

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων

Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας
της Λίμνης Πλαστήρα

Τεύχος 3: Μελέτη ποιότητας νερού

Αθήνα, Μάρτιος 2002

Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα

Περίοδος εκτέλεσης: Μάιος 2001 - Ιανουάριος 2002

Προϋπολογισμός: 18 000 000 δραχμές (€ 52 825) συμπερ. ΦΠΑ

Ανάθεση: Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καρδίτσας και Δήμος Καρδίτσας

Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Επιστημονικός υπεύθυνος: Κ. Χατζημπίρος

Κύριος ερευνητής: Δ. Κουτσογιάννης

Συμμετείχαν: Α. Ανδρεαδάκης, Α. Κατσίρη, Α. Στάμου, Α. Βαλασσόπουλος, Ε. Γαβαλάκη, Α. Ευστρατιάδης, Ι. Κατσίρης, Μ. Καπετανάκη, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Κ. Νουτσόπουλος, Γ.-Φ. Σαργέντης, Α. Χριστοφίδης

Όλα τα τεύχη του ερευνητικού έργου θα είναι διαθέσιμα από 12 Ιουλίου 2002 στη διεύθυνση

<http://www.itia.ntua.gr/g/projinfo/77/>. Επιπλέον πληροφορίες για το έργο, όπως το σύνολο των φωτογραφιών που τραβήχτηκαν στα πλαίσια της μελέτης, θα διατίθενται στη διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/2002plastiras/>.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μέρος Ι: Μοντέλο EUTRO-SEL	1
1 Εισαγωγή	3
2 Περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου	4
2.1 Γενική δομή μοντέλου ευτροφισμού - διαλυμένου οξυγόνου	4
2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Λίμνης Πλαστήρα	5
2.3 Δομή του μοντέλου ως προς τις διεργασίες.....	7
2.4 Εξωτερικές μεταβλητές	30
3 Σενάρια εφαρμογής του μαθηματικού μοντέλου	38
4 Αποτελέσματα-σχολιασμός	39
Βιβλιογραφία	48
Μέρος ΙΙ: Μοντέλο MERES	51
1 Εισαγωγή	53
2 Περιγραφή μαθηματικού μοντέλου	54
2.1 Δεδομένα του μοντέλου.....	54
2.2 Εξισώσεις του μοντέλου.....	63
3 Βαθμονόμηση μαθηματικού μοντέλου	96
3.1 Διαδικασία βαθμονόμησης	96
3.2 Σχόλια – σύγκριση.....	98
4 Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου	99
5 Συμπεράσματα	110
Βιβλιογραφία	111
Παράρτημα Α	113

Μέρος ΙΙΙ: Διαχείριση υγρών αποβλήτων λεκάνης απορροής	117
1 Περιοχή μελέτης – Πληθυσμοί	119
2 Αρχές επεξεργασίας – Ομαδοποιήσεις	121
3 Απαιτήσεις επεξεργασίας	122
4 Βασικές εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας	123
4.1 Μεμονωμένοι οικισμοί ή συγκροτήματα <500 κατοίκων	123
4.2 Οικισμοί μεγαλύτεροι των 1000 κατοίκων.....	125
4.3 Περιγραφή μονάδας επεξεργασίας	130
4.4 Επιφανειακή άρδευση.....	130
5 Κόστος	132
6 Φορτία	133

Μέρος Ι: Μοντέλο EUTRO-SEL

Α. Ανδραδάκης, Κ. Νουτσόπουλος, Ε. Γαβαλάκη

1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο ‘Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα’ που ανατέθηκε στον Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου από τη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση και το Δήμο της Καρδίτσας, σημαντικό τμήμα αποτέλεσε η εκτίμηση και διερεύνηση της εξέλιξης της τροφικής κατάστασης της Λίμνης Πλαστήρα. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή κατάλληλης μαθηματικής προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδάτινου σώματος της λίμνης. Η μελέτη της μαθηματικής προσομοίωσης εκπονήθηκε από ομάδα ειδικών ερευνητών, αποτελούμενη από τους Ανδρέα Ανδρεάδη Καθηγητή ΕΜΠ, Κώστα Νουτσόπουλο Πολιτικό Μηχανικό Υγειονολόγο-MSc και Ευγενία Γαβαλάκη Πολιτικό Μηχανικό Υγειονολόγο-MSc.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα μοντέλο ευτροφισμού-διαλυμένου οξυγόνου (EUTRO-SEL) το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας (Sanitary Engineering Laboratory) του ΕΜΠ και το οποίο προσαρμόστηκε στα συγκεκριμένα δεδομένα της παρούσας εργασίας.

Στα Κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται μια περιγραφή της δομής του μαθηματικού μοντέλου (Κεφ. 2), των εναλλακτικών σεναρίων που εξετάστηκαν (Κεφ. 3) καθώς και παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της μαθηματικής προσομοίωσης.

2 Περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου

2.1 Γενική δομή μοντέλου ευτροφισμού - διαλυμένου οξυγόνου

Το μαθηματικό μοντέλο (EUTRO-SEL) που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στις διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που επιτελούνται και που περιγράφονται με κατάλληλους όρους σε εξισώσεις συνεχείας για κάθε χημική ή βιολογική μεταβλητή που υπεισέρχεται. Το μοντέλο διαμορφώθηκε με βάση τις αρχές διατήρησης και συνέχειας της μάζας και διακρίνει δυο βασικούς τύπους διαδικασιών. Η πρώτη κατηγορία διαδικασιών αφορά σε μεταβολές συγκεντρώσεων σε ένα κλειστό σύστημα λόγω διαταραχής μιας κατάστασης ισορροπίας. Η ταχύτητα των μεταβολών μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια κινητικών εξισώσεων που εξαρτώνται από τις συγκεντρώσεις, τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η δεύτερη κατηγορία επιφέρει μεταβολές στις συγκεντρώσεις λόγω φαινομένων μεταφοράς ύλης (μεταγωγή, διασπορά, καθίζηση). Η αρχή της συνέχειας μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$\begin{array}{l} \text{Συσσώρευση} \\ \text{μάζας} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Καθαρή είσοδος} \\ \text{μάζας λόγω} \\ \text{μεταγωγής} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Καθαρή είσοδος} \\ \text{μάζας λόγω} \\ \text{διασποράς} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Μεταβολή} \\ \text{μάζας λόγω} \\ \text{αντιδράσεων} \\ \text{και καθίζησης} \end{array} \quad (1)$$

και με μαθηματική μορφή :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla EVC - \nabla VC \pm r \quad (2)$$

όπου : C = συγκέντρωση (g/m^3)

t = χρόνος (days)

E = συντελεστής διασποράς (m^2/day)

V = ταχύτητα (m/day)

r = μεταβολή λόγω αντιδράσεων ή καθίζησης ($\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$)

Η άμεση επίλυση της εξίσωσης (2) σε φυσικά υδάτινα συστήματα είναι συνήθως αδύνατη. Η επίλυση διευκολύνεται με τη θεώρηση του συνεχούς υδάτινου μέσου ως δικτύου πεπερασμένων στοιχείων πλήρους μίξης που έχει ως συνέπεια τη δυνατότητα μετατροπής των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές ή απλές διαφορικές εξισώσεις. Στη μορφή αυτή η εξίσωση συνέχειας για κάθε στοιχείο μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$V_k \frac{dC_k}{dt} = \sum \left| -Q_k (a_{kj}C_k + \beta_{kj}C_j) + E'_{kj} (C_j - C_k) \right| \pm r_k \pm w_k \quad (3)$$

όπου :

C_k = συγκέντρωση στο στοιχείο k (g/m³)

C_j = συγκέντρωση στο στοιχείο j σε επαφή με το στοιχείο k (g/m³)

V_k = όγκος στοιχείου k (m³)

Q_{kj} = καθαρή είσοδος λόγω μεταγωγής από στοιχείο k στο j (m³/day)

a_{kj} = συντελεστής (αδιάστατος)

$\beta_{kj} = 1 - a_{kj}$

E_{kj} = συντελεστής διασποράς (m²/day)

A_{kj} = επιφάνεια διατομής μεταξύ k και j (m²)

$E'_{kj} = E_{kj} A_{kj}/L_{kj}$ (m³/day)

L_k = μήκος στοιχείου k (m)

L_j = μήκος στοιχείου j (m)

r_k = ταχύτητα μεταβολής (m/day)

W_k = φόρτιση στοιχείου k (g/day)

$L_{kj} = (L_k + L_j)/2$ (m)

Η μεθοδολογία αυτή οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων που περιγράφει τη μεταφορά και τις αντιδράσεις κάθε ρύπου σε ένα στοιχείο. Ο τρόπος επίλυσης εξαρτάται τόσο από τη μορφή των κινητικών εξισώσεων όσο και από το εάν απαιτείται επίλυση για μόνιμες ή δυναμικές συνθήκες. Για τη δεύτερη περίπτωση η οποία και εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αναγκαία η αριθμητική ολοκλήρωση.

2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Λίμνης Πλαστήρα

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου η λίμνη Πλαστήρα θεωρήθηκε ως ένα εννιαίο στοιχείο πλήρους μίξης, με αποτέλεσμα οι διεργασίες της μεταγωγής και της διασποράς να

παραληφθούν. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον υπολογισμό των διαστάσεων της λίμνης, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η γεωμετρία της μεταβάλλεται χρονικά συναρτήσει των εισροών και των απολήψεων.

Από την ανάλυση των στοιχείων της υδρολογικής μελέτης, που αφορούν στη γεωμετρία της λίμνης και στη συσχέτιση όγκου (V), στάθμης ύδατος (ΣΥ) και επιφάνειας (E), προέκυψαν οι ακόλουθες σχέσεις, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της μαθηματικής προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών της λίμνης Πλαστήρα (Σχήματα 1-2):

$$\Sigma Y(t) = 770,572 - 0,0000593 \times V(t)^2 + 0,0791136 \times V(t) \quad (4)$$

$$E(t) = 0,843184 \times \Sigma Y(t) - 643,22 \quad (5)$$

όπου $\Sigma Y(t)$: η στάθμη του νερού στη λίμνη στο χρόνο t σε m

$V(t)$: ο όγκος του νερού στη λίμνη στο χρόνο t σε εκατομ. m^3

$E(t)$: η επιφάνεια της λίμνης στο χρόνο t σε εκατομ. m^2

Ο υπολογισμός του όγκου της λίμνης σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$V(t+\Delta t) = V(t) + \Delta Q \times \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta Q = Q_{\text{εισορών}} - Q_{\text{απολήψεων}} \quad (7)$$

όπου $V(t+\Delta t)$: ο όγκος του νερού στη λίμνη στο χρόνο (t+Δt) σε εκατομ. m^3

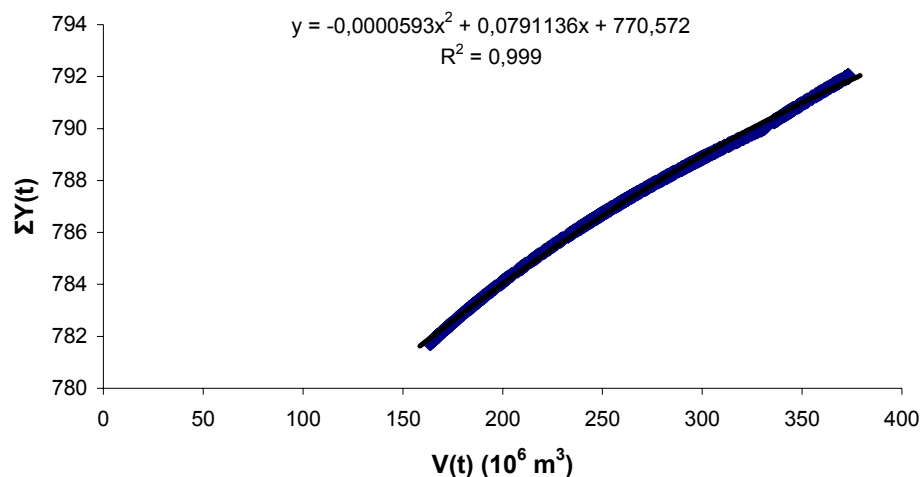
$V(t)$: ο όγκος του νερού στη λίμνη στο χρόνο t σε εκατομ. m^3

ΔQ : η μεταβολή της παροχής στο χρονικό βήμα Δt σε εκατομ. m^3 / ημέρα

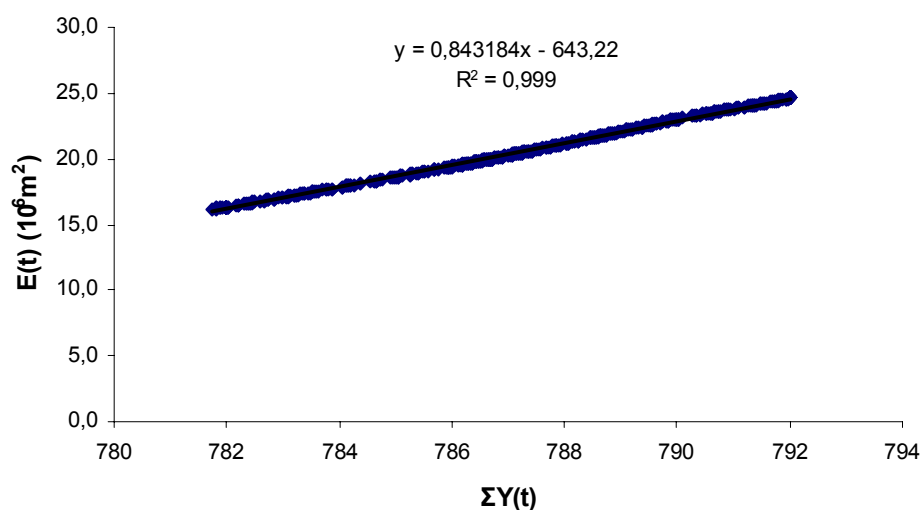
Δt : χρονικό βήμα σε ημέρες

$Q_{\text{εισορών}}$: η παροχή του συνόλου των εισροών στη λίμνη Πλαστήρα σε εκατομ. m^3 / ημέρα

$Q_{\text{απολήψεων}}$: η παροχή του συνόλου των απολήψεων από τη λίμνη Πλαστήρα σε εκατομ. m^3 / ημέρα



Σχήμα 1: Συσχέτιση στάθμης-όγκου στη λίμνη Πλαστήρα



Σχήμα 2: Συσχέτιση στάθμης-επιφάνειας στη λίμνη Πλαστήρα

2.3 Δομή του μοντέλου ως προς τις διεργασίες

Για την επίλυση των εξισώσεων 3, είναι απαραίτητη η έκφραση των διεργασιών που επιτελούνται. Οι ρύποι και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν είναι το φυτοπλαγκτόν (σε όρους χλωροφύλλης), το αμμωνιακό και οξειδωμένο άζωτο (NH και NO αντίστοιχα), ο οργανικός και ανόργανος φώσφορος (OP και IP αντίστοιχα), ο οργανικός άνθρακας (C) και το διαλυμένο οξυγόνο (DO). Παράλληλα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας των πυθμενικών αποθέσεων με προσδιορισμό της χρονικής μεταβολής του φυτοπλαγκτόν, του αζώτου και του φωσφόρου που αναπτύσσονται σε αυτές.

Οι διεργασίες που μελετήθηκαν είναι εκείνες που έχουν την σημαντικότερη επίδραση στη μεταβολή των συγκεντρώσεων και των τιμών των ρύπων και των δεικτών ποιότητας που αναφέρθηκαν.

2.3.1 Φυτοπλαγκτόν

Το φυτοπλαγκτόν χαρακτηρίζεται το σύνολο των αλγών χωρίς διακρίσεις κατά κατηγορίες, και εκφράζεται σε όρους χλωροφύλλης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης εξαρτάται κυρίως από τους μηχανισμούς της ανάπτυξης, της ενδογενούς αναπνοής, του θανάτου και της καθίζησης. Λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα αυτά το υπομοντέλο του φυτοπλαγκτόν μπορεί σχηματικά να περιγραφεί όπως στο Σχήμα 3.

Η ταχύτητα ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και τα θρεπτικά συστατικά N, P. Μια πολλαπλή σχέση Monod είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη για την περιγραφή της επίδρασης των θρεπτικών.

Έτσι προκύπτει ότι :

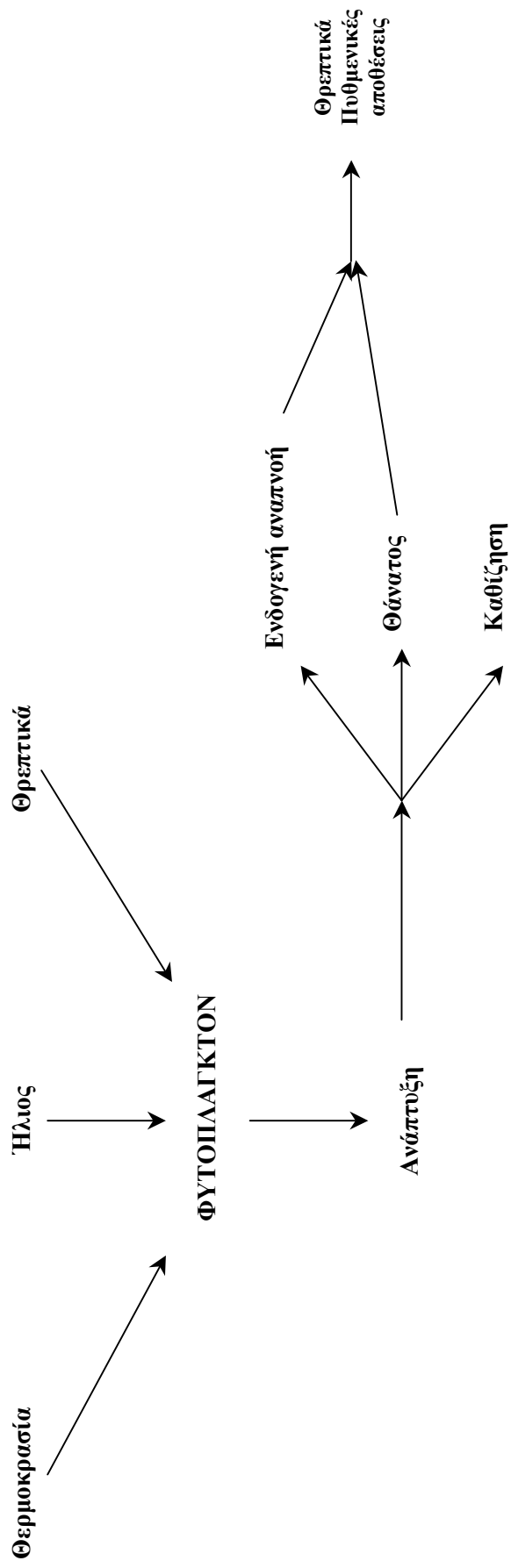
$$\mu = \mu_{\max} f(T) f(I) \frac{N}{K_N + N} \frac{P}{K_P + P} \quad (8)$$

Η επίδραση της θερμοκρασίας περιγράφεται από τη σχέση :

$$\mu_{\max(T)} = \mu_{\max(20)} A_1^{(T-20)} \quad (9)$$

όπου $\mu_{\max(T)}$ = μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης σε T°C(day⁻¹)

$\mu_{\max(20)}$ = μέγιστη ταχύτητα ανάπτυξης σε 20°C(day⁻¹)



Σχήμα 3: Υπομοντέλο Φυτοπλαστικού

A_1 = θερμοκρασιακός συντελεστής (αδιάστατος)

T = θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)

όπως έχει αποδειχθεί από πολλές πειραματικές μελέτες η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ρυθμό της φωτοσύνθεσης είναι άμεση. Αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας που δέχονται τα κύτταρα προκαλεί εντονότερα φαινόμενα φωτοσύνθεσης και αντίστροφα, ελάττωση της έντασης της ακτινοβολίας προκαλεί αναστολή της φωτοσύνθεσης.

Προσεκτική παρατήρηση στη συμπεριφορά των κυττάρων στις διακυμάνσεις της ακτινοβολίας έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι αύξηση της ακτινοβολίας πέραν κάποιας τιμής, έστω I_s , έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ρυθμών φωτοσύνθεσης λόγω αναχαίτισης. Η αναχαίτιση αυτή οφείλεται κυρίως σε καταστροφές στη δομή του παραλήπτη της ακτινοβολίας, δηλαδή της χλωροφύλλης, λόγω της μεγάλης έντασης ακτινοβολίας που δέχεται. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη μεταβολής του ρυθμού φωτοσύνθεσης και συνεπώς της ταχύτητας ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν, σε συνάρτηση με την ένταση της ακτινοβολίας.

Καμπύλες της μορφής του σχήματος 4 προσεγγίζονται με εξισώσεις της μορφής:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{I}{I_s} e^{-\frac{I}{I_s} + 1} \quad (10)$$

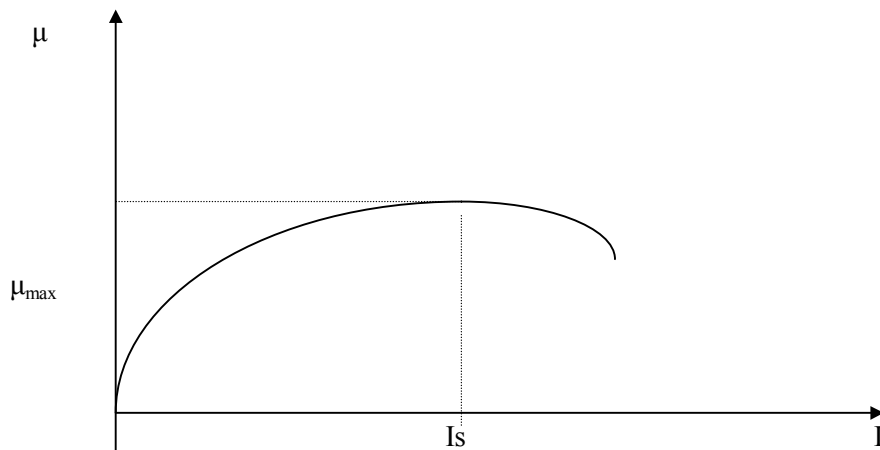
Η ακτινοβολία I την οποία δέχονται τα άλγη είναι μικρότερη από την ακτινοβολία I_0 που προσπίπτει στην επιφάνεια, λόγω της μείωσής της κατά τη δίοδο της από την υδάτινη μάζα. Η ακτινοβολία σε βάθος, H , I_H , σχετίζεται με την ακτινοβολία στην επιφάνεια, το I_0 , με τη βοήθεια της σχέσης :

$$I_H = I_0 e^{-KH} \quad (11)$$

όπου :

H το βάθος (μέτρα)

K = συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας (μέτρα^{-1})



Σχήμα 4 : Συσχέτιση ταχύτητας ανάπτυξης φυτοπλαγκτόν και ηλιακής ακτινοβολίας

Η σταθερά απόσβεσης K μπορεί να αναλυθεί σε δύο επί μέρους συνιστώσες :

$$K = K_w + K_A \times A \quad (12)$$

όπου :

K_w = η σταθερά απόσβεσης λόγω του νερού και των αιωρούμενων σ' αυτό στερεών (μέτρα⁻¹)

K_A = η σταθερά απόσβεσης που οφείλεται στη συγκέντρωση της χλωροφύλλης (1/mg.μέτρο)

Για να περιγραφεί η ταχύτητα ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν που βρίσκεται σε ένα στρώμα νερού βάθους H , είναι απαραίτητη η ολοκλήρωση της σχέσης (10) ως προς το βάθος (μεταβαλλόμενο I). Από την ολοκλήρωση προκύπτει η σχέση :

$$\mu = \mu_{\max} \frac{e}{HK} (e^{a_1} - e^{a_0}) \quad (13)$$

$$\text{όπου : } a_1 = -\frac{I_0}{I_s} e^{-KH} \quad (14)$$

$$a_0 = -\frac{I_0}{I_s} \quad (15)$$

Η ένταση της ακτινοβολίας I_0 παρουσιάζει έντονη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ένας συνήθης τρόπος αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου συνίσταται στη χρησιμοποίηση της μέσης ημερήσιας έντασης ακτινοβολίας \bar{I}_0 με ταυτόχρονη χρήση της φωτοπεριόδου F (κλάσμα ημέρας), όποτε οι σχέσεις (13)-(15) γράφονται :

$$\mu = \mu_{\max} \frac{Fe}{HK} (e^{a_1} - e^{a_0}) \quad (16)$$

$$a_1 = -\frac{I_0}{I_s} e^{-KH} \quad (17)$$

$$a_0 = -\frac{I_0}{I_s} \quad (18)$$

Με βάση τα παραπάνω, η σχέση (8) γράφεται :

$$\mu = \mu_{\max(20)} A_1^{(T-20)} \frac{Fe}{HK} (e^{a_1} - e^{a_0}) \frac{N}{K_N + N} \frac{P}{K_P + P} \quad (19)$$

Η μείωση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης θεωρείται ότι επέρχεται με δύο μηχανισμούς : την ενδογενή αναπνοή και τον θάνατο.

Η ταχύτητα ενδογενούς αναπνοής αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τόσο εκθετικές όσο και γραμμικές σχέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή αυτής της εξάρτησης. Η σχέση που εφαρμόστηκε έχει τη μορφή :

$$R_A = R_{A0} + A_2 T \quad (20)$$

Η ταχύτητα θανάτου εξαρτάται και αυτή από τη θερμοκρασία. Η εκθετική σχέση που εφαρμόστηκε έχει τη μορφή :

$$K_{dA} = K_{dA(20)} A_3^{(T-20)} \quad (21)$$

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στο μοντέλο δεν υπεισέρχεται η κατανάλωση του φυτοπλαγκτόν από το ζωοπλαγκτόν. Η παράλειψη αυτή, αν και θεωρητικά είναι αρκετά σημαντική, εν τούτοις μπορεί να αντιμετωπισθεί ικανοποιητικά με θεώρηση αυξημένου τόσο

του συντελεστή $K_{dA(20)}$ όσο και του συντελεστή A_3 , όπως θα φανεί κατά την εκτίμηση των παραμέτρων.

Οι απώλειες του φυτοπλαγκτόν λόγω καθίζησης περιγράφονται με τη βοήθεια του συντελεστή K_{SA} , ο οποίος εύκολα αποδεικνύεται ότι συσχετίζεται με την ταχύτητα καθίζησης, με τη βοήθεια της σχέσης :

$$K_{SA} = V_A / H \quad (22)$$

όπου : V_A = ταχύτητα καθίζησης φυτοπλαγκτόν (μέτρα/ημέρα)

H = βάθος (μέτρα)

Συχνά χρησιμοποιείται ένας διορθωτικός αδιάστατος συντελεστής, FFA, ο οποίος εκφράζει εμπειρικά την εποχιακή μεταβολή της ταχύτητας καθίζησης λόγω διαφορών τύρβης, θερμοκρασίας και μορφολογικών χαρακτηριστικών των κυττάρων που καθιζάνουν.

$$K_{SA} = V_A / H \cdot FFA \quad (23)$$

Ο συντελεστής FFA έχει θεωρηθεί προς το παρόν ίσος με τη μονάδα, ελλείψει στοιχείων που θα επέτρεπαν τον προσδιορισμό του. Έχει εν τούτοις ληφθεί υπόψη ένας παράγοντας που επιδρά στην ποσότητα της καθιζάνουσας ιλύος και που σχετίζεται με το φαινόμενο της επαναιώρησης. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε μικρά βάθη. Έτσι έχει προταθεί και έχει χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο η ακόλουθη συσχέτιση της ταχύτητας καθίζησης και του βάθους :

$$V_A = V_{Amax} \cdot H / (H+B) \quad (24)$$

όπου B είναι το βάθος (μέτρα) για το οποίο η ταχύτητα καθίζησης γίνεται ίση με το μισό της μεγίστης.

Σύμφωνα, επομένως, με τα παραπάνω η εξίσωση διατήρησης της μάζας για τη χλωροφύλλη σε κάθε χρονική στιγμή t μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\frac{dA}{dt} = \mu A - K_{dA} A + R_A A - K_{SA} A + \frac{W}{V} A \quad (25)$$

όπου : A = η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στη λίμνη (g/m^3)

$V(t)$ = ο όγκος της λίμνης στο χρόνο t (m^3)
 μ = συντελεστής ταχύτητας ανάπτυξης (day^{-1})
 K_{dA} = συντελεστής ταχύτητας θανάτου (day^{-1})
 K_{SA} = συντελεστής ταχύτητας καθίζησης (day^{-1})
 R_A = συντελεστής ταχύτητας ενδογενούς αναπνοής (day^{-1})
 W_A = εξωτερική φόρτιση χλωροφύλλης στη λίμνη (g/day)

Ειδικότερα,

$$W_A = Q_{\text{εισροής}} \times A_{\text{εισροής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times A_{\text{απολήψεων}} \quad (26)$$

όπου : $A_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$A_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στο νερό των απολήψεων.

Είναι $A_{\text{εισροής}} = 0$ και $A_{\text{απολήψεων}} = A$

Όσον αφορά στο φυτοπλαγκτόν που αναπτύσσεται στον πυθμένα της τεχνητής λίμνης και προσμετρά κυρίως το φαινόμενο ανάπτυξης των προσκολλημένων μακροφυκών, για τις ανάγκες του παρόντος μοντέλου θεωρήθηκε ότι αναπτύσσεται σε αναλογία με το φυτοπλαγκτόν του υδάτινου σώματος. Έτσι η ανάπτυξη του εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία σε συγκεκριμένο όμως βάθος H , τη θερμοκρασία και τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών αζώτου και φωσφόρου στις πυθμενικές αποθέσεις. Οι απώλειες του φυτοπλαγκτόν των πυθμενικών αποθέσεων σχετίζονται με τα φαινόμενα θανάτου και ενδογενούς αναπνοής τα οποία με τη σειρά τους συντελούν στην τροφοδότηση των πυθμενικών αποθέσεων με θρεπτικά.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή όλων των παραμέτρων (θερμοκρασιακών, κινητικών, κ.α.) πραγματοποιήθηκε βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας (Larsen 1974, Canale 1974, Chen et al., 1975, Thomann 1975, Gargas 1976, O' Connor 1976, Orlob 1983, Dugdale 1985) και της εμπειρίας της ερευνητικής ομάδας από μελέτες σε διάφορα υδάτινα σώματα (Ανδρεαδάκης et al., 1986, Ανδρεαδάκης et al., 1998, Ανδρεαδάκης et al., 1998, Νουτσόπουλος et al., 1997).

2.3.2 Φώσφορος

Ο φώσφορος στο υδάτινο περιβάλλον εμφανίζεται με τη μορφή του οργανικού ή ανόργανου φωσφόρου και με σωματιδιακή μορφή. Η ποσοτική κατανομή μεταξύ των διαφόρων μορφών εξαρτάται από τις βιολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες που επιτελούνται. Εσωτερικές πηγές του σωματιδιακού οργανικού φωσφόρου είναι: α) τα υπολείμματα της χρήσης του φυτοπλαγκτόν από το ζωοπλαγκτόν, β) ο θάνατος του ζωοπλαγκτόν και γ) η χρήση του ζωοπλαγκτόν από ανώτερους οργανισμούς. Απώλειες του σωματιδιακού φωσφόρου οφείλονται κυρίως στην καθίζηση και στη μετατροπή του σε διαλυμένο οργανικό φώσφορο. Οι κυριότερες πηγές του διαλυμένου οργανικού φωσφόρου είναι ο θάνατος και η αναπνοή του φυτοπλαγκτόν και η μετατροπή του οργανικού σωματιδιακού φωσφόρου σε διαλυμένο ενώ οι απώλειες συνίστανται στη μετατροπή του σε ανόργανο διαλυμένο φώσφορο.

Ο ανόργανος διαλυμένος φώσφορος είναι η μορφή που μπορεί να προσληφθεί από το φυτοπλαγκτόν και προέρχεται κυρίως από τη μετατροπή του οργανικού διαλυμένου σε ανόργανο.

Έχει παρατηρηθεί ότι η μετατροπή του σωματιδιακού οργανικού φωσφόρου σε διαλυμένο οργανικό φώσφορο γίνεται ταχύτατα μέσω μηχανισμών ενζυμικής υδρόλυσης. Το γεγονός αυτό καθιστά την υδρόλυση μη κρίσιμη διαδικασία που μπορεί να παραλειφθεί κατά τη μαθηματική προσομοίωση. Θεωρούνται κατά συνέπεια δύο μορφές φωσφόρου, οργανικός και ανόργανος φώσφορος.

Η τροφοδότηση με οργανικό φώσφορο λόγω θανάτου και ενδογενούς αναπνοής του φυτοπλαγκτόν μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση :

$$\frac{dOP}{dt} = (K_{dA} + R_A) A Y_1 \quad (27)$$

όπου : OP = συγκέντρωση οργανικού φωσφόρου (mg/l)

K_{dA}, R_A = συντελεστές ταχυτήτων θανάτου και ενδογενούς αναπνοής φυτοπλαγκτόν ($\eta\mu^{-1}$)

A = συγκέντρωση χλωροφύλλης (mg/l)

Y_1 = περιεκτικότητα φυτοπλαγκτόν σε φώσφορο (mgP/mg χλωροφύλλης)

Επισημαίνεται ότι η αυξημένη τιμή του K_{dA} επιτρέπει την προσμέτρηση του φωσφόρου που παράγεται από το ζωοπλαγκτόν, κατά το σκεπτικό της προηγούμενης ενότητας.

Οι απώλειες του οργανικού φωσφόρου οφείλονται στη μετατροπή του σε ανόργανη μορφή .
 Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση :

$$\frac{dOP}{dt} = -R_p OP \quad (28)$$

όπου : R_p = συντελεστής ταχύτητας μετατροπής οργανικού
 φωσφόρου σε ανόργανο ($\eta\mu^{-1}$)

Ο συντελεστής R_p θεωρήθηκε εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία

$$R_p = R_{p0} + A_5^T \quad (29)$$

όπου : R_{p0} = τιμή του συντελεστή για $T = 0^\circ\text{C}$ ($\eta\mu^{-1}$)

T = θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$)

A_5 = θερμοκρασιακός συντελεστής

Η συνολική δίαιτα του οργανικού φωσφόρου προκύπτει με εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας :

$$\frac{dOP}{dt} = (K_{dA} + R_A)AY_1 - R_p OP - K_{SP} OP + \frac{W_{OP}}{V} \quad (30)$$

$$\text{Είναι : } W_{OP} = Q_{\text{εισροής}} \times OP_{\text{εισροής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times OP_{\text{απολήψεων}} \quad (31)$$

όπου : $OP_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση του οργανικού φωσφόρου στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$OP_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση του οργανικού φωσφόρου στο νερό των απολήψεων.

Είναι $OP_{\text{εισροής}} = 0$ και $OP_{\text{απολήψεων}} = OP$

Η εσωτερική τροφοδότηση με ανόργανο φώσφορο οφείλεται στη μετατροπή του οργανικού σε ανόργανο φώσφορο και στην τροφοδότηση με ανόργανο φώσφορο από τις πυθμενικές αποθέσεις. Η πρώτη διαδικασία, δίνεται από την εξίσωση (28).

Οι απώλειες του ανόργανου φωσφόρου οφείλονται στην πρόσληψη του από το φυτοπλαγκτόν, κατά την εξίσωση :

$$\frac{dIP}{dt} = \mu Y_1 A \quad (32)$$

Η δίατα του ανόργανου φωσφόρου μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

$$\frac{dIP}{dt} = R_p OP - \mu Y_1 A + \frac{W_{IP}}{V} \quad (33)$$

$$\text{Είναι : } W_{IP} = Q_{\text{εισροής}} \times IP_{\text{εισροής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times IP_{\text{απολήψεων}} \quad (34)$$

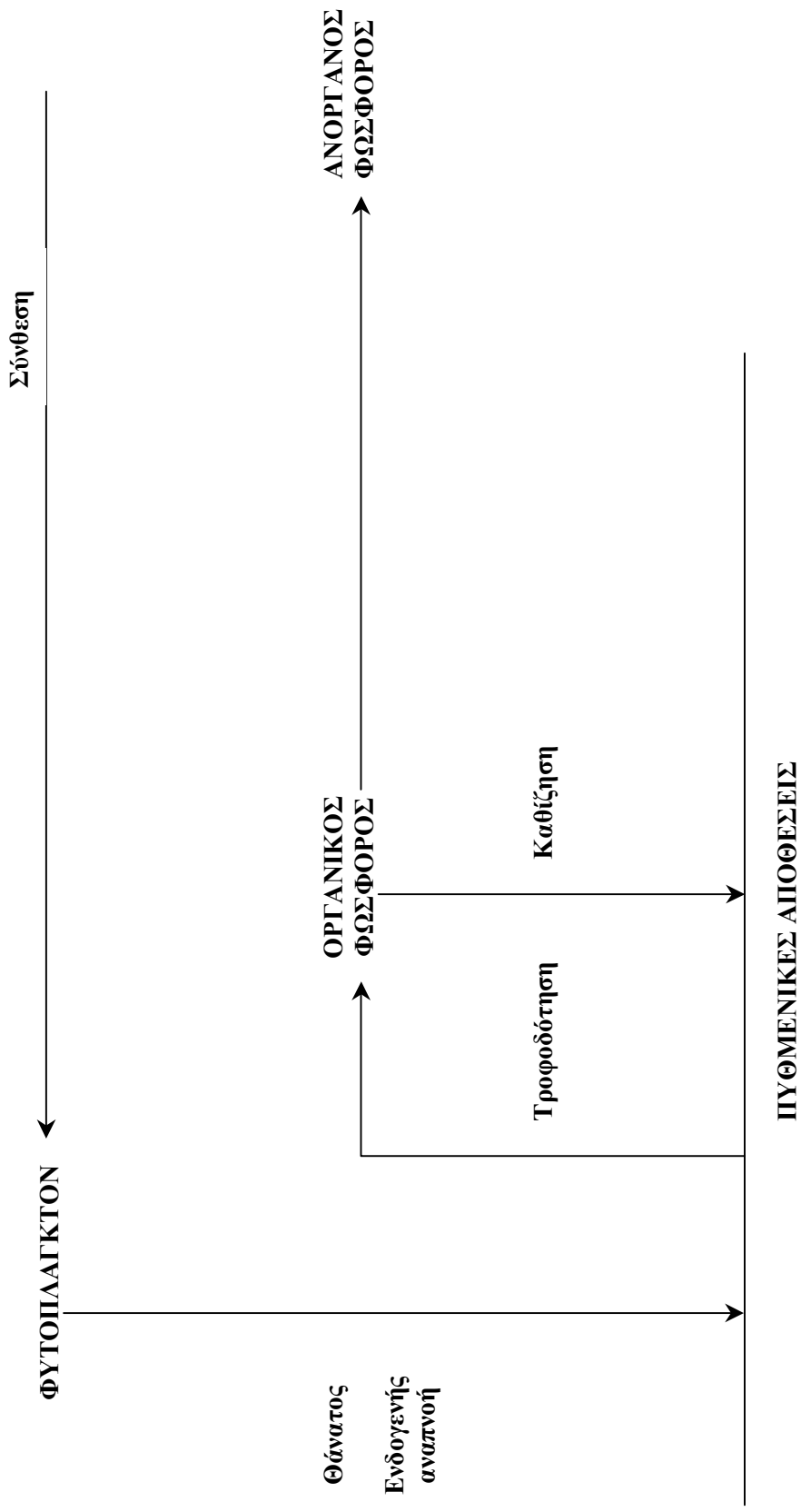
όπου : $IP_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση του ανόργανου φωσφόρου στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$IP_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση του ανόργανου φωσφόρου στο νερό των απολήψεων.

Είναι $IP_{\text{απολήψεων}} = IP$

Στο Σχήμα 5 περιγράφεται αναλυτικά το υπομοντέλο του φωσφόρου όπως αυτό αναλύεται στις προηγούμενες παραγράφους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή όλων των παραμέτρων (θερμοκρασιακών, κινητικών, κ.α.) πραγματοποιήθηκε βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας (Di Toro 1971, Nyholm 1973, Larsen 1974, Canale 1974, Thomann 1975, Canale 1976, O' Connor 1978) και της εμπειρίας της ερευνητικής ομάδας από μελέτες σε διάφορα υδάτινα σώματα (Ανδρεαδάκης et al., 1986, Ανδρεαδάκης et al., 1998, Ανδρεαδάκης et al., 1998, Νουτσόπουλος et al., 1997).



Σχήμα 5: Υπομοντέλο Φωσφόρου

2.3.3 Άζωτο

Το άζωτο εμφανίζεται κατά κύριο λόγο ως οργανικό, αμμωνιακό και οξειδωμένο (νιτρώδη και νιτρικά) άζωτο με ποσοτική κατανομή που εξαρτάται από τις διεργασίες και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Σε αυτή τη φάση της μελέτης θεωρήθηκε επαρκής η θεώρηση δύο μόνων μορφών αζώτου, του αμμωνιακού αζώτου και των νιτρικών. Η απλούστευση αυτή βασίζεται επίσης στο γεγονός ότι η διαδικασία της αμμωνιοποίησης γίνεται κατά κανόνα με σημαντικά ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με τις άλλες διεργασίες.

Εσωτερικές πηγές αμμωνιακού αζώτου κανονικά δεν υπάρχουν, δεδομένου ότι τα περιττώματα του ζωοπλαγκτόν καθώς και ο θάνατος τόσο του ζωοπλαγκτόν όσο και του φυτοπλαγκτόν δημιουργούν οργανικό άζωτο. Επειδή όμως για τους λόγους που προαναφέρθηκαν δεν χρησιμοποιείται εξίσωση ισορροπίας για το οργανικό άζωτο στη φάση αυτή θεωρείται ότι οι παραπάνω διεργασίες συνεισφέρουν στην δημιουργία αμμωνιακού αζώτου, κάτι που οπωσδήποτε, εμπεριέχεται στην αυξημένη ταχύτητα θανάτου του φυτοπλαγκτόν. Κατά συνέπεια η δημιουργία αμμωνιακού αζώτου περιγράφεται από τη σχέση :

$$\frac{dNH}{dt} = Y_2 K_{dA} A \quad (35)$$

όπου : Y_2 = περιεκτικότητα φυτοπλαγκτόν σε άζωτο (mg NH/mg χλωροφύλλης)

NH = συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου (mg/l)

A = συγκέντρωση χλωροφύλλης (mg/l)

Οι απώλειες του αμμωνιακού αζώτου οφείλονται στις διαδικασίες πρόσληψης κατά τη σύνθεση του φυτοπλαγκτόν και στη νιτροποίηση, δηλαδή τη βιοχημική οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου πρώτα σε νιτρώδη (NO_2) και στη συνέχεια σε νιτρικά (NO_3). Για τις τιμές του pH που επικρατούν, η διαφυγή αμμωνίας στην ατμόσφαιρα είναι αμελητέα.

Η χρησιμοποίηση του αμμωνιακού αζώτου από το φυτοπλαγκτόν εξαρτάται από την ποσοστιαία κατανομή των μορφών του ανόργανου αζώτου και συγκεκριμένα από τον λόγο αμμωνιακού αζώτου προς τα νιτρικά. Έχει προταθεί η χρήση ενός συντελεστή P_{NH} , ο οποίος εξαρτάται από τον παραπάνω λόγο, και ο οποίος εκφράζει την προτίμηση των αλγών προς

την αμμωνία σε σχέση με την προτίμηση τους προς τα νιτρικά. Η σχέση που δίνει τον συντελεστή P_{NH} είναι η ακόλουθη :

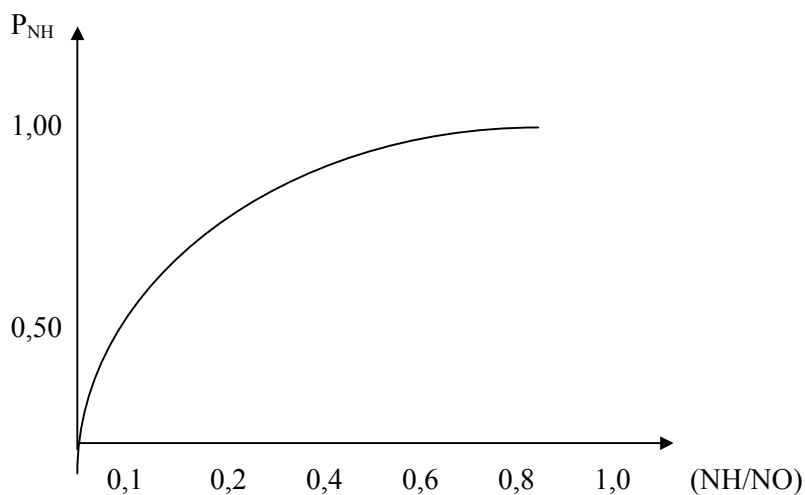
$$P_{NH} = \frac{0,96(NH)}{0,96(NH)+0,04(NO)} \quad (36)$$

όπου : P_{NH} = συντελεστής (αδιάστατος)

NH = συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου (mg/l)

NO = συγκέντρωση νιτρικών (mg/l)

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης (36) φαίνεται στο σχήμα 6 που ακολουθεί :



Σχήμα 6 : Σχέση P_{NH} προς NH/NO

Η χρησιμοποίηση του αμμωνιακού αζώτου από το φυτοπλαγκτόν μπορεί επομένως να εκφραστεί ως εξής :

$$\frac{dNH}{dt} = -\mu Y_2 P_{NH} A \quad (37)$$

Η δεύτερη διαδικασία που συντελεί στη μείωση του αμμωνιακού αζώτου είναι η νιτροποίηση που μπορεί για τις μικρές συγκεντρώσεις που παρατηρούνται στα υδάτινα οικοσυστήματα να περιγραφεί με κινητική πρώτης τάξης :

$$\frac{dNH}{dt} = -R_N NH \quad (38)$$

όπου : R_N = συντελεστής της νιτροποίησης

Είναι γνωστό ότι η διαδικασία της νιτροποίησης επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία με την οποία συνεπώς θα πρέπει να συσχετισθεί ο συντελεστής R_N . Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε είναι εκθετικής μορφής :

$$R_N = R_{N(20)} A_6^{(T-20)} \quad (39)$$

Η συνολική δίαιτα του αμμωνιακού αζώτου προκύπτει με εφαρμογή της σχέσης (3)

$$\frac{dNH}{dt} = -\mu Y_2 P_{NH} A - R_N NH + Y_2 K_{dA} A \quad \frac{W_{NH}}{V} \quad (40)$$

$$\text{Είναι : } W_{NH} = Q_{\text{εισορής}} \times NH_{\text{εισορής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times NH_{\text{απολήψεων}} \quad (41)$$

όπου : $NH_{\text{εισορής}}$: η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$NH_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου στο νερό των απολήψεων.

$$\text{Είναι } NH_{\text{απολήψεων}} = NH$$

Η εσωτερική δημιουργία νιτρικών οφείλεται στη διαδικασία της νιτροποίησης η οποία περιγράφεται από τη σχέση (38). Οι απώλειες οφείλονται στη χρησιμοποίηση των νιτρικών από το φυτοπλαγκτόν και την απονιτροποίηση.

Η μείωση λόγω πρόσληψης από το φυτοπλαγκτόν μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\frac{dNO}{dt} = -Y_2 \mu (1-P_{NH}) A \quad (42)$$

όπου : NO = συγκέντρωση νιτρικού αζώτου (mg/l)

Η απονιτροποίηση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται από τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (ανοξικές συνθήκες) και την επάρκεια οργανικού άνθρακα και που έχει ως αποτέλεσμα την αναγωγή των νιτρικών σε μοριακό άζωτο και τη διαφυγή του τελευταίου

στην ατμόσφαιρα. Συχνά σε μοντέλα ποιότητας υδάτινων αποδεκτών χρησιμοποιείται η απλή σχέση :

$$\frac{dNO}{dt} = -K_{DN} E / V \quad (43)$$

όπου : K_{DN} = συντελεστής απονιτροποίησης ($\text{mgN}/\eta\mu/\text{m}^2$)

Με βάση τα παραπάνω και με εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας η δίατα των νιτρικών μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

$$\frac{dNO}{dt} = -Y_2\mu(1-P_{NH})A - K_{DN}E/V + R_NNH + \frac{W_{NO}}{V} \quad (44)$$

$$\text{Είναι : } W_{NO} = Q_{\text{εισροής}} \times NO_{\text{εισροής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times NO_{\text{απολήψεων}} \quad (45)$$

όπου : $NO_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση των νιτρικών στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$NO_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση των νιτρικών στο νερό των απολήψεων.

Είναι $NO_{\text{απολήψεων}} = NO$

Στο Σχήμα 7 περιγράφεται το υπομοντέλο του αζώτου όπως αυτό προσομοιώθηκε από το παρόν μοντέλο.

2.3.4 Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)

Ο οργανικός άνθρακας εκφρασμένος σε όρους BOD_5 βρίσκεται σε σωματιδιακή ή διαλυμένη μορφή και προέρχεται (εκτός από τις εξωτερικές συνεισφορές) από τον θάνατο του φυτοπλαγκτόν και το θάνατο και τα περιττώματα του ζωοπλαγκτόν. Η μετατροπή του σωματιδιακού BOD_5 σε διαλυμένο γίνεται με σχετικά μεγάλη ταχύτητα με τη βοήθεια εξωκυτταρικών υδρολυτικών ενζύμων. Σε αυτή τη φάση της μελέτης δεν γίνεται διάκριση μεταξύ σωματιδιακού και διαλυμένου BOD_5 , θεωρείται δε ότι η διεργασία του θανάτου του φυτοπλαγκτόν με την αυξημένη ταχύτητα με την οποία περιγράφεται περιλαμβάνει όλες τις εσωτερικές διαδικασίες παραγωγής BOD που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Επίσης οργανικός άνθρακας παράγεται λόγω τροφοδότησης από πυθμενικές αποθέσεις.

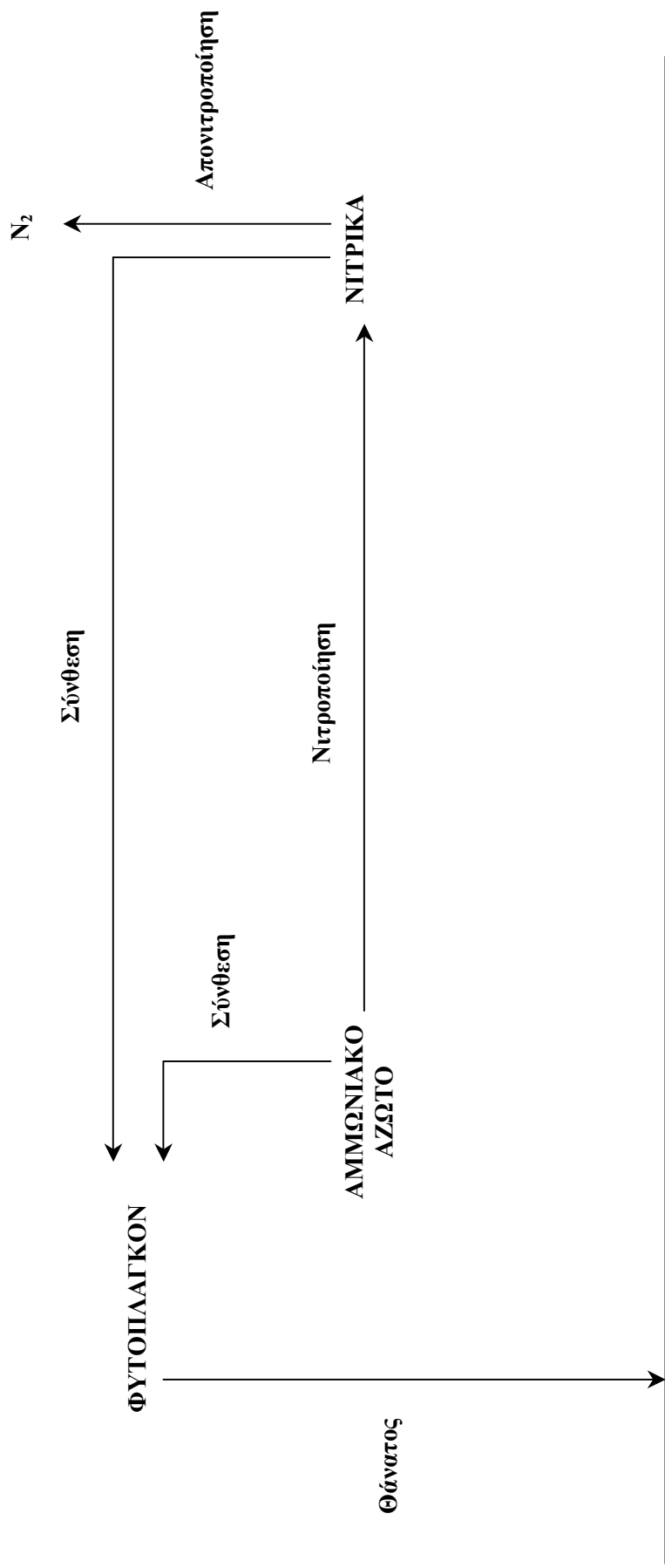
Η απομάκρυνση του BOD₅ θεωρείται ότι γίνεται με τη διαδικασία της οξείδωσης.. Με εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας η δίαιτα του BOD₅ περιγράφεται ως εξής :

$$\frac{dC}{dt} = Y_3 K_d A - R_L C + \frac{W C}{V} \quad (46)$$

όπου : C = συγκέντρωση BOD₅

Y_3 = περιεκτικότητα φυτοπλαγκτόν σε άνθρακα
(mg BOD/mg χλωροφύλλης)

R_L = συντελεστής ταχύτητας οξείδωσης του BOD₅



ΠΥΘΜΕΝΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

Σχήμα 7: Υπομοντέλο Αζώτου

$$\text{Είναι : } W_C = Q_{\text{εισροής}} \times C_{\text{εισροής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times C_{\text{απολήψεων}} \quad (47)$$

όπου : $C_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$C_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα στο νερό των απολήψεων.

Είναι $C_{\text{απολήψεων}} = C$

Η ταχύτητα διάσπασης του BOD_5 για μικρές συγκεντρώσεις του περιγράφεται ικανοποιητικά με τη βοήθεια κινητικής πρώτης τάξης και με εξάρτηση του συντελεστή διάσπασης από τη θερμοκρασία.

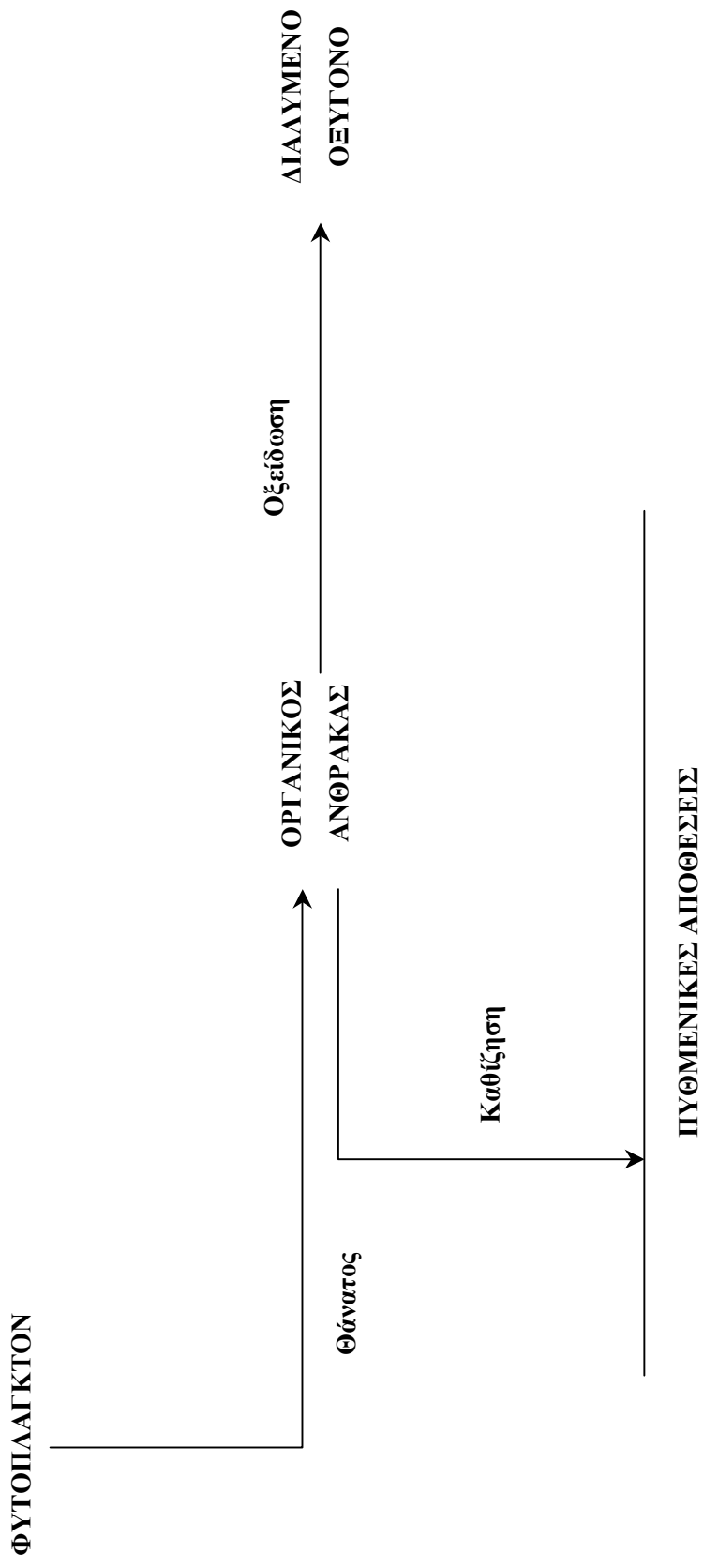
$$R_L = R_{L(20)} A_7^{(T-20)} \quad (48)$$

Στο Σχήμα 8 περιγράφεται το υπομοντέλο του οργανικού άνθρακα όπως αυτό προσομοιώθηκε από το παρόν μοντέλο

2.3.5 Διαλυμένο οξυγόνο

Η δίαιτα του διαλυμένου οξυγόνου επηρεάζεται θετικά από τη φωτοσύνθεση και την είσοδο οξυγόνου από την ατμόσφαιρα. Αρνητική επίδραση έχουν τα φαινόμενα της οξειδωσης του BOD_5 , της νιτροποίησης, της ενδογενούς αναπνοής του φυτοπλαγκτόν και της ζήτησης οξυγόνου των πυθμενικών αποθέσεων ή ειδικότερα της κατανάλωσης οξυγόνου για την οξείδωση των νεκρών κυττάρων φυτοπλαγκτόν.

Η παραγωγή οξυγόνου κατά τη φωτοσύνθεση είναι μία διαδικασία που εξαρτάται από τη συγκέντρωση του φυτοπλαγκτόν και την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών επηρεάζουν την ταχύτητα σύνθεσης νέου πρωτοπλάσματος φυτοπλαγκτόν, όχι όμως την ταχύτητα παραγωγής οξυγόνου. Με βάση τα παραπάνω, η παραγωγή οξυγόνου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως εξής:



Σχήμα 8: Υπομοντέλο Οργανικού Άνθρακα

$$\frac{dDO}{dt} = Y_4 A_k \mu_{\max} \frac{Fe}{HK} |e^{a_1} - e^{a_0}| \quad (49)$$

όπου : DO = συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (mg/l)

$Y_4 = O_2$ ανά μονάδα βάρους χλωροφύλλης (mgO₂/mg χλωροφύλλης)

Η τροφοδοσία οξυγόνου από την ατμόσφαιρα, σύμφωνα με τη θεωρία των δύο στιβάδων, δίνεται από την εξίσωση :

$$\frac{dDO}{dt} = K_{at} / H (DO_S - DO) \quad (50)$$

όπου : K_{at} = σταθερά επαναερισμού (μέτρα/ημέρα)

DO_S = συγκέντρωση κορεσμού (mg/l)

Η ζήτηση οξυγόνου λόγω ενδογενούς αναπνοής των αλγών, νιτροποίησης και οξείδωσης του BOD, περιγράφεται ως εξής :

$$\frac{dDO}{dt} = -R_L C - 4,5 R_N NH - Y_3 R_A A \quad (51)$$

Η ζήτηση οξυγόνου από τη νεκρή μάζα των αλγών περιγράφεται με τη βοήθεια της παραμέτρου SOD.

$$\frac{dDO}{dt} = \frac{SOD}{H} \quad (52)$$

όπου SOD = ζήτηση οξυγόνου από τη βιομάζα που αποσυντίθεται (gr/m²/ημέρα)

Το SOD υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή συναρτήσει της παραγωγής νεκρών κυττάρων χλωροφύλλης. Όσο περισσότερα κύτταρα χλωροφύλλης αποσυντίθενται τόσο μεγαλύτερη είναι η ζήτηση διαλυμένου οξυγόνου για την οξείδωση της νεκρής βιομάζας.

Η συνολική διαίτα του διαλυμένου οξυγόνου προκύπτει από την εξίσωση διατήρησης της μάζας :

$$\frac{dDO}{dt} = K_a \tau / H (DO_S - DO) + Y_4 A \mu_{\max} \frac{Fe}{HK} (e^{a_1} - e^{a_0}) - \frac{SOD}{H} - R_{LC} - 4,5 R_N NH - Y_3 R_{AA} + \frac{W_{DO}}{V} \quad (53)$$

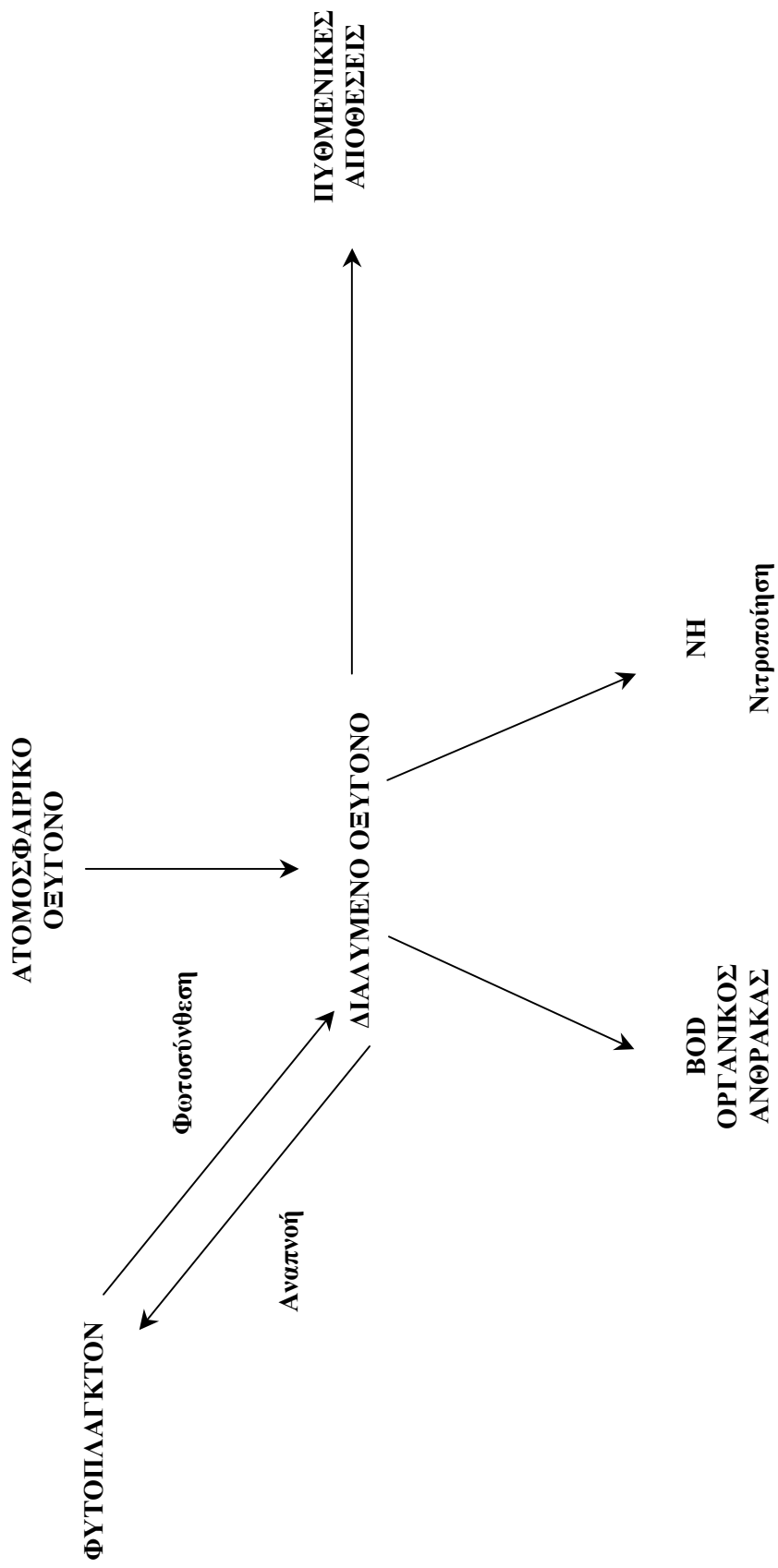
$$\text{Είναι : } W_{DO} = Q_{\text{εισροής}} \times DO_{\text{εισροής}} - Q_{\text{απολήψεων}} \times DO_{\text{απολήψεων}} \quad (54)$$

όπου : $DO_{\text{εισροής}}$: η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα νερά που εισρέουν στη λίμνη (σημειακές και μη-σημειακές πηγές).

$DO_{\text{απολήψεων}}$: η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό των απολήψεων.

Είναι $DO_{\text{εισροής}} = 0$ και $DO_{\text{απολήψεων}} = DO$

Το υπομοντέλο του διαλυμένου οξυγόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Υπομοντέλο Διαλυμένου Οξυγόνου

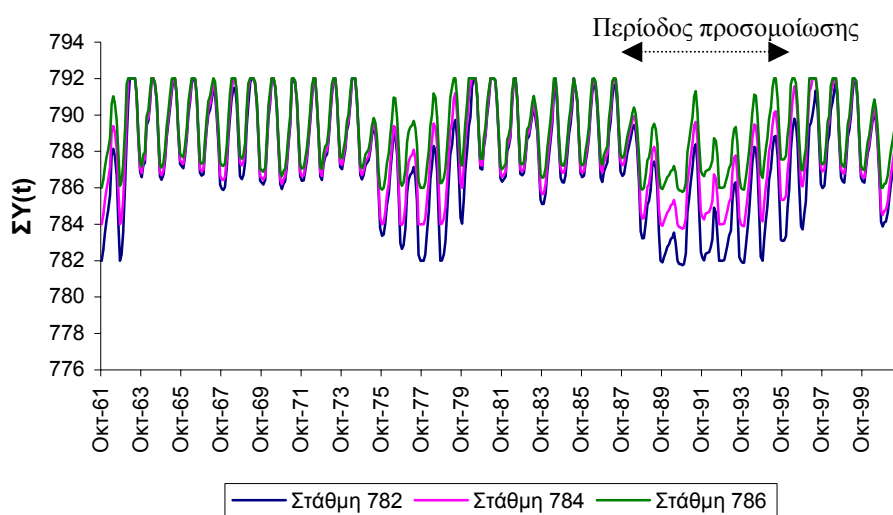
2.4 Εξωτερικές μεταβλητές

Για την επίλυση του μοντέλου είναι απαραίτητη η γνώση της χρονικής διακύμανσης των εξωτερικών μεταβλητών, οι οποίες είναι:

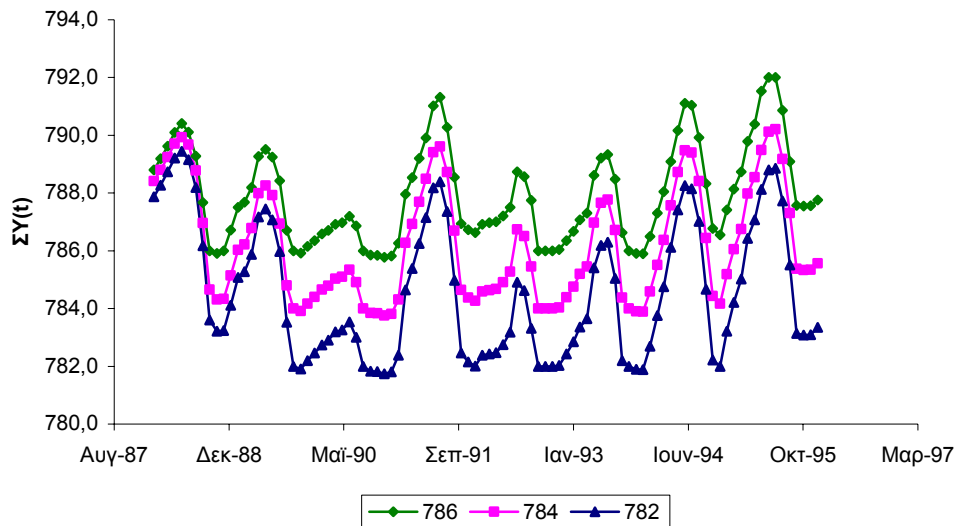
- α) οι εισερχόμενες και εξερχόμενες παροχές
- β) τα φορτία (θρεπτικών, οργανικού άνθρακα)
- γ) η θερμοκρασία
- δ) η ηλιοφάνεια και η φωτοπερίοδος

2.4.1 Εισερχόμενες και εξερχόμενες παροχές

Συνολικά εξετάστηκαν τρία σενάρια λειτουργίας της τεχνητής λίμνης Πλαστήρα, ανάλογα με την ελάχιστη στάθμη λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με την υδρολογική μελέτη, έχουν δημιουργηθεί τρεις χρονοσειρές 40ετίας μεταβολής της στάθμης της λίμνης συναρτήσει των εισροών και των εκροών από αυτήν (Σχήμα 10). Για τις ανάγκες της μαθηματικής προσομοίωσης της τροφικής κατάστασης της λίμνης εξετάστηκε ως κρίσιμότερη μία περίοδος 8 ετών (Ιανουάριος 1988-Δεκέμβριος 1995) κατά την οποία και στα τρία σενάρια καταγράφονται οι ελάχιστες στάθμες όπως αυτές ορίζονται σε κάθε σενάριο, για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα (Σχήμα 11).

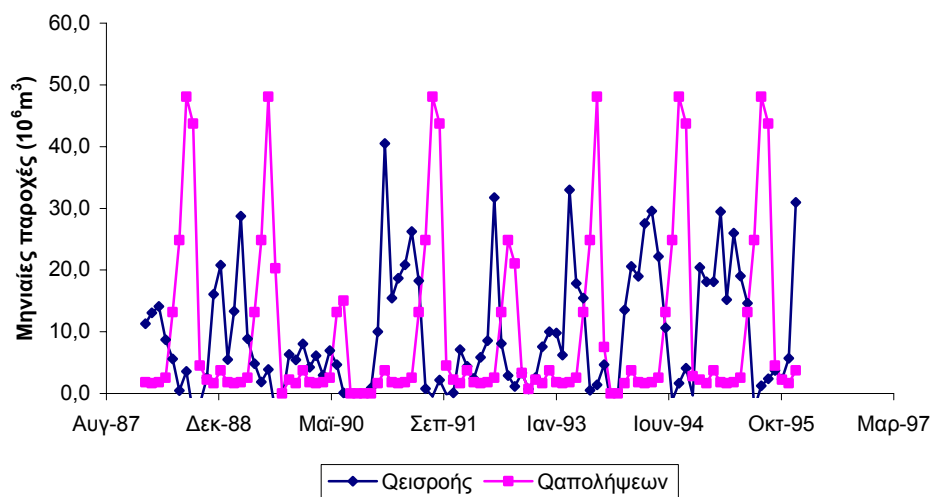


Σχήμα 10: Χρονοσειρές στάθμης τεχνητής λίμνης Πλαστήρα για τρία εναλλακτικά σενάρια ελάχιστης στάθμης.

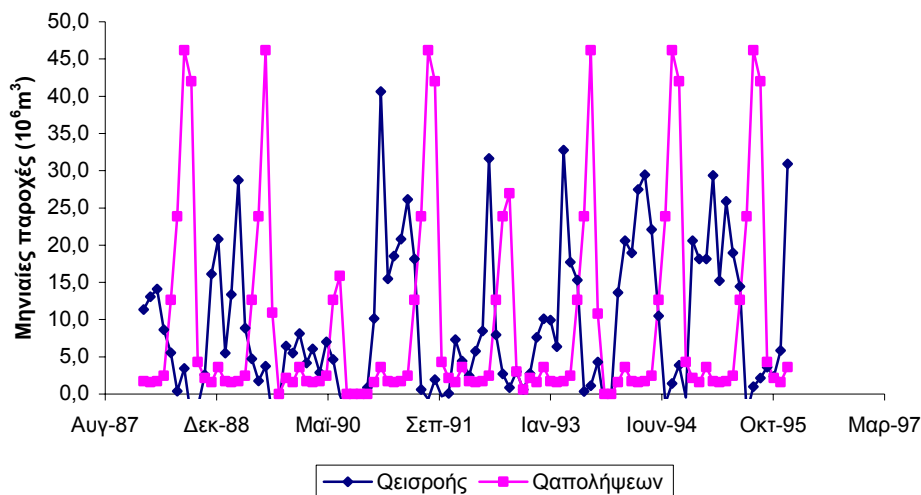


Σχήμα 11: Χρονοσειρά στάθμης της λίμνης Πλαστήρα για τρία εναλλακτικά σενάρια ελάχιστης στάθμης, για την περίοδο προσομοίωσης.

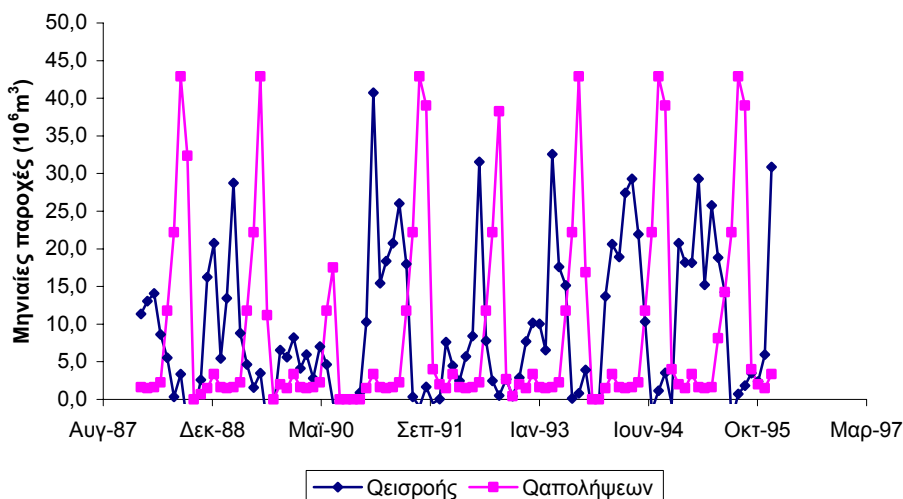
Τα σενάρια αυτά αφορούν στη λειτουργία της λίμνης Πλαστήρα με ελάχιστη στάθμη: α) στα 782m, β) στα 784m και γ) στα 786m. Οι αντίστοιχες παροχές εισροής και εκροής από τη λίμνη για καθένα από τα εξεταζόμενα σενάρια για την δετή περίοδο προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 12-14.



Σχήμα 12: Υδατικό ισοζύγιο λίμνης Πλαστήρα για ελάχιστη στάθμη στα 782m.



Σχήμα 13: Υδατικό ισοζύγιο λίμνης Πλαστήρα για ελάχιστη στάθμη στα 784m.



Σχήμα 14: Υδατικό ισοζύγιο λίμνης Πλαστήρα για ελάχιστη στάθμη στα 786m.

2.4.2 Φορτία

Τα ρυπαντικά φορτία που εισέρχονται στη λίμνη Πλαστήρα, προέρχονται από τις επιφανειακές απορροές (μη-σημειακές πηγές) και από την είσοδο αστικών αποβλήτων (σημειακές πηγές). Οι μη-σημειακές πηγές υπολογίστηκαν βάσει των χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής της λίμνης και των φορτίων των ρυπαντών που απορρέουν ανάλογα με κάθε χρήση. Οι συνολικές φορτίσεις από μη-σημειακές πηγές που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ρυπαντικά φορτία από μη-σημειακές πηγές

Χρήση γης	Φορτία (kg/έτος)	
	N	P
Αστικές περιοχές	500	200
Καλλιέργειες	37500	1250
Βοσκότοποι	20000	2000
Δάση	25350	845
Νερά	11200	560
Σύνολο	91550	4855

Σημειακές πηγές ρυπαντικών φορτίων αποτελούν οι εκροές αποχετευτικών αγωγών των γύρω από τη λίμνη οικισμών καθώς και η εισροή των ποταμών στη λίμνη. Οι φορτίσεις αυτές είναι υψηλότερες κατά την τουριστική περίοδο. Τα συνολικά ρυπαντικά φορτία από σημειακές πηγές που εισέρχονται στη λίμνη Πλαστήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ρυπαντικά φορτία από σημειακές πηγές.

	Μη τουριστική Kg/έτος		Τουριστική Kg/έτος
BOD	60827	BOD	92400
SS	27558	SS	41993
N	13907	N	21280
P	715	P	1129

Τα φορτία από μη-σημειακές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο επιμερίστηκαν αναφορικά με το άζωτο σε αμμωνιακό και οξειδωμένο άζωτο και το φώσφορο σε ανόργανο και οργανικό, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των καλλιεργούμενων εκτάσεων (περίοδοι χρήσης λιπασμάτων-φυτοφαρμάκων).

Έτσι στην περίπτωση των δασωδών εκτάσεων, των αστικών περιοχών και των υδάτων, το φορτίο του συνολικού αζώτου επιμερίζεται κατά 90% σε οξειδωμένο άζωτο ($\text{NO}_x\text{-N}$) και κατά 10 % σε αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4\text{-N}$).

Αντίστοιχα για τις καλλιέργειες το 20% του συνολικού φορτίου του αζώτου αποδόθηκε στο αμμωνιακό άζωτο και το 80% στις οξειδωμένες μορφές του αζώτου. Επίσης θεωρήθηκε ότι το 70% του συνολικού ρυπαντικού φορτίου των καλλιεργειών αφορά στους μήνες Οκτώβριο και Μάιο, ενώ το 30% ισομοιράστηκε στους υπόλοιπους μήνες. Επιπρόσθετα, το σύνολο του φορτίου του αζώτου από βοσκότοπους αποδόθηκε στο αμμωνιακό άζωτο.

Τέλος, αναφορικά με τα φορτία των σημειακών πηγών, ως τουριστική περίοδος θεωρήθηκαν οι μήνες Δεκέμβριος, Απρίλιος, Ιούλιος και Αύγουστος. Το συνολικό φορτίο του αζώτου των σημειακών

πηγών για την τουριστική και μη-τουριστική περίοδο ισοκατανεμήθηκε στους αντίστοιχους μήνες με την λογική παραδοχή ότι το 80% αφορά στο αμμωνιακό άζωτο και το 20% στο οξειδωμένο άζωτο.

Στους Πίνακες 3-6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ρυπαντικά φορτία τα οποία προσαρμοσμένα στις παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης Πλαστήρα.

Πίνακας 3 : Μηνιαία κατανομή των εισερχομένων φορτίων οργανικού άνθρακα (C).

Μήνας	Μη-σημειακές πηγές					Σημειακές πηγές	Συνολικά φορτία (kg/μήνα)
	Αστικές περιοχές	Καλλιέργειες	Δάση	Βοσκότοποι	Νερά		
Ιανουάριος	0	0	0	0	0	5083	5083
Φεβρουάριος	0	0	0	0	0	5083	5083
Μάρτιος	0	0	0	0	0	5083	5083
Απρίλιος	0	0	0	0	0	7721	7721
Μάιος	0	0	0	0	0	5083	5083
Ιούνιος	0	0	0	0	0	5083	5083
Ιούλιος	0	0	0	0	0	7721	7721
Αύγουστος	0	0	0	0	0	7721	7721
Σεπτέμβριος	0	0	0	0	0	5083	5083
Οκτώβριος	0	0	0	0	0	5083	5083
Νοέμβριος	0	0	0	0	0	5083	5083
Δεκέμβριος	0	0	0	0	0	7721	7721

Πίνακας 4 : Μηνιαία κατανομή των εισερχομένων φορτίων αμμωνιακού αζώτου (NH).

Μήνας	Μη-σημειακές πηγές					Σημειακές πηγές	Συνολικά φορτία (kg/μήνα)
	Αστικές περιοχές	Καλλιέργειες	Δάση	Βοσκότοποι	Νερά		
Ιανουάριος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	930	3093
Φεβρουάριος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	930	3093
Μάρτιος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	930	3093
Απρίλιος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	1423	3586
Μάιος	4,2	2812,5	211,3	1666,7	93,3	930	5718
Ιούνιος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	930	3093
Ιούλιος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	1423	3586
Αύγουστος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	1423	3586
Σεπτέμβριος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	930	3093
Οκτώβριος	4,2	2812,5	211,3	1666,7	93,3	930	5718
Νοέμβριος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	930	3093
Δεκέμβριος	4,2	187,5	211,3	1666,7	93,3	1423	3586

Πίνακας 5 : Μηνιαία κατανομή των εισερχομένων φορτίων του οξειδωμένου αζώτου (NO).

Μήνας	Μη-σημειακές πηγές					Σημειακές πηγές	Συνολικά φορτία (kg/μήνα)
	Αστικές περιοχές	Καλλιέργειες	Δάση	Βοσκότοποι	Νερά		
Ιανουάριος	37,5	750	1901,3	0	840	232,4	3761,2
Φεβρουάριος	37,5	750	1901,3	0	840	232,4	3761,2
Μάρτιος	37,5	750	1901,3	0	840	232,4	3761,2
Απρίλιος	37,5	750	1901,3	0	840	355,6	3884,4
Μάιος	37,5	11250	1901,3	0	840	232,4	14261,2
Ιούνιος	37,5	750	1901,3	0	840	232,4	3761,2
Ιούλιος	37,5	750	1901,3	0	840	355,6	3884,4
Αύγουστος	37,5	750	1901,3	0	840	355,6	3884,4
Σεπτέμβριος	37,5	750	1901,3	0	840	232,4	3761,2
Οκτώβριος	37,5	11250	1901,3	0	840	232,4	14261,2
Νοέμβριος	37,5	750	1901,3	0	840	232,4	3761,2
Δεκέμβριος	37,5	750	1901,3	0	840	355,6	3884,4

Πίνακας 6: Μηνιαία κατανομή των εισερχομένων φορτίων ανόργανου φωσφόρου (IP).

Μήνας	Μη-σημειακές πηγές					Σημειακές πηγές	Συνολικά φορτία (kg/μήνα)
	Αστικές περιοχές	Καλλιέργειες	Δάση	Βοσκότοποι	Νερά		
Ιανουάριος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	62,2	394
Φεβρουάριος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	62,2	394
Μάρτιος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	62,2	394
Απρίλιος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	95,2	427
Μάιος	16,7	468,8	70,4	166,7	46,7	62,2	831,5
Ιούνιος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	62,2	394
Ιούλιος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	95,2	427
Αύγουστος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	95,2	427
Σεπτέμβριος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	62,2	394
Οκτώβριος	16,7	468,8	70,4	166,7	46,7	62,2	831,5
Νοέμβριος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	62,2	394
Δεκέμβριος	16,7	31,3	70,4	166,7	46,7	95,2	427

2.4.3 Θερμοκρασία

Η αναμενόμενη εποχιακή διακύμανση της θερμοκρασίας των νερών της λίμνης Πλαστήρα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$T = 3.8 + 10 \times \left(1 - \cos \frac{(t - 21) \cdot 360}{365} \right) \times 3.14 / 180 \quad (55)$$

όπου T, η θερμοκρασία και t ο χρόνος σε ημέρες με αρχή την 1η Ιανουαρίου.

2.4.4 Ηλιοφάνεια και φωτοπερίοδος

Η ταχύτητα ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν εξαρτάται τόσο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία I_0 , όσο και από τη διάρκειά της που εκφράζεται με την φωτοπερίοδο F ως κλάσμα της ημέρας.

Με βάση τιμές από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και προηγούμενες μελέτες οι διακυμάνσεις της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και του συντελεστή φωτοπερίοδου εκφράστηκαν με τις ακόλουθες εξισώσεις :

$$I_0 = 120 + 192 \left(1 - \cos \frac{(t - 30)360}{365} \right) \quad (56)$$

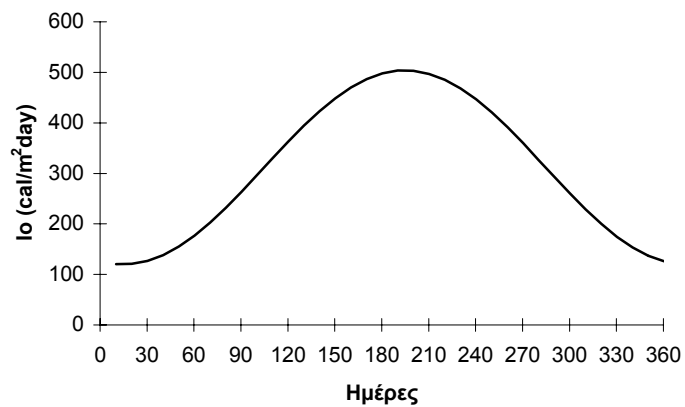
όπου : I_0 η μέση ημερήσια τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας σε cal/cm²

$t =$ ο χρόνος σε ημέρες με αρχή την 1η Ιανουαρίου.

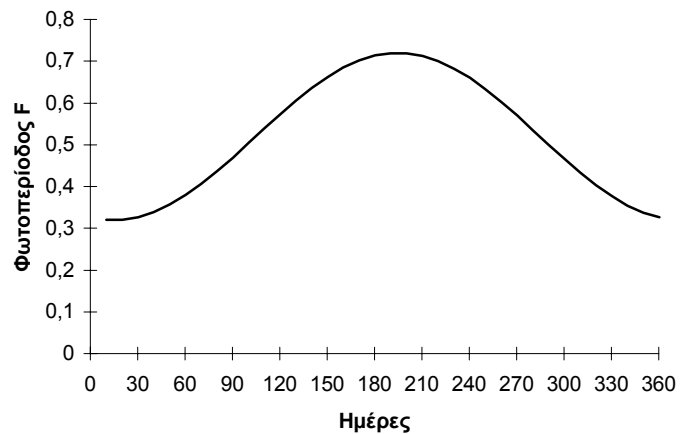
$$F = 0.320 + 0.200 \left(1 - \cos \frac{(t - 30)360}{365} \right) \quad (57)$$

όπου : F η φωτοπερίοδος ως κλάσμα της ημέρας.

Οι γραφικές παραστάσεις των εξισώσεων (56) και (57) παρουσιάζονται στα Σχήματα 15 και 16.



Σχήμα 15: Εποχιακή μεταβολή ηλιοφάνειας



Σχήμα 16: Εποχιακή μεταβολή φωτοπεριόδου

3 Σενάρια εφαρμογής του μαθηματικού μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο ευτροφισμού-διαλυμένου οξυγόνου που εφαρμόστηκε υπολογίζει σε κάθε χρονικό βήμα (Δt), τη διακύμανση του όγκου και της στάθμης του νερού στη λίμνη Πλαστήρα, καθώς και τη μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε μίας από τις προσομοιούμενες ποιοτικές παραμέτρους, για προσομοίωση δετίας.

Όπως έχει, ήδη, αναφερθεί προσομοιώθηκαν 3 εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας της λίμνης αναφορικά με τη διατήρηση μίας ελάχιστης στάθμης σε αυτήν. Τα σενάρια αυτά προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της υδρολογικής μελέτης και αφορούν σε λειτουργία της λίμνης σε κατώτατη στάθμη οριζόμενη στα *1) 782m, 2) 784m και 3) 786m*.

Η αναγκαιότητα ορισμού μίας κατώτατης στάθμης προκύπτει, όπως αναλύεται στην υδρολογική μελέτη, από την σκοπιμότητα σταθεροποίησης της τιμής της ετήσιας απόληψης νερού από τη λίμνη Πλαστήρα. Ο ορισμός όμως μίας εγγυημένης τιμής ετήσιας απόληψης δεν αποτελεί το μοναδικό κριτήριο επιλογής της κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης. Δύο εξίσου σημαντικές συνιστώσες για τον καθορισμό της κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης, είναι η ποιότητα των υδάτων και η αισθητική του τοπίου. Με την παρούσα μαθηματική προσομοίωση διερευνήθηκε η συνιστώσα της ποιότητας των υδάτων στην επιλογή της κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα.

4 Αποτελέσματα-σχολιασμός

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για κάθε ποιοτική παράμετρο για τα 3 σενάρια λειτουργίας παρουσιάζονται στους πίνακες 7-12 και στα Σχήματα 17-21. Ειδικότερα στους Πίνακες 7-12 σημειώνονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες ετήσιες συγκεντρώσεις κάθε παραμέτρου του μοντέλου για την δετή περίοδο προσομοίωσης και για τα τρία εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας. Αντίστοιχα στα Σχήματα 17-21 περιγράφεται η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε παραμέτρου για τα τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικές ετήσιες τιμές της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, για δετή περίοδο προσομοίωσης.

ΕΤΟΣ	Συγκεντρώσεις Χλωροφύλλης (Chla- $\mu\text{g/l}$)								
	Ελάχ. Στάθμη 782			Ελάχ. Στάθμη 784			Ελάχ. Στάθμη 786		
	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.
1	0,89	0,05	3,57	0,63	0,04	3,57	0,51	0,03	3,56
2	1,52	0,07	5,86	1,09	0,02	3,81	0,12	0,00	0,38
3	1,36	0,21	6,00	1,70	0,21	6,00	1,06	0,02	3,66
4	1,18	0,04	4,23	0,41	0,02	1,26	0,37	0,03	1,29
5	1,32	0,26	5,08	1,55	0,09	5,58	0,76	0,02	2,60
6	1,15	0,09	5,25	1,17	0,07	3,87	0,93	0,06	2,75
7	1,13	0,05	4,28	0,65	0,04	1,93	0,33	0,03	1,10
8	1,01	0,05	3,13	0,40	0,03	1,04	0,06	0,00	0,28

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικές ετήσιες τιμές της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, για δετή περίοδο προσομοίωσης.

ΕΤΟΣ	Συγκεντρώσεις Αμμωνιακού Αζώτου (NH ₄ -N-mg/l)								
	Ελάχ. Στάθμη 782			Ελάχ. Στάθμη 784			Ελάχ. Στάθμη 786		
	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.
1	0,033	0,006	0,065	0,034	0,009	0,065	0,034	0,012	0,064
2	0,028	0,001	0,061	0,031	0,008	0,060	0,031	0,013	0,056
3	0,025	0,001	0,063	0,027	0,001	0,062	0,035	0,016	0,062
4	0,026	0,002	0,056	0,026	0,006	0,051	0,032	0,012	0,059
5	0,025	0,001	0,061	0,028	0,002	0,063	0,033	0,014	0,060
6	0,027	0,001	0,063	0,024	0,002	0,054	0,033	0,012	0,061
7	0,026	0,001	0,057	0,025	0,005	0,049	0,030	0,012	0,056
8	0,024	0,003	0,050	0,027	0,009	0,050	0,028	0,011	0,051

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικές ετήσιες τιμές της συγκέντρωσης των νιτρικών για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, για δετή περίοδο προσομοίωσης.

ΕΤΟΣ	Συγκεντρώσεις Νιτρικών (NO ₃ -N-mg/l)								
	Ελάχ. Στάθμη 782			Ελάχ. Στάθμη 784			Ελάχ. Στάθμη 786		
	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.
1	0,177	0,102	0,219	0,188	0,102	0,255	0,197	0,102	0,284
2	0,190	0,021	0,315	0,282	0,190	0,357	0,360	0,286	0,423
3	0,089	0,015	0,198	0,176	0,019	0,314	0,467	0,399	0,543
4	0,117	0,034	0,200	0,146	0,058	0,201	0,438	0,406	0,486
5	0,094	0,015	0,198	0,192	0,028	0,319	0,461	0,396	0,525
6	0,107	0,014	0,215	0,105	0,036	0,187	0,416	0,330	0,493
7	0,111	0,029	0,197	0,138	0,062	0,182	0,383	0,340	0,428
8	0,116	0,056	0,179	0,226	0,160	0,265	0,427	0,392	0,460

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικές ετήσιες τιμές της συγκέντρωσης του ανόργανου φωσφόρου για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, για δετή περίοδο προσομοίωσης.

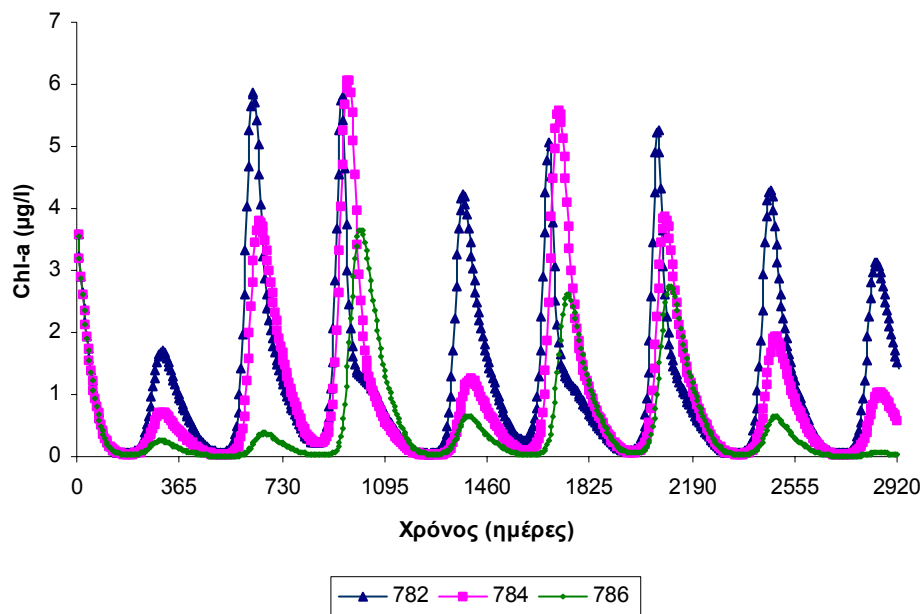
ΕΤΟΣ	Συγκεντρώσεις ανόργανου φωσφόρου (PO ₄ -P-mg/l)								
	Ελάχ. Στάθμη 782			Ελάχ. Στάθμη 784			Ελάχ. Στάθμη 786		
	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.
1	0,012	0,002	0,020	0,012	0,002	0,020	0,012	0,002	0,020
2	0,025	0,018	0,033	0,025	0,020	0,032	0,026	0,020	0,032
3	0,043	0,033	0,056	0,041	0,032	0,053	0,039	0,032	0,048
4	0,052	0,038	0,062	0,051	0,041	0,058	0,048	0,041	0,054
5	0,052	0,042	0,059	0,050	0,042	0,055	0,049	0,045	0,053
6	0,057	0,042	0,065	0,055	0,045	0,062	0,053	0,045	0,058
7	0,054	0,038	0,064	0,054	0,043	0,062	0,053	0,045	0,059
8	0,047	0,036	0,055	0,048	0,040	0,055	0,049	0,042	0,054

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικές ετήσιες τιμές της συγκέντρωσης του οργανικού άνθρακα για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, για δετή περίοδο προσομοίωσης.

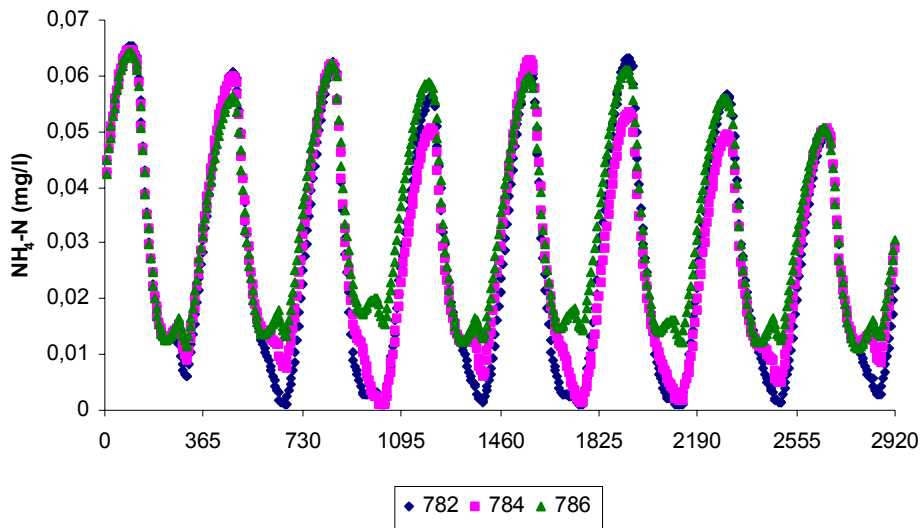
ΕΤΟΣ	Συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα (mg/l)								
	Ελάχ. Στάθμη 782			Ελάχ. Στάθμη 784			Ελάχ. Στάθμη 786		
	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.
1	0,014	0,002	0,042	0,010	0,001	0,041	0,008	0,001	0,041
2	0,032	0,002	0,140	0,020	0,001	0,082	0,003	0,000	0,018
3	0,036	0,003	0,186	0,042	0,004	0,181	0,021	0,000	0,079
4	0,022	0,001	0,092	0,008	0,001	0,033	0,006	0,001	0,022
5	0,033	0,005	0,159	0,035	0,002	0,145	0,014	0,001	0,057
6	0,028	0,002	0,147	0,023	0,002	0,088	0,017	0,002	0,060
7	0,022	0,001	0,091	0,011	0,001	0,044	0,006	0,001	0,021
8	0,017	0,002	0,067	0,007	0,001	0,029	0,002	0,000	0,012

Πίνακας 12: Χαρακτηριστικές ετήσιες τιμές της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, για δετή περίοδο προσομοίωσης.

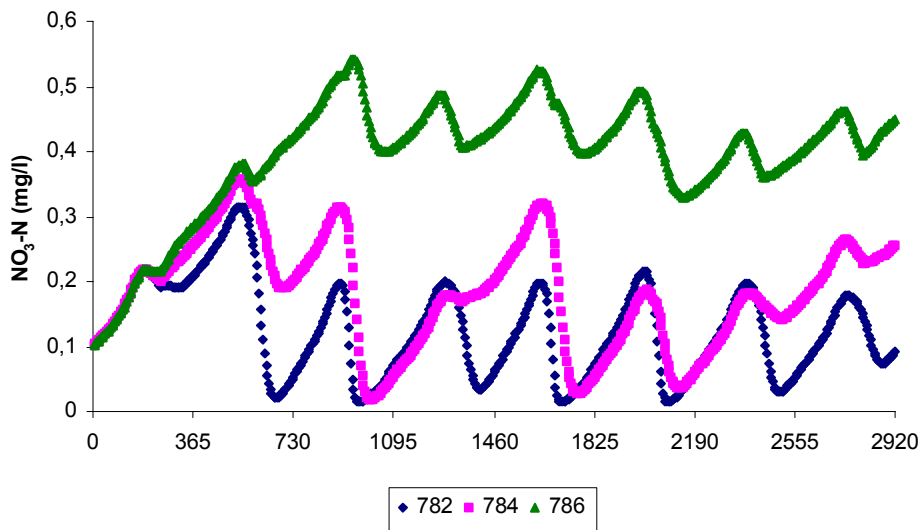
ΕΤΟΣ	Συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (mg/l)								
	Ελάχ. Στάθμη 782			Ελάχ. Στάθμη 784			Ελάχ. Στάθμη 786		
	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΣΗ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.
1	9,759	7,010	11,970	9,797	7,138	11,952	9,870	7,416	11,942
2	9,873	7,134	12,476	9,994	7,331	12,486	10,132	7,594	12,475
3	10,075	7,583	12,506	9,960	7,402	12,434	10,157	8,313	12,494
4	9,909	6,887	12,520	10,004	7,131	12,465	10,024	7,363	12,356
5	9,964	7,226	12,495	9,916	7,494	12,496	10,067	7,612	12,459
6	9,948	6,993	12,546	9,966	7,271	12,457	10,007	7,526	12,410
7	9,897	6,847	12,520	9,968	7,099	12,445	10,028	7,348	12,387
8	9,915	6,959	12,432	10,000	7,185	12,412	10,054	7,427	12,402



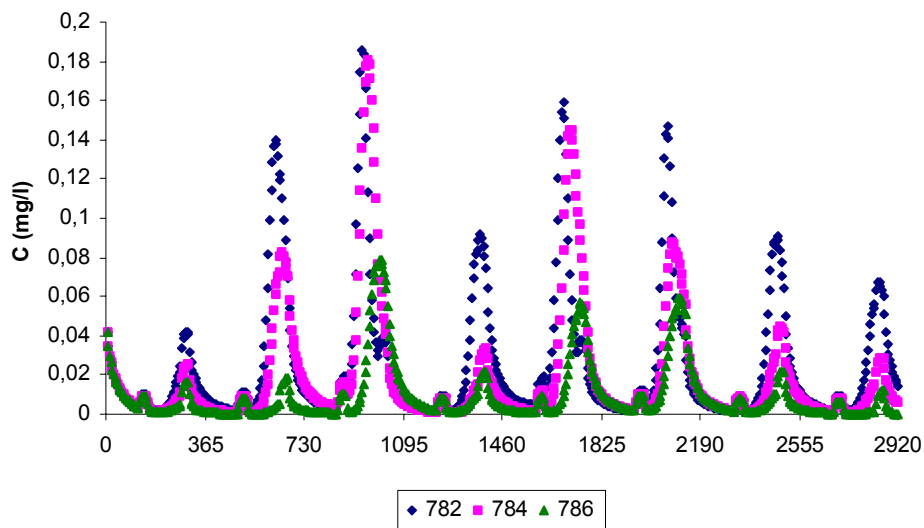
Σχήμα 17: Μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας για δετή περίοδο προσομοίωσης.



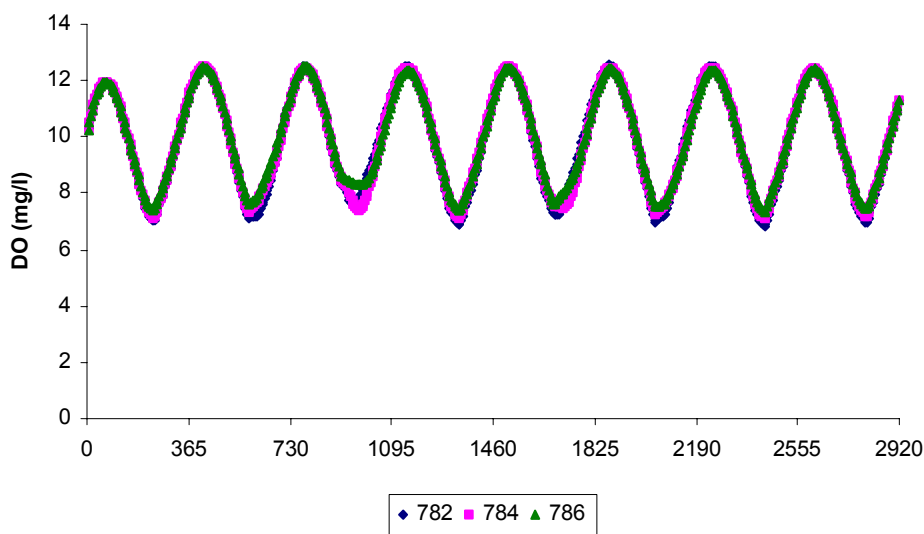
Σχήμα 18: Μεταβολή της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας για δετή περίοδο προσομείωσης.



Σχήμα 19: Μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας για δετή περίοδο προσομείωσης.



Σχήμα 20: Μεταβολή της συγκέντρωσης του οργανικού άνθρακα για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας για δετή περίοδο προσομοίωσης.



Σχήμα 21: Μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου για τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας για δετή περίοδο προσομοίωσης.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της μαθηματικής προσομοίωσης της τροφικής κατάστασης των υδάτων της λίμνης Πλαστήρα για τρία εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας βάσει μίας κατώτατης στάθμης είναι τα ακόλουθα:

Καταρχήν υπολογίστηκε ένα εύρος συγκεντρώσεων χλωροφύλλης που δεν διαφέρει σημαντικά από το εύρος τιμών των διαθέσιμων μετρήσεων οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0.7-3.7μg/l, γεγονός που επαληθεύει με πολύ ικανοποιητικό τρόπο την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου.

Δεν παρατηρείται καμμία ουσιαστική διαφοροποίηση των χειμερινών συγκεντρώσεων του αμμωνιακού αζώτου για τα τρία εναλλακτικά σενάρια κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης. Αντίθετα παρατηρούνται αξιόλογες διαφορές της ελάχιστης θερινής συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου ανάμεσα στα τρία εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, σημειώνονται κατά τη χειμερινή περίοδο σε αντιστοιχία με τις ελάχιστες συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης, ενώ οι ελάχιστες κατά τη θερινή περίοδο σε συνδιασμό με τις μέγιστες θερινές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης. Καθώς οι ελάχιστες συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου για όλα τα εναλλακτικά σενάρια είναι ιδιαίτερα χαμηλές (μικρότερες από 0.015 mg/l) οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται δεν θεωρούνται ως κρίσιμες.

Αντίθετα, εμφανίζονται σημαντικές διαφορές στις συγκεντρώσεις των νιτρικών για τα τρία εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας της λίμνης, με τις τιμές του σεναρίου των 786m να είναι πολύ υψηλότερες των τιμών που έδωσε η προσομοίωση των υπολοίπων δύο σεναρίων. Ειδικότερα, σε όρους μέγιστων τιμών οι συγκεντρώσεις των νιτρικών του σεναρίου των 786m είναι 1,5-2 φορές υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις του σεναρίου των 782m, ενώ σε όρους μέσων τιμών οι συγκεντρώσεις του σεναρίου της στάθμης των 786m είναι για κάποιες χρονιές ακόμη και τετραπλάσιες αυτών των σεναρίων ελάχιστης στάθμης της λίμνης στα 782m και 784m. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στις σημαντικές διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται στην ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν για τα τρία εναλλακτικά σενάρια.

Οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου φωσφόρου για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ελάχιστης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα, παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες αφορούν κυρίως στις μέγιστες ετήσιες συγκεντρώσεις και είναι της τάξης του 5-17%.

Πολύ σημαντικές είναι οι διαφορές στις συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα. Ειδικότερα οι μέγιστες ετήσιες συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα του σεναρίου ελάχιστης στάθμης λειτουργίας στα 782m εμφανίζονται σε κάποια έτη σχεδόν τριπλάσιες των αντιστοίχων του σεναρίου ελάχιστης στάθμης στα 784m και σχεδόν τετραπλάσιες των μέγιστων ετησίων συγκεντρώσεων του οργανικού άνθρακα του σεναρίου κατώτατης στάθμης στα 786m.

Οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου είναι υψηλές και κοντά στις τιμές κορεσμού για όλα τα εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας, με μικρές διαφοροποιήσεις μόνο σε σχέση με τις ελάχιστες ετήσιες

τιμές. Έτσι σε επίπεδο μέσων και μέγιστων ετησίων συγκεντρώσεων οι διαφορές είναι μικρές, ενώ αναφορικά με τις ελάχιστες ετήσιες τιμές, εμφανίζεται μία αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο σενάριο κατώτατης στάθμης λειτουργίας στα 786m σε σχέση με το σενάριο των 782m, της τάξης του 5-10%.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου για τα τρία εναλλακτικά σενάρια ελάχιστης στάθμης λειτουργίας, παρατηρείται μία σημαντική διαφοροποίηση στις προβλεπόμενες συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης (Πίνακας 7, Σχήμα 17). Ειδικότερα, σε όρους μέσων ετησίων τιμών, η διαφορά της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης για το σενάριο της ελάχιστης στάθμης λειτουργίας στα 782m είναι πολλαπλάσια της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης για το σενάριο των 784m, η οποία με τη σειρά της είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης για το σενάριο των 786m. Οι διαφορές σε επίπεδο μέσων ετησίων τιμών είναι της τάξης του 0.5-1μg/l. Σημαντική διαφοροποίηση παρατηρείται στις μέγιστες θερινές συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης. Πιο συγκεκριμένα, οι μικρότερες και συνεπώς ευνοϊκότερες ως προς τον χαρακτηρισμό της τροφικής κατάστασης των υδάτων της λίμνης συγκεντρώσεις χλωροφύλλης προκύπτουν από τον ορισμό της ελάχιστης στάθμης λειτουργίας στα 786m. Οι διαφορές με τα άλλα σενάρια είναι σημαντικές, αφού στην μεν περίπτωση των 786m οι τιμές κυμαίνονται για την προσομοιούμενη δετία μεταξύ 0.3-3.6μg/l, στη δε περίπτωση του σεναρίου των 784m μεταξύ 1-6μg/l, ενώ τέλος στη δυσμενέστερη όπως αποδεικνύεται περίπτωση ορισμού της στάθμης λειτουργίας στα 782m οι μέγιστες ετήσιες θερινές συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης κυμαίνονται μεταξύ 3.2-6μg/l. Οι διαφορές αυτές κρίνονται σημαντικές, καθώς ο χαρακτηρισμός και η κατηγοριοποίηση των ποιοτικών χαρακτηρισμών της λίμνης Πλαστήρα θα πρέπει, ακολουθώντας τη σύγχρονη πρακτική, να γίνει βάσει των μέγιστων ετησίων συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες τάσεις που κυριαρχούν σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, θα πρέπει να υιοθετηθεί η κατηγοριοποίηση/χαρακτηρισμός του Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Χαρακτηρισμός ποιότητας νερού και κατάταξη λιμνών.

Μέγιστη συγκέντρωση χλωροφύλλης (μg/l)	Χαρακτηρισμός/κατηγορία
<5	Πολύ καλή ποιότητα/ I
5-10	Καλή ποιότητα / II
10-20	Μέτρια ποιότητα/ III
20-50	Κακή ποιότητα/ IV
>50	Πολύ κακή ποιότητα/ V

Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση κατώτατης στάθμης λειτουργίας της λίμνης Πλαστήρα στα +786m, φαίνεται ότι εξασφαλίζει πολύ υψηλής ποιότητας ύδατα τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία I. Αντίθετα η λειτουργία της λίμνης με ελάχιστη στάθμη μεταξύ των 782-784m συμβάλλει στη δημιουργία καλής ποιότητας υδάτων, η οποία εντάσσεται στην κατηγορία II.

Βιβλιογραφία

1. Ανδρεαδάκης Α., Αφραταίος Χ., “Μελέτη του Φαινομένου του Ευτροφισμού με Εφαρμογή στη Λίμνη Παμβώτιδα”, ΕΜΠ (1986).
2. Ανδρεαδάκης Α., Βασιλοπούλου Μ., “Μαθηματική Προσομοίωση Ποιοτικών Χαρακτηριστικών Λίμνης Παμβώτιδας”, ΕΜΠ (1990).
3. Ανδρεαδάκης Α., Γαβαλάκη Ε., Νουτσόπουλος Κ. ‘Μαθηματική Προσομοίωση Ποιοτικών Χαρακτηριστικών Τεχνητής Λίμνης Σχινιά στα πλαίσια της Μελέτης Προέγκρισης και Χωροθέτησης Κέντρου Κωπηλασίας και Κανώ στο Σχινιά Αττικής’ (1997).
4. Bierman V.J., and Richardson W.L., “Mathematical Model of Phytoplankton Growth in Saginaw Bay, Lake Huron”, Envir.Research Laboratories Grosse Ile, Michigan, EPA Ecological Series (1976).
5. Canale R.P., Hineman D.F., Nachiappan S., “A Biological Production Model for Grand Traverse Bay”, MICHU-SG-74-200, Report No 37, Michigan (1974).
6. Canale R.P., De Palma L.M.and Vogel A.H., “A Plankton-based Food Web Model for Lake Michigan” in Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystems Ed. R.P. Canale (Ann Arbor Science) p.p. 33-74 (1976).
7. Chen C.W. and Orlob G.T., “Ecological Simulation of Aquatic Environments. Systems Analysis and Simulation in Ecology” vol.3 Ed. B.C.Patten (N.Y. Academic Press) p.p. 476-588 (1975).
8. Di Toro D.M., O’Connor D.J. and Thomann R.V., “A Dynamic Model of the Phytoplankton Population in the Sacramento-San Joaquin Delta”, Advances in Chemistry, No106, Am.Chem.Soc., Washington D.C., p.p. 131-180 (1971).
9. Dugdale R.C., “Biological Modeling in Modeling of Marine Systems”, Ed. J.C. Nihoul (Elsevier), p.p. 187-206, (1975).
10. Dugdale R.C. and Wilkerson F.P., “Outfall Diffuser System for Discharge of Effluent from Treatment Works on Psyttalia Island, Athens-Fairfield Impact of Surface Versus Deep Sewage Outfall”, (1985).
11. Gargas E., “A Three-box Eutrophication Model of a Mesotrophic Danish Lake”, Water Quality Institute, Horsholm, Denmark ,(1976).
12. Jorgensen S.E., “A Eutrophication Model for a Lake”, Ecological Modeling 2, p.p. 147-165 (1976).

13. Larsen D.P., Mercier H.T. and Malreg K.W., "Modeling Algal Growth Dynamics in Shagawa Lake, Minnesota", Modeling the Eutrophication Process, Eds. E.J. Middlebrook, O.H. Falkenberg and T.E. Maloney (Ann Arbor Science), p.p. 15-33 (1974).
14. Limno-Tech, Inc., "A Mathematical Framework for Water Quality Models in Saginaw River and Bay", Ann Arbor, Michigan, (1977).
15. Lung W.S., "Modeling of Phosphorus Sediment-Water Interactions in White Lake", Michigan, Ph.D.Diss., Univ.of Michigan, Ann Arbor, Michigan (1975).
16. Noutsopoulos C., E. Gavalaki and A. Andreadakis 'Evaluation of the impact from the discharge of treated sewage to the South East Saronicos Gulf through Water Quality Modeling' Water Science & Technology, 39,8,pp. 63-70 (1999).
17. Nyholm N., "A Simulation Model for Phytoplankton Growth and Nutrient Cycling in Eutrophic Shallow Lakes", Ecological Modeling, Vol.4, p.p. 279-310 (1973).
18. O'Connor D.J., Thomann R.V. and Di Toro D.M., "Dynamic Water Quality, Forecasting and Management", U.S. EPA, Washington D.C., Report EPA 660/3-73-009 (1978).
19. O'Connor D.J., Thomann R.V. and Di Toro D.M., "Ecological Models", Systems Approach to Water Management, Ed. V.Biswas (N.Y. McGraw-Hill), p.p. 299-333 (1976).
20. Orlob G.T., "Mathematical Modeling of Water Quality : Streams, Lakes and Reservoirs", IIASA, J.Wiley and Sons (1983).
21. Poole H.H. and Atkins W.G.R., "Photoelectric Measurements of Submarine Illumination throughout the Year", J.Mar.Biol.Ass., OK, 16, p.p. 270-308 (1929).
22. Thomann R.V., Di Toro D.M. and O'Connor D.J., "Preliminary Model of the Potomac Estuary Phytoplankton", Proc.of the ASCE, Journal of Envir.Eng.Dir. 100 (EE3), p.p. 699-715 (1974).
23. Thomann R.V., Di Toro D.M., Wingfield R.P. and O'Connor D.J., "Mathematical Modeling of Phytoplankton in Lake Ontario", EPA report 660/3-75-005 (1975).

Μέρος ΙΙ: Μοντέλο MERES

Α. Στάμου, Α. Βαλασσόπουλος, Ι. Κατσίρης, Μ. Καπετανάκη

1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί (α) η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου ποιότητας νερών και (β) η εφαρμογή του για την ανάλυση της ποιοτικής κατάστασης της λίμνης Πλαστήρα.

Το παρόν μοντέλο έχει την ονομασία MERES (Modeling Eutrophication in REServoirs).

Το MERES αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος σε περιβάλλον EXCEL. Ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία κατάστρωσης του μοντέλου (Στάμου, 1992 και 1996) και χρησιμοποιήθηκε ως υποδομή υπάρχον μοντέλο (Stamou et al, 1994). Η ανάπτυξη έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του τελειόφοιτου σπουδαστή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ Αλέξανδρου Βαλασσόπουλου, υπό την επίβλεψη του Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ Αναστασίου Ι. Στάμου. Στην εργασία συμμετείχαν και οι Ιωάννης Κατσίρης (Διπλ. Πολ. Μηχ. ΕΜΠ, υποψήφιος διδάκτωρ) και Μαρία Καπετανάκη (τελειόφοιτη Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας).

Αντικείμενο του MERES είναι η περιγραφή των χωρικών και χρονικών μεταβολών που υφίστανται οι ποιοτικές παράμετροι ενός ταμιευτήρα με τις διάφορες διεργασίες μετασχηματισμού τους ή τις μεταξύ τους αντιδράσεις, και κυρίως με αυτές που περιγράφουν τον ευτροφισμό και τη δίαιτα του διαλυμένου οξυγόνου (Stamou, 1992; Stamou et al, 1994).

Οι ποιοτικές παράμετροι του MERES καθορίστηκαν κυρίως από τα διαθέσιμα στοιχεία πεδίου για τη βαθμονόμηση του. Συγκεκριμένα, οι ποιοτικές παράμετροι του μοντέλου είναι η χλωροφύλλη-α, το αμμωνιακό άζωτο, το νιτρικό άζωτο, ο οργανικός και ανόργανος φώσφορος, το BOD και το διαλυμένο οξυγόνο.

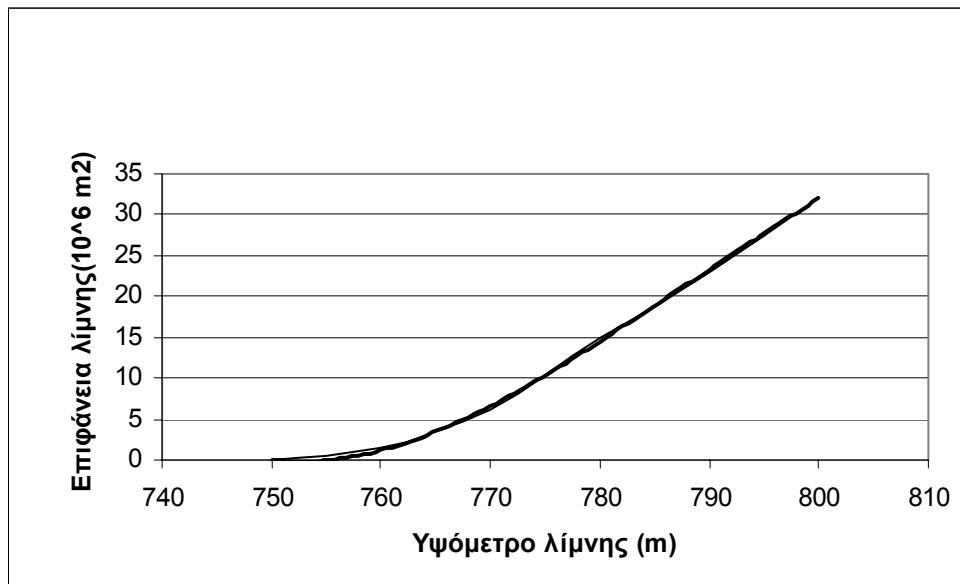
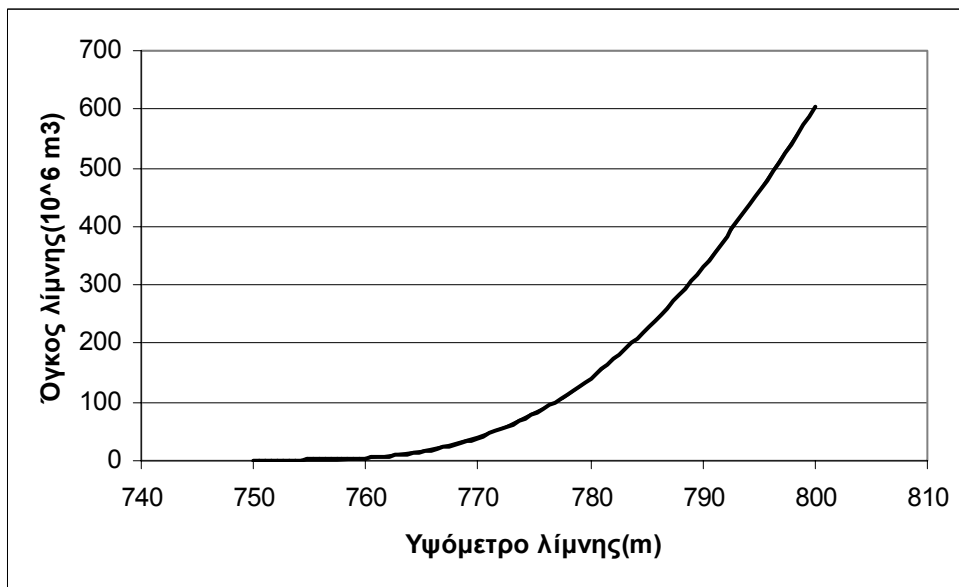
Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας των ποιοτικών χαρακτηριστικών διακριτοποιούνται στο ένα ή τα δύο στρώματα του ταμιευτήρα (επιλίμνιο και υπολίμνιο), ενώ θεωρείται ότι πραγματοποιείται μεταφορά μάζας μεταξύ των δύο στρωμάτων μέσω της διαδικασίας της τυρβώδους διάχυσης. Το MERES παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης μετάβασης από την κατάσταση πλήρους ανάμιξης (ενός στρώματος) στην κατάσταση στρωμάτωσης (δύο στρώματα) και αντίστροφα, ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο στρωμάτων.

2 Περιγραφή μαθηματικού μοντέλου

2.1 Δεδομένα του μοντέλου

2.1.1 Γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά

Ο όγκος και η επιφάνεια της λίμνης σε κάθε βάθος προσδιορίζονται από διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου στάθμης-όγκου λίμνης και στάθμης-επιφάνειας λίμνης. Οι μετρήσεις προσαρμόστηκαν στις εξισώσεις, οι οποίες φαίνονται στα Σχήματα 2-1 και 2-2.



2.1.2 Στοιχεία υδατικού ισοζυγίου λίμνης

Η διαφορική εξίσωση συνέχειας (ή μεταβολής) του όγκου της λίμνης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2-1)$$

όπου

V : όγκος της λίμνης ή του στρώματος (m^3)

Q_{in} : παροχή εισροής (m^3/day)

Q_{out} : παροχή εκροής (m^3/day)

Η εξίσωση 2-1 γράφεται στην ακόλουθη αριθμητική μορφή

$$V^{n+1} = V^n + (Q_{in} - Q_{out}) \cdot \Delta t \quad (2-2)$$

όπου

V^n : όγκος της λίμνης ή του στρώματος τη χρονική στιγμή t (m^3)

V^{n+1} : όγκος της λίμνης ή του στρώματος τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$ (m^3)

Q_{in} : παροχή εισροής τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$ (m^3/day)

Q_{out} : παροχή εκροής τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$ (m^3/day)

Δt : χρονικό βήμα (day)

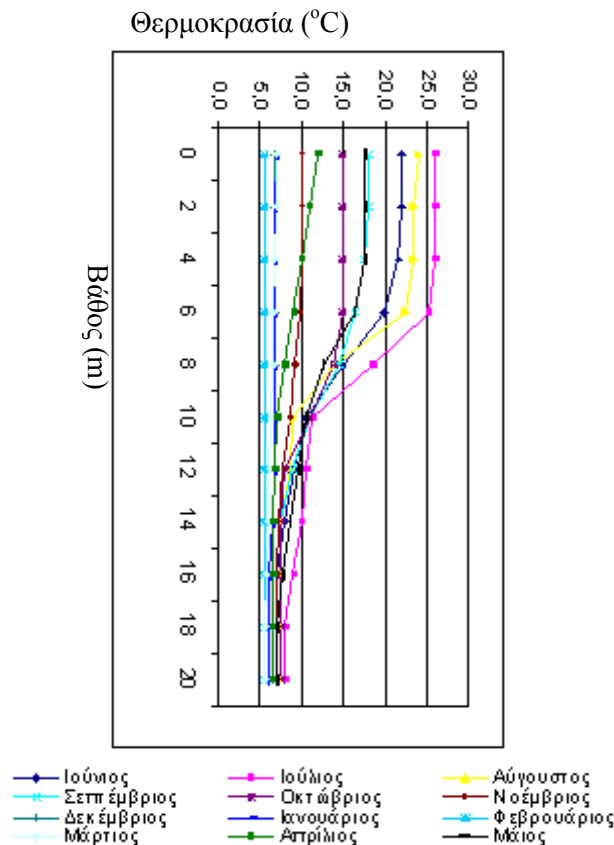
Ο αρχικός όγκος V και τα χαρακτηριστικά Q_{in} και Q_{out} αποτελούν δεδομένα για το μοντέλο, στο οποίο δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών.

2.1.3 Στοιχεία θερμοκρασίας και θερμικής στρωμάτωσης

Κατανομή θερμοκρασίας λίμνης

Η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για όλες τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στη λίμνη και περιγράφονται από το μαθηματικό μοντέλο.

Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται η κατά βάθος κατανομή θερμοκρασίας των νερών της λίμνης κατά την περίοδο 1987-1988 (Τσέκος κ.α., 1992).



Σχήμα 2-3. Κατανομή θερμοκρασίας κατά βάθος

Κατά την περίοδο αυτή, οι τιμές θερμοκρασίας του νερού στο επιφανειακό στρώμα της λίμνης Πλαστήρα μεταβλήθηκαν σημαντικά στη διάρκεια του έτους και κυμάνθηκαν από 26°C τον Ιούλιο μέχρι 5,5°C τον Φεβρουάριο. Οι τιμές της θερμοκρασίας του νερού κοντά στον πυθμένα μεταβλήθηκαν λίγο και κυμάνθηκαν από 8°C τον Ιούλιο μέχρι 5,5°C τον Φεβρουάριο.

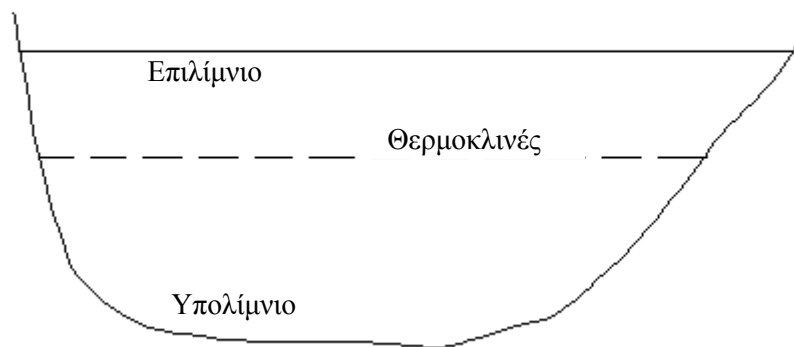
Θερμική στρωμάτωση της λίμνης – Θερινή περίοδος

Η θερμοκρασία των νερών της λίμνης προκύπτει από το ισοζύγιο (πρόσληψης, μεταφοράς και απώλειας) της θερμότητας. Η πρόσληψη της θερμότητας επιτυγχάνεται με την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας στα επιφανειακά στρώματα του νερού της λίμνης, όπου ιδιαίτερα αποδοτικές είναι οι ακτινοβολίες μεγάλου μήκους κύματος. Η μεταφορά θερμότητας στα βαθύτερα στρώματα του νερού γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με τη μεταφορά όγκου θερμού νερού από τα επιφανειακά στα βαθύτερα στρώματα. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ανέμου, ο οποίος ανάλογα με την ταχύτητά του δημιουργεί κυματισμό στην επιφάνεια της λίμνης. Η θραύση των κυματισμών στην ακτή δημιουργεί εκ νέου κυματισμό με αντίθετη κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρονται θερμές μάζες νερού από την επιφάνεια στα βαθύτερα σημεία της στήλης του νερού. Το

βάθος στο οποίο μεταφέρονται οι θερμές μάζες του επιφανειακού νερού αυξάνει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και αντιστρόφως ανάλογα με τη θερμοκρασία του επιφανειακού νερού.

Σε μια σχετικά βαθιά λίμνη, όπως η λίμνη Πλαστήρα, υπάρχουν 3 στρώματα: (α) το επιλίμνιο, (β) το μεταλίμνιο και (γ) το υπολίμνιο. Το επιλίμνιο είναι το επιφανειακό στρώμα, όπου το καλοκαίρι η θερμοκρασία του νερού είναι σταθερή (βλ. Σχήμα 2-3). Στο μεταλίμνιο, το οποίο βρίσκεται κάτω από το επιλίμνιο, παρατηρείται μεταβολή της θερμοκρασίας. Στο υπολίμνιο, που βρίσκεται κάτω από το μεταλίμνιο, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Μεταξύ των 3 στρωμάτων υπάρχουν τα δυο θερμοκλινές.

Στο εφαρμοζόμενο μαθηματικό μοντέλο, θεωρήθηκε χάριν απλότητας ότι υπάρχουν δυο στρώματα (α) το επιλίμνιο και (β) το υπολίμνιο, δηλ. το μεταλίμνιο έχει μηδενικό πάχος και υπάρχει μόνο ένα θερμοκλινές, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4. Σχηματική παράσταση στρωμάτωσης λίμνης

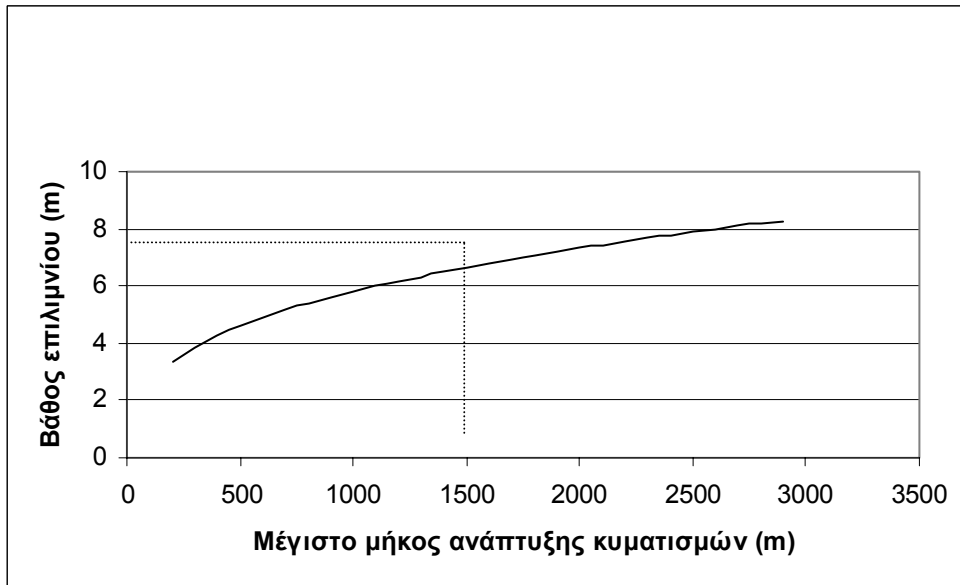
Η θέση του θερμοκλινούς μπορεί να υπολογιστεί από στοιχεία πεδίου ή από εμπειρικές εξισώσεις, όπως την εξίσωση 2-3 (Hanna, 1990). Η εξίσωση 2-3, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2-5, συσχετίζει το ενεργό μήκος ανάπτυξης κυματισμών της λίμνης (L_w) με το βάθος του θερμοκλινούς (H_{ther}). Βασίστηκε σε έρευνα 167 εύκρατων λιμνών με ενεργά μήκη από 170 ως 108000 m.

$$\log(H_{ther}) = 0,336 \cdot \log(L_w) - 0,245 \quad (2-3)$$

όπου

H_{ther} : βάθος θερμοκλινούς (m)

L_w : ενεργό μήκος ανάπτυξης κυματισμών (m)



Σχήμα 2-5. Εξάρτηση βάθους επιλιμνίου από το μέγιστο μήκος ανάπτυξης κυματισμών

Για την εξεταζόμενη περίπτωση, οι επικρατούντες άνεμοι είναι βόρειοι και το μέγιστο ενεργό μήκος ανάπτυξης κυματισμών εκτιμήθηκε γραφικά ίσο με $L_w = 1500$ m. Από την εξίσωση 2-3 και το Σχήμα 2-5 το μέγιστο βάθος του επιλιμνίου υπολογίστηκε ίσο $H_{ther} = 6,6$ m. Η τιμή αυτή βρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις (βλ. Σχήμα 2-3), κατά τις οποίες το βάθος του επιλιμνίου ήταν 6,0 m. Έτσι, στο μαθηματικό μοντέλο εφαρμόζεται η τιμή των 6,0 m καθ' όλη την περίοδο στρωμάτωσης.

Μεταβολή θερμοκρασίας στρωμάτων

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας του επιλίμνιου και υπολίμνιου προσαρμόστηκαν στην ακόλουθη γενική εξίσωση (EPA, 2000)

$$T = T_{mean} - \left(\frac{\Delta T}{2} \cdot (\sin(0,0174533 \cdot (0,987 \cdot (td + 100) - 30))) \right) \quad (2-4)$$

όπου

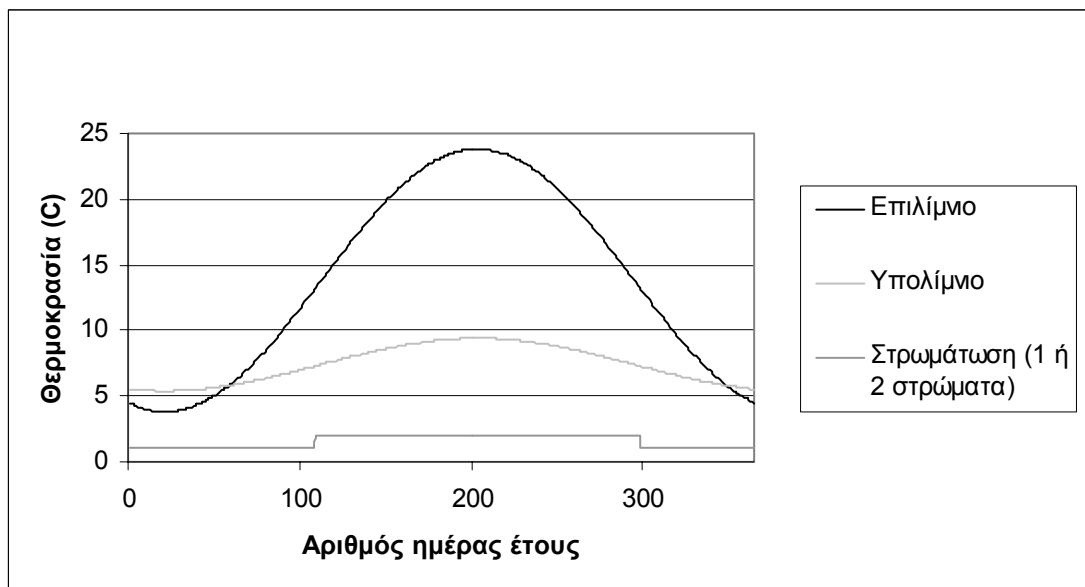
T : θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)

T_{mean} : μέση θερμοκρασία έτους ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT : εύρος διακύμανσης θερμοκρασίας στο έτος ($^{\circ}\text{C}$)

td : αριθμός της ημέρας ($td = 1$ για 1^η Ιανουαρίου)

Στην εξεταζόμενη περίπτωση οι τιμές των T_{mean} και ΔT προσδιορίστηκαν ίσες με $13,8$ $^{\circ}\text{C}$ και $10,0$ $^{\circ}\text{C}$, και $7,4$ $^{\circ}\text{C}$ και $2,0$ $^{\circ}\text{C}$ για το επιλίμνιο και το υπολίμνιο, αντίστοιχα. Εισάγοντας τις τιμές αυτές στη γενική εξίσωση 2-4 προκύπτουν οι κατανομές της ημερήσιας θερμοκρασίας του επιλιμνίου (T_{epi}) και υπολιμνίου (T_{ypo}), οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6. Μεταβολή της ημερήσιας θερμοκρασίας επιλιμνίου και υπολιμνίου

Φθινοπωρινή αναστροφή - Πλήρης ανάμιξη

Η θερμική στρωμάτωση του νερού τη θερινή περίοδο αρχίζει να διαταράσσεται, όταν μειώνεται η θερμοκρασία του επιφανειακού στρώματος και μεταφέρονται σε μεγαλύτερο βάθος επιφανειακές μάζες νερού. Η διαδικασία της σταδιακής αύξησης του πάχους του στρώματος του επιλιμνίου, σε βάρος του μεταλιμνίου, τελειώνει όταν η θερμοκρασία του επιλιμνίου εξισωθεί με αυτήν του υπολιμνίου. Η διεργασία αυτή καλείται φθινοπωρινή αναστροφή και οδηγεί στην πλήρη ανάμιξη του νερού σε όλο το βάθος της λίμνης.

Θεωρητικά, για την περίπτωση των διμικτικών λιμνών, η περαιτέρω πτώση της θερμοκρασίας στο επιφανειακό στρώμα καταλήγει σε θερμική στρωμάτωση κατά τη διάρκεια του χειμώνα (χειμερινή στρωμάτωση) με δύο θερμοκρασιακές ζώνες, τη ψυχρή επιφανειακή, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργείται στρώμα πάγου και τη ζώνη των 4°C. Την άνοιξη με την άνοδο της θερμοκρασίας του επιφανειακού στρώματος ακολουθεί η εαρινή αναστροφή, η οποία οδηγεί σε νέα πλήρη ανάμιξη του νερού.

Η Λίμνη Πλαστήρα ανήκει στις θερμού μονομικτικού τύπου λίμνες με μια περίοδο θερμικής στρωμάτωσης από το Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο και μια περίοδο ισόθερμης ανάμιξης στη διάρκεια του χειμώνα και στην αρχή της άνοιξης (Τσέκος κ.α, 1992).

Στο μοντέλο, με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, θεωρήθηκε ότι η διαταραχή της θερμικής στρωμάτωσης πραγματοποιείται, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιλιμνίου και υπολιμνίου γίνεται μικρότερη από 6 °C. Με βάση την παραδοχή αυτή στο μοντέλο δεν παρατηρείται στρωμάτωση (βλ. Σχήμα 2-6) από την 295^η μέρα του έτους μέχρι την 110^η του επομένου δηλ. για από τα μέσα Οκτωβρίου μέχρι τα μέσα Απριλίου. Η περίοδος αυτή βρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με τη μετρημένη, που όπως αναφέρθηκε ήταν: Οκτώβριος- Μάιος.

Υπολογισμός όγκων επιλιμνίου και υπολιμνίου και μέσων βαθών

Για τον υπολογισμό των όγκων του επιλιμνίου και του υπολιμνίου τη κάθε χρονική στιγμή εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία:

1. Με δεδομένο τον ολικό όγκο της λίμνης (V_{tot}) υπολογίζονται (α) η στάθμη της επιφάνειας (H_{tot}) και (β) το εμβαδό της επιφάνειας (A_{tot}) της λίμνης από τις εξισώσεις

$$Atot = -2E-09Vtot^4 + 2E-06Vtot^3 - 0,0007Vtot^2 + 0,1741Vtot + 0,2902 \quad (2-5)$$

$$Htot = -0,0003Atot^4 + 0,02Atot^3 - 0,4773Atot^2 + 5,491Atot + 751,17 \quad (2-6)$$

2. Θεωρώντας το βάθος του επιλιμνίου ίσο με $Hepi=6,0$ m, υπολογίζεται η στάθμη του θερμοκλινούς από την εξίσωση

$$Hther = Htot - Hepi = Htot - 6,0 \quad (2-7)$$

3. Από την τιμή της $Hther$ υπολογίζεται ο όγκος του υπολιμνίου $Vgyro$ από την ακόλουθη εξίσωση

$$Vgyro = 5,046E03Hther^3 - 1,128E06Hther^2 + 8,453E09Hther - 2,111E12 \quad (2-8)$$

4. και το εμβαδό επιφάνειας του θερμοκλινούς ($Ather$) από την εξίσωση 2-5

5. Ο όγκος του επιλιμνίου υπολογίζεται από την εξίσωση

$$Vepi = Vtot - Vgyro \quad (2-9)$$

Τα μέσα βάθη λίμνης ($Hmtot$), επιλιμνίου ($Hmepi$) και υπολιμνίου ($Hmyro$) υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$Hmepi = \frac{Vepi}{Ather + Atot} \quad (2-10)$$

$$Hmyro = \frac{Vgyro}{Ather + Abot} \quad (2-11)$$

$$Hmtot = Hmepi + Hmyro \quad (2-12)$$

όπου

$Abot$: επιφάνεια πυθμένα (m^2)

2.1.4 Ρυπαντικά φορτία

Τα ρυπαντικά φορτία της λίμνης Πλαστήρα (Κατσίρη, 2001) προέρχονται από:

- (α) σημειακές πηγές (εισροή αστικών αποβλήτων) και
- (β) μη σημειακές πηγές (επιφανειακές εισροές).

Η φόρτιση από τις σημειακές πηγές θεωρήθηκε ότι αυξάνεται κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου εξαιτίας της αθρόας προσέλευσης επισκεπτών. Η φόρτιση από τις μη σημειακές πηγές θεωρήθηκε ότι είναι σταθερή σε όλο το έτος.

Φορτία από σημειακές πηγές ρύπανσης

Σημειακές πηγές ρυπαντικών φορτίων αποτελούν οι εκροές αποχετευτικών αγωγών οικισμών γύρω από τη λίμνη και η εισροή των ποταμών στη λίμνη. Οι φορτίσεις αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την εποχή.

Τα συνολικά φορτία στην τουριστική και μη τουριστική περίοδο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1. Κατανομή φορτίων από σημειακές πηγές

	Μη τουριστική		Τουριστική	
	Kg/d	Kg/έτος	Kg/d	Kg/έτος
BOD	166,65	60827	253,15	92400
SS	15,5	27558	115,05	41993
N	38,1	13907	58,3	21280
P	2,04	745	3,12	1139

Οι μήνες της τουριστικής περιόδου ήταν οι μήνες Δεκέμβριος, Απρίλιος, Ιούλιος και Αύγουστος.

Τα φορτία αζώτου θεωρείται ότι αποτελούνται κατά 50% από αμμωνία και 50% από νιτρικά, ενώ ο φώσφορος ότι είναι μόνο σε ανόργανη μορφή.

Φορτία από μη σημειακές πηγές ρύπανσης

Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής της λίμνης Πλαστήρα.

Πίνακας 2-2. Χρήσεις γης

Χρήση γης	Έκταση (στρ.)	Ποσοστό (%)
Αστικές περιοχές	2000	1
Καλλιέργειες	12500	7
Βοσκότοποι	40000	24
Δάση	84500	51
Νερά	28000	17
Σύνολο	167000	100

Για τα φορτία αζώτου και φωσφόρου, θεωρήθηκε ότι απορρέουν ανάλογα με τη χρήση η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3. Φορτίσεις ανάλογα με τη χρήση γης (kg/στρέμμα/έτος)

Χρήση γης	N	P
Αστικές περιοχές	0,25	0,1
Καλλιέργειες	3	0,1
Βοσκότοποι	0,5	0,05
Δάση	0,3	0,01
Νερά	0,4	0,02

Η αυξημένη φόρτιση αζώτου από τις καλλιέργειες οφείλεται στην περιεκτικότητα αζώτου στα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται.

Τελικά, οι συνολικές φορτίσεις από μη σημειακές πηγές διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-4.

Πίνακας 2-4. Φορτίσεις από μη σημειακές πηγές

Χρήση γης	Φορτία (kg/έτος)	
	N	P
Αστικές περιοχές	500	200
Καλλιέργειες	37500	1250
Βοσκότοποι	20000	2000
Δάση	25350	845
Νερά	11200	560
Σύνολο	94550	4855

Τα φορτία του αζώτου θεωρήθηκαν ότι είναι μόνο νιτρικά, ενώ αυτά του φωσφόρου αποτελούνται από 30% ανόργανο φώσφορο και 70% οργανικό φώσφορο.

2.2 Εξισώσεις του μοντέλου

2.2.1 Γενικά

Γενική διαφορική εξίσωση συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων

Η διαφορική εξίσωση του ισοζυγίου μάζας μιας ποιοτικής παραμέτρου στον όγκο της λίμνης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\frac{dC}{dt} \cdot V = Min - Mout \pm Mmix + Mproc \quad (2-13)$$

όπου

V : όγκος της λίμνης ή του στρώματος (m^3)

C : συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου (g/m^3)

t : χρόνος (day)

Min : φορτίο εισροής (g/day)

$Mout$: φορτίο εκροής (g/day)

$Mmix$: ρυθμός μεταφοράς μάζας ποιοτικής παραμέτρου από το επιλίμνιο προς το υπολίμνιο (g/day)

$Mproc$: ρυθμός μεταβολής μάζας ποιοτικής παραμέτρου (g/day) εξαιτίας φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών.

Γενική αριθμητική εξίσωση συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων

Στο μοντέλο υπάρχουν δύο περίοδοι υπολογισμού:

(α) η περίοδος θερμικής στρωμάτωσης και

(β) η περίοδος πλήρους ανάμιξης.

Περίοδος θερμικής στρωμάτωσης

Για τη χρονική περίοδο στρωμάτωσης, η εξίσωση 2-13 ολοκληρώνεται στους όγκους του επιλιμνίου και υπολιμνίου και προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις

Για το επιλίμνιο

$$C_{epi}^{n+1} = C_{epi}^n + (Min - Mout \pm Mmix_{epi} + Mproc_{epi}) \cdot \frac{\Delta t}{V_{epi}} \quad (2-14)$$

Για το υπολίμνιο

$$C_{ypo}^{n+1} = C_{ypo}^n + (\pm Mmix_{ypo} + Mproc_{ypo}) \cdot \frac{\Delta t}{V_{ypo}} \quad (2-15)$$

όπου

C^n : συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

C^{n+1} : συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ (g/m^3)

Δt : χρονικό βήμα (days)

V : όγκος της λίμνης ή του στρώματος (m^3)

Για το σύνολο της λίμνης υπολογίζονται οι μέσες συγκεντρώσεις από την ακόλουθη εξίσωση

$$C^n = \frac{C_{epi}^n \cdot V_{epi} + C_{ypo}^n \cdot V_{ypo}}{V} \quad (2-16)$$

Περίοδος πλήρους ανάμιξης

Στο πρώτο χρονικό βήμα της περιόδου πλήρους ανάμιξης ως αρχικές συγκεντρώσεις των ποιοτικών παραμέτρων (δηλ. κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα) θεωρούνται οι μέσες τιμές σε όλο τον όγκο της λίμνης και επιλύεται στη συνέχεια μόνο η εξίσωση 2-13 στην ακόλουθη μορφή

$$C^{n+1} = C^n + (Min - Mout + Mproc) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (2-17)$$

δηλ. δεν υπάρχει ο όρος μεταφοράς μάζας εξαιτίας θερμικής στρωμάτωσης μεταξύ επιλιμνίου και υπολιμνίου.

Φορτία εισροής και εκροής

Τα φορτία εισροής δίνονται στο 2.1.4.

Τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mout = Qout \cdot C^n \quad (2-18)$$

όπου

C^n : συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή t (g/m³)

$Qout$: παροχή εκροής (m³/day)

Μεταφορά μάζας εξαιτίας θερμικής στρωμάτωσης

Η μεταφορά μάζας εξαιτίας θερμικής στρωμάτωσης μεταξύ επιλιμνίου και υπολιμνίου υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mmix = -Qmix \cdot (C_{epi}^n - C_{ypo}^n) \quad (2-19)$$

όπου

$Mmix$: ρυθμός μεταφοράς μάζας ποιοτικής παραμέτρου από το επιλίμνιο προς το υπολίμνιο (g/day)

$Qmix$: παροχή κατακόρυφης ανάμιξης (m³/day)

Η παροχή κατακόρυφης ανάμιξης υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Qmix = \frac{Disp \cdot Ather}{DH} \quad (2-20)$$

όπου

$Disp$: συντελεστής κατακόρυφης διασποράς (m²/day)

DH : απόσταση κεντροειδών επιλιμνίου και υπολιμνίου (m)

$Ather$: επιφάνεια θερμοκλινοῦς (m²).

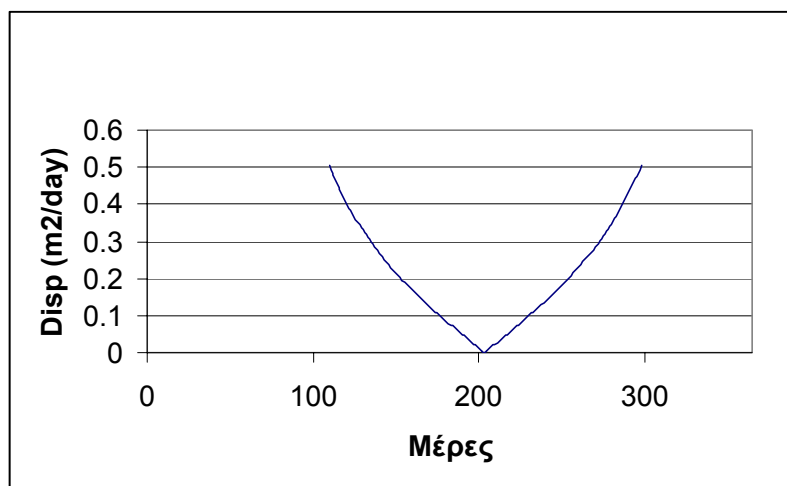
Ο συντελεστής κατακόρυφης διασποράς μπορεί να υπολογιστεί από δεδομένα κατακόρυφης κατανομής θερμοκρασιών (βλ. Σχήμα 2-3). Θεωρείται ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το επιλίμνιο στο υπολίμνιο είναι ίσος με το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας του υπολιμνίου (Thomann and Mueller, 1987), δηλ.

$$V_{\text{υπο}} \cdot \frac{|T_{\text{υπο}}^{n-1} - T_{\text{υπο}}^n|}{dt} = \frac{Disp \cdot A_{\text{Ther}}}{DH} (T_{\text{επι}}^n - T_{\text{υπο}}^n) \quad (2-21)$$

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής κατακόρυφης διασποράς των συγκεντρώσεων των ποιοτικών παραμέτρων είναι ίσος με τον αντίστοιχο της θερμοκρασίας και επιλύοντας την 2-21 ως προς το συντελεστή κατακόρυφης διασποράς προκύπτει

$$Disp = DH \cdot \left(\frac{V_{\text{υπο}}}{A_{\text{Ther}} \cdot dt} \cdot \frac{|T_{\text{υπο}}^{n-1} - T_{\text{υπο}}^n|}{T_{\text{επι}}^n - T_{\text{υπο}}^n} \right) \quad (2-22)$$

Στο Σχήμα 2-7 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του συντελεστή κατακόρυφης διασποράς.



Σχήμα 2-7.

μεταβολή του συντελεστή κατακόρυφης διασποράς

Χρονική

2.2.2 Άλγη - Φυτοπλαγκτό

Γενικά

Τα άλγη αποτελούν το σημαντικότερο βιολογικό παράγοντα σε μια λίμνη. Παράγουν οξυγόνο, καταναλώνουν θρεπτικά και επηρεάζουν καθοριστικά τα ισοζύγια των ποιοτικών χαρακτηριστικών της λίμνης. Η υπερβολική ανάπτυξη των αλγών (ευτροφισμός) μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, όπως αισθητικά (γλοιώδης αίσθηση της επιφάνειας του νερού, έντονες μυρωδιές από την αποσύνθεση των αλγών κλπ), μείωση της διείσδυσης του φωτός στα κατώτερα στρώματα, αύξηση της ζήτησης σε οξυγόνο από τα άλγη που καθίζησαν στον πυθμένα και ταπείνωση των επιπέδων οξυγόνου, ιδιαίτερα στο υπολίμνιο με πιθανό αποτέλεσμα το θάνατο των ψαριών.

Τα άλγη που υπάρχουν στη λίμνη ανήκουν σε διάφορες κατηγορίες, όπως διάτομα, χλωροφύκη, χρυσοφύκη κλπ. Η μαθηματική περιγραφή όλων των κατηγοριών αυτών από ένα μαθηματικό μοντέλο, καθιστά το μοντέλο ιδιαίτερα πολύπλοκο. Επιπλέον, επειδή οι διεργασίες για τις διάφορες κατηγορίες αλγών είναι παρόμοιες, το παρόν μοντέλο να περιέχει μια μόνο «αντιπροσωπευτική κατηγορία φυτοπλαγκτού», η οποία θα μετράται σε όρους «χλωροφύλλης-α». Η χλωροφύλλη-α περιέχεται σε όλα τα άλγη και χρησιμοποιείται συχνά ως δείκτης της ποιοτικής κατάστασης-ευτροφισμού των υδάτων.

Διεργασίες – Εξίσωση υπολογισμού

Οι διεργασίες που καθορίζουν τη χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης του φυτοπλαγκτού στη λίμνη είναι οι ακόλουθες:

1. Ανάπτυξη φυτοπλαγκτού (Gr_A).
2. Ενδογενής αναπνοή φυτοπλαγκτού (Res_A).
3. Θάνατος φυτοπλαγκτού (Dec_A).
4. Καθίζηση φυτοπλαγκτού (Set_A).

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_A),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_A$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_A$)

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$A^{n+1} = A^n + (Min_A - Mout_A \pm Mmix_A + Mproc_A) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (A)$$

όπου

- A^n : συγκέντρωση χλωροφύλλης-α τη χρονική στιγμή t (g/m^3)
 A^{n+1} : συγκέντρωση χλωροφύλλης-α τη χρονική στιγμή t+ Δt (g/m^3)
 Δt : χρονικό βήμα (days)
 V : όγκος της λίμνης ή του στρώματος (m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4 (στην περίπτωση της χλωροφύλλης-α είναι μηδενικά), τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_A \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_A + Res_A + Dec_A + Set_A \quad (A-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (A-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Ανάπτυξη φυτοπλαγκτού

Η εξίσωση υπολογισμού της ανάπτυξης είναι η ακόλουθη

$$Gr_A = \mu \cdot A^n \quad (A-1)$$

όπου

μ : ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού (1/day)

Ο ρυθμός ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού (μ) εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

1. Θερμοκρασία
2. Παρουσία θρεπτικών.
3. Ηλιακή ακτινοβολία.

Η εξίσωση που λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες αυτούς είναι η ακόλουθη

$$\mu = CMA \cdot AR \cdot FNP \quad (A-1-1)$$

όπου

CMA : ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού στους T°C (1/day)

FNP : συντελεστής επίδρασης θρεπτικών (-)

AR : συντελεστής επίδρασης ηλιακής ακτινοβολίας (-)

Επίδραση θερμοκρασίας

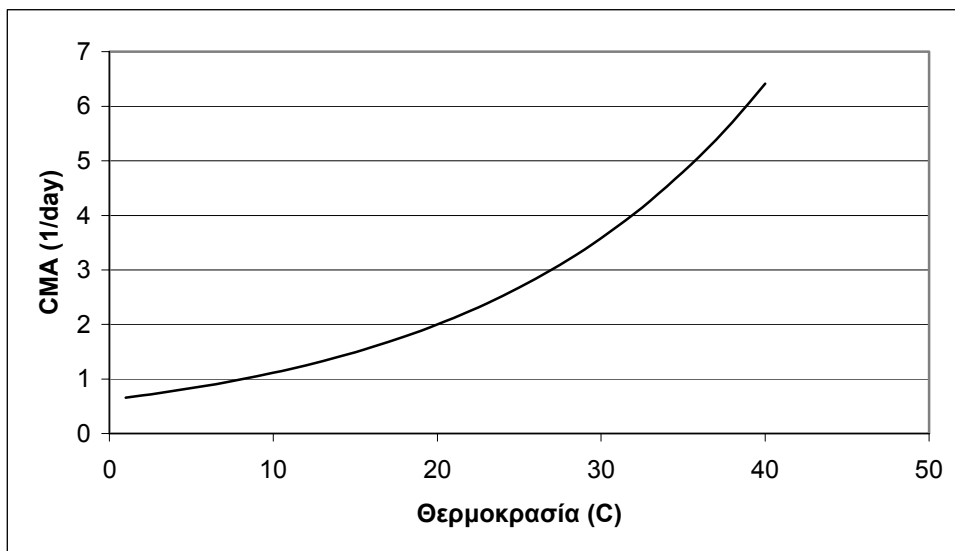
Η επίδραση της θερμοκρασίας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης Σχήμα 2-8)

$$CMA = CMA_{20} \cdot 1,06^{(T-20)} \quad (A-1-2)$$

όπου

CMA_{20} : ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού στους 20 °C (1/day)

T : θερμοκρασία (°C)



Σχήμα 2-8. Εξάρτηση του συντελεστή CMA από τη θερμοκρασία

Στον Πίνακα 2-5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή CMA20, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-5. Τιμές συντελεστή CMA20

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (1/day)
EPA (1985)	1,0 – 3,0
EPA (2000)	1,8 – 3,9
Gargas (1976)	2,5
Chen and Orlob (1975)	1,0 – 2,0
O'Connor et al (1973)	1,8 – 3,9
Larsen et al (1974)	2,4
Nyholm (1978)	0,8 – 2,4
Scavia et Park (1976)	1,1 – 1,6
Imboden (1976)	1,0 – 2,0

Επίδραση θρεπτικών

Τα θρεπτικά που αποτελούν συνήθως τους περιοριστικούς παράγοντες είναι το άζωτο και ο φώσφορος. Τα άλγη προσλαμβάνουν άζωτο σε μορφή αμμωνίας και νιτρικών και τον φώσφορο σε ανόργανη μορφή.

Οι συνηθισμένες προσεγγίσεις για την επίδραση των θρεπτικών είναι:

(α) Πολλαπλασιαστική, όπου θεωρείται επίδραση και από τα δύο θρεπτικά:

$$FNP = FN \cdot FP \quad (\text{A-1-3})$$

(β) Περιοριστικού παράγοντα, όπου θεωρείται επίδραση μόνο από το θρεπτικό που βρίσκεται σε έλλειψη:

$$FNP = \min(FN, FP) \quad (\text{A-1-4})$$

όπου

FN : περιοριστικός παράγοντας εξαιτίας του αζώτου (-)

FP : περιοριστικός παράγοντας εξαιτίας του φωσφόρου (-)

Με την προσέγγιση αυτή λαμβάνεται υπόψη το θρεπτικό που αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα, αλλά αγνοείται η αλληλεπίδραση των θρεπτικών και οι διαφορετικές ανάγκες της κάθε κατηγορίας αλγών σε θρεπτικά.

Στο παρόν μοντέλο εφαρμόζεται η πρώτη προσέγγιση.

Οι περιοριστικοί παράγοντες FN και FP υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$FN = \frac{A1^n + A2^n}{CA12 + A1^n + A2^n} \quad (A-1-5)$$

$$FP = \frac{P2^n}{CP2 + P2^n} \quad (A-1-6)$$

όπου

$A1^n$: συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$A2^n$: συγκέντρωση νιτρικού αζώτου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$CA12$: σταθερά ημι-κορεσμού για το άζωτο (g/m^3)

$P2^n$: συγκέντρωση ανόργανου φωσφόρου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$CP2$: σταθερά ημι-κορεσμού για το φώσφορο (g/m^3)

Οι σταθερές ημι-κορεσμού $CA12$ και $CP2$ αποτελούν τις συγκεντρώσεις του κάθε θρεπτικού που χρειάζονται τα άλγη για να έχουν ταχύτητα ανάπτυξης ίση με το 50% της μέγιστης.

Στους Πίνακες 2-6 και 2-7 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών $CA12$ και $CP2$, αντίστοιχα, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-6. Τιμές συντελεστή $CA12$

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (mg/l)
EPA (1985)	0,010 – 0,300
EPA (2000)	0,006 – 0,030
Gargas (1976)	0,050
Chen and Orlob (1975)	0,300 – 0,400
O'Connor et al (1973)	0,025
Scavia et Park (1976)	0,005 – 0,008
Larsen et al (1974)	0,014

Πίνακας 2-7. Τιμές συντελεστή $CP2$

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (mg/l)
EPA (1985)	0,001 – 0,050
EPA (2000)	0,001 – 0,070
Chen and Orlob (1975)	0,030 – 0,050
Larsen et al (1974)	0,001
Scavia et Park (1976)	0,005 – 0,015

Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας

Στο παρόν μοντέλο η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Steele (1962)

$$AR = \frac{e \cdot f \cdot (a_1 - a_0)}{K_e \cdot (Hm_1 - Hm_0)} \quad (A-1-7)$$

όπου

- f : φωτοπερίοδος (-)
 a_0 : ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στο πάνω (0) όριο της στρώσης (-)
 a_1 : ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στο κάτω (1) όριο της στρώσης (-)
 K_e : συντελεστής μείωσης ηλιακής ακτινοβολίας με το βάθος εξαιτίας της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών και της συγκέντρωσης των αλγών (1/m)
 Hm_0 : μέσο βάθος πάνω (0) επιπέδου της στρώσης (m)
 Hm_1 : μέσο βάθος κάτω (1) επιπέδου της στρώσης (m)

Από έρευνα της συμπεριφοράς των κυττάρων στις διακυμάνσεις της ακτινοβολίας έχει διαπιστωθεί ότι η αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας πέραν μιας τιμής, έστω I_s (ένταση κορεσμού) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ρυθμών φωτοσύνθεσης.

Η μείωση αυτή οφείλεται στην καταστροφή της δομής της χλωροφύλλης, εξαιτίας της μεγάλης έντασης της ακτινοβολίας που δέχεται. Έτσι, για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του βάθους και της αναχαίτισης αυτής, οι τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας a_0 και a_1 γράφονται:

$$a_{0,1} = e^{-\frac{I_0}{I_s} \cdot e^{-K_e \cdot Hm_{0,1}}} \quad (A-1-8)$$

όπου

- I_0 : μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ελεύθερη επιφάνεια (Ly/day)
 I_s : ένταση κορεσμού ηλιακής ακτινοβολίας για τη φωτοσύνθεση (Ly/day)

Στον Πίνακα 2-8 παρουσιάζονται τιμές του I_s που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-8. Τιμές συντελεστή I_s

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (Ly/d)
EPA (1985)	30 – 200
EPA (2000)	100 – 350
Gargas (1976)	200
Chen and Orlob (1975)	350
O'Connor et al (1973)	300
Scavia et Park (1976)	300 – 350
Larsen et al (1974)	150

Η μέση ένταση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση (EPA, 2000)

$$I_0 = I_{mean} + \frac{I_{range}}{2} \cdot \sin(0.0174533 \cdot td - 1.76) \quad (A-1-9)$$

όπου

I_{mean} : μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα χρόνο (Ly/day)
 I_{range} : εύρος έντασης ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα χρόνο (Ly/day)
 td : αριθμός ημέρας ($td = 1$ για την 1^η Ιανουαρίου)

Η φωτοπερίοδος χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη την έντονη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$f = \frac{12 + (0.1414 \cdot Lat - 2.413) \cdot \cos(6.37 \cdot \frac{td}{365} + 248)}{24} \quad (A-1-10)$$

όπου

Lat : γεωγραφικό πλάτος

Ο συντελεστής μείωσης K_e υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$K_e = K_w + K_a \cdot A^n \quad (A-1-11)$$

όπου

K_w : σταθερά απόσβεσης εξαιτίας των αιωρούμενων στερεών (1/m)
 K_a : σταθερά απόσβεσης εξαιτίας του φυτοπλαγκτού ($m^2/g A$)

Ενδογενής αναπνοή φυτοπλαγκτού

Η διεργασία της ενδογενούς αναπνοής υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Res_A = -RA \cdot A^n \quad (A-2)$$

όπου

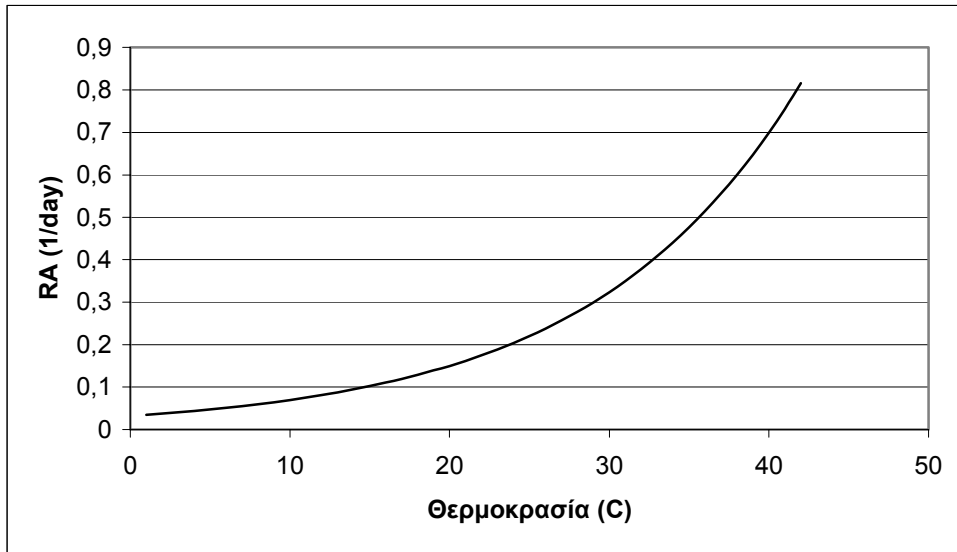
RA : ταχύτητα ενδογενούς αναπνοής φυτοπλαγκτού (1/day)

Η ταχύτητα της ενδογενούς αναπνοής αυξάνεται με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης Σχήμα 2-9)

$$RA = RA_{20} \cdot 1,08^{(T-20)} \quad (A-2-1)$$

όπου

RA_{20} : ταχύτητα ενδογενούς αναπνοής φυτοπλαγκτού στους 20 °C (1/day)



Σχήμα 2-9. Εξάρτηση του συντελεστή RA από τη θερμοκρασία

Στον Πίνακα 2-9 παρουσιάζονται τιμές του συντελεστή RA20, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-9. Τιμές συντελεστή RA20

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (1/day)
EPA (1985)	0,050 – 0,500
EPA (2000)	0,020 – 0,026
Gargas (1976)	0,060
Scavia et Park (1976)	0,010

Θάνατος φυτοπλαγκτού

Η εξίσωση που περιγράφει το θάνατο του φυτοπλαγκτού είναι η ακόλουθη

$$Dec_A = -CKDA \cdot A^n \quad (A-3)$$

όπου

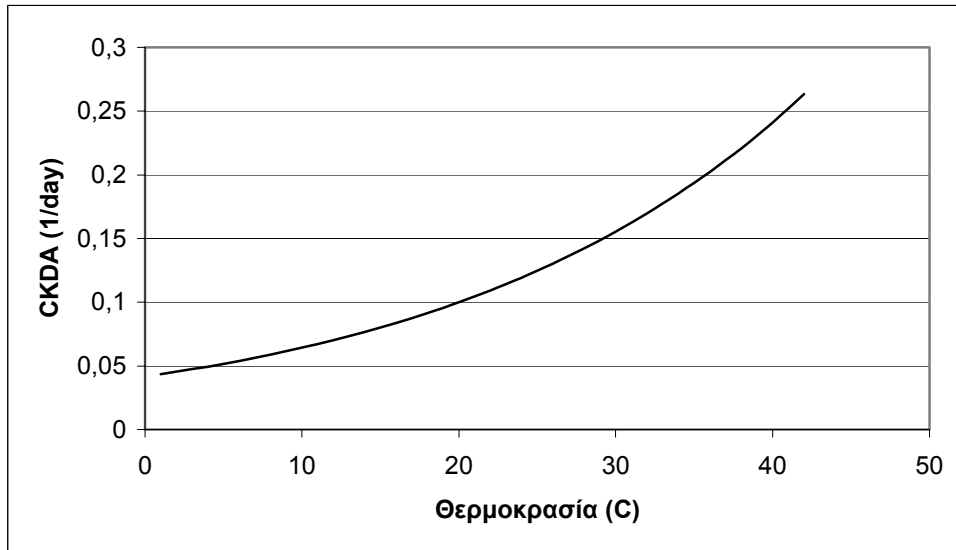
$CKDA$: ταχύτητα θανάτου φυτοπλαγκτού (1/day)

Για την εξάρτηση της ταχύτητας θανάτου του φυτοπλαγκτού από τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης Σχήμα 2-10)

$$CKDA = CKDA20 \cdot 1,045^{(T-20)} \quad (A-3-1)$$

όπου

$CKDA20$: ταχύτητα θανάτου φυτοπλαγκτού στους 20 °C (1/day)



Τιμή του συντελεστή CKDA20 που χρησιμοποιήθηκε σε άλλο μοντέλο είναι 0,20 (1/day) (Κωστόπουλος, 1995).

Καθίζηση φυτοπλαγκτού

Η καθίζηση του φυτοπλαγκτού περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Set_A = -KSA \cdot A^n \quad (A-4)$$

όπου

KSA : συντελεστής καθίζησης φυτοπλαγκτού (1/day)

Στο παρόν μοντέλο ο ρυθμός καθίζησης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$KSA = \frac{VAMAX}{H + BA} \quad (A-4-1)$$

όπου

$VAMAX$: ταχύτητα καθίζησης φυτοπλαγκτού (m/day)

H : μέσο βάθος (m)

BA : συντελεστής επαναιώρησης (m)

Στον Πίνακα 2-10 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή VAMAX, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-10. Τιμές συντελεστή VAMAX

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (m/day)
EPA (1985)	0,15 – 1,83
EPA (2000)	0,01 – 0,30
Gargas (1976)	0,20
Chen and Orlob (1975)	0,05 – 0,20
O'Connor et al (1973)	0,10
Nyholm (1978)	0,05 – 0,30
Scavia et Park (1976)	0,20
Imboden (1976)	0,10 – 0,40

Η μεγάλη διακύμανση των τιμών της ταχύτητας καθίζησης οφείλεται στη μεγάλη επίδραση των χαρακτηριστικών (α) των καθιζανόντων κυττάρων (π.χ. μέγεθος) και (β) του πεδίου ροής (π.χ. τύρβης, κυκλοφορίας) του υδάτινου σώματος.

2.2.3 Άζωτο

Γενικά

Το άζωτο εμφανίζεται ως οργανικό, αμμωνιακό και οξειδωμένο (νιτρώδη και νιτρικά) άζωτο με ποσοτική κατανομή, η οποία εξαρτάται από τις διεργασίες και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Στο παρόν μοντέλο θεωρούνται δύο μορφές αζώτου, το αμμωνιακό και το νιτρικό άζωτο. Η απλούστευση αυτή βασίζεται στα ακόλουθα:

- (α) η διαδικασία της αμμωνιοποίησης γίνεται κατά κανόνα με σημαντικά ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με τις άλλες διεργασίες
- (β) οι κύριες πηγές ρύπανσης περιέχουν το άζωτο σε ανόργανη κυρίως μορφή.

Αμμωνιακό Άζωτο – Διεργασίες

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι οι ακόλουθες:

1. Τροφοδότηση εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού (Gr_{A1})
2. Πρόσληψη από το φυτοπλαγκτό (Up_{A1})
3. Νιτροποίηση (N_{A1})
4. Τροφοδότηση από τον πυθμένα (SR_{A1})

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_{A1}),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_{A1}$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_{A1}$).

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$A1^{n+1} = A1^n + (Min_{A1} - Mout_{A1} \pm Mmix_{A1} + Mproc_{A1}) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (A1)$$

όπου

$A1^n$: συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$A1^{n+1}$: συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου τη χρονική στιγμή t+ Δt (g/m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4, τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_{A1} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_{A1} + Up_{A1} + N_{A1} + SR_{A1} \quad (A1-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (A1-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Τροφοδότηση εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού

Η εξίσωση απελευθέρωσης αζώτου κατά την αποσύνθεση του φυτοπλαγκτού είναι η ακόλουθη

$$Gr_{A1} = Y2 \cdot CKDA \cdot A^n \quad (A1-1)$$

όπου

$Y2$: περιεκτικότητα της χλωροφύλλης σε άζωτο ($g N / g A$)

$CKDA$: ταχύτητα θανάτου φυτοπλαγκτού ($1/day$)

Στον Πίνακα 2-11 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή Y2, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-11. Τιμές συντελεστή Y2

Μοντέλο-Ερευνητής	Y2
O'Connor (1976)	7 – 10
Di Toro et al (1975)	7
Larsen et al (1974)	7,2
Thomann et al (1975)	10

Πρόσληψη από το φυτοπλαγκτό

Η διεργασία της πρόσληψης αμμωνιακού αζώτου από το φυτοπλαγκτό δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$U_{p_{AI}} = -\mu \cdot Y2 \cdot PNH \cdot A^n \quad (A1-2)$$

όπου

PNH : συντελεστής προτίμησης αμμωνιακού αζώτου (-)

Η χρησιμοποίηση του αμμωνιακού αζώτου από το φυτοπλαγκτό εξαρτάται από την ποσοστιαία κατανομή των μορφών του ανόργανου αζώτου και συγκεκριμένα το λόγο αμμωνιακού αζώτου προς νιτρικό αζώτο. Ο συντελεστής PNH εκφράζει την προτίμηση των αλγών να προσλαμβάνουν την αμμωνία σε σχέση με τα νιτρικά. Ο συντελεστής PNH δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$PNH = \frac{PN \cdot A1^n}{PN \cdot A1^n + (1 - PN) \cdot A2^n} \quad (A1-2-3)$$

όπου

PN : σταθερά προτίμησης αμμωνιακού αζώτου (-)

$A1^n$: συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου τη χρονική στιγμή t (g/m³)

$A2^n$: συγκέντρωση νιτρικού αζώτου τη χρονική στιγμή t (g/m³)

Νιτροποίηση

Η διαδικασία της νιτροποίησης περιγράφεται με κινητική πρώτης τάξης, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση

$$N_{AI} = -RN \cdot A1^n \quad (A1-3)$$

όπου

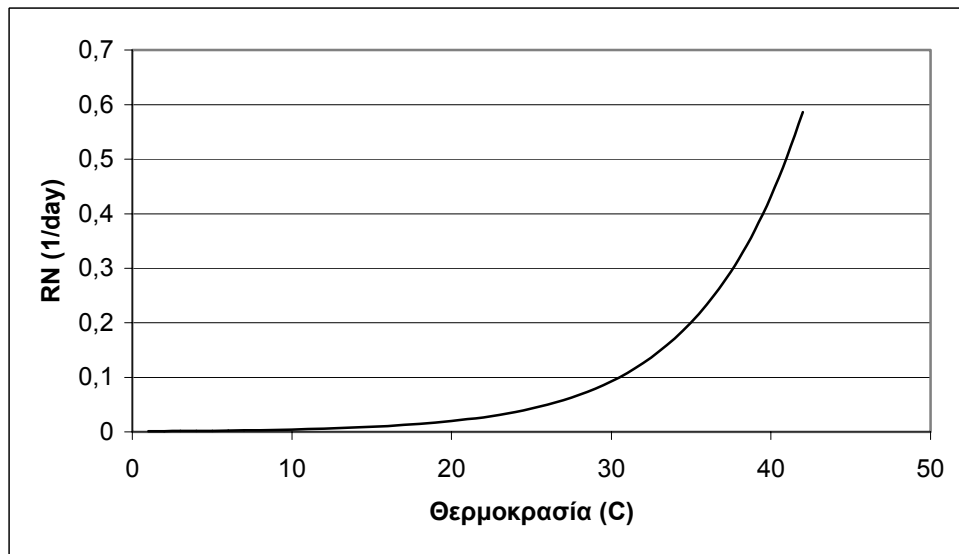
RN : ταχύτητα νιτροποίησης (1/day)

Η επίδραση της θερμοκρασίας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης Σχήμα 2-11)

$$RN = RN20 \cdot 1,166^{(T-20)} \quad (A1-3-1)$$

όπου

RN_{20} : ταχύτητα νιτροποίησης στους 20 °C (1/day)



Στον Πίνακα 2-12 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή RN_{20} , οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-12. Τιμές συντελεστή RN_{20}

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (1/day)
EPA (1985)	0,02 – 2,00
Chen and Orlob (1975)	0,03
O'Connor (1973)	0,20

Τροφοδότηση από τον πυθμένα

Εξαιτίας της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ του πυθμενικού στρώματος και του υπερκείμενου υδάτινου στρώματος μεταφέρεται από τον πυθμένα αμμωνιακό αζώτο με ρυθμό που υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$SR_{A1} = \frac{KRN}{H} \quad (A1-4)$$

όπου

KRN : συντελεστής πυθμενικής τροφοδότησης αμμωνιακού αζώτου ($g/m^2/day$)

H : μέσο βάθος (m)

Στον Πίνακα 2-13 παρουσιάζονται τιμές του συντελεστή KRN .

Πίνακας 2-13. Τιμές συντελεστή KRN

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμές (g/m^2)
Di Toro and Connolly (1980)	0,022 – 0,044

Νιτρικό Άζωτο – Διεργασίες

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

1. Νιτροποίηση (N_{A2})

2. Πρόσληψη από το φυτοπλαγκτό (Up_{A2})

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_{A2}),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_{A2}$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_{A2}$).

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$A2^{n+1} = A2^n + (Min_{A2} - Mout_{A2} \pm Mmix_{A2} + Mproc_{A2}) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (A2)$$

όπου

$A2^n$: συγκέντρωση νιτρικού αζώτου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$A2^{n+1}$: συγκέντρωση νιτρικού αζώτου τη χρονική στιγμή t+ Δt (g/m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4, τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_{A2} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Up_{A2} + N_{A2} \quad (A2-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (A2-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Νιτροποίηση

Η διαδικασία της νιτροποίησης περιγράφεται από την A1-3. Στην περίπτωση του νιτρικού αζώτου η εξίσωση γράφεται με θετικό πρόσημο

$$N_{A2} = RN \cdot A1^n \quad (A2-1)$$

Πρόσληψη από το φυτοπλαγκτό

Η μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών εξαιτίας της πρόσληψης από το φυτοπλαγκτό περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης A1-2)

$$Up_{A2} = -\mu \cdot Y2 \cdot (1 - PNH) \cdot A^n \quad (A2-2)$$

2.2.4 Φώσφορος

Γενικά

Ο φώσφορος στο υδάτινο περιβάλλον εμφανίζεται με τη μορφή του οργανικού ή του ανόργανου φωσφόρου, σε διαλυμένη ή σε σωματιδιακή μορφή. Η ποσοτική κατανομή μεταξύ των διαφόρων μορφών εξαρτάται από τις βιολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες που επιτελούνται.

Στο παρόν μοντέλο θεωρούνται δυο μορφές φωσφόρου: (α) ο οργανικός φώσφορος σε σωματιδιακή μορφή και (β) ο ανόργανος διαλυμένος φώσφορος. Ο οργανικός σωματιδιακός φώσφορος μετατρέπεται σε οργανικό διαλυμένο φώσφορο ταχύτατα μέσω μηχανισμών ενζυμικής υδρόλυσης. Στη συνέχεια ο διαλυμένος οργανικός μετατρέπεται σε ανόργανο διαλυμένο φώσφορο, ο οποίος αποτελεί τη μορφή που μπορεί να προσληφθεί από το φυτοπλαγκτό.

Οργανικός Φώσφορος – Διεργασίες

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι οι ακόλουθες:

1. Τροφοδότηση εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού (Gr_{P1})
2. Τροφοδότηση εξαιτίας της ενδογενούς αναπνοής του φυτοπλαγκτού (RGr_{P1})
3. Μετατροπή οργανικού σε ανόργανο (P_{P1})
4. Καθίζηση (Set_{P1})

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_{P1}),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_{P1}$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_{P1}$).

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$P1^{n+1} = P1^n + (Min_{P1} - Mout_{P1} \pm Mmix_{P1} + Mproc_{P1}) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (P1)$$

όπου

$P1^n$: συγκέντρωση οργανικού φωσφόρου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$P1^{n+1}$: συγκέντρωση οργανικού φωσφόρου τη χρονική στιγμή t+Δt (g/m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4, τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_{P1} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_{P1} + RGr_{P1} + P_{P1} + Set_{P1} \quad (P1-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (P1-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Τροφοδότηση εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού

Η τροφοδότηση οργανικού φωσφόρου εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Gr_{P1} = Y1 \cdot CKDA \cdot A^n \quad (P1-1)$$

όπου
 $Y1$: περιεκτικότητα της χλωροφύλλης σε φώσφορο (g P/ g A)

Στον Πίνακα 2-14 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή $Y1$, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-14. Τιμές συντελεστή $Y1$

Μοντέλο-Ερευνητής	$Y1$
O'Connor (1976)	1,00
Larsen et al (1974)	0,63

Τροφοδότηση εξαιτίας της ενδογενούς αναπνοής του φυτοπλαγκτού

Η τροφοδότηση του οργανικού φωσφόρου εξαιτίας της ενδογενούς αναπνοής περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$RGr_{p1} = Y1 \cdot RA \cdot A'' \quad (P1-2)$$

Μετατροπή οργανικού σε ανόργανο

Η εξίσωση που περιγράφει τη μετατροπή του οργανικού φωσφόρου σε ανόργανο είναι η ακόλουθη.

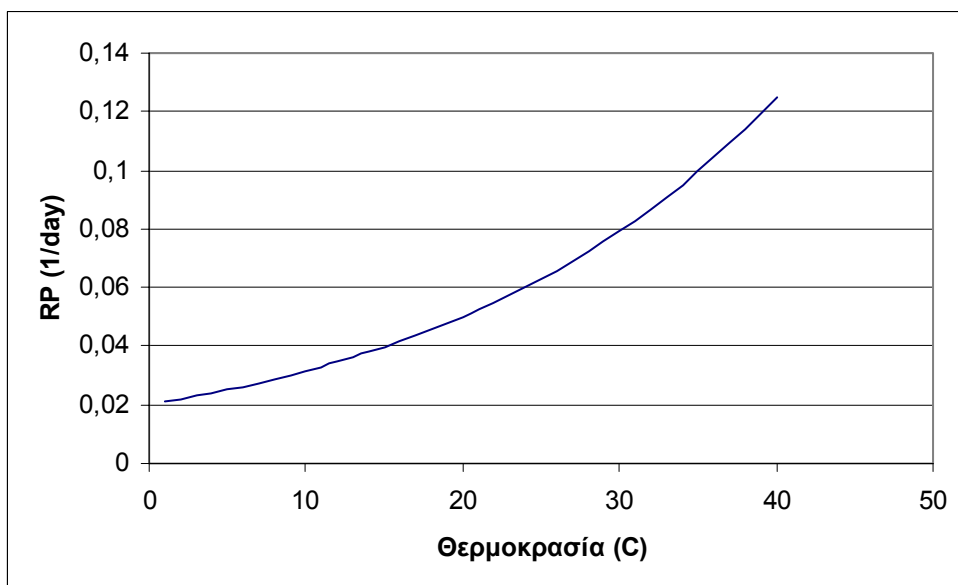
$$P_{p1} = -RP \cdot P1'' \quad (P1-3)$$

όπου
 RP : ταχύτητα μετατροπής οργανικού σε ανόργανο φώσφορο (1/day)

Η επίδραση της θερμοκρασίας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης Σχήμα 2-13)

$$RP = RP20 \cdot 1.047^{(T-20)} \quad (P1-3-1)$$

όπου
 $RP20$: ταχύτητα μετατροπής οργανικού σε ανόργανο φώσφορο στους 20 °C (1/day)



Σχήμα 2-13. Εξάρτηση του συντελεστή RP από τη θερμοκρασία

Οι τιμές του συντελεστή RP20 στο μοντέλο Qual2E (EPA, 1985) κυμαίνονται από 0,01 – 0,7 (1/day)

Καθίζηση

Η διεργασία της καθίζησης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Set_{P1} = -KSP \cdot P1^n \quad (P1-4)$$

όπου

KSP : συντελεστής καθίζησης οργανικού φωσφόρου (1/day)

Ο συντελεστής ταχύτητας της καθίζησης του οργανικού φωσφόρου, σε αναλογία με το συντελεστή καθίζησης του φυτοπλαγκτού, υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$KSP = \frac{VPMAX}{H + BA} \quad (P1-4-1)$$

όπου

$VPMAX$: ταχύτητα καθίζησης οργανικού φωσφόρου (m/day)

Στον Πίνακα 2-15 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή VPMAX, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μοντέλα.

Πίνακας 2-15. Τιμές συντελεστή VPMAX

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμές (m/day)
EPA (2000)	0,15
Gargas (1976)	0,05
Chen and Orlob (1975)	0,20
Nyholm (1978)	0,01 – 0,60

Ανόργανος Φώσφορος – Διεργασίες

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

1. Μετατροπή οργανικού σε ανόργανο (P_{P2})
2. Τροφοδότηση από τον πυθμένα (SR_{P2})
3. Πρόσληψη από το φυτοπλαγκτό (Up_{P2})

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_{P2}),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_{P2}$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_{P2}$).

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$P2^{n+1} = P2^n + (Min_{P2} - Mout_{P2} \pm Mmix_{P2} + Mproc_{P2}) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (P2)$$

όπου

$P2^n$: συγκέντρωση ανόργανου φωσφόρου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

$P2^{n+1}$: συγκέντρωση ανόργανου φωσφόρου τη χρονική στιγμή t+Δt (g/m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4, τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_{P2} \cdot \frac{\Delta t}{V} = P_{P2} + SR_{P2} + Up_{P2} \quad (P2-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (P2-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Μετατροπή οργανικού φωσφόρου σε ανόργανο

Η εξίσωση που περιγράφει τη μετατροπή του οργανικού φωσφόρου σε ανόργανο είναι η ίδια με την P1-3, αλλά με θετικό πρόσημο

$$P_{P2} = RP \cdot P1^n \quad (P2-1)$$

Τροφοδότηση ανόργανου από τον πυθμένα

Η απελευθέρωση ανόργανου φωσφόρου από το πυθμενικό στρώμα περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$SR_{P2} = \frac{KRP}{H} \quad (P2-2)$$

όπου

KRP : συντελεστής πυθμενικής τροφοδότησης ανόργανου φωσφόρου ($g/m^2/day$)

Στον Πίνακα 2-16 παρουσιάζονται τιμές του συντελεστή KRP .

Πίνακας 2-16. Τιμές συντελεστή KRP

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμή (g/m ²)
Di Toro and Connolly (1980)	0,002 – 0,006

Οι τιμές του Πίνακα 2-16 αντιστοιχούν σε αερόβιες συνθήκες Σε αναερόβιες συνθήκες η τροφοδότηση για το φώσφορο αυξάνει σημαντικά και φτάνει μέχρι 0.032 g/m².

Πρόσληψη από το φυτοπλαγκτό

Η πρόσληψη ανόργανου φωσφόρου από το φυτοπλαγκτό περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_{P_{P_2}} = -Y_1 \cdot \mu \cdot A^n \quad (P2-3)$$

2.2.5 Οργανικός Άνθρακας (BOD)

Γενικά

Ο οργανικός άνθρακας βρίσκεται σε σωματιδιακή ή διαλυμένη μορφή. Η μετατροπή του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα σε διαλυμένο γίνεται σε σχετικά μεγάλη ταχύτητα με τη βοήθεια εξωκυτταρικών υδρολυτικών ενζύμων. Έτσι, στο μοντέλο θεωρείται μια μορφή οργανικού άνθρακα, εκφρασμένη σε όρους BOD.

Διεργασίες

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

1. Τροφοδότηση εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού (Gr_B)
2. Οξείδωση (Ox_B)
3. Καθίζηση (Set_B)

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_B),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_B$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_B$).

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$B^{n+1} = B^n + (Min_B - Mout_B \pm Mmix_B + Mproc_B) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (B)$$

όπου

B^n : συγκέντρωση οργανικού άνθρακα τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

B^{n+1} : συγκέντρωση οργανικού άνθρακα τη χρονική στιγμή t+ Δt (g/m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4, τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_B \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_B + Ox_B + Set_B \quad (B-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (B-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Τροφοδότηση εξαιτίας θανάτου του φυτοπλαγκτού

Η τροφοδότηση οργανικού άνθρακα εξαιτίας του θανάτου του φυτοπλαγκτού περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Gr_B = Y3 \cdot CKDA \cdot A^n \quad (B-1)$$

όπου

$Y3$: περιεκτικότητα της χλωροφύλλης σε άνθρακα ($g C / g A$)

Ο συντελεστής Y3 λαμβάνεται ίσος με 50 (O'Connor, 1976).

Οξειδωση

Η εξίσωση που περιγράφει την οξειδωση του οργανικού άνθρακα είναι η ακόλουθη

$$Ox_B = -CKDB \cdot B^n \quad (B-2)$$

όπου

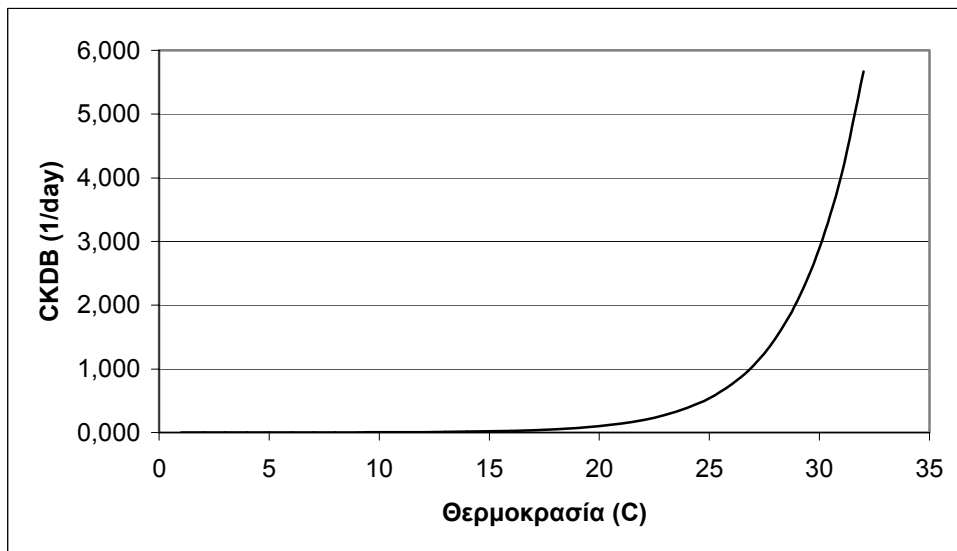
$CKDB$: ταχύτητα οξειδωσης οργανικού άνθρακα (1/day)

Η επίδραση της θερμοκρασίας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση (βλ. επίσης Σχήμα 2-14)

$$CKDB = CKDB_{20} \cdot 1.04^{(T-20)} \quad (B-2-1)$$

όπου

$CKDB_{20}$: ταχύτητα οξειδωσης οργανικού άνθρακα στους 20 °C (1/day)



Σχήμα 2-14. Εξορμητική του CKDB από τη θερμοκρασία

Στον Πίνακα 2-17 δίνονται τιμές του συντελεστή CKDB που χρησιμοποιήθηκαν σε άλλα μοντέλα.

Πίνακας 2-17. Τιμές συντελεστή CKDB

Μοντέλο-Ερευνητής	Τιμές (1/day)
EPA (1985)	0,02 – 3,4

Καθίζηση οργανικού άνθρακα

Η διαδικασία της καθίζησης του οργανικού άνθρακα περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Set_B = -KSB \cdot B^n \quad (B-3)$$

όπου

KSB : ταχύτητα καθίζησης οργανικού άνθρακα (1/day)

Ο συντελεστής ταχύτητας της καθίζησης του οργανικού άνθρακα, σε αναλογία με το συντελεστή καθίζησης του φυτοπλαγκτού, υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$KSB = \frac{VAMAX}{H + BA} \quad (B-3-1)$$

2.2.6 Οξυγόνο

Γενικά

Η σημαντικότερη παράμετρος για την επιβίωση ενός οικοσυστήματος είναι το διαλυμένο οξυγόνο. Η παρουσία του είναι απαραίτητη για την ολοκλήρωση σχεδόν όλων των βιολογικών διεργασιών. Έλλειψη του μπορεί να οδηγήσει σε μαζικούς θανάτους ψαριών και τελικά σε καταστροφή των λιμναίων οικοσυστημάτων. Ιδιαίτερα σε περιόδους θερμικής στρωμάτωσης το υπολίμνιο δεν αερίζεται επαρκώς και υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ανοξικών συνθηκών.

Διεργασίες

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

1. Τροφοδότηση εξαιτίας φωτοσύνθεσης ($Phot_{DO}$)
2. Φυσικός αερισμός (Rea_{DO})
3. Κατανάλωση οξυγόνου για νιτροποίηση (UpN_{DO})
4. Κατανάλωση οξυγόνου για οξείδωση του οργανικού άνθρακα (UpB_{DO})
5. Κατανάλωση οξυγόνου για αναπνοή του φυτοπλαγκτού (UpA_{DO})
6. Ζήτηση οξυγόνου από τον πυθμένα (UpS_{DO})

Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις επιδράσεις

1. των φορτίων εισροής (Min_{DO}),
2. των φορτίων εκροής ($Mout_{DO}$) και
3. της μεταφοράς μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων ($Mmix_{DO}$).

περιγράφονται στο μοντέλο από την ακόλουθη εξίσωση

$$DO^{n+1} = DO^n + (Min_{DO} - Mout_{DO} \pm Mmix_{DO} + Mproc_{DO}) \cdot \frac{\Delta t}{V} \quad (DO)$$

όπου

DO^n : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου τη χρονική στιγμή t (g/m^3)

DO^{n+1} : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου τη χρονική στιγμή t+Δt (g/m^3)

Τα φορτία εισροής (g/day) καθορίζονται στην 2.1.4, τα φορτία εκροής υπολογίζονται από την εξίσωση 2-18 και η μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο στρωμάτων υπολογίζεται από την εξίσωση 2-19.

Το σύνολο των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Mproc_{DO} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Phot_{DO} + Rea_{DO} + UpN_{DO} + UpB_{DO} + UpA_{DO} + UpS_{DO} \quad (DO-0)$$

Ο κάθε όρος της εξίσωσης (DO-0) αναλύεται στη συνέχεια.

Τροφοδότηση εξαιτίας φωτοσύνθεσης

Η παραγωγή οξυγόνου μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$Phot_{DO} = Y4 \cdot CMA \cdot AR \cdot A^n \quad (DO-1)$$

όπου

$Y4$: παραγόμενο οξυγόνο ανά μονάδα χλωροφύλλης ($g O / g A$)

Ο συντελεστής Y4 λαμβάνεται ίσος 50 g O₂/g χλωροφύλλης (Dugdale and Wilkerson, 1985).

Φυσικός αερισμός

Η εξίσωση που περιγράφει την τροφοδότηση οξυγόνου με τη διεργασία του φυσικού αερισμού είναι η ακόλουθη

$$Rea_{DO} = \frac{REA}{H} \cdot (CSAT - DO^n) \quad (DO-2)$$

όπου

CSAT: συγκέντρωση κορεσμού διαλυμένου οξυγόνου (g/m³)

REA : συντελεστής φυσικού αερισμού (m/day)

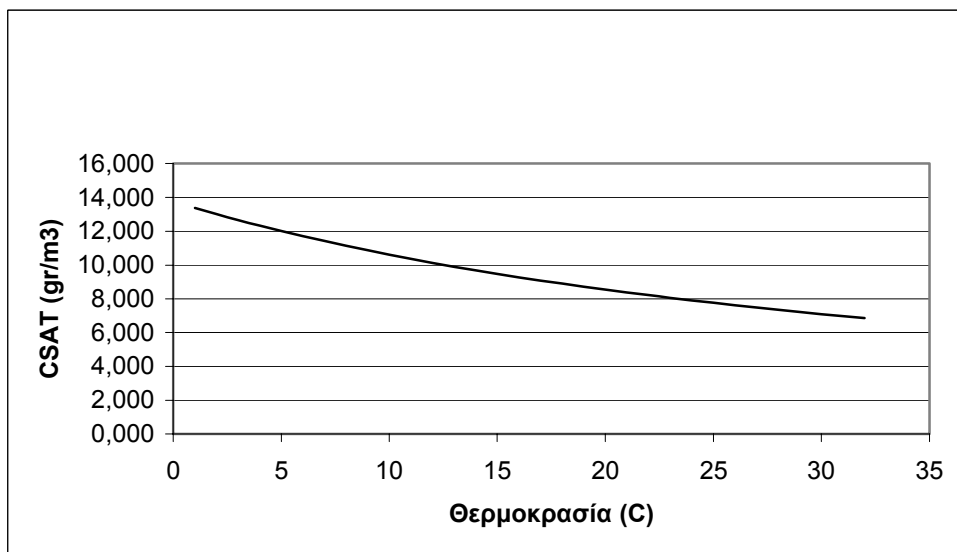
Για τον υπολογισμό του *CSAT* χρησιμοποιείται η εξίσωση του Weiss (1970), οποία παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2-15

$$CSAT = 1.4277 \cdot \exp \left[-173.4927 + \frac{24963.39}{Tk} + 143.3483 \cdot \ln \left(\frac{Tk}{100} \right) - 0.21849 \cdot Tk + \right. \\ \left. + S \cdot (-0.033096 + 0.00014259 \cdot Tk - 1.7 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{Tk}) \right] \quad (DO-2-1)$$

όπου

Tk : θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin (°K)

S : αλατότητα (ppt)



Για τον υπολογισμό του συντελεστή REA χρησιμοποιείται η εμπειρική εξίσωση του Schwarzenbach (1993), η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ανέμου.

$$REA = 0.346 + 0.0346 \cdot Wind^2 \quad (DO-2-2)$$

όπου

$Wind$: ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της λίμνης (m/sec).

Κατανάλωση οξυγόνου για νιτροποίηση

Η κατανάλωση οξυγόνου για τη διεργασία της νιτροποίησης υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$UpN_{DO} = -4.5 \cdot RN \cdot A1^n \quad (DO-3)$$

Κατανάλωση οξυγόνου για οξείδωση του οργανικού άνθρακα

Η κατανάλωση οξυγόνου για τη διεργασία της οξείδωσης του οργανικού άνθρακα υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$UpB_{DO} = -CKDB \cdot B^n \quad (DO-4)$$

Κατανάλωση οξυγόνου για αναπνοή του φυτοπλαγκτού

Η κατανάλωση οξυγόνου για τη διεργασία της ενδογενούς αναπνοής υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$UpA_{DO} = -Y3 \cdot RA \cdot A^n \quad (DO-5)$$

Ζήτηση οξυγόνου από τον πυθμένα

Η διεργασία της κατανάλωσης οξυγόνου από πυθμενικούς οργανισμούς περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$UpS_{DO} = -\frac{SOD}{H} \quad (DO-6)$$

όπου

SOD : πυθμενική ζήτηση οξυγόνου (g/m^2)

2.2.7 Σύνοψη εξισώσεων μοντέλου

Εξισώσεις Φυτοπλαγκτού

Πίνακας 2-18. Εξισώσεις Φυτοπλαγκτού

	Γενική εξίσωση
A	$A^{n+1} = A^n + (Min_A - Mout_A \pm Mmix_A + Mproc_A) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_A = Qout \cdot A^n$
	$Mmix_A = MixCoeff \cdot (A_{\gamma po}^n - A_{\epsilon pi}^n)$
A-0	$Mproc_A \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_A + Res_A + Dec_A + Set_A$
	Εξισώσεις διεργασιών
A-1	$Gr_A = \mu \cdot A^n$
A-2	$Res_A = -RA \cdot A^n$
A-3	$Dec_A = -CKDA \cdot A^n$
A-4	$Set_A = -KSA \cdot A^n$

Εξισώσεις Αμμωνιακού Αζώτου

Πίνακας 2-19. Εξισώσεις Αμμωνιακού Αζώτου

	Γενική εξίσωση
A1	$A1^{n+1} = A1^n + (Min_{A1} - Mout_{A1} \pm Mmix_{A1} + Mproc_{A1}) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_{A1} = Qout \cdot A1^n$
	$Mmix_{A1} = MixCoeff \cdot (A1^n_{ypo} - A1^n_{epi})$
A1-0	$Mproc_{A1} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_{A1} + Up_{A1} + N_{A1} + SR_{A1}$
	Εξισώσεις διεργασιών
A1-1	$Gr_{A1} = Y2 \cdot CKDA \cdot A^n$
A1-2	$Up_{A1} = -\mu \cdot Y2 \cdot PNH \cdot A^n$
A1-3	$N_{A1} = -RN \cdot A1^n$
A1-4	$SR_{A1} = \frac{KRN}{H}$

Εξισώσεις Νιτρικού Αζώτου

Πίνακας 2-20. Εξισώσεις Νιτρικού Αζώτου

	Γενική εξίσωση
A2	$A2^{n+1} = A2^n + (Min_{A2} - Mout_{A2} \pm Mmix_{A2} + Mproc_{A2}) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_{A2} = Qout \cdot A2^n$
	$Mmix_{A2} = MixCoeff \cdot (A2^n_{ypo} - A2^n_{epi})$
A2-0	$Mproc_{A2} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Up_{A2} + N_{A2}$
	Εξισώσεις διεργασιών
A2-1	$N_{A2} = RN \cdot A1^n$
A2-2	$Up_{A2} = -\mu \cdot Y2 \cdot (1 - PNH) \cdot A^n$

Εξισώσεις Οργανικού Φωσφόρου

Πίνακας 2-21. Εξισώσεις Οργανικού Φωσφόρου

	Γενική εξίσωση
P1	$P1^{n+1} = P1^n + (Min_{P1} - Mout_{P1} \pm Mmix_{P1} + Mproc_{P1}) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_{P1} = Qout \cdot P1^n$
	$Mmix_{P1epi} = MixCoeff \cdot (P1_{ypo}^n - P1_{epi}^n)$
P1-0	$Mproc_{P1} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_{P1} + RGr_{P1} + P_{P1} + Set_{P1}$
	Εξισώσεις διεργασιών
P1-1	$Gr_{P1} = Y1 \cdot CKDA \cdot A^n$
P1-1	$RGr_{P1} = Y1 \cdot RA \cdot A^n$
P1-2	$P_{P1} = -RP \cdot P1^n$
P1-3	$Set_{P1} = -KSP \cdot P1^n$

Εξισώσεις Ανόργανου Φωσφόρου

Πίνακας 2-22. Εξισώσεις Ανόργανου Φωσφόρου

	Γενική εξίσωση
P2	$P2^{n+1} = P2^n + (Min_{P2} - Mout_{P2} \pm Mmix_{P2} + Mproc_{P2}) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_{P2} = Qout \cdot P2^n$
	$Mmix_{P2epi} = MixCoeff \cdot (P2_{ypo}^n - P2_{epi}^n)$
P2-0	$Mproc_{P2} \cdot \frac{\Delta t}{V} = P_{P2} + SR_{P2} + Up_{P2}$
	Εξισώσεις διεργασιών
P2-1	$P_{P2} = RP \cdot P1^n$
P2-2	$SR_{P2} = \frac{KRP}{H}$
P2-3	$Up_{P2} = -Y1 \cdot \mu \cdot A^n$

Εξισώσεις Οργανικού Άνθρακα

Πίνακας 2-23. Εξισώσεις Οργανικού Άνθρακα

	Γενική εξίσωση
B	$B^{n+1} = B^n + (Min_B - Mout_B \pm Mmix_B + Mproc_B) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_B = Qout \cdot B^n$
	$Mmix_{B_{epi}} = MixCoeff \cdot (B_{yro}^n - B_{epi}^n)$
B-0	$Mproc_B \cdot \frac{\Delta t}{V} = Gr_B + Ox_B + Set_B$
	Εξισώσεις διεργασιών
B-1	$Gr_B = Y3 \cdot CKDA \cdot A^n$
B-2	$Ox_B = -CKDB \cdot B^n$
B-3	$Set_B = -KSB \cdot B^n$

Εξισώσεις Διαλυμένου Οξυγόνου

Πίνακας 2-24. Εξισώσεις Διαλυμένου Οξυγόνου

	Γενική εξίσωση
DO	$DO^{n+1} = DO^n + (Min_{DO} - Mout_{DO} \pm Mmix_{DO} + Mproc_{DO}) \cdot \frac{\Delta t}{V}$
	<i>Min</i> υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 2.1.4
	$Mout_{DO} = Qout \cdot DO^n$
	$Mmix_{DOepi} = MixCoeff \cdot (DO^n_{ypo} - DO^n_{epi})$
DO-0	$Mproc_{DO} \cdot \frac{\Delta t}{V} = Phot_{DO} + Rea_{DO} + UpN_{DO} + UpB_{DO} + UpA_{DO} + UpS_{DO}$
	Εξισώσεις διεργασιών
DO-1	$Phot_{DO} = Y4 \cdot CMA \cdot AR \cdot A^n$
DO-2	$Rea_{DO} = \frac{REA}{H} \cdot (CSAT - DO^n)$
DO-3	$UpN_{DO} = -4.5 \cdot RN \cdot A1^n$
DO-4	$UpB_{DO} = -CKDB \cdot B^n$
DO-5	$UpA_{DO} = -Y3 \cdot RA \cdot A^n$
DO-6	$UpS_{DO} = -\frac{SOD}{H}$

2.2.8 Συντελεστές μοντέλου

Στον Πίνακα 2-25 δίνονται οι τιμές των συντελεστών του μοντέλου, όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση (βλ. Κεφάλαιο 3)

Πίνακας 2-25. Τιμές συντελεστών μοντέλου

Συντελεστής	Τιμή	Μονάδες
BA	12,500	m
CA12	0,100	μg/l
CKDA20	0,100	day ⁻¹
CKDB20	0,100	day ⁻¹
CKDN	0,000	mg/m ² /day
CMA20	2,500	day ⁻¹
CP2	0,005	μg/l
KRP	0,0000	gP/day/m ²
REA	0,400	m/day
SOD20	1,700	gO/day/m ²
RA20	0,080	day ⁻¹
RN20	0,030	day ⁻¹
PN	0,800	(-)
RP20	0,050	day ⁻¹
Y1	0,800	gP/gA
Y2	10,000	gN/gA
Y3	50,000	gC/gA
Y4	50,000	gO/gA
VAMAX	0,400	m/day
VPMAX	0,200	m/day

3 Βαθμονόμηση μαθηματικού μοντέλου

3.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

Με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία, επιχειρήθηκε η βαθμονόμηση του ΜΜ. Η περίοδος δειγματοληψίας ήταν από τον Ιούνιο 1987 μέχρι τον Μάιο 1988. Κατά την περίοδο αυτή οι μέσες τιμές των βασικών μεγεθών ήταν οι ακόλουθες:

1. Μέσο υψόμετρο της λίμνης = 783,2 m.
2. Μέσος όγκος της λίμνης = 182000000 m³.
3. Μέση εισροή = 330000 m³/day.

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, καθορίστηκαν οι ακόλουθες συνθήκες βαθμονόμησης:

1. Υψόμετρο της λίμνης = σταθερό = 783,2 m.
2. Όγκος της λίμνης = σταθερός = 182000000 m³.
3. παροχή εισροής = παροχή εκροής = 330000 m³/day.

Η παροχή εισροής θεωρήθηκε ίση με την παροχή εκροής, ώστε το υψόμετρο της επιφάνειας και ο όγκος της λίμνης να παραμένουν σταθερά.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τις συνθήκες βαθμονόμησης και για μια χρονική περίοδο, η οποία ονομάστηκε περίοδος βαθμονόμησης. Η περίοδος αυτή, έχει ικανή χρονική διάρκεια, π.χ. 5 έτη, έτσι ώστε οι υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων (α) να προκύπτουν ανεξάρτητες από τις αρχικές συνθήκες και (β) να χαρακτηρίζονται από περιοδικότητα.

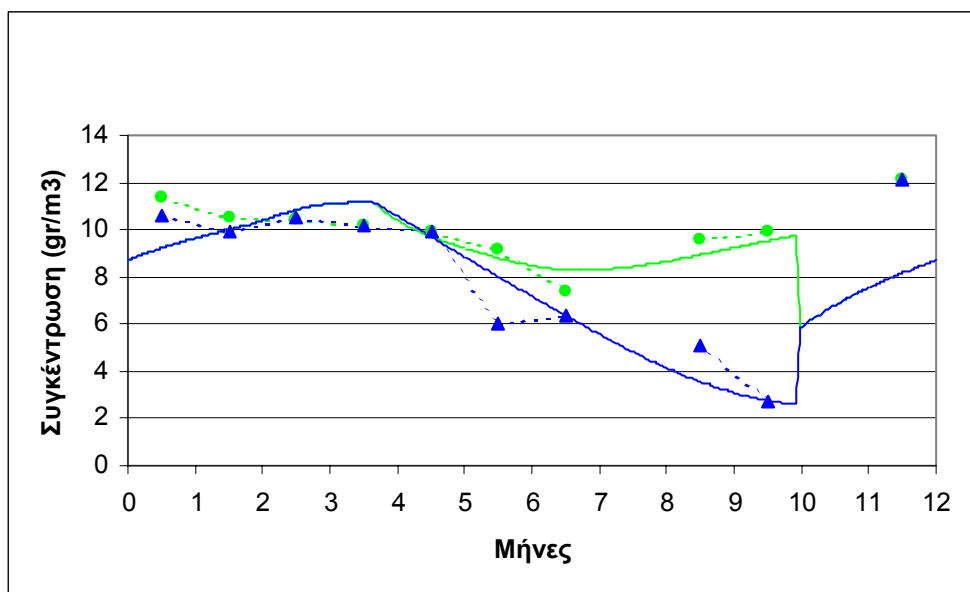
Οι τιμές των παραμέτρων ποιότητας συγκρίθηκαν με τις διαθέσιμες μετρήσεις και πραγματοποιήθηκε η επιλογή των συντελεστών του μοντέλου.

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί του μοντέλου και οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των ποιοτικών παραμέτρων.

Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται η σύγκριση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα του μοντέλου για τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου.

Πίνακας 3-1. Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών μοντέλου συγκεντρώσεων ποιοτικών παραμέτρων

Παράμετρος	Περίοδος-στρώμα	Υπολογισμοί μοντέλου	Μετρήσεις πεδίου
Χλωροφύλλη-α (μg/l)	Στρωμάτωση- Επιλίμνιο	2,5 – 4,0	0,8 – 3,2
	Στρωμάτωση –Υπολίμνιο	0,9 – 3,0	0,8 – 2,4
	Πλήρης ανάμιξη	1,7 – 3,7	1,4 – 3,0
Αμμωνιακό άζωτο (μg/l)	Στρωμάτωση- Επιλίμνιο	23,5 –44,5	4,0 – 25,0
	Στρωμάτωση –Υπολίμνιο	33,6 – 44,6	8,0 – 34,0
	Πλήρης ανάμιξη	33,4 – 45,3	27,0 – 43,0
Νιτρικό άζωτο (μg/l)	Στρωμάτωση- Επιλίμνιο	114,5 – 194,5	4,0 – 90,0
	Στρωμάτωση –Υπολίμνιο	91,5 – 145,3	5,0– 108,0
	Πλήρης ανάμιξη	103,8 – 163,5	120,0 – 211,0
Ανόργανος φώσφορος (μg/l)	Στρωμάτωση- Επιλίμνιο	1,7 – 5,7	0,0 – 4,0
	Στρωμάτωση –Υπολίμνιο	1,4 – 2,4	1,0 – 6,0
	Πλήρης ανάμιξη	1,7 – 5,4	1,0 – 3,0
Διαλυμένο οξυγόνο (mg/l)	Στρωμάτωση- Επιλίμνιο	8,3 – 11,0	7,4 – 9,9
	Στρωμάτωση –Υπολίμνιο	2,6 – 11,0	2,7 – 9,9
	Πλήρης ανάμιξη	5,9 – 11,0	9,9 – 12,1



Σχήμα 3-1. Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμών μοντέλου συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου

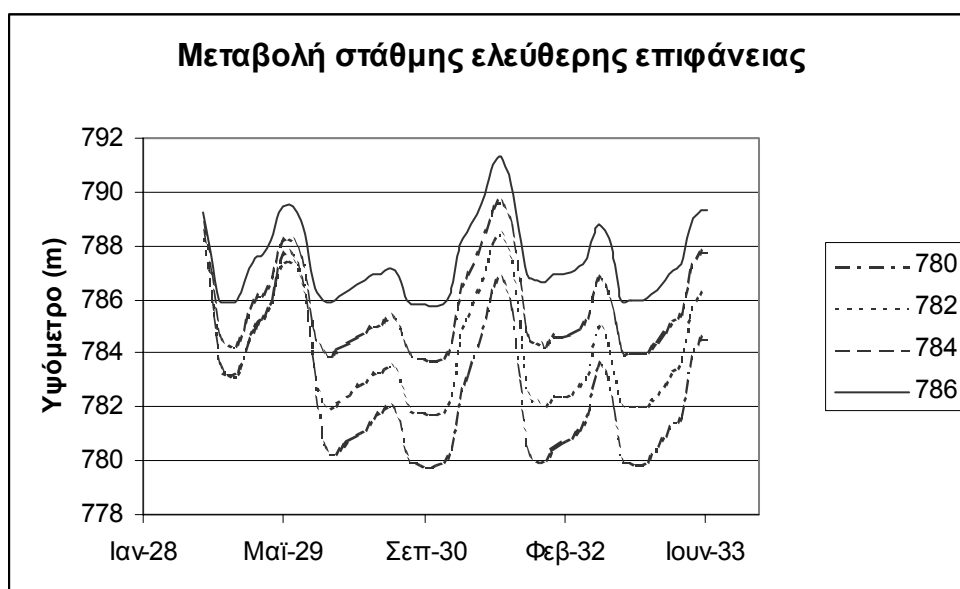
3.2 Σχόλια – σύγκριση

Από τη διαδικασία της βαθμονόμησης διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία κρίνονται ως ανεπαρκή για την ακριβή βαθμονόμηση του μοντέλου. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η σύγκριση των στοιχείων του Πίνακα 3-1 και του Σχήματος 3-1 επιτρέπει το χαρακτηρισμό της «προσεγγιστικής» βαθμονόμησης που επιχειρήθηκε ως «ικανοποιητικής». Επιπλέον, οι συντελεστές του μοντέλου που προσδιορίστηκαν κατά τη βαθμονόμηση (βλ. Πίνακα 2-25) βρίσκονται μέσα στα όρια των τιμών που προτείνονται στη βιβλιογραφία.
2. Οι υπολογιζόμενες από το μοντέλο τιμές της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α κατά την περίοδο της στρωμάτωσης (2,5 μέχρι 4,0 $\mu\text{g/l}$ για το επιλίμνιο και 0,9 μέχρι 3,0 $\mu\text{g/l}$ για το υπολίμνιο) βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές πεδίου (0,8 – 3,2 $\mu\text{g/l}$ για το επιλίμνιο και 0,8 μέχρι 2,4 $\mu\text{g/l}$ για το υπολίμνιο). Η συμφωνία είναι ικανοποιητική και κατά την περίοδο της πλήρους ανάμιξης, όταν οι τιμές του μοντέλου κυμαίνονται από 1,7 μέχρι 3,7 $\mu\text{g/l}$, ενώ οι τιμές του πεδίου βρίσκονται στη περιοχή: 1,4 μέχρι 3,0 $\mu\text{g/l}$. Η μέγιστη τιμή του μοντέλου είναι 4,0 $\mu\text{g/l}$ και παρατηρείται στο τέλος της περιόδου στρωμάτωσης, ενώ η μέγιστη τιμή των μετρήσεων πεδίου είναι 3,2 $\mu\text{g/l}$ και παρατηρήθηκε την ίδια περίοδο (τέλος της περιόδου στρωμάτωσης).
3. Οι υπολογιζόμενες από το μοντέλο τιμές συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου (αμμωνιακό άζωτο και νιτρικό άζωτο) βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές πεδίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-1. Το μοντέλο δεν προβλέπει τις μικρές τιμές συγκεντρώσεων, που παρατηρούνται στις μετρήσεις πεδίου στο μέσο της περιόδου στρωμάτωσης. Αυτό αποδίδεται στα μεγάλα φορτία εισροής των παραμέτρων αυτών που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, σε σχέση με τα πραγματικά.
4. Οι υπολογιζόμενες από το μοντέλο τιμές της συγκέντρωσης ανόργανου φωσφόρου κατά την περίοδο της στρωμάτωσης βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις πεδίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-1. Διευκρινίζεται ότι στη σύγκριση δεν λήφθηκε υπόψη μια σημαντικά μεγάλη τιμή που παρατηρήθηκε μετά από καταιγίδα (12,0 $\mu\text{g/l}$).
5. Η συμφωνία του μοντέλου με τις μετρήσεις στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, όπως διαπιστώνεται από τις τιμές του Πίνακα 3-1 και το Σχήμα 3-1. Η υπολογιζόμενη ελάχιστη τιμή παρατηρείται στο υπολίμνιο στο τέλος της περιόδου στρωμάτωσης (2,6 mg/l) και βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τη μετρημένη τιμή (2,7 mg/l). Χαρακτηριστική είναι η «καθυστέρηση του μοντέλου» στην «αποκατάσταση» μεγάλων τιμών συγκεντρώσεων στην αρχή της περιόδου πλήρους ανάμιξης. Αυτό οφείλεται στη μέθοδο που εφαρμόζεται στο μοντέλο για την περιγραφή της καταστροφής του θερμοκλινούς (δηλ. στη μετάβαση από τα δυο στρώματα στο ένα).

4 Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου θεωρήθηκε ως δεδομένη η χρονική μεταβολή της στάθμης της επιφάνειας (η οποία συνοδεύεται από τις αντίστοιχες μεταβολές των παροχών εισροής και εκροής και του όγκου της λίμνης) για τα 4 σενάρια διατήρησης ελάχιστης στάθμης στη λίμνη Σ780, Σ782, Σ784 και Σ786, τα οποία αντιστοιχούν στις 4 στάθμες επιφάνειας της λίμνης 780, 782, 784 και 786 m, για μια 40-ετία. Από την 40-ετή περίοδο επιλέχθηκε η 5ετής περίοδος, η οποία παρουσιάζει τη δυσμενέστερη συμπεριφορά (δηλ. χαμηλές στάθμες και σχετικά μικροί όγκοι λίμνης), παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1. Η περίοδος αυτή ξεκινά από τον 7^ο μήνα (Ιούλιος) του 28^{ου} έτους με στάθμη επιφάνειας λίμνης περ. 788 m (κοινό σημείο εκκίνησης και για τα 4 σενάρια) και λήγει τον 6^ο μήνα (Ιούνιος) του 33^{ου} έτους (κοινό σημείο τέλους και για τα 4 σενάρια). Η περίοδος αυτή ονομάστηκε περίοδος εφαρμογής του MM.



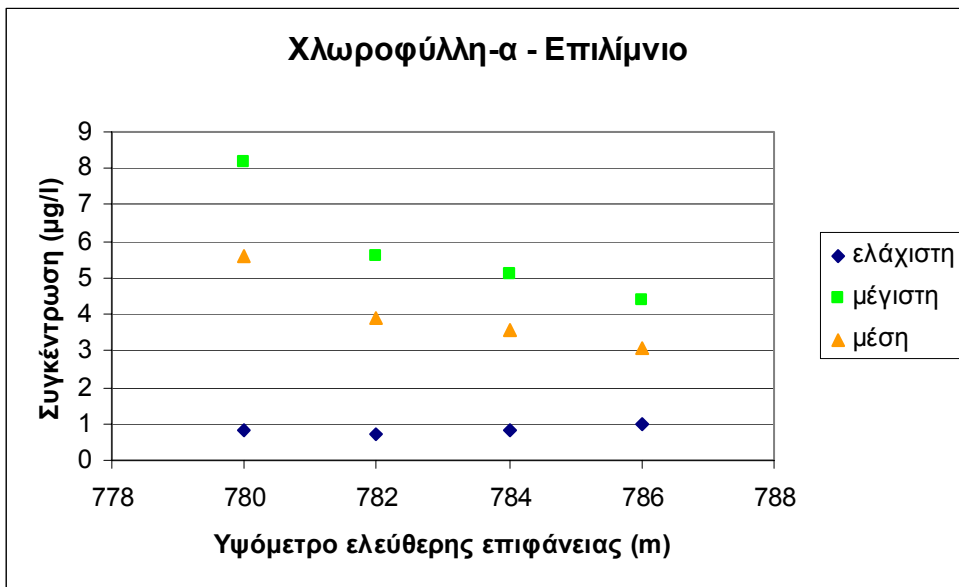
Σχήμα 4-1. Μεταβολή στάθμης των 4 σεναρίων

Οι αρχικές συνθήκες της περιόδου εφαρμογής υπολογίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα της περιόδου βαθμονόμησης. Οι υπολογισμοί της περιόδου βαθμονόμησης επαναλήφθηκαν για τις τιμές εκκίνησης της στάθμης επιφάνειας και του όγκου της λίμνης των 4 σεναρίων. Οι τιμές των παραμέτρων των νέων αυτών υπολογισμών, που αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή εκκίνησης της περιόδου εφαρμογής, χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες της περιόδου εφαρμογής.

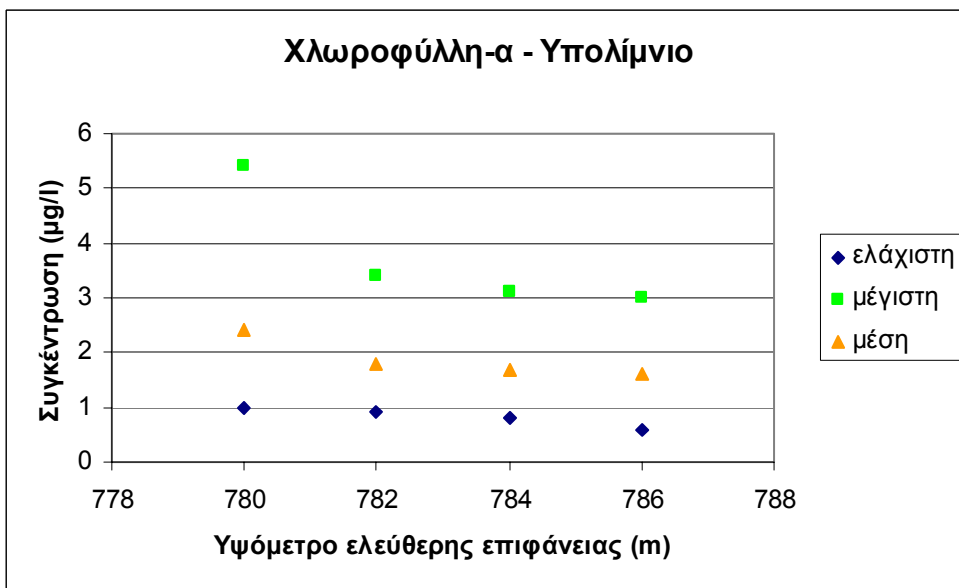
Σημειώνεται ότι η κατανομή (τιμές και χρονική διακύμανση) των ρυπαντικών φορτίων κατά την περίοδο εφαρμογής θεωρήθηκε ίδια με αυτή της περιόδου βαθμονόμησης.

Στα Σχήματα. 4-2 μέχρι 4-22 παρουσιάζονται οι μέγιστες, μέσες και ελάχιστες τιμές των 7 ποιοτικών παραμέτρων για τα 4 σενάρια κατά την περίοδο εφαρμογής.

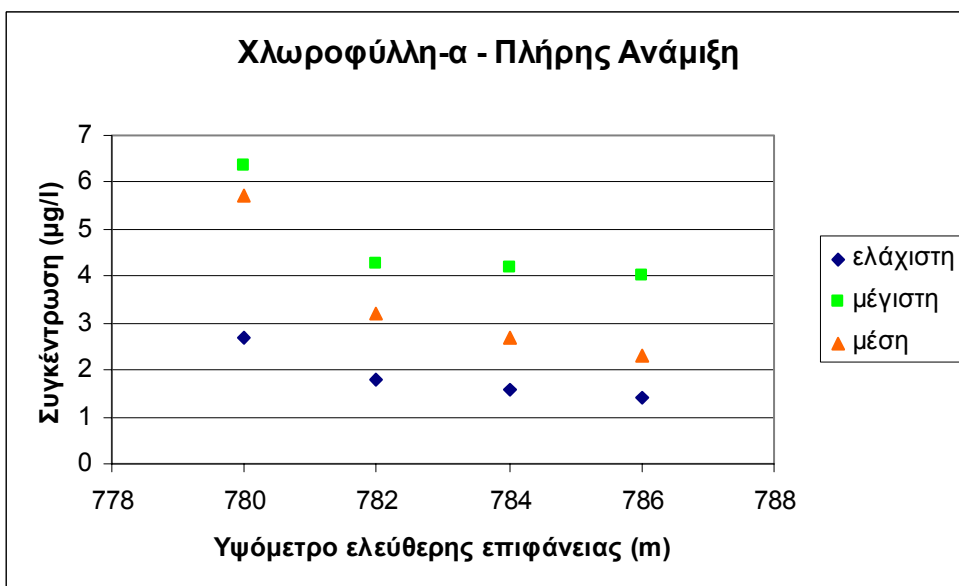
Στα Σχήματα 4-23 μέχρι 4-26 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α για τα 4 σενάρια κατά την περίοδο εφαρμογής.



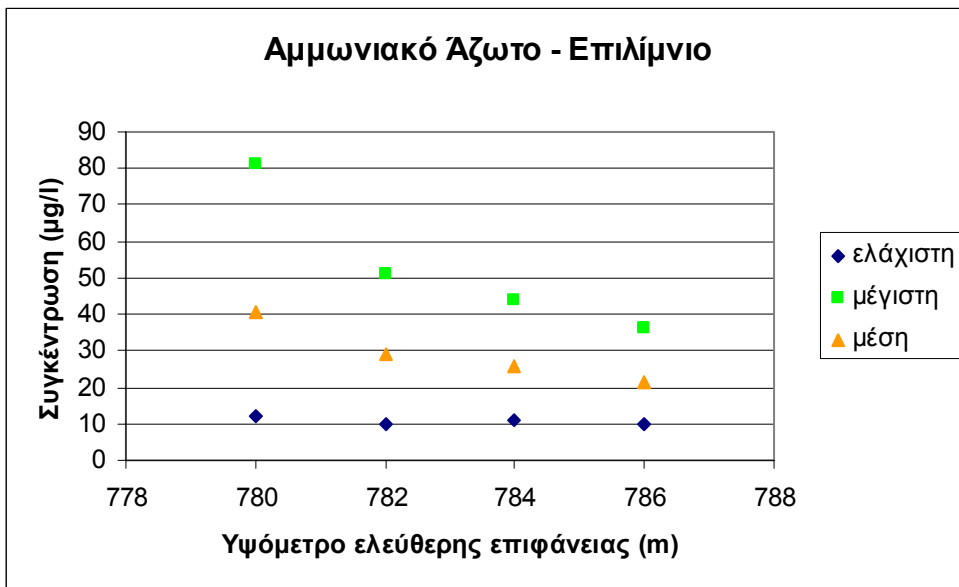
Σχήμα 4-2. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



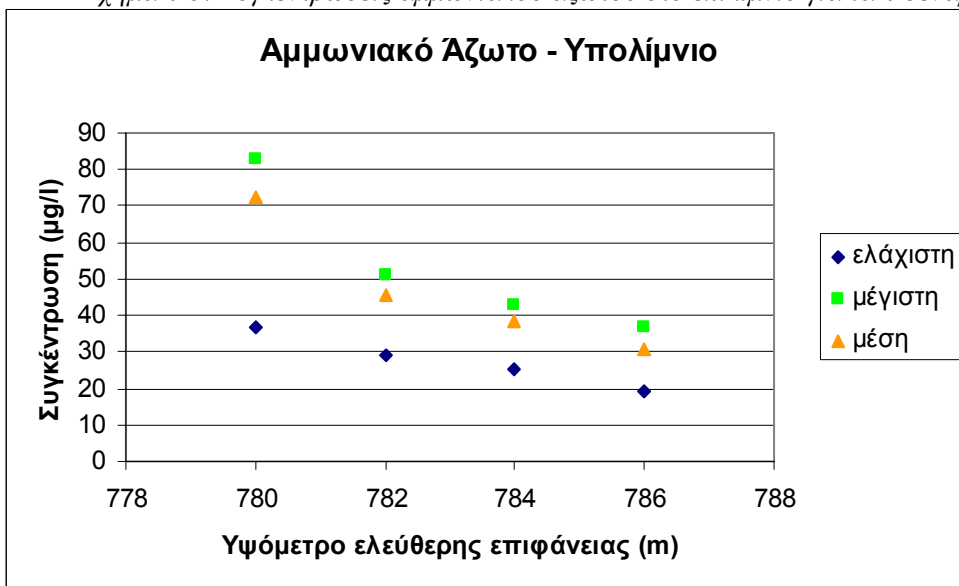
Σχήμα 4-3. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



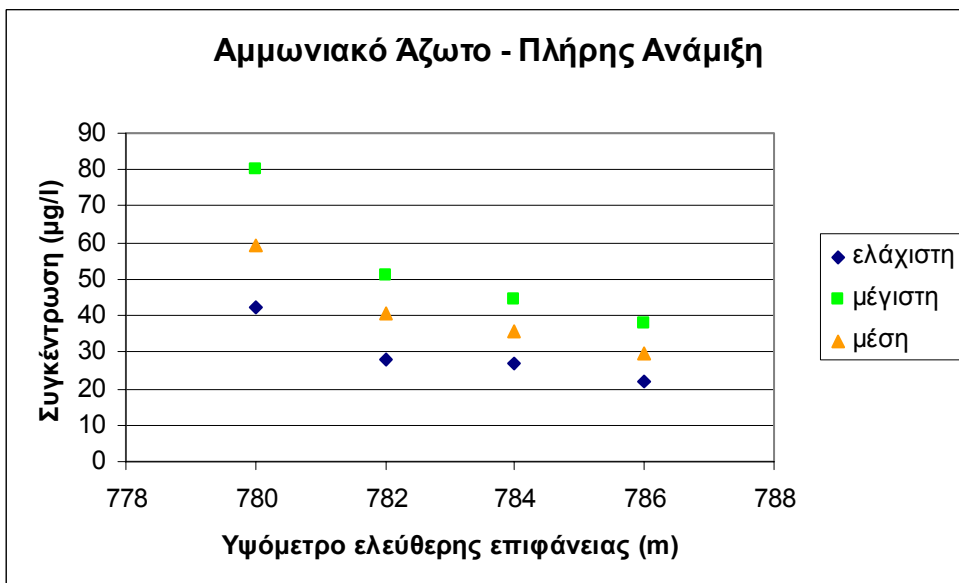
Σχήμα 4-4. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α κατά την περίοδο ανάμιξης για τα 4 σενάρια



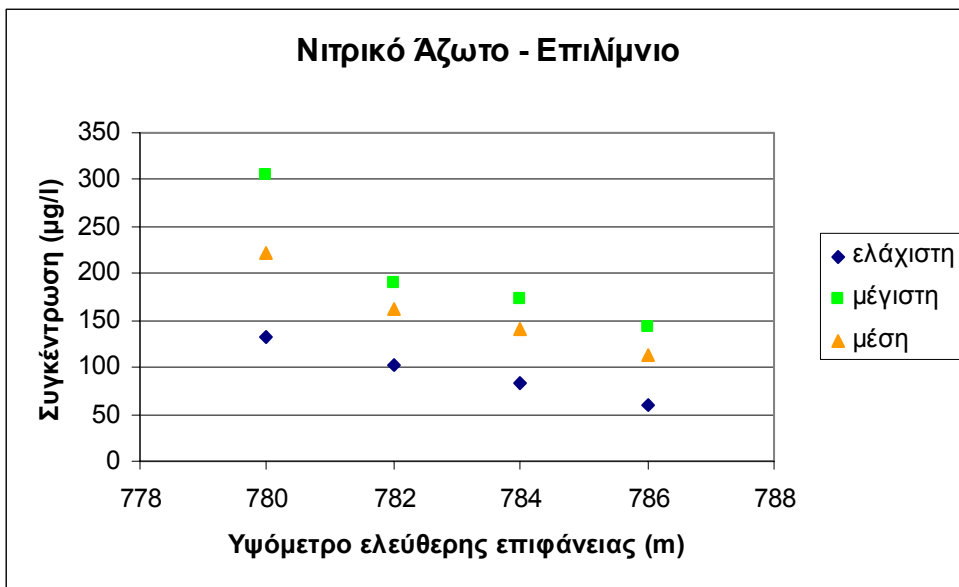
Σχήμα 4-5. Συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



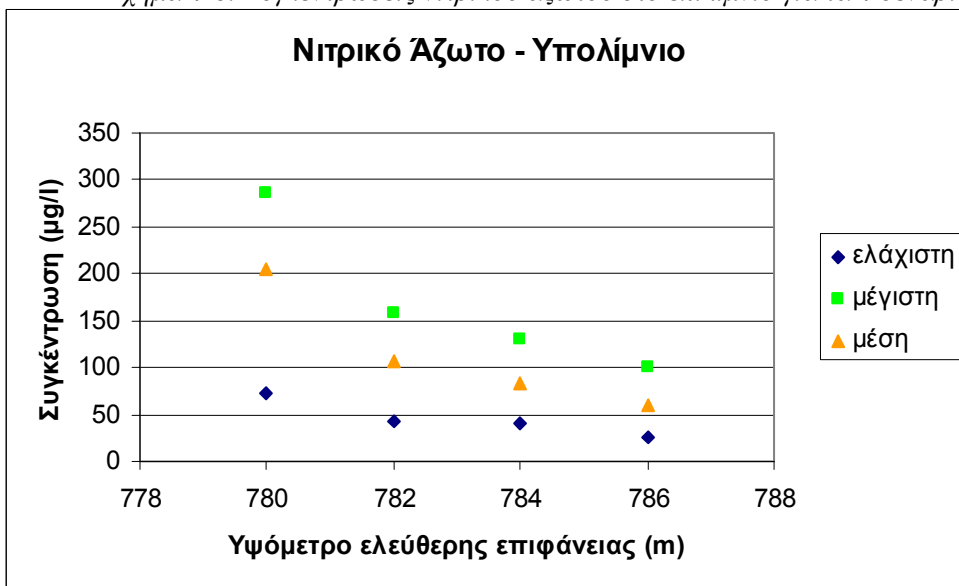
Σχήμα 4-6. Συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



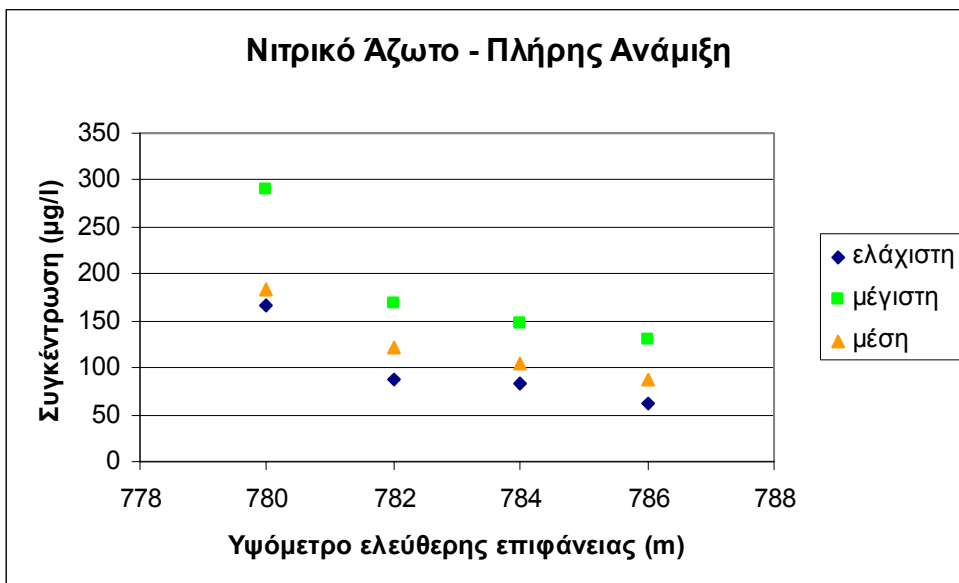
Σχήμα 4-7. Συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου κατά την περίοδο ανάμιξης για τα 4 σενάρια



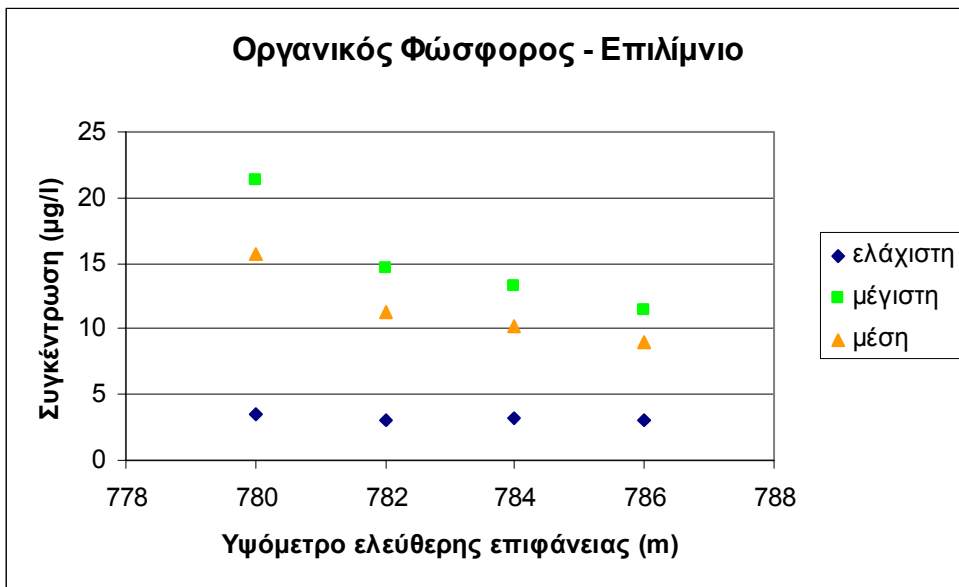
Σχήμα 4-8. Συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



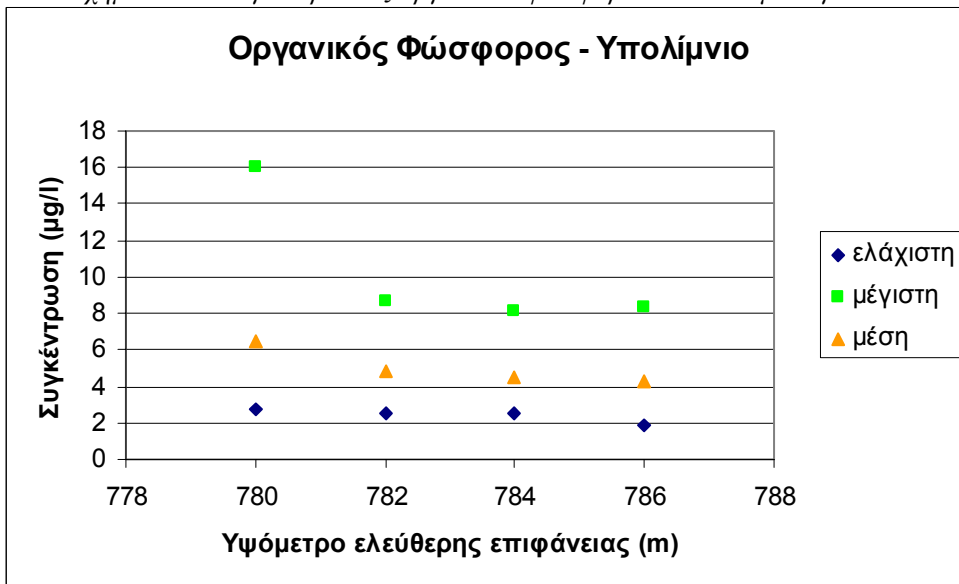
Σχήμα 4-9. Συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



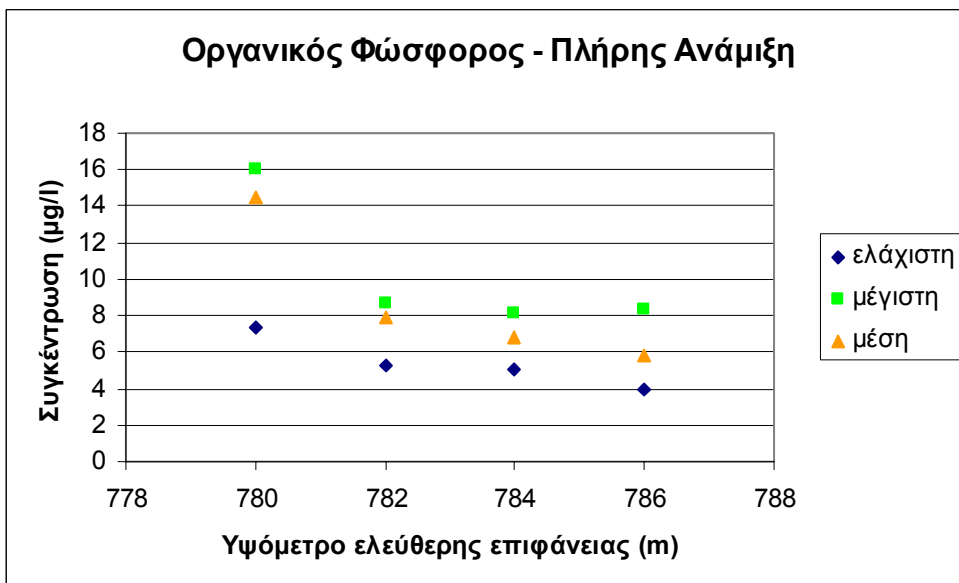
Σχήμα 4-10. Συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου κατά την περίοδο πλήρους ανάμιξης για τα 4 σενάρια



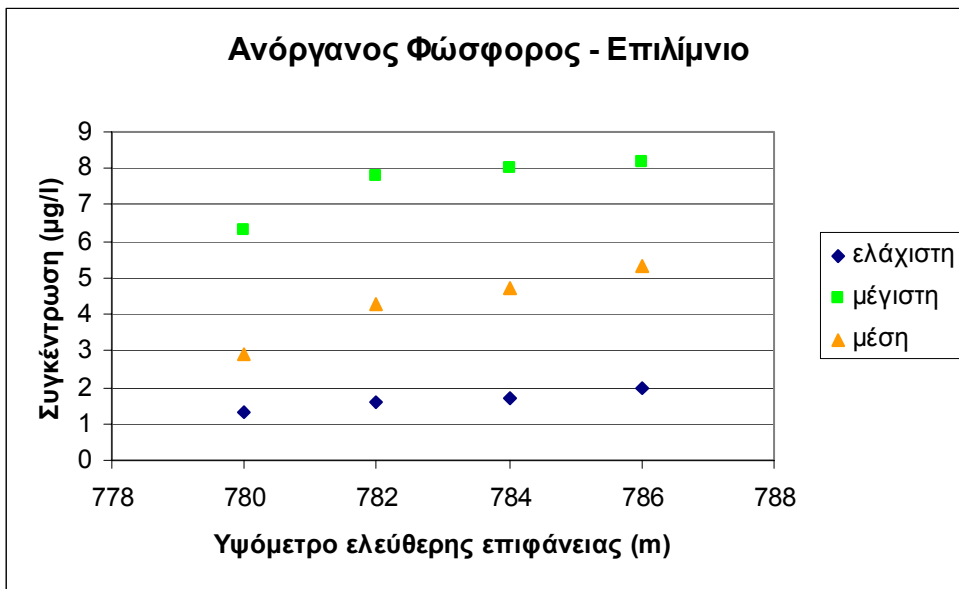
Σχήμα 4-11. Συγκεντρώσεις οργανικού φωσφόρου στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



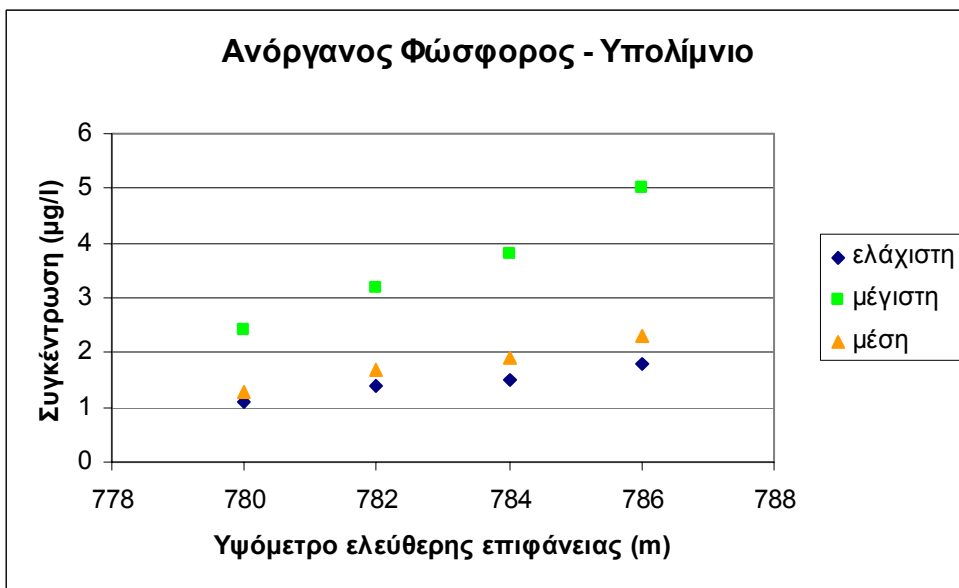
Σχήμα 4-12. Συγκεντρώσεις οργανικού φωσφόρου στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



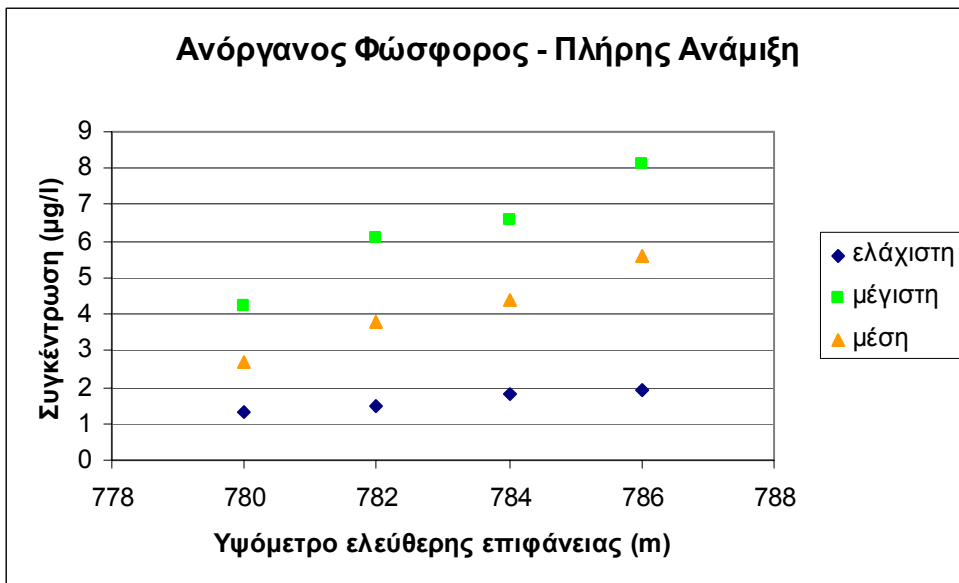
Σχήμα 4-13. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α κατά την περίοδο ανάμιξης για τα 4 σενάρια



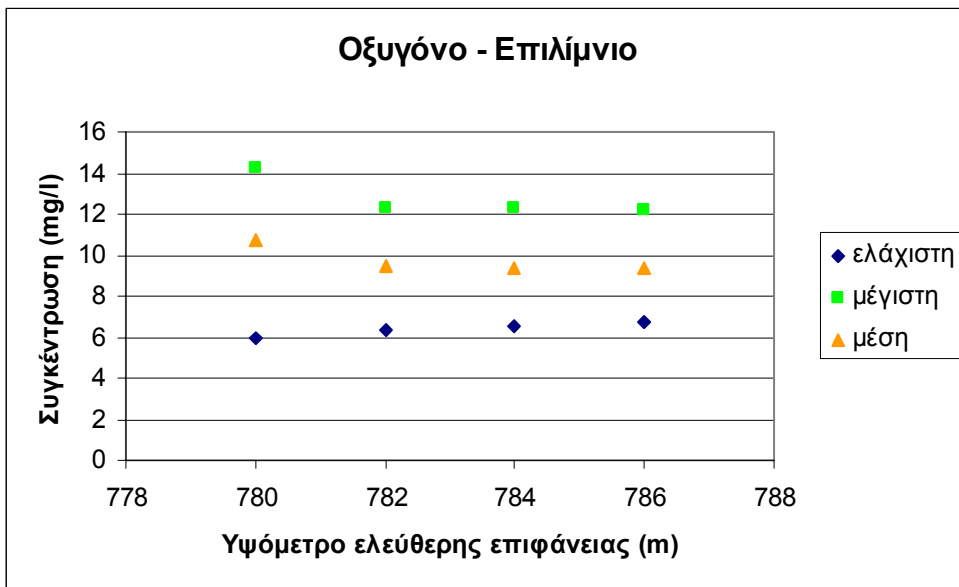
Σχήμα 4-14. Συγκεντρώσεις ανόργανου φωσφόρου στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



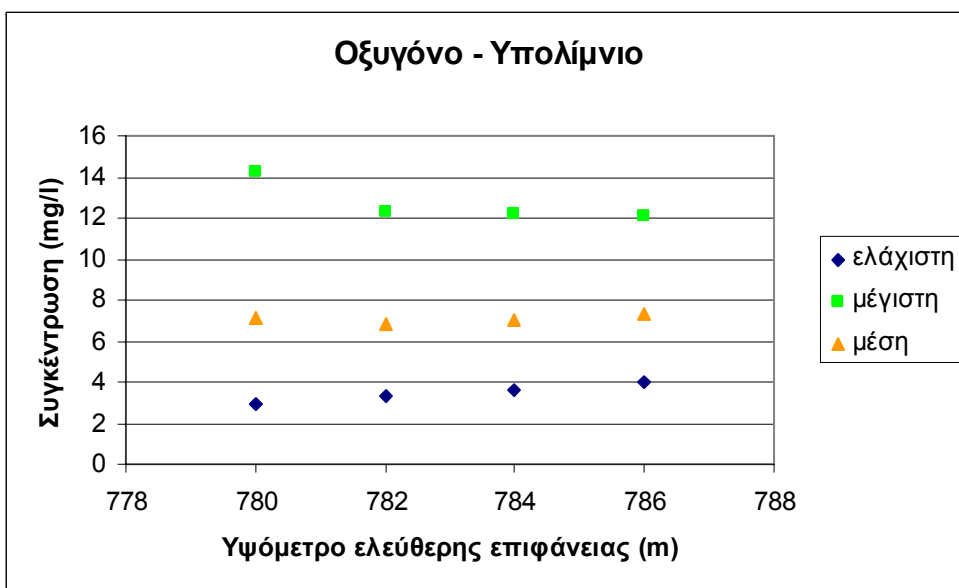
Σχήμα 4-15. Συγκεντρώσεις ανόργανου φωσφόρου στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



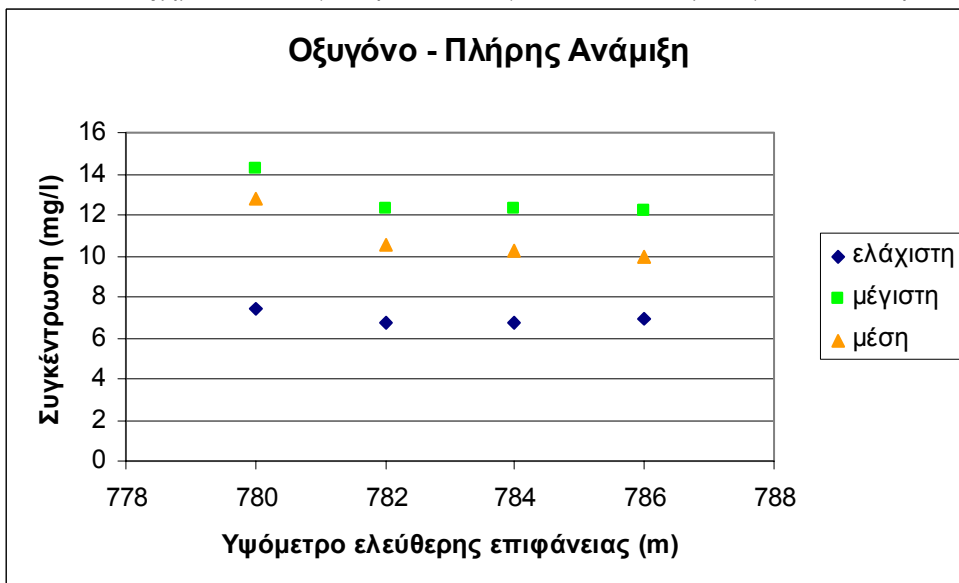
Σχήμα 4-16. Συγκεντρώσεις ανόργανου φωσφόρου κατά την περίοδο ανάμιξης για τα 4 σενάρια



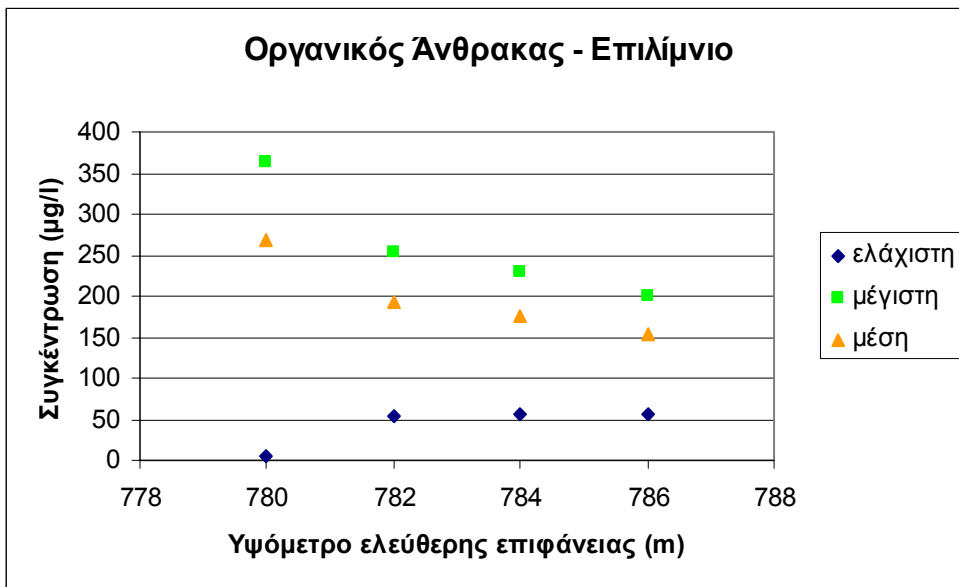
Σχήμα 4-17. Συγκεντρώσεις οξυγόνου στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



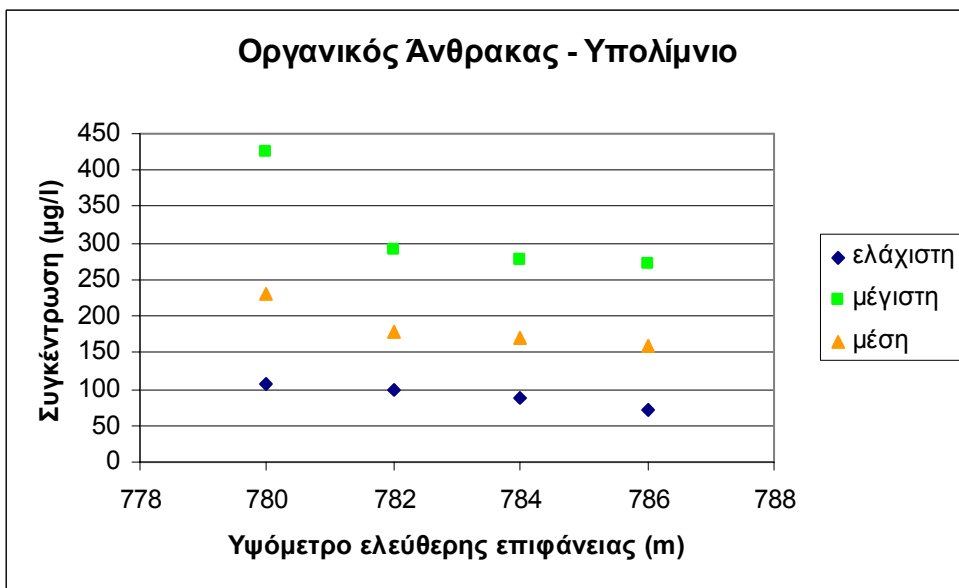
Σχήμα 4-18. Συγκεντρώσεις οξυγόνου στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



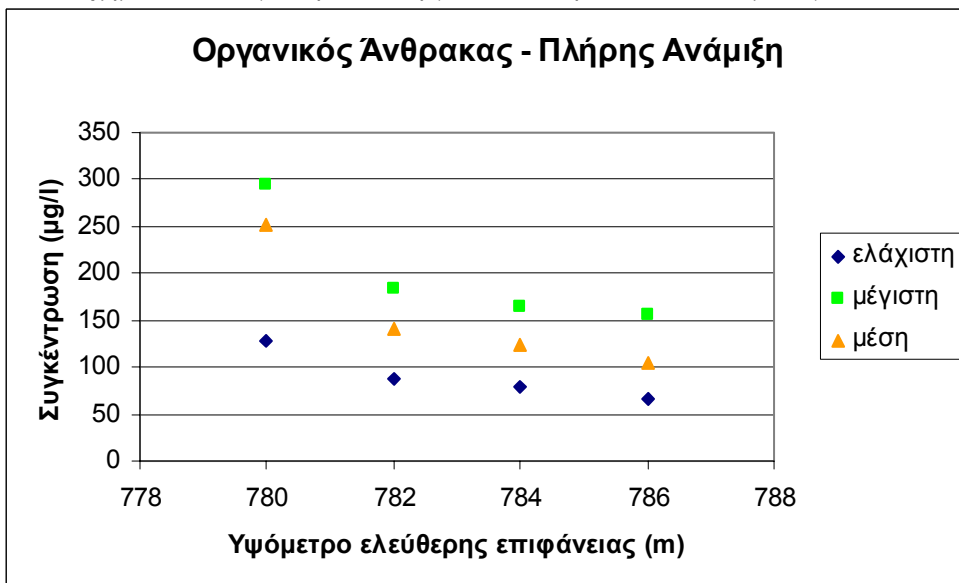
Σχήμα 4-19. Συγκεντρώσεις οξυγόνου κατά την περίοδο ανάμιξης για τα 4 σενάρια



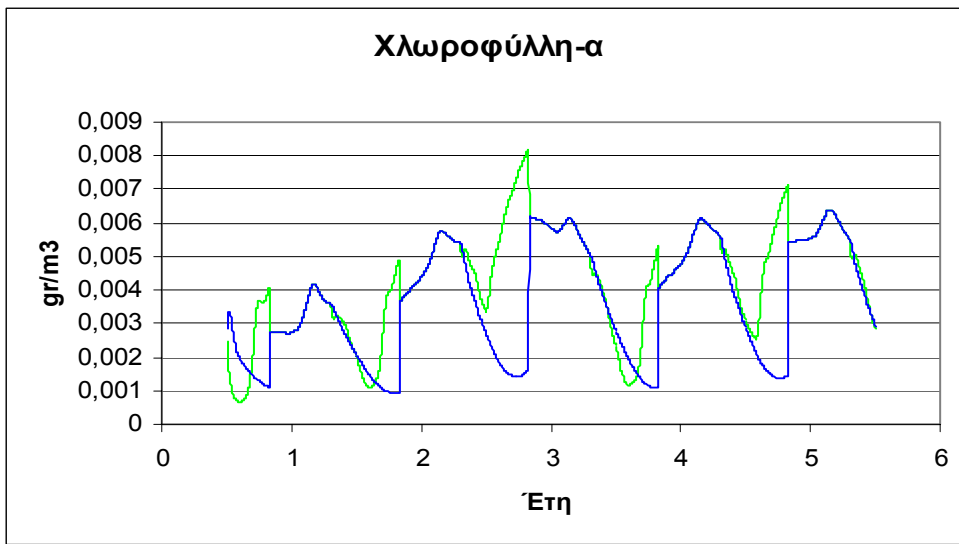
Σχήμα 4-20. Συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα στο επιλίμνιο για τα 4 σενάρια



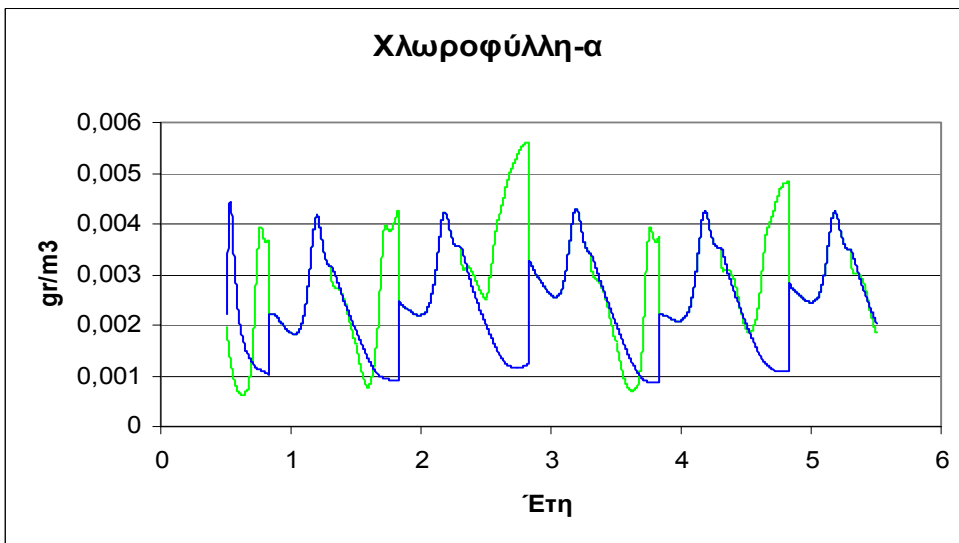
Σχήμα 4-21. Συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα στο υπολίμνιο για τα 4 σενάρια



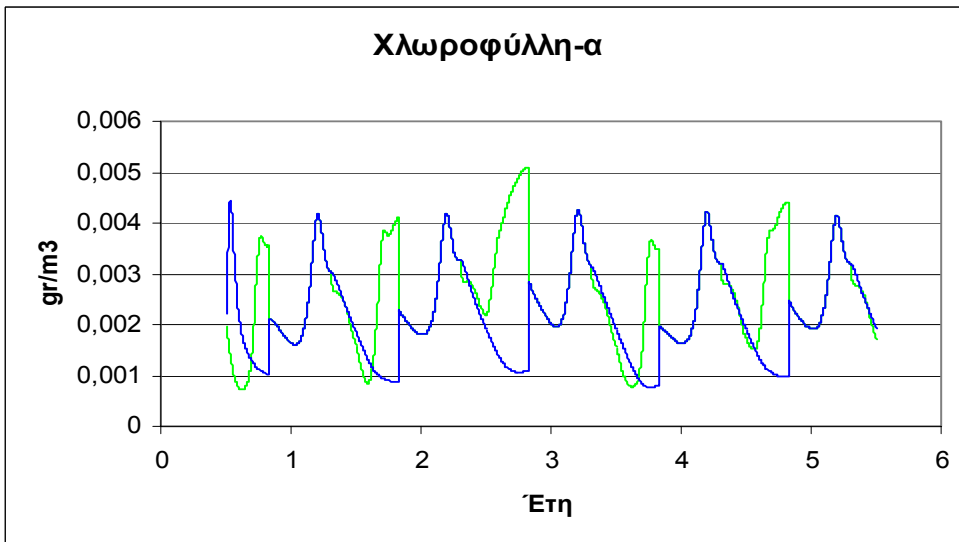
Σχήμα 4-22. Συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα κατά την περίοδο ανάμιξης για τα 4 σενάρια



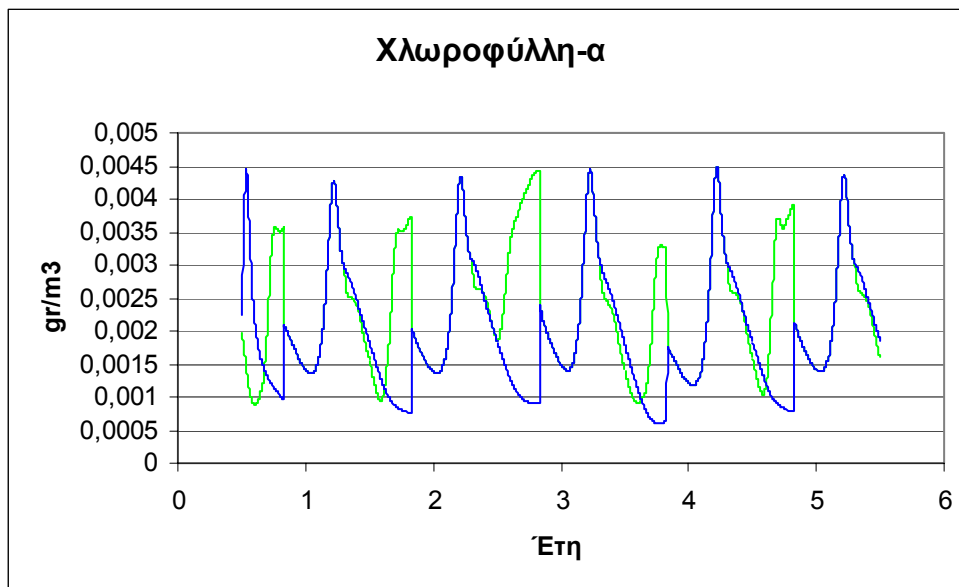
Σχήμα 4-23. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α για το σενάριο Σ780



Σχήμα 4-24. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α για το σενάριο Σ782



Σχήμα 4-25. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α για το σενάριο Σ784



Σχήμα 4-26. Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α για το σενάριο Σ786

Από τα Σχήματα 4-2 μέχρι 4-26 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Οι μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α παρατηρούνται στο επιλίμνιο κατά την περίοδο της στρωμάτωσης, όπου υπάρχουν 2 τοπικά μέγιστα στην αρχή και το τέλος της περιόδου. Οι μέγιστες τιμές είναι 8,2μg/l, 5,6μg/l, 5,1μg/l και 4,4μg/l, για τα σενάρια Σ780, Σ782, Σ784 και Σ786, αντίστοιχα, και παρατηρούνται στο τέλος της περιόδου στρωμάτωσης.

Κατά την ίδια περίοδο, οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης χλωροφύλλης-α στο επιλίμνιο είναι 5,6μg/l, 3,9μg/l, 3,6μg/l και 3,1μg/l για τα Σ780, Σ782, Σ784 και Σ786, αντίστοιχα.

2. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των θρεπτικών είναι ιδιαίτερα αυξημένες στο σενάριο Σ780, εξαιτίας του σημαντικά μικρότερου όγκου της λίμνης, σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια.

Χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών φτάνουν τα 300 μg/l για το Σ780, ενώ δεν υπερβαίνουν τα 142 μg/l για το Σ786.

Σημαντική, επίσης, είναι η απότομη πτώση των συγκεντρώσεων των νιτρικών και του ανόργανου φωσφόρου κατά την εξίσου έντονη αύξηση της χλωροφύλλης-α (ανάπτυξη φυτοπλαγκτού) στο επιλίμνιο κατά την περίοδο της στρωμάτωσης.

3. Οι τιμές των συγκεντρώσεων του BOD είναι σχετικά χαμηλές για όλα τα σενάρια. Οι μέγιστες τιμές κυμαίνονται από 270 μg/l για το Σ786 μέχρι 430 μg/l για το Σ780.

Σε κάθε περίπτωση η παράμετρος αυτή έχει χαμηλές σχετικά τιμές και έτσι δεν κρίνεται ως αποφασιστικής σημασίας στον επηρεασμό της βασικότερης ποιοτικής παραμέτρου, που είναι το διαλυμένο οξυγόνο (DO).

4. Οι ελάχιστες τιμές της συγκέντρωσης του DO παρατηρούνται στο υπολίμνιο κατά την περίοδο της στρωμάτωσης. Οι ελάχιστες τιμές είναι 2,9mg/l, 3,3mg/l, 3,6mg/l και 4,0mg/l, για τα σενάρια Σ780, Σ782, Σ784 και Σ786, αντίστοιχα.

Κατά την περίοδο της πλήρους ανάμιξης, η μέση τιμή των συγκεντρώσεων του DO είναι περ. 7,0 mg/l και παρουσιάζει σχετική ανεξαρτησία από τα σενάρια μεταβολής παροχών.

Κατά το μεγαλύτερο διάστημα των δυο περιόδων (στρωμάτωσης και πλήρους ανάμιξης) οι μέσες και μέγιστες τιμές συγκέντρωσης του DO στο επιλίμνιο είναι μεγαλύτερες από το 80%

της συγκέντρωσης κορεσμού, ώστε τελικά το DO να μην αποτελεί περιοριστικό κριτήριο, για το χαρακτηρισμό της λίμνης ως «ολιγοτροφική».

5 Συμπεράσματα

Θεωρώντας

- 1) ως βασικό κριτήριο το επίπεδο του ευτροφισμού της λίμνης, όπως αυτό εκφράζεται από τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α,
 - 2) ως ανώτατο όριο για το χαρακτηρισμό της λίμνης ως «ολιγοτροφική» την τιμή 4,0 μg/l (Thomann and Mueller, 1987),
 - 3) ως δευτερεύον κριτήριο τη διατήρηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, ιδιαίτερα του υπολίμνιου, σε υψηλά επίπεδα και
 - 4) ως απαιτούμενη ελάχιστη τιμή της συγκέντρωσης του DO τα 3,5 mg/l,
- η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- a. Σενάριο Σ780.
 - i. Οι μέσες τιμές χλωροφύλλης-α (5,6μg/l) υπερβαίνουν σημαντικά το όριο των 4,0 μg/l και η λίμνη οδηγείται προς την «μεσοτροφική» περιοχή.
 - ii. Οι τιμές συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου στο επιλίμνιο είναι πολύ καλές. Κατά την περίοδο της στρωμάτωσης παρατηρούνται χαμηλές τιμές (2,9μg/l) στο υπολίμνιο.
- b. Σενάριο Σ782.
 - i. Οι μέσες τιμές χλωροφύλλης-α (3,9μg/l) είναι οριακά μικρότερες από το όριο των 4,0 μg/l. Η λίμνη εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται ως «ολιγοτροφική».
 - ii. Οι τιμές συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου στο επιλίμνιο είναι πολύ καλές. Κατά την περίοδο της στρωμάτωσης παρατηρούνται χαμηλές τιμές (3,3μg/l) στο υπολίμνιο.
- c. Σενάριο Σ784.
 - i. Οι μέσες τιμές χλωροφύλλης-α (3,6μg/l) είναι μικρότερες από το όριο των 4,0 μg/l. Η λίμνη χαρακτηρίζεται ως «ολιγοτροφική».
 - ii. Οι τιμές συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου στο επιλίμνιο είναι πολύ καλές. Κατά την περίοδο της στρωμάτωσης παρατηρούνται σχετικά χαμηλές τιμές (3,6μg/l) στο υπολίμνιο.
- d. Σενάριο Σ786.
 - i. Οι μέσες τιμές χλωροφύλλης-α (3,1μg/l) είναι σημαντικά μικρότερες από το όριο των 4,0 μg/l. Η λίμνη χαρακτηρίζεται ως «ολιγοτροφική».
 - ii. Οι τιμές συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου στο επιλίμνιο είναι πολύ καλές. Κατά την περίοδο της στρωμάτωσης παρατηρούνται οριακά χαμηλές τιμές (4,0μg/l) στο υπολίμνιο.

Βιβλιογραφία

1. Ανδρεαδάκης Α. (1999-2000). «Μαθηματική Προσομοίωση Διακίνησης Ρύπων και Ποιότητας Υδάτων», σημειώσεις μαθήματος ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»
2. Di Toro, D.M., O'Connor, D. J., Thomann, R.V. and Mancini, J.L. (1975). Phytoplankton-Zooplankton-Nutrient interaction model for western Lake Erie, *Systems Analysis and Simulation in Ecology* vol. 3, ed. B.C. Patten (New York, NY: Academic Press), pp. 423-474
3. Di Toro, D.M. and Connolly, J.P. (1980). Mathematical Models of Water Quality in Large Lakes, Part 2: Lake Erie, ERL, ORD, USEPA, Duluth, MN 231 pp. EPA-600/3-80-65
4. Dugdale, R.C. and Wilkerson, F.P. (1985). Primary Production in the Cap Blanc Region, International Symposium on Upwelling of West Africa., Inst. Inv. Pesq. C. Bas, R. Margalef and P. Rubies (Eds.), Barcelona 1: 233-243
5. Dugdale, R.C. and Wilkerson, F.P. (1985). Athens Project: Far-Field Impact of Surface versus Deep Sewage Outfall, Woodward Clyde Associates Report 1, 28pp
6. Dugdale, R.C. and Wilkerson, F.P. (1985). The Design of the Outfall Diffuser System for the Effluent from the Treatment Works on Psytallia Island and its Diffusion in the Saronikos Gulf: Analysis of far-field impact, Woodward Clyde Associates Report 2, 50pp
7. EPA (1985). Computer Program Documentation for the Enhanced Stream Water Quality, Model QUAL-2E
8. EPA (2000). Aquatox, A Modular Fate and Effects Model for Aquatic Ecosystems Volume 2: Technical Documentation
9. Gargas, E. (1976). A Three Box Eutrophication Model of a Mesotrophic Danish Lake, Water Quality Institute, Horsholm, Denmark
10. Hanna, M. (1990). Evaluation of Models Predicting Mixing Depth. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47:940-947
11. Imboden, D.M. (1974). Phosphorus Model for Lake Eutrophication, *Limnology and Oceanography* 19:297-304
12. Κατσίρη, Α. (2001), Προσωπική Επικοινωνία
13. Κωστόπουλος, Θ. (1995). Μαθηματικό Μοντέλο Ρύπανσης Παρακτιων Περιοχών, Μελέτη Ευαισθησίας στις Σταθερές του Μοντέλου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
14. Larsen, D.P., Mercier, H.T. and Malveg, K.W. (1974). Modeling Algal Growth Dynamics in Shagawa Lake, Minnesota, *Modeling the Eutrophication Process*, eds. Middlebrooks, E.J., Falkenberg, D.H. and Maloney, T.E. (Ann Arbor, MI : Ann Arbor Science),pp. 15-33
15. Μαντζιάρας, Ι. (1991). Μαθηματική Προσομοίωση της Ποιοτικής Κατάστασης των Νερών της Λίμνης Καστοριάς, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
16. Nylolm, N. (1978). A Simulation Model for Phytoplankton Growth and Nutrient Cycling in Eutrophic, Shallow Lakes, *Ecological Modeling* 4:279-310
17. O'Connor, D.J., Thomann, R.V. and Di Toro, D.M. (1973). Dynamic Water Quality, Forecasting and Management, US Environmental Protection Agency, Washington, DC Report EPA 660/3-73-009.
18. O'Connor, D.J., Thomann, R.V. and Di Toro, D.M. (1976). Ecological Models, *Systems Approach to Water Management*, ed. V.Biswas (New York, NY:McGraw-Hill), pp.299-333.
19. Οικονόμου Α. και συνεργάτες (2001). Μελέτη αλιευτικής διαχείρισης λιμνών (φυσικών και τεχνητών) αξιοποίηση υδάτων πόρων ορεινών και μειονεκτικών περιοχών νομών Αιτωλοακαρνανίας, Ευρυτανίας, Καρδίτσας, Βοιωτίας, Αρκαδίας, Ηλείας και Αχαΐας. Α' Φάση, Τελική Έκθεση 599 σελ. Στο: *Μελέτη αλιευτικής διαχείρισης λιμνών (φυσικών και τεχνητών) αξιοποίηση υδάτων πόρων ορεινών και μειονεκτικών περιοχών νομών*

- Αιτωλοακαρνανίας, Φλώρινας, Πέλλας, Κιλκίς, Σερρών, Ιωαννίνων, Ευρυτανίας, Κοζάνης, Καστοριάς, Θεσσαλονίκης, Ροδόπης, Καρδίτσας, Βοιωτίας, Αρκαδίας, Ηλείας, Αχαΐας, Γρεβενών, Θεσπρωτίας, Ημαθίας, Άρτας, Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, ΙΕΥ/ΕΚΘΕ, Τμήμα Ζωολογίας Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και ΙΝΑΛΕ*
20. Scavia, D., and Park, R.A. (1976). Documentation of Selected Constructs and Parameter Values in the Aquatic Model CLEANER, *Ecological Modeling* 2:33-53.
 21. Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M. and Imboden, D.M. (1993). Environmental Organic Chemistry, eds. Wiley and Sons, Inc., New York.
 22. Stamou, A. I., Noutsopoulos, C., Pipilis, K. G., Gavalaki, E. and Andreadakis, A. (1999). Hydrodynamic and Water Quality Modelling of Southern Evoikos Gulf- Greece, *Global Nest the Int. J.*, 1(2), 5-15.
 23. Stamou, A. I., Christodoulou, G. C. and Petroulas, M. (1994). Modeling of Pollution in Coastal Areas, Proceedings of the International Conference for the Restoration and Protection of the Environment II, Patras, pp.9-16.
 24. Stamou, A. I. (1992). Water Quality Modeling-Water Quality and its Management, A Series of Notes for the One-year European Masters Degree Course in Environmental Science and Engineering at Budapest, Supported by the Tempus Programme of the EEC, pp.34.
 25. Στάμου, Α. Ι. (1992). Μεθοδολογία Μαθηματικής Προσομοίωσης της Ρύπανσης σε Επιφανειακούς Υδάτινους Αποδέκτες, Πρακτικά Εθνικού Συνεδρίου της ΕΕΔΥΠ με θέμα Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από Έργα Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων ,σελ. 289-296.
 26. Στάμου, Α. Ι. (1996). Μαθηματικά Μοντέλα για τη Μελέτη της Ρύπανσης σε Επιφανειακούς Υδάτινους Αποδέκτες, Διεθνές Επιστημονικό Συνέδριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, ΤΕΕ, Τόμος ΙΙ, Λάρισα.
 27. Steele, J.H. (1962), Environmental Control of Photosynthesis in the Sea. *Limnology and Oceanography*, 7:137-150
 28. Τσέκος, Ι., Οικονομίδης, Π., Χαριτωνίδης, Σ., Σίνης, Α., Νικολαΐδης, Γ., Πετρίδης, Δ., Μουστάκα, Μ., Ζαρφτιζιάν, Μ.-Ε., Κοκκινάκης, Α.(1992). Υδροβιολογική μελέτη της τεχνητής λίμνης Ταυρωπού, Νομού Καρδίτσας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
 29. Thomann, V.R. and Mueller, J.A. (1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, eds. Harper and Row, Publishers New York
 30. Weiss, R. (1970), The Solubility of Nitrogen, Oxygen and Argon in Water and Seawater, *Deep Sea Res.*, 17, 721-735

Παράρτημα Α

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
a_0	ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στο πάνω (0) όριο της στρώσης	(-)
a_1	ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στο κάτω (1) όριο της στρώσης	(-)
A^n	συγκέντρωση χλωροφύλλης-α τη χρονική στιγμή t	g/m ³
A^{n+1}	συγκέντρωση χλωροφύλλης-α τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
AI^n	συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου τη χρονική στιγμή t	g/m ³
AI^{n+1}	συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
$A2^n$	συγκέντρωση νιτρικού αζώτου τη χρονική στιγμή t	g/m ³
$A2^{n+1}$	συγκέντρωση νιτρικού αζώτου τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
$Abot$	επιφάνεια πυθμένα	m ²
AR	συντελεστής επίδρασης ηλιακής ακτινοβολίας	(-)
$Ather$	επιφάνεια θερμοκλινούς	m ²
$Atot$	επιφάνεια λίμνης	m ²
B^n	συγκέντρωση οργανικού άνθρακα τη χρονική στιγμή t	g/m ³
B^{n+1}	συγκέντρωση οργανικού άνθρακα τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
BA	συντελεστής επαναιώρησης	m
C	συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου	g/m ³
C^n	συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή t	g/m ³
C^{n+1}	συγκέντρωση ποιοτικής παραμέτρου τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
$CAI2$	σταθερά ημι-κορεσμού για το άζωτο	g/m ³
$CKDA$	ταχύτητα θανάτου φυτοπλαγκτού στους T °C	1/day
$CKDA20$	ταχύτητα θανάτου φυτοπλαγκτού στους 20 °C	1/day
$CKDB$	ταχύτητα οξείδωσης οργανικού άνθρακα στους T °C	1/day
$CKDB20$	ταχύτητα οξείδωσης οργανικού άνθρακα στους 20 °C	1/day
CMA	ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού στους T °C	1/day
$CMA20$	ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού στους 20 °C	1/day
$CP2$	σταθερά ημι-κορεσμού για το φώσφορο	g/m ³
$CSAT$	συγκέντρωση κορεσμού διαλυμένου οξυγόνου	g/m ³
Δt	χρονικό βήμα	day
ΔT	εύρος διακύμανσης θερμοκρασίας στο έτος	°C
Dec_A	θάνατος φυτοπλαγκτού	g/m ³
Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
DH	απόσταση κεντροειδών επιλιμνίου και υπολιμνίου	m
$Disp$	συντελεστής κατακόρυφης διασποράς	m ² /day

DO^n	συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου τη χρονική στιγμή t	g/m^3
DO^{n+1}	συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m^3
f	φωτοπερίοδος (κλάσμα ημέρας)	(-)
FN	περιοριστικός παράγοντας εξαιτίας του αζώτου	(-)
FNP	συντελεστής επίδρασης θρεπτικών	(-)
FP	περιοριστικός παράγοντας εξαιτίας του φωσφόρου.	(-)
Gr_A	ανάπτυξη φυτοπλαγκτού	g/m^3
Gr_{AI}	τροφοδότηση αμμωνιακού αζώτου εξαιτίας θανάτου φυτοπλαγκτού	g/m^3
Gr_{PI}	τροφοδότηση οργανικού φωσφόρου εξαιτίας θανάτου φυτοπλαγκτού	g/m^3
Gr_B	τροφοδότηση οργανικού θανάτου εξαιτίας θανάτου φυτοπλαγκτού	g/m^3
H	μέσο βάθος	m
$Hepi$	βάθος επιλιμνίου	m
Hm_0	μέσο βάθος πάνω (0) επιπέδου της στρώσης	m
Hm_1	μέσο βάθος κάτω (1) επιπέδου της στρώσης	m
$Hmepi$	μέσο βάθος επιλιμνίου	m
$Hmtot$	μέσο βάθος λίμνης	m
$Hmyro$	μέσο βάθος υπολιμνίου	m
$Hther$	βάθος θερμοκλινούς	m
$Htot$	στάθμη επιφάνειας της λίμνης	m
I_0	μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στην ελεύθερη επιφάνεια	Ly/day
I_{mean}	μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα χρόνο	Ly/day
I_{range}	εύρος έντασης ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα χρόνο	Ly/day
I_s	ένταση κορεσμού ηλιακής ακτινοβολίας για τη φωτοσύνθεση	Ly/day
KRN	συντελεστής πυθμενικής τροφοδότησης αμμωνιακού αζώτου	$g/m^2/day$
KRP	συντελεστής πυθμενικής τροφοδότησης ανόργανου φωσφόρου	$g/m^2/day$
KSA	συντελεστής καθίζησης φυτοπλαγκτού	1/day
Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
KSP	συντελεστής καθίζησης οργανικού φωσφόρου	1/day
KSB	συντελεστής καθίζησης οργανικού άνθρακα	1/day
K_e	συντελεστής μείωσης ηλιακής ακτινοβολίας με το βάθος εξαιτίας της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών και της συγκέντρωσης των αλγών	1/m
K_w	σταθερά απόσβεσης εξαιτίας των αιωρούμενων στερεών	1/m
K_a	σταθερά απόσβεσης εξαιτίας των αλγών	$m^2/g A$
Lat	γεωγραφικό πλάτος	(-)
L_w	ενεργό μήκος ανάπτυξης κυματισμών	m
μ	ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού	1/day
Min	φορτίο εισροής	g/day
M_{mix}	ρυθμός μεταφοράς μάζας ποιοτικής παραμέτρου από επιλίμνιο προς το υπολίμνιο	g/day
M_{out}	φορτίο εκροής	g/day

M_{proc}	ρυθμός μεταβολής μάζας της ποιοτικής παραμέτρου εξαιτίας φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών.	g/day
N_{A1}	νιτροποίηση (αμμωνιακό άζωτο)	g/m ³
N_{A2}	νιτροποίηση (νιτρικό άζωτο)	g/m ³
Ox_B	οξειδωση οργανικού άνθρακα	g/m ³
PI^n	συγκέντρωση οργανικού φωσφόρου τη χρονική στιγμή t	g/m ³
PI^{n+1}	συγκέντρωση οργανικού φωσφόρου τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
$P2^n$	συγκέντρωση ανόργανου φωσφόρου τη χρονική στιγμή t	g/m ³
$P2^{n+1}$	συγκέντρωση ανόργανου φωσφόρου τη χρονική στιγμή t+Δt	g/m ³
$Phot_{DO}$	τροφοδότηση οξυγόνου εξαιτίας φωτοσύνθεσης	g/m ³
PN	σταθερά προτίμησης αμμωνιακού αζώτου	(-)
PNH	συντελεστής προτίμησης αμμωνιακού αζώτου	(-)
P_{P1}	μετατροπή οργανικού σε ανόργανο (οργανικός φώσφορος)	g/m ³
P_{P2}	μετατροπή οργανικού σε ανόργανο (ανόργανος φώσφορος)	g/m ³
Q_{in}	παροχή εισροής	m ³ /day
Q_{mix}	παροχή κατακόρυφης ανάμιξης	m ³ /day
Q_{out}	παροχή εκροής	m ³ /day
Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
RA	ταχύτητα ενδογενούς αναπνοής φυτοπλαγκτού	l/day
$RA20$	ταχύτητα ενδογενούς αναπνοής φυτοπλαγκτού στους 20 °C	l/day
REA	συντελεστής φυσικού αερισμού	m/day
Rea_{DO}	φυσικός αερισμός	g/m ³
Res_A	ενδογενής αναπνοή φυτοπλαγκτού	g/m ³
RGr_{P1}	τροφοδότηση οργανικού φωσφόρου εξαιτίας της ενδογενούς αναπνοής του φυτοπλαγκτού	g/m ³
RN	ταχύτητα νιτροποίησης στους T °C	l/day
$RN20$	ταχύτητα νιτροποίησης στους 20 °C	l/day
RP	ταχύτητα μετατροπής οργανικού σε ανόργανο φώσφορο	l/day
$RP20$	ταχύτητα μετατροπής οργανικού σε ανόργανο φώσφορο στους 20 °C	l/day
S	αλατότητα	ppt
Set_A	καθίζηση φυτοπλαγκτού	g/m ³
Set_{P1}	καθίζηση οργανικού φωσφόρου	g/m ³
Set_B	καθίζηση οργανικού άνθρακα	g/m ³
SOD	πυθμενική ζήτηση οξυγόνου	g/m ²
SR_{A1}	Τροφοδότηση αμμωνιακού αζώτου από τον πυθμένα	g/m ³
SR_{P2}	Τροφοδότηση ανόργανου φωσφόρου από τον πυθμένα	g/m ³
t	χρόνος	day
T	θερμοκρασία	°C
T^n	θερμοκρασία τη χρονική στιγμή t	°C
T^{n+1}	θερμοκρασία τη χρονική στιγμή t+ Δt	°C
Te_{pi}	θερμοκρασία επιλιμνίου	°C

<i>T_{γρo}</i>	θερμοκρασία υπολιμνίου	°C
<i>td</i>	αριθμός ημέρας (<i>td</i> = 1 για την 1η Ιανουαρίου)	(-)
<i>T_k</i>	θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin	°K
<i>T_{mean}</i>	μέση θερμοκρασία έτους	°C
<i>U_{pA1}</i>	Πρόσληψη αμμωνιακού αζώτου από το φυτοπλαγκτό	g/m ³
<i>U_{pA2}</i>	Πρόσληψη νιτρικού αζώτου από το φυτοπλαγκτό	g/m ³
<i>U_{pP2}</i>	Πρόσληψη ανόργανου φωσφόρου από το φυτοπλαγκτό	g/m ³
<i>U_{pN_{DO}}</i>	Κατανάλωση οξυγόνου για νιτροποίηση	g/m ³
Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
<i>U_{pB_{DO}}</i>	Κατανάλωση οξυγόνου για οξείδωση του οργανικού άνθρακα	g/m ³
<i>U_{pA_{DO}}</i>	Κατανάλωση οξυγόνου για αναπνοή του φυτοπλαγκτού	g/m ³
<i>U_{pS_{DO}}</i>	ζήτηση οξυγόνου από τον πυθμένα	g/m ³
<i>V</i>	ο όγκος της λίμνης ή του στρώματος	m ³
<i>V_{AMAX}</i>	ταχύτητα καθίζησης φυτοπλαγκτού	m/day
<i>Vⁿ</i>	όγκος της λίμνης ή του στρώματος τη χρονική στιγμή <i>t</i>	m ³
<i>Vⁿ⁺¹</i>	όγκος της λίμνης ή του στρώματος τη χρονική στιγμή <i>t</i> + Δ <i>t</i>	m ³
<i>V_{epi}</i>	όγκος επιλιμνίου	m ³
<i>V_{γρo}</i>	όγκος υπολιμνίου	m ³
<i>V_{P_{MAX}}</i>	ταχύτητα καθίζησης οργανικού φωσφόρου	m/day
<i>V_{tot}</i>	ολικός όγκος της λίμνης	m ³
<i>Wind</i>	ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της λίμνης	m/sec
<i>Y1</i>	περιεκτικότητα της χλωροφύλλης σε φώσφορο	g P/ g A
<i>Y2</i>	περιεκτικότητα της χλωροφύλλης σε άζωτο	g N/ g A
<i>Y3</i>	περιεκτικότητα της χλωροφύλλης σε άνθρακα	g C/ g A
<i>Y4</i>	παραγόμενο οξυγόνο ανά μονάδα χλωροφύλλης	g O/ g A

Μέρος III: Διαχείριση υγρών αποβλήτων λεκάνης απορροής

A. Κασίρη

Πίνακας 1. Μόνιμος και εποχιακός πληθυσμός των οικισμών λίμνης Πλαστήρα

Περιοχή	Υψόμετρο	Μόνιμοι κάτοικοι	Παραθεριστές	Ένοικ/μενα δωμάτια Ξενοδοχεία	Ολικός πληθυσμός
ΔΗΜΟΣ ΙΤΑΜΟΥ					
Καστανιά	800	264	319	30	613
Μούχα	840	143	173	20	336
ΣΥΝΟΛΟ		407	492	50	949
ΔΗΜΟΣ ΝΕΒΡΟΠΟΛΗΣ ΑΓΡΑΦΩΝ					
Κρυονέρι	880	631	69	35	735
Κουτσοδήμος	830	57	6	0	63
Μπελοκομίτης	986	148	36	22	206
Κέδρος	1140	54	13	0	67
Νεοχώρι	980	1108	133	307	1548
Πεζούλα	900	328	423	119	870
Καλύβια Πεζούλας	820	217	280	0	497
Νεράιδα	1120	2	3	26	31
Φυλακτή	1000	401	249	64	714
Καλύβια Φυλακτής	880	63	39	12	114
ΣΥΝΟΛΟ		3009	1251	585	4845
Δ. ΠΛΑΣΤΗΡΑ					
Κερασέα	920	431	34	72	537
Νεβρόπολη	845	97	8	0	105
Λαμπερό-Α. Αθανάσιος	740	333	107	0	440
Μερσενικόλας	700	674	310	48	1032
Μορφοβούνι	800	844	371	12	1227
Μοσχάτο	440	278	197	15	490
ΣΥΝΟΛΟ		2657	1027	147	3831
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ		6073	2770	782	9625

2 Αρχές επεξεργασίας – Ομαδοποιήσεις

Οι βασικές αρχές που ακολουθήθηκαν για την διαχείριση των λυμάτων των οικισμών είναι οι εξής:

- Απομονωμένοι ή δυσπρόσιτοι οικισμοί με πληθυσμό < 500 κατοίκους αντιμετωπίζονται χωριστά
- Αποφυγή μεγάλου μήκους αγωγών μεταφοράς που έχουν υψηλό κόστος αλλά και προβλήματα αποθέσεων και δημιουργίας υδρόθειου. Γενικά έχει βρεθεί ότι δύο χωριστές εγκαταστάσεις κοστίζουν φθηνότερα από μια κοινή όταν οι οικισμοί απέχουν περισσότερο από 5 km.
- Χρήση εναλλακτικών δικτύων συλλογής ακαθάρτων, σε συνδυασμό με σηπτικούς βόθρους, με στόχο την ελαχιστοποίηση των εκσκαφών και των διαμέτρων.
- Χρήση συστημάτων επεξεργασίας χαμηλής τεχνολογίας με μικρές απαιτήσεις συντήρησης
- Συγκέντρωση της ιλύος από όλες τις μονάδες επεξεργασίας σε μία μονάδα επεξεργασίας που θα περιλαμβάνει και έργα χειρισμού της ιλύος.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω αρχές έγιναν κατ' αρχήν οι ακόλουθες ομαδοποιήσεις οικισμών:

1. Μεμονωμένοι οικισμοί που αντιμετωπίζονται ο καθένας μόνος του και βρίσκονται μακριά από τη λίμνη είναι οι Καρίτσα, Μούχα, Καστανιά και Μοσχάτο, Νεράιδα.
2. Λαμπερό – Άγιος Αθανάσιος – Πληθυσμός 600 κάτοικοι (Σύμπλεγμα 1).
3. Μερσενικόλας, Μορφοβούνι - Πληθυσμός 2300 κάτοικοι (Σύμπλεγμα 2).
4. Κερασιά, Κρουνέρι, Φυλακτή, Πεζούλα, Κουτσοδήμος, Νεοχώρι, Μπελοκομίτης - Πληθυσμός 5500 κάτοικοι (Σύμπλεγμα 3).

Για την περίπτωση 4 εξετάζονται επίσης και δύο εναλλακτικά σχήματα τα

- 4α Νεοχώρι – Μπελοκομίτης - Πληθυσμός 1800 κάτοικοι (Σύμπλεγμα 3α).
- 4β Κερασιά, Κρουνέρι, Φυλακτή, Πεζούλα, Κουτσοδήμος - Πληθυσμός 3700 κάτοικοι (Σύμπλεγμα 3β).

3 Απαιτήσεις επεξεργασίας

Οι δυνατοί αποδέκτες στην περιοχή μελέτης είναι η λίμνη Πλαστήρα απ'ευθείας ή μέσω χειμάρρων που καταλήγουν σ' αυτήν, το έδαφος μέσω της επιφανειακή άρδευση ή της ταχείας διήθησης και χείμαρροι εκτός λεκάνης απορροής. Οι απαιτήσεις της επεξεργασίας για τις περιπτώσεις αυτές είναι οι ακόλουθες

Λίμνη και υδατορεύματα	Επιφανειακή άρδευση
Βιολογική επεξεργασία και νιτροποίηση	Βιολογική επεξεργασία και νιτροποίηση
Απονιτροποίηση	Μερική Απονιτροποίηση
Διύλιση	Διύλιση
Απολύμανση με UV	Χλωρίωση
Αφαίρεση φωσφόρου με προσθήκη θειικού αργιλίου	

Η ποιότητα της τελικής εκροής στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα θα πρέπει να είναι

Λίμνη και υδατορεύματα	Επιφανειακή άρδευση
BOD < 10 mg/l	BOD < 10 mg/l
SS < 5 mg/l	SS < 5 mg/l
NH ₄ -N < 0,5 mg/l	NH ₄ -N < 1,0 mg/l
NO ₃ -N < 10 mg/l	NO ₃ -N < 20 mg/l
P < 1,0 mg/l	P < 6 mg/l
Κολοβακτηρίδια < 100/100 ml	Κολοβακτηρίδια < 100/100 ml

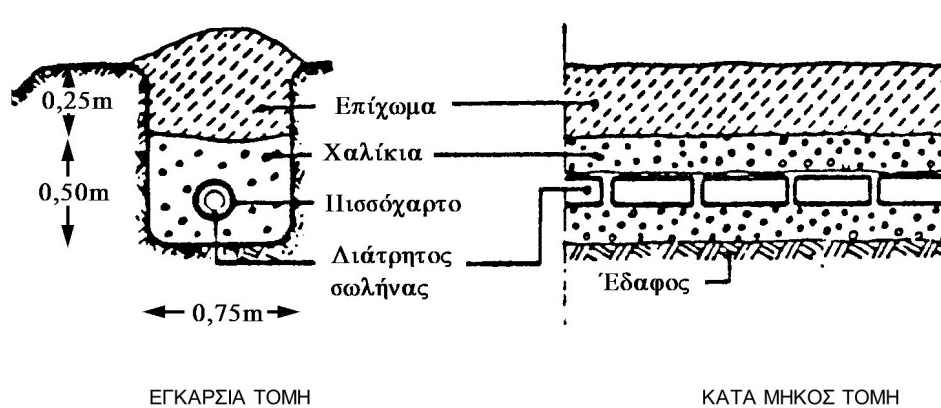
4 Βασικές εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας

4.1 Μεμονωμένοι οικισμοί ή συγκροτήματα <500 κατοίκων

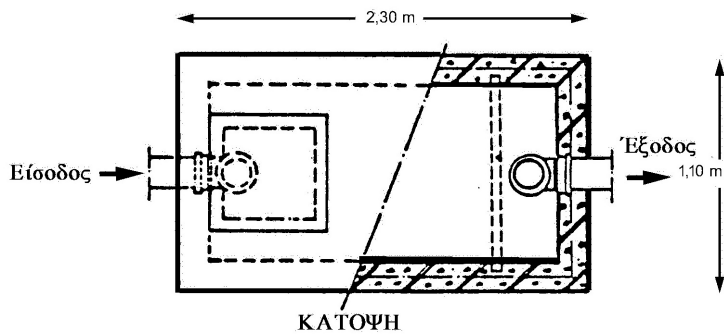
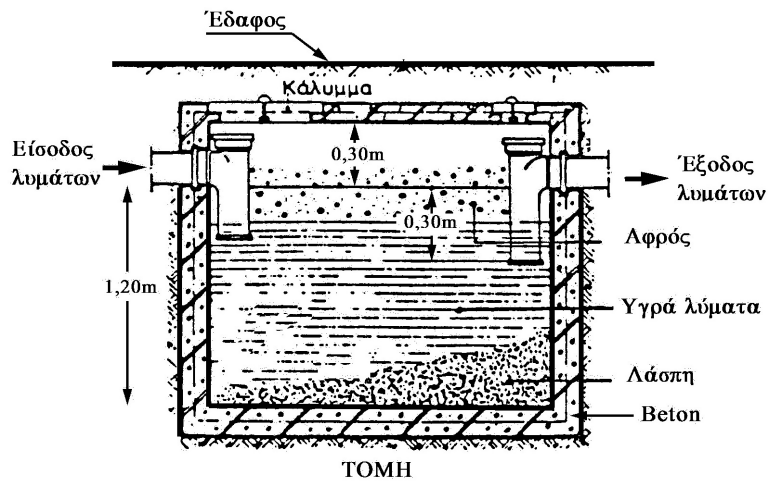
Για τους απομονωμένους οικισμούς κατάλληλα συστήματα επεξεργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Σηπτικοί βόθροι – απορροφητικές τάφροι αποτελούμενα από σηπτικό βόθρο και υπεδάφιο πεδίο ξεχωριστό για κάθε κατοικία. Η μέση απαιτούμενη έκταση του υπεδάφιο πεδίου είναι $6,5 \text{ m}^2/\text{κάτοικο}$ και ο όγκος του σηπτικού βόθρου για 4-μελή οικογένεια είναι 3000 λίτρα. Ο όγκος του σηπτικού βόθρου σε λίτρα προκύπτει από τη σχέση $V = 180 \times P + 2000$ όπου P τα εξυπηρετούμενα άτομα.
- Ατομικά συστήματα επεξεργασίας αποτελούμενα από σηπτικό βόθρο και φίλτρα άμμου ($1 \text{ m}^2/\text{κάτοικο}$). Η λύση αυτή προτείνεται στην περίπτωση που το έδαφος είναι ακατάλληλο για τα απορροφητικά πεδία όπως π.χ έδαφος με μικρή απορροφητικότητα ή έδαφος βραχώδες ή όταν δεν υπάρχει επαρκής χώρος στο οικόπεδο για την κατασκευή του απορροφητικού πεδίου.
- Συλλογικά συστήματα επεξεργασίας αποτελούμενα από σηπτικούς βόθρους σε κάθε οικία και λεκάνη καλαμιών ($4 \text{ m}^2/\text{κάτοικο}$). Τα συστήματα αυτά μπορούν να συνδυαστούν και με ειδικά δίκτυα βαρύτητας ή υπό πίεση.

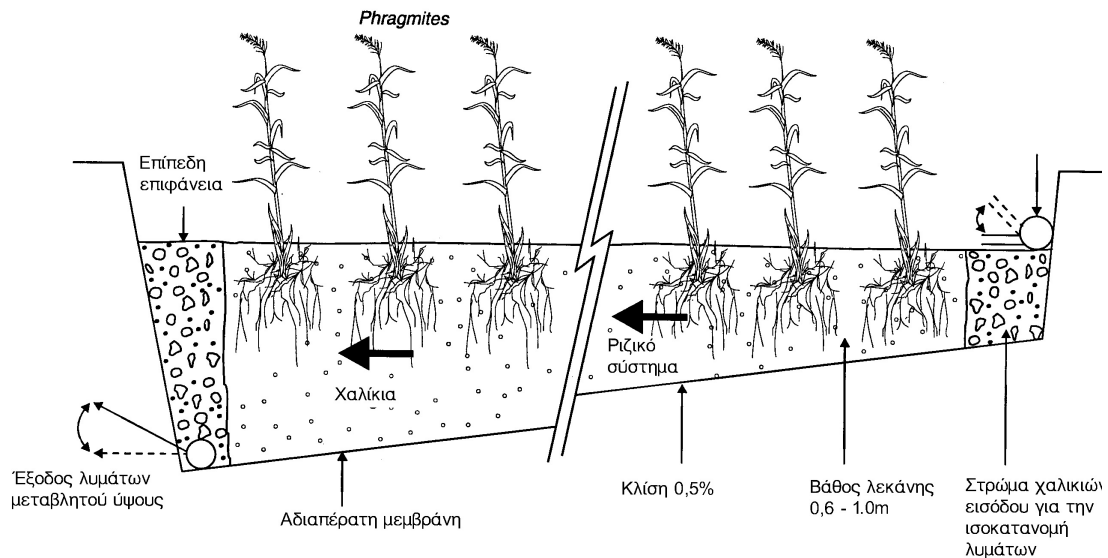
Ακολουθούν μερικές χαρακτηριστικές εικόνες των πιο πάνω συστημάτων επεξεργασίας:



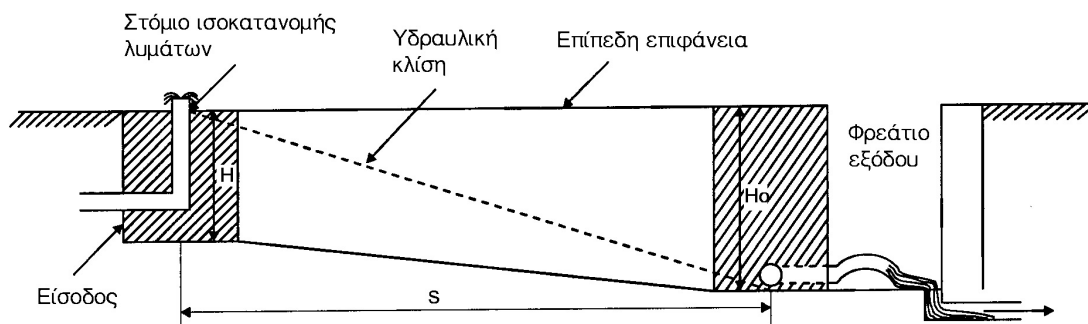
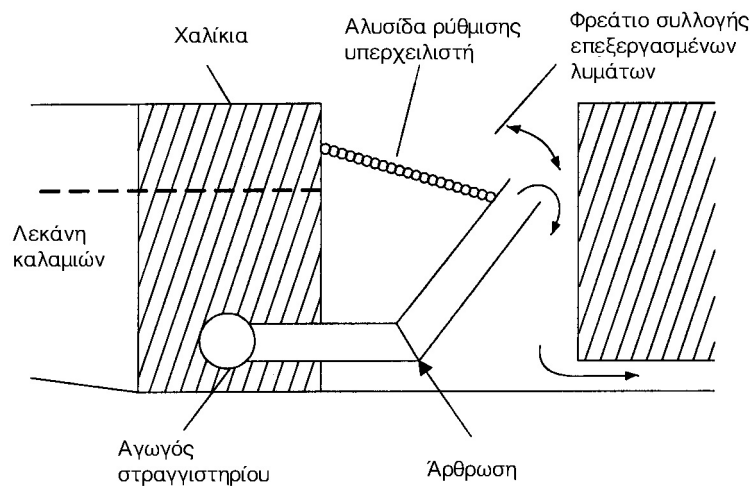
Απορροφητική τάφρος



Σηπτικός βόθρος



Τυπική διάταξη λεκάνης καλαμιών οριζοντίας ροής



Τυπικές τομές λεκάνης καλαμιών

4.2 Οικισμοί μεγαλύτεροι των 1000 κατοίκων

Για τους οικισμούς ή τα συγκροτήματα οικισμών με πληθυσμό μεγαλύτερο των 1000 κατοίκων κατάλληλα συστήματα επεξεργασίας που επιτυγχάνουν και υψηλή ποιότητα τελικής εκροής και εξασφαλίζουν τη δυνατότητα νιτροποίησης και απονιτροποίησης είναι τα:

- Αντιδραστήρες εναλλασσόμενης λειτουργίας (SBR)
- Οξειδωτικές τάφροι
- Bioblocks
- Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι

Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά στοιχεία για το κάθε σύστημα καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του.

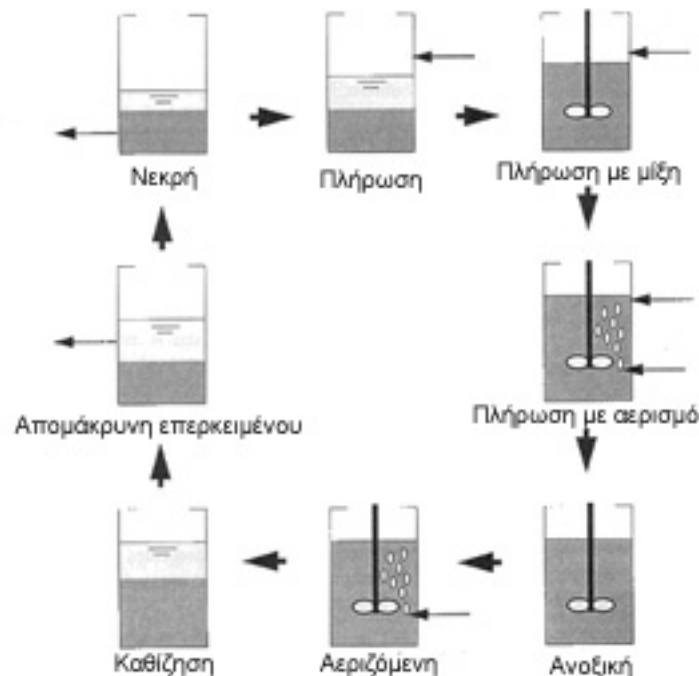
Αντιδραστήρες εναλλασσόμενης λειτουργίας (SBR)

Πρόκειται για παραλλαγή του συστήματος ενεργού ιλύος που λειτουργεί σαν σύστημα διακοπτόμενης ροής σε 2-3 ημερήσιους κύκλους που περιλαμβάνουν διακεκριμένες φάσεις, όπως φαίνεται περιγραφικά στο ακόλουθο σχήμα. Μπορεί με κατάλληλο συνδυασμό των φάσεων πλήρωσης και αντίδρασης να επιτύχει κανείς απομάκρυνση του αζώτου αλλά βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου.

Κατασκευάζονται από 1 – 3 συστήματα SBR που λειτουργούν παράλληλα. Η απλούστερη κατασκευή περιλαμβάνει 1 SBR. Στην περίπτωση αυτή κατά τη διάρκεια των φάσεων καθίζησης και αφαίρεσης υπερκειμένου απαιτείται η αποθήκευση των εισερχόμενων λυμάτων σε χωριστή δεξαμενή. Σε μικρά συστήματα είναι δυνατή η τροφοδοσία λυμάτων και κατά τις παραπάνω φάσεις αλλά η είσοδος των λυμάτων γίνεται κοντά στον πυθμένα ώστε να μην διαταράσσεται η επιφάνεια.

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δεν απαιτείται δεξαμενή τελικής καθίζησης	Απαιτείται αυτοματισμός για τη λειτουργία του.
Μεγάλη ευελιξία μέσω των φάσεων λειτουργίας για την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας τελικής εκροής	Απαιτείται κάποια εμπειρία για τη ρύθμιση της διάρκειας και της αλληλουχίας των φάσεων



Φάσεις λειτουργίας SBR

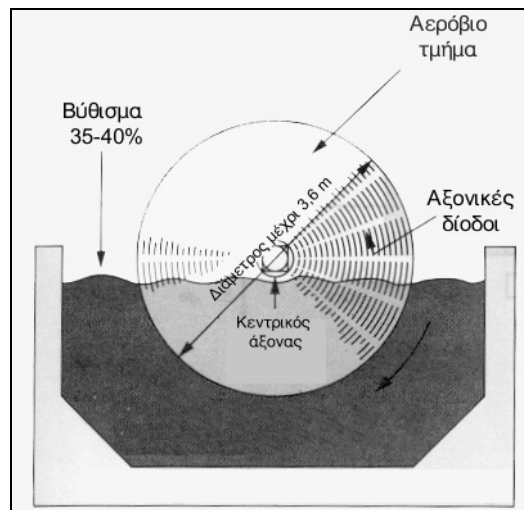
Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι

Το σύστημα των περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου βιολογικής επεξεργασίας των βιολογικών φίλτρων. Αποτελείται από σειρά παράλληλων κυκλικών δίσκων, τοποθετημένων κοντά ο ένας στον άλλον και ενωμένων σε ένα κοινό κεντρικό μεταλλικό άξονα. Ενδεικτική τομή φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Οι δίσκοι είναι βυθισμένοι περίπου κατά το 40% της επιφάνειάς τους στη δεξαμενή των λυμάτων και περιστρέφονται αργά. Με την πάροδο του χρόνου η βιολογική μάζα προσκολλάται στην επιφάνεια των δίσκων όπου σχηματίζει μια μόνιμη λεπτή βιολογική μεμβράνη πάχους 1-3mm. Η μεμβράνη περιέχει βακτηρίδια, μύκητες, άλγη και πρωτόζωα, όλα σε δυναμική ισορροπία. Η βιομάζα έχει

μεγάλη συγκέντρωση που φθάνει 15.000 ως 20.000 mg/l ως προς τον όγκο του υγρού. Αυτό αποτελεί και ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος που επιτυγχάνει σημαντική οικονομία έργων.

Με την περιστροφή οι δίσκοι έρχονται εναλλακτικά σε επαφή με τα λύματα και τον ατμοσφαιρικό αέρα εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο το απαιτούμενο οξυγόνο για τη βιολογική αποδόμηση των οργανικών ουσιών. Οι οργανικές ουσίες προσροφούνται πάνω στη βιολογική μεμβράνη και στη συνέχεια διασπώνται και οξειδώνονται από τους μικροοργανισμούς. Μέρος από τις διασπώμενες οργανικές ουσίες συντίθεται σε νέους μικροοργανισμούς και έτσι αυξάνεται το πάχος της μεμβράνης.



Χαρακτηριστική τομή βιοδίσκων

Η περιστροφή των δίσκων με την τύρβη που προκαλεί, διευκολύνει την απολέπιση της προσκολλημένης βιομάζας καθώς επίσης και τη παραμονή της αποκολλημένης βιομάζας σε αιώρηση.

Οι βιολογικοί δίσκοι κατασκευάζονται συνήθως σε περισσότερες βαθμίδες σε σειρά. Κάθε βαθμίδα δίσκων είναι τοποθετημένη σε χωριστό διαμέρισμα ή χωριστή δεξαμενή. Αύξηση των βαθμίδων στο σύστημα περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων συνεπάγεται αύξηση του βαθμού επεξεργασίας καθώς κάθε βαθμίδα δέχεται μειωμένο οργανικό φορτίο σε σχέση με την προηγούμενη, φθάνοντας μέχρι και την νιτροποίηση. Η απονιτροποίηση επιτυγχάνεται όταν οι δίσκοι βυθιστούν κατά 70%. Το στάδιο της απονιτροποίησης προηγείται του σταδίου του αερισμού.

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Έχει χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας	Απαιτείται πρωτοβάθμια καθίζηση για την αποφυγή έμφραξης των δίσκων
Έχει σχετικά μικρές λειτουργικές απαιτήσεις	Απαιτείται τελική καθίζηση
Μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε κτίριο και άρα προσαρμόζεται καλλίτερα στο τοπίο	Δεν έχει τον ίδιο βαθμό απόδοσης με τα συστήματα ενεργού ιλύος
	Δεν είναι κατάλληλο για πληθυσμούς μεγαλύτερους των 1000 κατοίκων
	Η περίσσεια ιλύς δεν είναι καλά σταθεροποιημένη

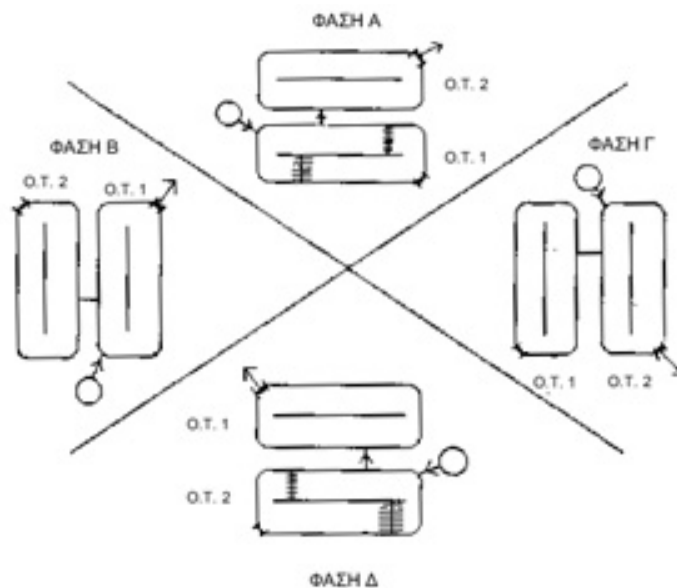
Εναλλασσόμενες οξειδωτικοί τάφροι

Η οξειδωτική τάφρος είναι παραλλαγή του συστήματος ενεργού ιλύος και λειτουργεί στην περιοχή του παρατεταμένου αερισμού. Η τάφρος έχει σχήμα πετάλου ή ελλειπτικού δακτυλίου και είναι εξοπλισμένη με ειδικού τύπου επιφανειακούς αεριστήρες οριζοντίου άξονα, τύπου "βούρτσας".

Οι αεριστήρες προσδίδουν στα λύματα μια οριζόντια ταχύτητα 0,25 – 0,30 m/sec που διατηρεί τη βιομάζα σε αιώρηση και εξασφαλίζει τη συνεχή κυκλοφορία των λυμάτων στην τάφρο. Το επίμηκες σχήμα της τάφρου σε συνδυασμό με τη θέση των αεριστήρων δημιουργεί ιδανικές συνθήκες για τη βιολογική νιτροποίηση και απονιτροποίηση καθόσον εύκολα διαμορφώνονται ζώνες με υψηλή και χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου αντίστοιχα.

Το σύστημα της οξειδωτικής τάφρου δεν απαιτεί πρωτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων. Σε μικρές μονάδες η οξειδωτική τάφρος σχεδιάζεται με τραπεζοειδή διατομή. Ο διαχωρισμός της βιομάζας από τα επεξεργασμένα απόβλητα γίνεται στην τελική δεξαμενή καθίζησης και η βιομάζα ανακυκλοφορεί συνεχώς στην τάφρο. Η περίσσεια ιλύς είναι αερόβια σταθεροποιημένη και δεν απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία πριν την αφυδάτωση.

Το σύστημα των εναλλασσόμενων τάφρων περιλαμβάνει δύο τάφρους η κάθε μια εκ των οποίων λειτουργεί εναλλάξ σαν δεξαμενή τελικής καθίζησης. Οι δύο τάφροι επικοινωνούν μεταξύ τους μ' έναν αγωγό σύνδεσης εσωτερικής διαμέτρου $d = 15 \text{ cm}$, ο οποίος επιτρέπει στο ανάμικτο υγρό να περνάει από τη μία τάφρο στην άλλη. Κάθε τάφρος είναι εξοπλισμένη με ένα οριζόντιο ρότορα. Με τον τρόπο αυτό η λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας απλουστεύεται γιατί δεν απαιτείται δεξαμενή τελικής καθίζησης και επανακυκλοφορία της ιλύος. Οι κύκλοι λειτουργίας των δύο τάφρων φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Κύκλοι λειτουργίας τάφρων

Οι διατάξεις εισροής - εκροής της κάθε δεξαμενής είναι τοποθετημένες αντιδιαμετρικά, προκειμένου να εξασφαλίζονται καλύτερες συνθήκες μίξης και να αποφεύγονται βραχυκυκλώματα ροής.

Η τελική εκροή υπερχειλίζει πάνω από ρυθμιζόμενους μηχανικούς υπερχειλιστές λεπτής στέψης, ενώ ένα μεταλλικό πέτασμα (κόφτρα) είναι τοποθετημένο μπροστά από τους υπερχειλιστές με σκοπό να παρεμποδίζει τη διαφυγή στερεών ιλύος μαζί με την υπερχειλίζουσα εκροή.

Η αφαίρεση περίσσειας ιλύος γίνεται απευθείας από τη δεξαμενή αερισμού με τη βοήθεια βαλβίδας εκκένωσης. Η ποσότητα της ιλύος που θα αφαιρείται θα είναι η ίδια με το σύστημα της απλής τάφρου.

Η απόρριψη θα γίνει από διακλάδωση του σωλήνα που συνδέει τις δύο τάφρους προς το αντλιοστάσιο περίσσειας ιλύος.

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δεν απαιτείται δεξαμενή τελικής καθίζησης ούτε και αντλιοστάσιο επανακυκλοφορίας	Απαιτεί αυτοματισμούς για τη λειτουργία των φάσεων
Η ποιότητα της τελικής εκροής είναι υψηλή	
Η ιλύς είναι σταθεροποιημένη	
Δεν απαιτείται χωριστή δεξαμενή αποθήκευσης ιλύος	

Bioblock

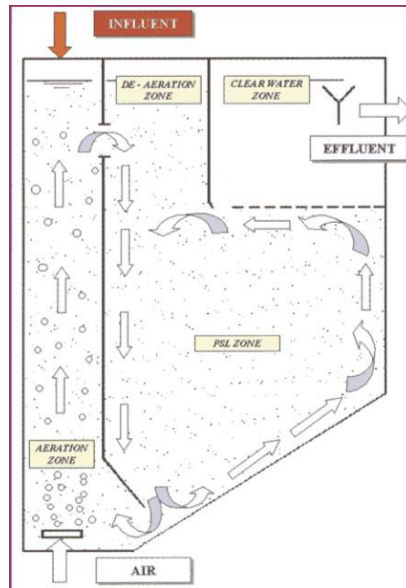
Πρόκειται για πρότυπο σύστημα επεξεργασίας λυμάτων βασισμένο στην αρχή της ενεργού ιλύος όπου οι διαδικασίες του αερισμού, νιτροποίησης, απονιτροποίησης και καθίζησης επιτυγχάνονται σε μία δεξαμενή. Η δεξαμενή έχει κυλινδρικό σχήμα και ύψος 6-12 m. Ο αερισμός επιτυγχάνεται με πιεσμένο αέρα ενώ το μεγάλο ύψος της δεξαμενής βελτιώνει την απόδοση του αερισμού επιτυγχάνοντας έτσι σημαντική οικονομία ενέργειας.

Η διαύγαση των καθαρισμένων λυμάτων γίνεται μέσα στη δεξαμενή σε περιοχές ηρεμίας που διαμορφώνονται με κατάλληλες κωνικές διατάξεις. Δεν υπάρχει χωριστή δεξαμενή καθίζησης ούτε ανακυκλοφορίας της ιλύος. Η απομάκρυνση της περίσσειας ιλύος γίνεται απ' ευθείας από τη δεξαμενή. Το σύστημα επιτυγχάνει πολύ υψηλή ποιότητα τελικής εκροής¹. Χαρακτηριστικές εικόνες φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δεν απαιτείται δεξαμενή τελικής καθίζησης ούτε και αντλιοστάσιο επανακυκλοφορίας	Είναι ευαίσθητο στη ρύθμιση της παροχής του αέρα
Η ποιότητα της τελικής εκροής είναι υψηλή	
Η ιλύς είναι σταθεροποιημένη	

¹ Ερευνητικό Πρόγραμμα ΕΜΠ «Αξιολόγηση Απόδοσης Πρωτότυπου Συστήματος Επεξεργασίας Λυμάτων Bioblock® & Actifiber®» Τελική Έκθεση Οκτώβριος 2001



Όψη και σχηματική τομή Bioblock

4.3 Περιγραφή μονάδας επεξεργασίας

Η εγκατάσταση επεξεργασίας θα περιλαμβάνει τις ακόλουθες επί μέρους μονάδες

- Σχάρα εισόδου
- Εναλλασσόμενες οξειδωτικές τάφροι ή bioblock ή SBR
- Απολύμανση (χλωρίωση ή UV)
- Φίλτρο άμμου
- Αφαίρεση φωσφόρου (Για διάθεση στη λίμνη)
- Δεξαμενή αποθήκευσης ιλύος
- Κοινή επεξεργασία ιλύος από όλες τις μονάδες με ταινιοφιλτράπρεσα ή σακκόφιλτρα

4.4 Επιφανειακή άρδευση

Η επιφανειακή άρδευση συνίσταται στην ελεγχόμενη διάθεση των λυμάτων για άρδευση κάποιων επιλεγμένων καλλιεργειών. Η άρδευση μπορεί να γίνει είτε με σωλήνες στάγδην είτε με επιφανειακή κατάκλιση. Ο δεύτερος τρόπος είναι οικονομικότερος γιατί δεν έχει το κόστος των σωληνώσεων.

Η απαιτούμενη έκταση για τη διάθεση των λυμάτων υπολογίζεται με ισορροπία μαζών από την ακόλουθη σχέση:

$$L_w = ET - P + W_p$$

όπου:

L_w = η δόση εφαρμογής των επεξεργασμένων λυμάτων, mm/ημ

ET = η ταχύτητα της εξατμισοδιαπνοής

P = η βροχόπτωση

W_p = η ταχύτητα διήθησης των λυμάτων στο έδαφος των λυμάτων

Οι παράμετροι ET και P υπολογίζονται με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής. Η παράμετρος W_p εξαρτάται από την διαπερατότητα του εδάφους και λαμβάνεται ίση με το 4-6% της τιμής αυτής.

Οι σχετικοί υπολογισμοί φαίνονται στον πίνακα 2. Για το έδαφος θεωρήθηκε μία τιμή διαπερατότητας ίση με 1,5 cm/h και η διήθηση στο έδαφος καθορίστηκε στο 4% της τιμής αυτής ήτοι 0,06 cm/h ή 15 m³/στρέμμα.ημ ή 450 mm/μήνα.

Η απαιτούμενη έκταση υπολογίζεται από τη σχέση

$$A = \frac{Q_{\text{μέσηχ}} \times 365}{5678,64} = m^2$$

Πίνακας 2. Υπολογισμός απαιτούμενης έκτασης για επιφανειακή άρδευση

Μήνας	Βροχή, P mm	ETP mm	P - ETP mm	W mm	Φόρτιση, L _w mm	Παροχή m ³ /ημ
Οκτ	112,10	76,01	-36,08	450,00	413,92	85,14
Νοε	196,06	38,50	-157,56	450,00	292,44	60,15
Δεκ	181,91	25,57	-156,34	450,00	293,66	60,40
Ιαν	130,74	33,37	-97,37	450,00	352,63	72,53
Φεβ	140,03	52,86	-87,17	450,00	362,83	74,63
Μαρ	104,72	79,38	-25,34	450,00	424,66	87,34
Απρ	88,88	119,99	31,11	450,00	481,11	98,96
Μαϊ	46,91	162,94	116,03	450,00	566,03	116,42
Ιουν	29,11	206,24	177,14	450,00	627,14	128,99
Ιουλ	19,30	237,79	218,48	450,00	668,48	137,50
Αυγ	24,43	212,18	187,74	450,00	637,74	131,17
Σεπ	39,18	147,19	108,01	450,00	558,01	114,77
Σύνολο	1113,27	1392,01	278,64	5400,00	5678,64	

Η ποσότητα των λυμάτων που μπορεί να διατεθεί κάθε μήνα φαίνεται στην τελευταία στήλη του πίνακα. Όπως φαίνεται η έκταση αρκεί να απορροφήσει και τη μέγιστη ημερήσια παροχή που θα παρουσιαστεί τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

Οι απαιτούμενες εκτάσεις για τα συγκροτήματα κατοικιών είναι:

Σύμπλεγμα 1	4,5	στρέμματα
Σύμπλεγμα 2	23,2	στρέμματα
Σύμπλεγμα 3	54,68	στρέμματα
Σύμπλεγμα 3α	18,04	στρέμματα
Σύμπλεγμα 3β	36,62	στρέμματα

5 Κόστος

Η οικονομική αξιολόγηση που ακολουθεί έγινε ενδεικτικά για το σύστημα των οξειδωτικών τάφρων και παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα 3.

Από την ανάλυση προέκυψε τα εξής συμπεράσματα

- Η χωριστή επεξεργασία είναι γενικά οικονομικότερη όταν απαιτείται μεταφορά λυμάτων σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 5 km.
- Τα σενάρια 3α και 3β έχουν συνολικό κόστος ελαφρά μικρότερο από το σενάριο 3

Πίνακας 3. Κόστος επεξεργασίας εναλλακτικών σχημάτων επεξεργασίας

Περιοχή	Εγκατάσταση επεξεργασίας	Αγωγοί μεταφοράς	Επιφανειακή άρδευση	Σύνολο
Σύμπλεγμα 1	40.000	27.000	10.000	77.000
Σύμπλεγμα 2	187.500	30.000	52.000	369.500
Σύμπλεγμα 3	352.000	390.000	120.000	862.000
Σύμπλεγμα 3α	157.000	60.000	40.000	257.000
Σύμπλεγμα 3β	257.000	240.000	82.000	579.000

6 Φορτία

Μη σημειακές πηγές					
Χρήση γης	Έκταση (στρέμμα)	Μοναδιαία φορτία		Φορτία	
		N	P	N	P
		kg/στρέμμα.έτος		kg/έτος	
Αστικές περιοχές	2000	0,25	0,1	500	200
Καλλιεργούμενες	12500	3	0,1	37500	1250
Βοσκότοποι	40000	0,5	0,05	20000	2000
Δάση	84500	0,3	0,01	25350	845
Νερά	28000	0,4	0,02	11200	560
Σύνολο	167000			94550	4855

Σύνολο	Μη τουριστική		Τουριστική	
	kg/d	Kg/έτος	kg/d	Kg/έτος
BOD	166,65	60827	253,15	92400
SS	75,5	27558	115,05	41993
N	38,1	13907	58,3	21280
P	2,04	745	3,12	1139