_s$  (Substrate conc  $SS$ ).

**1.2.** Ετερότροφη βιομάζα (Heterotrophic biomass  $X_H$ ) με συγκέντρωση  $X_H$  [ $\text{gCOD}/\text{m}^3$ ]. Η ετερότροφη βιομάζα είναι πανομοιότυπη με την ενεργό ιλύ. Η συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας αυξάνεται από (α) την κατανάλωση οργανικού υποστρώματος και μειώνεται εξαιτίας (α) της εκροής ιλύος και (β) της διάσπασης (lysis) της ετερότροφης βιομάζας ( $X_H$  Lysis) (σχήμα 6.3). Η συγκέντρωση της βιομάζας επηρεάζει την τιμή και των τριών αυτών παραμέτρων.

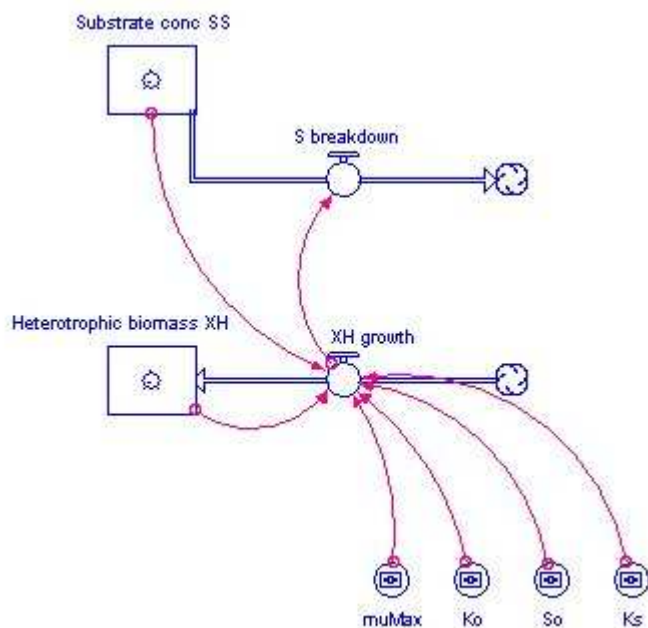


**Σχήμα 6.3.** Ετερότροφη βιομάζα  $X_H$  (Heterotrophic biomass  $X_H$ ).

## 2. Το μοντέλο περιέχει τέσσερις διαδικασίες μετατροπής:

**2.1.** Την αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας με κατανάλωση οργανικού υποστρώματος ( $X_H$  growth). Η κινητική των αντιδράσεων (reaction kinetics) της αύξησης της ετερότροφης βιομάζας είναι τύπου Michaelis Menten όσον αφορά το υπόστρωμα αλλά και το οξυγόνο. Αφού ο αερισμός διατηρεί τη συγκέντρωση του οξυγόνου σταθερή, το μοντέλο αγνοεί την κατανάλωση οξυγόνου λόγω αναπνοής και αύξησης της ετερότροφης βιομάζας. Μια διαφορική εξίσωση απώλειας οξυγόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιθανές επεκτάσεις του μοντέλου που περιλαμβάνουν το οξυγόνο σαν μια μεταβλητή παράμετρο.

Η αύξηση της βιομάζας (αύξηση της συγκέντρωσης της βιομάζας) εξαρτάται από (α) το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης βιομάζας (Maximum growth rate ή  $\mu_{\text{Max}}$  ή  $\mu_{\text{max}}$ ), (β) τη σταθερά κορεσμού  $K_o$  (Michaelis Menten saturation constant for oxygen), (γ) τη συγκέντρωση οξυγόνου ( $S_o$ ), (δ) τη σταθερά κορεσμού  $K_s$  (Saturation constant for substrate), και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την εκάστοτε συγκέντρωση (ε) του υποστρώματος και (στ) της βιομάζας, ενώ επηρεάζει την αποδόμηση του υποστρώματος (μείωση του υποστρώματος) (σχήμα 6.4).



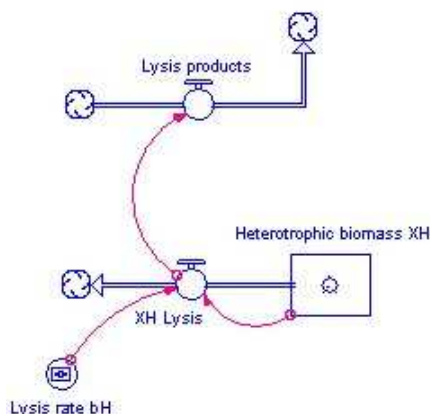
**Σχήμα 6.4.** Αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας (XH growth).

**2.2.** Τη διάσπαση-λύση (lysis) της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis). Όπως προαναφέρθηκε η ετερότροφη βιομάζα δεν φεύγει μόνο από τη δεξαμενή αερισμού μέσω μεταφοράς προς και από τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, αλλά και τμήμα της επιστρέφει στο υπόστρωμα μέσω της διαδικασίας της διάσπασης-λύσης (lysis). Η διάσπαση-λύση συνοψίζει όλες τις διαδικασίες που μετατρέπουν την ετερότροφη βιομάζα σε υπόστρωμα. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τη σήψη, τη διάσπαση-λύση (lysis), την υδρόλυση, τη «θήρευση» (predation), και την ενδογενή αναπνοή.

Στο μοντέλο η διαδικασία αυτή θεωρήθηκε σαν μια χημική αντίδραση με κινητική πρώτης τάξης (first order kinetics):

$$b_H = \text{σταθερά ρυθμού διάσπασης (σήψης) ετερότροφης βιομάζας [1/ημέρα]}$$

Η διάσπαση-λύση της βιομάζας μειώνει την συγκέντρωση της βιομάζας, και ταυτόχρονα παράγει τα προϊόντα διάσπασης (lysis products), ενώ εξαρτάται από τον ρυθμό διάσπασης (Lysis rate  $b_H$ ) και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την εκάστοτε συγκέντρωση της βιομάζας (σχήμα 6.5).

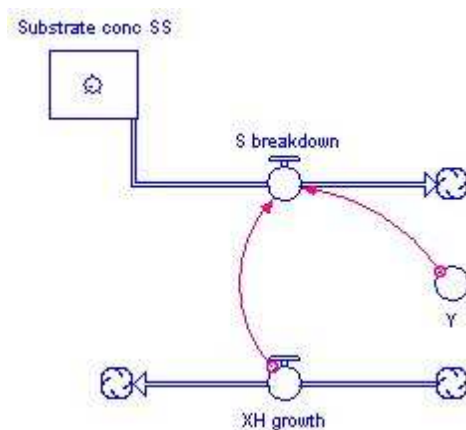


**Σχήμα 6.5.** Διάσπαση-αποδόμηση της ετερότροφης βιομάζας (XH Lysis).

**2.3.** Τη διάσπαση-αποδόμηση του υποστρώματος από την ετερότροφη βιομάζα (S breakdown). Η αύξηση της ετερότροφης βιομάζας γίνεται εις βάρος του οξυγόνου και του

υποστρώματος. Παρόλα αυτά η ετερότροφη βιομάζα χρησιμοποιεί τμήμα του υποστρώματος για αναπνοή και διατήρηση. Για αυτό το λόγο μια μονάδα παραγωγής ετερότροφης βιομάζας κοστίζει περισσότερο από μια μονάδα υποστρώματος. Ο εμπειρικός συντελεστής ετερότροφης παραγωγής (empirical heterotrophic yield coefficient)  $Y_H$  δείχνει την απόδοση της μετατροπής του υποστρώματος σε ετερότροφη βιομάζα [ $M_{COD,H} / M_{COD,S}$ ].

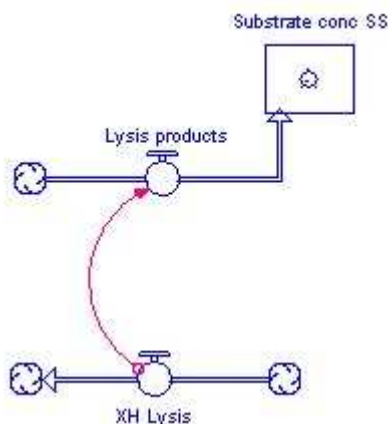
Η αποδόμηση του υποστρώματος (μείωση της συγκέντρωσης του υποστρώματος) εξαρτάται (α) από τον εμπειρικό συντελεστή ετερότροφης παραγωγής (empirical heterotrophic yield coefficient)  $Y_H$  και (β) από την αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 6.6).



**Σχήμα 6.6.** Αποδόμηση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος (*S breakdown*).

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

Τα προϊόντα της διάσπασης της βιομάζας αυξάνουν τη συγκέντρωση του υποστρώματος και εξαρτώνται καθαρά από τη διάσπαση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 6.7).



**Σχήμα 6.7.** Αύξηση του διαλυμένου οργανικού υποστρώματος εξαιτίας των προϊόντων διάσπασης-λύσης (*Lysis products*).

### 3. Το μοντέλο περιέχει τρεις διαδικασίες μεταφοράς:

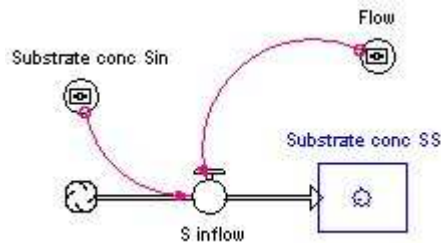
**3.1.** Εισροή υποστρώματος (λυμάτων) από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης (*S inflow*). Το υπόστρωμα στη δεξαμενή αερισμού έχει συγκέντρωση  $S_s$ . Τα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή αερισμού με συγκεκριμένη ροή  $f$  από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Το υπόστρωμα εισέρχεται στο σύστημα μέσω της εισροής λυμάτων με μια υποθετικά σταθερή συγκέντρωση  $S_{in}$ . Δηλαδή έχουμε:

$S_S$  = συγκέντρωση υποστρώματος στη δεξαμενή αερισμού [ $g_{COD}/m^3$ ]

$S_{in}$  = συγκέντρωση υποστρώματος στα εισρέοντα υγρά απόβλητα [ $g_{COD}/m^3$ ]

$f$  = ρυθμός εισροής και εκροής υγρών αποβλήτων [ $m^3/ημέρα$ ]

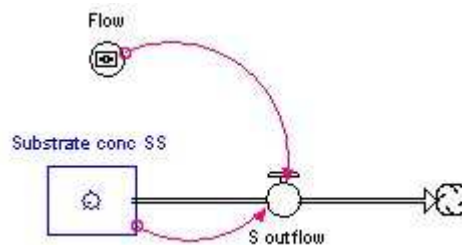
Η εισροή υποστρώματος (μέσω των λυμάτων) αυξάνει φυσικά τη συγκέντρωση του υποστρώματος και εξαρτάται από τη ροή (παροχή) των εισρέοντων λυμάτων και από τη συγκέντρωση του υποστρώματος στα εισρέοντα λύματα (Substrate conc  $S_{in}$ ) (σχήμα 6.8).



**Σχήμα 6.8.** Εισροή υποστρώματος (λυμάτων) ( $S$  inflow).

**3.2.** Εκροή υποστρώματος στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης ( $S$  outflow). Τα λύματα εξέρχονται από τη δεξαμενή αερισμού προς την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης με την ίδια ροή  $f$ .

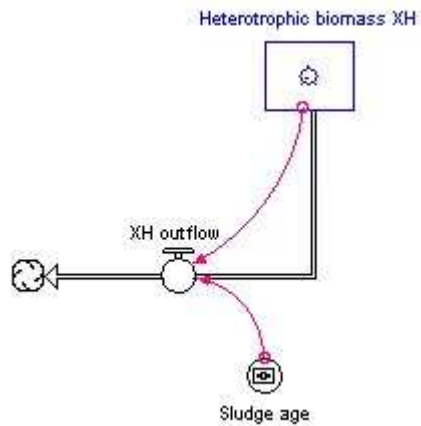
Η εκροή υποστρώματος (μείωση της συγκέντρωσης του υποστρώματος) εξαρτάται από τη ροή (παροχή) των εκρέοντων λυμάτων, ενώ υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την εκάστοτε συγκέντρωση του υποστρώματος στην δεξαμενή αερισμού (σχήμα 6.9).



**Σχήμα 6.9.** Εκροή υποστρώματος ( $S$  outflow).

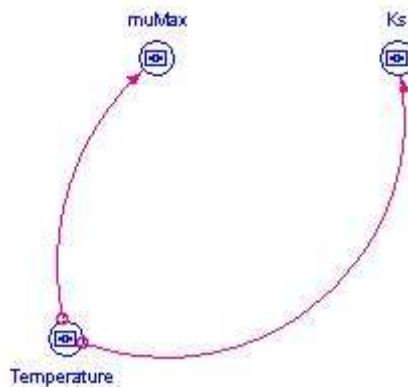
**3.3.** Εκροή ιλύος ( $XH$  outflow). Τμήμα της ιλύος εξέρχεται του συστήματος σαν περίσσεια ιλύος (waste sludge).

Η εκροή ιλύος (μείωση της συγκέντρωσης της βιομάζας) εξαρτάται από την ηλικία της ιλύος (σχήμα 6.10) και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την εκάστοτε συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού. Η ηλικία ιλύος είναι ο μέσος χρόνος σε ημέρες της ιλύος στη δεξαμενή αερισμού.



**Σχήμα 6.10.** Εκροή ιλύος (XH outflow).

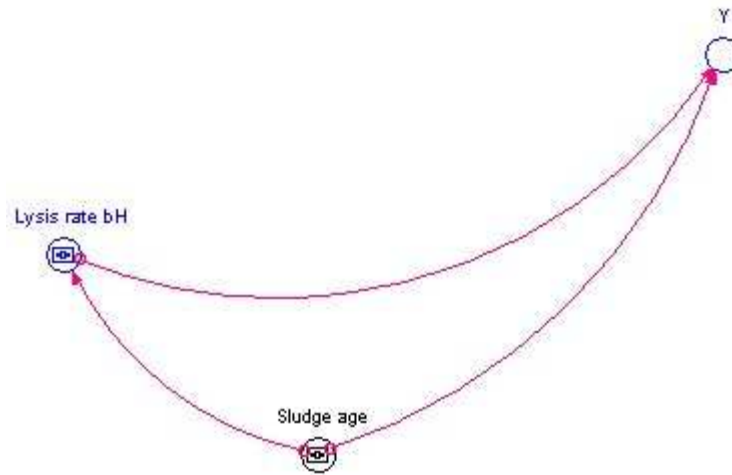
**4. Επίσης το μοντέλο επηρεάζεται από την θερμοκρασία.** Από τη θερμοκρασία εξαρτάται (α) ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας (Maximum growth rate ή  $\mu_{max}$  ή  $\mu_{max}$ ) και (β) Η σταθερά κορεσμού υποστρώματος  $K_s$  (Saturation constant for substrate) (σχήμα 6.11).



**Σχήμα 6.11.** Σχέση θερμοκρασίας (Temperature) με  $\mu_{max}$  ( $\mu_{max}$ ) και  $K_s$ .

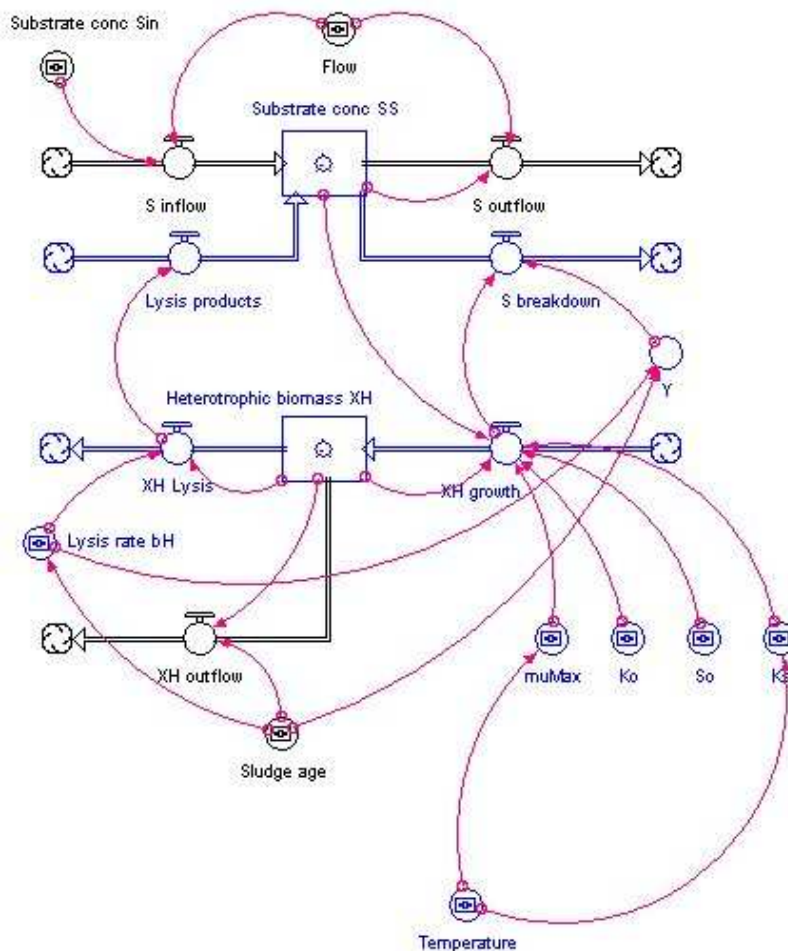
**5. Τέλος για να ολοκληρωθεί το μοντέλο πρέπει να προσθέσουμε την αλληλεπίδραση του ρυθμού διάσπασης βιομάζας (Lysis rate  $b_H$ ), του συντελεστή  $Y$  και της ηλικίας ιλύος. Η ηλικία ιλύος επηρεάζει το ρυθμό διάσπασης βιομάζας και τον συντελεστή  $Y$ , ενώ ο ρυθμός διάσπασης βιομάζας επηρεάζει το συντελεστή  $Y$  (σχήμα 6.12).**





**Σχήμα 6.12.** Σχέση μεταξύ ρυθμού διάσπασης βιομάζας (Lysis rate  $b_H$ ) – συντελεστή  $Y$  – ηλικίας ιλύος (sludge age).

Το σχήμα 6.13 συνοψίζει το αντίστοιχο μοντέλο που παράγεται από τα παραπάνω και έχει σχεδιαστεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA.



**Σχήμα 6.13.** Το ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης στο επίπεδο «χάρτης-μοντέλο» του προγράμματος προσομοίωσης STELLA.

## 6.5. Εξισώσεις του μοντέλου.

Οι εξισώσεις αλλά και όλοι οι αριθμητικοί παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί και που αντιπροσωπεύουν κάθε απόθεμα, κάθε ροή και κάθε μετατροπέα απεικονίζονται στο επίπεδο των εξισώσεων του προγράμματος προσομοίωσης STELLA.

### 6.5.1. Διαφορικές Εξισώσεις.

Οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι οι εξής:

➤ **Συγκέντρωση Ετερότροφης Βιομάζας:**

$$Heterotrophic\_biomass\_XH(t) = Heterotrophic\_biomass\_XH(t - dt) + (XH\_growth - XH\_Lysis - XH\_outflow) * dt$$

➤ **Συγκέντρωση Διαλυμένου Οργανικού Υποστρώματος:**

$$Substrate\_conc\_SS(t) = Substrate\_conc\_SS(t - dt) + (S\_inflow + Lysis\_products - S\_outflow - S\_breakdown) * dt$$

(Ο χρόνος dt έχει οριστεί από το πρόγραμμα ως ο αρχικός χρόνος  $t_0$ ).

### 6.5.2. Λοιπές Εξισώσεις.

➤ **Αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας (XH\_growth):**

$$XH\_growth = \mu_{Max} * (Substrate\_conc\_SS / (K_s + Substrate\_conc\_SS)) * (S_o / (K_o + S_o)) * Heterotrophic\_biomass\_XH$$

➤ **Διάσπαση (lysis) της ετερότροφης βιομάζας (XH\_Lysis):**

$$XH\_Lysis = Lysis\_rate\_bH * Heterotrophic\_biomass\_XH$$

➤ **Εκροή ιλύος (XH\_outflow):**

$$XH\_outflow = 1/Sludge\_age * Heterotrophic\_biomass\_XH$$

➤ **Εισροή υποστρώματος (μέσω των λυμάτων) (S\_inflow):**

$$S\_inflow = Flow * Substrate\_conc\_Sin$$

➤ **Προϊόντα από τη διάσπαση-λύση της ετερότροφης βιομάζας (Lysis\_products):**

$$Lysis\_products = XH\_Lysis$$

➤ **Εκροή υποστρώματος (μέσω των λυμάτων) (S\_outflow):**

$$S\_outflow = Flow * Substrate\_conc\_SS$$

➤ **Διάσπαση-αποδόμηση υποστρώματος (S\_breakdown):**

$$S\_breakdown = (1/Y) * XH\_growth$$

➤ **Συντελεστής  $K_s$  (Saturation constant for substrate):**

$$K_s = 40 * 0.96^{(Temperature-20)}$$

➤ **Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας (Maximum growth rate -  $\mu_{Max}$ ):**

$$\mu_{Max} = 3 * 1.028^{(Temperature-20)}$$

➤ **Ρυθμός διάσπασης-λύσης (Lysis\_rate\_BH):**

$$Lysis\_rate\_bH = 0.1 * 0.75^{(1.44 * LOGN(Sludge\_age))}$$

➤ **Συντελεστής Y:**

$$Y = 0.60 / (1 + Lysis\_rate\_bH * Sludge\_age)$$

### 6.5.3. Παράμετροι που εμείς ορίζουμε.

➤ **Αρχική συγκέντρωση Ετερότροφης Βιομάζας:**

$$INIT\ Heterotrophic\_biomass\_XH = 1.000\ gr/m^3$$

➤ **Αρχική συγκέντρωση Υποστρώματος:**

$$INIT\ Substrate\_conc\_SS = 540\ gr/m^3$$

➤ **Ροή:**

$$Flow = 5\ m^3 / \eta\mu\epsilon\rho\alpha.$$

- **Συντελεστής κορεσμού  $K_o$ :**  
 $K_o = 0,1 \text{ gr/m}^3$ .
- **Ηλικία Ιλύος:**  
 $Sludge\_age = 4 \text{ ημέρες}$ .
- **Συγκέντρωση οξυγόνου:**  
 $S_o = \text{gr/m}^3$ .
- **Συγκέντρωση εισερχόμενου στη δεξαμενή αερισμού υποστρώματος:**  
 $Substrate\_conc\_Sin$
- **Θερμοκρασία:**  
 $Temperature = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Στο σχήμα 6.14 φαίνεται το σύνολο των εξισώσεων, όπως ορίστηκαν στο επίπεδο «εξισώσεις» στο πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA.

```

 Heterotrophic_biomass_XH(t) = Heterotrophic_biomass_XH(t- dt) + (XH_growth - XH_Lysis - XH_outflow) * dt
INIT Heterotrophic_biomass_XH = 1000
INFLOWS:
  ➤ XH_growth = muMax*(Substrate_conc_SS/(Ks+Substrate_conc_SS))*(So/(Ko+So))
    *Heterotrophic_biomass_XH
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 - S_outflow - S_breakdown) * dt
INIT Substrate_conc_SS = 540
INFLOWS:
  ➤ S_inflow = Flow*Substrate_conc_Sin
  ➤ Lysis_products = XH_Lysis
OUTFLOWS:
  ➤ S_outflow = Flow*Substrate_conc_SS
  ➤ S_breakdown = (1/Y)*XH_growth
 Flow = 5
 Ko = 0.1
 Ks = 40*0.96^(Temperature-20)
 Lysis_rate_bH = 0.1*0.75^(1.44*LOGN(Sludge_age))
 muMax = 3*1.028^(Temperature-20)
 Sludge_age = 4
 So = 2
 Substrate_conc_Sin = 540
 Temperature = 15
 Y = 0.60/(1+Lysis_rate_bH*Sludge_age)

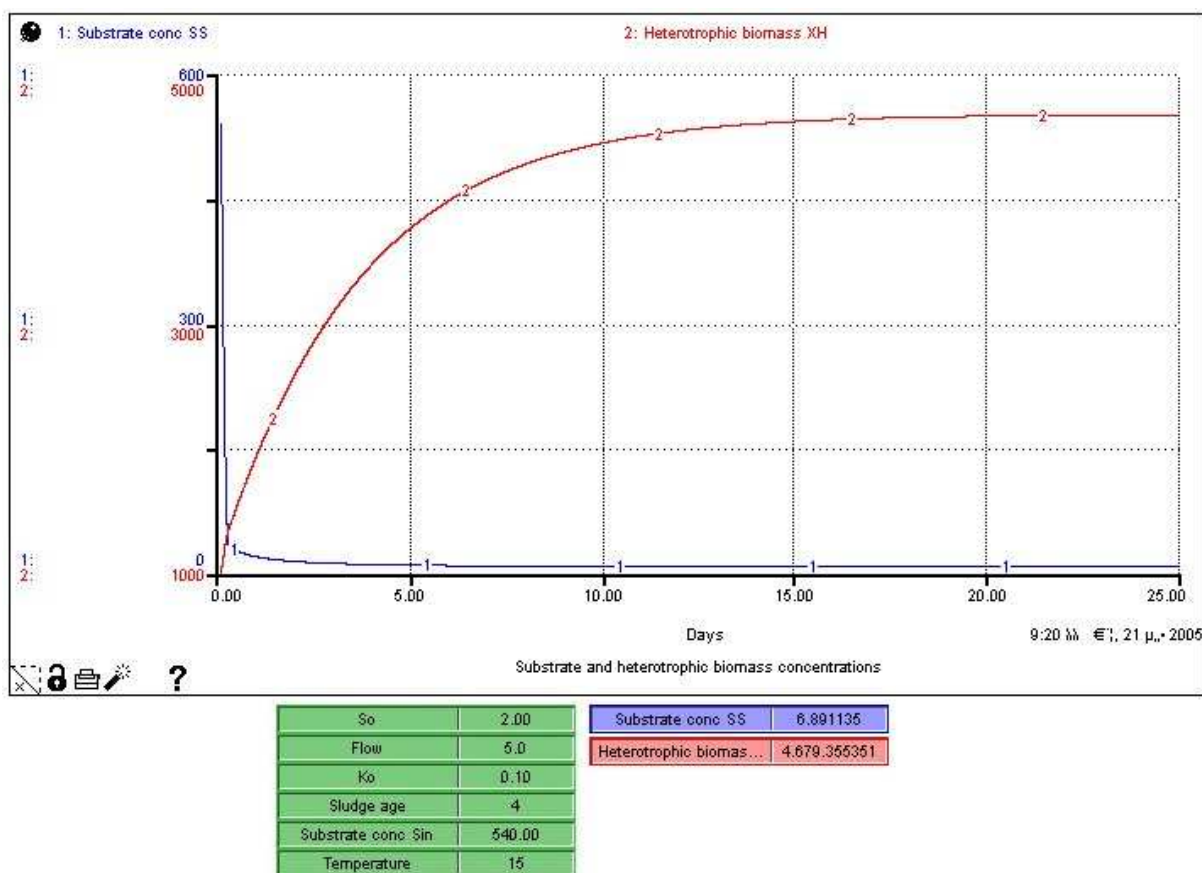
```

**Σχήμα 6.14.** Το επίπεδο «εξισώσεις» του μοντέλου στο πρόγραμμα προσομοίωσης STELLA.

## Κεφάλαιο 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για την εξέταση της προσομοίωσης του μοντέλου ορίσαμε τα εξής αρχικά δεδομένα στο σύστημα (σχήμα 7.1):

- Αρχική ετερότροφη βιομάζα =  $1.000 \text{ gr/m}^3$
- Αρχικό υπόστρωμα στη δεξαμενή αερισμού =  $540 \text{ gr/m}^3$
- Συγκέντρωση υποστρώματος εισροής =  $540 \text{ gr/m}^3$
- Συγκέντρωση οξυγόνου =  $2 \text{ gr/m}^3$
- Ροή =  $5 \text{ m}^3/\text{day}$
- Ηλικία λάσπης = 4 ημέρες
- Σταθερά κορεσμού οξυγόνου =  $0,1 \text{ gr/m}^3$ .
- Θερμοκρασία =  $15 \text{ }^\circ\text{C}$



**Σχήμα 7.1.** Διάγραμμα υποστρώματος-βιομάζας για τυπικές τιμές παραμέτρων.  
(Σημ.: Με τον όρο «τυπικές» εννοούμε τις αρχικές τιμές που εμείς ορίσαμε.)

**Ετερότροφη βιομάζα:** Η συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας ξεκινάει με μια αρχική τιμή  $1000 \text{ gr/m}^3$  (που ορίσαμε εμείς), και αυξάνεται εκθετικά μέχρι και την εικοστή πέμπτη μέρα όπου παίρνει και την τελική τιμή της ( $4679,35 \text{ gr/m}^3$ ) (σχήμα 7.1). Ο ρυθμός αύξησης της συγκέντρωσης της βιομάζας μειώνεται σταδιακά, ενώ πρακτικά μετά την εικοστή περίπου μέρα, η ετερότροφη βιομάζα παραμένει σταθερή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το υπάρχον υπόστρωμα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, μειώνεται οπότε η βιομάζα διαθέτει συνεχώς όλο και λιγότερο υπόστρωμα για να καταναλώσει. Έτσι είναι λογικό να παράγεται όλο και λιγότερη βιομάζα, μέχρις ενός σημείου ισορροπίας όπου διοχετεύεται τόσο υπόστρωμα όσο χρειάζεται η βιομάζα για μείνει σε μια σταθερή συγκέντρωση. Η ισορροπία αυτή είναι δυναμική. Αυτό σημαίνει ότι στη μονάδα του χρόνου,

η ποσότητα της βιομάζας που παράγεται είναι ίση με την ποσότητα της βιομάζας που καταστρέφεται.

**Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα:** Το υπόστρωμα ξεκινά με την αρχική συγκέντρωση που εμείς ορίσαμε ( $540 \text{ gr/m}^3$ ), και μειώνεται αρχικά με απότομο και σχεδόν γραμμικό ρυθμό. Η μείωση του υποστρώματος οφείλεται στο γεγονός, ότι η βιομάζα «καταναλώνει» το υπόστρωμα εκθετικά. Μέσα σε πέντε περίπου ώρες η συγκέντρωση του υποστρώματος έχει πέσει στα  $32 \text{ gr/m}^3$  (σχήμα 7.1). Έπειτα ακολουθεί μια φάση μείωσης της συγκέντρωσης του υποστρώματος, με φθίνοντα ρυθμό. Τέλος από την δέκατη περίπου μέρα και μετά παρατηρείται μια σχεδόν σταθερή συγκέντρωση του υποστρώματος ( $6,89 \text{ gr/m}^3$ ), που συνοδεύεται από μια τάση για επίσης σταθερή συγκέντρωση της βιομάζας. Τέλος οδηγούμαστε σε μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, που προκαλείται εξαιτίας του γεγονότος, ότι η ποσότητα του υποστρώματος που «καταστρέφεται» στη μονάδα του χρόνου, είναι ίση με το άθροισμα της ποσότητας του υποστρώματος που «δημιουργείται» από την λύση των κυττάρων και της νέας ποσότητας υποστρώματος που εισέρχεται στη δεξαμενή αερισμού.

## 7.1. Ανάλυση «Ευαισθησίας» του Μοντέλου.

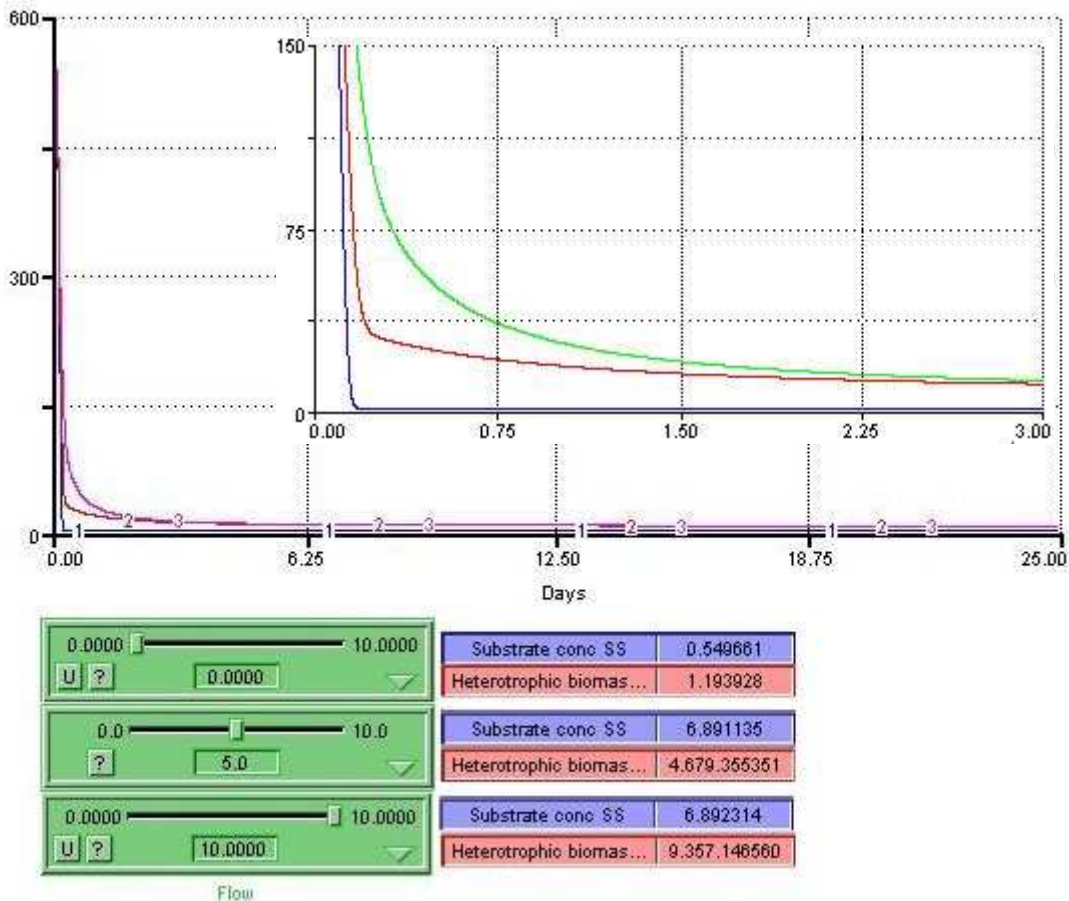
Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε την ευαισθησία του μοντέλου προσομοίωσης ως προς τις μεταβολές των βασικών του μεταβλητών. Θεωρούμε παντού την αρχική συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας ίση με  $1.000 \text{ gr/m}^3$ , την αρχική συγκέντρωση του υποστρώματος στη δεξαμενή αερισμού ίση με  $540 \text{ gr/m}^3$  και την συγκέντρωση του υποστρώματος στην εισροή ίση με  $540 \text{ gr/m}^3$  (εκτός από την περίπτωση όπου εξετάζουμε τη συμπεριφορά του μοντέλου για μεταβλητή συγκέντρωση εισερχόμενου υποστρώματος (παράγραφοι 7.15 & 8.5)). Συγκεκριμένα θα δούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μέγιστες, τυπικές και ελάχιστες τιμές: (α) ροής, (β) συγκέντρωσης οξυγόνου, (γ) συντελεστή  $K_o$ , (δ) ηλικίας ιλύος, (ε) συγκέντρωσης εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος (substrate conc  $S_{in}$ ) και (στ) θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειώσουμε, ότι λέγοντας μέγιστες και ελάχιστες τιμές δεν εννοούμε ότι οι παράμετροι δεν μπορούν απαραίτητα να ξεπεράσουν προς τα άνω ή προς τα κάτω τις τιμές αυτές, αλλά ότι οι τιμές αυτές αποτελούν ενδεικτικές ακραίες περιπτώσεις.

### 7.1.1. Ροή.

Για να εξετάσουμε τη ροή θεωρούμε ως δεδομένο, ότι υπάρχει μια αρχική συγκέντρωση υποστρώματος ίση με  $540 \text{ gr/m}^3$ . Εξετάζουμε την ευαισθησία του συστήματος (μοντέλου) για τρεις διαφορετικές τιμές ροών:

- (1) Ροή =  $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ .
- (2) Ροή =  $5 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ .
- (3) Ροή =  $10 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ .

Substrate conc SS: 1 - 2 - 3 -

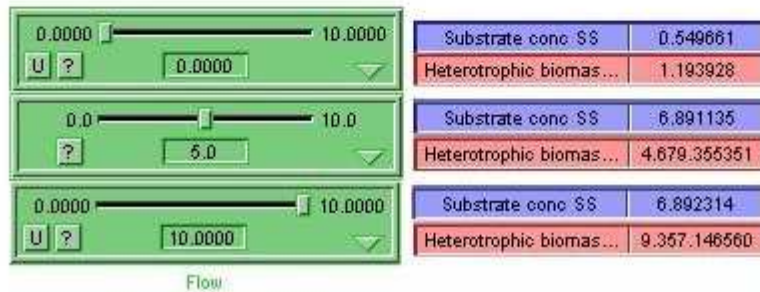
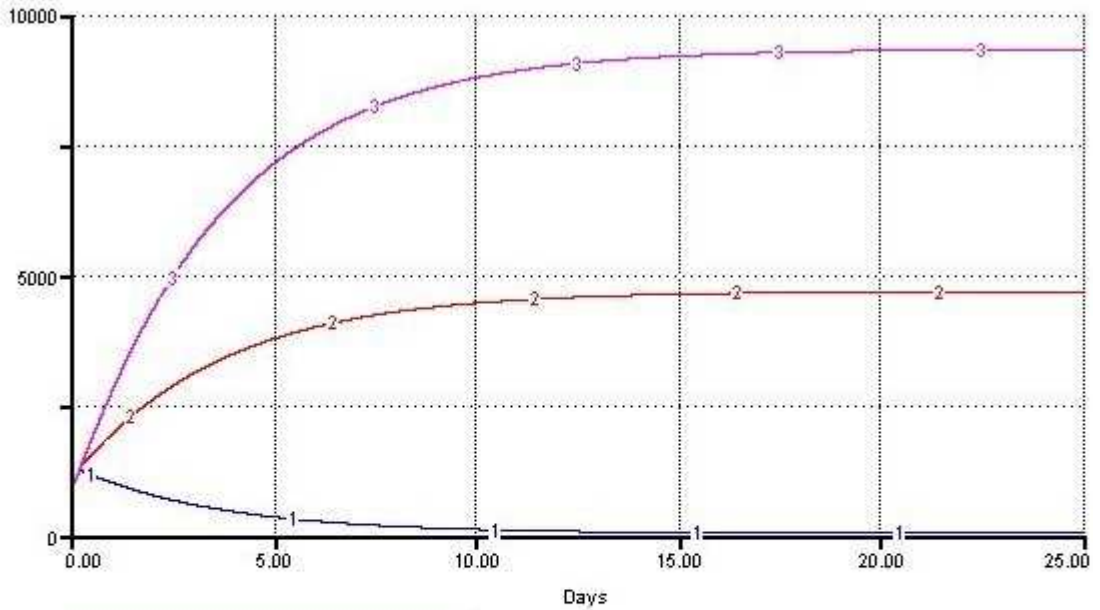


**Σχήμα 7.2.** Διάγραμμα υποστρώματος για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη τιμή ροής (σε μεγέθυνση το διάστημα των 3 πρώτων ημερών).

Παρατηρούμε μικρές διαφορές ανάμεσα στις δύο γραφικές παραστάσεις της τυπικής (2) και της μέγιστης (3) τιμής ροής (σχήμα 7.2). Οι μικρές αυτές διαφορές περιορίζονται στις πρώτες 1 με 2 ημέρες της προσομοίωσης, λόγω του ότι έχουμε ορίσει την ίδια αρχική συγκέντρωση ετερότροφης βιομάζας ( $1.000 \text{ gr/m}^3$ ) και σταθερό μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης  $\mu_{\max} = 3 * 1,028^{(T-20)} [\text{s}^{-1}]$ . Ουσιαστικά λοιπόν λόγω των παραδοχών που έχουμε κάνει το μοντέλο όσον αφορά το υπόστρωμα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στη μεταβολή της ροής (2) και (3) του συστήματος της δεξαμενής αερισμού.

Όσον αφορά όμως τη μηδενική ροή (1) το μοντέλο παρουσιάζει μεγάλη διαφορά αφού μετά την κατανάλωση του  $S_0$  δεν ανιχνεύεται καθόλου υπόστρωμα στο σύστημα και η ετερότροφη βιομάζα μετά από περίπου 12 μέρες εξαφανίζεται (σχήμα 7.3).

Heterotrophic biomass XH: 1 - 2 - 3 -



**Σχήμα 7.3.** Διάγραμμα βιομάζας για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη τιμή ροής.

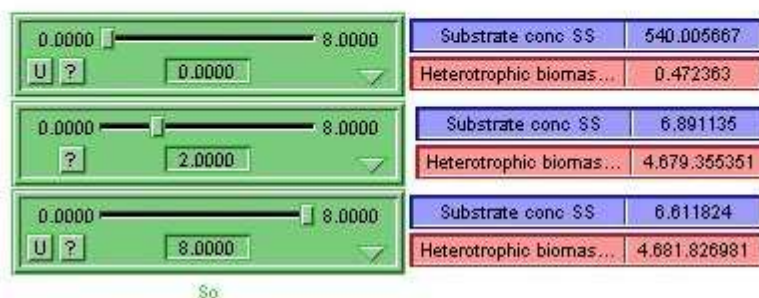
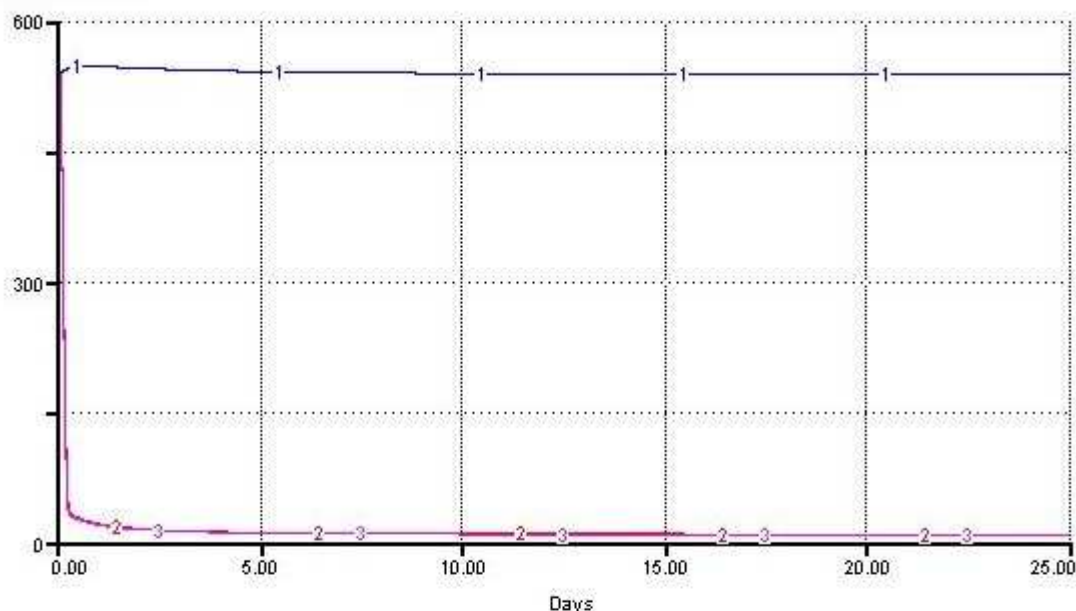
Έτσι λοιπόν οι τρεις γραφικές παραστάσεις της βιομάζας διαφέρουν πολύ μεταξύ τους (σχήμα 7.3). Το εύρος των τιμών που παίρνει η ετερότροφη βιομάζα αλλάζει κατά πολύ. Για μηδενική ροή μετά από 25 ημέρες η ετερότροφη βιομάζα έχει συγκέντρωση  $1,19 \text{ gr/m}^3$ , για ροή  $5 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  έχει συγκέντρωση  $4.679,35 \text{ gr/m}^3$ , ενώ για ροή  $10 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  έχει συγκέντρωση  $9.357,14 \text{ gr/m}^3$ . Άρα η ετερότροφη βιομάζα (δηλαδή το μοντέλο όσον αφορά την ετερότροφη βιομάζα) παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή της ροής του συστήματος της δεξαμενής αερισμού.

### 7.1.2. Συγκέντρωση οξυγόνου ( $S_0$ ).

Για τον έλεγχο της ευαισθησίας του μοντέλου σχετικά με τη συγκέντρωση του οξυγόνου ορίζουμε ως:

- (1) Ελάχιστη τη μηδενική συγκέντρωση  $S_0 = 0 \text{ gr/m}^3$ .
- (2) Τυπική =  $2 \text{ gr/m}^3$ .
- (3) Μέγιστη =  $8 \text{ gr/m}^3$ .

Substrate conc SS: 1 - 2 - 3 -

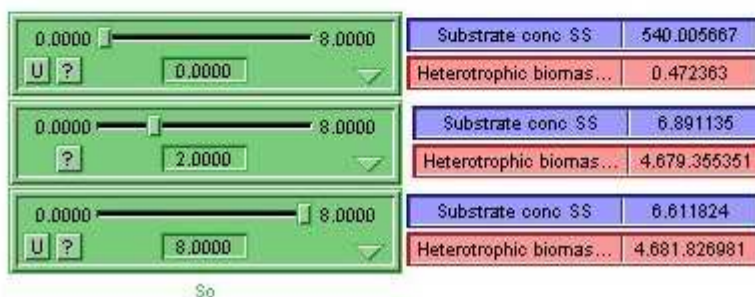
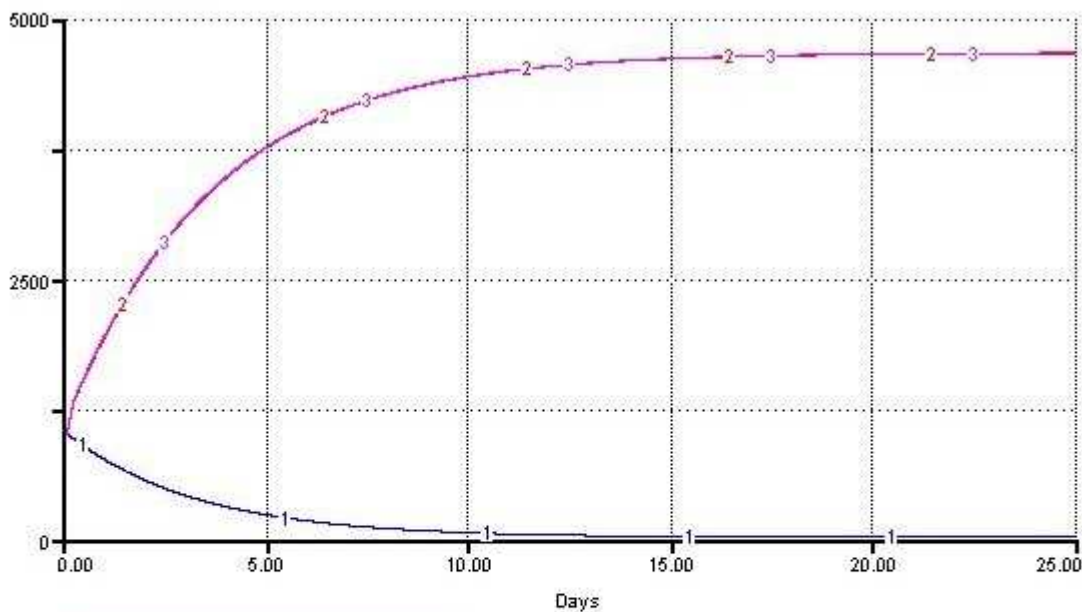


**Σχήμα 7.4.** Διάγραμμα υποστρώματος για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη τιμή συγκέντρωσης οξυγόνου.

Ουσιαστικά τα διαγράμματα 2 και 3 (τυπική και μέγιστη τιμή) είναι σχεδόν ίδια (σχήμα 7.4), ενώ το διάγραμμα της ελάχιστης τιμής παρουσιάζει εντελώς διαφορετική μορφή και είναι σχεδόν γραμμικό λόγω του ότι χωρίς παροχή οξυγόνου η υπάρχουσα αρχική συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας οδηγείται στη απόπτωση των κυττάρων (σχήμα 7.5) Πειραματιζόμενοι με διάφορες τιμές συγκέντρωσης οξυγόνου συμπεραίνουμε ότι οι μορφές των γραφικών παραστάσεων του υποστρώματος τείνουν να συγκλίνουν (σχεδόν όλες) με αυτές των γραφικών παραστάσεων 2 και 3. Έχουμε δηλαδή συγκέντρωση υποστρώματος μεταξύ 6,6 και 6,9  $\text{gr/m}^3$  και μέση συγκέντρωση ετερότροφης βιομάζας 4.680  $\text{gr/m}^3$  στο σημείο ισορροπίας. Μόνο για πολύ μικρές συγκεντρώσεις οξυγόνου ( $<0,05 \text{ gr/m}^3$ ) οι γραφικές αποκλίνουν από τις 2 και 3 και πλησιάζουν την μορφή της 1. Άρα στο μοντέλο το οργανικό υπόστρωμα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία (εκτός των περιπτώσεων όπου το οξυγόνο έχει συγκέντρωση μικρότερη του 0,05  $\text{gr/m}^3$ ) στη μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού.



Heterotrophic biomass XH: 1 - 2 - 3 -



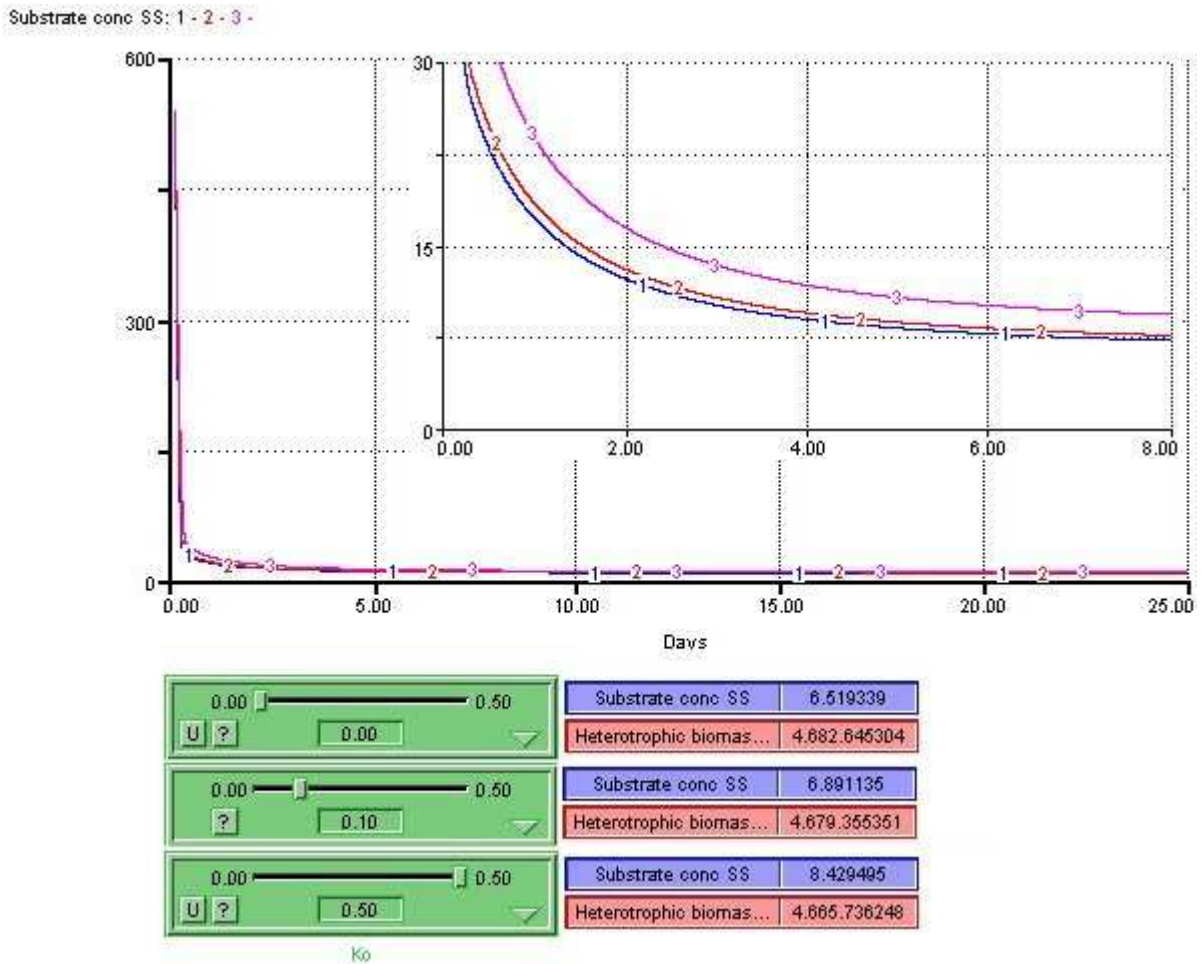
**Σχήμα 7.5.** Διάγραμμα βιομάζας για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη τιμή συγκέντρωσης οξυγόνου.

Και στην περίπτωση της βιομάζας (σχήμα 7.5) οι γραφικές τείνουν να έχουν όλες τη μορφή και τις τιμές των 2 και 3 (τυπική και μέγιστη τιμή συγκέντρωσης οξυγόνου). Μόνο για συγκεντρώσεις οξυγόνου μικρότερες του  $0,05 \text{ gr/m}^3$  οι γραφικές πλησιάζουν προς την 1 (μηδενική συγκέντρωση οξυγόνου και θάνατος κυττάρων) (σύγκρινε και ενότητα 8.2). Άρα λοιπόν στο μοντέλο με τις σταθερές που έχουμε ορίσει η βιομάζα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία ως προς τις μεταβολές της συγκέντρωσης του οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού (με εξαίρεση τις περιπτώσεις που έχουμε πολύ μικρή συγκέντρωση οξυγόνου).

### 7.1.3. Συντελεστής $K_o$ .

Η ευαισθησία του μοντέλου εξετάστηκε με:

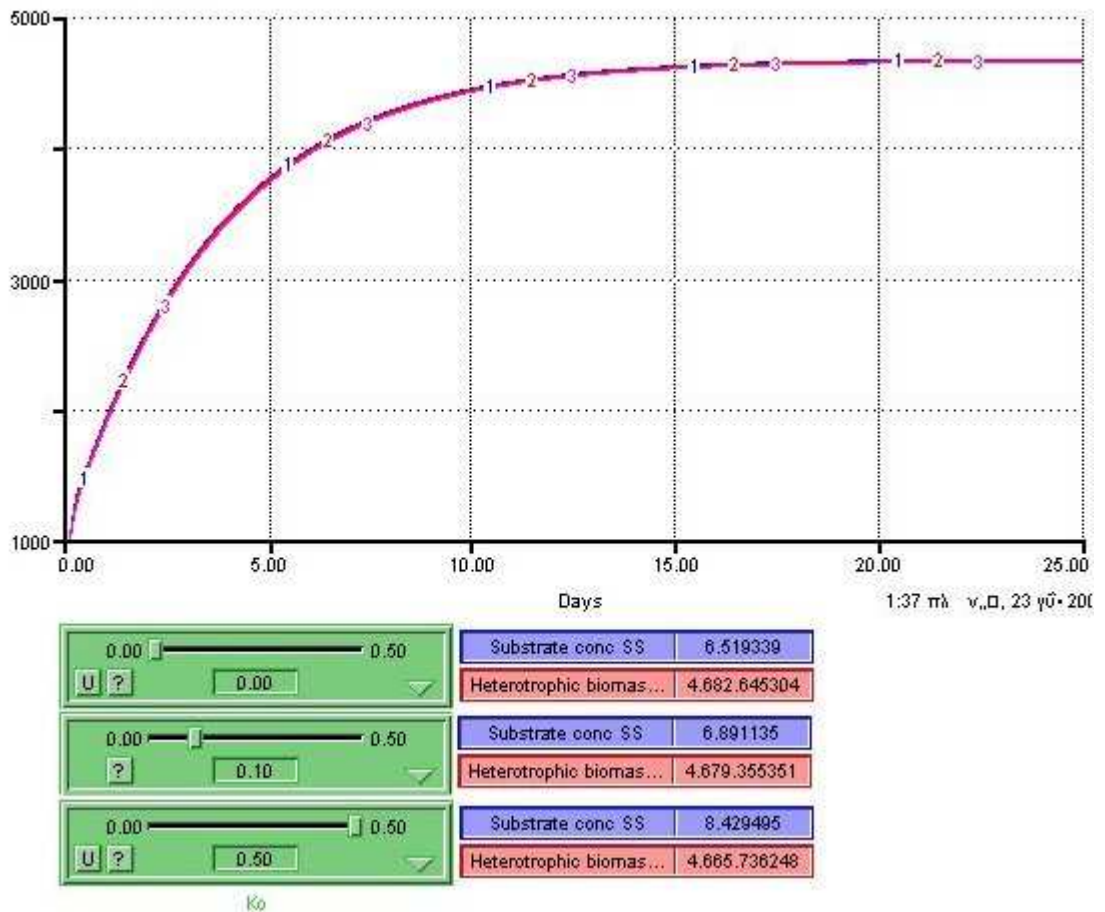
- (1) Ελάχιστη τιμή  $K_o = 0 \text{ gr/m}^3$ .
- (2) Τυπική τιμή  $K_o = 0,1 \text{ gr/m}^3$ .
- (3) Μέγιστη τιμή  $K_o = 0,5 \text{ gr/m}^3$ .



**Σχήμα 7.6.** Διάγραμμα υποστρώματος για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη τιμή  $K_o$  (σε μεγέθυνση το διάστημα των 8 πρώτων ημερών).

Παρατηρούμε ότι και οι τρεις γραφικές παραστάσεις (σχήμα 7.6) έχουν την ίδια μορφή, καταλήγουν όμως σε διαφορετική συγκέντρωση υποστρώματος ( $S_s = 6,5 \text{ gr/m}^3$  για την (1),  $S_s = 6,9 \text{ gr/m}^3$  για την (2) και  $S_s = 8,4 \text{ gr/m}^3$  για την (3)). Άρα λοιπόν στο μοντέλο το οργανικό υπόστρωμα παρουσιάζει πολύ μικρή ευαισθησία ως προς τη μεταβολή του  $K_o$ .

Heterotrophic biomass XH: 1 - 2 - 3 -



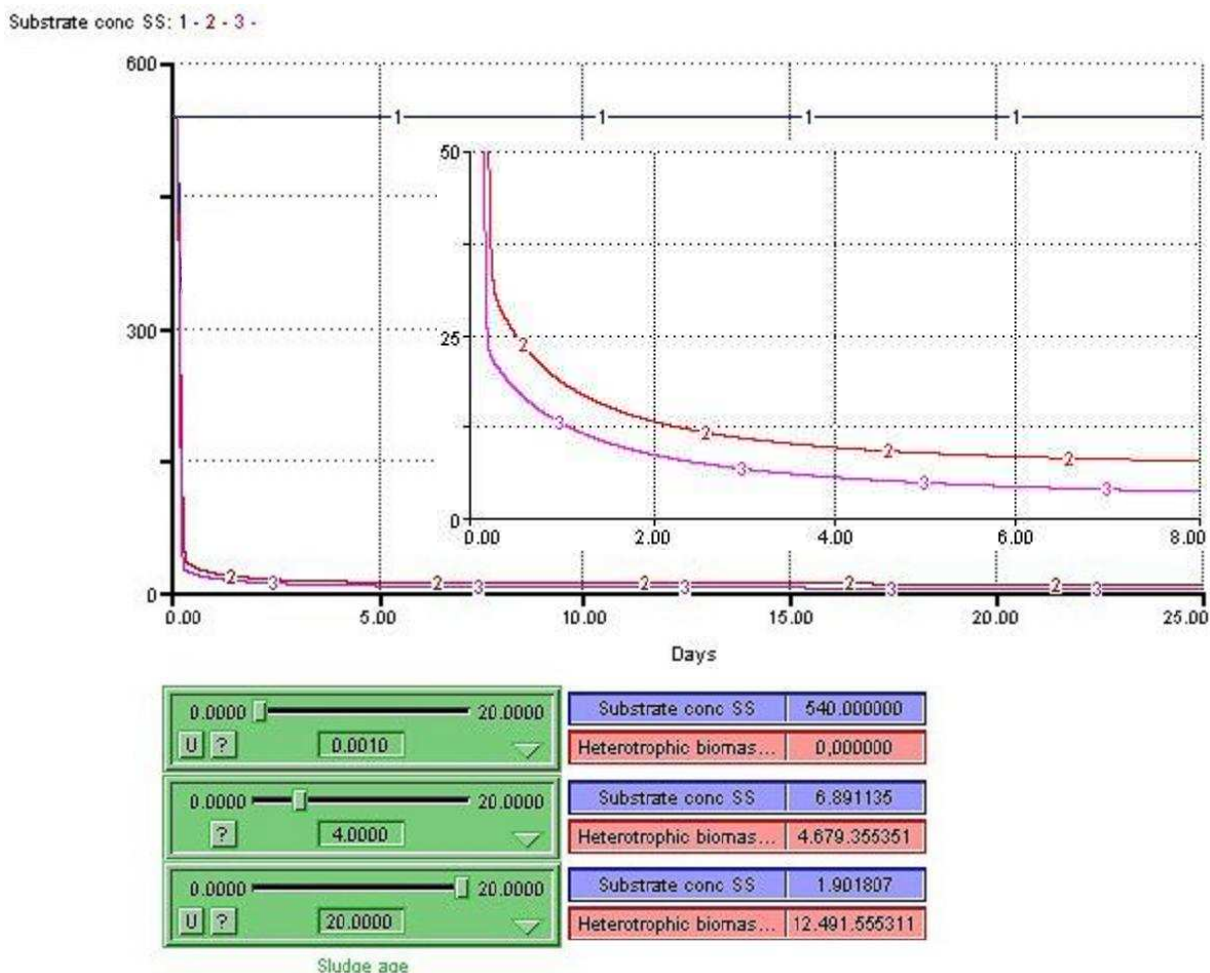
**Σχήμα 7.7.** Διάγραμμα βιομάζας για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη τιμή  $K_0$ .

Στην περίπτωση της ετερότροφης βιομάζας παρατηρούμε, ότι και οι τρεις γραφικές παραστάσεις σχεδόν ταυτίζονται. Η συγκέντρωση της ετερότροφης βιομάζας στη δυναμική ισορροπία κυμαίνεται από  $4.682 \text{ gr/m}^3$  για την γραφική παράσταση (1), έως  $4.665 \text{ gr/m}^3$  για την (3). Άρα συμπεραίνουμε και εδώ, ότι η ετερότροφη βιομάζα στο μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζει πολύ μικρή ευαισθησία ως προς τη μεταβολή του  $K_0$  (σχήμα 7.7).

### 7.1.4. Ηλικία ιλύος.

Η ευαισθησία του μοντέλου όσον αφορά την ηλικία της ιλύος εξετάστηκε με:

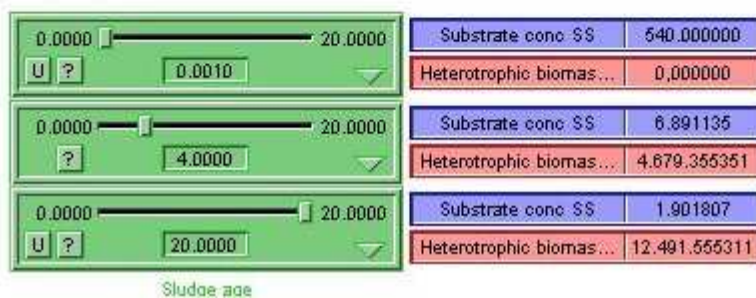
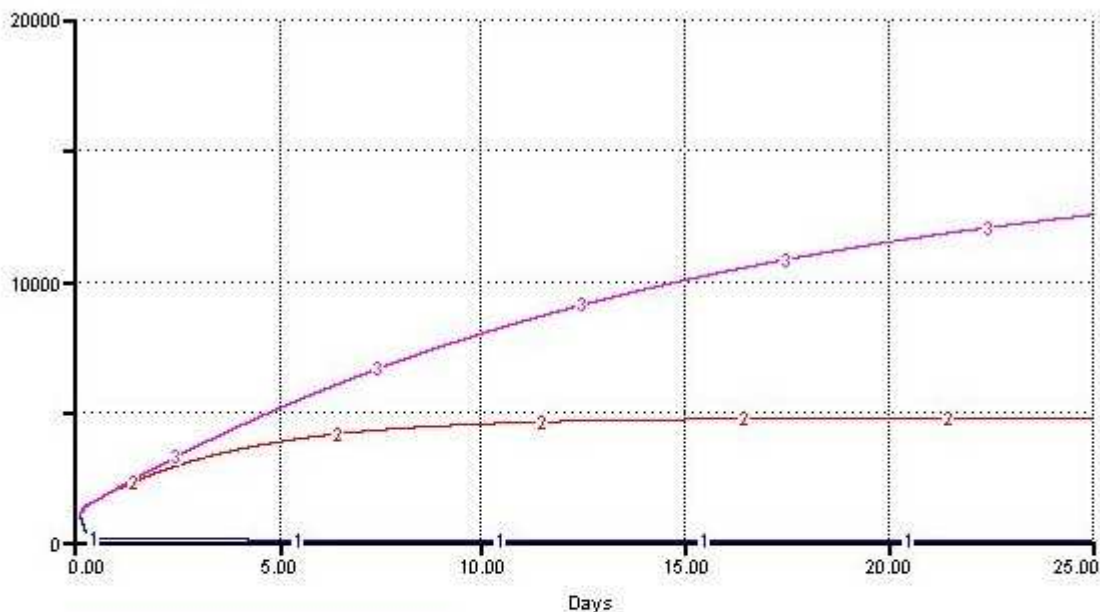
- (1) Μηδενική ηλικία ιλύος = 0,001 ημέρες.
- (2) Ηλικία ιλύος = 4 ημέρες.
- (3) Ηλικία ιλύος = 20 ημέρες.



**Σχήμα 7.8.** Διάγραμμα υποστρώματος για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη ηλικία ιλύος (στη μεγέθυνση φαίνεται το διάστημα των 8 πρώτων ημερών).

Όπως βλέπουμε από το σχήμα 7.8 οι γραφικές (2) και (3) (τυπική και μέγιστη τιμή ηλικίας ιλύος) έχουν την ίδια μορφή. Λόγω όμως της διαφορετικής ηλικίας λάσπης καταλήγουν στο σημείο ισορροπίας με διαφορετικές τιμές υποστρώματος ( $S_s$ ) και βιομάζας ( $X_H$ ). Η γραφική (2) για ηλικία λάσπης 4 ημέρες επιτυγχάνει  $S_s = 6,89 \text{ gr/m}^3$  και  $X_H = 4.679 \text{ gr/m}^3$ , ενώ η γραφική (3) δείχνει όπως είναι αναμενόμενο μεγαλύτερη κατανάλωση υποστρώματος ( $S_s = 1,90 \text{ gr/m}^3$ ) και μεγαλύτερη δημιουργία βιομάζας ( $X_H = 12.491 \text{ gr/m}^3$ ). Αντίθετα η γραφική παράσταση 1 ανεξαρτητοποιείται από τις άλλες δύο και παρουσιάζει γραμμική μορφή και σταθερή τιμή χωρίς κατανάλωση υποστρώματος και δημιουργία βιομάζας. Με επιπλέον πειράματα με διάφορες τιμές ηλικίας ιλύος εξακριβώνουμε, ότι μόνο για ηλικίες ιλύος μικρότερες της μιας ημέρας οι γραφικές αποκλίνουν πολύ από αυτές των (2) και (3). Για το υπόλοιπο φάσμα τιμών ηλικίας ιλύος, οι γραφικές έχουν παρόμοιες καμπύλες με τις (2) και (3), όχι όμως και ταυτόσημες τιμές  $S_s$  και  $X_H$ . Έτσι λοιπόν, στην προσομοίωση, το οργανικό υπόστρωμα παρουσιάζει ευαισθησία στις μεταβολές της ηλικίας ιλύος.

Heterotrophic biomass XH: 1 - 2 - 3 -



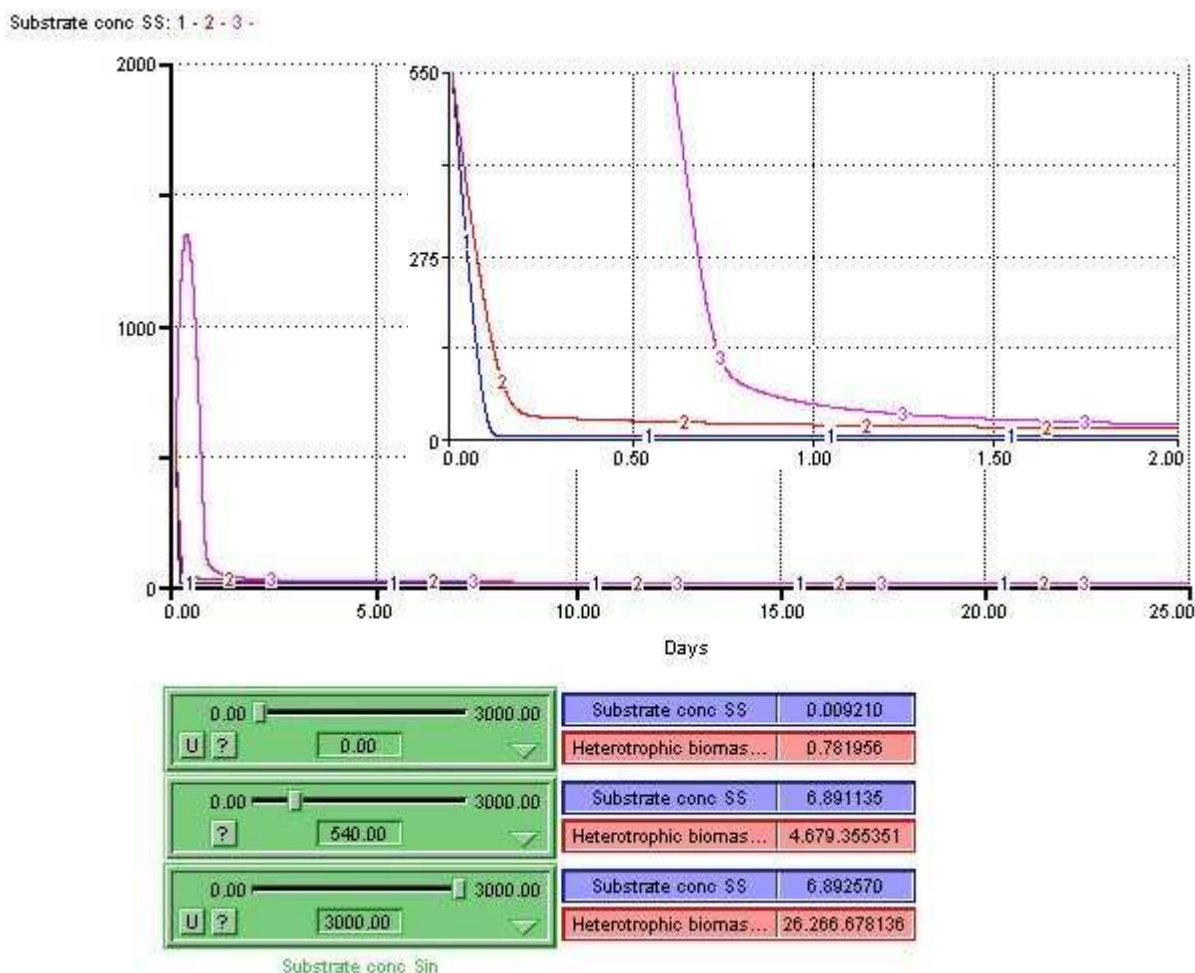
Σχήμα 7.9. Διάγραμμα βιομάζας για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη ηλικία ιλύος.

Στην περίπτωση της βιομάζας οι τρεις γραφικές παραστάσεις (σχήμα 7.9) διαφέρουν φανερά η μια από την άλλη. Μάλιστα οι διαφορές στις τιμές των συγκεντρώσεων είναι πολύ μεγάλες, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Έτσι λοιπόν η βιομάζα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία, στο μοντέλο, ως προς τη μεταβολή της ηλικίας ιλύος.

### 7.1.5. Συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος (Substrate conc $S_{in}$ ).

Η ευαισθησία όσον αφορά τη συγκέντρωση του εισερχόμενου υποστρώματος ( $S_{in}$ ) εξετάστηκε για τις παρακάτω τιμές:

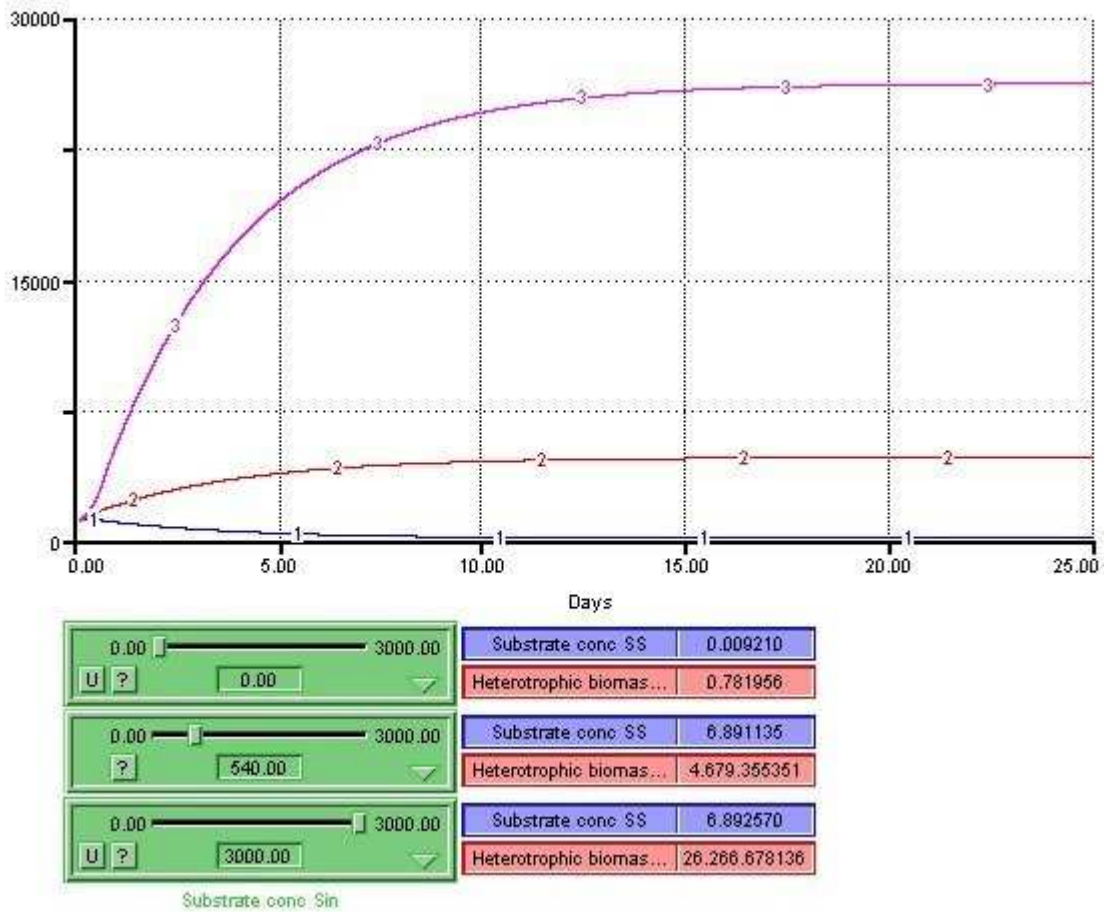
- (1)  $S_{in} = 0 \text{ gr/m}^3$ .
- (2)  $S_{in} = 540 \text{ gr/m}^3$ .
- (3)  $S_{in} = 3000 \text{ gr/m}^3$ .



**Σχήμα 7.10.** Διάγραμμα υποστρώματος για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος (στη μεγέθυνση φαίνονται οι 2 πρώτες ημέρες).

Από το σχήμα 7.10 παρατηρούμε, ότι οι γραφικές 1 και 2 έχουν παρόμοια μορφή. Η γραφική παράσταση της μέγιστης τιμής όμως διαφοροποιείται στο χρονικό διάστημα της πρώτης περίπου ημέρας, λόγω της ύπαρξης πολύ μεγαλύτερης ποσότητας υποστρώματος από αυτό που μπορεί να καταναλώσει η υπάρχουσα βιομάζα ( $1.000 \text{ gr/m}^3$ ) τη δεδομένη χρονική στιγμή. Από τη δεύτερη περίπου ημέρα και μετά και οι τρεις γραφικές είναι παρόμοιες γιατί η βιομάζα αυξάνεται ανάλογα με το υπάρχον υπόστρωμα και καταλήγει στο σημείο ισορροπίας να έχει την ίδια συγκέντρωση υποστρώματος  $S_s = 6,89 \text{ gr/m}^3$ , αλλά διαφορετική συγκέντρωση βιομάζας. Στη γραφική παράσταση 2 η βιομάζα φτάνει τα  $4.679 \text{ gr/m}^3$ , ενώ στη γραφική παράσταση 3 φτάνει τα  $26.266 \text{ gr/m}^3$ . Άρα στο μοντέλο προσομοίωσης το υπόστρωμα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία τις πρώτες ημέρες και μικρότερη στη φάση της δυναμικής ισορροπίας, στη μεταβολή της συγκέντρωσης του εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος.

Heterotrophic biomass X<sub>H</sub>: 1 - 2 - 3 -



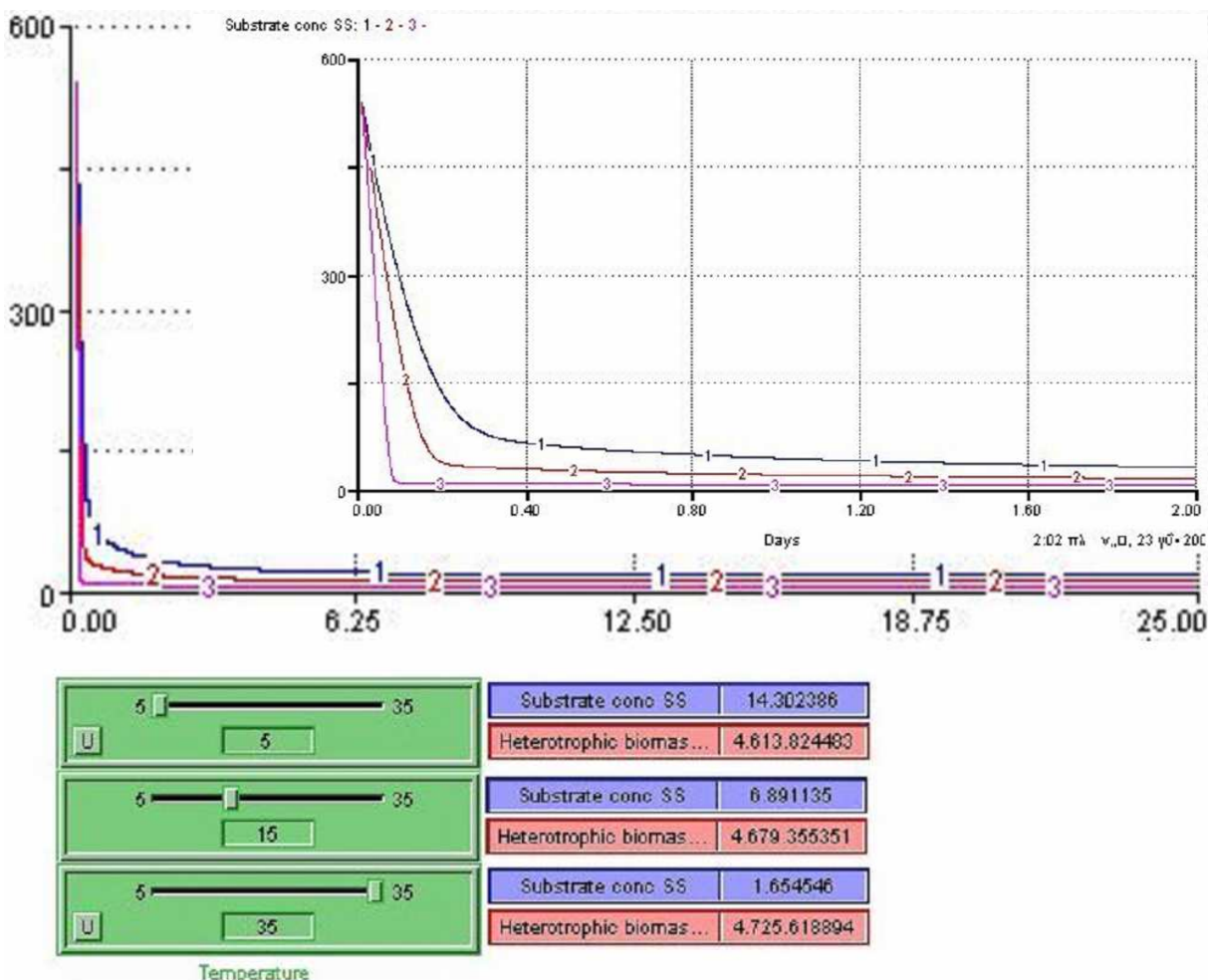
**Σχήμα 7.11.** Διάγραμμα βιομάζας για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος.

Όπως προαναφέρθηκε οι τρεις γραφικές παραστάσεις της παραγωγής βιομάζας (σχήμα 7.11) διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους, όπως είναι και αναμενόμενο λόγω της διαφορετικής ποσότητας εισερχόμενου υποστρώματος ( $S_{in}$ ). Το εύρος των τιμών που παίρνει η ετερότροφη βιομάζα κατά την εικοστή πέμπτη ημέρα αλλάζει κατά πολύ (για την (1) έχουμε  $X_H = 0,78 \text{ gr/m}^3$ , για την (2) έχουμε  $X_H = 4.679 \text{ gr/m}^3$  και για την (3) έχουμε  $X_H = 26.266 \text{ gr/m}^3$ ). Άρα η βιομάζα, στο μοντέλο, παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή της συγκέντρωσης του εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος.

### 7.1.6. Θερμοκρασία.

Όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στην ευαισθησία του μοντέλου, εξετάστηκαν οι συγκεντρώσεις του υποστρώματος και της βιομάζας για τιμές θερμοκρασίας:

- (1)  $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- (2)  $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- (3)  $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

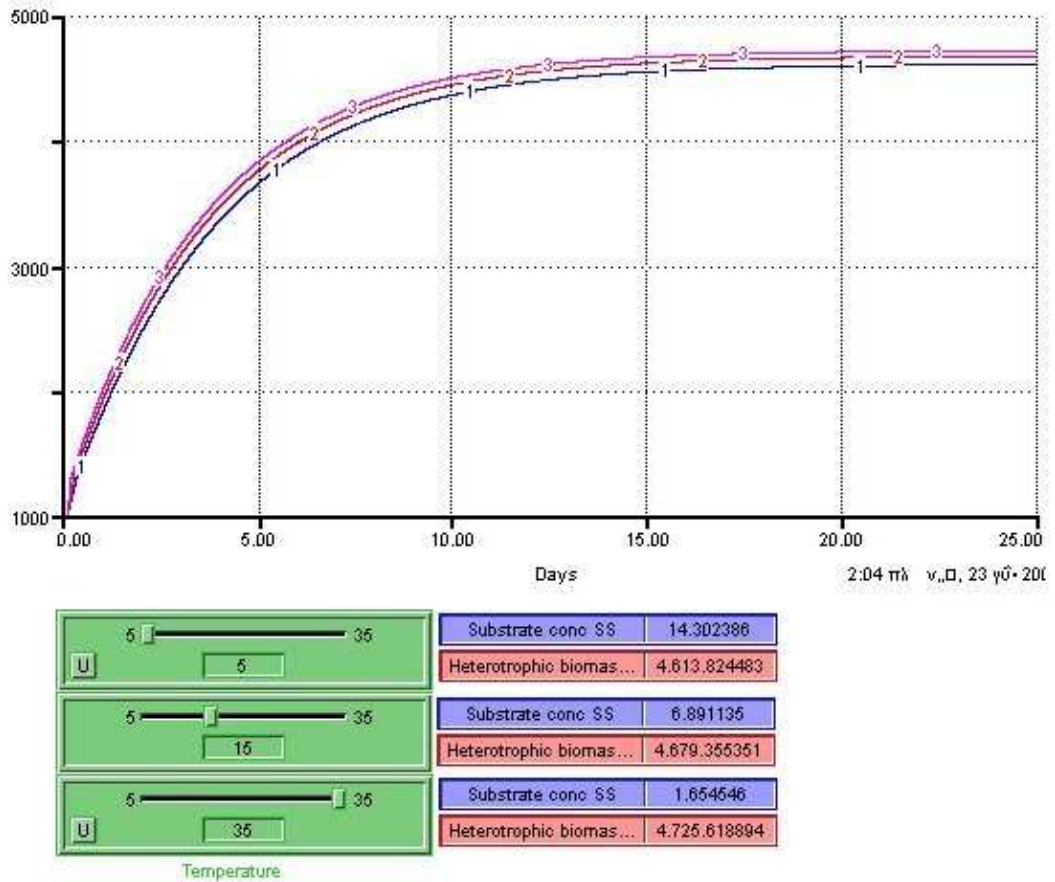


**Σχήμα 7.12.** Διάγραμμα υποστρώματος για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη θερμοκρασία (σε μεγέθυνση το διάστημα των 2 πρώτων ημερών).

Όπως φαίνεται στη σχήμα 7.12 οι καμπύλες των τριών γραφικών παραστάσεων έχουν παρόμοια μορφή αλλά διαφέρουν αισθητά η μία από την άλλη. Εξάλλου οι τρεις γραφικές καταλήγουν στο σημείο δυναμικής ισορροπίας σε τρεις διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης υποστρώματος ( $S_s = 14,3\text{ gr/m}^3$  στους  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S_s = 6,89\text{ gr/m}^3$  στους  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $S_s = 1,65\text{ gr/m}^3$  στους  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Συμπεραίνουμε λοιπόν πως στο μοντέλο, το οργανικό υπόστρωμα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ως προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας γιατί όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη κατανάλωση υποστρώματος παρατηρείται.



Heterotrophic biomass X<sub>H</sub>: 1 - 2 - 3 -



**Σχήμα 7.13.** Διάγραμμα βιομάζας για (1) ελάχιστη, (2) τυπική και (3) μέγιστη θερμοκρασία.

Οι τρεις καμπύλες της βιομάζας στο σχήμα 7.13 έχουν παρόμοια μορφή. Όμως οι διαφορές στις τιμές των συγκεντρώσεων, όπως για παράδειγμα στις τελικές τιμές, είναι υπολογίσιμες (πάνω από 100 gr/m<sup>3</sup> σε κάποιες περιπτώσεις, αφού στο σημείο δυναμικής ισορροπίας έχουμε συγκέντρωση βιομάζας X<sub>H</sub> = 4.613 gr/m<sup>3</sup> στους 5 °C, X<sub>H</sub> = 4.679 gr/m<sup>3</sup> στους 15 °C και X<sub>H</sub> = 4.725 gr/m<sup>3</sup> στους 35 °C). Στο μοντέλο λοιπόν η ετερότροφη βιομάζα παρουσιάζει μικρή αλλά υπολογίσιμη ευαισθησία ως προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ένα απλό, ευέλικτο και ευκολονόητο μοντέλο προσομοίωσης σε μια δεξαμενή αερισμού μιας ΕΕΑΛ και να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητά του, έτσι ώστε να αποτελέσει πιθανή βάση για τη δημιουργία πολυπλοκότερων μοντέλων προσομοίωσης που θα λαμβάνουν υπόψη τους και άλλους παράγοντες και που θα περιλαμβάνουν στην προσομοίωση και άλλα τμήματα μιας ΕΕΑΛ, όπως οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης.

Για την εφαρμογή της προσομοίωσης ελήφθη ως δεδομένη η απλοποιημένη επεξεργασία λυμάτων που περιγράφεται παρακάτω. Τα λύματα εισέρχονται σε μια πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης όπου αφαιρείται μεγάλο μέρος αιωρούμενων σωματιδίων που καθιζάνουν ή επιπλέουν. Τα υγρά απόβλητα έπειτα εισέρχονται στη δεξαμενή αερισμού όπου μειώνεται το οργανικό τους φορτίο. Αμέσως μετά ρέουν προς την δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης όπου καθιζάνει η δευτεροβάθμια λάσπη (βιομάζα). Το επεξεργασμένο πια νερό της δευτεροβάθμιας δεξαμενής καθίζησης εξέρχεται του συστήματος. Τμήμα της λάσπης που καθιζάνει στην δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης επιστρέφει στην δεξαμενή αερισμού (ιλύς ανακυκλοφορίας), ενώ το υπόλοιπο τμήμα της λάσπης αυτής εξέρχεται του συστήματος σαν περίσσεια ιλύος.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης ελήφθησαν υπόψη οι εξής παραδοχές:

- α) Η συγκέντρωση του οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού διατηρείται σταθερή.
- β) Δεν λαμβάνεται υπόψη η ανακυκλοφορία ιλύος, αλλά η «ηλικία ιλύος».
- γ) Οι σχέσεις υποστρώματος-ρυθμού αύξησης βιομάζας και συγκέντρωσης οξυγόνου-ρυθμού αύξησης βιομάζας είναι σύμφωνες με την κινητική του Monod και δεν αλλάζουν την συγκέντρωση οξυγόνου, αφού την διατηρούμε σταθερή.
- δ) Η διάσπαση-λύση (lysis) των κυττάρων είναι χημική αντίδραση με κινητική πρώτης τάξης (first order chemical reaction kinetics) και κατά τη διαδικασία αυτή η συγκέντρωση του οξυγόνου παραμένει σταθερή.
- ε) Η συγκέντρωση του εισρέοντος (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος είναι σταθερή και ίση με  $540 \text{ gr/m}^3$  σε όλες τις εφαρμογές του προγράμματος εκτός από την εφαρμογή που ορίζεται ως μεταβλητή η  $S_{in}$  (παράγραφοι 7.1.5 & 8.5).

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 7.0.1 του προγράμματος προσομοίωσης “STELLA” της εταιρίας High Performance Systems Inc.

Στο παρόν μοντέλο προσομοίωσης εξετάστηκαν ως προς την επίδραση τους στην κατανάλωση του υποστρώματος και στην παραγωγή ετερότροφης βιομάζας οι εξής έξι παράμετροι:

- α) Η ροή ( $f$ ) των εισρέοντων στην δεξαμενή αερισμού λυμάτων [ $\text{m}^3/\text{ημέρα}$ ].
- β) Η συγκέντρωση οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού ( $S_o$ ) [ $\text{gr/m}^3$ ].
- γ) Ο συντελεστής κορεσμού για οξυγόνο ( $K_o$ ) (Michael Menten saturation constant for oxygen) [ $\text{gr/m}^3$ ].
- δ) Η ηλικία ιλύος [ημέρες].
- ε) Η συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος ( $S_{in}$ ) [ $\text{gr/m}^3$ ].
- στ) Η θερμοκρασία στη δεξαμενή αερισμού [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Πρέπει να αναφερθεί ότι κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκαν οι προαναφερθείσες παράμετροι (εκτός ελαχίστων περιπτώσεων) μετά από ένα χρονικό διάστημα οι συγκεντρώσεις του υποστρώματος και της βιομάζας κατέληγαν σε δυναμική ισορροπία. Πιο συγκεκριμένα κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκαν, οι έξι παράμετροι προκαλούν τα ακόλουθα στο σημείο της δυναμικής ισορροπίας (Οι μηδενικές τιμές των παραμέτρων δεν ελήφθησαν υπόψη):

- Η αύξηση της ροής αυξάνει τη συγκέντρωση της βιομάζας ενώ δεν έχει επίδραση στο υπόστρωμα. Η μείωση της ροής μειώνει τη συγκέντρωση της βιομάζας ενώ δεν έχει επίδραση σε αυτή του υποστρώματος.

- Η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου μέχρις ενός ορίου αυξάνει τη βιομάζα και μειώνει το υπόστρωμα. Περαιτέρω αύξηση δεν επιφέρει αλλαγές. Η μείωση του οξυγόνου προκαλεί την αντίθετη συμπεριφορά.
- Η αύξηση του συντελεστή  $K_o$  προκαλεί αύξηση του υποστρώματος και μείωση της βιομάζας. Η μείωση του συντελεστή  $K_o$  προκαλεί τα αντίθετα αποτελέσματα.
- Η αύξηση της ηλικίας ιλύος προκαλεί αύξηση της βιομάζας και μείωση του υποστρώματος. Αντίστοιχα η μείωση της ηλικίας ιλύος προκαλεί τα αντίστροφα αποτελέσματα.
- Η αύξηση του εισρέοντος υποστρώματος αυξάνει την βιομάζα ενώ δεν επηρεάζει το υπόστρωμα. Η μείωση του εισρέοντος υποστρώματος προκαλεί μείωση της βιομάζας ενώ δεν επηρεάζει το υπόστρωμα.
- Τέλος η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της βιομάζας και μείωση του υποστρώματος, ενώ η μείωση της προκαλεί τα αντίστροφα αποτελέσματα.

Οι έξι παράμετροι που περιλαμβάνει το μοντέλο επιδρούν με διαφορετικό τρόπο η κάθε μια στη συγκέντρωση του υποστρώματος και της βιομάζας. Κάποιες από αυτές όταν αυξηθούν επηρεάζουν θετικά την παραγωγή βιομάζας ή/και την κατανάλωση υποστρώματος και κατ' αντιστοιχία όταν μειωθούν τις επηρεάζουν αρνητικά. Κάποιες άλλες δρουν αντίστροφα (όταν αυξηθούν επηρεάζουν αρνητικά την κατανάλωση υποστρώματος ή/και την παραγωγή βιομάζας και αντίστοιχα, όταν μειωθούν τα επηρεάζουν θετικά). Επίσης μια παράμετρος μπορεί να ενεργεί θετικά ταυτόχρονα και στο υπόστρωμα και στη βιομάζα ή να ενεργεί θετικά μόνο στο ένα, εις βάρος του άλλου. Ο παρακάτω πίνακας 8.1 δείχνει συνοπτικά πως επηρεάζει η κάθε παράμετρος το υπόστρωμα και τη βιομάζα στο σημείο δυναμικής ισορροπίας που επιτυγχάνεται στην κάθε περίπτωση. Στον πίνακα αυτόν δεν έχουν συμπεριληφθεί οι επιδράσεις που έχουν οι μηδενικές τιμές των παραμέτρων.

**Πίνακας 8.1.** Επίδραση των αυξομειώσεων των εξεταζόμενων παραμέτρων του μοντέλου στη συγκέντρωση του υποστρώματος και στη συγκέντρωση της βιομάζας στο σημείο δυναμικής ισορροπίας.

- + : Αύξηση της συγκέντρωσης του υποστρώματος ή της βιομάζας.
- : Μείωση της συγκέντρωσης του υποστρώματος ή της βιομάζας.

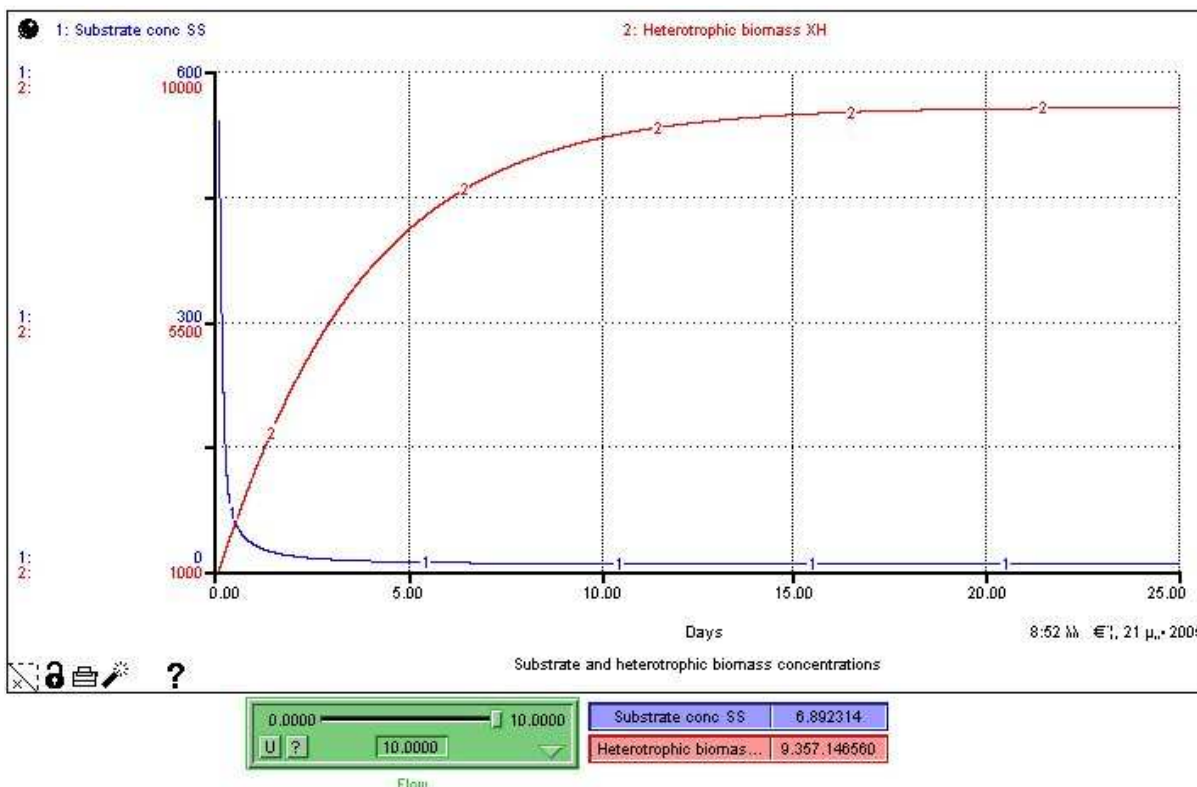
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ		ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΑΖΑ	
	ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ	ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ
Ροή	0	0	+	-
Συγκέντρωση Οξυγόνου ( $S_o$ )	-	+	+	-
Συντελεστής $K_o$	+	-	-	+
Ηλικία Ιλύος	-	+	+	-
Συγκέντρωση Εισερχ. Υποστρώματος	0	0	+	-
Θερμοκρασία	-	+	+	-

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στην εφαρμογή του μοντέλου.

### 8.1. Ροή.

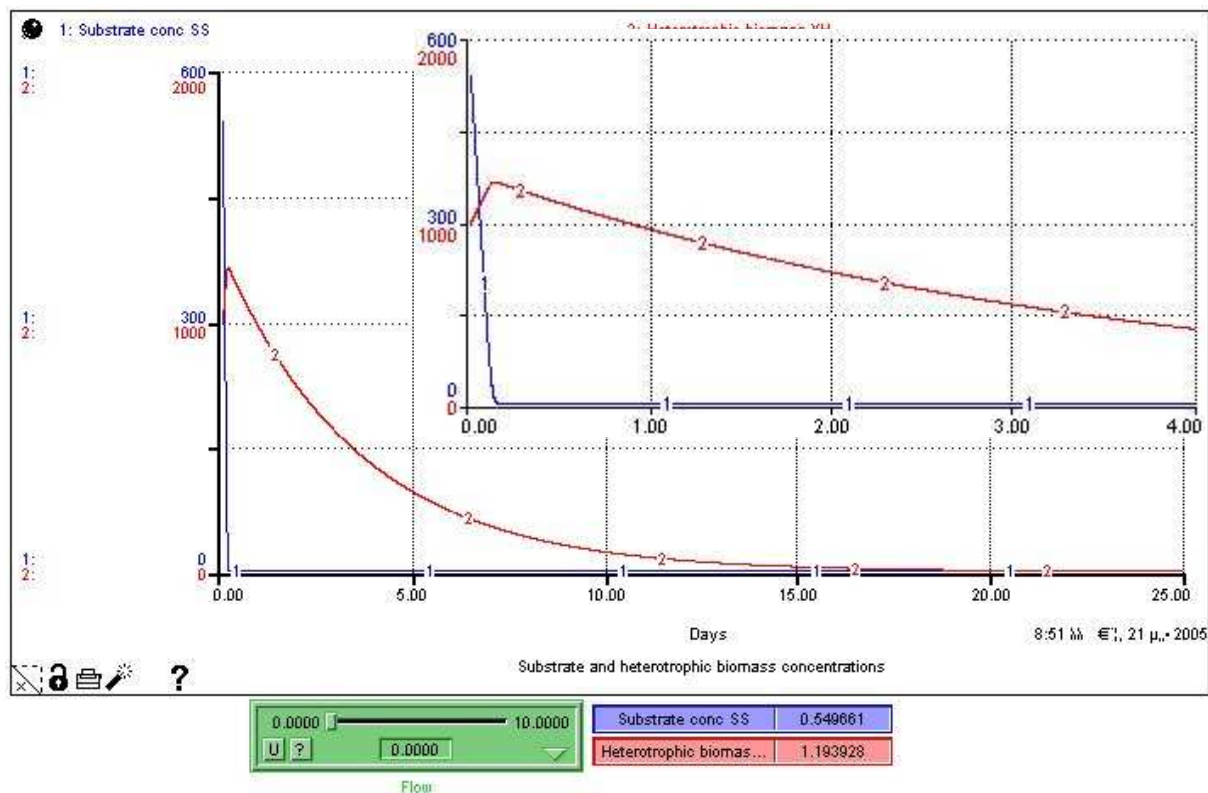
Η αύξηση της ροής των λυμάτων από 5 σε 10  $m^3$ /ημέρα αυξάνει σημαντικά τη συγκέντρωση της βιομάζας, αλλά αυξάνει ελάχιστα τη συγκέντρωση του υποστρώματος (για την πρώτη μόνο περίπου ημέρα). Αυτό είναι λογικό αφού όταν στη δεξαμενή αερισμού υπάρχει περισσότερο υπόστρωμα, η βιομάζα έχει περισσότερη «τροφή» για να αναπτυχθεί.

Δηλαδή η βιομάζα έχει στη διάθεση της περισσότερο υπόστρωμα για να καταναλώσει-αποδομήσει, οπότε έχουμε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης της. Αντίθετα η συγκέντρωση του υποστρώματος στο σημείο δυναμικής ισορροπίας παραμένει σχεδόν σταθερή αφού προφανώς η μεγαλύτερη ποσότητα εισρέοντος υποστρώματος (λυμάτων) αντισταθμίζεται (καταναλώνεται) από τη μεγαλύτερη ποσότητα βιομάζας που αναπτύσσεται, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται και πάλι ο σκοπός της δεξαμενής αερισμού, δηλαδή η μείωση της αρχικής συγκέντρωσης του υποστρώματος. Το μοντέλο εδώ δείχνει ότι σύμφωνα με την προσομοίωση δεν θα υπάρξει σημαντικό πρόβλημα στην ΕΕΑΛ αν αυξήσουμε τη ροή των λυμάτων από 5 σε 10 m<sup>3</sup>/ημέρα προς τη δεξαμενή αερισμού (σχήμα 8.1). Βέβαια ένας υπερβολικά αναπτυγμένος αριθμός βακτηρίων βιομάζας ενδέχεται να δημιουργήσει κάποιο πρόβλημα.



**Σχήμα 8.1.** Μέγιστη τιμή ροής (10 m<sup>3</sup>/ημέρα) .

Η μείωση της ροής των λυμάτων από 5 σε 0 m<sup>3</sup>/ημέρα μειώνει σημαντικά και τη συγκέντρωση του υποστρώματος αλλά και της βιομάζας στο σημείο δυναμικής ισορροπίας. Ο μηδενισμός της ροής προκαλεί το ακόλουθο σενάριο (σχήμα 8.2). Η βιομάζα έχοντας να καταναλώσει μόνο την ήδη υπάρχουσα ποσότητα υποστρώματος δεν μπορεί να αναπτυχθεί και καταλήγει ουσιαστικά στον μηδενισμό της. Το υπόστρωμα από την άλλη εφόσον δεν αναπληρώνεται από ποσότητα εισρέοντος υποστρώματος καταλήγει και αυτό σε μηδενισμό και μάλιστα μέσα σε λίγες ώρες. Αυτό όμως είναι καταστροφικό για την ισορροπία του συστήματος της δεξαμενής αερισμού. Με τη μείωση της ροής από 5 σε 0 m<sup>3</sup>/ημέρα λοιπόν μπορούμε να ελέγξουμε ταυτόχρονα τη μείωση του υποστρώματος (σε μικρή κλίμακα), αλλά και του πληθυσμού της βιομάζας (σε μεγάλη κλίμακα).



Σχήμα 8.2. Ελάχιστη τιμή ροής ( $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ ) (μεγέθυνση των 4 πρώτων ημερών).

## 8.2. Συγκέντρωση Οξυγόνου ( $S_0$ ).

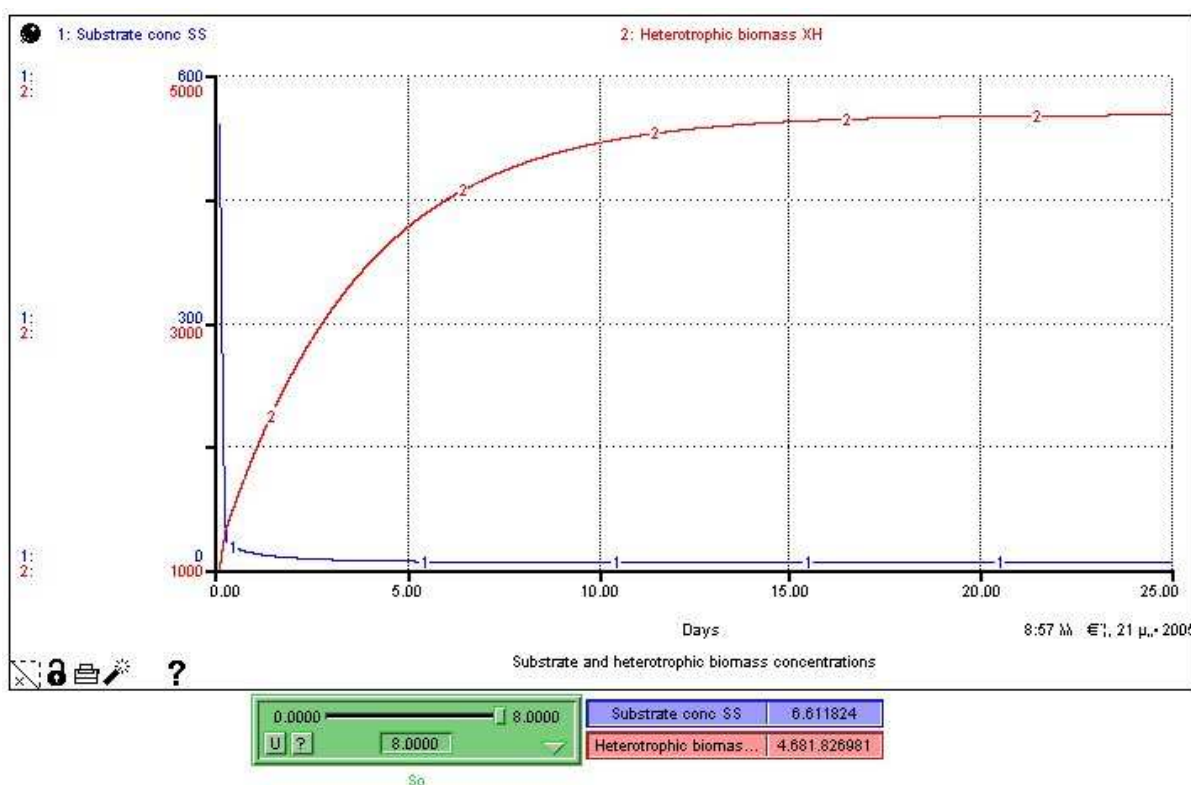
Η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου από 0 έως  $\approx 0,05 \text{ gr/m}^3$  αυξάνει τη βιομάζα και μειώνει το υποστρώμα. Με την ύπαρξη οξυγόνου η ετερότροφη βιομάζα βρίσκεται σε ευνοϊκότερο περιβάλλον. Έτσι έχοντας οξυγόνο για να αναπνέει αποδομεί περισσότερες οργανικές ενώσεις (υπόστρωμα) με αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας της με ταυτόχρονη μείωση του υποστρώματος (σχήμα 8.3). Μια περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου ( $>0,05 \text{ gr/m}^3$ ) δεν επιφέρει στο μοντέλο σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση της κατανάλωσης του υποστρώματος, ούτε σημαντικά υψηλότερη παραγωγή βιομάζας (σχήμα 7.4 & 7.5).

Αντίθετα η μείωση του οξυγόνου κάτω από  $\approx 0,05 \text{ gr/m}^3$  προκαλεί την αντίθετη συμπεριφορά (πίνακας 8.2). Η βιομάζα δεν έχει στη διάθεση της το οξυγόνο που απαιτεί, οπότε αναπτύσσεται με πιο αργούς ρυθμούς και «καταναλώνει» μικρότερη ποσότητα υποστρώματος. Στον πίνακα 8.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την επίδραση της μεταβολής της  $S_0$  για συγκεντρώσεις οξυγόνου από  $0 \text{ gr/m}^3$  έως  $8 \text{ gr/m}^3$ , στη συγκέντρωση του υποστρώματος και της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού. Όπως φαίνεται στον πίνακα 8.2 για μεταβολές της συγκέντρωσης του οξυγόνου από 8 έως  $\approx 0,05 \text{ gr/m}^3$  παρατηρούνται μικρές μεταβολές στη συγκέντρωση της βιομάζας και του υποστρώματος. Αντίθετα για συγκεντρώσεις οξυγόνου μικρότερες των  $0,05 \text{ gr/m}^3$  οι μεταβολές στη συγκέντρωση του υποστρώματος και της βιομάζας είναι μεγάλες.

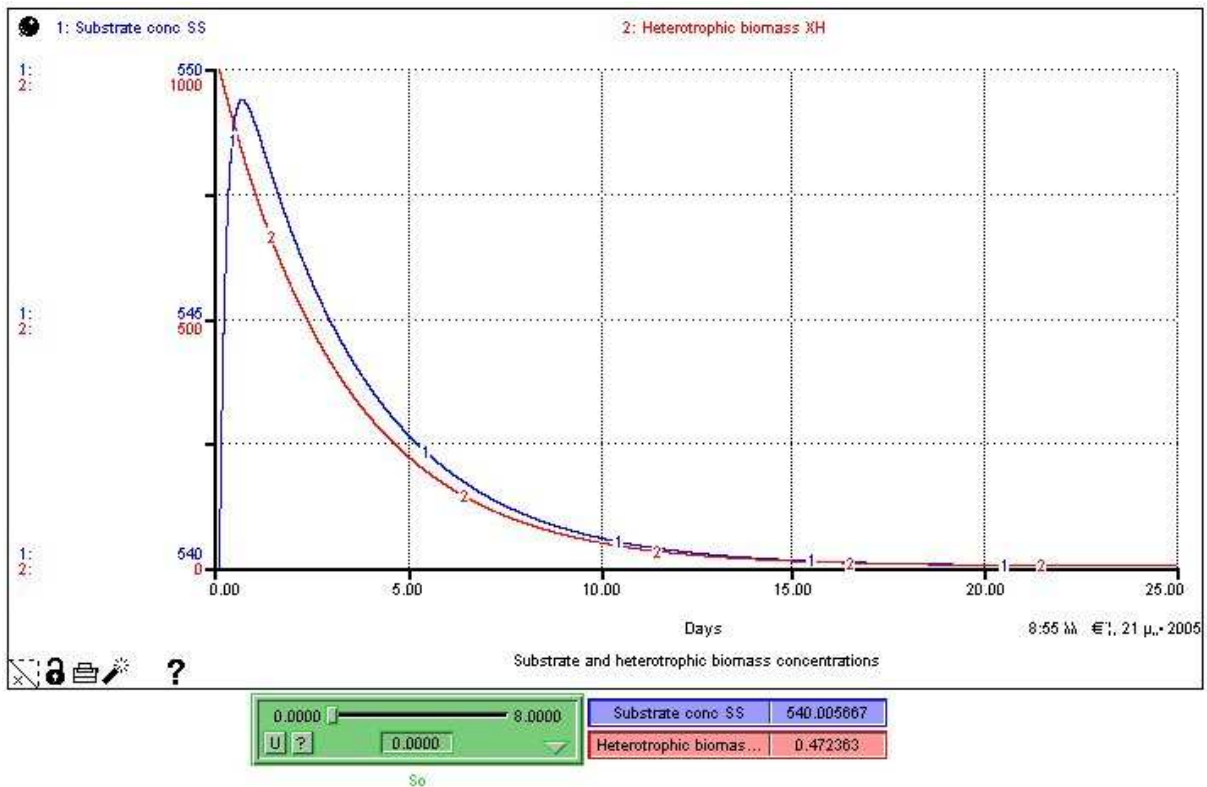
Πίνακας 8.2. Επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του οξυγόνου στις μεταβολές της συγκέντρωσης του υποστρώματος και της βιομάζας.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (gr/m <sup>3</sup> )	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (gr/m <sup>3</sup> )	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (gr/m <sup>3</sup> )
8	6,61	4681,8
2	6,89	4679,3
1	7,27	4676
0,5	8,04	4669
0,2	10,4	4647,6
0,1	15	4607
0,05	26,6	4503,1
0,03	50,9	4279,7
0,02	134	3417,7
0,015	427,8	986,8
0,01	531,6	106,3
0	540	0,47

Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο, ρυθμίζοντας τη συγκέντρωση του οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού από 0 έως  $\approx 0,05$  gr/m<sup>3</sup> μπορούμε να ρυθμίσουμε το υπόστρωμα και τη βιομάζα, ευνοώντας το ένα από τα δύο, εις βάρος του άλλου, κατά βούληση. Βέβαια οι ακραίες περιπτώσεις – όπως η μηδενική συγκέντρωση οξυγόνου – οδηγούν σε καταστροφή της ισορροπίας του συστήματος βιομάζας-υποστρώματος (σχήμα 8.4)



Σχήμα 8.3. Μέγιστη συγκέντρωση οξυγόνου (8 gr/m<sup>3</sup>).

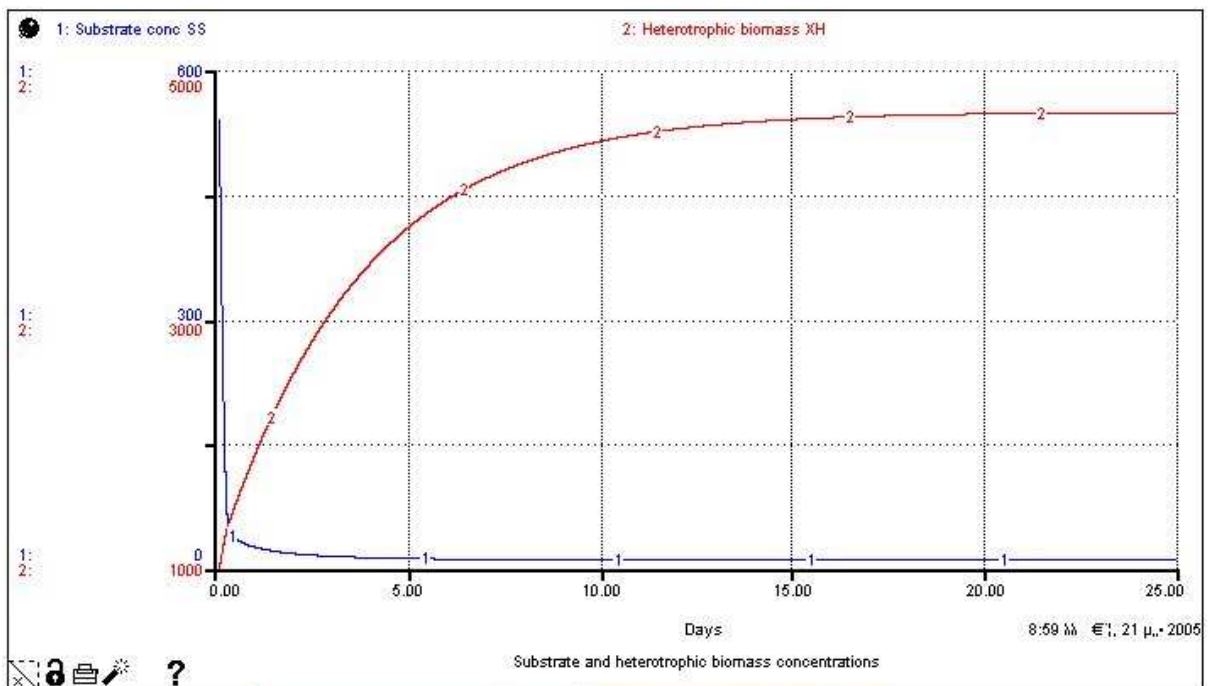


Σχήμα 8.4. Ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου ( $0 \text{ gr/m}^3$ ).

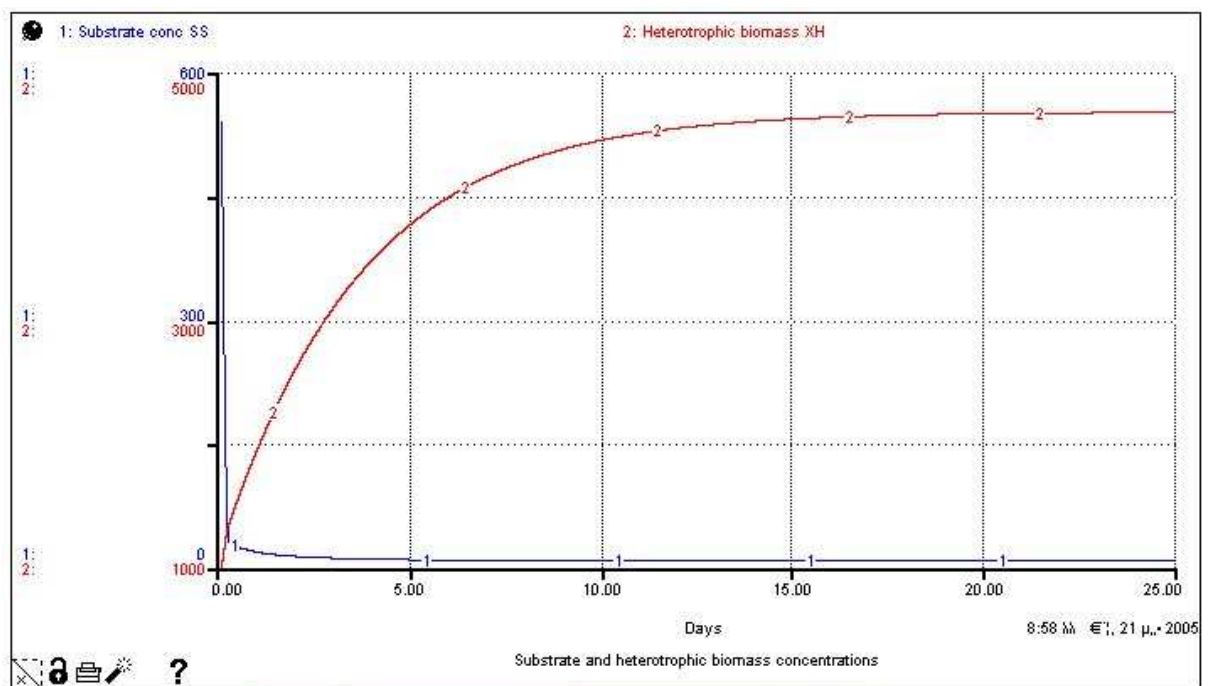
### 8.3. Συντελεστής $K_o$ (Michaelis Menten saturation constant for oxygen).

Η αύξηση του  $K_o$  από 0 σε  $0,5 \text{ gr/m}^3$  προκαλεί μικρή αύξηση του υποστρώματος και ελάχιστη μείωση της βιομάζας (σχήμα 8.5 & 8.6). Το  $K_o$  αποτελεί συντελεστή που επηρεάζει την ετερότροφη βιομάζα, δηλαδή σχετίζεται με τη συγκέντρωση της βιομάζας και δε σχετίζεται άμεσα με τη συγκέντρωση του υποστρώματος. Πιο συγκεκριμένα μέσα από την προσομοίωση παρατηρούμε, ότι η αύξηση του  $K_o$  από 0 σε  $0,5 \text{ gr/m}^3$  μειώνει ελάχιστα τη συγκέντρωση της βιομάζας από  $4.682 \text{ gr/m}^3$  σε  $4.665 \text{ gr/m}^3$ . Αντίθετα η μείωση του συντελεστή προκαλεί αύξηση της βιομάζας. Η αυξημένη βιομάζα είναι λογικό να «καταναλώνει» περισσότερο υπόστρωμα με αποτέλεσμα τη μειωμένη συγκέντρωση υποστρώματος σε σχέση με αυτή για τυπικό  $K_o$  (σχήμα 7.6). Αντίστοιχα ένας μειωμένος πληθυσμός βιομάζας «καταναλώνει» μικρότερη ποσότητα υποστρώματος και άρα η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι αυξημένη σε σχέση με αυτή για τυπικό  $K_o$  (σχήμα 7.6 & 7.7).

Το μοντέλο λοιπόν δείχνει, ότι με ρύθμιση του  $K_o$  από 0 έως  $0,5 \text{ gr/m}^3$  μπορούμε να ρυθμίσουμε σε μικρή κλίμακα και άρα με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συγκέντρωση του υποστρώματος και της βιομάζας.



Σχήμα 8.5. Μέγιστο  $K_0$  ( $0,5 \text{ gr/m}^3$ ).



Σχήμα 8.6. Ελάχιστο  $K_0$  ( $0 \text{ gr/m}^3$ ).

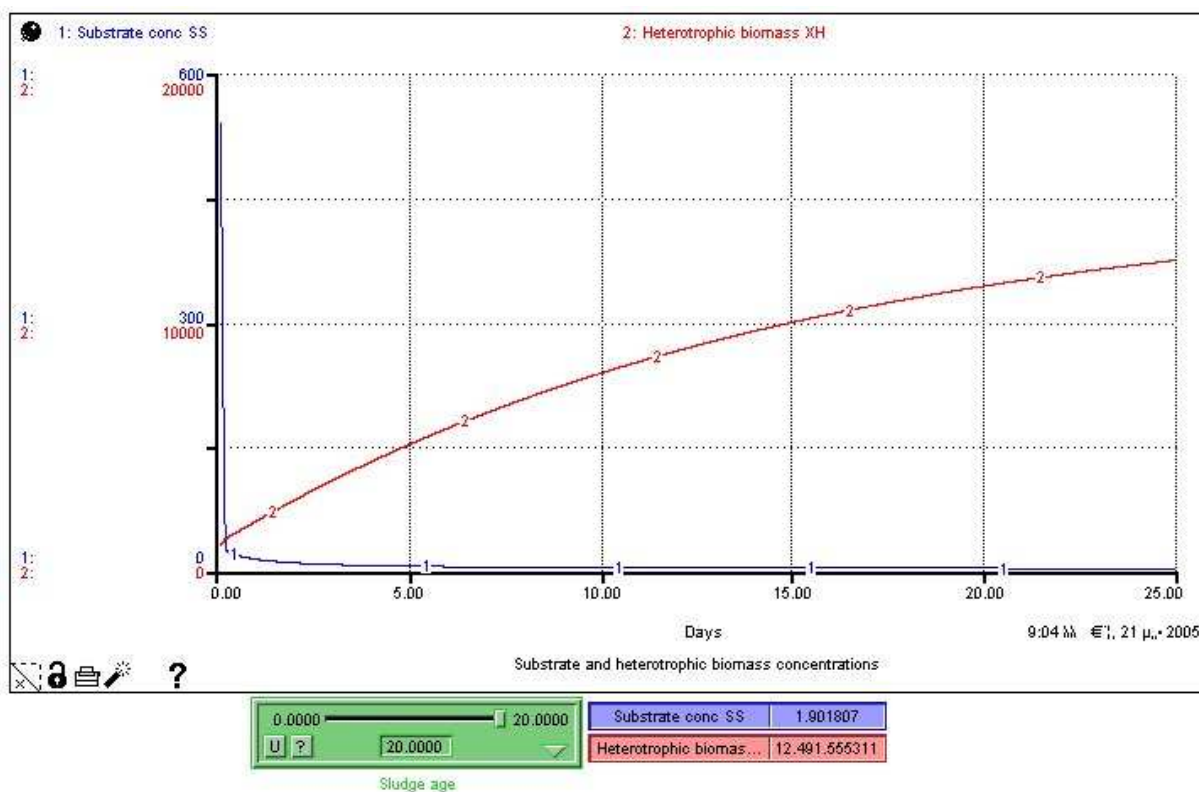


## 8.4. Ηλικία ιλύος.

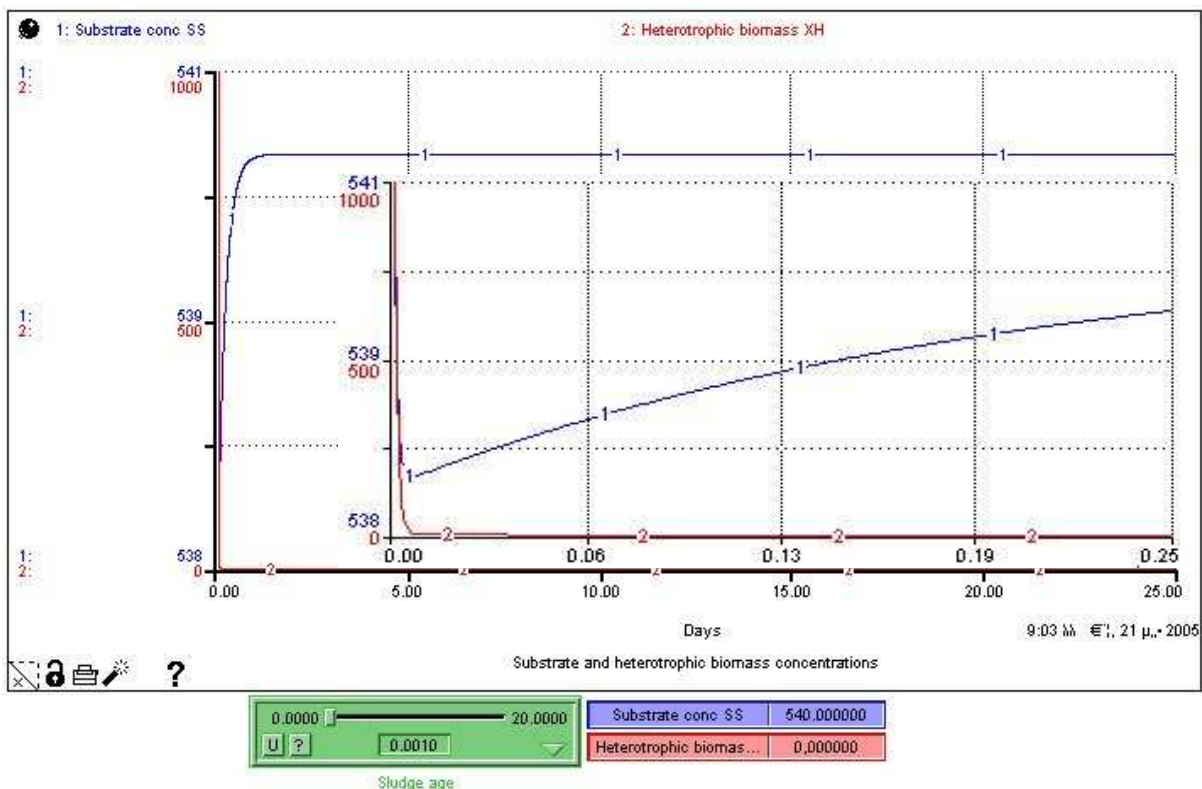
Η αύξηση της ηλικίας ιλύος από 0 σε 20 ημέρες προκαλεί αύξηση της ετερότροφης βιομάζας και μείωση του οργανικού υποστρώματος (σχήμα 8.7). Εφόσον αυξάνεται η ηλικία της ιλύος μειώνεται η ποσότητα της ιλύος που εξέρχεται (με μεταφορά) από τη δεξαμενή αερισμού, άρα η βιομάζα που παραμένει στη δεξαμενή αερισμού αυξάνεται. Όμως μεγαλύτερη ποσότητα βιομάζας «καταναλώνει» μεγαλύτερη ποσότητα υποστρώματος και έτσι η συγκέντρωση του υποστρώματος μειώνεται (σε σχέση με τη συγκέντρωση υποστρώματος για τυπική ηλικία ιλύος) (σχήμα 7.8 & 7.9).

Αντίστοιχα η μείωση της ηλικίας ιλύος από 20 σε 0 ημέρες προκαλεί μείωση της ετερότροφης βιομάζας (σχήμα 8.8). Αφού η ηλικία ιλύος είναι μικρή, η ιλύς που εξέρχεται της δεξαμενής αερισμού είναι περισσότερη και άρα η συγκέντρωση της βιομάζας είναι μικρότερη από αυτή που έχουμε για τυπική ηλικία ιλύος. Όμως λιγότερη βιομάζα «καταναλώνει» λιγότερο υπόστρωμα, άρα έχουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση υποστρώματος σε σχέση με αυτή της τυπικής ηλικίας ιλύος (σχήμα 7.8 & 7.9).

Το μοντέλο λοιπόν δείχνει, ότι μέσω της ηλικίας ιλύος σε εύρος από 0 έως 20 ημέρες, δηλαδή μέσω της ιλύος ανακυκλοφορίας, μπορούμε να ρυθμίσουμε σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη της βιομάζας στη δεξαμενή αερισμού και άρα και την αποδόμηση του οργανικού υποστρώματος (σχήμα 7.8 & 7.9).



Σχήμα 8.7. Μέγιστη ηλικία ιλύος (20 ημέρες).



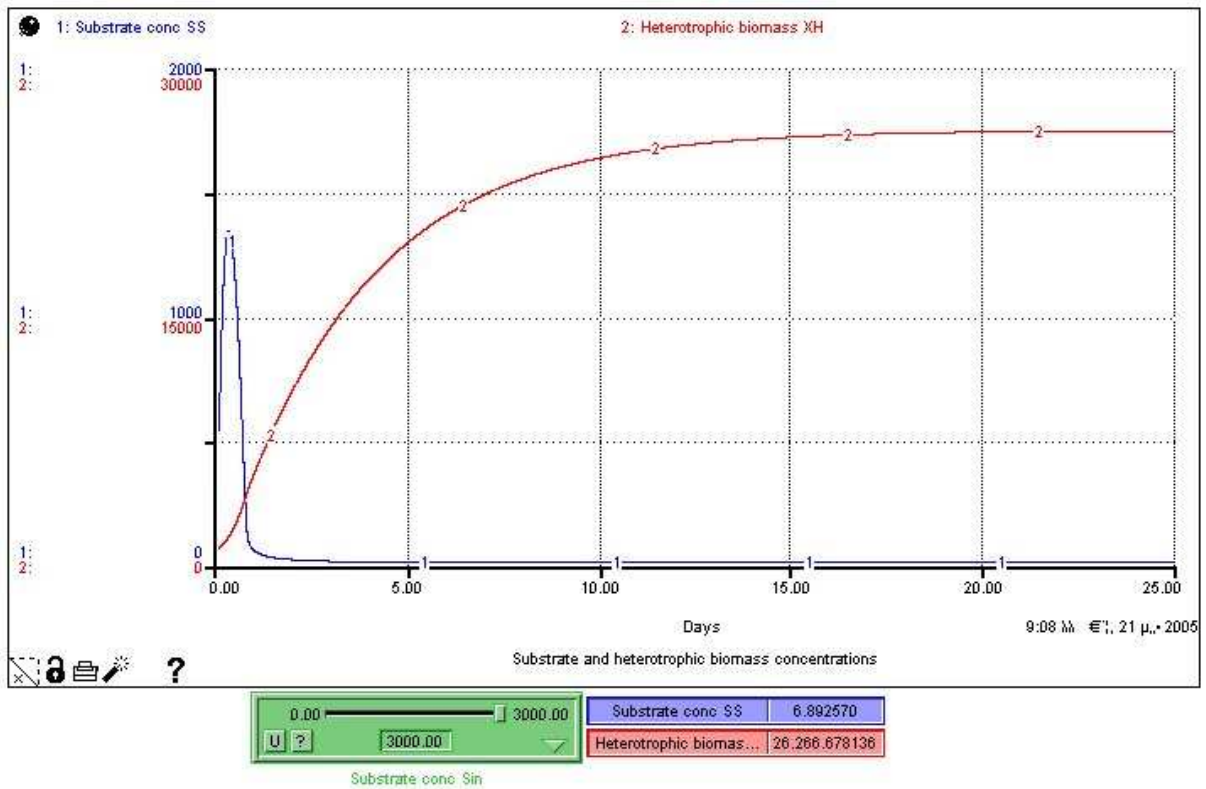
Σχήμα 8.8. Ελάχιστη ηλικία ιλύος (0,001 ημέρες) (σε μεγέθυνση οι 6 πρώτες ώρες).

## 8.5. Συγκέντρωση εισερχόμενου (στη δεξαμενή αερισμού) υποστρώματος (Substrate conc $S_{in}$ ).

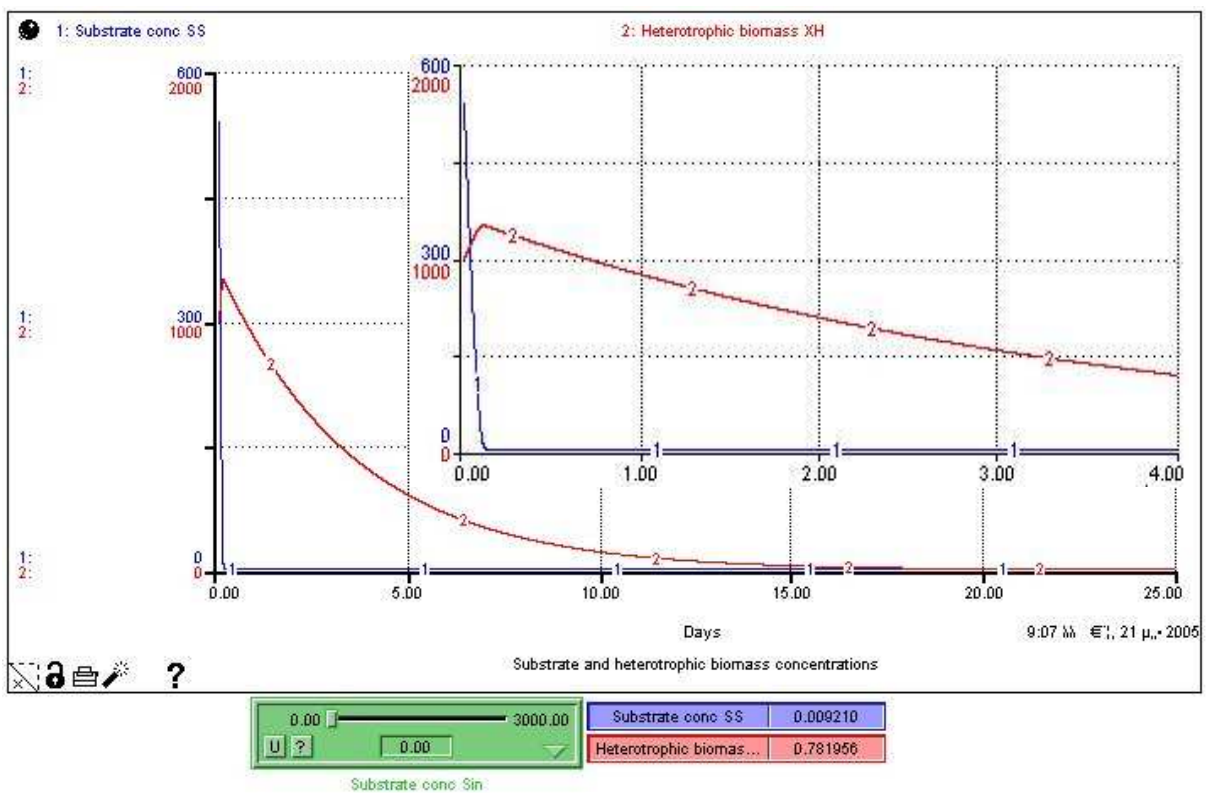
Η αύξηση του εισρέοντος υποστρώματος από 0 έως  $3.000 \text{ gr/m}^3$  αυξάνει φυσικά την ποσότητα του υποστρώματος που υπάρχει στη δεξαμενή αερισμού και οδηγεί στην μεγαλύτερη ανάπτυξη της βιομάζας, η οποία έχει πλέον περισσότερη «τροφή» για να αναπτυχθεί αφού έχει περισσότερο υπόστρωμα για να αποδομήσει-καταναλώσει. Πειραματιζόμενοι με διάφορες τιμές εισρέοντος υποστρώματος παρατηρούμε, ότι η αύξηση του πάνω από τα  $20 \text{ gr/m}^3$  δεν προκαλεί περαιτέρω αλλαγή στη συγκέντρωση του υποστρώματος στο σημείο της δυναμικής ισορροπίας.

Κατ' αντιστοιχία η μείωση του εισερχόμενου υποστρώματος από  $3.000$  σε  $0 \text{ gr/m}^3$  μειώνει φυσικά τη διαθέσιμη ποσότητα του υποστρώματος στη δεξαμενή αερισμού και οδηγεί στη μείωση της βιομάζας αφού αυτή διαθέτει πλέον λιγότερο υπόστρωμα προς «κατανάλωση». Και σε αυτήν την περίπτωση η μείωση του εισρέοντος υποστρώματος επηρεάζει τη συγκέντρωση του υποστρώματος στο σημείο της δυναμικής ισορροπίας, μόνο όταν πάρει τιμές μικρότερες από  $20 \text{ gr/m}^3$ .

Το μοντέλο προσομοίωσης λοιπόν υποδεικνύει, ότι με τη ρύθμιση της συγκέντρωσης του εισερχόμενου υποστρώματος από 0 έως  $3.000 \text{ gr/m}^3$  μπορούμε να ρυθμίσουμε την ταυτόχρονη αύξηση ή μείωση του υποστρώματος και της βιομάζας (σχήμα 7.10, 7.11, 8.9 & 8.10) μέχρις ενός ορίου (για τιμές  $S_{in}$  από 0 έως  $20 \text{ gr/m}^3$ ) και από εκεί και έπειτα ( $S_{in} > 20 \text{ gr/m}^3$ ) μπορούμε να ρυθμίσουμε μόνο την αύξηση ή μείωση της βιομάζας.



Σχήμα 8.9. Μέγιστη συγκέντρωση εισερχόμενου υποστρώματος ( $3.000 \text{ gr/m}^3$ ).

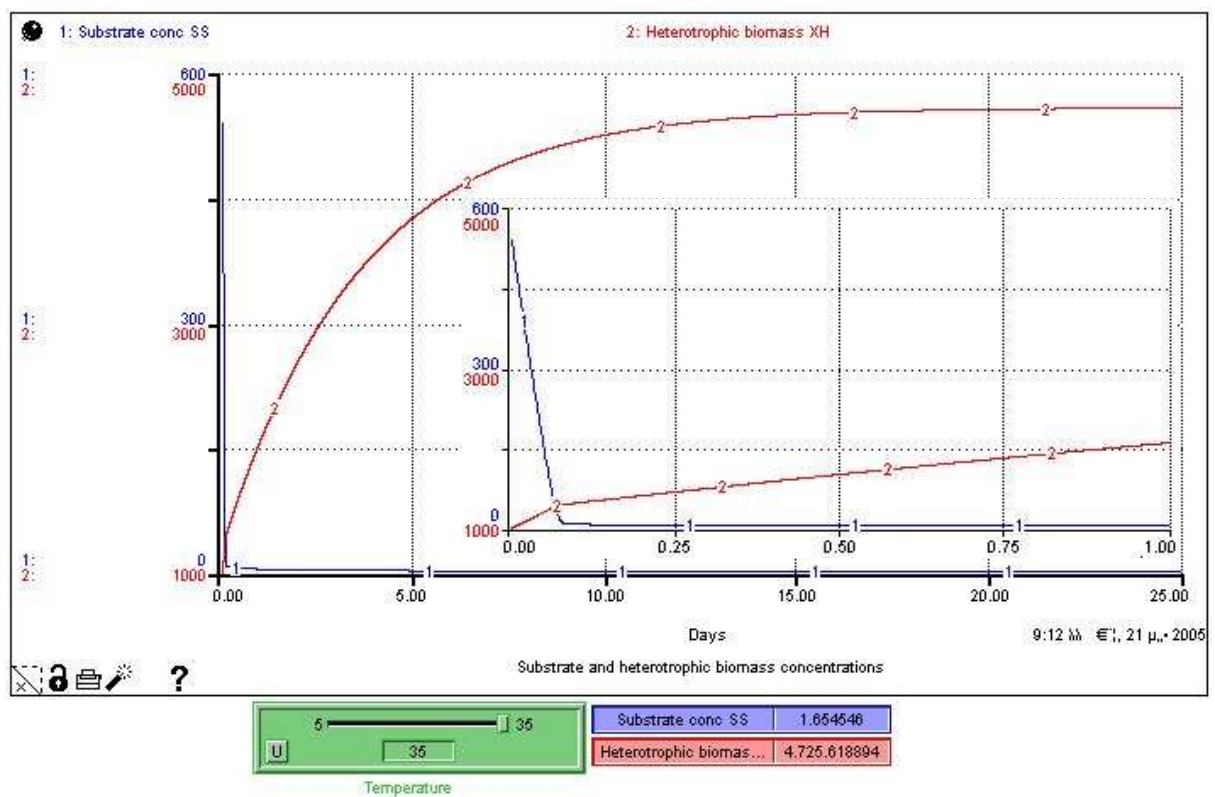


Σχήμα 8.10. Ελάχιστη συγκέντρωση εισερχόμενου υποστρώματος ( $0 \text{ gr/m}^3$ ) (σε μεγέθυνση οι 4 πρώτες ημέρες).

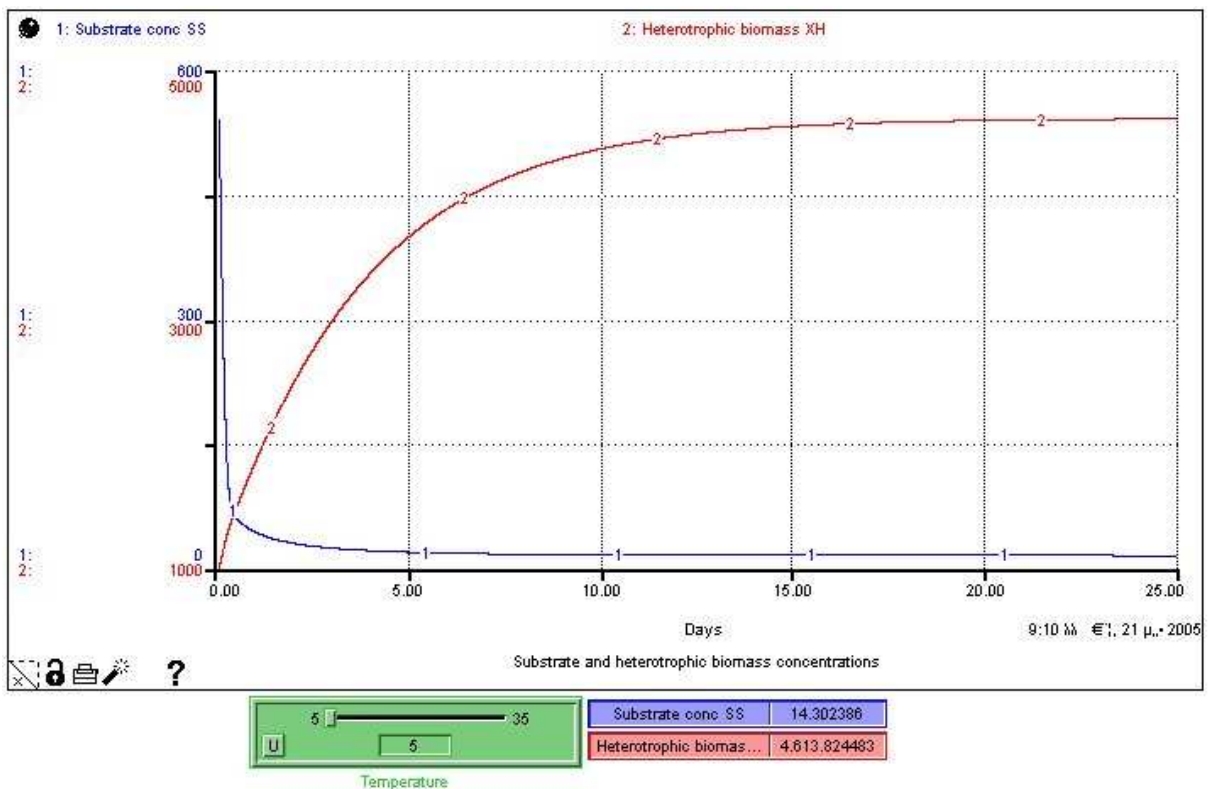
## 8.6. Θερμοκρασία.

Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 5 °C έως τους 35 °C οδηγεί σε αύξηση της βιομάζας και μείωση του υποστρώματος, ενώ η μείωση της προκαλεί τα ανάποδα αποτελέσματα (σχήμα 7.12, 7.13, 8.11 & 8.12). Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 5 °C έως τους 35 °C φαίνεται πως δρα καταλυτικά στην γρηγορότερη και ευκολότερη ανάπτυξη των βακτηρίων της βιομάζας και έτσι καταλήγουμε σε αυξημένη ποσότητα βιομάζας. Αυτή η βιομάζα όμως «καταναλώνει» περισσότερο υπόστρωμα και έτσι η συγκέντρωση του μειώνεται. Αντίστοιχα η μείωση της θερμοκρασίας από τους 35 °C έως τους 5 °C δρα ως αρνητικός καταλύτης, επηρεάζοντας αρνητικά την ανάπτυξη της βιομάζας και έτσι έχουμε μικρότερη συγκέντρωση βιομάζας και άρα μεγαλύτερη συγκέντρωση υποστρώματος, αφού αυτό αποδομείται σε μικρότερο βαθμό.

Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο, ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία στη δεξαμενή αερισμού από τους 5 °C έως τους 35 °C μπορούμε να ελέγχουμε τον πληθυσμό της βιομάζας και άρα και την αποδόμηση του υποστρώματος (σχήμα 7.12 & 7.13).



Σχήμα 8.11. Μέγιστη θερμοκρασία (35 °C) (μεγέθυνση της πρώτης ημέρας).



Σχήμα 8.12. Ελάχιστη θερμοκρασία (5 °C).

## 8.7. Αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης.

Συνοψίζοντας λοιπόν τα προαναφερθέντα αποτελέσματα διαπιστώνουμε, ότι το μοντέλο δρα λογικά και σχετικά αξιόπιστα. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου προσομοίωσης οδήγησε σε ρεαλιστικά αποτελέσματα σε όλες τις διαφορετικές θεωρητικές συνθήκες, οι οποίες εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Άρα το μοντέλο εκτιμάται ως αξιόπιστο κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκε. Παρόλα αυτά η αξιοπιστία του μοντέλου δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί πλήρως από την ανάλυση μόνο θεωρητικών δεδομένων που γίνεται στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας του μοντέλου θα χρειαστεί να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα από μια εν λειτουργία ΕΕΑΛ. Επιπλέον για να χαρακτηριστεί το μοντέλο πλήρως αξιόπιστο θα πρέπει να εξεταστεί αναλυτικά κάτω από άπειρες διαφορετικές συνθήκες προσομοίωσης, να δημιουργηθούν παραλλαγές του και να εξετασθούν και αυτές.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία:

1. Carson, R. (2002). *Silent Spring*. First Mariner Books. New York, USA.
2. Colborn, T., Dumanoski, D. and Myers, J. P. (1996). *Our Stolen Future*. Abacus. London, UK.
3. Deaton, M. & Winebrake, J. J. (2000). *Dynamic Modelling of Environmental Systems*. Springer. New York, USA.
4. Ford, A. (1999). *Modelling the environment*. Island Press. Washington, USA.
5. Gujer, W. & Henze, M. (1987). "Activated Sludge Model No. 1" - *Scientific and Technical Report No. 1*. IAWPRC. London, U.K.
6. Habekotte, B. & Lutjeboer, H. (1995). *Environmental Modelling with STELLA*. Van Hall Institute. Groningen, The Netherlands.
7. Hannon, B. & Ruth, M. (1994). *Dynamic Modelling*. Springer-Verlag. New York, USA.
8. Hannon, B. & Ruth, M. (1997). *Dynamic Modelling of Biological Systems*. Springer. New York, USA.
9. Harte, J. (1988). *Consider a Spherical Cow – A course in Environmental Problem Solving*. University Science Books. Sausalito, California, USA.
10. Harte, J. (2001). *Consider a Cylindrical Cow – More adventures in Environmental Problem Solving*. University Science Books. Sausalito, California, USA.
11. Howard, H. & Sharp, J. A. (1998), *Η Επισημοτική Μελέτη: Οδηγός Διαχείρισης Πανεπιστημιακών Ερευνητικών Εργασιών*. Εκδόσεις Gutenberg, Αθήνα, Ελλάδα.
12. HPS (High Performance Systems) (2001). *An Introduction to Systems Thinking*. Hanover, USA.
13. HPS (High Performance Systems) (2001). *STELLA Manual*. Hanover, USA.
14. Huggett, R. J. (1993). *Modelling the Human Impact on nature – Systems Analysis of Environmental Problems*. Oxford University Press. Oxford, UK.
15. Randers, J (1973). *Global Equilibrium*. Springer. New York, USA.
16. Schnoor, J. (1996). *Environmental Modeling – Fate and transport of pollutants in water, air, and soil*. Wiley-Interscience Publications. New York, USA.
17. Soltzberg, L. (1996). *The Dynamic Environment*. University Science Books. Sausalito, California, USA.
18. Terzis, E. (1999). *Environmental Modelling*. Postgraduate Course Notes. University of Bradford, Bradford, UK.
19. WAZUSIM (1995). *Windows simulation of an activated sludge wastewater treatment system*. Van Hall Institute-Dep. of simulations. Leeuwarden, The Netherlands.

### Ελληνική Βιβλιογραφία:

1. Λέκκας, Θ. (2001). *Περιβαλλοντική Μηχανική II: Διαχείριση υγρών αποβλήτων*. Κόσμος Πεμερ ΕΠΕ. Αθήνα, Ελλάδα.
2. Στάμου, Α. (1995). *Βιολογικός Καθαρισμός Αστικών Αποβλήτων*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου. Αθήνα, Ελλάδα.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακες επεξήγησης συντομογραφιών και συμβόλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία:

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
BOD	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand) [mg O <sub>2</sub> /L].
COD	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand) [mg O <sub>2</sub> /L].
DO	Διαλυμένο οξυγόνο (Diluted Oxygen) [mg O <sub>2</sub> /L].
Heterotrophic biomass X <sub>H</sub>	Ετερότροφη βιομάζα με συγκέντρωση X <sub>H</sub> [gCOD/m <sup>3</sup> ]. Ετερότροφη βιομάζα = ενεργός ιλύς.
Lysis products	Προϊόντα διάσπασης-λύσης της ετερότροφης βιομάζας.
Lysis rate b <sub>H</sub>	Ρυθμός διάσπασης της ετερότροφης βιομάζας.
MLSS	Αιωρούμενα στερεά ανάμικτου υγρού (Mixed liquor Suspended solids).
MLVSS	Αιωρούμενα οργανικά στερεά ανάμικτου υγρού (Mixed liquor volatile suspended solids, volatile: εξαερώσιμος-οργανικός).
mu <sub>Max</sub>	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας (Maximum growth rate).
S breakdown	Διάσπαση-αποδόμηση του υποστρώματος από την ετερότροφη βιομάζα.
S inflow	Εισροή υποστρώματος (μέσω των λυμάτων) από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης.
S outflow	Εκροή υποστρώματος στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης.
Substrate conc S <sub>in</sub>	Συγκέντρωση του υποστρώματος στα εισρέοντα λύματα.
Substrate conc S <sub>S</sub>	Διαλυμένο οργανικό υπόστρωμα με συγκέντρωση S <sub>s</sub> [gCOD/m <sup>3</sup> ].
X <sub>H</sub> growth	Αερόβια αύξηση της ετερότροφης βιομάζας με κατανάλωση οργανικού υποστρώματος.
X <sub>H</sub> Lysis	Διάσπαση (lysis) της ετερότροφης βιομάζας.
X <sub>H</sub> outflow	Εκροή ιλύος (τιμήμα της ιλύος εξέρχεται του συστήματος σαν περίσσεια ιλύος - waste sludge).
ANAY	Αντλιοστάσιο ανάμικτου υγρού.
ANΔ	Αναερόβια δεξαμενή φωσφόρου.
ANΛ	Αντλιοστάσιο λάσπης.
ΑΟΔ	Ανοξική δεξαμενή.
BA	Βιολογικός αντιδραστήρας.
ΔΑ	Δεξαμενή αερισμού.
ΔΕΒ	Δεξαμενή επιλογής βακτηριδίων.
ΔΚ	Δεξαμενή καθίζησης.
ΔΠΧ	Δεξαμενή πάχυνσης.
ΔΧΛ	Χλωρίωση / Δεξαμενή χλωρίωσης.
ΕΕΑΛ	Εγκατάσταση Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων.
EI	Ενεργός ιλύς.
H-M	Ηλεκτρομηχανικός.
ΚΑΑ	Κεντρικός αποχετευτικός αγωγός.

ΚΞ	Κλίνες ξήρανσης.
μ/ο	Μικροοργανισμοί.
ΟΤ	Οξειδωτικές τάφροι.
ΠΚ	Περιστρεφόμενος κύλινδρος πάχυνσης λάσπης.
TB	Ταινία βαρύτητας.
TΦ	Ταινιοφιλτρόπρεςες.
ΦΔ1	Φρεάτιο διανομής 1.
ΦΔ2	Φρεάτιο διανομής 2.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
$a = \frac{Q_r}{Q}$	Ποσοστό ανακύκλωσης βιομάζας (τιμές συνήθως μικρότερες της μονάδας).
$b_H$	Σταθερά ρυθμού διάσπασης (σήψης) ετερότροφης βιομάζας [1/ημέρα].
$C = \frac{X_r}{X}$	Συντελεστής συμπύκνωσης της βιομάζας ή ενεργού ιλύος (τιμές μεγαλύτερες της μονάδας).
D	Αναλογία αραίωσης ή παροχή ανά μονάδα όγκου (Q/V). Αντίστροφο του υδραυλικού χρόνου παρακράτησης θ.
DX	Ταχύτητα απομάκρυνσης της βιομάζας λόγω υπερχείλισης [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].
dX/dt	Ταχύτητα αύξησης βιομάζας [ $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ].
(dx/dt) <sub>20</sub>	Ταχύτητα αύξησης βιομάζας στους 20 °C.
(dx/dt) <sub>T</sub>	Ταχύτητα αύξησης στους T °C.
f	Ρυθμός εισροής και εκροής νερού [ $\text{m}^3$ /ημέρα].
K	Ειδική ταχύτητα χρήσης υποστρώματος (Σταθερά αναλογίας χρήσης. Αύξηση μάζας μ/ο ανά μονάδα μάζας υποστρώματος και χρόνου) [ $\text{s}^{-1}$ ].
K'	Συντελεστής αναλογίας ανάλογος του μ.
K <sub>1</sub>	Συντελεστής παρεμπόδισης για συγκεκριμένη ουσία (συγκέντρωση παρεμπόδισης που προκαλεί το 1/2 της μέγιστης παρεμπόδισης) [ $\text{kg m}^{-3}$ ].
K <sub>d</sub>	Ειδική ταχύτητα αποσύνθεσης. Συντελεστής αποσύνθεσης των βακτηρίων ανάλογος του μ [ $\text{s}^{-1}$ ].
K <sub>m</sub>	Ειδική ταχύτητα κατανάλωσης υποστρώματος που αντιστοιχεί στη $\mu_m$ [ $\text{s}^{-1}$ ].
K <sub>o</sub>	Συντελεστής-σταθερά κορεσμού για οξυγόνο του Michael Menten (Michaelis Menten saturation constant for oxygen) [ $\text{gr m}^{-3}$ ].
K <sub>s</sub>	Συγκέντρωση υποστρώματος όταν $\mu = 1/2 \mu_m$ . Σταθερά κορεσμού για το οργανικό υπόστρωμα (Saturation constant for substrate) του Michaelis Menten [ $\text{kg m}^{-3}$ ].
P	Φώσφορος.
Q	Παροχή εισόδου (του δοχείου βιολογικής αύξησης) [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
Q <sub>r</sub>	Παροχή ανακυκλοφορίας της ιλύος [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].



Q/V	Αναλογία αραίωσης ή παροχή ανά μονάδα όγκου. Συμβολίζεται με D και είναι το αντίστροφο του υδραυλικού χρόνου παρακράτησης $\theta$ .
Q <sub>w</sub>	Παροχή της απομακρυνόμενης ιλύος (περίσσεια ιλύος) [m <sup>3</sup> /h].
QX	Ταχύτητα αλλαγής που οφείλεται στην υπερχειλίση.
r <sub>g</sub>	Ταχύτητα βακτηριακής αύξησης [kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ].
r <sub>s</sub>	Ταχύτητα χρήσης υποστρώματος [kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ].
S	Συγκέντρωση υποστρώματος [kg m <sup>-3</sup> ].
S <sub>e</sub>	Συγκέντρωση του υποστρώματος στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα [kg m <sup>-3</sup> ].
S <sub>i</sub>	Συγκέντρωση του υποστρώματος στην είσοδο του βιοαντιδραστήρα [kg m <sup>-3</sup> ].
S <sub>in</sub>	Συγκέντρωση υποστρώματος στα εισρέοντα (ρευστά) [gCOD/m <sup>3</sup> ].
S <sub>o</sub>	Συγκέντρωση οξυγόνου [gr/m <sup>3</sup> ].
S <sub>s</sub>	Συγκέντρωση υποστρώματος [gCOD/m <sup>3</sup> ].
U	Ταχύτητα χρήσης του υποστρώματος (ή σχέση τροφής προς μ/ο).
V	Όγκος του δοχείου βιολογικής αύξησης.
V(dX/dt)	Ολική ταχύτητα αλλαγής της βιομάζας X.
VK <sub>d</sub> X	Ταχύτητα αλλαγής που οφείλεται στην αποσύνθεση.
V <sub>μ</sub> X	Ταχύτητα αλλαγής που οφείλεται στην αναπαραγωγή και αύξηση των μ/ο.
X	Συγκέντρωση βιομάζας [kg m <sup>-3</sup> ].
X <sub>e</sub>	Συγκέντρωση της βιομάζας στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα [kg/m <sup>3</sup> ].
X <sub>H</sub>	Συγκέντρωση βιομάζας [gCOD/m <sup>3</sup> ].
X <sub>m</sub>	Μέγιστη τιμή συγκέντρωσης βιομάζας.
X <sub>o</sub>	Βιομάζα για χρονική στιγμή t = 0.
X <sub>r</sub>	Η βιομάζα στην απομακρυνόμενη ενεργό ιλύ (περίσσεια ιλύος) [kg/m <sup>3</sup> ].
Y	Συντελεστής απόδοσης αύξησης (growth yield). Δηλώνει τη βιομάζα που παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιημένου υποστρώματος.
Y <sub>H</sub>	Εμπειρικός συντελεστής ετερότροφης παραγωγής (empirical heterotrophic yield coefficient). Εμπειρική απόδοση της μετατροπής του υποστρώματος σε βιομάζα [M <sub>COD,H</sub> /M <sub>COD,S</sub> ].
Y <sub>o</sub>	Φαινομενικός Συντελεστής απόδοσης αύξησης. Δηλώνει τη βιομάζα που παρατηρείται να παράγεται ανά μονάδα μάζας χρησιμοποιημένου υποστρώματος (Παρατηρούμενος συντελεστής μετατροπής του υποστρώματος σε βιομάζα).
α	Ποσοστό ανακύκλωσης (λυμάτων), έχει συνήθως τιμές μικρότερες του 1.
θ	Μέσος υδραυλικός χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερισμού ( $\theta = 1/D$ , D: αναλογία αραίωσης).
θ <sub>c</sub>	Μέση ηλικία της βιομάζας. Μέσος χρόνος παραμονής των κυττάρων στη δεξαμενή αερισμού.
Θ	Συντελεστής θερμοκρασίας. Παίρνει τιμές 1,04 για την ενεργό ιλύ,

	1,08 για τις λίμνες αερισμού και 1,035 για τα βιολογικά φίλτρα.
$\mu$	Ειδική ταχύτητα αύξησης (σταθερά αναλογίας αύξησης : αύξηση μάζας μ/ο ανά μονάδα μάζας μ/ο και χρόνου) [ $s^{-1}$ ].
$\mu'$	Φαινόμενη Ειδική ταχύτητα αύξησης (που παρατηρείται). Περιλαμβάνει δηλαδή και την απώλεια βιομάζας λόγω αποδόμησης της ίδιας της βιομάζας.
$\mu_m$	Μέγιστη δυνατή τιμή της ειδικής ταχύτητας αύξησης [ $s^{-1}$ ].
$\mu_X$	Ταχύτητα αύξησης της βιομάζας που οφείλεται στην αναπαραγωγή και αύξηση των μ/ο [ $kg\ m^{-3}\ s^{-1}$ ].