ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Π.Μ.Σ : «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ «ΝΕΑΣ» ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PCLAKE: ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ, ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑ

Κοφινάς Δημήτριος
Μέλλιος Νικόλαος

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:
Εισηγήτρια: Λασπίδου Χρυσή
Μέλη: Κάγκαλου Ιφιγένεια
Λουκάς Αθανάσιος

Βόλος, 2013

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα και τα ρεαλιστικά όρια αποκατάστασης ενός πολύ σημαντικού υδάτινου οικοσυστήματος της κεντρικής Ελλάδας, χαρακτηρισμένου ως Natura 2000, του λιμναίου οικοσυστήματος της Κάρλας. Βρίσκεται στα νότια της Θεσσαλικής πεδιάδας και ορίζεται από τις παρυφές του όρους Πηλίου και στα ανατολικά-βορειοανατολικά από το όρος Μαυροβούνι. Η λίμνη αποξηράνθηκε το 1962, με αποστράγγιση μέσω σήραγγας που διοχέτευσε το νερό στον Παγασητικό κόλπο. Τα τεράστια οικολογικά, κοινωνικά και οικονομικά προβλήματα που προέκυψαν οδήγησαν στην απόφαση να επαναδημιουργηθεί η λίμνη 40 χρόνια μετά.

Η νέα, μικρότερη λίμνη, σήμερα αντιμετωπίζει έντονα προβλήματα ποιοτικά και ποσοτικά. Η τροφική της κατάσταση χαρακτηρίζεται υπερευτροφική με τις αναμενόμενες αρνητικές συνέπειες στην βιοποικιλότητα. Αυτό οφείλεται, αφενός, στην μεγάλη είσοδο θρεπτικών από την παρακείμενη αγροτική περιοχή, αφετέρου στην υδατική ανεπάρκεια.

Η κακή κατάσταση της λίμνης, σε συνδυασμό με την επιταγή της ευρωπαϊκής οδηγίας- πλαίσιο (2000/60/ΕΚ) για καλή κατάσταση των υδάτινων σωμάτων, έως το 2015 επιβάλλουν την παρακολούθηση και ανάδειξη, άμεσα, διαχειριστικών μέτρων αποκατάστασης. Η προσομοίωση της Κάρλας αποτελεί σημαντικό εργαλείο κατανόησης, πρόβλεψης και διαχείρισης. Εν προκειμένω, χρησιμοποιείται το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης ρηχών λιμνών PCLake, που κρίνεται ιδανικό για την περίπτωση της Κάρλας και παρέχει πλήρη δυνατότητα παραμετροποίησης.

Η προσομοίωση γίνεται για το έτος 2012. Το μοντέλο βαθμονομείται με βάση τις ετήσιες χρονοσειρές του βάθους Secchi και της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α, για την ίδια χρονιά. Ακολουθεί επέκταση του μοντέλου σε βάθος πενταετίας και διερεύνηση της επίδρασης του χρόνου παραμονής, της εισροής θρεπτικών, των υγροτοπικών εκτάσεων και της κλιματικής αλλαγής, ενώ προσδιορίζεται η ελάχιστη απαραίτητη υδραυλική παροχή εισόδου. Τέλος εξετάζονται σε βάθος πενταετίας, 24 σενάρια διαχείρισης που αφορούν σε συνδυασμούς των μέτρων. Η διερεύνηση εστιάζει στην επίδραση των παραπάνω στα ψάρια, την βλάστηση, τη χλωροφύλλη-α, τα κυανοβακτήρια, τη θολερότητα, τη συγκέντρωση ιόντων, το ολικό kjeldahl άζωτο και την κατά Carlson τροφική κατάσταση. Οι επιδράσεις εξετάζονται για χαμηλό (1.5 m) και υψηλότερο (3.5 m) μέσο βάθος λίμνης. Κριτήριο ποιότητας και σύγκρισης αποτελεί η τροφική κατάσταση σε βαθμούς TSI (Trophic State Index), ενώ ως ρεαλιστικός στόχος προκύπτει η μείωση τους σε 70, που είναι το όριο υπερευτροφικής- ευτροφικής λίμνης.

Το βάθος λίμνης και η φόρτιση θρεπτικών, προκύπτουν ως καθοριστικοί παράγοντες για την τροφική κατάσταση της λίμνης, Ο χρόνος παραμονής, επίσης αναδεικνύεται ως ένας σημαντικός παράγοντας. Η κάλυψη με καλάμους αποτελεί υποβοηθητικό, αλλά κρίσιμο, διαχειριστικό μέτρο, ειδικά σε περιπτώσεις υψηλής φόρτισης θρεπτικών. Σε καμία περίπτωση, οι παραπάνω παράγοντες, δεν δύνανται να βελτιώσουν την τροφική κατάσταση της λίμνης μεμονωμένα. Ο κατάλληλος συνδυασμός τους μπορεί να επιφέρει την επιθυμητή αναβάθμιση της λίμνης, από υπερευτροφική σε ευτροφική. Η αύξηση της θερμοκρασίας, ως αποτέλεσμα κλιματικής αλλαγής, λειτουργεί ανασταλτικά προς τη βελτίωση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: λίμνη Κάρλα, μοντέλο PCLake, ευτροφισμός ρηχών λιμνών

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ABSTRACT

In this thesis, we analyze the extent and the realistic limits of the possible restoration of a very important wetland ecosystem in central Greece, designated as a Natura 2000 site, Lake Karla. It is located south of the Thessalian plain and borders the foothills of Mount Pelion and east - northeast of Mount Mavrovouni. The lake was drained in 1962 through a tunnel, transferring water into Pagassitikos bay. The enormous ecological, social and financial problems that occurred, led to the decision of lake restoration after 40 years.

The new, smaller lake faces now serious problems, both in terms of quality and quantity. Its trophic state is characterized as hyper-eutrophic with the expected negative effects on biodiversity. This is due to the large influx of nutrients from adjacent rural areas and due to low water levels, resulting in a serious deficit.

The poor state of the lake, combined with the requirement of the European Water Framework Directive (2000/60/EK) for good ecological status of water bodies till 2015, require monitoring and the immediate development of restoration management plans. The simulation of lake Karla is an important tool of understanding, prediction and management. In this case, we use the simulation software package for shallow lakes, PCLake, which is considered ideal for the case of lake Karla and provides a full set of parameters, modeling a wide range of ecological variables.

Simulations are performed for the year 2012. The model is calibrated based on the annual time series of chlorophyll-a concentration and Secchi depth, for the same year. Thereafter, an extension of the model follows in five years depth and an investigation of the effect of residence time, influx of nutrients, the reedy areas and climate change, whereas the minimum required hydraulic supply input is determined. Finally, we examine in five years time, 24 management scenarios involving combinations of measures. The investigation focuses on the effect of the aforementioned quantities on fish, vegetation, chlorophyll-a, cyanobacteria, turbidity, ion concentration, Total Kjeldahl Nitrogen by Carlson and nutrient status. These effects are examined for low (1.5 m) and higher (3.5 m) average depth of the lake. The trophic status in TSI (Trophic State Index) units is used as a quality and comparison criterion, whereas as a realistic target is the decrease of TSI to 70 units, which is the limit of hypertrophic to eutrophic turn of the lake.

The depth of the lake and the nutrient load, are used as determinants for the trophic state of the lake. The residence time is also a critical factor. The marsh areas are a supportive, but critical management measure, especially in cases of high nutrient loading. In any case, these factors can not improve the trophic status of the lake individually. The appropriate combination of them can bring about the desired improvement of the lake, from hypertrophic to eutrophic. The temperature increase, as a result of climate change, acts as a constraint to the improvement.

KEYWORDS: Karla lake, PCLake model, eutrophication of shallow lakes

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Ευχαριστούμε θερμά την κυρία Χ. Λασπίδου, επιβλέπουσα καθηγήτριά μας, για την πολύτιμη βοήθεια που μας παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και για την άριστη συνεργασία που είχαμε. Η συνεργασία μαζί της αφενός μας βοήθησε να έρθουμε σε επαφή με ένα τόσο ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα, αφετέρου μας έδωσε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε και να αφομοιώσουμε τον μεθοδικό τρόπο εργασίας της.

Ευχαριστούμε επίσης την κυρία Ι. Κάγκαλου και τον κύριο Α. Λουκά που δέχτηκαν να συναποτελέσουν μαζί με την κυρία Χ. Λασπίδου την τριμελή επιτροπή παρακολούθησης της διπλωματικής μας εργασίας.

Ευχαριστούμε θερμά τον κύριο J. Janse, για την ευγενική χορηγία του λογισμικού πακέτου PCLake καθώς και μεγάλο όγκο βιβλιογραφίας και συμπληρωματικών συμβουλών χειρισμού του μοντέλου. Η μελέτη της βιβλιογραφίας που μας παρείχε, μεγάλος όγκος της οποίας αποτελεί προσωπική του εργασία, λειτούργησε καταλυτικά στην κατανόηση των μηχανισμών και διεργασιών που διέπουν μία λίμνη, καθώς και των αρχών προσομοίωσής της.

Ευχαριστούμε το συντονιστή του ερευνητικού προγράμματος «Υδρομέντωρ», κύριο Α. Λουκά για την εμπιστοσύνη και τη συνεργασία. Η εμπειρία της συμμετοχής σε μία τέτοια προσπάθεια, είμαστε βέβαιοι ότι θα αποδειχθεί σημαντική για μας.

Ευχαριστούμε επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα Π. Σιδηρόπουλο για τις συμβουλές και διαλεύκανση γύρω από θέματα που αφορούν στη λίμνη Κάρλα.

Τέλος ευχαριστούμε τον υποψήφιο διδάκτορα Μ. Σπηλιωτόπουλο για την κατατόπιση γύρω από τη συλλογή δεδομένων που αφορούν στη λίμνη Κάρλα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1: Ιστορικη Αναδρομη / Κινητρα 1
1.2: Στοχοι 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΙΜΝΑΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ 4
2.1 Η εννοια του λιμναιου οικοσυστηματος 4
2.2 Καταταξη των λιμνων σε σχεση με την προελευση τους 6
2.3 Βασικες συνιστωσες του λιμναιου οικοσυστηματος 7
2.3.1 Μορφομετρία της λίμνης 7
2.3.2 Λεκάνη απορροής της λίμνης 7
2.3.3 Οι φυσικές παράμετροι σε ένα λιμναίο οικοσύστημα 10
2.3.4 Οι χημικές παράμετροι σε ένα λιμναίο οικοσύστημα 12
2.3.5 Κατανομή των βιολογικών παραμέτρων 21
2.4 Ρηχες λιμνες 26
2.5 Λιμνη Καρλα 28
2.5.1 Η ζωή στην Κάρλα πριν και μετά την αποξήρανση 29
2.5.2 Η Κάρλα σήμερα 31
2.5.3 Το σχέδιο της επαναδημιουργίας 32
2.5.4 Έργα διαμόρφωσης της λίμνης 35
2.5.5 Μορφολογία της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας 35
2.5.6 Το Βιοτικό περιβάλλον της λίμνης 36
2.5.7 Περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις 36
2.5.8 Εδαφολογικές Συνθήκες 36
2.5.9 Μετεωρολογικές Συνθήκες 37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PCLAKE 38
3.1 Εισαγωγη, αντικειμενο μελετης 38
3.2 Ευτροφισμος σε ρηχες λιμνες 38
3.3 Προσεγγιση μεσω του μοντελου 42
3.4 Συντομη περιγραφη του PCLake 44
3.4.1 Δομή 44
3.4.2 Διεργασίες 44
3.4.2.1 Αβιοτικές και μικροβιακές διεργασίες 44
3.4.2.2 Φυτοπλαγκτόν 47
3.4.2.3 Υδρόβια βλάστηση 48
3.4.2.4 Τροφική αλυσίδα 48
3.4.2.5 Υπορουτίνα των ελωδών περιοχών 49
3.4.3 Είσοδοι κι έξοδοι 50
3.5 Κρισιμο φορτιο σε ρηχες λιμνες 52
3.5.1 Απόκριση της προσομοίωσης σε βάθος χρόνου 52
3.5.2 Οι επιδράσεις της φόρτισης με θρεπτικά και των αρχικών συνθηκών σε μια μέση λίμνη 55
3.5.3 Κρίσιμο φορτίο για διαφορετικούς τύπους λιμνών 57
3.5.4 Εμπλεκόμενοι μηχανισμοί 60
3.5.5 Υποδείξεις διαχείρισης 61
3.5.6 Συμπεράσματα 63
3.5.6.1 Οικολογικοί μηχανισμοί 63
3.5.6.2 Σύγκριση με εμπειρικά στοιχεία: η επίδραση των χαρακτηριστικών των λιμνών 65
3.5.6.3 Σύγκριση με άλλα μοντέλα 66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PCLAKE ΣΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ 68
4.1 Δεδομενα εισοδου 68
4.1.1 Παράμετροι 69
4.1.1.1 Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία - μέση διάρκεια ημέρας 69

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.1.1.2 Θερμοκρασία μέσα στο νερό ... 70
4.1.1.3 Μέση ταχύτητα ανέμου ... 70
4.1.1.4 Ρυθμός υπόγειων διαφυγών ... 71
4.1.1.6 Παροχές εισόδου ... 72
4.1.1.7 Ανάπτυγμα ανέμου ... 73
4.1.1.8 Κάλυψη της λίμνης με καλάμους ... 73
4.1.1.9 Τύπος ιζήματος ... 73
4.1.1.10 Φόρτιση θρεπτικών ... 74
4.1.2 Αρχικές συνθήκες ... 74
4.2 Βαθμονομηση του μοντελου ... 75
4.2.1 Μέθοδος βαθμονόμησης ... 76
4.2.2 Αποτέλεσμα βαθμονόμησης ... 76
4.3 Βασικο σεναριο ... 79
4.3.1 Ετήσια πραγμάτωση για τα δεδομένα εισόδου του έτους 2012 ... 79
4.3.2 Ελάχιστη απαραίτητη παροχή εισόδου ... 87
4.3.3 Πενταετής πραγμάτωση για το βασικό σενάριο ... 88
4.4 Επεξεργασια εξοδων μοντελου ... 97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ..100
5.1 Τασεις φυσικων μεγεθων της λιμνης για την διαρκεια ενος τυπικου ετους για 12, 18, 26 και 32 mm/d και χαμηλη σταθμη λιμνης ... 102
5.2 Τασεις φυσικων μεγεθων της λιμνης για την διαρκεια ενος τυπικου ετους για 12, 18, 26 και 32 mm/d και μεση σταθμη λιμνης ... 111
5.3 Η επιδραση του χρονου παραμονης στα μεσα θερινα επιπεδα των φυσικων μεγεθων της λιμνης για χαμηλη σταθμη ... 120
5.4 Η επιδραση του χρονου παραμονης στα μεσα θερινα επιπεδα των φυσικων μεγεθων της λιμνης για μεση σταθμη ... 129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΏΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ.....138
6.1 Τασεις φυσικων μεγεθων της λιμνης για τη διαρκεια ενος τυπικου ετους για 4, 16, 8 και 12 gr N/M^2 και χαμηλη σταθμη λιμνης ... 138
6.2 Οι καμπυλες φυσικων μεγεθων της λιμνης για την διαρκεια ενος τυπικου ετους για 4, 6, 8 και 12 gr N/M^2 και μεση σταθμη λιμνης ... 147
6.3 Η επιδραση της φορτισης θρεπτικων στα μεσα θερινα επιπεδα των φυσικων μεγεθων της λιμνης για χαμηλη σταθμη ... 156
6.4 Η επιδραση της φορτισης θρεπτικων στα μεσα θερινα επιπεδα των φυσικων μεγεθων της λιμνης για μεση σταθμη ... 164
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΥΓΡΟΤΟΠΙΚΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ... 173
7.1 Τασεις φυσικων μεγεθων της λιμνης για την διαρκεια ενος τυπικου ετους για καλυψη με περιοχες καλαμων κατα 0, 10, 20 και 30% και χαμηλη σταθμη λιμνης ... 173
7.2 Οι καμπυλες φυσικων μεγεθων της λιμνης για την διαρκεια ενος τυπικου ετους για καλυψη κατα 0, 10, 20 και 30% και μεση σταθμη λιμνης ... 182
7.3 Η επιδραση της καλυψης των περιοχων με καλαμους στα μεσα θερινα επιπεδα των φυσικων μεγεθων της λιμνης για χαμηλα σταθμη ... 191
7.4 Η επιδραση της καλυψης των περιοχων με καλαμους στα μεσα θερινα επιπεδα των φυσικων μεγεθων της λιμνης για μεση σταθμη ... 200
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ..209
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΧΕΔΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ... 226
9.1 Σχεδια διαχειρισης A ... 228
9.2 Σχεδια διαχειρισης B ... 236
9.3 Σχεδια διαχειρισης C ... 244
9.4 Σχεδια διαχειρισης D ... 252

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.5 Σχεδια διαχειρισης Ε 260
9.6 Σχεδια διαχείρισης F..... 268
9.7 Μεση θερινη τροφικη καταστάση της λιμνης για τα διαχειριστικα σεναρια 276
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....277
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 280

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1: Ιστορική Αναδρομή / Κίνητρα

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που απασχολούν τις σύγχρονες κοινωνίες και τις τελευταίες δεκαετίες έχει περάσει στη σφαίρα της θεσμικής επίλυσης με την αρωγή της επιστημονικής γνώσης, είναι η προστασία της ποιότητας και ποσότητας των υδάτινων πόρων. Η ευρωπαϊκή οδηγία πλαίσιο 2000/60 απαιτεί άμεση εξασφάλιση καλής κατάστασης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Η πολιτική της ΕΕ για την προστασία της βιοποικιλότητας εκφράζεται κυρίως μέσα από τη δημιουργία του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου Natura 2000 (σε εφαρμογή των οδηγιών 92/43/ΕΟΚ και 79/409/ΕΟΚ).

Η λίμνη Κάρλα καθώς και η ευρύτερη περιοχή Μαυροβουνίου, Κεφαλόβρυσο Βελεστίνου και Νεοχώρι (GR1420004) αποτελούν χαρακτηρισμένη Natura 2000 περιοχή. Η οικολογική αξία της φαίνεται από πολλαπλά στοιχεία. Διαθέτουν ποικιλία γεωμορφολογικών σχηματισμών και τύπων οικοτόπων. Υπάρχουν εκτεταμένα και ικανοποιητικώς διατηρημένα δάση φυλλοβόλων πλατύφυλλων ειδών, καθώς και μεγάλη ποικιλία πουλιών. Ο ταμιευτήρας στην περιοχή της λίμνης Κάρλας συγκεντρώνουν μεγάλο αριθμό μεταναστευτικών και διαχειμαζόντων πουλιών, υδρόβιων, παρυδάτιων και αρπακτικών. Οι περιοχές διαθέτουν, επίσης, σημαντική ποικιλότητα ερπετών, αμφιβίων, θηλαστικών και ψαριών, τα περισσότερα από τα οποία προστατεύονται σε εθνικό και διεθνές επίπεδο και είναι "είδη κοινοτικού ενδιαφέροντος".

Η λίμνη Κάρλα υπήρξε η σημαντικότερη λίμνη της Θεσσαλίας και μία από τις μεγαλύτερες λίμνες στην Ελλάδα. Η Κάρλα αποτέλεσε πόλο ζωής και πολιτιστικής ανάπτυξης, καθώς μεγάλο μέρος του πληθυσμού των παρακάρλιων χωριών είχε ως κύρια απασχόληση για πάρα πολλά χρόνια την αλιεία, ενώ πολλοί ασχολούνταν με το εμπόριο και την κατασκευή βαρκών. Η έκταση που καταλάμβανε η λίμνη δεν ήταν σταθερή αλλά μεταβαλλόταν ανάλογα με τις εισροές και εκροές νερού. Στις αρχές της δεκαετίας του ΄20, οι πλημμύρες του Πηνειού και η αύξηση της έκτασης της λίμνης προκαλούσαν σοβαρά προβλήματα σε πολλά χωριά. Η κατασκευή αντιπλημμυρικών αναχωμάτων στο δεξιό ανάχωμα του Πηνειού περιόρισε την υπερχείλισή του. Τα μέτρα αυτά δεν έφεραν τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς μετά το 1950, η στάθμη της Κάρλας άρχισε να πέφτει αισθητά και επικίνδυνα, με συνέπεια να υπάρξουν αρνητικές επιπτώσεις για την περιοχή. Ειδικότερα, η αισθητή μείωση της στάθμης των νερών, η μείωση των αλιευμάτων, το ανεξέλεγκτο της αβαθούς λίμνης, το υφάλμυρο των νερών, καθώς και το πρόβλημα της ελονοσίας λόγω των κουνουπιών που μάστιζαν την περιοχή, οδήγησαν την Πολιτεία στην απόφαση για ολική αποστράγγιση της λίμνης. Έτσι, στα μέσα της δεκαετίας του ΄60, ολοκληρώθηκε η αποστράγγιση της λίμνης Κάρλας, με τους κατοίκους της περιοχής να πιστεύουν ότι η ενέργεια αυτή θα δημιουργήσει εύφορες εκτάσεις προς καλλιέργεια. Η αποστράγγιση, ωστόσο, ολοκληρώθηκε χωρίς την κατασκευή του ταμιευτήρα που προβλεπόταν από τη μελέτη. Μέσα σε λίγα χρόνια διαπιστώθηκε ότι οι επιπτώσεις στο οικοσύστημα της περιοχής ήταν μεγαλύτερες από το όφελος που προσέφερε η αποξήρανσή της, καθώς δημιουργήθηκαν έντονα προβλήματα, όπως ραγδαία πτώση της υπόγειας υδροφορίας, εισχώρηση του θαλάσσιου μετώπου στον ευρύτερο χώρο της περιοχής της Κάρλας, ρύπανση στον Παγασητικό κόλπο και εμφάνιση φυτοπλαγκτού, εμφάνιση ρηγμάτων μεγάλου βάθους ακόμα και μέσα σε χωριά, επιπτώσεις στην πανίδα και στην χλωρίδα της περιοχής, αλλαγές στο μικροκλίμα της περιοχής, αδυναμία υδροδότησης πόλεων και οικισμών κ.α.

Τα παραπάνω προβλήματα οδήγησαν στην απόφαση για αναδημιουργία της λίμνης. Κύριοι στόχοι του έργου είναι η αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας στην ευρύτερη περιοχή και η αναδιάταξη του τρόπου διαχείρισης των υδατικών πόρων της, ενώ δευτερεύοντες στόχοι του έργου αποτελούν η δημιουργία συνθηκών βιώσιμης ανάπτυξης, η δημιουργία ενός πρότυπου χώρου για την ανάδειξη της δυνατότητας αρμονικής ανάπτυξης ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε ισορροπία με το φυσικό περιβάλλον, καθώς και η ανάδειξη της ιστορικής σημασίας της περιοχής και της σχέσης των παλαιότερων οικισμών με τη λίμνη. (Kagalou, 2010; Loukas, 2010; Sidiropoulos, et al., 2012)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

1.2: Στόχοι

Στην παρούσα εργασία γίνεται μαθηματική μοντελοποίηση της λίμνης Κάρλας. Η μοντελοποίηση γίνεται με χρήση του λογισμικού πακέτου PCLake. Γίνεται επίσης πρόβλεψη της επίδρασης διαχειριστικών παραμέτρων στα σημαντικά βιοχημικά, χημικά, βιολογικά και υδρολογικά μεγέθη της λίμνης. Προσανατολισμός της παραπάνω διερεύνησης είναι η βελτίωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης.

Αρχικός στόχος μιας τέτοια εργασίας είναι η εις βάθος κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την υδρολογία και οικολογία του υδάτινου συστήματος. Οι μηχανισμοί αυτοί αποσαφηνίζονται μέσω της εκτεταμένης διερεύνησης των επιδράσεων, πολλών παραμέτρων. Οι παράμετροι αφορούν στην υδρολογία (χρόνος παραμονής, παροχές εισόδου και εξόδου, στάθμη νερού), στην βιολογία (ψάρια. βλάστηση, κάλαμοι, κυανοβακτήρια), στη χημεία (φορτίσεις θρεπτικών, χημικές διεργασίες, κύκλοι ζωής άνθρακα, φωσφόρου, αζώτου) και σε άλλες φυσικές παραμέτρους όπως η κλιματική αλλαγή. (Horne, 1994)

Σε δεύτερο επίπεδο, η κατανόηση των παραπάνω μηχανισμών, πρέπει να μεταφραστεί σε κατώτατα κι ανώτατα όρια και ποσοτικοποίηση των επιδράσεων. Αυτό αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή σε πρακτικό επίπεδο πλέον της συσσωρευμένης γνώσης. Παραδείγματα, αποτελούν η ελάχιστη στάθμη λίμνης, η ελάχιστη υδραυλική παροχή, η μέγιστη φόρτιση θρεπτικών. Ως απόρροια των παραπάνω προκύπτουν δευτερογενή όρια όπως η μέγιστη άντληση για άρδευση, η μέγιστη χρήση λιπασμάτων και η επιλογή των καλλιεργειών.

Απώτερος στόχος είναι μέσω της κατάρτισης που προκύπτει από τη μελέτη συμπεριφοράς του συστήματος και τον προσδιορισμό των ορίων, η άμεση εφαρμογή, αναπτυξιακών πολιτικών με σαφή κατεύθυνση που θα προστατεύει την λίμνη και το οικοσύστημα, με σεβασμό στις κοινωνικές και οικονομικές ανάγκες.

Η συγκεκριμένη εργασία, συνάδει με τον παραπάνω προσανατολισμό, όπως οφείλει. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα επιμέρους στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία εισαγωγή στην έννοια των λιμναίων οικοσυστημάτων και των κύριων χαρακτηριστικών τους, ακολουθεί επιμερισμός στις ρηχές λίμνες και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν και τέλος γίνεται περιγραφή του λιμναίου οικοσυστήματος της Κάρλας.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης PCLake. Συγχρόνως με την περιγραφή των λειτουργιών του μοντέλου γίνεται και περιγραφή των αντίστοιχων φυσικών διεργασιών της λίμνης. Γίνεται εισαγωγή στο φυσικό φαινόμενο του ευτροφισμού των λιμνών, και ιδιαίτερα των ρηχών. Ακολουθεί καταγραφή και ανάλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιεί το μοντέλο για να μεταφραστούν οι φυσικές διεργασίες. Ακολουθεί ανάλυση της έννοιας του κρίσιμου φορτίου καθώς και των βρόγχων υστέρησης. Τέλος υποδεικνύονται διαχειριστικά μέτρα αποκατάστασης λιμνών.

Στο κεφάλαιο 4 υπολογίζονται και καταγράφονται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, καθώς και οι παραδοχές που γίνονται, συλλέγονται οι χρονοσειρές εισόδου και οι αρχικές συνθήκες. Ακολουθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τα δεδομένα πεδίου για το 2012, αφού γίνει μία περιγραφή της μεθόδου βαθμονόμησης. Ακολούθως, γίνεται περιγραφή της προσομοίωσης για το έτος 2012 που στα κεφάλαια που ακολουθούν χρησιμοποιείται ως βασικό σενάριο αναφοράς. Εκτιμάται η ελάχιστη απαραίτητη υδραυλική παροχή εισόδου και γίνεται πενταετής πρόβλεψη βάση αυτής της παροχής.

Στα κεφάλαια 5, 6, 7 και 8 γίνεται διερεύνηση της επίδρασης του χρόνου παραμονής, της φόρτισης θρεπτικών, των περιοχών κάλυψης με καλάμους και της κλιματικής αλλαγής σε βασικά μεγέθη της λίμνης που συνδέονται με την τροφική κατάστασή της. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι τάσεις των μικρών, μεγάλων και αρπακτικών ψαριών, του διαλυμένου οξυγόνου (D.O.), της βυθισμένης βλάστησης, του βάθους Secchi, της χλωροφύλλης-α, των κυανοβακτηρίων, των διατόμων, των φωσφορικών, νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων καθώς και του ολικού Kjeldahl αζώτου (TKN). Παρουσιάζεται η επίδραση και στην τροφική κατάσταση της λίμνης εκφρασμένης σε βαθμούς TSI σύμφωνα με τον Carlson. Ειδική αναφορά γίνεται, πέρα από τις ετήσιες διακυμάνσεις των μεγεθών, στα μέσα θερινά επίπεδά τους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Στο κεφάλαιο 9 προτείνονται και προσομοιώνονται σχέδια διαχείρισης που βασίζονται στα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων. Εξετάζεται και συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα των σχεδίων διαχείρισης και αναδεικνύονται τα προτιμότερα.

Ακολουθούν στο 10ο και τελευταίο κεφάλαιο τα συμπεράσματα σε συνοπτική μορφή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΙΜΝΑΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ

2.1 Η έννοια του λιμναίου οικοσυστήματος

Ως λίμνη ορίζεται η μικρή ή μεγάλη υδάτινη μάζα με γλυκό, υφάλμυρο ή και αλμυρό νερό, που βρίσκεται συνήθως σε μία κλειστή γεωλογική λεκάνη στην επιφάνεια της γης, χωρίς να έχει άμεση επικοινωνία με τη θάλασσα. Η ελεύθερη επιφάνεια των λιμνών δεν παρουσιάζει μια μέση σταθερή στάθμη, γιατί εξαρτάται από την έκταση και τη χωρητικότητα της λίμνης, από τις παροχές των ποταμών και των πηγών και κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες.

Η λίμνη βέβαια δεν είναι μόνο μια συλλογή νερού, αλλά ένα οικοσύστημα, μια κοινότητα με αλληλεπιδράσεις μεταξύ ζώων, φυτών, μικροοργανισμών και του φυσικού και χημικού περιβάλλοντος στο οποίο ζουν. Η ποικιλία και η ετερογένεια αποτελούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λιμναίων οικοσυστημάτων. Οι λίμνες διαφέρουν μεταξύ τους λόγω φυσικών αιτίων, όπως είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία ή η κίνηση των νερών, διαφέρουν λόγω χημικών αιτίων (διαφοροποίηση στα θρεπτικά συστατικά, τα κυρίαρχα ιόντα, τους ρυπαντές), διαφέρουν ακόμη λόγω βιολογικών αιτίων, όπως η βιομάζα, οι αριθμοί πληθυσμών, οι ρυθμοί ανάπτυξης. (Πολυεταιρική Σχολική Σύμπραξη, 1999)

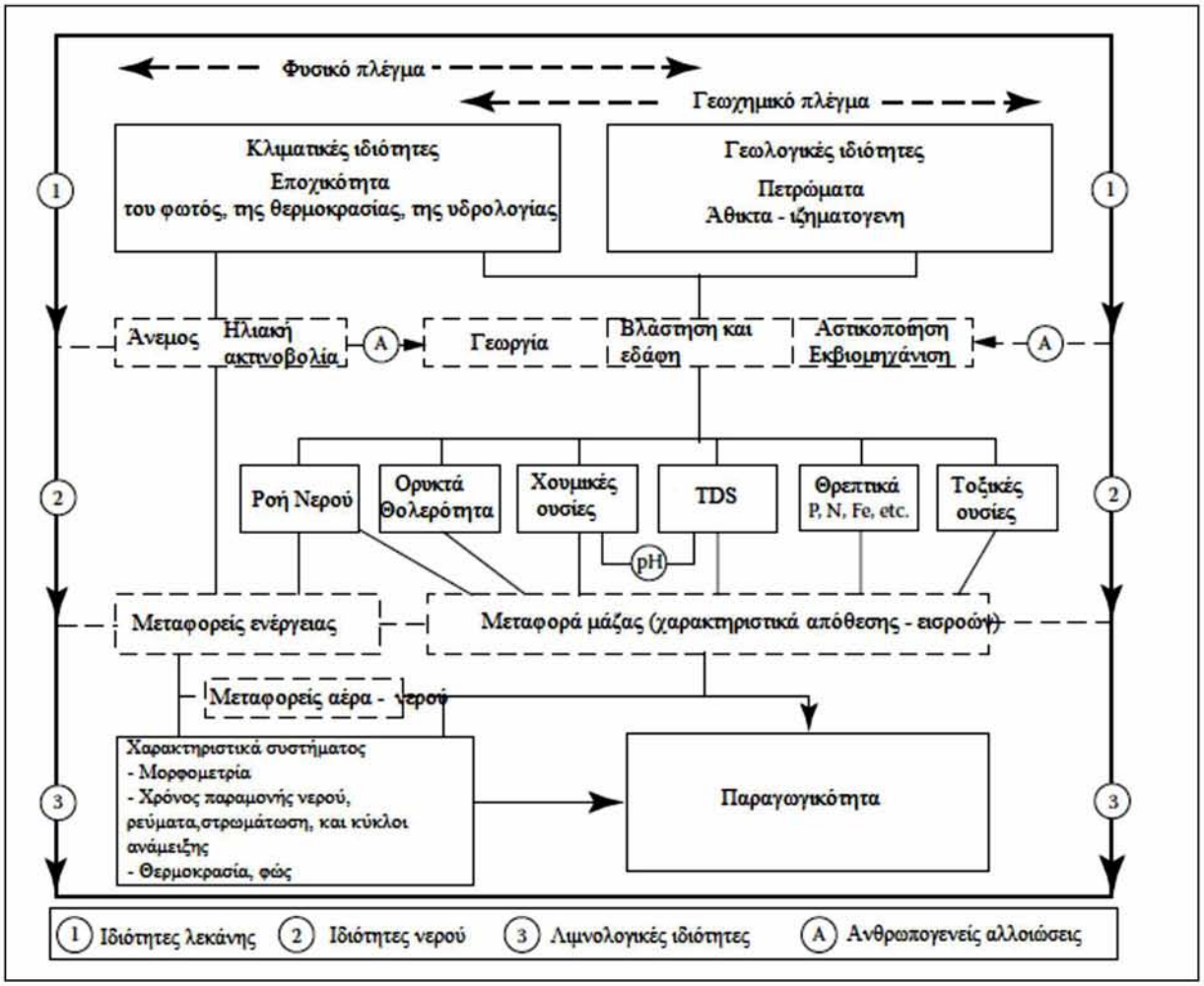
Στον Ελλαδικό χώρο, οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι καλύπτουν συνολική επιφάνεια γύρω στα 2200 Km2, εκ των οποίων οι φυσικές και οι τεχνητές λίμνες καλύπτουν έκταση περίπου 956 Km2, δηλαδή το 43,4% των επιφανειακών υδατικών πόρων σε απόθεμα γλυκού νερού (Ζαλίδης & Μαντζαβέλας 1994). Το γλυκό νερό αποτελεί βασική προαπαίτηση επιβίωσης για κάθε μορφή ζωής και ο άνθρωπος συχνά βασίζεται στις λίμνες για ένα ευρύ φάσμα «αγαθών και υπηρεσιών», όπως το πόσιμο νερό, την απομάκρυνση των αποβλήτων, την αλιεία, τη γεωργική άρδευση, τη βιομηχανική δραστηριότητα και την αναψυχή καθιστώντας τις λίμνες ως σημαντικά οικοσυστήματα (Hairston & Fussmann 2002).

Το 2000 στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ψηφίστηκε η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα, στην οποία γίνεται διαχωρισμός μεταξύ φυσικών και τεχνητών λιμνών. Στο Άρθρο 2, η Οδηγία Πλαίσιο, ορίζει ως λίμνη ένα σύστημα στάσιμων εσωτερικών επιφανειακών υδάτων και ως τεχνητή λίμνη (ταμιευτήρα) ένα σύστημα επιφανειακών υδάτων που δημιουργείται με δραστηριότητα του ανθρώπου. Οι ταμιευτήρες ωστόσο θεωρούνται συχνά υβρίδια των λιμνών και των ποταμών ως προς τη μορφολογία, την υδρολογία, τα φορτία συσσώρευσης θρεπτικών και την κυκλοφορία, καθώς και τις πηγές οργανικής ύλης (Kimmel et al., 1990; Søballe et al., 1992). Τα ανθρωπογενή αυτά οικοσυστήματα δημιουργούνται για ειδικούς σκοπούς διαχείρισης του ύδατος όπως η αποθήκευση νερού, ο έλεγχος της πλημμύρας, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η αναψυχή (Wetzel, 2001).

Μία λίμνη ή ένας ταμιευτήρας είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με μια λεκάνη απορροής, ένα βιογεωφυσικό σύνορο, δηλαδή ένα σύστημα αποστράγγισης που συνδέει αυτά τα φυσικά και τεχνητά υδάτινα συστήματα (Jeppesen et al., 2011). Η λεκάνη απορροής, ως εκ τούτου, ελέγχει αρκετούς μηχανισμούς λειτουργίας των λιμνών και των ταμιευτήρων. Ανεκμετάλλευτες λεκάνες απορροής που δεν υπόκεινται σε εκτενείς ανθρωπογενείς δραστηριότητες, συμβάλλουν με χαμηλές εισροές θρεπτικών ουσιών, αιωρούμενων υλικών ή τοξικών ουσιών σε λίμνες και ταμιευτήρες. Αντίθετα, υποβαθμισμένες λεκάνες απορροής έχουν μεγάλη επίδραση στη λειτουργία των φυσικών ή τεχνητών οικοσυστημάτων που συνδέονται με αυτούς. Κατά συνέπεια, κάθε λίμνη ή δεξαμενή σε μια λεκάνη απορροής εξαρτάται από ένα πλέγμα γεωλογικών, υδρογεωχημικών, φυσικών κλιματολογικών χαρακτηριστικών (Εικόνα 2.1) και ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επιβάλλονται πάνω σε αυτά τα υδάτινα συστήματα (Jorgensen et al., 2012).

Η βιολογική αξία κάθε λεκάνης απορροής εξαρτάται από τη μοναδικότητα της βιοποικιλότητας, τη γενετική ποικιλότητα, τη χωρική ετερογένεια της, και την οικολογική πολυπλοκότητα που φιλοξενεί (Jorgensen et al., 2012).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 2.1: Πλέγμα αλληλεπιδράσεων μεταξύ φυσικών χαρακτηριστικών που καθορίζουν την παραγωγικότητα μιας λίμνης ή ταμιευτήρα. (Vollenweider, 1987)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

2.2 Κατάταξη των λιμνών σε σχέση με την προέλευσή τους

Μία σημαντική κατηγορία λιμνών αποτελούν οι λίμνες **τεκτονικής προέλευσης**. Οι λίμνες αυτές οφείλουν την δημιουργία τους σε μετακινήσεις και διαρρήξεις του στερεού φλοιού της γης. τα αίτιά τους δηλαδή είναι τεκτονικά. Οι περισσότερες από αυτές προέκυψαν από κάποιο ρήγμα (μοναδικό) ή από πολλαπλά γειτονικά ρήγματα. Η λεκάνη των λιμνών αυτών σχηματίστηκε από κάποια καταβύθιση του εδάφους, λόγω της δράσης ενός ρήγματος ή από βύθισμα μιας ευρύτερης περιοχής που βρίσκεται μεταξύ δύο γειτονικών ρηγμάτων. Οι μεγαλύτερες και βαθύτερες λίμνες, όπως η Βαϊκάλη στη Σιβηρία, οι μεγάλες λίμνες της Ανατολικής Αφρικής, όπως οι λίμνες Μαλάουι, Τανγκανίκα, Έντουαρτ, Αλβέρτου και Τουρκάνα ακόμη και η Ερυθρά θάλασσα, έχουν τεκτονική προέλευση και σχηματίστηκαν κατά μήκος του μεγάλου ρήγματος κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου πριν από 1 έως 10 εκατομμύρια χρόνια. Ένας δεύτερος βασικός τύπος τεκτονικών λιμνών προέκυψε από την ανύψωση τμημάτων του θαλάσσιου βυθού. Έτσι σχηματίστηκαν οι ρηχές λίμνες της Φλώριδας, η Κασπία θάλασσα και η Αράλη, ενώ ένας τρίτος τύπος τεκτονικών λιμνών είναι αυτές όπου η κλίση, η ανύψωση ή η βύθιση του φλοιού της γης αντέστρεψαν το υπάρχον αποστραγγιστικό σύστημα της περιοχής. Η Μεγάλη λίμνη Βικτόρια, η Άφρικα, η λίμνη Τιτικάκα ψηλά στις Άνδεις είναι παραδείγματα λιμνών που σχηματίστηκαν από την ανύψωση των γύρω περιοχών τους.

Όσον αφορά στις λίμνες **ηφαιστειακής προέλευσης**, οι πλέον γνωστές είναι αυτές που καταλαμβάνουν τους κρατήρες των σβησμένων ηφαιστείων όπως οι λίμνες Crater Lake, Oregon με διάμετρο 10 χιλ. και βάθος 600 μέτρων, η Crater Butte Lake, California και η ρηχή λίμνη Mahega στην Ουγκάντα με αλκαλικά νερά και διαφάνεια μερικών εκατοστών. Στις ηφαιστειακές λίμνες συμπεριλαμβάνονται και αυτές που σχηματίστηκαν όταν η λάβα έφραξε την έξοδο ενός ποταμού η μιας κοιλάδας, όπως συνέβη σε πολλές λίμνες της Ιαπωνίας.

Λίμνες παγετικής προέλευσης. Οι περισσότερες λεκάνες των λιμνών του πλανήτη μας σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του Πλειστόκαινου (τεταρτογενές), όταν οι παγετώνες κάλυπταν μεγάλο τμήμα της γης. Η περίοδος αυτή δημιούργησε τις προϋποθέσεις για τη δημιουργία των λιμνών παγετικής προέλευσης που είναι συνήθως επιμήκεις και ο αρχικός τους σχηματισμός οφείλεται στη διέλευση των παγετώνων κατά μήκος της παλαιάς ποτάμιας κοιλάδας, η οποία υποσκάπτεται και διευρύνεται, ενώ το κατώτερο τμήμα της φράσσεται κατά κύριο λόγο από φερτά υλικά που μεταφέρουν και πετρώματα που συναντούν (Μορένες). Ο σχηματισμός των φιόρδ με τα μεγάλα βάθη και τις απότομες ακτές, είναι επίσης παγετικής προέλευσης. Οι λεκάνες αυτές καλύφθηκαν με νερά όταν έλιωσαν και υποχώρησαν οι πάγοι και έτσι σχηματίστηκαν οι μεγάλες λίμνες της Β. Αμερικής αλλά και της Β. Ευρώπης.

Άλλη μια κατηγορία λιμνών αποτελούν οι **καρστικές λίμνες**, τις οποίες συναντούμε συνήθως σε ασβεστολιθικές περιοχές όπου παρατηρούνται καρστικά φαινόμενα (διάσπαρτα έγκοιλα, όπως κοιλότητες, οπές, βάραθρα, που προέρχονται από τη διάβρωση των ασβεστόλιθων). Η δημιουργία τους οφείλεται στη διάλυση των ασβεστολιθικών ή δολομιτικών πετρωμάτων από υπόγεια ή επιφανειακά τρεχούμενα νερά, τα οποία στη συνέχεια τροφοδοτούν τις λίμνες αυτές. Κλασσικές περιπτώσεις καρστικών λιμνών στη χώρα μας που καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από ασβεστόλιθους είναι η λίμνη Κάρλα, των Πρεσπών, της Βεγορίτιδας, της Καστοριάς, των Ιωαννίνων και η αποξηρανθήσα λίμνη της Κωπαΐδας.

Τέλος υπάρχουν και οι **παράκτιες λίμνες**, ο σχηματισμός των οποίων οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ενέργεια των θαλάσσιων ρευμάτων που επικρατούν και δρουν πολύ κοντά στις ακτές με αποτέλεσμα να παρασύρουν την άμμο, να την αποθέτουν στην εκβολή του νερού και να δημιουργούν το αποφρακτικό ανάχωμα. Όταν ο αποκλεισμός της θάλασσας είναι τέλειος, τότε σχηματίζεται παράκτια λίμνη, όπως η λίμνη της Αγουλινίτσας, όταν όμως δεν είναι τέλειος και επιτρέπει την επικοινωνία της λίμνης με τη θάλασσα, τότε σχηματίζεται λιμνοθάλασσα όπως του Μεσολογγίου, του Πόρτο Λάγος της Ξάνθης κ.τ.λ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

2.3 Βασικές συνιστώσες του λιμναίου οικοσυστήματος

Η δομή κάθε λιμναίου οικοσυστήματος προσδιορίζεται από ορισμένες βασικές παραμέτρους οι οποίες είναι:

- Η μορφομετρία ή γεωμορφολογία της λίμνης
- Η λεκάνη απορροής της λίμνης
- Η κατανομή των φυσικών και χημικών παραμέτρων στη λίμνη
- Η κατανομή των βιολογικών παραμέτρων στη λίμνη

2.3.1 Μορφομετρία της λίμνης

Πολλά λιμνολογικά φαινόμενα, όπως η κατανομή των βιοκοινωνιών και η παραγωγικότητα σχετίζονται άμεσα με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης. Ακόμη και το σχήμα μιας λίμνης μπορεί να καθορίσει την παραγωγικότητά της. Για παράδειγμα, οι ρηχές λίμνες με αναλογικά μεγαλύτερο ποσοστό νερού σε επαφή με το ίζημα, είναι πιο παραγωγικές από τις λίμνες που είναι βαθιές και που έχουν απότομες ακτές. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά μιας λίμνης μπορούν να περιγραφούν και να υπολογιστούν από ένα λεπτομερή βυθομετρικό χάρτη. Εξαρτώνται από το σχήμα της και την γεωλογική της προέλευση και είναι οι παράμετροι που αναφέρονται πιο κάτω:

- Η έκταση, είναι το εμβαδόν της επιφάνειας μιας λίμνης
- Το μέγιστο βάθος και το μέσο βάθος της λίμνης
- Το μήκος και το πλάτος της
- Ο όγκος του νερού της
- Το μήκος της ακτογραμμής και η ανάπτυξη της ακτογραμμής

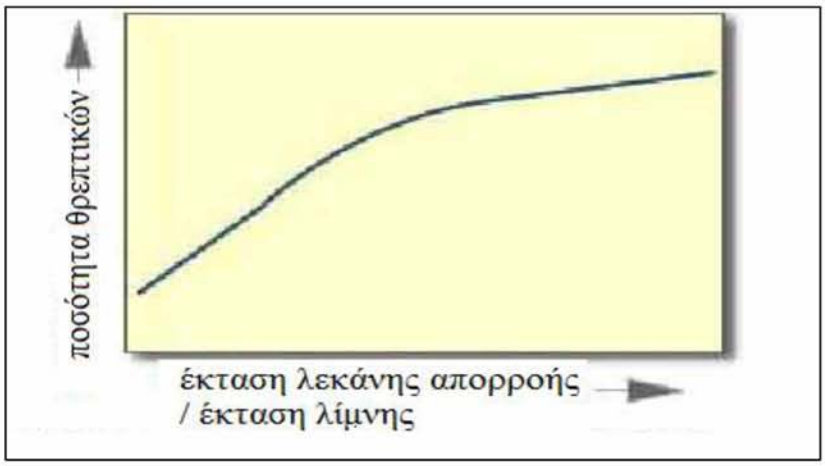
Το μέγιστο βάθος μετριέται με ειδικά όργανα, τα βυθόμετρα και βέβαια μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας της εναπόθεσης ιζημάτων ή της διάβρωσης. Σαν μέγιστο μήκος μιας λίμνης ορίζεται η απόσταση των δυο πιο απομακρυσμένων σημείων της, ενώ μέγιστο πλάτος είναι η απόσταση των πιο απομακρυσμένων σημείων της ακτής (χωρίς να παρεμβάλλεται στεριά), που είναι όμως κάθετη προς τον άξονα του μέγιστου μήκους. Αντίστοιχα μέσο πλάτος είναι ο λόγος της επιφάνειας της λίμνης προς το μέγιστο μήκος της. Ο όγκος του νερού μιας λίμνης μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση των ισοβαθών καμπυλών, αθροίζοντας τον όγκο που περιέχεται μεταξύ των διαφόρων επιφανειών (στρωμάτων) όλων των ισοβαθών. Το μήκος, η επιφάνεια και ο όγκος μιας λίμνης υπολογίζονται με τους υδρογραφικούς χάρτες. Το μέσο βάθος μιας λίμνης υπολογίζεται από τον λόγο του όγκου του νερού προς την επιφάνεια του. (Κάγκαλου, 1997; Κουσουρής, 1998)

2.3.2 Λεκάνη απορροής της λίμνης

Ονομάζεται η χερσαία έκταση που περιβάλλει τη λίμνη και από την οποία συγκεντρώνεται όλη η επιφανειακή απορροή που υδροδοτεί τη λίμνη. Οριοθετείται συνήθως από την κορυφογραμμή (υδροκρίτη) της περιβάλλουσας ορεινής έκτασης και περιέχει τα εδάφη που η κλίση τους επιτρέπει το νερό των κατακρημνισμάτων να διοχετεύεται στη λίμνη μέσω ποταμών, χειμάρρων ή ρεμάτων. Η λίμνη αποτελεί αντανάκλαση της λεκάνη απορροής. Η γεωλογική της σύσταση, το μέγεθός της, η κλίση του εδάφους της, το κλίμα και η χρήση της επηρεάζουν το είδος και την ποσότητα των χημικών στοιχείων που αιωρούνται ή είναι διαλυμένα στο νερό αλλά και που υπάρχουν στο ίζημα της λίμνης. Για παράδειγμα, οι γρανιτικές λεκάνες σε περιοχές του Καναδά, της Σκανδιναβίας και της Σκωτίας, είναι άγονες, κάτι το οποίο γνωρίζουν καλά οι αγρότες των περιοχών αυτών και έχει άμεση επίδραση και στις γειτονικές λίμνες. (ΚΠΕ Καστοριάς, 2000)

Αντίθετα, λίμνες αρκετά νότια, σε περιοχές με παγετώδεις προσχώσεις και ιζηματογενή πετρώματα, είναι παραγωγικές σε άλγη και σε ψάρια. Εξάλλου το μέγεθος της λεκάνης απορροής σε συσχέτιση με την επιφάνεια της λίμνης είναι σημαντικός παράγοντας με αποτέλεσμα οι μεγάλες λεκάνες απορροής να συνδέονται με αυξημένες ποσότητες φερτών υλών σε αντίθεση με τις μικρές (Διάγραμμα 2.1).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 2.1: Στο διάγραμμα φαίνεται η αύξηση της ποσότητας των θρεπτικών με την αύξηση της έκτασης της λεκάνης απορροής σε σχέση με την έκταση της λίμνης. ("Understanding Lake Ecology" - Lake Ecology Overview - Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς)

Οι υδρογεωλογικές και μετεωρολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής είναι πολύ σημαντικές για κάθε υδάτινο οικοσύστημα, άρα και για κάθε λίμνη. Έτσι λεκάνες απορροής με πετρώματα σχιστολιθικά, ψαμμιτικά, κροκαλοπαγή που θεωρούνται αδιαπέραστοι σχηματισμοί, έχουν μεγάλο συντελεστή επιφανειακής απορροής (>35% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων) και μικρή κατείσδυση (3-7% της ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης). Αντίθετα τα ανθρακικά πετρώματα με διαρρήξεις και "κάρστ" παρουσιάζουν μικρή επιφανειακή απορροή (0-7%), ενώ η κατείσδυσή τους είναι μεγάλη (>50% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων). Προσχώσεις, τεταρτογενείς και σχηματισμοί νεότερης ηλικίας έχουν ποικίλο συντελεστή επιφανειακής απορροής.

Η χρήση της γης έχει επίσης σημαντική επίδραση στην ποιότητα και στην ποσότητα του νερού που εισέρχεται στις λίμνες. Έτσι, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.2, το υδάτινο φορτίο που εκφορτίζεται σε μια λίμνη διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη χρήση της γης. Σε αστικές περιοχές η μεγάλη συμμετοχή των αδιάβροχων επιφανειών, π.χ. δρόμοι, σπίτια στη διαμόρφωση του εδάφους, έχει σαν συνέπεια την ελάχιστη απορρόφηση του νερού μιας καταιγίδας και τη δημιουργία αυξημένης επιφανειακής απορροής, που με τη σειρά της δημιουργεί σημαντική διάβρωση στις όχθες των ρεμάτων και μεταφορά μεγάλων τμημάτων εδάφους.



Διάγραμμα 2.2: Οι επιφανειακές απορροές των αστικών περιοχών είναι πολύ μεγαλύτερες σε όγκο από τις αντίστοιχες των δασικών και εμφανίζονται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, σε αντίθεση με τις δασικές εκτάσεις όπου η απορροή συμβαίνει με βραδύτερους ρυθμούς. ("Understanding Lake Ecology" - Lake Ecology Overview - Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Το κλίμα επίσης επηρεάζει την ιζηματογένεση και τη μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων. Στα εύκρατα κλίματα οι βροχοπτώσεις διατηρούν μια κανονική περίπου κατανομή στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους και οι καταρρακτώδεις βροχές είναι σπάνιες. Αυτό έχει σαν συνέπεια να δημιουργείται μια διαρκής φυτική κάλυψη σε δάση και ανοικτές εκτάσεις, οπότε η φυσική διάβρωση του εδάφους είναι περιορισμένη. Αντίθετα, σε ημιάνυδρα κλίματα παρατηρούνται λίγες και έντονες καταιγίδες που σε συνδυασμό με την εποχιακή φυτοκάλυψη, έχουν σαν αποτέλεσμα η διάβρωση του εδάφους να είναι εκτεταμένη και οι φερτές ύλες να μεταφέρονται ευκολότερα από τη λεκάνη στη λίμνη. Παράμετροι λοιπόν όπως ο όγκος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στη συνολική λεκάνη της λίμνης, ο όγκος των επιφανειακών απορροών της λεκάνης και των υπόγειων εισροών, ο όγκος του νερού που εξατμίζεται από την επιφάνεια της λίμνης, ο όγκος του νερού που απάγεται από τη λίμνη, η σχετική υγρασία του εδάφους και η εξατμισοδιαπνοή της εδαφικής λεκάνης είναι καθοριστικοί για το υδρολογικό καθεστώς της λίμνης, όπως καθοριστικός παράγοντας είναι και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού της λίμνης. Υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ξαναγεμίσει μια άδεια λίμνη, μέσω της φυσικής ροής των νερών που την τροφοδοτεί. Αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη μελέτη της ρύπανσης αλλά και για υπολογισμούς που αφορούν τη δυναμική των θρεπτικών στοιχείων. Σχετίζεται άμεσα με την παροχή των εισροών της λίμνης και τη μορφολογία της λεκάνης της και υπολογίζεται με την διαίρεση του όγκου της με την παροχή των εισροών και εκροών. (Loukas et al, 2007)

Τα θρεπτικά συστατικά, όπως ο φώσφορος ή ο σίδηρος, μεταφέρονται σαν άλατα ενσωματωμένα σε τμήματα εδάφους, οπότε μετακινούνται πιο εύκολα σε ημιάνυδρα κλίματα. Αντίθετα το άζωτο, το πυρίτιο ή το θείο είναι συνήθως παρόντα σε χημικές ενώσεις διαλυτές στο νερό, οπότε μεταφέρονται εξίσου εύκολα σε καθαρά ή λασπώδη νερά. Η κύρια πηγή του αζώτου σε όλες τις λεκάνες απορροής είναι οι βροχές, ενώ για το φώσφορο είναι η διάβρωση του εδάφους. Επόμενο λοιπόν είναι ότι οι λίμνες σε ημιάνυδρα κλίματα τείνουν να έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις φωσφορικών και χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, ενώ σε λίμνες των εύκρατων κλιμάτων συμβαίνει το αντίθετο.

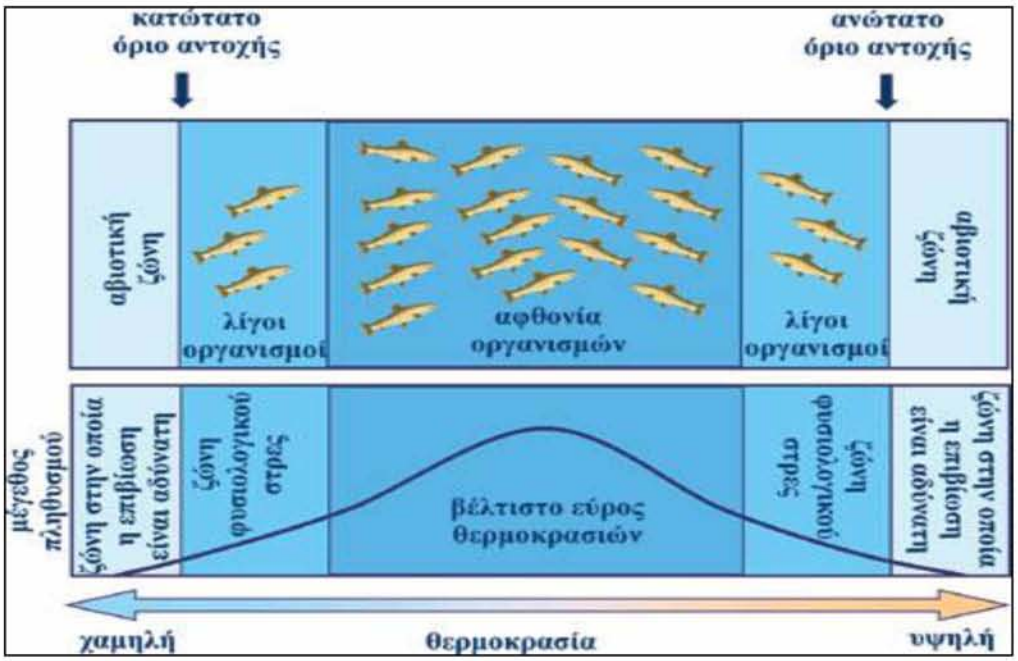
Η επίδραση της λεκάνης απορροής στη λίμνη γίνεται εμφανής αν εκτιμηθεί η παράμετρος που εκφράζεται με το πηλίκο: έκταση της λεκάνης απορροής / έκταση της λίμνης (Σχήμα 1). Λογικό είναι να αναμένει κανείς ότι όσο η τιμή του κλάσματος αυτού μεγαλώνει, τόσο μειώνεται η ποιότητα του νερού. Αυτό γιατί όσο αυξάνεται η έκταση λεκάνης απορροής σε σχέση με την έκταση της λίμνης, επιπλέον πηγές και όγκοι φερτών υλών καταλήγουν στη λίμνη. Βέβαια αυξάνεται και η πιθανότητα να συγκρατηθούν και να απορροφηθούν από το έδαφος τα ανόργανα στοιχεία πριν καταλήξουν στη λίμνη. Αντίθετα όταν η λεκάνη απορροής είναι μικρή, οι λίμνες τροφοδοτούνται κυρίως από τον υπόγειο υδροφορέα και προφανώς είναι πιο φτωχές σε θρεπτικά συστατικά, έχουν καλύτερη ποιότητα νερού, είναι όμως πιο ευαίσθητες στην οξίνηση των νερών τους από την όξινη βροχή, λόγω της μειωμένης ρυθμιστικής τους ικανότητας. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Crater Lake του Όρεγκον που είναι μια από τις πλέον ολιγοτροφικές λίμνες του κόσμου, αφού η λεκάνη απορροής της περιλαμβάνει μόνο τον κρατήρα του ηφαιστείου. Το κλίμα ευθύνεται επίσης και για το μέγεθος της επίδρασης της όξινης βροχής στη λίμνη. Έτσι οι λίμνες που βρίσκονται σε κρύα κλίματα είναι πιθανό να έχουν πιο όξινα νερά - χαμηλό pH -, επειδή το λιωμένο χιόνι έχει χαμηλότερο pH σε σχέση με το νερό που εξουδετερώνει την οξύτητά του ρέοντας διαμέσου των εδαφών. Η μορφολογία της λεκάνης απορροής επηρεάζει την ποιότητα του νερού και με άλλο τρόπο. Έτσι λίμνες που στερούνται φυσικών υπερχειλίσεων καταλήγουν να γίνουν αλμυρές λόγω της εξάτμισης του νερού. Τέτοιες λίμνες συναντούμε βόρεια των Ιμαλάϊων, στην ανατολική Αυστραλία, στον κεντρικό Καναδά, στη Νεβάδα, και στις δυτικές ερήμους της Β. Αμερικής.

Σημαντικότερη βέβαια όλων των προαναφερθέντων, είναι η επίδραση του ανθρώπου, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιεί εκτάσεις της λεκάνης απορροής με τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να ρυπαίνει, είτε με αποθέσεις τοξικών χημικών είτε με τα λύματα κατοικημένων περιοχών είτε ακόμη με τα χημικά των καλλιεργειών τα οποία καταλήγουν στις παρακείμενες λίμνες, δημιουργώντας τα γνωστά προβλήματα του ευτροφισμού και της ρύπανσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

2.3.3 Οι φυσικές παράμετροι σε ένα λιμναίο οικοσύστημα

Η θερμοκρασία είναι καθοριστικός παράγοντας στη λειτουργία του οικοσυστήματος της λίμνης επειδή επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου και άλλων συστατικών, το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών αλλά και τη διαδικασία διάσπασης των οργανικών ουσιών που υπάρχουν. Οι τιμές των βέλτιστων θερμοκρασιών για τους υδρόβιους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς ποικίλουν (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Η θερμοκρασία επηρεάζει τους υδρόβιους πληθυσμούς. ("Understanding Lake Ecology" - Lake Ecology Overview - Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς)

Οι υδρόβιοι πληθυσμοί μπορούν να διακριθούν γενικά σε θερμοανθεκτικούς με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και σε ψυχροανθεκτικούς με αντοχή στις χαμηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά το εύρος των θερμοκρασιών μέσα στο οποίο είναι δυνατή η επιβίωση των υδρόβιων πληθυσμών, οι διάφοροι οργανισμοί μπορούν να διακριθούν σε ευρύθερμους, με ανθεκτικότητα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και σε στενόθερμους, με ανθεκτικότητα σε μικρές μόνο μεταβολές της θερμοκρασίας. Όσο η θερμοκρασία του νερού πλησιάζει τη βέλτιστη τιμή για κάποιους υδρόβιους οργανισμούς, τόσο οι οργανισμοί αυτοί γίνονται περισσότερο δραστήριοι, καταναλώνουν περισσότερη τροφή και χρησιμοποιούν περισσότερο οξυγόνο. Συνεπώς, η θερμοκρασία του νερού όχι μόνο διαμορφώνει τη σύνθεση των βιοκοινοτήτων, αλλά επιδρά και στη συμπεριφορά τους και στο μέγεθος κατ΄ επέκταση των πληθυσμών τους.

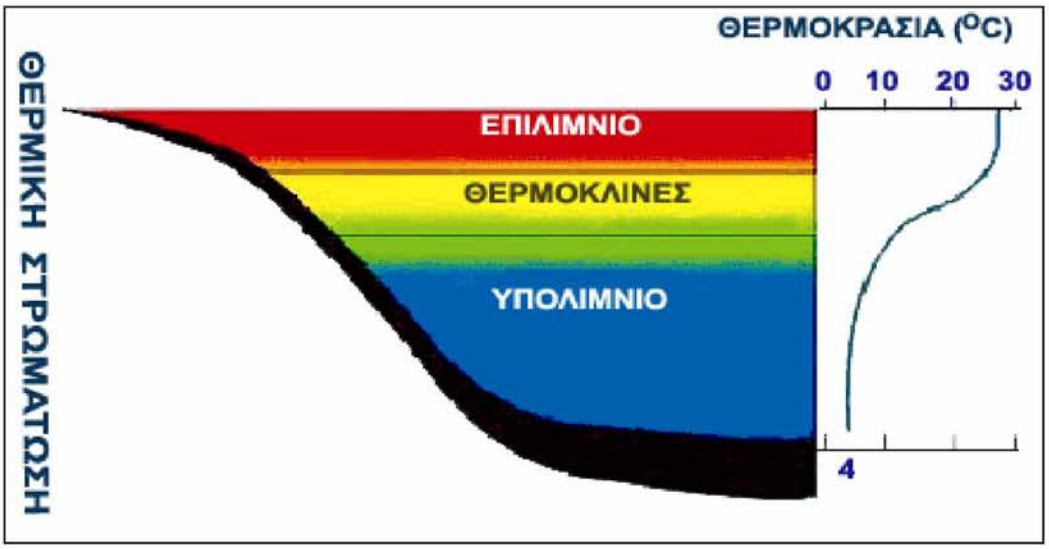
Ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και το βάθος τους οι λίμνες διακρίνονται σε:

- Τροπικές: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών μεγαλύτερη από 4°C
- Εύκρατες: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών και κάτω από 4°C
- Πολικές: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών μικρότερη από 4oC όλη τη διάρκεια του έτους (στον πυθμένα όμως η θερμοκρασία σταθεροποιείται στους 4°C)

Στα εύκρατα γεωγραφικά πλάτη και σε βαθιές λίμνες, καθώς ο ήλιος θερμαίνει τη λίμνη, δημιουργεί ένα θερμό και λιγότερο πυκνό επιφανειακό στρώμα με σχετικά ομοιόμορφη θερμοκρασία και δική του κυκλοφορία, το επιλίμνιο. Πρόκειται για το επιφανειακό νερό (και αυτό που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια) που δέχεται άμεσα τις επιδράσεις από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα (εποχιακές διακυμάνσεις της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας) και τον άνεμο και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Το νερό στο επιλίμνιο είναι συνήθως θερμότερο από αυτό των υποκείμενων στρωμάτων. Κατά τη χειμερινή ωστόσο περίοδο και όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας πλησιάζει το μηδέν, το επιλίμνιο μπορεί να είναι ψυχρότερο από τα υποκείμενα στρώματα, των οποίων η θερμοκρασία παραμένει σταθερή (4°C), (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης στη διάρκεια του καλοκαιριού. ("Understanding Lake Ecology" - Lake Ecology Overview - Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς)

Το επιλίμνιο βρίσκεται πάνω σε ένα πυκνότερο, ψυχρότερο και "αδιατάραχτο" στρώμα, το υπολίμνιο. Πρόκειται για το κατώτερο, βαρύτερο και ψυχρότερο στο μεγαλύτερο διάστημα του έτους στρώμα της λίμνης που χαρακτηρίζεται συνήθως από χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Λόγω ανώμαλης διαστολής και μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού, κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους (θερμοκρασία ατμόσφαιρας κοντά ή υπό του μηδενός), η θερμοκρασία στο υπολίμνιο παραμένει σταθερή (4°C) και υψηλότερη από αυτή του επιλίμνιου. Στην ανώτερη περιοχή του υπολίμνιου, εκεί όπου διαχωρίζεται το επιλίμνιο από το υπολίμνιο και μέσα σε μια υδάτινη περιοχή ελάττωσης της θερμοκρασίας με το βάθος (μεταλίμνιο), υπάρχει ένα στρώμα έντονης ασυνέχειας, το θερμοκλινές. Πρόκειται για το λεπτό στρώμα νερού που χαρακτηρίζεται από σημαντική ελάττωση της θερμοκρασίας όσο αυξάνεται το βάθος. Αν και ο όρος θερμοκλινές συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμο του μεταλιμνίου, στην πραγματικότητα αντιστοιχεί στην επιφάνεια με το μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος. Συνεπώς το θερμοκλινές είναι το σημείο της μεγαλύτερης μείωσης της θερμοκρασίας μέσα στο μεταλίμνιο.

Το χρώμα που βλέπουμε σε μια λίμνη καθορίζεται από το μήκος κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο νερό, από το είδος των σωματιδίων που αιωρούνται, από το χρώμα του ιζήματος, από την παρουσία ανόργανων ή οργανικών ουσιών, από το είδος των πλαγκτονικών οργανισμών και τη βιολογική τους δραστηριότητα, ακόμη και από το γεωλογικό υπόστρωμα της περιοχής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απορρόφηση του φωτός στο νερό και του προσδίδουν συγκεκριμένο χρώμα που μπορεί να είναι από πράσινο - γαλάζιο έως σκούρο καφετί. Η απορρόφηση του φωτός υπολογίζεται με το συντελεστή απορρόφησης (ελ), ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε λίμνη αλλά και για κάθε μήκος κύματος του φωτός. Έτσι οι διαφανείς λίμνες έχουν μικρό συντελεστή απορρόφησης, ενώ οι εύτροφες και θολές μεγάλο.

Η διέλευση μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας στο νερό (οπτικό μέσο) εξαρτάται από το μήκος κύματος της και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής. Η ακτινοβολία του ορατού φωτός στην περιοχή του πράσινου-μπλε είναι αυτή που διεισδύει βαθύτερα στη λίμνη, ενώ του κόκκινου-βιολετί απορροφάται ταχύτερα. Το μπλε φως είναι αυτό που υφίσταται εντονότερο διασκεδασμό (διάχυση και ανάκλαση) από τα μόρια του νερού με αποτέλεσμα να δίνει το χαρακτηριστικό μπλε χρώμα στις διαφανείς

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ορεινές λίμνες. Παράλληλα τα αιωρούμενα σωματίδια και οι διαλυμένες ουσίες αντανακλούν μια ποικιλία χρωμάτων, προσδίδοντας έτσι τις ιδιαίτερες αποχρώσεις της λίμνης. Σύμφωνα με το Forel ο σημαντικότερος παράγοντας προσδιορισμού του χρώματος είναι η παρουσία διαλυμένου οργανικού υλικού. Λίμνες με έντονη βιολογική δραστηριότητα έχουν χρώμα πράσινο, ενώ λίμνες με ασθενέστερη βιολογική δραστηριότητα έχουν χρώμα πράσινο - γαλάζιο. Ο χρωματισμός πάλι αποτελεί ένδειξη για την παρουσία συγκεκριμένων χημικών ουσιών π.χ η παρουσία θείου (S) προσδίδει στο νερό κιτρινωπό χρώμα ενώ η παρουσία ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$) πράσινο χρώμα.

Το χρώμα του νερού της λίμνης μπορεί ν' αλλάζει εποχιακά, όταν εξαιτίας της διάχυσης του ιζήματος κατά τη φθινοπωρινή και εαρινή αναστροφή αναπτύσσεται υπερβολικά το φυτοπλαγκτόν εντείνοντας το πράσινο χρώμα ή με τη μεταφορά φερτών υλών από τη λεκάνη απορροής που προσδίδουν στη λίμνη φαιό χρώμα.

Η οσμή όπως και το χρώμα είναι ένα οργανοληπτικό χαρακτηριστικό και γι' αυτό υποκειμενικό, που μπορεί ωστόσο να αποτελέσει κριτήριο για την ταξινόμηση των νερών σε κατηγορίες χρήσεων (πόση, αναψυχή, διαβίωση ψαριών κ.λπ.). Η οσμή των νερών στη λίμνη μπορεί να οφείλεται σε φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια. Σε μία ευτροφική λίμνη, όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες, τα προϊόντα της διάσπασης της οργανικής ύλης είναι το υδρόθειο, η αμμωνία, το μεθάνιο, αέρια δύσοσμα, τοξικά και εκρηκτικά. Επίσης η χημική κατεργασία λυμάτων και αποβλήτων με χλώριο δίνει στο νερό χαρακτηριστική οσμή χλωρίου ή χλωροφαινόλης. Βέβαια η ένταση των οσμών δεν εξαρτάται πάντα από τη συγκέντρωση των ουσιών που την προκαλούν. Αν και το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της οσμής είναι η ανθρώπινη μύτη, υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνικές με τις οποίες προσδιορίζεται ποιοτικά και ποσοτικά. Η ποιοτική κατάταξη γίνεται με βάση κατηγορίες αντιπροσωπευτικών ουσιών με χαρακτηριστική οσμή π.χ. τα βιομηχανικά απόβλητα, το χλώριο, τα απόβλητα διυλιστηρίων, το υδρόθειο, η αμμωνία αντιστοιχίζονται στην κατηγορία της οσμής φαρμάκων, φυτά σε αποσύνθεση στην κατηγορία της οσμής μούχλας κ.λπ. Ποσοτικά η οσμή προσδιορίζεται με τη μέθοδο των διαδοχικών αραιώσεων. Το δείγμα αραιώνεται σταδιακά και κρατάμε αυτό στο οποίο η οσμή είναι ελάχιστα αντιληπτή. Στο δείγμα αυτό η αραίωση χαρακτηρίζεται ως "κατώφλι οσμής".

2.3.4 Οι χημικές παράμετροι σε ένα λιμναίο οικοσύστημα

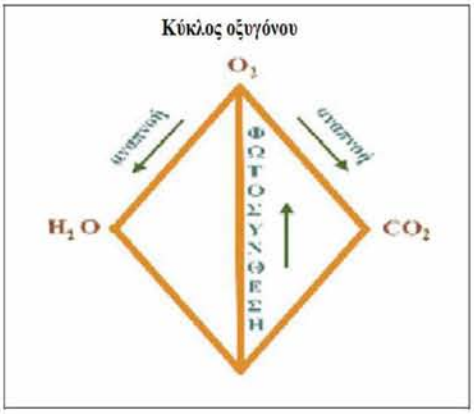
Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (D.O) στο νερό αποτελεί αναμφισβήτητο δείκτη της κατάστασης και της βιωσιμότητας του λιμναίου οικοσυστήματος. Η ανάπτυξη των περισσότερων μορφών ζωής (ζωικών, φυτικών, μυκήτων, πρωτίστων και βακτηρίων) προϋποθέτει την παρουσία οξυγόνου. Η καύση οργανικών ουσιών (κυρίως σακχάρων και λιπαρών οξέων), κυτταρική αναπνοή, εξασφαλίζει την απαραίτητη για την επιβίωση, ανάπτυξη και αναπαραγωγή ενέργεια στην πλειονότητα του έμβιου κόσμου.
Ο εμπλουτισμός της λίμνης με οξυγόνο γίνεται μέσω:

- διάχυσής του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο νερό της λίμνης
- φωτοσυνθετικής παραγωγής οξυγόνου από τα ανώτερα υδρόβια φυτά, το φυτοπλαγκτόν και το περίφυτον

Το μεγαλύτερο ποσοστό του οξυγόνου που υπάρχει στον αέρα και στο νερό σχηματίστηκε στο πέρασμα των γεωλογικών αιώνων από τους αυτότροφους οργανισμούς μέσω της φωτοσύνθεσης.

Όλοι οι αερόβιοι οργανισμοί χρησιμοποιούν το οξυγόνο στη διαδικασία της αναπνοής. Το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό που παράγονται αποτελούν τα υλικά της φωτοσύνθεσης η οποία γίνεται στους αυτότροφους οργανισμούς και προϊόν της είναι το οξυγόνο. Ο κύκλος αυτός συμβαίνει και στα χερσαία και στα υδάτινα οικοσυστήματα και γενικά υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και την κατανάλωση του οξυγόνου, όταν οι συνθήκες είναι κανονικές και δεν εμποδίζονται οι διαδικασίες της αναπνοής και της φωτοσύνθεσης (π.χ όταν μια λίμνη ρυπανθεί προκαλείται μείωση ή ακόμα και έλλειψη οξυγόνου) (Εικόνα 2.4). (Ζανάκη, 2004)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 2.4: Ο κύκλος του οξυγόνου σε κανονικές συνθήκες διατηρείται σταθερός. (http://kpe-kastor.kas.sch.gr/limnology/limnology/references.htm)

Όταν εξαιτίας φυσικών ή ανθρώπινων δραστηριοτήτων εισέλθει στη λίμνη άφθονο θρεπτικό υλικό προκαλείται υπερβολική ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού (άνθιση του νερού) με αποτέλεσμα το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο να μειώνεται σε περιοχές κοντά στην ακτή και στον πυθμένα όπου καταλήγουν μεγάλες ποσότητες νεκρής υδρόβιας βλάστησης και αποσυντίθενται από τα αερόβια βακτήρια, τα οποία χρησιμοποιούν το διαλυμένο οξυγόνο.

Η μείωση οξυγόνου που θα προκύψει μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο μεγάλο μέρος της ιχθυοπανίδας κι αν συνεχιστεί η αύξηση των θρεπτικών συστατικών που εισρέουν στη λίμνη θα δημιουργηθούν ανοξικές συνθήκες. Αναερόβια βακτήρια θα κατακλύσουν την περιοχή τα οποία θα δημιουργήσουν αέρια προϊόντα αποσύνθεσης όπως το ιδιαίτερα δύσοσμο αλλά και τοξικό υδρόθειο και το εύφλεκτο μεθάνιο. Όταν υπάρχει έλλειψη οξυγόνου ο αριθμός των ειδών μειώνεται, αλλά αυξάνονται οι ανθεκτικοί σε αυτές τις συνθήκες οργανισμοί. Η κατάσταση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και σε ένα συγκεκριμένο σημείο της λίμνης και δεν είναι οριστική. Όταν οι συνθήκες με την πάροδο του χρόνου ξαναγίνουν "κανονικές" οι αλλαγές εξαφανίζονται. Σε γενικές γραμμές το οξυγόνο διαλύεται εύκολα στο νερό. Τα δίπολα του νερού μετατρέπουν τα μη πολικά μόρια του οξυγόνου σε ηλεκτρικά δίπολα. Η διάλυση του οξυγόνου στο νερό συντελείται με την ανάπτυξη ασθενών ελκτικών δυνάμεων ανάμεσα στα πολικά μόρια του νερού και στα σχηματιζόμενα πολικά μόρια του οξυγόνου. Ωστόσο τόσο η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό όσο και η κατανομή του σε μια υδάτινη μάζα εξαρτώνται από ποικιλία παραγόντων:

α) κλίμα - μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή

β) θερμοκρασία νερού και θερμική στρωμάτωση της υδάτινης στήλης

γ) ατμοσφαιρική πίεση (υψόμετρο)

δ) ρεύματα αέρα - κυματισμός

ε) αφθονία φωτοσυνθετικών οργανισμών

στ) αφθονία αερόβιων οργανισμών

ζ) αφθονία οργανικού και ανόργανου υλικού (που παράγεται στο εσωτερικό της λίμνης ή που εισέρχεται στη λίμνη)

η) περιεκτικότητα των εισερχόμενων στη λίμνη νερών σε οξυγόνο (υπολίμνιες πηγές, επιφανειακά ρεύματα που απορρέουν στη λίμνη)

θ) σχήμα και μέγεθος της λεκάνης απορροής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Βιοχημική αποδόμηση - B.O.D (Biochemical Oxygen Demand) - C.O.D (Chemical Oxygen Demand). Το οργανικό φορτίο που βρίσκεται σ' ένα φυσικό υδάτινο οικοσύστημα, μαζί με ορισμένα ανόργανα συστατικά αποτελεί κατάλληλο θρεπτικό υλικό για μια ποικιλία μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί αυτοί για να εξασφαλίσουν την ενέργεια που τους χρειάζεται, αφομοιώνουν τις οργανικές αυτές ουσίες μ' έναν πολύπλοκο μηχανισμό. Ο μηχανισμός αυτός καταλήγει τελικά στη διάσπαση των οργανικών ουσιών και στη μετατροπή τους στην πιο σταθερή μορφή που είναι ανόργανα άλατα, ενώ ταυτόχρονα εκλύονται διάφορα αέρια. Η αποικοδόμηση είναι αερόβια όταν υπάρχει διαλυμένο στο νερό οξυγόνο και γίνεται από αερόβιους μικροοργανισμούς με τελικά προϊόντα NO3-, CO2, SO3--, SO4--, H2O και αναερόβια όταν δεν υπάρχει διαλυμένο ελεύθερο οξυγόνο και γίνεται από αναερόβιους οργανισμούς με τελικά προϊόντα H2S, NH3, CH4, που είναι δύσοσμα, τοξικά κι εκρηκτικά κι επηρεάζουν την υγεία φυτών και ζώων. Γι' αυτό μας ενδιαφέρει να επικρατούν στο περιβάλλον αερόβιες συνθήκες αποδόμησης. Το οξυγόνο που χρειάζεται για τη βιοχημική αποδόμηση των οργανικών ουσιών του υδάτινου αποδέκτη από αερόβιους μικροοργανισμούς ονομάζεται βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand). Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο αποτελεί σήμερα μια σημαντική παράμετρο όσον αφορά την ποιότητα του νερού. Αποτελεί ένδειξη για το βαθμό της οργανικής ρύπανσης που προκαλεί το αποσυντιθέμενο οργανικό υλικό. Το B.O.D. μετρά το ποσό του οξυγόνου που καταναλώνουν οι μικροοργανισμοί όχι μόνο για την αποικοδόμηση μιας ρυπαντικής ουσίας αλλά όλου του υπάρχοντος οργανικού υλικού. Το οργανικό υλικό στα νερά προέρχεται από αστικά λύματα, γεωργοκτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα, καθώς και υπολείμματα σοδειάς, λιπάσματα, φυτοφάρμακα, όπως επίσης και από τη φυσική βλάστηση της περιοχής που όταν αποξηραίνεται εμπλουτίζει τους αποδέκτες. Επειδή η αποσύνθεση του οργανικού αυτού υλικού απαιτεί οξυγόνο, η μέτρηση του B.O.D. μας διευκολύνει να εκτιμήσουμε τα επίπεδα της ρύπανσης. Τα ρυπασμένα νερά αυτοκαθαρίζονται βιολογικά με τους αερόβιους αποικοδομητές - βακτήρια χρησιμοποιώντας το διαλυμένο οξυγόνο. Υπάρχει και το C.O.D. (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο) σε περιπτώσεις που η βιολογική διάσπαση είναι βραδεία (π.χ. ξερά καλάμια αργούν να αποικοδομηθούν βιολογικά), οπότε το B.O.D. σε 5 ημέρες δεν μπορεί να δείξει το πραγματικό οργανικό φορτίο. Στις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ισχυρά οξειδωτικά μέσα όπου οξειδώνεται ολόκληρο το οργανικό περιεχόμενο του νερού. Ανάμεσα σε C.O.D. και B.O.D. δεν υπάρχει υποχρεωτικά συσχέτιση.

Υποστηρίζεται ότι ο προσδιορισμός του B.O.D. είναι σημαντικότερος ακόμη και από τον προσδιορισμό του διαλυμένου οξυγόνου επειδή, μειωμένη κατανάλωση οξυγόνου μπορεί να σημαίνει ότι το νερό είναι απαλλαγμένο από μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών ή ότι οι υπάρχοντες μικροοργανισμοί δεν "ενδιαφέρονται" για τη διάσπαση της οργανικής ύλης ή ακόμα ότι ένας μεγάλος αριθμός μικροοργανισμών από εκείνους που αρχικά υπήρχαν έχει αποβιώσει. (Ζανάκη, 2004)

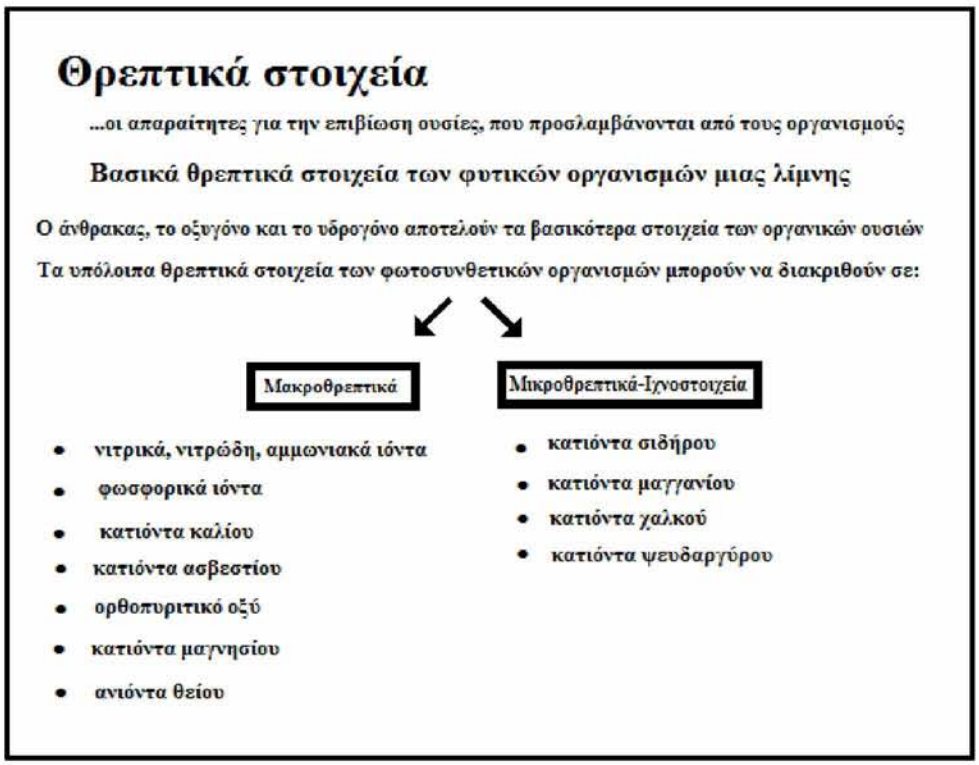
Η ενεργός οξύτητα εκφράζει τη συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου (υδρογονιόντων) ενός δείγματος. Το pH ενός δείγματος ισούται με την αρνητική λογαριθμική συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου στο δείγμα (-log[H+]). Η κλίμακα μέτρησης του pH είναι από 0 ως 14. Η τιμή 7 αντιστοιχεί σε ουδέτερα δείγματα. Τιμές μικρότερες του 7 υποδεικνύουν υπεροχή υδρογονιόντων (οξύτητα) στο δείγμα, ενώ τιμές μεγαλύτερες από 7 αντιστοιχούν σε αλκαλικά δείγματα (υπεροχή υδροξυλιόντων). Το σύνολο των βιοχημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό των κυττάρων πραγματοποιείται σε ουδέτερο pH. Όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα δυσχεραίνουν την πορεία των παραπάνω αντιδράσεων ή αναστέλλουν την πραγματοποίησή τους. Τα φυσικά νερά έχουν τιμές pH που κυμαίνονται μεταξύ των 4-9 μονάδων, ενώ τιμές 6,5-8,5 είναι στις περισσότερες περιπτώσεις οι καταλληλότερες για τους υδρόβιους οργανισμούς. Η ενεργός οξύτητα του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την αλατότητα (παρουσία ανιόντων θείου, χλωρίου κ.ά., μεταλλικών κατιόντων ασβεστίου, μαγνησίου κ.ά.), τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου, καθώς και από τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή) και τη χημική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών.

Η οξύτητα του νερού παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των υδρόβιων οργανισμών, καθώς επηρεάζει την περιεκτικότητα του νερού σε ιχνοστοιχεία. Αλλαγές στην οξύτητα του νερού μπορούν να αυξήσουν τη διάβρωση του εδάφους από το νερό και, κατά συνέπεια, να εμπλουτίσουν το νερό με συστατικά που ήταν εγκλωβισμένα στο έδαφος.

Θρεπτικά στοιχεία. Στα θρεπτικά στοιχεία περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες για την επιβίωση ουσίες που προσλαμβάνονται από τους οργανισμούς. Εκτός από τον άνθρακα, το οξυγόνο και το υδρογόνο, βασικά θρεπτικά συστατικά (μακροθρεπτικά, στοιχεία απαραίτητα σε μεγάλες σχετικά ποσότητες - >1000ppm) των

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

φυτικών οργανισμών μιας λίμνης είναι τα νιτρικά, τα νιτρώδη και τα αμμωνιακά ιόντα, τα φωσφορικά ιόντα, το πυρίτιο (απαραίτητο στα διάτομα και σε κάποια άλλα πλαγκτικά είδη), τα κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου, τα ανιόντα θείου κ.ά. Μεταξύ άλλων τα κατιόντα των μετάλλων σιδήρου, μαγγανίου, χαλκού και ψευδαργύρου αποτελούν τα μικροθρεπτικά στοιχεία - ιχνοστοιχεία - καθώς είναι απαραίτητα σε μικρές σχετικά ποσότητες (<100ppm, με εξαίρεση το σίδηρο που απαιτείται σε ποσότητες <1000ppm και >100ppm) από τους οργανισμούς (Εικόνα 2.4).



στοιχείο	ενδεικτικές λειτουργίες
C	βασικό συστατικό οργανικών ενώσεων
O	βασικό συστατικό οργανικών ενώσεων
H	βασικό συστατικό οργανικών ενώσεων
N	συστατικό αμινοξέων, νουκλεοτιδίων, χλωροφύλλης
K	ενεργοποιητής πολλών ενζύμων
Ca	ρυθμιστής διαπερατότητας κυτάρρου
P	συστατικό νουκλεοτιδίων,ATP, φωσφολιπιδίων
Mg	ενεργοποιητής ενζύμων, συστατικό χλωροφύλλης
S	συστατικό αμινοξέων (π.χ. μεθειονίνης)
Fe	σύνθεση χλωροφύλλης
Cu	ενεργοποιητής μερικών ενζύμων
Mn	ενεργοποιητής μερικών ενζύμων
Zn	ενεργοποιητής μερικών ενζύμων

Εικόνα 2.4: Θρεπτικά στοιχεία και ενδεικτικές λειτουργίες τους στο φυτικό οργανισμό. (Ζανάκη, 2004)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών στο νερό διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιοτική και την ποσοτική αφθονία των οργανισμών. Για παράδειγμα, ο εποικισμός διαφόρων ειδών φυτοπλαγκτού σε ένα λιμναίο οικοσύστημα σχετίζεται με τη συγκέντρωση ορισμένων ιόντων (Ca++, Mg++, Na+, K+ κ.ά.), ενώ η αύξηση των πληθυσμών τους συνδέεται συνήθως με τη σχετική αφθονία κάποιων άλλων (νιτρώδη, νιτρικά, αμμωνιακά, φωσφορικά, πυριτικά ιόντα).

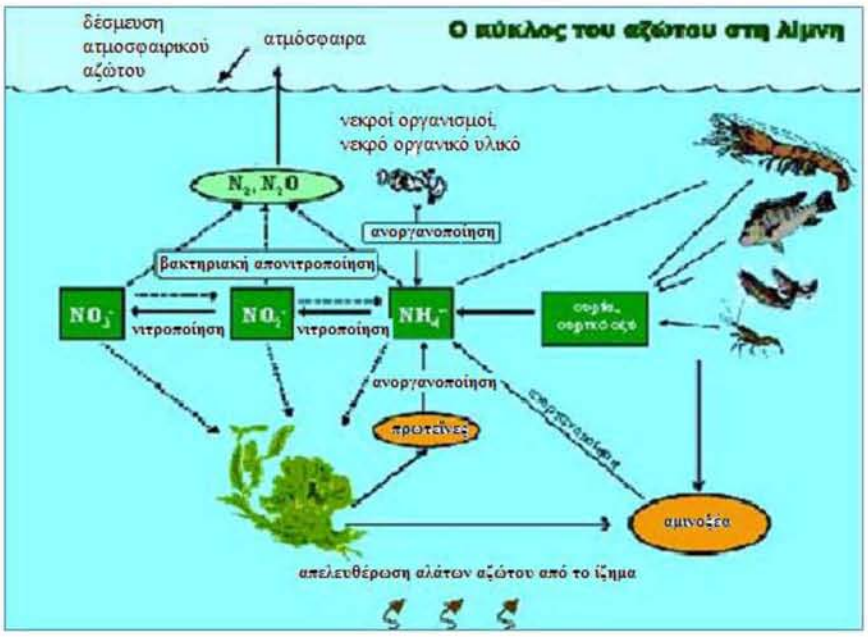
Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, των νιτρωδών, των αμμωνιακών και των φωσφορικών ιόντων παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης, οι τιμές τους δηλαδή είναι ενδεικτικές για τις συνθήκες (ολιγότροφες, μεσότροφες, εύτροφες) που επικρατούν σε αυτή.

Άζωτο:

Το άζωτο είναι ένα από τα κυριότερα συστατικά του ζωντανού πρωτοπλάσματος (αποτελεί το 1-10% του βάρους των φυτών και περισσότερο από 20-30% του βάρους των ζώων) και επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα των υδατικών οικοσυστημάτων. Το άζωτο υπάρχει στο νερό ως (Εικόνα 2.5):

- διαλυμένο αέριο άζωτο
- άζωτο δεσμευμένο σε οργανικές ενώσεις, όπως πρωτεΐνες, αμινοξέα, ουρία κ.ά.
- αμμωνία, κυρίως ως αμμωνιακά ιόντα ($NH4^+$ και NH_4OH^-)
- νιτρώδη ιόντα (NO_2^-)
- νιτρικά ιόντα (NO_3^-)

Αρκετές είναι οι ενώσεις του αζώτου που συμπεριλαμβάνονται στα θρεπτικά στοιχεία του φυτοπλαγκτού (νιτρικά, τα πιο εύληπτα από τα φυτά άλατα, νιτρώδη, αμμωνιακά ιόντα). Τα άλατα του αζώτου προέρχονται συνήθως από το ίζημα και απελευθερώνονται ως αμμωνία σε ανοξικές συνθήκες και ως νιτρικά στις περιόδους κυκλοφορίας του νερού, όπου το διαλυμένο οξυγόνο βρίσκεται σε αφθονία. Μερικά είδη κυανοφυκών - κυανοβακτηρίων μπορούν να δεσμεύουν το διαλυμένο στο νερό ατμοσφαιρικό άζωτο ($N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$).



Εικόνα 2.5: Απλοποιημένη απεικόνιση του κύκλου του αζώτου σε μια λίμνη. (www.alken-murray.com/ BIO-INFO.HTM - Προσαρμογή στα ελληνικά από το ΚΠΕ Καστοριάς)

Συγκεκριμένα βακτήρια οξειδώνουν τα αμμωνιακά και τα νιτρώδη άλατα σε νιτρικά (βακτηριακή νιτροποίηση).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

(*Nitrosomonas*):

$$NH_4^+ + 1½O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

(*Nitrobacter*):

$$NO_2^- + ½O_2 \rightarrow NO_3^-$$

Ανάμεσα στους παράγοντες που επιδρούν στην πορεία της βακτηριακής νιτροποίησης είναι το pH του νερού, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, η θερμοκρασία κ.ά.

Η διαδικασία της νιτροποίησης ευνοείται σε ουδέτερες ως ελαφρά αλκαλικές τιμές του pH. Σε τιμές pH μικρότερες από το 7 η νιτροποίηση καθυστερεί ή αναστέλλεται καθώς οι όξινες συνθήκες δυσχεραίνουν τη λειτουργία των *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*. Σε τιμές του pH μεγαλύτερες του 8, τα άτομα Nitrobacter παύουν να μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά και συνεπώς η διαδικασία της νιτροποίησης αναστέλλεται επίσης. Είναι προφανές ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό παίζει καθοριστικό ρόλο στη νιτροποίηση, στην οξείδωση δηλαδή της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα. Σε μια υδάτινη συλλογή ο ρυθμός νιτροποίησης μειώνεται με το βάθος. Όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό βακτηριακής νιτροποίησης, χαμηλές θερμοκρασίες είναι δυσμενείς για την ανάπτυξη των συγκεκριμένων βακτηρίων. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της ψυχρής εποχής του έτους, παρατηρείται συσσώρευση νιτρικών ιόντων.

Αντίθετη της βακτηριακής νιτροποίησης διαδικασία είναι η βακτηριακή απονιτροποίηση. Μια μεγάλη ποικιλία βακτηριακών οργανισμών (*Esherichia coli*, *Serratia marcesu* κ.ά) συμμετέχουν στην αναγωγή των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων, χρησιμοποιώντας οξυγόνο ανιόντων (π.χ. NO_3^-, NO_2^-, SO_4^-) για την οξείδωση οργανικού υλικού ($NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$). Αναερόβιες συνθήκες ευνοούν τη βακτηριακή απονιτροποίηση.

Οι συγκεντρώσεις των ενώσεων του αζώτου στις λίμνες ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες. Οι ρυθμοί παραγωγικότητας και οι παράγοντες που ελέγχουν μέχρι ένα βαθμό τις βακτηριακές δραστηριότητες, επηρεάζουν τη συγκέντρωση των ενώσεων του αζώτου. Κατά τη θερινή στρωμάτωση μιας λίμνης τα νιτρικά μπορεί ακόμα και να εξαφανιστούν στο επιφανειακό στρώμα του νερού, ως αποτέλεσμα της χρησιμοποίησής τους, όπως επίσης και στα βαθύτερα στρώματα, εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου στα στρώματα αυτά.

<u>Εμπλουτισμός των νερών με αζωτούχες ενώσεις προέρχεται από (Εικόνα 2.6):</u>

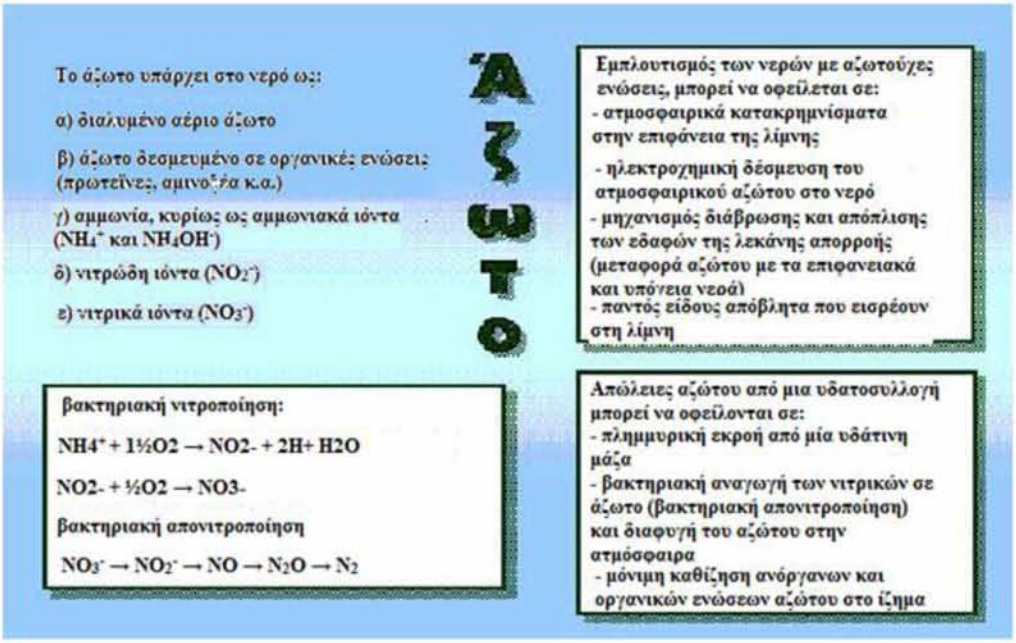
- ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην επιφάνεια μιας λίμνης
- τη δέσμευση ατμοσφαιρικού αζώτου στο νερό (ηλεκτρική ή φωτοχημική δέσμευση με κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις).
- από τους μηχανικούς διάβρωσης και απόπλυσης των εδαφών της λεκάνης απορροής, με τα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά.
- παντός είδους απόβλητα που εισρέουν στη λίμνη

Χωρίς τέτοιους εμπλουτισμούς σε άζωτο, οι μέγιστες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 10 ως 1000μg/l.

<u>Απώλειες αζώτου από μια υδατοσυλλογή μπορεί να προέλθουν από (Εικόνα 2.6):</u>

- πλημμυρική εκροή από μια υδάτινη μάζα
- αναγωγή των νιτρικών σε άζωτο με βακτηριακή απονιτροποίηση και στη συνέχεια διαφυγή του αζώτου στην ατμόσφαιρα
- μόνιμη καθίζηση στο ίζημα της υδατοσυλλογής ανόργανων και οργανικών συστατικών που περιέχουν άζωτο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 2.6: Μορφές αζώτου στο νερό και τρόποι εισόδου και εξόδου. (http://kpe-kastor.kas.sch.gr/limnology/limnology/references.htm)

Φώσφορος:

Ο φώσφορος, με τη μορφή φωσφορικών κυρίως ιόντων (PO_4^{-3} και HPO_4^{-2}) αποτελεί ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών οργανισμών. Φώσφορος υπάρχει στο μόριο του DNA, του ATP, στην κυτταρική μεμβράνη (φωσφολιπίδια) και αλλού.

Ο φώσφορος αποτελεί συνήθως περιοριστικό παράγοντα της πρωτογενούς παραγωγής και ως εκ τούτου έχει καθοριστική σημασία για την αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας στη λίμνη. Αν και είναι ένα από τα έξι κύρια κυτταρικά στοιχεία (C, H, O, N, P, S) και η αναλογία του στη νωπή βιομάζα του κυτοπλάσματος μπορεί να ξεπερνάει το 0,5%, η παρουσία του στο φλοιό της γης είναι σπανιότερη από αυτή των άλλων πέντε στοιχείων.

Οι ενώσεις του φωσφόρου στο νερό διακρίνονται σε οργανικές ή ανόργανες, διαλυμένες ή σωματιδιακές. Φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στο υδάτινο περιβάλλον μεταβάλλουν διαρκώς την αναλογία των παραπάνω μορφών.

Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό είναι η θερμοκρασία, το pH και η συγκέντρωση των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων. Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τους ρυθμούς αποικοδόμησης των οργανικών ουσιών και συνεπώς την απελευθέρωση φωσφόρου. Παράλληλα βέβαια υψηλές θερμοκρασίες εντείνουν την πρόσληψη φωσφόρου από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Συνήθως όμως ο ρυθμός της πρώτης διαδικασίας (απελευθέρωση φωσφόρου) είναι μεγαλύτερος από αυτόν της δεύτερης (δέσμευση φωσφόρου), με αποτέλεσμα υψηλές θερμοκρασίες να επιφέρουν αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο νερό.

Το pH σχετίζεται με την εσωτερική τροφοδοσία του νερού σε φώσφορο, την επαναιώρηση δηλαδή του φωσφόρου του πυθμένα. Σε υψηλές τιμές pH συμβαίνει ανταλλαγή των ιόντων υδροξυλίου του νερού με φώσφορο από ενώσεις σιδήρου και αργιλίου του πυθμένα. Συνεπώς αύξηση του pH επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο νερό.

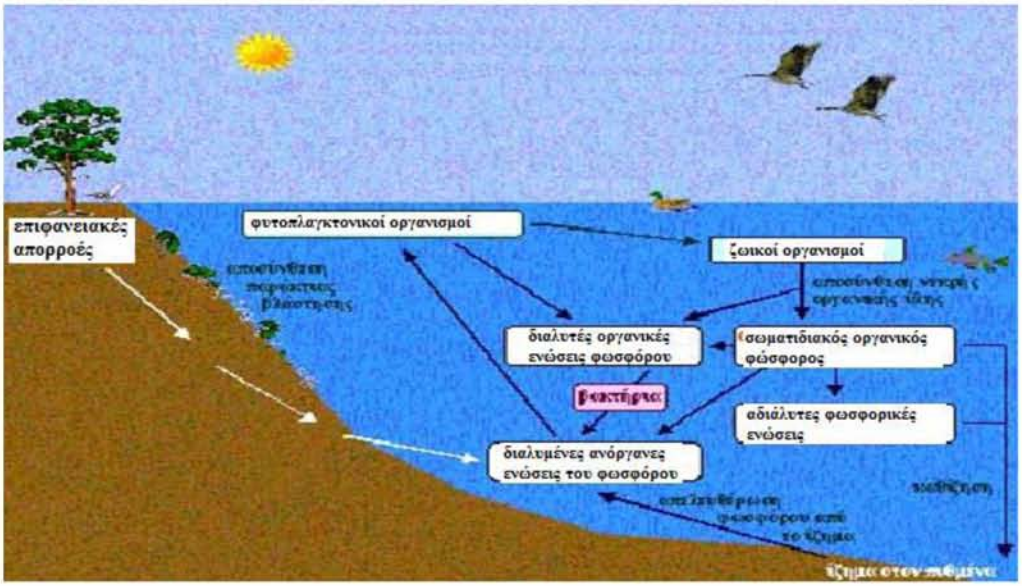
Ανοξικές συνθήκες ευνοούν τη διάχυση του φωσφόρου από τον πυθμένα στο νερό. Αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων μειώνει το ρυθμό απελευθέρωσης του φωσφόρου από τον πυθμένα (και συνεπώς τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό) εξαιτίας της οξειδωτικής τους δράσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Παράλληλα, η παρουσία υδρόβιας μακροφυτικής βλάστησης σε μια υδάτινη συλλογή αυξάνει τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό. Οι παραπάνω φυτικοί οργανισμοί προσλαμβάνουν φώσφορο κυρίως από το υπόστρωμα, ενώ κατά την ανάπτυξή τους απελευθερώνουν μεγάλα ποσά φωσφόρου στο νερό, διαδικασία που συνεχίζεται και κατά την ξήρανσή τους. Η παραμονή ξηρών φυτικών τμημάτων στο νερό διευκολύνει την αποσύνθεσή τους, εμπλουτίζοντας το νερό με φωσφορικές ενώσεις.

Ο φώσφορος διαλύεται σχετικά δύσκολα στο νερό και η ένωση του με σίδηρο, αργίλιο και ασβέστιο προκαλεί την καθίζησή του. Η τυπική διαδικασία ανακύκλωσης του φωσφόρου σε μια λίμνη περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω (Εικόνα 2.7). Ο φώσφορος απελευθερώνεται από το επιλίμνιο κατά την αποσύνθεση οργανικών ουσιών και προσλαμβάνεται από το φυτοπλαγκτόν και την υπόλοιπη υδρόβια βλάστηση. Ο θάνατος και η αποικοδόμηση των οργανισμών εμπλουτίζει το νερό με φωσφορικές ενώσεις που καθιζάνουν στον πυθμένα, ενώ παράλληλα συμβαίνει διάχυση του φωσφόρου από το ίζημα στο νερό (εσωτερική τροφοδοσία του νερού της λίμνης σε φώσφορο).

Στα περισσότερα φυσικά νερά οι συγκεντρώσεις του ολικού φωσφόρου (το σύνολο του ανόργανου και οργανικού, διαλυμένου και σωματιδιακού φωσφόρου) κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10 και 50μg/l. Ωστόσο σε μη παραγωγικά, ολιγότροφα νερά η συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου μπορεί να είναι μικρότερη από 5μg/l, ενώ σε πολύ εύτροφες συνθήκες μπορεί να υπερβαίνει τα 100 μg/l.



Εικόνα 2.7: Διαδικασία ανακύκλωσης του φωσφόρου σε μια λίμνη. (http://kpe-kastor.kas.sch.gr/limnology/limnology/references.htm)

Στις εξωτερικές πηγές φωσφόρου συμπεριλαμβάνονται οι επιφανειακές απορροές, τα λιπάσματα, κτηνοτροφικά απόβλητα, οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων, βιομηχανικά απόβλητα κ.ά. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η εντατική χρήση λιπασμάτων και απορρυπαντικών έχει αυξήσει τη συγκέντρωση του φωσφόρου στις λίμνες πολλών περιοχών.

Θείο:

Οι αυτότροφοι οργανισμοί και πολλοί ετερότροφοι μικροοργανισμοί προσλαμβάνουν θείο από τα θειικά ιόντα (SO_4^{-2}) του νερού. Κύρια πηγή των θειικών ιόντων στο νερό των λιμνών είναι το νερό της βροχής. Άλλες πιθανές πηγές θειικών ιόντων είναι ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν θειικό ασβέστιο ή θειικό πυρίτιο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Σε κλειστές λίμνες όπου υπάρχουν αποθέσεις κρυστάλλων θειικού νατρίου η συγκέντρωση των θειικών ιόντων μπορεί να φτάνει τα 60,3g/lt.

Στο υπολίμνιο των περισσότερων λιμνών και κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου προκαλεί μείωση των πληθυσμών των αερόβιων αποικοδομητικών οργανισμών. Στις παραπάνω συνθήκες η ανοργανοποίηση των οργανικών ουσιών με τη συμμετοχή αναερόβιων βακτηρίων δεν οδηγεί στο σχηματισμό νερού και διοξειδίου του άνθρακα, αλλά ενώσεων όπως το υδρόθειο.

Συμπερασματικά, όσον αφορά την κατακόρυφη κατανομή του θείου, αναμένεται να παρατηρείται αύξηση της σε συνάρτηση με την αύξηση του βάθους.

Πυρίτιο:

Το πυρίτιο εμφανίζεται συνήθως, ως διαλυτό πυριτικό οξύ και ως σωματιδιακό πυρίτιο, σε επαρκείς συγκεντρώσεις στα εσωτερικά νερά. Το ορθοπυριτικό οξύ ($Si(OH)_4$) είναι πιθανόν η μόνη ένωση πυριτίου διαθέσιμη στα διάτομα και σε άλλα πλαγκτικά φύκη (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Το ορθοπυριτικό οξύ ($Si(OH)_4$) είναι πιθανόν η μόνη ένωση πυριτίου διαθέσιμη στα διάτομα και σε άλλα πλαγκτικά φύκη. (http://kpe-kastor.kas.sch.gr/limnology/limnology/references.htm)

Στην πλειοψηφία των εύκρατων λιμνών η συγκέντρωση του πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 560 και 5600μg/l. Λίγες είναι οι περιπτώσεις λιμνών στις οποίες το πυρίτιο βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις σε όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ σε αρκετές μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των διατόμων μόνο για σύντομες χρονικές περιόδους, μετά από τη βιολογική κατανάλωσή του από τους παραπάνω οργανισμούς.

Μεγάλες συγκεντρώσεις πυριτίου παρατηρούνται κατά τη χειμερινή περίοδο και στην αρχή της άνοιξης, ενώ σταδιακά μειώνονται εξαιτίας της βιολογικής κατανάλωσής τους κατά την εαρινή και τη θερινή περίοδο. Περιορισμένες συγκεντρώσεις πυριτίου παρατηρούνται στην εύφωτη ζώνη των εύτροφων λιμνών, ενώ στις ολιγότροφες λίμνες παρατηρούνται διαφορές συγκεντρώσεων, ανάμεσα στο υπολίμνιο και στο επιλίμνιο, κατά τη θερμική στρωμάτωση των νερών.

Η τροφοδοσία μιας λίμνης σε πυρίτιο μπορεί να είναι εξωτερική (μέσω εισροών) ή εσωτερική (διάθεση πυριτίου από το ίζημα, αποσύνθεση διατόμων).

Ιχνοστοιχεία μετάλλων:

Στο νερό των λιμνών υπάρχουν διάφορα μέταλλα τα οποία συμμετέχουν σε μικρές ποσότητες (ιχνοστοιχεία) στις μεταβολικές διεργασίες των οργανισμών.

Το μαγγάνιο βρίσκεται σε ανιχνεύσιμες ποσότητες σε όλα σχεδόν τα επιφανειακά νερά και χρησιμοποιείται από φυτοπλαγκτονικούς οργανισμούς της λίμνης σε ποσότητα που ποικίλει ανάλογα με το είδος του οργανισμού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Αποθέματα μαγγανίου στον πυθμένα που επαναδιαλύονται τροφοδοτούν συνήθως τον υδάτινο όγκο με το συγκεκριμένο μέταλλο. Ως εκ τούτου μεγαλύτερες ποσότητες ιόντων μαγγανίου αναμένεται να παρατηρηθούν στο υπολίμνιο και στο μεταλίμνιο.

Οι συγκεντρώσεις του χαλκού στο νερό των λιμνών κυμαίνονται από πρακτικά μη ανιχνεύσιμα επίπεδα μέχρι μερικές εκατοντάδες mg/m3. Σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού παρατηρείται κατά τη φθινοπωρινή αναστροφή. Η παρουσία υδρόθειου στον πυθμένα δυσχεραίνει τη διάλυση του χαλκού και την απελευθέρωσή του στο υπολίμνιο. Ο εμπλουτισμός του νερού των βαθύτερων στρωμάτων με οξυγόνο προκαλεί την οξείδωση του υδρόθειου στον πυθμένα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο χαλκός ανιχνεύεται σε συγκεντρώσεις τοξικές για την υδρόβια ζωή. Τέλος στα νερά των λιμνών ανιχνεύονται συχνά και άλλα μέταλλα (σίδηρος, ψευδάργυρος, κοβάλτιο, βόριο, κ.ά.).

2.3.5 Κατανομή των βιολογικών παραμέτρων

Σε μια τυπική λίμνη συναντώνται διακριτές βιοκοινότητες οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λίμνης, αλλά και τις φυσικοχημικές παραμέτρους του χώρου εξάπλωσής τους, που μπορεί να είναι το νερό, ο πυθμένας ή η ακτή.

Έτσι οι οργανισμοί της λίμνης μπορούν να διακριθούν σε:

α) Οργανισμούς που ζουν στον πυθμένα της λίμνης και είναι:

- Φυτά: ανώτερα φυτά (μακρόφυτα) και προσκολλημένα μικροφύκη (περίφυτον)
- Βακτήρια και μύκητες
- Βενθικοί οργανισμοί: υδρόβια έντομα, μαλάκια (μύδια, σαλιγκάρια), άλλα ασπόνδυλα (καραβίδες, σκώληκες)

β) Οργανισμούς που παρασύρονται από το νερό: Φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βακτήρια

γ) Οργανισμούς που μετακινούνται ελεύθερα:

- Τα μεγαλύτερα είδη του ζωοπλαγκτού
- Αμφίβια
- Ψάρια

Στην παράκτια ζώνη, στα ρηχά νερά δηλαδή κατά μήκος της παραλίας, το φως διεισδύει μέχρι τον πυθμένα επιτρέποντας την ανάπτυξη υδρόβιων φυτών - μακρόφυτων. Τα φυτά αυτά μπορεί να είναι υπερυδατικά (περιοδικά βρίσκονται μέσα στο νερό, αλλά μπορούν να επιβιώσουν και εκτός νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα - συνήθως αποτελούνται από βούρλα, καλάμια και ψαθιά), εφυδατικά (μακρόφυτα με επιπλέοντα φύλλα και άνθη, όπως νούφαρα, λέμνες) ή υφυδατικά (μακρόφυτα με βυθισμένα φύλλα, όπως μυριόφυλλα και ποταμογείτονες, που βρίσκονται έξω από το νερό, μέσα στο νερό ή στην επιφάνεια του νερού ή ακόμη είναι βυθισμένα εξ ολοκλήρου στο νερό) (Εικόνα 2.9).

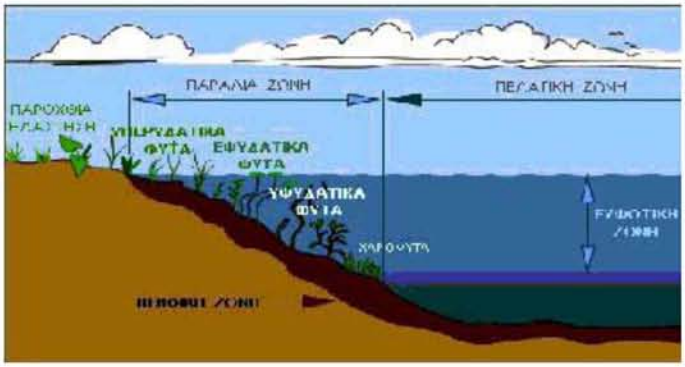
Η παράκτια ζώνη εξαπλώνεται από τις όχθες της λίμνης έως το βάθος όπου η ένταση του φωτός είναι περίπου το 1% της επιφανειακής, δηλαδή στην ευφωτική ζώνη όπου μπορεί να γίνει η φωτοσύνθεση.

Στις περισσότερες λίμνες η ευφωτική ζώνη συμπίπτει με το επιλίμνιο και μόνο σε λίμνες με μεγάλη διαφάνεια η φωτοσυνθετική δραστηριότητα μπορεί να παρατηρηθεί και στο θερμοκλινές.

Τα φυτά της παράκτιας ζώνης εκτός από τροφή για τους φυτοφάγους οργανισμούς της περιοχής, αποτελούν το υπόστρωμα ανάπτυξης για μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών φυκών και ασπόνδυλων και παρέχουν μια φυσική κατοικία για ψάρια και άλλους οργανισμούς διαφορετική από αυτή της πελαγικής ζώνης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Πελαγική ζώνη είναι η περιοχή στα ανοιχτά της λίμνης, όπου το φως δεν φθάνει συνήθως μέχρι τον πυθμένα. Το ίζημα του πυθμένα αποτελεί την βενθική ζώνη, στην επιφάνεια της οποίας (πάχος 2-5cm) συναντάται μια μεγάλη ποικιλία οργανισμών, οι λεγόμενοι βενθικοί οργανισμοί που είναι ασπόνδυλα, νύμφες δίπτερων εντόμων (σκνίπες, κουνούπια, μύγες κ.λπ.) και μικρά καρκινοειδή. Η ζώνη αυτή είναι πλούσια σε οργανική ύλη και η παραγωγικότητά της εξαρτάται από το οργανικό περιεχόμενο, τις φυσικές συνθήκες του ιζήματος και από τους ρυθμούς θήρευσης των ψαριών.



Εικόνα 2.9: Στην ευφωτική ζώνη μπορούν να αναπτυχθούν όλα τα είδη που φωτοσυνθέτουν, όπως η υδρόβια βλάστηση στην παράλια ζώνη και το φυτοπλαγκτόν στην πελαγική αλλά και την παράλια. ("Understanding Lake Ecology" - Lake Ecology Overview - Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς)

Τα αμμώδη ιζήματα είναι ασταθή και περιέχουν συνήθως μειωμένες ποσότητες θρεπτικών, γι' αυτό και οι φυτικοί οργανισμοί είναι σπάνιοι, ενώ στους βραχώδεις πυθμένες εμφανίζεται μεγάλη ποικιλία ζωής αφού προσφέρουν καταφύγιο στους οργανισμούς από τους θηρευτές τους, υπόστρωμα για να προσκολλούνται τα μικροφύκη (περίφυτον) αλλά και τροφή (οργανική λάσπη) στους διάφορους βενθικούς οργανισμούς. (Μουστάκα Γούνη, 2000)

Τροφικό πλέγμα

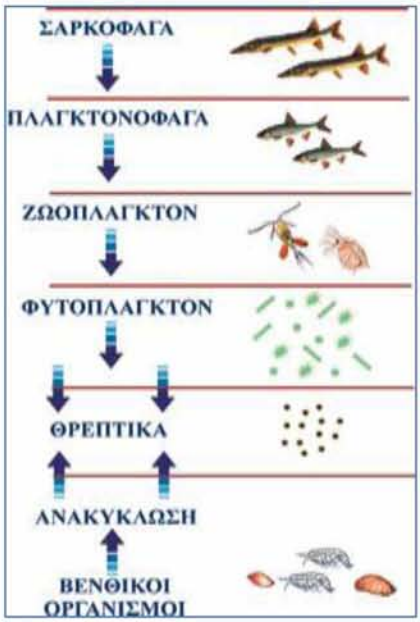
Για να καταλάβουμε πώς λειτουργεί το οικοσύστημα της λίμνης, μπορούμε να οργανώσουμε τις βιολογικές κοινότητες σε τροφικές αλυσίδες και τροφικά πλέγματα. Η απλούστερη παρουσίαση του "ρόλου" ενός οργανισμού σε ένα οικοσύστημα είναι η απεικόνιση της οικολογικής πυραμίδας (Εικόνα 2.10). Στην πλατιά βάση των παραγωγών ανήκουν οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί και τα κυανοβακτήρια. Οι παραγωγοί υποστηρίζουν τα ανώτερα τροφικά επίπεδα της πυραμίδας, δηλαδή τους φυτοφάγους οργανισμούς (ζωοπλαγκτόν), τους πλαγκτονοφάγους οργανισμούς και τους πολύ μικρότερους πληθυσμούς των σαρκοφάγων (θηρευτών).



Εικόνα 2.10: Απλοποιημένη παρουσίαση της τροφικής πυραμίδας, της ροής ενέργειας και της ανακύκλωσης των θρεπτικών στοιχείων σε μια λίμνη. (http://kpe-kastor.kas.sch.gr/limnology/limnology/references.htm)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Τα φυτά αποτελούν τροφή των καταναλωτών πρώτης τάξης και όταν ολοκληρώσουν τον κύκλο της ζωής τους και νεκρωθούν, γίνονται τροφή των αποικοδομητών. Οι πρωτογενείς καταναλωτές, όπως το ζωοπλαγκτόν και η ποικιλία ασπόνδυλων αποτελούν τροφή για τους καταναλωτές δεύτερης τάξης, που είναι τα μικρά ψάρια και κάποια είδη της ορνιθοπανίδας. Οι μεγαλύτεροι ζωικοί οργανισμοί, όπως τα μεγάλα ψάρια, τα ψαροφάγα πουλιά, οι ψαραετοί, αλλά και ο άνθρωπος είναι καταναλωτές τρίτης τάξης (4ο τροφικό επίπεδο). Τα πιο πάνω ανεξάρτητα τροφικά επίπεδα μπορούν να απεικονιστούν με τροφικές αλυσίδες, αλλά στην πραγματικότητα πολλοί οργανισμοί είναι παμφάγοι και συνεπώς δεν αντιπροσωπεύονται πάντα μόνο από ένα από τα παραπάνω τροφικά επίπεδα. Παράλληλα, οι καταναλωτές πολύ συχνά αλλάζουν τροφικό επίπεδο στη διάρκεια του κύκλου της ζωής τους. Για παράδειγμα ένα ψάρι μπορεί στα πρώτα στάδια της ζωής του να τρέφεται από μικροφύκη, βακτήρια και τρίμματα νεκρής ή αποικοδομούμενης οργανικής ύλης, στη συνέχεια από ζωοπλαγκτόν και στα ώριμα στάδια της ζωής του από άλλα ψάρια. Τα τροφικά πλέγματα είναι συνήθως πολύ σύνθετα και στο οικοσύστημα της λίμνης εκατοντάδες οργανισμοί μπορεί να συμμετέχουν σ΄ αυτά. Επειδή όμως η διαθέσιμη ενέργεια μειώνεται όσο προχωράμε στα ανώτερα τροφικά επίπεδα, είναι απαραίτητη μια μεγάλη βάση παραγωγών, ώστε να μπορεί να συντηρήσει τα λιγότερα σε αριθμό μεγάλα ψάρια. Τα τροφικά πλέγματα επίσης απεικονίζουν τη ροή ενέργειας και θρεπτικών (άνθρακας, άζωτο, φώσφορος) (Εικόνα 2.11). Η ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του οικοσυστήματος.



Εικόνα 2.11: Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση τροφικού πλέγματος λιμναίου οικοσυστήματος. (http://kpe-kastor.kas.sch.gr/limnology/limnology/references.htm)

Όπως και στα χερσαία οικοσυστήματα, δύο είναι οι βασικές λειτουργίες για τη διατήρηση της ζωής στη λίμνη: η φωτοσύνθεση και η αναπνοή. Τα πράσινα τμήματα των φυτών δεσμεύουν ενέργεια από τον ήλιο και μετατρέπουν τις αβιοτικές ανόργανες χημικές ουσίες (CO_2, νερό, ανόργανα άλατα) σε οργανικές. Στους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς της λίμνης περιλαμβάνονται το φυτοπλαγκτόν, το περίφυτον και τα μακρόφυτα. Είναι οι παραγωγοί του συστήματος που παράγουν τις οργανικές ενώσεις που απαιτούνται για τη θρέψη, την πρόσληψη δηλαδή ενέργειας από τους υπόλοιπους οργανισμούς. Το οξυγόνο, παραπροϊόν της φωτοσύνθεσης, προστίθεται στο οξυγόνο της λίμνης που προέρχεται από την ατμόσφαιρα. Στα υδάτινα στρώματα που ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης είναι πολύ υψηλός, όπως στις περιπτώσεις της άνθισης του νερού, το νερό μπορεί να υπερκορεσθεί σε οξυγόνο. Το σημείο κορεσμού του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Το σημείο κορεσμού του νερού σε οξυγόνο αυξάνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία του. Σε περιόδους στρωμάτωσης της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

λίμνης, η μοναδική πηγή οξυγόνου για τις βαθύτερες ζώνες είναι οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο αν το φως μπορεί να διεισδύσει κάτω από το θερμοκλινές.

Εκτός από φως, το φυτοπλαγκτόν και τα ανώτερα φυτά χρειάζονται οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και θρεπτικά για να αναπτυχθούν και να επιζήσουν. Εκτός από ελάχιστα είδη κυανοπράσινων μικροφυκών, τα υπόλοιπα δεν μπορούν να επιζήσουν σε ανοξικό περιβάλλον.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι πρακτικά πάντα διαθέσιμο, αφού προέρχεται από τη χημική και μηχανική διάβρωση, τη διάλυση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων της λεκάνης απορροής, τη διάχυσή του από την ατμόσφαιρα και από τη λειτουργία της κυτταρικής αναπνοής των οργανισμών της λίμνης.

Τα βασικά θρεπτικά συστατικά, που είναι το άζωτο και ο φώσφορος, βρίσκονται διαλυμένα στο νερό ή στο ίζημα του πυθμένα και απορροφούνται από τους μικροφυτικούς οργανισμούς και τα ανώτερα φυτά αντίστοιχα. Η χαμηλή συγκέντρωσή τους στο νερό αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των φυτών.

Άλλα στοιχεία απαραίτητα για τη ζωή είναι τα κύρια ιόντα: ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο και κάλιο, τα ιχνοστοιχεία σίδηρος, κοβάλτιο, μολυβδαίνιο, μαγγάνιο, βόριο, ψευδάργυρος και είναι συνήθως παρόντα σε επαρκείς συγκεντρώσεις. Το θείο που επίσης χρειάζονται οι ζωντανοί οργανισμοί υπάρχει συνήθως στις λίμνες με τη μορφή θειικών αλάτων.

Η αναπνοή και η οξείδωση του οργανικού υλικού απελευθερώνει μέρος της ενέργειας που αρχικά δεσμεύτηκε για τη φωτοσύνθεση. Οι μικροοργανισμοί (βακτήρια και μύκητες) καταναλώνουν ένα μεγάλο μέρος του διαθέσιμου οξυγόνου κατά την αποικοδόμηση του νεκρού οργανικού υλικού που αποβάλλεται από τους οργανισμούς, ενώ παράλληλα ανακυκλώνουν τα θρεπτικά που είναι απαραίτητα για τη φωτοσύνθεση.

Ευτροφισμός

Ο όρος ευτροφισμός αναφέρεται στην υπέρμετρη αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας, στην υπέρμετρη δηλαδή αύξηση της φυτικής βιομάζας (φυτοπλαγκτόν, υδρόβια, υδροχαρής βλάστηση) μιας "κλειστής" υδάτινης μάζας (Εικόνα 2.12). Ο ευτροφισμός των λιμνών οφείλεται στη διοχέτευση, στην υδάτινη μάζα, μεγάλης ποσότητας θρεπτικών αλάτων, κυρίως αζώτου και φωσφόρου και μπορεί να οφείλεται σε φυσικούς παράγοντες (γεωγραφικά, γεωμορφολογικά, κλιματολογικά, μορφομετρικά, υδροδυναμικά, και άλλα χαρακτηριστικά της λίμνης) ή σε ανθρωπογενείς επιδράσεις (αστικά λύματα, κτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα, αποπλύσεις γεωγραφικών εδαφών). Τα αποτελέσματα του ευτροφισμού είναι δυσμενή για τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του νερού.



Εικόνα 2.12: Σε ευτροφικές λίμνες και κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου (περίοδοι ανάμιξης των νερών) εμφανίζεται το φαινόμενο της "άνθισης του νερού". (www.ecy.wa.gov/programs/ eap/fw_lakes/bloom.html)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Ο ευτροφισμός επιφέρει σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο επιφανειακό στρώμα του νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της έντονης φωτοσύνθεσης, ενώ παράλληλα προκαλεί μείωση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου στα βαθύτερα υδάτινα στρώματα, λόγω αυξημένων αναπνευστικών αναγκών των βακτηρίων που αποικοδομούν τις οργανικές ουσίες και μπορεί να διαμορφώσει ανοξικές συνθήκες.

Σε εύτροφες λίμνες και κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου (περίοδοι ανάμιξης των νερών) εμφανίζεται το φαινόμενο της "άνθισης του νερού". Η συσσώρευση θρεπτικών αλάτων κατά τη διάρκεια του χειμώνα (εποχή κατά την οποία η αύξηση του φυτοπλαγκτού παρεμποδίζεται λόγω χαμηλών θερμοκρασιών) προκαλεί την ταχεία ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών κατά τη διάρκεια της άνοιξης (εποχή κατά την οποία η θερμοκρασία είναι ευνοϊκή για την αύξησή τους).

Η εξάντληση των θρεπτικών ουσιών στο επιλίμνιο, που παρουσιάζεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της θερμικής στρωμάτωσης που έχει ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της ανάμιξης των νερών, περιορίζει το μέγεθος των φυτοπλαγκτονικών πληθυσμών, γιατί τα θρεπτικά άλατα συσσωρεύονται στα κατώτερα στρώματα.

Η φθινοπωρινή ψύξη των νερών προκαλεί ομοιοθερμία και ανάμιξη του νερού, με αποτέλεσμα να επανέρχονται τα θρεπτικά άλατα στα επιφανειακά στρώματα, γεγονός που συντελεί στην ταχεία αύξηση του φυτοπλαγκτού (φθινοπωρινή άνθιση του νερού).

Η αναλογία αζώτου - φωσφόρου παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των τροφικών συνθηκών μιας λίμνης. Στους φυτοπλαγκτονικούς και στους υδρόβιους φυτικούς οργανισμούς γενικότερα η σχέση φωσφόρου / αζώτου είναι 1 άτομο φωσφόρου προς 16 άτομα αζώτου. Αν ο λόγος N/P στο νερό είναι μεγαλύτερος από 16, τότε ο φώσφορος είναι ανεπαρκής για την ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών, η έλλειψη δηλαδή του φωσφόρου λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας για την αύξηση των πληθυσμών τους.

Ενδεικτικά για την ανάπτυξη ευτροφισμού σε μία λίμνη είναι τα παρακάτω στοιχεία:

Βιολογικοί δείκτες

- Μείωση της ποικιλίας των βενθικών και φυτοπλαγκτονικών ειδών
- Αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας (μεγαλύτερη από 200g C/m3 ανά έτος) - αύξηση της βιομάζας των φυκών, της νηρητικής υδρόβιας και χερσαίας βλάστησης
- Αύξηση της βακτηριακής πυκνότητας
- Αύξηση του αριθμού εκείνων των βενθικών και των πλαγκτονικών ειδών, που αποτελούν δείκτες ρύπανσης

Χημικοί δείκτες

- Έλλειμμα οξυγόνου στον πυθμένα
- Υπερκορεσμός του επιλίμνιου σε οξυγόνο
- Αύξηση του ανόργανου αζώτου και φωσφόρου και του ολικού αζώτου και φωσφόρου
- Αύξηση του λόγου N/P του νερού
- Μεταβολή του pH του νερού
- Μεταβολή της σύστασης του ιζήματος του πυθμένα

Φυσικοί δείκτες

- Μείωση του μέσου βάθους της λίμνης
- Μείωση της διαφάνειας της λίμνης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

2.4 Ρηχές λίμνες

Οι ρηχές λίμνες απαντώνται σε όλες τις ηπείρους και τις λεκάνες απορροής (Talling, 2001). Οι ρηχοί ταμιευτήρες (μέσο βάθος < 5m) παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά όπως οι ρηχές λίμνες (Jorgensen *et al.* 2012). Αυτά τα ρηχά (< 5m μέσο βάθος) υδατικά συστήματα είναι συνήθως πολυμικτικά με περιστασιακή διαστρωμάτωση στα επιφανειακά στρώματα, η οποία ποικίλει σε έκταση (λιγότερο από 0,1 Km2 , σε περισσότερο από 1000 Km2) και συχνά υπόκεινται σε ισχυρές επιπτώσεις του ανέμου που προκαλούν επαναιώρηση των ιζημάτων, ανόργανων σωματιδίων και κύτταρα και αποικίες φυκών (Jorgensen *et al.* 2012). Οι ρηχές πολυμικτικές λίμνες εμφανίζουν χαρακτηριστικά που τις διαφοροποιούν από τις συχνά μελετημένες βαθιές – διμικτικές λίμνες, όπως:

η έλλειψη σταθερής μακροπρόθεσμης θερμικής στρωμάτωσης (Beaver *et al.,* 1981, Muraoka & Fukushima, 1981)

η συχνή ανάμιξη ολόκληρης της στήλης νερού και επαναιώρηση των ιζημάτων (Ishikawa & Tanaka, 1993)

η σημαντική εσωτερική φόρτιση με θρεπτικά στοιχεία από το ίζημα στο υπερκείμενο νερό (Sondergaard *et al*., 1992).

Σύμφωνα με τον Sas (1989) η ποιότητα του νερού αυτών των λιμνών (ολικός φώσφορος, θολερότητα, χλωροφύλλη α, και άνθιση φυκών) μπορεί να έχει πολύπλοκες σχέσεις με τα εξωτερικά θρεπτικά φορτία και τις φυσικές διεργασίες της λίμνης.

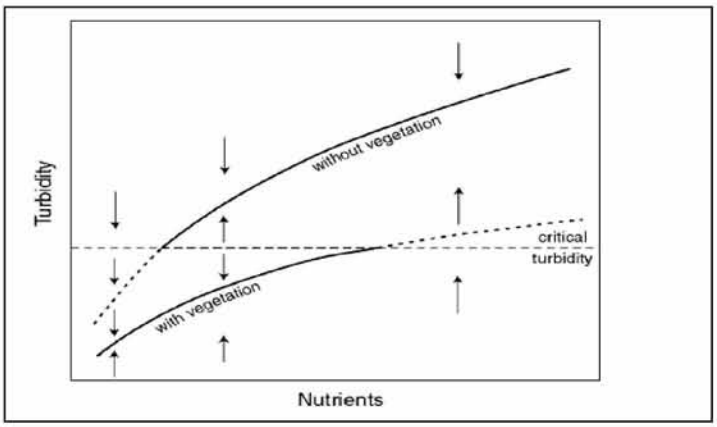
Η ισορροπία ανάμεσα στην επαναιώρηση και την καθίζηση είναι σημαντική σε ρηχές λίμνες καθώς είναι καθοριστική για τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών. Η θολότητα των λιμνών ως συνέπεια της επαναιώρησης είναι μια σημαντική ιδιότητα για τις ρηχές λίμνες (Scheffer, 1998).

Σύμφωνα με τη θεωρία των εναλλακτικών σταθερών καταστάσεων, τα ρηχά οικοσυστήματα μπορούν να βρίσκονται σε δύο εναλλακτικές σταθερές καταστάσεις, μία όπου επικρατεί θολότητα και χαρακτηρίζεται από υψηλή βιομάζα φυκών και μία όπου επικρατεί μεγάλη διαύγεια των υδάτων κυριαρχούμενη από υδρόβια βλάστηση. Αυτή η εναλλαγή παίζει σημαντικό ρόλο στην πιθανότητα αποκατάστασης ευτροφικών ρηχών λιμνών. Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται ο κύριος μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την εναλλαγή από τη μία κατάσταση στην άλλη και σχετίζεται με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ υδρόβιας βλάστησης και θολότητας (Scheffer *et al.,* 1993). Το μοντέλο βασίζεται σε τρείς υποθέσεις:

- Αυξάνεται η θολερότητα σε αντιστοιχία με το θρεπτικό επίπεδο, εξαιτίας της μεγάλης αφθονίας του φυτοπλαγκτού
- Η υδρόβια βλάστηση τείνει να ενισχύει τη διαύγεια του νερού
- Η ανάπτυξη της υδρόβιας βλάστησης καταστέλλεται από την αυξημένη θολερότητα (Scheffer & Van Nes, 2007).

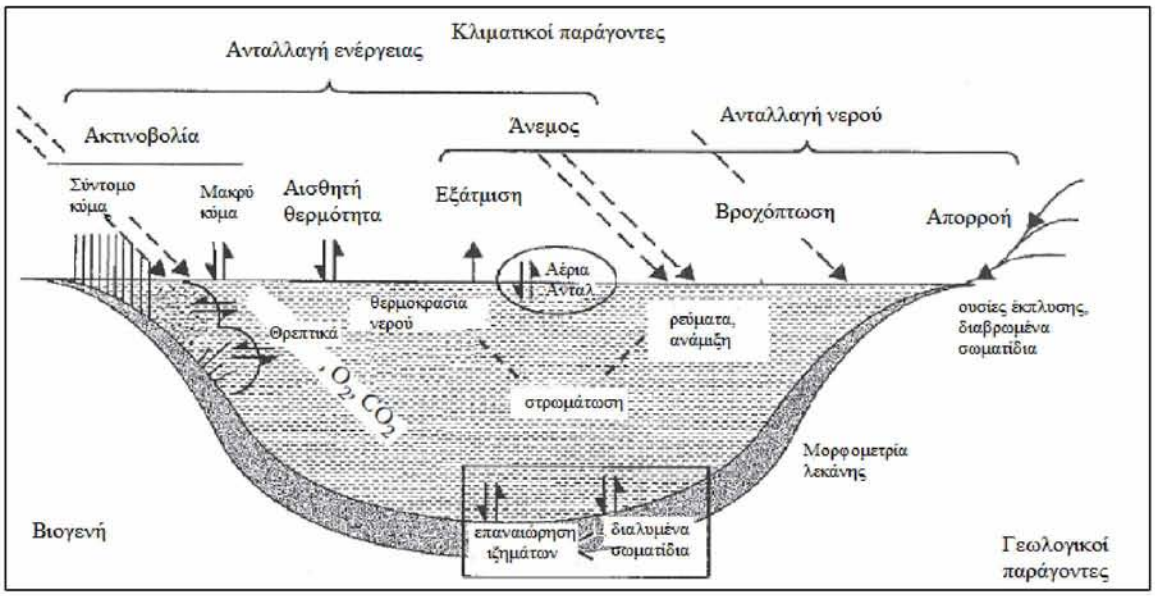
Επομένως η αύξηση της θολερότητας που προκαλείται από τη μεγάλη αφθονία του φυτοπλαγκτού και την επαναιώρηση του ιζήματος, αλλά και λόγω του αυξημένου ανταγωνισμού για τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών οδηγεί σε μείωση της αφθονίας της υδρόβιας βλάστησης (Scheffer, 1998). Το γεγονός αυτό ενισχύει την αύξηση της θολότητας και ενδέχεται το οικοσύστημα να μετατοπιστεί από μια κατάσταση ισορροπίας με διαυγή ύδατα σε μια κατάσταση ισορροπίας με θολά ύδατα υποβαθμισμένης ποιότητας και με σοβαρές επιπτώσεις για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας (Scheffer et al., 1993; Kagalou et al., 2001; Mylopoulos et al., 2009).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 2.13: Γραφική παράσταση της «θεωρίας των εναλλακτικών σταθερών καταστάσεων» όπου φαίνεται η σχέση μεταξύ της θολότητας και της συγκέντρωσης των θρεπτικών αλάτων σε δύο διαφορετικές καταστάσεις, με ή χωρίς υδρόβια βλάστηση. Οι καμπύλες δείχνουν μεταξύ θρεπτικών και θολότητας σε λίμνες όπου κυριαρχεί το φυτοπλαγκτόν (πάνω καμπύλη) ή τα υδρόβια μακρόφυτα (κάτω καμπύλη). (Scheffer et al., 1993)

Η εποχιακή δυναμική των χαρακτηριστικών των ρηχών λιμνών επηρεάζεται από εξωτερικές δυναμικές λειτουργίες όπως ο άνεμος, η ηλιακή ενέργεια, η θερμοκρασία του αέρα, η αύξηση της βιομάζας και η αποικοδόμηση (Talling & Lemoalle, 1998). Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγικότητα και την οικολογική δυναμική των ρηχών λιμνών είναι τα θρεπτικά συστατικά. Η μεγάλη συσσώρευση εξωτερικών θρεπτικών φορτίων, επιταχύνει τη διαδικασία του ευτροφισμού, μεταβάλλοντας την ισορροπία της λίμνης, οδηγώντας τη σε ευτροφικό επίπεδο με υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών στο ίζημα και το νερό και με μια σχεδόν μόνιμη άνθιση των κυανοβακτηρίων ή με μακροφυτική βλάστηση (Jorgensen et al., 2012).



Εικόνα 2.14: Διάγραμμα, κάθετου τμήματος ρηχής λίμνης, δείχνοντας την επίδραση των περιβαλλοντικών στοιχείων από κλιματικούς – ατμοσφαιρικούς, γεωλογικούς και βιολογικούς παράγοντες. (Talling & Lemoalle 1998)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

2.5 Λίμνη Κάρλα

Η περιοχή της Κάρλας και οι πέριξ περιοχές καταλαμβάνουν τη νότια απόληξη της Θεσσαλικής πεδιάδας. Η έκταση αυτή στο νότιο τμήμα της ορίζεται από τις παρυφές του όρους Πηλίου και στα ανατολικά-βορειοανατολικά από το όρος Μαυροβούνι. Η ακαθόριστη έκτασή τους ανέρχεται στα 169.000 στρέμματα και η καθαρή καλλιεργήσιμη γη σε 146.000 στρέμματα. Η περιοχή είναι επιμήκης με πλάτος περίπου 8 km και μήκος περίπου 25 km και ουσιαστικά αποτελεί τις δυτικές παρυφές του όρους Μαυροβουνίου. Ένα πολύ ιδιαίτερο στοιχείο της περιοχής είναι το σύνθετο φυσικό και τεχνητό υδρογραφικό δίκτυο που τη διασχίζει, καθώς και οι πολυάριθμες επιφανειακές υδατοσυλλογές, στις οποίες αναπτύσσονται ποικίλης αξίας οικοσυστήματα.



Εικόνα 2.15: Γεωγραφικός χάρτης της περιοχής της λίμνης Κάρλας. (http://el.wikipedia.org/wiki)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Παλαιότερα η λίμνη Κάρλα ήταν τριγυρισμένη παντού από βουνά και βρισκόταν σε υψηλότερο υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας. Από σεισμούς προκλήθηκε ρήγμα στα σημερινά Τέμπη και χωρίστηκε η Όσσα από τον Όλυμπο, οπότε βρήκε διέξοδο προς τη θάλασσα ο Πηνειός και η περιοχή αποστραγγίστηκε. Ωστόσο απέμεινε η λίμνη Νεσσωνίς και η μικρότερη σε έκταση Βοϊβηίς.

Η έκταση που καταλάμβανε η λίμνη δεν ήταν σταθερή αλλά μεταβαλλόταν ανάλογα με τις εισροές και εκροές του νερού. Το χειμώνα του 1920-21 εξαιτίας των μεγάλων πλημμύρων του Πηνειού η λίμνη κατέλαβε τη μεγαλύτερη έκταση που έχει σημειωθεί (180.000 στρέμματα) με στάθμη 50 m πάνω από τη θάλασσα. Η κατασκευή αντιπλημμυρικών αναχωμάτων στο δεξιό ανάχωμα του Πηνειού βόρεια της Λάρισας από το 1936-40, περιόρισε την υπερχείλιση του με το Ασμάκι και κατά συνέπεια την επιφάνεια της λίμνης.

Το μέγιστο βάθος της από 5.5 m που ήταν πριν το 1940 μειώθηκε στα 2 m το 1950- 51, αν και πλημμύρισε η περιοχή το 1954- 55. Οι διακυμάνσεις της στάθμης, οι πλημμύρες της περιοχής, η δημιουργία περισσότερων γεωργικών εκτάσεων και η μείωση των αλιευμάτων συντέλεσαν στην ολική αποξήρανση της λίμνης το 1962 παρά τις σχετικές μελέτες που δεν προέβλεπαν κάτι τέτοιο.

Τα χωριά της Κάρλας που ήταν κοντά στη λίμνη και επηρεάζονταν άμεσα ή έμμεσα από αυτήν ήταν: Κανάλια, Καλαμάκι, Αμυγδαλή, Καστρί, Πλασσιά, Νάματα, Αρμένιο, Νίκη, Αχίλλειο, Στέφανοβίκειο, Ριζόμυλος, Κεραμίδι, Γλαυκή, Μελία, Σωτήριο, Έλαφος, Πλατύ κάμπος κ. α.

Η Κάρλα ήταν ένας από τους σπουδαιότερους υγρότοπους στην Ελλάδα και στα Βαλκάνια. Η ορνιθοπανίδα της περιοχής της λίμνης της Κάρλας υπολογίζεται σε 1.000.000 πουλιά που διαβιούσαν στην περιοχή, ο μεγαλύτερος αριθμός υδρόβιων πουλιών σε Ελληνικό υγρότοπο. Λίγο μετά την αποξήρανση ο αριθμός των πουλιών εκτιμήθηκε σε 450.000 ενώ σήμερα έχει μειωθεί σημαντικά. Τα 143 είδη πουλιών από τα οποία τα 55 είδη είναι υπό προστασία σήμερα, είναι εντυπωσιακός αριθμός. Ένα σημαντικό ερώτημα είναι το που πήγαν όλα αυτά τα πουλιά κι αν είναι δυνατό να επιστρέψουν. Οι ταμιευτήρες που κατασκευάστηκαν τα τελευταία χρόνια στο Καλαμάκι και τα Κανάλια έδειξαν ότι η ορνιθοπανίδα επιστρέφει στην περιοχή. Η Κάρλα είχε και πολλά είδη ψαριών, τα περίφημα καρλιώτικα ή καρλίσια ψάρια. Πολλές επομένως ήταν οι οικογένειες, πάνω από χίλιες που ζούσαν από την αλιεία στη λίμνη (Σταυροθεωδόρου, 2010).Η έντονη πτώση του υδροφόρου ορίζοντα αποτελεί σημαντική απώλεια της παραλίμνιας χλωρίδας και πανίδας. Οι έντονες κλιματικές αλλαγές, καθώς και οι έντονες κοινωνικοοικονομικές αλλαγές στις παρακάρλιες περιοχές έφεραν το μαρασμό τους.

Η ανασύσταση λοιπόν της λίμνης Κάρλα - Βοιβηίδας αναδεικνύει το πρόβλημα της αειφορικής διαχείρισης των υδατικών πόρων που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με το ευρύτερο εθνικό και παγκόσμιο πρόβλημα της προστασίας του περιβάλλοντος με παράλληλο σεβασμό στην πολιτιστική μας κληρονομιά.

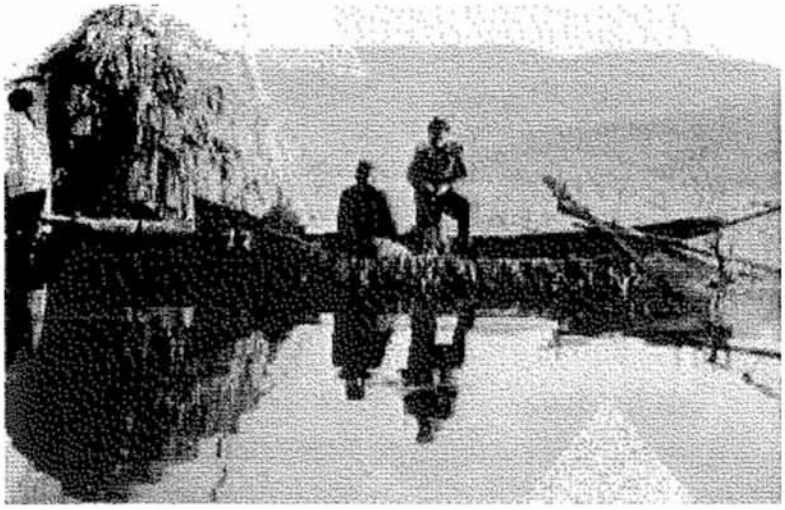
2.5.1 Η ζωή στην Κάρλα πριν και μετά την αποξήρανση

Στην περιοχή της Κάρλας οι κάτοικοι για να ζήσουν ψάρευαν γιατί η Κάρλα είχε πολλά ψάρια και οι κάτοικοι των χωριών γύρω από αυτήν ασχολούνταν με την αλιεία. Πηγές αναφέρουν ότι πάνω από 1.000 άτομα ψάρευαν στη λίμνη. Μέχρι το 1962 που αποξηράνθηκε η Κάρλα υπήρχε στην περιοχή του Καλαμακίου ένας λιμναίος οικισμός, μοναδικός στην Ελλάδα με 100 και επιπλέον καλύβες. Ομάδες ανδρών 2-5 ατόμων έφευγαν κυρίως από τα χωριά της Μαγνησίας και πήγαιναν βόρεια προς τα χωριά της Λάρισας, προς το Καλαμάκι. Εκεί τα νερά της λίμνης ήταν ρηχά και έφτιαχναν καλύβες από καλάμια πάνω στην επιφάνεια της λίμνης. Οι Καναλιώτες έφευγαν το δεκαπενταύγουστο και γύριζαν πριν το Πάσχα, την Κυριακή των Βαΐων σε ομάδες 2-5 ατόμων.

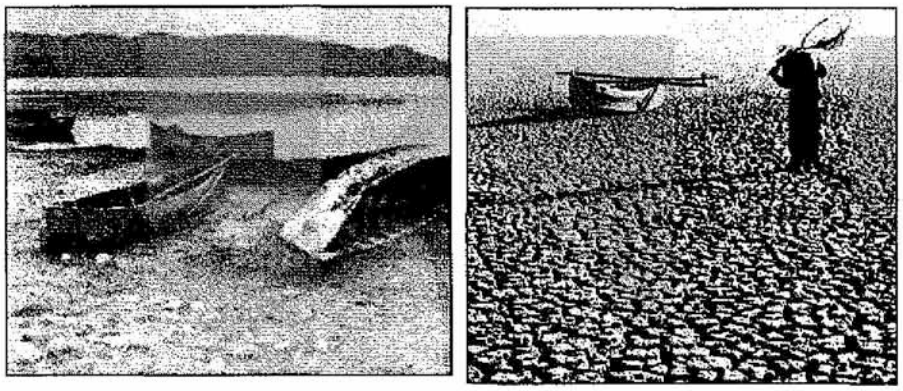
Οι ψαράδες της Κάρλας βρήκαν δικούς τους τρόπους αλιείας, όπως δίχτυα, τράτες, μακάρα, κατίκια, μανδράκια. Οι βάρκες τους, που τις έλεγαν «καράβια», ήταν μοναδικές. Δεν είχαν καρίνα και στο πίσω μέρος της είχαν ένα δοκάρι που υποβάσταζε τα κουπιά. Υπήρχαν 3 ιχθυόσκαλες που λειτουργούσαν ως το 1962. Από όλα αυτά τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η Κάρλα έπαιξε σημαντικό ρόλο στη ζωή των παρακάρλιων κατοίκων από την αρχαιότητα ως την αποξήρανσή της (Σταυροθεωδόρου, 2010).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Η λίμνη αποξηράνθηκε το 1962 με απόφαση της πολιτείας βασικά για την εξασφάλιση καλλιεργήσιμων εκτάσεων που θα αποκαλύπτονταν από την αποστράγγιση των επιφανειών. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε σήραγγα που διοχέτευσε τα νερά της λίμνης στον Παγασητικό κόλπο (Νεβεσκιώτης, 2010). Το ζήτημα της εκτέλεσης αντιπλημμυρικών έργων και άρδευσης των κτημάτων απασχόλησε κατά καιρούς τις κυβερνήσεις της νεότερης Ελλάδας αρχής γενομένης από την κυβέρνηση Τρικούπη το 1887, που δεν τελεσφόρησαν οι προσπάθειες της. Η αρχική μελέτη (Nobile 1913) αφορούσε σε κατασκευή ταμιευτήρα 45.000 στρ. στην ίδια θέση που η λίμνη είχε το χαμηλότερο υψόμετρο, που θα μπορούσε να αρδεύσει τα Παρακάρλια χωριά.



Εικόνα 2.16: Καναλιώτικη καλύβα μέσα στη λίμνη (φωτογραφία του Δημήτρη Τλούπα, λήψη 1952, φωτογραφικό αρχείο Δ. Τλούπα, αρ. 346)



Εικόνα 2.17: Ιχθυόσκαλα (φωτογραφία της Βούλας Παπαϊωάννου, λήψη -1955, φωτογραφικό αρχείο Μουσείου Μπενάκη, αρ. αρνητικού Β. 6317)

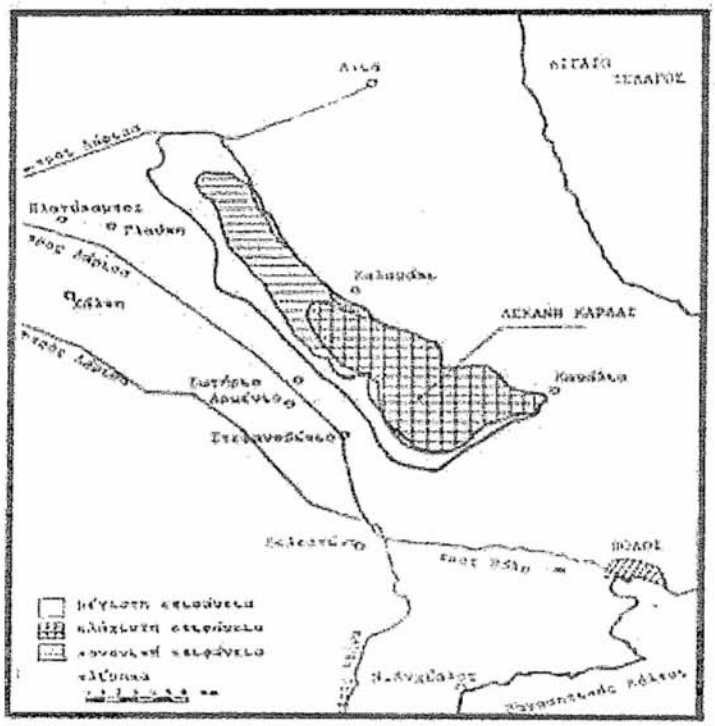
Την περίοδο 1936-41 έγιναν μικρά έργα χωρίς συντονισμό και ήταν τοπικού χαρακτήρα. Το 1959 ανατέθηκε μελέτη από το Υπουργείο Γεωργίας για την αξιοποίηση της πεδιάδας της Κάρλας, με δεδομένα την κατασκευή ταμιευτήρα 64.700 στρεμμάτων, σήραγγας και τάφρων πεδινών υδάτων. Η λίμνη θα χρησιμοποιούνταν για άρδευση με αρδευτικά κανάλια και θα τροφοδοτούνταν με νερά του Πηνειού. Με τη κατασκευή της σήραγγας που άρχισε τον Ιανουάριο του 1957 και τελείωσε τον Οκτώβριο του 1962, άρχισε η εκκένωση της λίμνης που ολοκληρώθηκε το 1962.

Τα δυσμενή αποτελέσματα της αποξήρανσης άρχισαν να παρουσιάζονται σταδιακά αρκετά χρόνια αργότερα. Η κατασκευή της σήραγγας δεν ήταν έγκλημα, όπως έγραψε ο τοπικός τύπος, έγκλημα ήταν που οι αρμόδιοι φορείς δεν προχώρησαν στην αποκατάσταση της λίμνης, όπως αρχικά είχε προγραμματιστεί (Σταυροθεωδόρου, 2010).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Η αποξήρανση της Κάρλας αναδεικνύει ένα τμήμα της τεχνικής κληρονομιάς σε ότι αφορά τα αποξηραντικά έργα, αλλά επέφερε ριζικές οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές αλλαγές στους παράλιους οικισμούς, όπου αναγνωρίζεται μια παθητική προσαρμογή των ανθρώπων με έντονη αλιευτική παράδοση στο νέο περιβάλλον, μεταβολή των παραγωγικών δραστηριοτήτων και ένας οικονομικός μαρασμός προκαλώντας ένα αυξημένο κύμα αστυφιλίας.

Τα αποτελέσματα σε περιβαλλοντικό επίπεδο ήταν η ραγδαία πτώση της υπόγειας υδροφορίας, η απώλεια της παραλίμνιας χλωρίδας και πανίδας και οι κλιματολογικές μεταβολές στο σύνολο του Θεσσαλικού χώρου, (Νεβεσκιώτης, 2010).



Εικόνα 2.18: Μέγιστη και ελάχιστη επιφάνεια της τέως λίμνης Κάρλας. (http://7gym-laris.lar.sch.gr/ergasies/karla.htm

2.5.2 Η Κάρλα σήμερα

Σχεδόν 40 χρόνια μετά την αποξήρανση της η Κάρλα ξαναγίνεται λίμνη. Όχι τόσο μεγάλη όσο την έκανε η φύση, αλλά πάντως ένα βασικό τμήμα της αναδημιουργείται. Και αυτό γιατί στα χρόνια που πέρασαν, καλλιεργητές και κράτος κατέληξαν στην κοινή διαπίστωση: η φύση εκδικείται, για τις ανθρώπινες επεμβάσεις.

Η έναρξη της επαναδημιουργίας της λίμνης οδήγησε και στην εμφάνιση περιορισμένου αριθμού πουλιών φοινικόπτερων για πρώτη φορά, γεγονός που θα αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω παρακολούθησης από τον Φορέα Διαχείρισης Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας - Μαυροβουνίου - Κεφαλόβρυσου - Βελεστίνου (Π.Ο.Κα. Μα.Κε.Βε). Παράλληλα έχουν παρατηρηθεί ζευγάρια μαυροπελαργών και γενικά το περιβάλλον της προς ανασύσταση λίμνης δείχνει να ανταποκρίνεται θετικά στις έως σήμερα παρεμβάσεις.

Οι επιστήμονες και οι οικολογικές οργανώσεις εκτιμούν ότι περίπου 160 είδη πουλιών θα ζήσουν στη λίμνη όταν καλυφθούν και τα 40.000 στρέμματα της έκτασής της από νερό. Εκτός από είδη πτηνών που δεν απειλούνται και θεωρούνται κοινά, στην Κάρλα θα μπορέσουν να ζήσουν και κάποια είδη πτηνών, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των παγκοσμίως απειλουμένων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Μάλιστα, σύμφωνα με τους επιστήμονες, η λίμνη θα αποτελέσει πόλο έλξης για είδη πανίδας, όπως η βαλτόπαπια, το κιρκινέζι και ο αργυροτσικνιάς, ήτοι είδη, που ο πληθυσμός τους έχει συρρικνωθεί. Ωστόσο, με τη συγκεκριμένη εξέλιξη θα πρέπει να επισημανθεί και η ανάγκη πλέον για την προστασία όλης αυτής της χλωρίδας και της πανίδας στην περιοχή ειδικά από τους λαθροκυνηγούς.

Τα χωράφια που προήλθαν από την αποξήρανση της Κάρλας, έκτασης περίπου 78.000 στρεμμάτων, δεν απέδωσαν τα αναμενόμενα οφέλη, αφού πλημμύριζαν με την πρώτη βροχή και οι παραγωγοί ζούσαν στην ανασφάλεια. Επιπλέον ποτέ δεν έγινε διανομή αγροτικής γης. Οι ακτήμονες καλλιεργητές εκμίσθωναν με συμβολικό τίμημα κάθε χρόνο τις εκτάσεις. Άλλοτε οι καλλιεργητές υπενοικίαζαν τις εκτάσεις που τους δίδονταν. Υπήρξαν και άτομα που παρουσίασαν τίτλους ιδιοκτησίας από την Τουρκοκρατία επί των χωραφιών που δημιουργήθηκαν από την αποξήρανση της λίμνης.

Τα κτήματα της Κάρλας όμως άρχισαν να γίνονται βούρκος. Τα άλατα που είχαν συσσωρευτεί στο έδαφος από την πρώην λίμνη δεν ευνοούσαν τις καλλιέργειες. Επιπλέον στην πρώτη νεροποντή η περιοχή ξαναγινόταν λίμνη. Το 1962 στη λίμνη των 130.000 στρεμμάτων κατασκευάστηκε μια σήραγγα και τα νερά της διοχετεύτηκαν στον Παγασητικό. Το συνολικό έργο προέβλεπε τον εγκιβωτισμό και τη δημιουργία μικρής τεχνητής λίμνης, καθώς και την κατασκευή αρδευτικού και αποστραγγιστικού δικτύου, τα οποία δεν έγιναν ποτέ. Αντίθετα η σήραγγα πολλές φορές ήταν φραγμένη και η σοδειά καταστρεφόταν.

Υπήρχαν και οι ψαράδες της Κάρλας, που έμειναν χωρίς εισόδημα μετά την αποξήρανσή της. Οι άνθρωποι αυτοί εκ των πραγμάτων έγιναν γεωργοί. Οι ισορροπίες ανατράπηκαν. Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας άρχισε να μειώνεται επικίνδυνα. Τα νερά σε ορισμένα σημεία έγιναν υφάλμυρα.

Η κατάσταση έφθασε στο απροχώρητο. Και το ΥΠΕΧΩΔΕ, ως αρμόδιο υπουργείο για το περιβάλλον, έπειτα από εμπεριστατωμένη μελέτη, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η λίμνη πρέπει να αναδημιουργηθεί, τουλάχιστον σε ένα τμήμα της, έκτασης 38.000 στρεμμάτων.

2.5.3 Το σχέδιο της επαναδημιουργίας

Η δημιουργία της νέας λίμνης, στο χαμηλό τμήμα της περιοχής της παλαιάς, σχεδιάστηκε να καταλαμβάνει έκταση 38.000 στρεμμάτων και περιβάλλεται από τους γύρω ορεινούς όγκους. Όπου αυτοί δεν υπάρχουν σχηματίζονται αναχώματα συνολικού μήκους 13 χλμ. Στη λίμνη παροχετεύονται τα νερά της ευρύτερης λεκάνης απορροής μέσω τεσσάρων κυρίων χωμάτινων συλλεκτήρων, συνολικού μήκους 39 χλμ., καθώς και τα χειμερινά νερά του Πηνειού ποταμού, που αποτελούν το 60% της τροφοδοσίας της λίμνης. Η χωρητικότητά της σχεδιάστηκε για την αντιπλημμυρική προστασία της γύρω πεδιάδας.

Για τη στήριξη της υδρόβιας ορνιθοπανίδας, το εσωτερικό των αναχωμάτων της λίμνης διαμορφώνεται κατά τόπους βαθμιδωτά. Η περιοχή γύρω από τη λίμνη έχει φυτευτεί για να λειτουργήσει το φυσικό οικοσύστημα που προκύπτει. Παραλίμνια υγροτοπικά συστήματα λειτουργούν ως φυσικό σύστημα καθαρισμού των υδάτων, πριν από τη διοχέτευσή τους στη λίμνη. Προβλέπεται η κατασκευή ενός εξωτερικού υγροτόπου- αναθρεπτήρα για την αναπαραγωγή και τον εμπλουτισμό της λίμνης με ιχθυοπανίδα, καθώς και ιχθυοδιόδων για την ελεύθερη επικοινωνία των ψαριών.

Εκτιμάται ότι με την επαναδημιουργία της λίμνης θα αρδευθούν οι γύρω περιοχές σε έκταση 92.500 στρεμμάτων. Από αυτήν τα 50.000 στρέμματα θα αρδεύονται προσωρινά μέσω του δικτύου των τάφρων που υπάρχουν, οι οποίες θα συμπληρωθούν με νέα έργα. Η υπόλοιπη έκταση των 42.500 στρεμμάτων θα εξυπηρετηθεί με μόνιμα, πλήρη δίκτυα. Με τον τρόπο αυτό θα αναδιαρθρωθεί η διαχείριση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, ώστε να περισσέψει νερό, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της υδροδότησης της πόλης του Βόλου. Το σχέδιο αναδιάρθρωσης των καλλιεργειών προβλέπει τη μείωση της καλλιέργειας του βαμβακιού και την αύξηση της αμειψισποράς και των βιολογικών καλλιεργειών, ώστε να μειωθεί η χρήση των αγροχημικών στην ευρύτερη περιοχή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Η επαναδημιουργία της λίμνης των 38.000 στρεμμάτων (η λίμνη των Ιωαννίνων έχει έκταση 22.000 στρέμματα) αναμένεται να αλλάξει σταδιακά τον χαρακτήρα της περιοχής. Στόχος είναι να αποκατασταθούν ενέργειες του παρελθόντος, που με τα σημερινά δεδομένα αποτιμώνται ως μερικώς λανθασμένες, αλλά και να επαναλειτουργήσει το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον με βάση τις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης.

Η επανασύσταση της λίμνης της Κάρλας και η ανασυγκρότηση όλων των άλλων υποδομών για την υδροδότηση και άρδευση, είναι εξαιρετικά σημαντικές για την περιβαλλοντική και παραγωγική ανασυγκρότηση της ευρύτερης περιοχής. Πρόκειται για ένα μεγάλο έργο, όχι μόνο για τη Μαγνησία αλλά και για τη Θεσσαλία. Συμβολίζει τη μεγάλη στροφή της χώρας σε έργα επανάκτησης περιβαλλοντικών απωλειών του παρελθόντος.

Το έργο της επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας με 160,000 κυβικά μέτρα επιφανειακών υδάτων, είναι ένα έργο πολλαπλής σκοπιμότητας και ωφέλειας που, που συντελεί στη περιβαλλοντική αναβάθμιση της ευρύτερης περιοχής, στην αντιπλημμυρική προστασία, στην αποκατάσταση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα παρά τη περιοχή της λίμνης, στην εξασφάλιση επιφανειακού νερού για την άρδευση 100.000 στρεμμάτων, σε πρώτη φάση, που σήμερα αρδεύονται με γεωτρήσεις, στην ενίσχυση της ύδρευσης του Βόλου με 15 εκατ. κυβικά μέτρα νερού ετησίως, δηλαδή το 50% των αναγκών της πόλης, με την εξεύρεση επαρκών ποσοτήτων νερού από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα στην οικοτουριστική και οικονομική ανάπτυξη της περιοχής.

Εκτός όμως από τις προφανείς αυτές ωφέλειες, η λίμνη της Κάρλας στη Μαγνησία μαζί με τους ταμιευτήρες της Γυρτώνης και του Σμοκόβου στη Λάρισα και τη Καρδίτσα και με τα άλλα έργα εγγείων βελτιώσεων που προγραμματίζονται ή εκτελούνται στη Θεσσαλία θα αξιοποιήσουν αποτελεσματικά το υδατικό δυναμικό της λεκάνης του Πηνειού, έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί και να υποστηριχθεί στα αρμόδια όργανα της ΕΕ η αναγκαιότητα ενίσχυσης με τους απαιτούμενους υδατικούς πόρους από τη λεκάνη του Αχελώου.

Οι εκπονούμενες μελέτες άρχισαν από την περίοδο του 1911-1913, από την μελέτη του Ιταλού μηχανικού Nobile, σύμφωνα με την οποία προβλεπόταν η κατασκευή των αναχωμάτων εγκιβωτισμού του Πηνειού, η διάνοιξη σήραγγας με σκοπό την αποξήρανση της λίμνης Κάρλας και η δημιουργία ταμιευτήρα σε τμήματα της αποξηραμένης λίμνης, για την ανάσχεση των νερών της πλημμύρας και αποταμίευση νερού για άρδευση.

Την περίοδο 1920-1921. ο Jackson και ο Macdonald από μια αγγλική εταιρία πρότειναν παρεμβάσεις στην περιοχή. Το 1927 έγινε χαρτογράφηση της περιοχής και διανομή κλήρων σε κατοίκους των χωριών.

Την περίοδο 1938-1939 έγιναν τα έργα διευθέτησης του χειμάρρου Γκουσμπασανιώτη για την αντιπλημμυρική προστασία της περιοχής Πλατύκαμπου. Όλες αυτές οι παρεμβάσεις είχαν θετικά αποτελέσματα στις περιοχές που έγιναν, αλλά συγχρόνως συνέτειναν στη διόγκωση της λίμνης και στην αχρήστευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων από την εισβολή των νερών στις χαμηλότερες παρακάρλιες περιοχές.

Το 1949-1950 έγιναν τα πρώτα οργανωμένα έργα στη λεκάνη απορροής της Κάρλας από την εταιρία BOOT LTD. Το 1951 έγινε η διάνοιξη της κύριας τάφρου Τι. Το 1952 έγινε η αποτύπωση των εκτάσεων της λίμνης, η δημιουργία τοπογραφικών διαγραμμάτων και κτηματολογικού χάρτη.

Το 1953 ανατέθηκε στον μηχανικό Ι. Παπαδάκη από το Υπουργείο Γεωργίας, η εκπόνηση προμελέτης εγγειοβελτιωτικών έργων παρακαρλίου περιοχής. Η συνολική έκταση της περιοχής αυτής είναι 197.000 στρέμματα.

Η μελέτη αυτή τελείωσε το 1954 και προέβλεπε κατασκευή αρδευτικού και αποστραγγιστικού δικτύου που να αποτελείται από τάφρους και διώρυγες. Το 1959 ανατέθηκε οριστική μελέτη στο γραφείο Ν. Νικολαίδη για την αξιοποίηση της πεδιάδας Λάρισας-Κάρλας και με δεδομένη την κατασκευή του ταμιευτήρα 64.700 στρεμμάτων καθώς και των άλλων έργων. Με βάση την μελέτη του Νικολαίδη άρχισε η κατασκευή της χωρίς όμως την παράλληλη κατασκευή του φράγματος για μετατροπή της λίμνης σε υδαταποθήκη. Έτσι το 1961, έτος ολοκλήρωσης κατασκευής της σήραγγας, άρχισε και η εκκένωση της υδάτινης μάζας της λίμνης στον Παγασητικό κόλπο. Η αποξήρανση της λίμνης ολοκληρώθηκε το 1962. Παράλληλα έγινε διάνοιξη των τάφρων αποστράγγισης πεδινών υδάτων 2Τ, 3Τ,4Τ,5Τ και 6Τ που πρότεινε η μελέτη Παπαδάκη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Το 1977 εκπονήθηκε Προκαταρκτική Μελέτη Αντιπλημμυρικών και Αποστραγγιστικών Έργων Μείζονος Περιοχής Κάρλας από το γραφείο ΑΛΦΑ - ΩΜΕΓΑ.

Το 1980, το Υπουργείο Δημοσίων Έργων ανέθεσε στα συνεργαζόμενα γραφεία ΑΛΦΑ-ΩΜΕΓΑ Ν. Νικολαίδη - Εξάρχου τη σύνταξη Προμελέτης του Ταμιευτήρα Κάρλας μαζί με τα έργα υδροδότησής του. Σύμφωνα με την τελευταία μελέτη η έκταση του ταμιευτήρα πρέπει να είναι 42.000 στρέμματα.

Το 1984 εκπονήθηκε με μέριμνα του Υπουργείου Προεδρίας - Υπηρεσίας Νέας Γενιάς μελέτη με τίτλο «Επιπτώσεις Αποξήρανσης Λίμνης Κάρλας ~ Ενιαίος Φορέας Καλλιέργειας Ταμιευτήρα».

Το 1985 εκπονήθηκε με μέριμνα του Αγροτοβιομηχανικού Συνεταιρισμού παρακάρλιων χωριών μελέτη κατασκευής μικρών ταμιευτήρων στην περιοχή της τέως λίμνης Κάρλας.

Το Σεπτέμβριο του 1987 εκπονήθηκε αναγνωριστική έκθεση από τον Θ. Μαντζιάρα με μέριμνα του ΥΠΕΧΩΔΕ, στο πλαίσιο της μελέτης ανάπτυξης εγγειοβελτιωτικών έργων Θεσσαλίας, σε συνδυασμό με την εκτροπή του Αχελώου. Επίσης την ίδια χρονιά από το ΥΠΕΧΩΔΕ έγινε η μελέτη εκτροπής του Αχελώου, όπου προτείνεται η χρήση νερών του Αχελώου για άρδευση της περιοχής της Κάρλας. Για την αντιπλημμυρική προστασία προτείνεται ταμιευτήρας 15.000 - 20.000 στρεμμάτων και νέα σήραγγα προς το Αιγαίο. Ακόμα η Νομαρχία Μαγνησίας εκπόνησε μελέτες για την κατασκευή ταμιευτήρα στην Κάρλα και την κατασκευή αντλιοστασίου στον ταμιευτήρα της Κάρλας. (Νεβεσκιώτης, 2010)

Τα έργα της επαναδημιουργίας της λίμνης, ξεκίνησαν το 1999 με την υπογραφή της σύμβασης για τη κατασκευή του Ταμιευτήρα και των συναφών έργων. Το 2001 εντάχθηκε στο επιχειρησιακό πρόγραμμα ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (ΕΠΠΕΡ) με συνολικό προϋπολογισμό 152 εκατ. ευρώ. Επίσης το έργο εντάχθηκε στο ΕΣΠΑ.

Για τον ταμιευτήρα Κάρλας και Συναφή έργα, η σύμβαση υπογράφηκε στις 24 Σεπτεμβρίου 1999 και περαιώθηκε στις 30 Ιουνίου 2006 συνολικής δαπάνης 99 εκατ. ευρώ με ΦΠΑ. Με την εργολαβία αυτή ολοκληρώθηκε η κατασκευή του ταμιευτήρα και σημαντικό τμήμα των συλλεκτήρων.

Για την Κατασκευή των απαιτούμενων έργων τροφοδοσίας της λίμνης από τον ποταμό Πηνειό, η σύμβαση υπεγράφη την 21η Αυγούστου 2007 και το έργο ολοκληρώθηκε μέσα στο 2010. Η δαπάνη του έργου ανήλθε σε 6,377 εκατ. ευρώ. Το φυσικό αντικείμενο της εργολαβίας περιλαμβάνει το έργο υδροληψίας με αντλιοστάσιο στον Πηνειό για την τροφοδότηση της λίμνης Κάρλας από τις απορροές του Πηνειού κατά την χειμερινή και εαρινή περίοδο και επεμβάσεις κατά μήκος του συστήματος μεταφοράς νερού στις υφιστάμενες διώρυγες - τάφρους 2Δ -6Τ-7Τ-2Τ-Σ4-1Τ. Ολοκληρώθηκε επίσης και η εργολαβία καθαρισμού των τάφρων 7Τ και 2Τ που δημοπρατήθηκε στις 13 Απριλίου 2010: Για την απρόσκοπτη λειτουργία και των 5 αντλιοστασίων θα πρέπει να γίνουν εργασίες διευθέτησης των τάφρων 7Τ και 2Τ σε μικρό σχετικά μήκος -περίπου 500 μ.- με αναχώματα, προκειμένου να αυξηθεί η παροχετευτικότητά τους.

Βρίσκονται σε εξέλιξη 5 εργολαβίες. Η εργολαβία της ορεινής υδρονομίας, προϋπολογισμού 12,9 εκατ. ευρώ, δημοπρατήθηκε στις 12 Νοεμβρίου 2010 και αναμένεται η έγκριση του Ελεγκτικού Συνεδρίου για την υπογραφή της Σύμβασης. Το έργο περιλαμβάνει τα απαιτούμενα συμπληρωματικά αντιπλημμυρικά έργα (στις περιοχές της Αγιάς, του Καλαμακίου και της Κερασιάς) στο πεδινό και ημιπεδινό τμήμα των λεκανών και των απαιτούμενων έργων ορεινής υδρονομίας, τεχνικά και φυτοκομικά στα λοφώδη ή ορεινά τμήματα των λεκανών για την προστασία των συλλεκτήρων. Είναι η τελευταία εργολαβία για την ολοκλήρωση του έργου της επαναδημιουργίας της λίμνης. Η εργολαβία μεταφοράς και διανομής νερού της λίμνης (δίκτυο άρδευσης) προϋπολογισμού 25 εκατ. ευρώ περίπου που χρηματοδοτείται από αμιγώς εθνικούς πόρους. Το έργο έχει δημοπρατηθεί από το 2008 αλλά δεν διατέθηκαν μέχρι τέλος του 2009 πιστώσεις για να ξεκινήσει. Οι εργασίες βρίσκονται σε εξέλιξη αλλά με αργούς ρυθμούς λόγω περιορισμού των πιστώσεων. Με την κατασκευή του έργου θα μπορούν να αρδεύονται σε πρώτη φάση 100.000 στρέμματα με 60 εκατ. κυβικά μέτρα νερό ετησίως.

Υπογράφηκε στις 30 Δεκεμβρίου 2009 η σύμβαση των έργων ανάδειξης του περιβάλλοντος της λίμνης προϋπολογισμού 4,226 εκατ. ευρώ και οι εργασίες προχωρούν με κανονικό ρυθμό. Το έργο περιλαμβάνει την κατασκευή υποδομών ήπιας τουριστικής ανάδειξης της λίμνης (μουσείο στα κανάλια, Κέντρο πληροφόρησης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

στο Στεφανοβίκειο, μονοπάτια, θέσεις θέας, παρατηρητήρια κ.λπ.) καθώς και των απαραίτητων φυτοτεχνικών παρεμβάσεων.

Η εργολαβία της ύδρευσης περιοχής Βόλου προϋπολογισμού 9,084 εκατ. ευρώ ξεκίνησε στις 6 Ιουνίου 2008 και περιλαμβάνει τη διάνοιξη και εκμετάλλευση 33 νέων συνολικά υδρογεωτρήσεων με κατάργηση των αντίστοιχων αρδευτικών, καθώς και την αξιοποίηση 5 γεωτρήσεων από το υφιστάμενο δίκτυο της ΔΕΥΑ Μείζονος περιοχής Βόλου, την κατασκευή δικτύου συλλογής των υδρογεωτρήσεων, την κατασκευή δύο αντλιοστασίων, την κατασκευή αγωγού μεταφοράς ο οποίος μεταφέρει το νερό στην υφιστάμενη δεξαμενή της ΔΕΥΑΒ Μείζονος περιοχής Βόλου. Με το έργο αυτό προβλέπεται η τροφοδότηση του πολεοδομικού συγκροτήματος Βόλου με 15.000.000 κυβικά νερού για ύδρευση που καλύπτει το 50% των αναγκών του και είναι ο μεγαλύτερος δείκτης ωφελιμότητας του συνολικού έργου της επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας. Μέχρι σήμερα δαπανήθηκαν για το έργο 4.000.000 ευρώ.

Έχουν εκτελεστεί όλες οι εργασίες και απομένει μόνο η διάνοιξη 33 συνολικών υδρογεωτρήσεων. Έχει εγκριθεί παράταση προθεσμίας για τις προαναφερθείσες γεωτρήσεις μέχρι 31 Δεκεμβρίου 2011.

Υπογράφηκε στις 19 Ιουλίου 2010 η σύμβαση της εργολαβίας των υπολειπόμενων εργασιών (εργολαβία σκούπα). Ο προϋπολογισμός της μελέτης του έργου ανέρχεται σε 18.000.000 ευρώ συμπεριλαμβανομένου ΦΠΑ. Το φυσικό αντικείμενο της εργολαβίας περιλαμβάνει την κατασκευή των υπολειπόμενων εργασιών που δεν έχουν υλοποιηθεί από την πρώτη εργολαβία Οι εργασίες άρχισαν και προχωρούν με ικανοποιητικό βαθμό και η διάρκεια της σύμβασης είναι 2,5 έτη.

2.5.4 Έργα διαμόρφωσης της λίμνης

Στο πλαίσιο των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας και αποχέτευσης της Θεσσαλίας κατασκευάστηκαν και ορισμένα έργα που είναι σημαντικά για την περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας όπως τα αναχώματα Πηνειού από Λάρισα μέχρι Γυρτώνη, Συλλεκτήρες, οι Τάφροι 1Τ και 2Τ και η σήραγγα της Κάρλας.

Ανατολικά και Δυτικά της λίμνης είναι κατασκευασμένα δύο αναχώματα μέσου ύψους 9 m, μήκους 2.700 m περίπου και 11.300 m περίπου, αντίστοιχα. Το βάθος του νερού στη λίμνη έχει σχεδιαστεί να κυμαίνεται εποχιακά μεταξύ 2.50m και 5m με περιθώριο για περιπτώσεις πλημμύρων 1.2m.

Τα όμβρια νερά των υψηλών περιοχών της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας θα συλλέγονται στους συλλεκτήρες Σ3(32.320 m), Σ4(13.740 m), Σ6 (4.550 m) και Σ7 (2.600m) μέσω των οποίων θα οδηγούνται στη λίμνη. Οι συλλεκτήρες αυτοί κατασκευάζονται με την εκσκαφή τραπεζοειδούς κοίτης ή/και την κατασκευή αναχωμάτων εγκιβωτισμού με πλάτος πυθμένα μεταβλητό από ανάντη προς τα κατάντη και ύψος αναχωμάτων μέχρι 5m.

Τα όμβρια νερά των χαμηλών περιοχών αντλούνται στη λίμνη με τα αντλιοστάσια αποχέτευσης DP1 Q=24 m3/sec στον κόμβο Πέτρας στο δυτικό ανάχωμα και το DP2 με παροχή Q= 3,6 m3/sec στον κόμβο Καναλιών. (Σταυροθεωδόρου, 2010).

2.5.5 Μορφολογία της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας

Η μορφολογία της λεκάνης κατάκλισης της Κάρλας μπορεί να περιγραφεί από τα εξής στοιχεία: Τα εδάφη που θα κατακλύσει είναι υποβαθμισμένα και κατώτερης ποιότητας. Ο ταμιευτήρας καταλαμβάνει σε μέγιστο ποσοστό εκτάσεις του Δημοσίου και έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα απαλλοτριώσεων. Ο πυθμένας της λίμνης παρουσιάζει στεγανότητα, ενώ παρουσιάζονται διαρροές σε τμήματα της φυσικής περιμέτρου της λίμνης. Τα μέγιστα υψόμετρα της περιοχής της Κάρλας φθάνουν στο +52m και κατά τόπους μέχρι +56 m και +58 m. Το χαμηλότερο υψόμετρο της περιοχής της Κάρλας είναι +44ιη που είναι το ελάχιστο υψόμετρο της Θεσσαλικής πεδιάδας. (Αμπράζη, 2009).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

2.5.6 Το Βιοτικό περιβάλλον της λίμνης

Η αλιεία και το κυνήγι ήταν οι κύριοι πόροι εισοδήματος για τους Έλληνες από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Οι κάτοικοι των χωριών γύρω είτε γίνονταν ψαράδες είτε ασχολούνταν με την αλιεία, κυρίως οι κάτοικοι των Καναλιών.

Μετά την αποξήρανση μεγάλο ποσοστό των κατοίκων μετανάστευσε στην Αθήνα, τη Θεσσαλονίκη, αλλά και στο εξωτερικό. Το ποσοστό που μετανάστευσε ήταν περίπου 30% και κυρίως ψαράδες, το 40% στράφηκε στην γεωργία, το 20% έγιναν βιομηχανικοί εργάτες στο Βόλο ,ενώ το 10% ασχολήθηκε με την κτηνοτροφία. (Αμπράζη, 2009).

Η πληθώρα των μελετών για την αξιοποίηση της περιοχής της Κάρλας, δεν αντιμετώπισε σε καμία περίπτωση ως σύνολο τις επιπτώσεις των προτεινόμενων έργων στον παρακάρλιο πληθυσμό και αγνόησε τις κοινωνικές συνθήκες και αντιθέσεις της περιοχής. (Σταυροθεωδόρου, 2010).

2.5.7 Περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις

Η όποια επιλογή κατασκευής έργων πρέπει να γίνεται με μέτρο τον άνθρωπο και την ειρηνική συνύπαρξη του με τη μητέρα φύση. Η λίμνη Κάρλα εξαφανίστηκε από το χάρτη της Θεσσαλίας. Αποξηράνθηκε για να μην υπάρχουν έλη και να μην πλημμυρίζουν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις αλλά τα προβλήματα δεν έπαψαν για τους κατοίκους των παρακάρλιων κοινοτήτων. Το 1987 ήταν όλοι σε επιφυλακή λόγω της πλημμύρας στην περιοχή. Τα ίδια σχεδόν και το 1985 και άλλες χρονιές. Όλα τα αρδευτικά δίκτυα έχουν παραλλήλως προς το δίκτυο των διωρύγων και δίκτυο χανδάκων για το νερό όπως προβλεπόταν με την κατασκευή του ταμιευτήρα των 64.700 στρεμμάτων.

2.5.8 Εδαφολογικές Συνθήκες

Τα εδάφη της περιοχής μελέτης προέρχονται από αλλουβιακά, λιμναία και ελώδη αποθέματα ποικίλης μηχανικής σύστασης, δημιουργηθέντα από τα φερτά υλικά του Πηνειού ποταμού και των άλλων μικρότερης σημασίας ποταμών και χειμάρρων της περιοχής. Χαρακτηρίζονται ως νεαρά εδάφη, αλλουβιακής προέλευσης και οι διαδικασίες εδαφογένεσης δεν επέδρασαν έντονα στο να δημιουργηθούν γενετικοί ορίζοντες και ανεπτυγμένα εδαφικά προφίλ.

Η πεδινή περιοχή της Κάρλας και της περιοχής μελέτης διακρίνεται από τους ακόλουθους τύπους εδαφοσειρών, οι οποίοι περιγράφονται επιγραμματικά:

Εδαφοσειρά Κάρλας: εδάφη βαριάς σύστασης, αργιλώδη, βραδείας έως μετρίως βραδείας διηθητικότητας και διαπερατότητας, ισχυρώς αλκαλιωμένα και με έμφαση έντονων οξειδαναγωγικών φαινομένων. Η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία είναι 1,5%.

Εδαφοσειρά Καλαμακίου: εδάφη ελαφριάς σύστασης, κολλουβιακής προέλευσης, ιδιαίτερα φτωχά σε οργανική ουσία (0,5-1%), ταχείας έως μέτριας διηθητικότητας και όξινου pH.

Εδαφοσειρά Ριζόμυλου: εδάφη αλλουβιακά μέτριας έως βαριάς σύστασης, μέτριας διηθητικότητας. Η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία είναι 1-1.5%.

Εδαφοσειρά ΝΔ άκρου λεκάνης Κάρλας: εδάφη βαριάς έως μέσης σύστασης καλά στραγγιζόμενα. Η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία είναι 1-2%.

Εδαφοσειρά Καναλιών: εδάφη κολλουβιακά, μέσης έως βαριάς σύστασης, καλά στραγγιζόμενα και διαπερατά. Η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία είναι μικρότερη του 2%.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Τα πεδινά τμήματα των λεκανών παρουσιάζουν ένα αρκετά γόνιμο και βαθύ έδαφος σε αντίθεση με τα ημιορεινά και ορεινά τμήματα τους όπου οι κλίσεις αρχίζουν να ξεπερνούν το 25% και το βάθος του εδάφους να μειώνεται. Εξαίρεση ίσως να αποτελεί η λεκάνη Λ7β όπου η χλωριδικές διαπλάσεις που εμφανίζονται με πολύ καλά δομημένους θαμνώδες αείφυλλων, πλατύφυλλων και συστάδες μικρής έκτασης χαλεπίου, πεύκης, δρυός αλλά και ελάτης, μαρτυρούν το αρκετά βαθύ έδαφος της περιοχής ανεξάρτητα των πολύ δυσμενών κλίσεων εδάφους. (Μελέτη συμπληρωματικών αντιπλημμυρικών έργων και έργων ορεινής υδρονομίας στη λεκάνη της λίμνης Κάρλας. Οριστική Μελέτη Δασοτεχνικών Έργων. Γεωπληροφορική ΑΕΜΕ.)

2.5.9 Μετεωρολογικές Συνθήκες

Το κλίμα της Θεσσαλίας είναι μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και υγρό και ψυχρό χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία φθάνει περίπου τους 18°C σε υψόμετρο 0 m και 11°C σε υψόμετρο 1000 m. Η μέση ετήσια περίπου βροχόπτωση ελαττώνεται από δυτικά προς ανατολικά και από τα όροι προς τις πεδιάδες. Στη δυτική πεδιάδα οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 600-900 mm με υγρότερο τμήμα την οριακή ζώνη προς τα δυτικά. Στην ανατολική πεδιάδα η οποία είναι κατά πολύ ξηρότερη αν και γειτνιάζει με το Αιγαίο, οι τιμές τις βροχόπτωσης κυμαίνονται μεταξύ 500-550 mm. Το υψόμετρο επηρεάζει σημαντικά το ύψος της βροχής. Στα δυτικά όροι η ετήσια βροχόπτωση φτάνει τα 1800mm. Ειδικότερο για το καθορισμό των κλιματολογικών στοιχείων της πεδιάδας Λαρίσης- Κάρλας έχουν κυρίως ληφθεί υπόψη οι διατιθέμενες παρατηρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού Λαρίσης γιατί από τους δύο, από τους δύο σταθμούς που λειτουργούν στη περιοχή μελέτης ο σταθμός Λαρίσης διαθέτει τις πιο μακροχρόνιες μετρήσεις. Βάση των βροχοπτώσεων και της θερμοκρασίας, το κλίμα της περιοχής μελέτης κατατάσσεται στο ηπειρωτικό ημίξηρο, χαρακτηριζόμενο, από θερμό και ξηρό καλοκαίρι και ψυχρό και υγρό χειμώνα. Η ξηρά περίοδος διαρκεί από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο και η υγρή από τον Οκτώβριο μέχρι και Απρίλιο. (Μελέτη συμπληρωματικών αντιπλημμυρικών έργων και έργων ορεινής υδρονομίας στη λεκάνη της λίμνης Κάρλας. Οριστική Μελέτη Δασοτεχνικών Έργων. Γεωπληροφορική ΑΕΜΕ).

Από τα στοιχεία της ΕΜΥ (Μ.Σ. Λάρισας) προκύπτει ότι οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι οι ανατολικοί με ποσοστό εμφάνισης 16.708% και ακολουθούν οι βορειοανατολικοί και οι νοτιοανατολικοί, οι βόρειοι, οι δυτικοί και οι βορειοδυτικοί. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι οι άνεμοι είναι χαμηλής εντάσεως κυρίως 2-4 Beaufort ενώ το ποσοστό νηνεμίας είναι πολύ μεγάλο και ξεπερνά το 55%.

Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εντοπίζονται στο επιφανειακό στρώμα, ενώ σε βάθη μεγαλύτερα από 200m εμφανίζεται θερμοκρασιακή ομοιομορφία, χαρακτηριστική για κάθε υδατική λεκάνη. Η θερμοκρασία επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου και άλλων συστατικών, το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών, τη διαδικασία διάσπασης των οργανικών ουσιών που υπάρχουν και είναι υπεύθυνοι για την θερμική στρωμάτωση και την αναστροφή των νερών. Άλλα φυσικά χαρακτηριστικά είναι η πυκνότητα, το χρώμα, η διαύγεια, η απορρόφηση ηλιακού φωτός

Η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή της Λάρισας είναι 15,7°0. Ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση θερμοκρασία 27,2 ενώ ο ψυχρότερος είναι ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία 5,2°0. Ή διαφορά αυτή των 22°0 στη θερμοκρασία προσδίδει στο κλίμα ηπειρωτικό χαρακτήρα. Η μέση μέγιστη ετησίως θερμοκρασία που έχει παρατηρηθεί τη περίοδο 1955-1997 είναι 21,3°0 και η μέση ελάχιστη ετησίως είναι 8,ό°0. (Μελέτη συμπληρωματικών αντιπλημμυρικών έργων και έργων ορεινής υδρονομίας στη λεκάνη της λίμνης Κάρλας. Οριστική Μελέτη Δασοτεχνικών Έργων. Γεωπληροφορική ΑΕΜΕ).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PCLAKE

3.1 Εισαγωγή

Ο ευτροφισμός αποτελεί ένα φαινόμενο που προκαλείται από την υπερβολική εισροή θρεπτικών, ιδιαίτερα φωσφόρου και αζώτου, σε φυσικά ολιγοτροφικά ή μεσοτροφικά οικοσυστήματα. Προκαλεί την υποβάθμιση ή την εξάλειψη των φυσικών κοινοτήτων φυτών και ζώων. Τα ρηχά, συνήθως στάσιμα νερά, όπως οι λίμνες και οι τάφροι, είναι τα πιο ευάλωτα συστήματα στον ευτροφισμό. Οι φυσικές φυτικές και ζωικές κοινότητες των νερών αυτών κάτω από μεσοτροφικές συνθήκες, που ως επί το πλείστον κυριαρχούν τα υδρόβια φυτά (μακρόφυτα) ως πρωτογενείς παραγωγοί, τείνουν να αλλάξουν ριζικά. Εκτός από την κατάρρευση των μακρόφυτων, των άλγεων και των ασπόνδυλων, τα ψάρια καθώς και άλλοι οργανισμοί επίσης αλλάζουν τελείως και η βιοποικιλότητα στο σύνολό της γενικά μειώνεται. Το PCLake επικεντρώνεται στις επιδράσεις στις ρηχές λίμνες, όπου η φυτική κοινότητα των καθαρών νερών η οποία χαρακτηρίζεται από μακρόφυτα, αντικαθίσταται από φυτοπλαγκτόν και θολό νερό, ενώ η ποικιλόμορφη κοινότητα ψαριών που περιλαμβάνει ιχθυοφάγα ψάρια, μετατρέπεται σε μια κοινότητα «φτωχή» σε είδη και κυριαρχείται από ένα είδος κυπρίνου. (Janse, 2005)

Καθώς αυτές οι επιδράσεις σε βιοτικό επίπεδο θεωρούνται ανεπιθύμητες, είναι σημαντικό να είμαστε σε θέση να προβλέψουμε, όσο το δυνατόν καλύτερα, με έναν ποσοτικό τρόπο, το μέγεθος του ευτροφισμού που θα προκύψει από αυτές τις αλλαγές και το κατά πόσο είναι αντιστρέψιμες ή όχι. Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν χρήσιμα εργαλεία όσον αφορά την πρόβλεψη. (Janse, 2005)

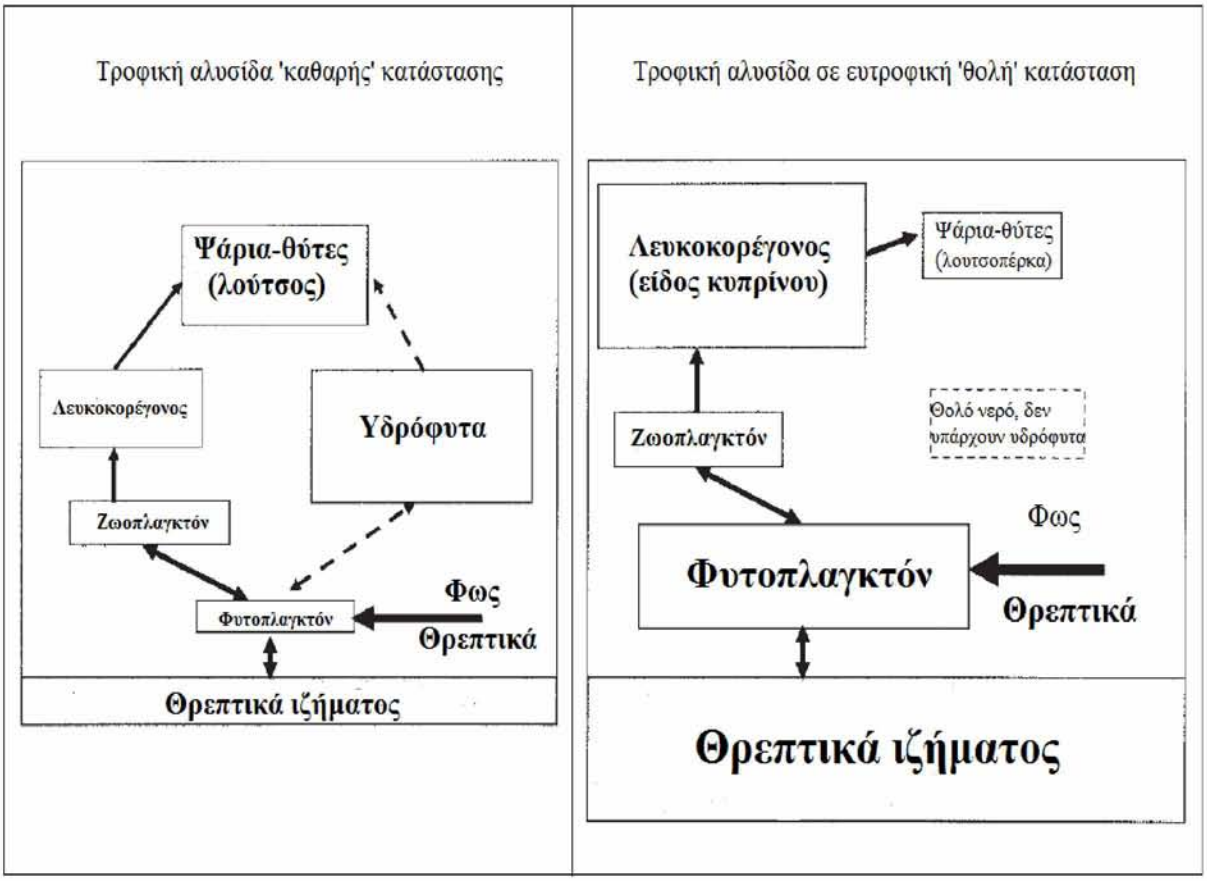
Στις παρακάτω σελίδες, το μοντέλο PCLake περιγράφεται αναλυτικά. Ο στόχος του μοντέλου αυτού είναι να απαντήσει στις παρακάτω ερωτήσεις:

- Σε τι επίπεδο εξωτερικής φόρτισης με θρεπτικά το σύστημα αλλάζει από τη φυσική στην υποβαθμισμένη κατάσταση;
- Πόσο διαρκεί αυτή η αλλαγή;
- Είναι αναστρέψιμη αυτή η αλλαγή; (π.χ. πόσο πρέπει να μειωθεί το φορτίο θρεπτικών έτσι ώστε να επιστρέψει στη φυσική από την υποβαθμισμένη κατάσταση το σύστημα;)
- Γιατί ορισμένες λίμνες είναι πιο ευαίσθητες στον ευτροφισμό από ότι άλλες;
- Ποιες είναι οι βασικές διαδικασίες που το καθορίζουν;
- Ποια είναι η επίδραση των διαφορετικών επιλογών διαχείρισης στην αποκατάσταση των υποβαθμισμένων οικοσυστημάτων, ή στην αύξηση της ανθεκτικότητας των φυσικών οικοσυστημάτων;
- Ποια είναι η αβεβαιότητα αυτών των προβλέψεων;

3.2 Ευτροφισμός σε ρηχές λίμνες

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών είναι γεγονός ότι πολλές ρηχές λίμνες έχουν γίνει υπερτροφικές, ως αποτέλεσμα της τροφοδότησής τους με υψηλά φορτία θρεπτικών. Χαρακτηρίζονται από πυκνά φύκια κυανοβακτηρίων, από μεγάλη θολερότητα, από απουσία βλάστησης, ενώ η κοινότητα ψαριών κυριαρχείται από ένα είδος κυπρίνου. Αντίθετα, η μεσοτροφική κατάσταση η οποία είναι και η ιδανική, χαρακτηρίζεται από μεγάλη κάλυψη του βυθού από μακρόφυτα, από χαμηλή θολερότητα, από χαμηλά επίπεδα άλγεων και από πολλά ιχθυοφάγα ψάρια (Εικόνα 3.1). Παρόλο που η υπερτροφική κατάσταση δημιουργείται λόγω των αυξημένων φορτίων θρεπτικών, η αποκατάσταση της βλάστησης του νερού συχνά δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη μείωση των φορτίων των θρεπτικών: οι ευτροφικές λίμνες συχνά παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στην επαναφορά τους σε μεσοτροφική κατάσταση. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.1), αναπαρίστανται οι κυρίαρχοι οργανισμοί τόσο στη μεσοτροφική όσο και στην υπερτροφική κατάσταση. (Janse, 2005)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 3.1: Κυρίαρχοι οργανισμοί σε μία καθαρή βορειοευρωπαϊκή λίμνη (αριστερά) και σε μία θολή (δεξιά). (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

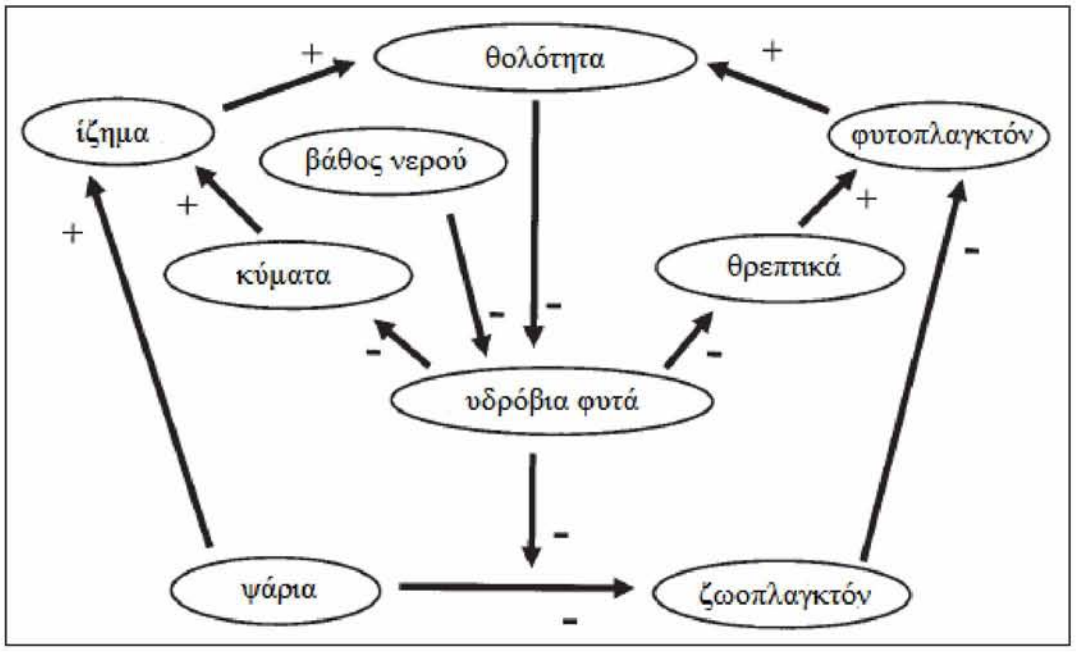
Σήμερα υπάρχουν επαρκή στοιχεία που αποδεικνύουν ότι οι ρηχές λίμνες μπορεί να εναλλάσσονται και στις δύο καταστάσεις, δηλαδή στην κατάσταση που χαρακτηρίζεται από καθαρό νερό και κυριαρχούν τα μακρόφυτα και στην κατάσταση που χαρακτηρίζεται από θολό νερό και κυριαρχεί το φυτοπλαγκτόν. Αρκετοί παράγοντες καθορίζουν ποια κατάσταση επικρατεί σε κάθε περίπτωση, αλλά ο παράγοντας «κλειδί» είναι η εξωτερική φόρτιση με θρεπτικά. Όταν η εξωτερική φόρτιση με θρεπτικά είναι υψηλή, μόνο η θολή κατάσταση είναι σταθερή, ενώ η αντίθετη περίπτωση ισχύει για χαμηλή φόρτιση με θρεπτικά. Στην ενδιάμεση κατάσταση εξωτερικής φόρτισης με θρεπτικά, είναι δυνατόν να υπάρχουν αμφότερες οι δύο καταστάσεις (μεσοτροφική-ευτροφική) και να εναλλάσσονται. Επειδή και οι δύο καταστάσεις διαθέτουν μια σειρά από αυτόσταθεροποιητικούς ρυθμιστικούς μηχανισμούς, το επίπεδο του κρίσιμου φορτίου κατά το οποίο γίνεται η μετατροπή, εξαρτάται από την αρχική κατάσταση του λιμναίου συστήματος: η μετατροπή από θολή σε καθαρή κατάσταση συμβαίνει σε πολύ χαμηλότερο φορτίο θρεπτικών από ότι το αντίθετο (υστέρηση). Στην ενδιάμεση κατάσταση εξωτερικής φόρτισης με θρεπτικά, η μετατροπή μπορεί να συμβεί από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια. Για παράδειγμα, η θολή κατάσταση μπορεί να μετατραπεί σε καθαρή μέσω φυσικού θανάτου των ψαριών ή μέσω ενός βιοδιαχειριστικού μέτρου: εξάλειψη των βενθοφάγων και ζωοπλαγκτοφάγων ψαριών. (Gulati et al., 1990a)

Κατά τη διάρκεια της μετατροπής μιας μεσοτροφικής λίμνης σε ευτροφική, συμβαίνουν αλλαγές σε όλους τους αβιοτικούς και βιοτικούς παράγοντες του οικοσυστήματος της λίμνης. Σε μια μεσοτροφική λίμνη όλοι οι οργανισμοί βρίσκονται σε ισορροπία και η βιομάζα του φυτοπλαγκτού διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα λόγω του περιορισμού των θρεπτικών και της βόσκησής του από άλλους οργανισμούς (ζωοπλαγκτόν, ψάρια). Εάν η εξωτερική φόρτιση με θρεπτικά (ειδικά με φώσφορο που είναι συνήθως ο περιοριστικός παράγοντας για το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

φυτοπλαγκτόν του γλυκού νερού), αυξηθεί σε επίπεδο πάνω από την ικανότητα πρόσληψης του συστήματος της λίμνης, τότε η βιομάζα του φυτοπλαγκτού και, κυρίως, τα πράσινα άλγη, αυξάνονται. Τα μακρόφυτα εξαφανίζονται λόγω της έλλειψης φωτός. Όταν η θολερότητα αυξάνεται, τα άλγη συχνά αντικαθίστανται από κυανοβακτήρια τα οποία προσαρμόζονται καλύτερα στη σκιά (Van Liere, 1979), με την προϋπόθεση ότι ο χρόνος παραμονής δεν είναι πολύ μικρός. Η εξάλειψη των μακρόφυτων καταλήγει σε διατάραξη της τροφικής αλυσίδας, οδηγώντας στην επικράτηση των κυπρίνων, κάτι το οποίο από μόνο του συνεισφέρει στη θολερότητα του νερού και στην ανακύκλωση των θρεπτικών. Το ζωοπλαγκτόν δεν δύναται να διαχειριστεί την υψηλή συγκέντρωση του φυτοπλαγκτού. Τα κυανοβακτήρια, τα οποία ενεργοποιούνται με την ύπαρξη φωσφόρου, διατηρούν υψηλή βιομάζα ακόμη και στην περίπτωση που το φορτίο φωσφόρου μειωθεί ξανά. (Janse, 2005)

Και οι δύο καταστάσεις (μεσοτροφική - υπερτροφική) κατέχουν έναν αριθμό από αυτοσταθεροποιητικούς μηχανισμούς (Εικόνα 3.2). Αρκετοί, συχνά αλληλεπιδρώντες μηχανισμοί, έχουν προταθεί (Scheffer, 1998). Αρχικά, μία παρατεταμένη εσωτερική φόρτιση από τα ιζήματα που είναι πλούσια σε θρεπτικά, μπορεί να καθυστερήσει την αντίδραση (Ryding & Forsberg, 1977). Κατά δεύτερο λόγο, μία αύξηση της ικανότητας χρησιμοποίησης των θρεπτικών από το φυτοπλαγκτόν, τα καθιστά ικανά να παράγουν την ίδια βιομάζα με λιγότερα θρεπτικά (Van Liere & Janse, 1992). Επίσης, η πίεση της βόσκησης του ζωοπλαγκτού στο φυτοπλαγκτόν είναι χαμηλή, λόγω της περιορισμένης εδωδιμότητας των κυανοβακτηρίων από το ζωοπλαγκτόν και λόγω της μεγάλης κατανάλωσης του ζωοπλαγκτού από τους κυπρίνους (Gulati et al., 1990b). Τέλος, ο μεγάλος αριθμός ενήλικων κυπρίνων, μέσω της τροφικής τους συμπεριφοράς στο ανώτερο στρώμα των ιζημάτων, διατηρεί το νερό θολό και εμποδίζει την επιστροφή της βλάστησης. Είναι ξεκάθαρο ότι, τόσο η άμεση επίδραση των θρεπτικών, όσο και η έμμεση επίδραση διαμέσου της τροφικής αλυσίδας, συνεισφέρουν στη συχνά παρατηρούμενη αντίσταση του λιμναίου συστήματος σε αποκατάσταση. Για το λόγο αυτό, πέρα από τη μείωση του φορτίου θρεπτικών, είναι σημαντικό να ληφθούν περαιτέρω μέτρα όπως η άμεση διαχείριση της τροφικής αλυσίδας (Gulati et al., 1990b).



Εικόνα 3.2: Κύριες αλληλεπιδράσεις στο λιμναίο οικοσύστημα που αφορούν σε θολερότητα του νερού (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Από την άλλη, οι λίμνες με καθαρό νερό και μακρόφυτα δείχνουν επίσης μία συγκεκριμένη αντίσταση σε εξωτερικές επιδράσεις, όπως σε μία μέτρια αύξηση στο φορτίο θρεπτικών. (Moss, 1990). Αρκετοί μηχανισμοί σταθεροποίησης μπορεί να παίζουν ρόλο (Scheffer, 1998; Jeppesen et al., 1998). Η πρόσληψη θρεπτικών από τα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

μακρόφυτα μπορεί να καταστείλει την ανάπτυξη των άλγεων λόγω του περιορισμού των θρεπτικών. Επίσης, τα μακρόφυτα μπορούν να μειώσουν έμμεσα την κατανάλωση του ζωοπλαγκτού, παρέχοντας ιδανικές συνθήκες κάλυψής του από τα ψάρια που τρέφονται με αυτό, και τέλος μπορούν να μειώσουν την επαναιώρηση που προκαλείται από τον άνεμο μέσω της σταθεροποίησης του ιζήματος. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση αυτών των αλληλεπιδράσεων.

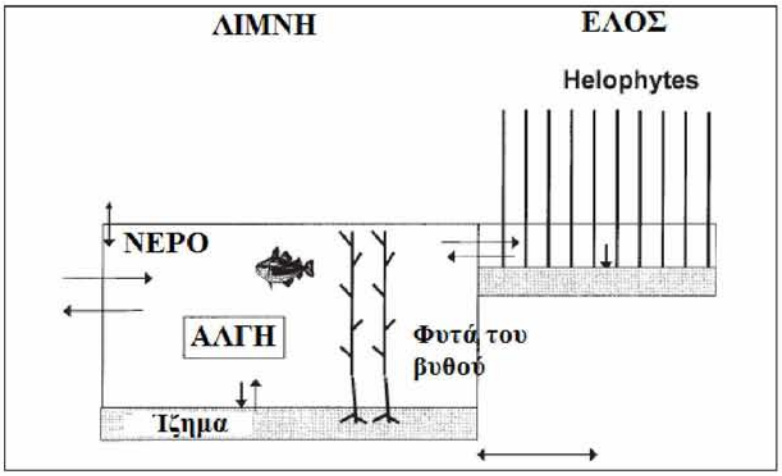
Κύριο παράγοντα για την κατάσταση που επικρατεί αποτελεί η διαφάνεια του νερού. Η πιθανότητα αλλαγής της κατάστασης για ένα συγκεκριμένο φορτίο θρεπτικών, εξαρτάται από φυσικοχημικούς και βιολογικούς παράγοντες. Στους φυσικοχημικούς παράγοντες συγκαταλέγονται το βάθος της λίμνης, το μέγεθος, ο τύπος του ιζήματος, ο χρόνος παραμονής του νερού, η χημική σύσταση των θρεπτικών, κ.α.. Στους βιολογικούς παράγοντες συγκαταλέγονται οι ιδιότητες των οργανισμών της λίμνης, όπως ο κύκλος ζωής τους, οι ρυθμοί ανάπτυξης και απώλειας και η τροφική συμπεριφορά τους. Οι παράμετροι ανάπτυξης καθορίζουν τον ανταγωνισμό ανάμεσα στους διάφορους πρωτογενείς παραγωγούς για περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως τα θρεπτικά και το φως. Οι παράμετροι απώλειας περιλαμβάνουν τη θνησιμότητα, τη βόσκηση του ζωοπλαγκτού και την αλιεία.

Το κεντρικό ερώτημα που προκύπτει είναι η πιθανότητα ύπαρξης των δύο καταστάσεων (μεσοτροφική – υπερτροφική), καθώς και η μετατροπή από τη μία στην άλλη, ως λειτουργία των κύριων χαρακτηριστικών της λίμνης και των παραγόντων εισόδου στο σύστημα, εστιάζοντας στους παράγοντες που μπορεί να διαχειριστεί ο άνθρωπος.

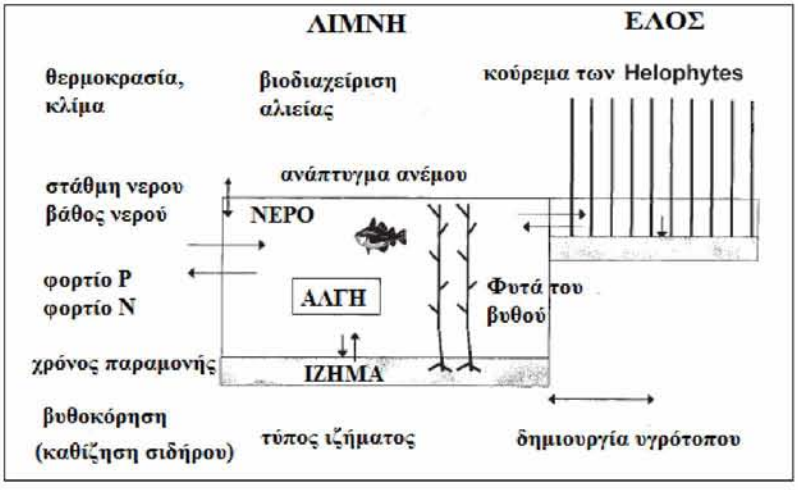
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.3 Προσέγγιση μέσω του μοντέλου

Το θέμα προσεγγίζεται μέσω του μοντέλου προσομοίωσης PCLake, το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο οικολογικό μοντέλο των ρηχών λιμνών, περιγράφοντας το φυτοπλαγκτόν, τα μακρόφυτα και μια απλοποιημένη τροφική αλυσίδα, εντός του πλαισίου του κλειστού κύκλου των θρεπτικών (Janse, 2005). Σκοπός του μοντέλου είναι η ανάλυση της πιθανότητας μετάβασης από την κατάσταση που χαρακτηρίζεται από καθαρό νερό και κυριαρχείται από βλάστηση, στην κατάσταση που χαρακτηρίζεται από θολό νερό και κυριαρχείται από φυτοπλαγκτόν ή αντίστροφα, ως λειτουργία της εξωτερικής φόρτισης με θρεπτικά και άλλους παράγοντες (Εικόνα 3 α, β). Εκτός από τα σενάρια διαφορετικών εξωτερικών φορτίσεων με θρεπτικά, οι επιδράσεις των υδρολογικών και μορφολογικών αλλαγών, η κλιματική αλλαγή, οι επιλογές διαχείρισης όπως η βυθοκόρηση και η διαχείριση της υδρόβιας ζωής, ή συνδυασμοί των παραπάνω, μπορούν να αξιολογηθούν με έναν τουλάχιστον ημιποσοτικό τρόπο (Εικόνα 3.3 α, β).



(α)



(β)

Εικόνα 3.3: Σχηματική άποψη του πεδίου εφαρμογής του PCLake. α) σχηματική δομή του μοντέλου, β) σχηματική δομή του μοντέλου και παράθεση των παραγόντων προς διαχείριση. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της επίδρασης διαφορετικών υποθέσεων σε οικολογικές αλληλεπιδράσεις (όπως προκύπτουν, για παράδειγμα, από την οικολογική γνώση). Περιγράφει τις πιο σημαντικές οικολογικές αλληλεπιδράσεις σε ένα ρηχό λιμναίο οικοσύστημα που καθορίζουν ποια κατάσταση θα υπερισχύσει. Τόσο οι επιδράσεις από την επιφάνεια προς τον πυθμένα όσο και οι επιδράσεις από τον πυθμένα προς την επιφάνεια καθώς και οι έμμεσες επιδράσεις, λαμβάνονται υπόψη, εντός του γενικού πλαισίου του κύκλου των θρεπτικών. Το μοντέλο κατέχει μία ενδιάμεση θέση ανάμεσα στα μοντέλα ευτροφισμού που εστιάζουν κυρίως στα θρεπτικά και στο φυτοπλαγκτόν (π.χ. Ambrose et al, 1998; Van der Molen et al, 1993; STOWA, 1999), σε μοντέλα πιο λεπτομερή στα βιολογικά είδη (π.χ. Van Nes et al, 2002) και των λεγόμενων «minimodels» (Scheffer, 1998).

Οι βιοτικές μεταβλητές 'κλειδιά' είναι το φυτοπλαγκτόν και η βλάστηση του πυθμένα, ενώ οι αβιοτικοί παράγοντες 'κλειδιά' είναι η διαφάνεια και τα θρεπτικά. Το μοντέλο βασίζεται σε κλειστούς κύκλους αζώτου και φωσφόρου και για το λόγο αυτό οι αναλογίες των θρεπτικών προς τη βιομάζα μοντελοποιούνται δυναμικά. Αυτό γίνεται για να προσαρμοστούν οι αναλογίες θρεπτικών του φυτοπλαγκτού και των μακρόφυτων στη διαθεσιμότητα των θρεπτικών και επειδή οι αναλογίες θρεπτικών των οργανισμών αυξάνονται με το τροφικό επίπεδο. Για τη μεταφορά και κατακράτηση, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση των διαλυμένων και σωματιδιακών μορφών των θρεπτικών. Με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των διαθέσιμων θρεπτικών, είναι απαραίτητο να συμπεριλάβουμε σε αυτά, το άνω στρώμα των ιζημάτων και της ανταλλαγής του με τη στήλη νερού. Το άνω στρώμα των ιζημάτων, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και στη διαφάνεια του νερού, όπως επίσης και η οργανική και ανόργανη ύλη. Τα ιζήματα είναι επίσης απαραίτητα για να προσομοιώσουμε το 'ιστορικό' της λίμνης, να εκτιμήσουμε τα αποτελέσματα διαχειριστικών μέτρων όπως είναι η βυθοκόρηση, και γενικά να καταγράψουμε το χρόνο αντίδρασης (εάν υφίσταται κάποια αντίδραση) σε μέτρα αποκατάστασης. Τέλος, ανάμεσα από κάθε δύο περιόδους ανάπτυξης (καλοκαίρια), υπάρχει μία αδρανής περίοδος όπου η σημαντικότητα των βασικών οικολογικών παραγόντων μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική. Τα παραπάνω ενισχύουν την επιλογή της δυναμικής μεθόδου υπολογισμού.

Όσον αφορά στα υψηλότερα τροφικά επίπεδα, μόνο οι ουσιώδεις επιρροές συμπεριλαμβάνονται, π.χ. η πίεση βόσκησης στα άλγη και η σημασία των λευκοκορέγονων για τη διαφάνεια και την αποθήκευση θρεπτικών συστατικών. Όλοι οι οργανισμοί θεωρούνται ως εξαρτημένοι, άμεσα ή έμμεσα, από τα διαθέσιμα θρεπτικά του συστήματος, ως σύνολο, επομένως η τροφική δομή και οι κύκλοι των θρεπτικών συζευγνύονται. Το γεγονός ότι συμπεριλαμβάνεται ένας τροφικός ιστός, καθιστά επίσης δυνατή τη μοντελοποίηση των επιδράσεων της βιοδιαχείρισης.

Η επίδραση της διακύμανσης της στάθμης του νερού μπορεί να μοντελοποιηθεί, καθώς το βάθος του νερού αποτελεί μία μεταβλητή κατάστασης του μοντέλου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υπορουτίνα της ελώδους ζώνης για να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις της στην αποκατάσταση της ποιότητα της λίμνης.

Η δομή του μοντέλου παρέχει έτσι διάφορα «παραθυράκια» όσον αφορά σε διαφορές στις ιδιότητες του συστήματος ή σε επιβολή (συνδυασμούς) αλλαγών στους παράγοντες εισόδου, με ιδιαίτερη έμφαση στους παράγοντες που είναι διαχειρίσιμοι από τον άνθρωπο. Το μοντέλο αποτελεί έτσι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο αξιολόγησης και διαχείρισης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.4 Σύντομη περιγραφή του PCLake

3.4.1 Δομή

Το μοντέλο περιγράφει ένα πλήρους ανάδευσης υδάτινο σώμα, ενώ περιλαμβάνει εκτός από την υδάτινη στήλη, το ανώτερο ιζηματογενές στρώμα του πυθμένα, με τα πιο σημαντικά βιοτικά κι αβιοτικά συστατικά. Ως εκ τούτου, το μοντέλο προορίζεται κυρίως για προσομοίωση ρηχών και μη στρωματοποιημένων λιμνών. Δεν προβλέπεται περεταίρω οριζόντια ή κατακόρυφη διακριτοποίηση μέσα στη λίμνη, εκτός από την προαιρετική συνεκτίμηση ζώνης υγροτοπικών εκτάσεων (buffer zone).

Μαθηματικά, το μοντέλο συνίσταται από έναν αριθμό, συνδυασμένων ανά δύο, διαφορικών εξισώσεων, μία για κάθε μεταβλητή του Πίνακα 3.1. Η δομή του μοντέλου της λίμνης, αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 3.4., ενώ αυτή της υπορουτίνας της ζώνης ελωδών περιοχών στην Εικόνα 3.5. Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί προσομοιώνονται με την μορφή λειτουργικών ομάδων. Εκτός των ροών της τροφικής αλυσίδας, περιλαμβάνονται, επίσης, κάποιοι εμπειρικοί ή έμμεσοι συσχετισμοί των διάφορων στοιχείων, όπως για παράδειγμα η επιρροή των ιχθύων και μακρόφυτων στην επαναιώρηση των καθιζανόντων. Οι κύκλοι των θρεπτικών –αζώτου, φωσφόρου και πυριτίου- περιγράφονται ως εντελώς κλειστοί, με εξαίρεση την εξωτερική φόρτιση κι απομάκρυνση θρεπτικών στην λίμνη, μέσω εισροών κι εκροών, και την απονιτροποίηση. Αυτό επιτυγχάνεται προσδιορίζοντας όλα τα συστατικά στοιχεία με χρήση τριών εκφράσεων: ξηρό βάρος (D), νιτρικά (N) και φωσφορικά (P), (ειδικά για την ιλύ, χρησιμοποιείται και το πυρίτιο ως μορφή έκφρασης). Ο ανόργανος άνθρακας (CO_2) δεν προσομοιώνεται άμεσα. Προφανώς, οι διάφορες εκφράσεις λόγων, θρεπτικών ανά ξηρό βάρος που προκύπτουν, είναι ποικίλες. Οι λόγοι θρεπτικών ανά ξηρό βάρος των διάφορων οργανισμών αυξάνονται, όσο υψηλότερο είναι το τροφικό επίπεδο (π.χ. φυτοπλαγκτόν < ιχθείς). Στο μοντέλο περιλαμβάνονται οι μηχανισμοί που δημιουργούν αυτή την κλιμάκωση. Ένας τέτοιος μηχανισμός είναι η ανισομερής αφομοίωση στους οργανισμούς, των θρεπτικών και του άνθρακα, με μεγαλύτερη απόδοση στην αφομοίωση των θρεπτικών. Τα ισοζύγια μαζών του κάθε συστατικού στοιχείου, ελέγχονται δυναμικά κατά την διάρκεια της επίλυσης. Το εικοσιτετράωρο έχει επιλεγεί ως η ενιαία μονάδα μέτρησης για όλες τις διεργασίες, ωστόσο η σχετική κλίμακα χρόνου για τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης είναι της τάξης των εβδομάδων ή και μηνών.

Τα κύρια δεδομένα εισόδου είναι η εισροή ύδατος, οι υπόγειες διαφυγές ή υπόγεια τροφοδότηση (αν υπάρχει), η φόρτιση θρεπτικών (N, P), η φόρτιση σωματιδίων, η θερμοκρασία, το φως, οι διαστάσεις (ανάπτυγμα λίμνης και βάθος), το μέγεθος της ζώνης ελωδών περιοχών, το είδος των ιζημάτων και το ιστορικό φόρτισης (το τελευταίο, μέσω των αρχικών συνθηκών). Τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι η βιομάζα και οι συγκεντρώσεις όλων των μεταβλητών .

Η αρχιτεκτονική του μοντέλου είναι «εύπλαστη», παραμετροποιήσιμη , σε τέτοιο βαθμό, ώστε ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ενοποιήσει, να επιμερίσει ή και να αγνοήσει συγκεκριμένες ομάδες οργανισμών, παρότι προτείνονται μέσω προεπιλεγμένων τιμών οι αντίστοιχες ποσότητες. Έτσι, για παράδειγμα, στην προσομοίωση της λίμνης Loosdrecht παραμερίστηκαν εντελώς τα μακρόφυτα κι ολόκληρος ο κύκλος του αζώτου, αντιθέτως στην προσομοίωση της λίμνης Zwemlust, τα μακρόφυτα όχι μόνο συμπεριλήφθηκαν, αλλά και επιμερίστηκαν σε τρεις λειτουργικές ομάδες.

3.4.2 Διεργασίες

Οι διεργασίες που προσομοιώνονται, περιγράφονται εν συντομία, ακολούθως.

3.4.2.1 Αβιοτικές και μικροβιακές διεργασίες

Στην βάση του μοντέλου βρίσκονται οι διεργασίες μεταφοράς, δηλαδή η εισροή και εκροή από και προς το περιβάλλον θρεπτικών συστατικών, μέσω οργανικής κι ανόργανης ύλης. Το βάθος της λίμνης (ή η στάθμη ύδατος), μπορεί να είναι δεδομένο εισόδου ή μεταβλητή προς επίλυση, αναλόγως των δεδομένων. Για να

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

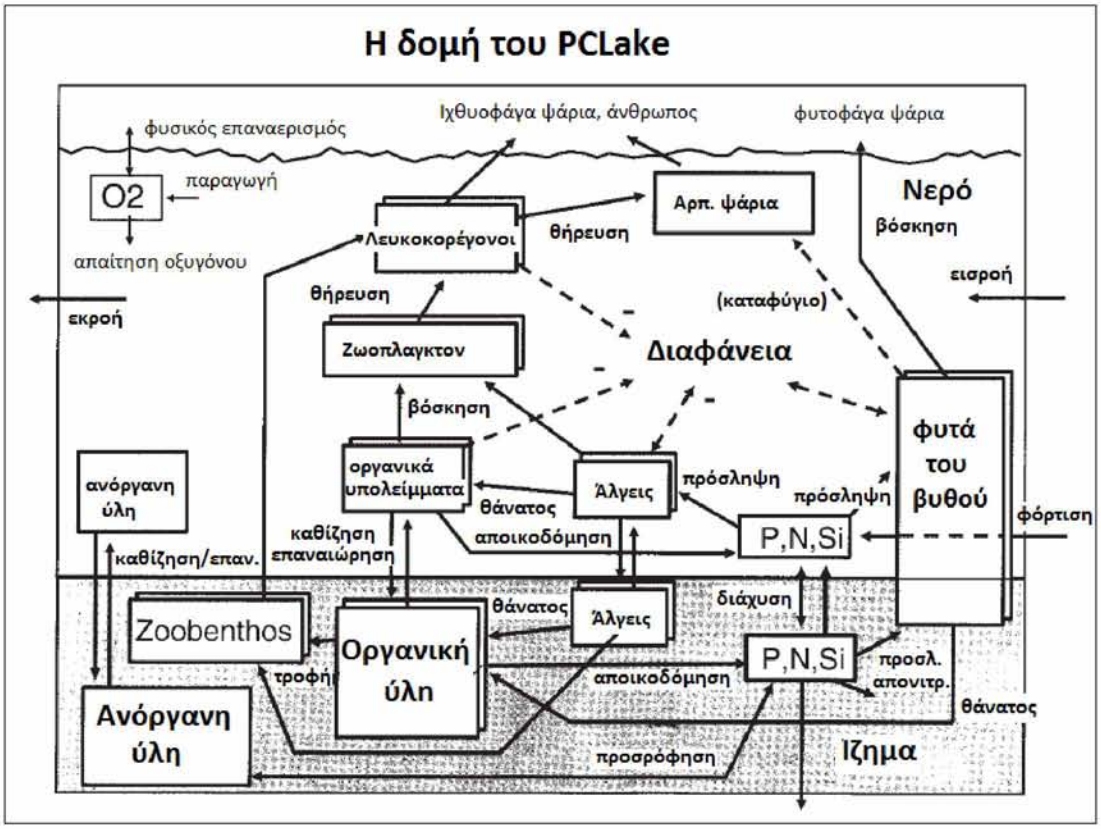
θεωρηθεί μεταβλητή, πρέπει να προσδιοριστούν οι εποχιακές διαφορές των εισροών και των εκροών, συμπεριλαμβανομένων των υπόγειων διαφυγών ή υπόγειας τροφοδότησης.

Η ανώτερη στοιβάδα ιζημάτων του πυθμένα θεωρείται ότι έχει σταθερό πάχος με προεπιλεγμένη τιμή τα 10 cm και συνίσταται -με σταθερούς τους αντίστοιχους λόγους περιεκτικοτήτων της ιλύος- από ανόργανη ύλη (IM), από μαυρόχωμα (humus), οργανικά υπολείμματα (detritus) και νερό πόρων. Η ανταλλαγή ανόργανης κι οργανικής ύλης, μεταξύ της ανώτερης στοιβάδας του πυθμένα και του νερού της λίμνης, περιγράφεται μέσω ενός μηχανισμού ισορροπίας καθίζησης (πρώτης τάξης διεργασία) κι επαναιώρησης (μηδενικής τάξης διεργασία). Ο ρυθμός καθίζησης μειώνεται κι αντίστοιχα αυξάνεται ο ρυθμός επαναιώρησης, όσο αυξάνεται το μέγεθος της λίμνης. Η επαναιώρηση επίσης εντείνεται, όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες της στοιβάδας ιζημάτων αλλά και ο πληθυσμός των βενθοφάγων ιχθύων, ενώ μειώνεται, όσο αυξάνεται η κάλυψη του πυθμένα με βλάστηση.

Πίνακας 3.1: κατηγοριοποίηση των μεταβλητών κατάστασης

μεταβλητή κατάστασης	στην υδάτινη στήλη		στην ανώτερη στιβάδα ιζημάτων	
	ως δομικά συστατικά	[μονάδες]	ως δομικά συστατικά	[μονάδες]
νερό				
βάθος νερού	νερό	[m]	(προεπιλεγμένο)	
αβιοτικά συστατικά				
ανόργανη ύλη	D	[g m^{-3}]	D	[g m^{-2}]
ιλύς	--		D	[g m^{-2}]
οργανικά υπολείμματα	D, P, N, Si	[g m^{-3}]	D, P, N, Si	[g m^{-2}]
ανόργανα θρεπτικά	PO_4, P_{ads}; NH_4, NO_3; SiO_2	[g m^{-3}]	PO_4, P_{ads}; NH_4, NO_3	[g m^{-2}]
οξυγόνο	O_2	[g m^{-3}]	(αερόβια ποσόστωση)	
φυτοπλαγκτό				
διάτομα	D, P, N, (Si)	[g m^{-3}]	D, P, N, (Si)	[g m^{-2}]
μικρές βρώσιμες άλγεις	D, P, N	[g m^{-3}]	D, P, N	[g m^{-2}]
κυανοβακτήρια	D, P, N	[g m^{-3}]	D, P, N	[g m^{-2}]
βλάστηση				
βυθισμένη βλάστηση	D, P, N	[g m^{-2}]		
ζωικές ομάδες				
ζωοπλαγκτόν	D, P, N	[g m^{-3}]		
ζωοβένθη	D, P, N	[g m^{-2}]		
μικροί λευκοκορέγονοι	D, P, N	[g m^{-2}]		
μεγάλοι λευκοκορέγονοι	D, P, N	[g m^{-2}]		
ιχθυοφάγα ψάρια	D, (P, N)	[g m^{-2}]		
βλάστηση ελών				
βλαστοί καλαμιών	D, P, N	[g m^{-2}]		
ριζώματα καλαμιών	D, P, N	[g m^{-2}]		

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 3.4: Η δομή του PCLake. Τα σκιασμένα σχήματα αναπαριστούν τμήματα που προσομοιώνονται με ξηρό βάρος και θρεπτικά. Το φυτοπλαγκτόν διακρίνεται σε τρεις λειτουργικές ομάδες: κυανοβακτήρια, διάτομα και μικρές βρώσιμες άλγεις. Οι λευκοκορέγονοι διαχωρίζονται σε μικρούς (ζωοπλαγκτοβόρους) και μεγάλους (βενθοβόρους). Τα βέλη με τις συμπαγείς γραμμές υποδηλώνουν ροές μάζας (π.χ. τροφικές σχέσεις), τα βέλη με τις διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν εμπειρικές σχέσεις (το "-" υποδηλώνει αρνητική επίδραση ειδάλλως υπονοείται θετική). Οι ροές απεκκρίσεων και θνησιμότητας των ζωικών οργανισμών και οι ροές αναπνοής δεν αναπαριστώνται. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Η αποικοδόμηση των οργανικών υπολειμμάτων (μικρόκοκκα υπολείμματα ζωικής και φυτικής προέλευσης σε μορφή τρίμματος, detritus) περιγράφεται ως διεργασία πρώτης τάξης, εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία. Το μαυρόχωμα (βραδύκαυστη οργανική ύλη, humus), θεωρείται ότι αποικοδομείται με πολύ αργούς ρυθμούς. Τα θρεπτικά που απελευθερώνονται από τη διαδικασία της αποικοδόμησης διαλύονται στο νερό των πόρων. Ο ελεύθερος φώσφορος (ανόργανος), επαναπροσροφάται στην ανόργανη ύλη, σύμφωνα με την ισόθερμη καμπύλη του Langmuir. Σε περίπτωση μεγάλων συγκεντρώσεων μέρος του καθιζάνει. Η σχετική προσρόφηση του φωσφόρου επηρεάζεται θετικά και από την περιεκτικότητα των ιζημάτων σε ιλύ και από την εξασφάλιση αερόβιων συνθηκών. Για το τελευταίο, το μοντέλο θεωρεί ένα σταθερό βάθος του πυθμένα, που έχει διεισδύσει το οξυγόνο. Παίζουν ρόλο στην συγκεκριμένη λειτουργία η συγκέντρωση του οξυγόνου, η απαίτηση σε οξυγόνο και ο ρυθμός διάχυσης. Η νιτροποίηση του αμμωνίου (NH_4^+) και η απονιτροποίηση των νιτρικών (NO_3^-) επηρεάζονται επίσης από τις αερόβιες συνθήκες. Η μετακίνηση διαλυμένου φωσφόρου κι αζώτου από το νερό των πόρων στην υπερκείμενη υδάτινη στήλη έχει προσομοιωθεί με βάση την διαφορά συγκέντρωσης στα δύο υποσυστήματα. Το τελικό αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραπάνω διεργασιών είναι ότι τα φωσφορικά ιόντα εμφανίζουν εποχιακή διακύμανση που καθορίζεται από την θερμοκρασία και τη διαθεσιμότητα οργανικών υπολειμμάτων στο σύστημα.

Ομοίως μοντελοποιούνται η αποικοδόμηση και η νιτροποίηση στην υδάτινη στήλη. Προβλέπεται υπορουτίνα δυναμικού υπολογισμού της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου , η μεταβολή του οποίου, εξαρτάται από το BOD και SOD, τον ρυθμό αερισμού από την ατμόσφαιρα και την παραγωγή οξυγόνου από το φυτοπλαγκτόν και τη βλάστηση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.4.2.2 Φυτοπλαγκτόν

Η υπορουτίνα του φυτοπλαγκτού περιγράφει την ανάπτυξη και τον θάνατο τριών λειτουργικών ομάδων φυτοπλαγκτού, των κυανοβακτηρίων, των διατόμων και των υπόλοιπων μικρότερων βρώσιμων άλγεων. Η διάκριση στις τρεις παραπάνω ομάδες γίνεται, αφενός, ώστε να περιγραφούν ικανοποιητικά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους, αφετέρου, ώστε να εξυπηρετηθούν καλύτερα ενδεχόμενες προσομοιώσεις σχεδίων βιοδιαχείρισης. Η βιομάζα της καθεμιάς από τις τρεις ομάδες περιγράφεται με την ακόλουθη διαφορική εξίσωση.

$$dx/dt = παραγωγή - αναπνοή - θνησιμότητα - καθίζηση + επαναιώρηση - βόσκηση + εισροή - εκροή$$

Συγχρόνως το φυτοπλαγκτόν περιγράφεται και σε μονάδες αζώτου και φωσφόρου μέσω της ακόλουθης διαφορικής εξίσωσης.

$$dy/dt = πρόσληψη - απέκκριση - θνησιμότητα - καθίζηση + επαναιώρηση - βόσκηση + εισροή - εκροή$$

Η παραγωγή (η ανοικοδόμηση του άνθρακα, για λόγους απλούστευσης ταυτίζεται με την ανάπτυξη), εξαρτάται από τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης, τη θερμοκρασία, τη διάρκεια της ημέρας, το λιμναίο νερό, τον φώσφορο (P) και άζωτο (N), και για τα διάτομα, επίσης, από το πυρίτιο (Si). Η εξαρτώμενη από το φως ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων και των διατόμων, περιγράφεται από τους Di Toro & Matystik (1980), σύμφωνα με την εξίσωση του Steele, που ενσωματώθηκε στο μοντέλο, προσαρμοσμένη στο βάθος της λίμνης. Η εξίσωση υποδεικνύει αναστολή της ανάπτυξης σε μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τις υπόλοιπες άλγειες χρησιμοποιήθηκε μία παρόμοια εξίσωση βασισμένη στην εξίσωση Monod, που όμως δεν θεωρεί αναστολή λόγω υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Το διαθέσιμο φως εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της λίμνης με κατανομή στην υδάτινη στήλη, σύμφωνα με τον νόμο Lambert-Beer. Ο συντελεστής απόσβεσης ορίζεται συνυπολογίζοντας την φυσιολογική μακροχρόνια διαδικασία εξαφάνισης των ειδών στο υδάτινο περιβάλλον, λόγω ανταγωνιστικότητας των ειδών ή κλιματικής αλλαγής, και τη συμβολή της ανόργανης ύλης, των οργανικών υπολειμμάτων, του φυτοπλαγκτού και της υδρόβιας βλάστησης στην παραπάνω διαδικασία, εξαιτίας του φαινομένου της αυτοσκίασης, που θέτει ένα ανώτατο όριο επιβίωσης βιομάζας. Ο φώσφορος και το άζωτο επηρεάζουν τον ρυθμό ανάπτυξης, περισσότερο μέσω της εσωτερικής περιεκτικότητας σε θρεπτικά του φυτοπλαγκτού, παρά μέσω των συγκεντρώσεών τους στο νερό. Γι αυτό το λόγο, η πρόσληψη των θρεπτικών προσομοιώνεται ξεχωριστά από την παραγωγή βιομάζας, ώστε να εξυπηρετείται η στοιχειομετρία των διεργασιών. Ο ρυθμός πρόσληψης θρεπτικών αυξάνεται με την αύξηση των συγκεντρώσεων τους στο νερό, μέχρι ενός μέγιστου, που καθορίζεται από την εσωτερική κυτταρική περιεκτικότητα θρεπτικών στο φυτοπλαγκτόν (cell quota). Ο ρυθμός πρόσληψης θρεπτικών μεγιστοποιείται, όταν η κυτταρική περιεκτικότητα είναι ελάχιστη (Riegman & Mur, 1984). Η παραγωγή βιομάζας, έπειτα, περιγράφεται, εξαρτώμενη από την εσωτερική περιεκτικότητα, σύμφωνα με την εξίσωση Droop (1974). Συγκεκριμένα ακολουθεί ασυμπτωτικά την αύξηση της. Για την ανάπτυξη των διατόμων, που εξαρτάται από το πυρίτιο, χρησιμοποιείται η απλούστερη εξίσωση Monod, με βάση την εξωτερική συγκέντρωση οξειδίου του πυριτίου SiO_2. Ο πραγματικός ρυθμός ανάπτυξης υπολογίζεται, με πολλαπλασιασμό του μέγιστου ρυθμού με μειωτικούς συντελεστές που αφορούν στην φωτεινότητα, την θερμοκρασία και την διαθεσιμότητα των θρεπτικών. Ο τελευταίος μειωτικός συντελεστής κρίνεται κατά περίπτωση, ανάλογα με το ποιο θρεπτικό βρίσκεται σε περιορισμένη διαθεσιμότητα και άρα καθορίζει την ανάπτυξη, σύμφωνα με τον νόμο του Liebig. Η χλωροφύλλη-α, που περιέχεται στο φυτοπλαγκτόν, είναι μία συμπληρωματική μεταβλητή. Η μεταβλητή αυτή γίνεται σημαντική για την περιγραφή της βιομάζας σε συνθήκες περιορισμού της ηλιακής ακτινοβολίας (Riegman, 1985).

Οι διεργασίες μείωσης της βιομάζας, η αναπνοή και η φυσική θνησιμότητα περιγράφονται σαν διεργασίες πρώτης τάξης, με την αναπνοή να εξαρτάται από την θερμοκρασία. Η απέκκριση θρεπτικών, παράλληλα με την αναπνοή, θεωρείται ότι μειώνεται όταν η εσωτερική περιεκτικότητα σε θρεπτικά είναι χαμηλή. Η καθίζηση, επίσης, περιγράφεται σαν διεργασία πρώτης τάξης, με ρυθμό την ταχύτητα καθίζησης. Το φυτοπλαγκτόν που έχει ήδη καθιζάνει θεωρείται ξεχωριστή μεταβλητή. Σε αυτό και σε άλλα σωματίδια μαζί σαν άθροισμα προσδίδεται η δυνατότητα επαναιώρησης, ενώ θεωρείται ότι δεν αναπτύσσεται περεταίρω, συμμετέχει όμως στις διεργασίες αναπνοής και φυσικής θνησιμότητας. Επίσης, μπορεί να καταναλωθεί από ανώτερους οργανισμούς, ζωοβενθικούς.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Οι τιμές των παραμέτρων για τις τρεις ομάδες άλγεων διαφέρουν. Τα κυανοβακτήρια προσαρμόζονται πιο εύκολα στην έλλειψη φωτός από τις άλλες δύο κατηγορίες κι έχουν μεγαλύτερο ρυθμό πρόσληψης φωσφόρου. Από την άλλη έχουν μικρότερο μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης και μεγαλύτερη ευαισθησία στην θερμοκρασία. Τα διάτομα έχουν μικρότερη βέλτιστη τιμή θερμοκρασίας, ενώ για την τρίτη κατηγορία των μικρών βρώσιμων άλγεων δεν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα ανάπτυξης η μεγάλη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Οι δύο τελευταίες κατηγορίες έχουν υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης, αλλά και υψηλότερους ρυθμούς μείωσης λόγω καθίζησης και βόσκησης από το ζωοπλαγκτόν. Τα διάτομα είναι η μόνη κατηγορία που μπορεί να περιοριστεί από την διαθεσιμότητα του πυριτίου.

3.4.2.3 Υδρόβια βλάστηση

Η υδρόβια βλάστηση που βρίσκεται μέσα στο νερό περιγράφεται ως μία ενιαία ομάδα σύμφωνα με την παρακάτω διαφορική εξίσωση για την βιομάζα:

dx/dt = παραγωγή – αναπνοή - θνησιμότητα (- βρώση από πουλιά) (- βιοδιαχείριση)

και για τα θρεπτικά (N και P) που εμπεριέχονται στα φυτά:

dy/dt = πρόσληψη - απέκκριση - θνησιμότητα (- βρώση από πουλιά) (- βιοδιαχείριση)

Η βιομάζα βλάστησης διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, ένα υπόγειο τμήμα της (ρίζες) κι ένα τμήμα της μέσα στο νερό (βλαστοί), με την δεύτερη κατηγορία να θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη στην υδάτινη στήλη. Η εποχικότητα προσομοιώνεται με έναν απλουστευμένο τρόπο, θεωρώντας μεγάλο ποσοστό ριζών (επί της συνολικής βλάστησης) για την χειμερινή περίοδο και μικρό για την περίοδο ανάπτυξης (προεπιλεγμένες τιμές 0.6 και 0.1 αντίστοιχα). Οι αλλαγές των τιμών από χειμερινή σε θερινή κι αντίστροφα, γίνονται κατά τις περιόδους της άνοιξης και φθινοπώρου ομαλά. Η παραγωγή βιομάζας του βλαστού προσομοιώνεται σε αντιστοιχία με την παραγωγή φυτοπλαγκτού, δηλαδή εξαρτημένη από έναν μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης, την θερμοκρασία, την διάρκεια ημέρας, το φως κάτω από την επιφάνεια του νερού και τα θρεπτικά N και P. Θεωρείται ότι τα μακρόφυτα μπορούν να αποβάλλουν θρεπτικά στο νερό της λίμνης, αλλά και στο νερό των πόρων του πυθμένα, σύμφωνα με την διαθεσιμότητα. Στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο μέρος θρεπτικών καταλήγει στα ιζήματα. Η αναπνοή και η απέκκριση μοντελοποιούνται όπως και στο φυτοπλαγκτόν. Η περιγραφή της ανάπτυξης και θνησιμότητας της βλάστησης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη έναν διορθωτικό παράγοντα, που εξαρτάται από την πυκνότητα της βλάστησης και προέκυψε από εμπειρική- λογιστική προσέγγιση της ανάπτυξης, ώστε να συνυπολογίζονται κι άλλοι παράμετροι, που δεν προσομοιώνονται, όπως ο περιορισμός χώρου. Μία λίμνη έχει ένα μέγιστο όριο πυκνότητας βλάστησης, που επιτρέπει να αναπτυχθεί, «μία φέρουσα ικανότητα». Προαιρετικά, μπορούν να προσδιοριστούν, ως δεδομένα εισόδου, ο ρυθμός βόσκησης της βλάστησης από φυτοφάγα πουλιά καθώς και η απομάκρυνση μακρόφυτων από τον ανθρώπινο παράγοντα. Η βλάστηση, με την σειρά της, επηρεάζει με έμμεσο τρόπο κάποιες άλλες διεργασίες στην λίμνη. Για παράδειγμα παρεμποδίζει την επαναιώρηση και επιδρά στις δύο μεγάλες λειτουργικές ομάδες ιχθύων, στην μία θετικά και στην άλλη αρνητικά.

3.4.2.4 Τροφική αλυσίδα

Η υπορουτίνα της τροφικής αλυσίδας διατηρείται όσο το δυνατό απλούστερη και περιλαμβάνει το ζωοπλαγκτόν, τα μακροβένθη, τους λευκοκορέγονους (με ηλικιακή διάκριση σε νεαρούς και γηραιούς) και τα αρπακτικά ψάρια. Η γενική εξίσωση για την ζωική ομάδα είναι:

dx/dt = (σίτιση – απεκκρίσεις) – αναπνοή –θνησιμότητα – θήρευση

σε συνδυασμό με μία διόρθωση εξαρτημένη από τις αντίστοιχες πυκνότητες του κάθε τροφικού επιπέδου (Hallam et al., 1983; Traas, 2004; Janse et al., 1995).

Το ζωοπλαγκτόν τρέφεται από φυτοπλαγκτόν και οργανικά υπολείμματα. Η βόσκηση περιγράφεται ως τύπου Monod κινητική μίας συγκέντρωσης αιωρούμενων βιολογικών κι οργανικών σωματιδίων με την μέση κοκκομετρική διάμετρο να μειώνεται ακολουθώντας υπερβολική κατανομή, ενόσω αυξάνεται η συγκέντρωση. Μία μεταβλητή «επιλεκτικότητας» χρησιμοποιείται για το κάθε είδος ώστε να συνυπολογίζεται η προτίμηση βόσκησης του ζωοπλαγκτού: άλλες άλγεις > διάτομα > οργανικά υπολείμματα > κυανοβακτήρια (e.g. Gliwicz,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

1980). Ο συντελεστής αφομοίωσης για την καταναλωμένη τροφή είναι σταθερός και χαμηλός (0.3) για τον άνθρακα (Gulati et al., 1985), αλλά είναι μεταβλητός για τον φώσφορο κι εξαρτώμενος από την εσωτερική περιεκτικότητα της τροφής σε αυτόν. Έτσι ο συντελεστής αφομοίωσης του φωσφόρου διατηρείται συνήθως υψηλότερος. Αυτός είναι ένας από τους μηχανισμούς που διαφοροποιούν την περιεκτικότητα του φωσφόρου στα διάφορα επίπεδα της τροφικής αλυσίδας.

Τα ζωοβένθη θεωρείται ότι τρέφονται από καθιζάνοντα οργανικά υπολείμματα και επικαθήμενες άλγειες, επίσης με κινητική τύπου Monod (τύπου ΙΙ). Επίσης θεωρείται ότι φέρουν ικανότητα αφομοίωσης φωσφόρου, μέσω της τροφής, συγκρίσιμη με αυτή του ζωοπλαγκτού.

Όλες οι διεργασίες θήρευσης των αρπακτικών ψαριών προσομοιώνονται με μία τύπου ΙΙΙ απόκριση (Holling, 1965): ο ρυθμός θήρευσης των αρπακτικών ψαριών εξαρτάται από την πυκνότητα της λείας στην υδάτινη στήλη σύμφωνα με μια σιγμοειδή καμπύλη. Οι μικροί λευκοκορέγονοι τρέφονται με ζωοπλαγκτόν, οι μεγάλοι λευκοκορέγονοι με ζωοβένθη και τα αρπακτικά ψάρια τρέφονται και με τα δύο είδη λευκοκορέγονων. Η ωοτοκία προσομοιώνεται ως μεταφορά, κάθε Μάιο, μικρού ποσοστού βιομάζας μεγάλων (ενήλικων) σε βιομάζα μικρών (ανήλικων). Στο τέλος κάθε χρόνου, μισή βιομάζα των μικρών μετατρέπεται σε βιομάζα των μεγάλων. Επίσης, οι λευκοκορέγονοι θεωρείται έχουν έναν σχετικά μεγάλο συντελεστή αφομοίωσης φωσφόρου, εφόσον η εσωτερική ποσόστωση σε φώσφορο των ψαριών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των κατώτερων οργανισμών της τροφικής αλυσίδας (Kitchell et al., 1975). Για τα αρπακτικά ψάρια, αυτός ο μηχανισμός δεν παίζει κάποιο ρόλο πλέον. Μία έμμεση επίδραση των μεγάλων λευκοκορέγονων που περιλαμβάνεται στο μοντέλο είναι η αναμόχλευση που δημιουργεί στον πυθμένα κατά τη διαδικασία της θήρευσης, δημιουργώντας μία ροή σωματιδίων και θρεπτικών στην υδάτινη στήλη (Breukelaar et al., 1994). Τα αρπακτικά ψάρια θεωρείται ότι εξαρτώνται από την ύπαρξη βλάστησης. Η φέρουσα ικανότητά τους μπορεί να εξαρτάται από το μέγεθος της παρακείμενης ελώδους περιοχής. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί για εύκρατες λίμνες, που είναι διαφορετικές από τις μεσογειακές, όπως η Κάρλα στην βιοποικιλότητα. Η Κάρλα περιέχει κυπρινοειδή που γεννιούνται τρεις φορές το έτος. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα του μοντέλου στην προσομοίωση μιας λίμνης σαν την Κάρλα.

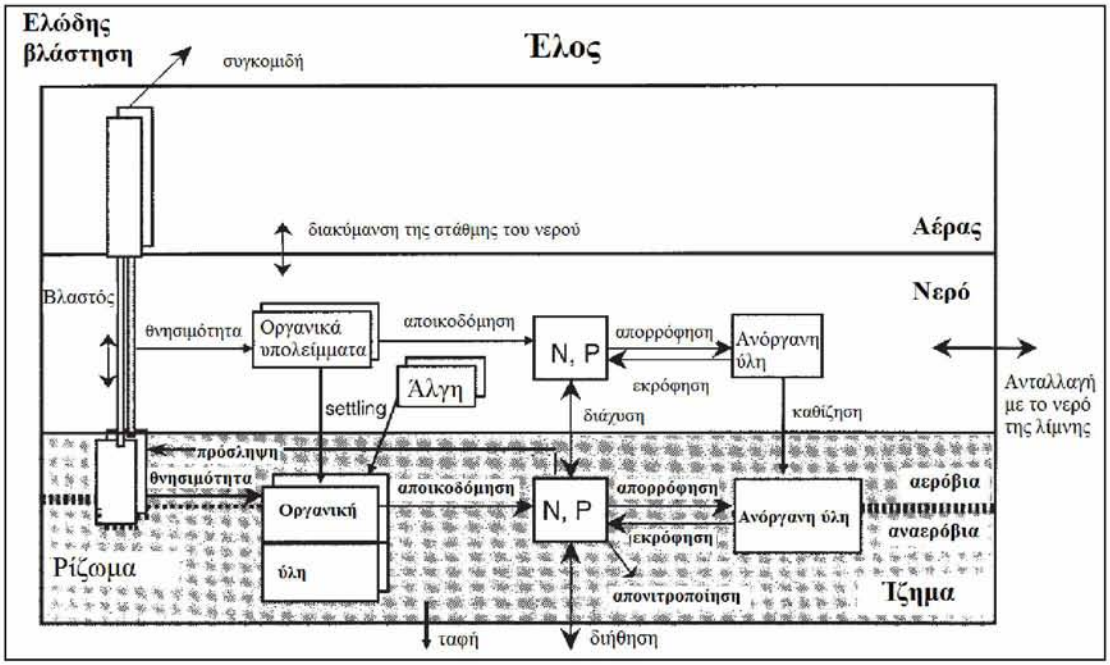
3.4.2.5 Υπορουτίνα των ελωδών περιοχών

Η υπορουτίνα των ελωδών περιοχών αποτελεί σύζευξη δύο προσομοιώσεων διεργασιών, μίας απλής καμπύλης ανάπτυξης για τους κάλαμους (Haslam, 1973; Dykyjová & Kveˇt, 1978; Björndahl, 1983), συνδυασμένης με μία περιγραφή των διεργασιών των θρεπτικών στην υδάτινη στήλη και του ανώτερου στρώματος ιζημάτων του πυθμένα αυτών των περιοχών, ανάλογη προς την αντίστοιχη στην περιοχή της λίμνης. Η βιομάζα της βλάστησης των ελών χωρίζεται σε ρίζωμα και βλαστό με μία αναλογία ως δύο ξεχωριστές μεταβλητές. Η εποχιακή ανάπτυξη μοντελοποιείται ως μεταφορά μέρους του ποσοστού των ριζωμάτων σε ποσοστό βλαστού, την άνοιξη, φωτοσυνθετική ανάπτυξη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και αντίστροφης πορείας μεταφορά το φθινόπωρο. Η ανάπτυξη, το καλοκαίρι, εξαρτάται από το βάθος νερού, το άζωτο (N) και φώσφορο (P) στο ανώτερο στρώμα ιζημάτων του πυθμένα, την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Τα θρεπτικά προσλαμβάνονται μόνο από το ανώτερο στρώμα ιζήματος. Προαιρετικά, τακτικός καθαρισμός της βλάστησης μπορεί να ληφθεί υπόψη.

Ο περιγραφές των στοιχείων και διεργασιών (αποικοδόμηση οργανικής ύλης, καθίζηση, προσρόφηση φωσφόρου (P), νιτροποίηση και απονιτροποίηση) είναι ανάλογες με αυτές του μοντέλου στη λίμνη, με τις διαφορές ότι το βάθος νερού είναι πολύ χαμηλότερο (προεπιλεγμένη τιμή 0.5m), οι ταχύτητες καθίζησης είναι υψηλότερες λόγω της απουσίας της επίδρασης του ανέμου, οπότε η επαναιώρηση θεωρείται μηδενική. Το φυτοπλαγκτόν θεωρείται ότι δεν αναπτύσσεται υπό τη σκιά των καλάμων.

Η επικοινωνία των υδάτινων στηλών της λίμνης και του έλους περιγράφεται με έναν συντελεστή ανταλλαγής (που αναπαριστά την μεταφορά λόγω διασποράς και λόγω διαφοράς σταθμών), πολλαπλασιασμένο με τη διαφορά συγκεντρώσεων. Η σχέση του έλους με τον πληθυσμό των ψαριών εντός της λίμνης, αρκείται στην περιγραφή του έλους ως περιοχή αναπαραγωγής των αρπακτικών ψαριών. Θεωρείται ότι η μέγιστη δυνατή βιομάζα αυτών των ψαριών αυξάνεται, μέχρι ένα όριο, με την έκταση του έλους (Ligtvoet & Grimm, 1992).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 3.5: Η δομή του μοντέλου για τις ελώδεις περιοχές. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

3.4.3 Είσοδοι κι έξοδοι

Ο χρήστης πρέπει να εισάγει τους εξής παράγοντες:

α) Χαρακτηριστικά της λίμνης

- Μέσο βάθος νερού [m]
- Επιφάνεια λίμνης, εκφρασμένη ως ανάπτυγμα
- Ιζήματα:
- περιεκτικότητα ξηρού βάρους [%]
- περιεκτικότητα σε οργανικά [% ξηρού βάρους]
- περιεκτικότητα ιλύος [%] ή Fe και Al [mg/g]
- ή αν δεν είναι διαθέσιμα τα παραπάνω δεδομένα γίνεται μία εκτίμηση του τύπου του ιζήματος, π.χ. αργιλώδες, αμμώδες, τυρφώδες
- Ελώδης περιοχή [-]

β) Εισροές νερού και θρεπτικών

- Υδραυλική παροχή [mm/d] ή χρόνος παραμονής [d]
- Υπόγειες διαφυγές ή υπόγεια τροφοδότηση [mm/d]
- Εξωτερική φόρτιση P, N και Si [g/m^2/d] ή αντίστοιχες συγκεντρώσεις των παροχών εισόδου [mg/l]: άθροισμα των σημειακών πηγών των διάχυτων πηγών κα της επιφανειακής εισροής. Εκτίμηση της % φόρτισης διαλυμένης και σωματιδιακής.
- Παροχή μάζας ή αντίστοιχη συγκέντρωση των υδραυλικών παροχών εισόδου ανόργανων αιωρούμενων σωματιδίων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

γ) Άλλες είσοδοι

- Θερμοκρασία νερού
- Ηλιακή ακτινοβολία

δ) Ιστορικό λίμνης και διαχείριση

- Συγκεντρώσεις P και N στο ανώτερο στρώμα ιζημάτων στον πυθμένα, ή εκτίμηση του ιστορικού φόρτισης με θρεπτικά
- Ένταση αλιείας [d^{-1}]
- Πιθανά διαχειριστικά μέτρα όπως βιοδιαχείριση, βυθοκόρηση και καθαρισμός καλάμων

Ως έξοδοι προκύπτουν οι συγκεντρώσεις ή βιομάζες όλων των μεταβλητών σε οποιοδήποτε επιθυμητό χρονικό διάστημα. Κάποιες σημαντικές έξοδοι είναι:

- Ολικός φώσφορος (TP) [mgP/l] = PO_4 + P_{ads} + P των οργανικών υπολειμμάτων + P των άλγεων
- Ολικό άζωτο (TN) [mgN/l] = NH4 + NO3 + N των οργανικών υπολειμμάτων + N των άλγεων
- Χλωροφύλλη-α (CHla) [mg m^{-3}] = το άθροισμα όλων των λειτουργικών ομάδων του παράγοντα: βιομάζα άλγεων * αναλογία Chla/D
- Διαφάνεια νερού: βάθος Secchi [m]= βάθος διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο νερό, μετρημένη από τον δίσκο του Secchi.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.5 Κρίσιμο φορτίο σε ρηχές λίμνες

3.5.1 Απόκριση της προσομοίωσης σε βάθος χρόνου

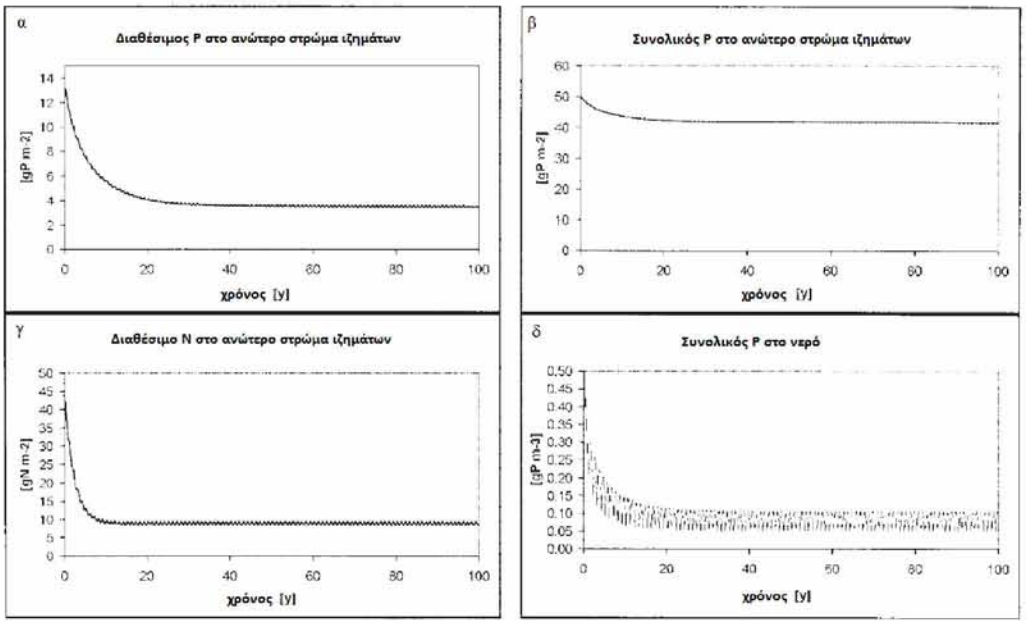
Αποτελεί κοινή γνώση ότι τα υδάτινα οικοσυστήματα συνήθως προσαρμόζονται αργά στις αλλαγές των επιπέδων των θρεπτικών. Ένας από τους λόγους που συμβαίνει αυτό, είναι η αργή αντίδραση των ιζημάτων και η μεγάλη απελευθέρωση θρεπτικών από τα ιζήματα για πολλά χρόνια μετά τη μείωση της φόρτισης της λίμνης.

Για να διερευνηθεί αυτό το φαινόμενο με το μοντέλο PClake, διεξήχθησαν προσομοιώσεις μεγάλων χρονοσειρών για μία υποθετική λίμνη η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική πολλών ολλανδικών ρηχών λιμνών. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι: μέσο βάθος = 2 m, ανάπτυγμα ανέμου = 1000 m, επιφανειακή υδραυλική παροχή = 20 mm/day (= 7.2 m/yr), χωρίς υπόγεια διήθηση ή τροφοδότηση, χωρίς ελώδεις περιοχές περιμετρικά και με ελαφρώς αργιλώδη ιζήματα (30% ξηρή μάζα, από την οποία το 10% είναι οργανική και το 10% ανόργανη).

Αυτή η μέση λίμνη αρχικά υπόκειται σε υψηλή φόρτιση θρεπτικών (20 mg P m^{-2} d^{-1} και 200 mg N m^{-2} d^{-1}) για 100 έτη, ώστε να δημιουργηθεί ίζημα πλούσιο σε N και P: 13 g m^{-2} διαθέσιμου P and 43 g m^{-2} διαθέσιμου N σε βάθος 10 cm του ανώτερου στρώματος του πυθμένα της λίμνης. Με τον όρο διαθέσιμο εννοείται το σύνολο των θρεπτικών εκτός της βραδύκαυστης οργανικής ύλης. Στη συνέχεια, η φόρτιση μειώθηκε στο 10% της αρχικής για τα επόμενα 100 έτη προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα, ο διαθέσιμος P στα ιζήματα μειώθηκε σταδιακά μέχρι να ισορροπήσει στα 3,5 g m^{-2} και το διαθέσιμο N αντίστοιχα στα 9 g m^{-2} (Διαγράμματα 3.1). Επίσης, η συγκέντρωση των θρεπτικών στην υδάτινη στήλη ακολούθησε παρόμοια μείωση. Η μεγαλύτερη μείωση σημειώθηκε τα πρώτα 10-15 χρόνια.

Μία ακόμα μεγαλύτερη μείωση της φόρτισης, σε 0.5 mg P m^{-2} d^{-1} και 5 mg N m^{-2} d^{-1} , ξεκινώντας από τις ίδιες ευτροφικές συνθήκες, οδηγεί σε μετατροπή των άλγεων σε μακρόφυτα (Διαγράμματα 3.2) Επίσης σ' αυτή την περίπτωση παίρνει 15 έτη, ώστε η συγκέντρωση P στα ιζήματα να φτάσει στη νέα χαμηλότερη τιμή. Ο βραδύκαυστος P δεν ισορροπεί σε κάποια τιμή, εφόσον συνεχώς βυθίζεται σε βαθύτερα στρώματα του πυθμένα, χωρίς να ανανεώνεται. Το στρώμα του πυθμένα, που λαμβάνει υπόψη το μοντέλο, είναι σταθερού πάχους και πορώδους. Τα άλγη σταδιακά μειώνονται έως ότου σε βάθος 8 ετών αγγίξουν χαμηλά επίπεδα. Ακολουθεί η αντικατάστασή τους από μακρόφυτα. Επειδή τα μακρόφυτα χρειάζονται λίγα έτη για να αποκτήσουν υψηλή βιομάζα, η συγκέντρωση ολικού φωσφόρου (TP) στο νερό προσωρινά αυξάνεται στη μεταβατική περίοδο, μέχρι να ξαναπέσει σε χαμηλά επίπεδα. Η συγκέντρωση του διαθέσιμου αζώτου μετά τη σταθεροποίηση των μακρόφυτων αυξάνεται λίγο, πιθανόν εξαιτίας του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής του συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση της λίμνης.

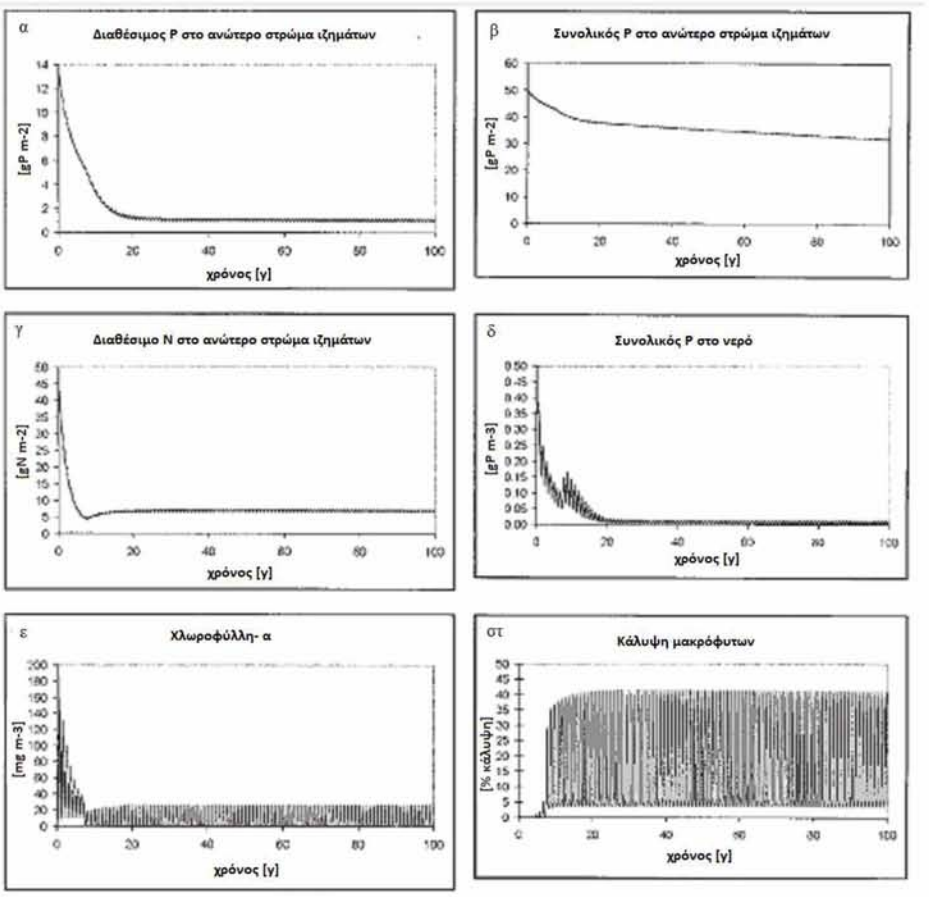
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



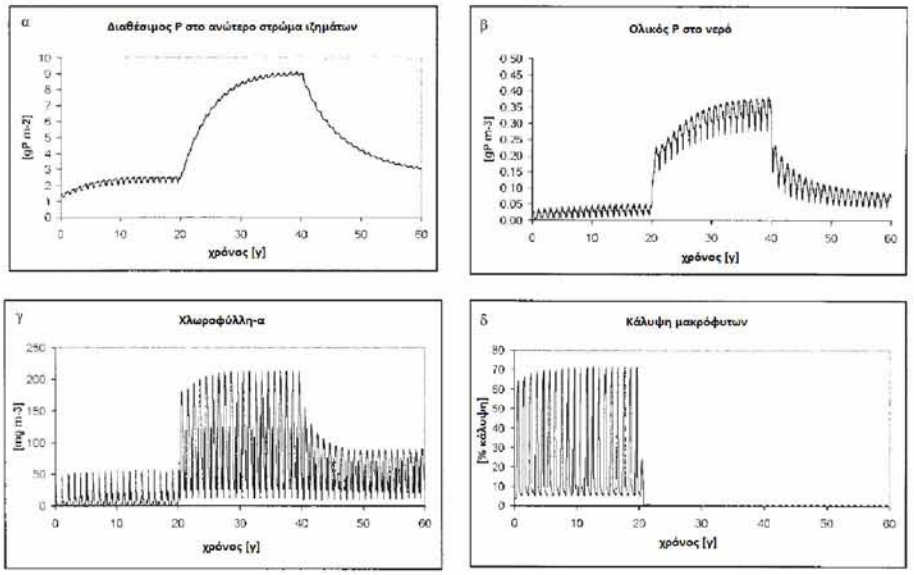
Διαγράμματα 3.1: Προσομοιώσεις σε βάθος χρόνου με μικρή φόρτιση θρεπτικών και με ευτροφική αρχική κατάσταση α) διαθέσιμος φώσφορος (P) στο άνω στρώμα των ιζημάτων [g P m-2], β) ολικός φώσφορος (P) στο άνω στρώμα των ιζημάτων [g P m-2], γ) διαθέσιμο άζωτο (N) στο άνω στρώμα των ιζημάτων [g N m-2], δ) ολικός φώσφορος (P) στην υδάτινη στήλη [g P m-3]. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Μία ρηχή λίμνη, κατά τη μετατροπή της από την κατάσταση που επικρατούν άλγη στην κατάσταση επικράτησης των μακρόφυτων, συνήθως παρουσιάζει υστέρηση όσον αφορά στην απόκρισή της σε αλλαγές φόρτισης (Διαγράμματα 3.3). Για να αναδειχθεί η υστέρηση, γίνεται η προσομοίωση της λίμνης ξεκινώντας από μεσοτροφικές συνθήκες και φόρτισης 1.5 mg P m^{-2} d^{-1}, ενώ ακολουθούν 20 χρόνια πενταπλάσιας φόρτισης P και άλλα 20 με μείωση στην αρχική εισροή P. Η απόκριση της συγκέντρωσης του P στα ιζήματα εμφανίζει καθυστέρηση κάποιων ετών σε σχέση με τις αλλαγές. Αντιδρά πιο αργά στην περίοδο της μείωσης. Τα μακρόφυτα που εξαφανίζονται μετά την αύξηση της φόρτισης δεν επανεμφανίζονται μετά τη μείωσή της. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α μειώνεται μετά την μείωση, αλλά δεν επανέρχεται στις αρχικές χαμηλές τιμές. Εντούτοις, ο ευτροφισμός μετέτρεψε το σύστημα από κατάσταση διαύγειας και επικράτησης μακρόφυτων σε θολερή κατάσταση επικράτησης κυανοβακτηρίων. Αυτή η διεργασία δεν μπορεί να αναστραφεί μόνο με μείωση της εισροής θρεπτικών, σε συμφωνία και με τις μετρήσεις πεδίου σε διάφορες λίμνες (Gulati & Van Donk, 2002).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διαγράμματα 3.2: Προσομοιώσεις σε βάθος χρόνου με πολύ χαμηλή φόρτιση θρεπτικών ξεκινώντας από ευτροφική κατάσταση α) Διαθέσιμος φώσφορος (P) στο άνω στρώμα των ιζημάτων [gP m-2], β) ολικός φώσφορος (P) στο άνω στρώμα των ιζημάτων [gP m-2], γ) διαθέσιμο άζωτο (N) στο άνω στρώμα των ιζημάτων [gN m-2], δ) ολικός φώσφορος (P) στην υδάτινη στήλη [gP m-3], ε) χλωροφύλλη-α [mg m-3], στ) μακρόφυτα [% κάλυψη του πυθμένα]. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)



Διαγράμματα 3.3: Προσομοίωση της μέσης λίμνης με αρχική τη διαυγή κατάσταση, για 1-20 έτη χαμηλής φόρτισης, για 20-40 έτη υψηλής φόρτισης και 40-60 έτη χαμηλής φόρτισης. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.5.2 Οι επιδράσεις της φόρτισης με θρεπτικά και των αρχικών συνθηκών σε μια μέση λίμνη

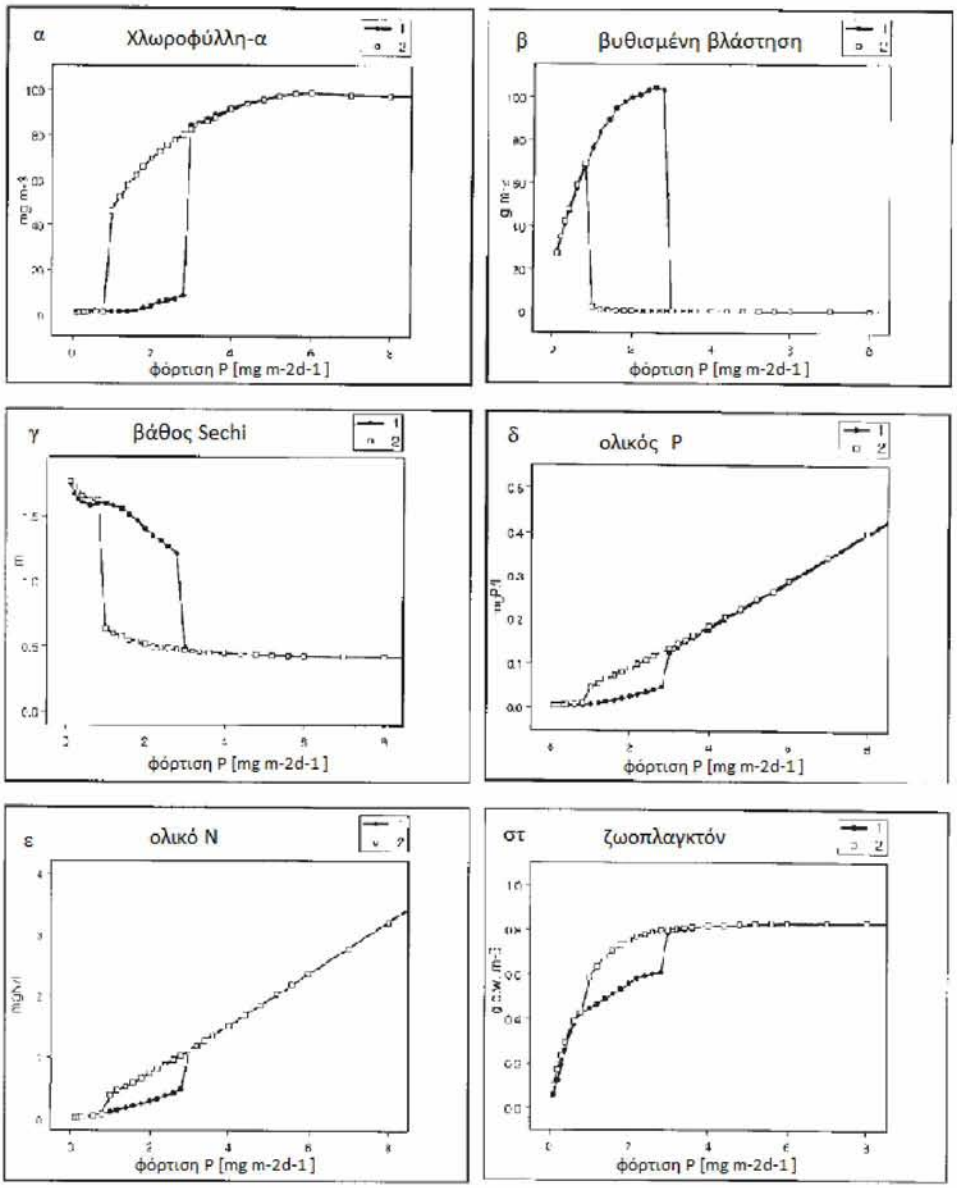
Για τη διερεύνηση της μακροπρόθεσμης επίδρασης διαφορετικών φορτίσεων θρεπτικών, γίνονται προσομοιώσεις 50 ετών με ανά περίπτωση σταθερή φόρτιση που κυμαίνεται από 0 ως 10 mg P m^{-2} d^{-1}. Η εισροή αζώτου ορίζεται δεκαπλάσια του P. Για κάθε περίπτωση, η προσομοίωση γίνεται δύο φορές, ξεκινώντας είτε από την κατάσταση επικράτησης των μακρόφυτων ή από την κατάσταση επικράτησης του φυτοπλαγκτού. (Διαγράμματα 3.4)

Οι σχέσεις μεταξύ της εισροής θρεπτικών και χλωροφύλλης, και μεταξύ της εισροής θρεπτικών και της βιομάζας μακρόφυτων είναι μη γραμμικές, με απότομη αύξηση της χλωροφύλλης από χαμηλές τιμές (επικράτηση μακρόφυτων) σε υψηλές τιμές (επικράτηση φυτοπλαγκτού). Επιπρόσθετα, η απόκριση εμφανίζει υστέρηση, με το κρίσιμο φορτίο να είναι διαφορετικό στις δύο διαφορετικές εξεταζόμενες περιπτώσεις. Το κρίσιμο φορτίο για την αλλαγή από θολερή σε διαυγή κατάσταση είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό της αντίστροφης αλλαγής, 0.9 και 3 mg P m^{-2} d^{-1} , αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το βάθος Secchi επίσης εμφανίζει απότομη μεταβολή από υψηλές σε χαμηλές τιμές, όταν αλλάζει η κατάσταση (Διάγραμμα 3.4 γ). Οι συγκεντρώσεις του ολικού P και ολικού N είναι ανάλογες της φόρτισης όταν έχουμε θολερή κατάσταση, αλλά είναι πολύ μικρότερες όταν έχουμε διαυγή κατάσταση. Αυτές οι μεταβολές και οι υστερήσεις εμφανίζονται επίσης και στη βιομάζα των διάφορων ζωικών ομάδων. Όταν η λίμνη βρίσκεται σε θολερή κατάσταση, το ζωοπλαγκτόν εμφανίζει μία σχεδόν ασυμπτωτική σχέση με τη φόρτιση. Στην διαυγή κατάσταση η βιομάζα του ζωοπλαγκτού είναι μικρότερη πιθανόν εξαιτίας της μικρότερης διαθεσιμότητας σε τροφή. Ωστόσο, ο λόγος ζωοπλαγκτού - φυτοπλαγκτού είναι πολύ μεγαλύτερος. Τα ζωοβένθη είναι περισσότερα στη διαυγή κατάσταση, εξαιτίας της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας σε τροφή (οργανική ύλη στα ιζήματα). Οι μικροί λευκοκορέγονοι (πλαγκτοβόρα) έχουν υψηλότερη βιομάζα, όταν η λίμνη είναι θολερή παρά διαυγής. Το αντίθετο ισχύει για τα μεγάλα ψάρια (βενθοβόρα). Η βιομάζα των αρπακτικών ψαριών είναι υψηλή μόνο στη διαυγή κατάσταση (με ένα όριο που συνδέεται με τη φέρουσα ικανότητα της λίμνης). Αυτό αντανακλάται σε ένα μεγαλύτερο λόγο αρπακτικών ψαριών- λευκοκορέγονων.

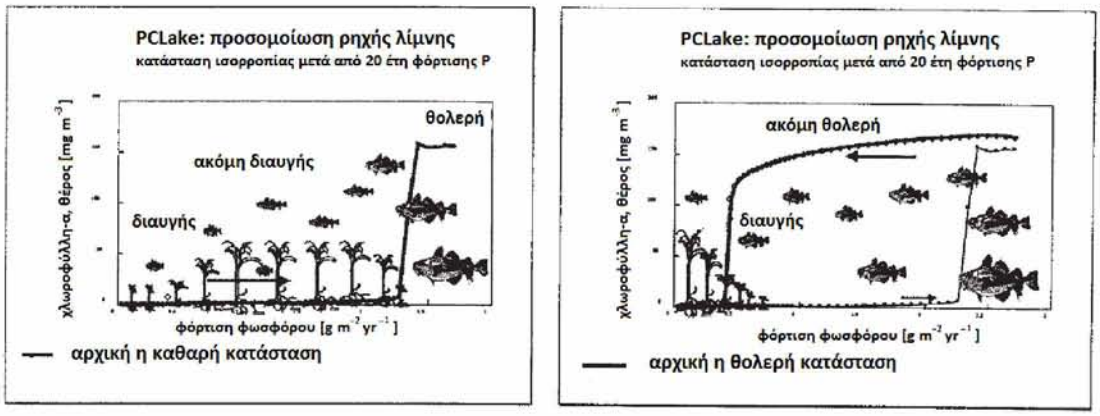
Από τη σχέση των συγκεντρώσεων της προσομοιωμένης χλωροφύλλης-α και του ολικού P, προκύπτει κρίσιμη συγκέντρωση περίπου ίση με 0.05 mg P l^{-1}. Η Εικόνα 3.6 δίνει μία σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της υστέρησης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διαγράμματα 3.4: Προσομοιώσεις της μέσης ρηχής λίμνης για εύρος φόρτισης με φώσφορο (P). Όλες οι προσομοιώσεις πραγματώνονται για δύο αρχικές καταστάσεις, μία διαυγή κατάσταση επικράτησης μακρόφυτων (καμπύλη 1, κύκλοι) μία θολερή κατάσταση επικράτησης φυτοπλαγκτού (καμπύλη 2, τρίγωνα). Τα αποτελέσματα αφορούν στις μέσες θερινές τιμές για προσομοίωση 50 ετών ίδιων συνθηκών φόρτισης. Οι διάφορες μεταβλητές των αξόνων y εξετάζονται συναρτήσει διαφορετικών φορτίσεων με φώσφορο. α) χλωροφύλλη-α, β) βλάστηση, γ) βάθος Secchi, δ) ολικός φώσφορος (TP), ε) ολικό άζωτο (TN) και στ) ζωοπλαγκτόν. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση του φαινομένου της υστέρησης, όπως αυτό προσομοιώθηκε από το PCLake. Αριστερά: μεταβολή της κατάστασης σε θολερή, δεξιά: μεταβολή της κατάστασης σε διαυγή (αποκατάσταση) (Van Liere & Jonkers)

3.5.3 Κρίσιμο φορτίο για διαφορετικούς τύπους λιμνών

Παρόμοιες προσομοιώσεις γίνονται για διάφορους συνδυασμούς άλλων τύπων λίμνης. Οι παράγοντες που ακολουθούν ποικίλλουν, όταν λαμβάνονται υπόψη μεμονωμένα αλλά και σε συνδυασμό:

(Σημείωση: ο αστερίσκος υποδηλώνει την τιμή της λίμνης που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση της παραπάνω παραγράφου.)

- υδραυλική παροχή: 10, 20*, 40 ή 80 [mm d^{-1}]
- βάθος νερού: 1, 1.5, 2*, 3 ή 4 [m]
- ανάπτυγμα ανέμου: 100, 300, 1000* ή 3000 [m]
- λόγος φόρτισης N/P: 10* ή 3 [g N / g P]
- ελώδης περιοχή: 0.001*, 0.15, 0.3 ή 1.0 [m^2 έλος . m^{-2} λίμνη]
- τύπος ιζήματος: 1=άργιλος*, 5=τύρφη, 6=άμμος
- ρυθμός ψαρέματος: 0, 0.00137* ή 0.01 [d^{-1}]
- αρχική κατάσταση (1=διαυγής, 2=θολερή)
- ο ρυθμός φόρτισης με P σε όρους παροχής μάζας, ο οποίος κυμαίνεται από 0,005 έως 1,0 mg P l^{-1} σε 35 βήματα: [0.005 0.01 0.015 0.02:0.01:0.18 0.20:0.02:0.30 0.35 0.40 0.45 0.5:0.1:1.0].

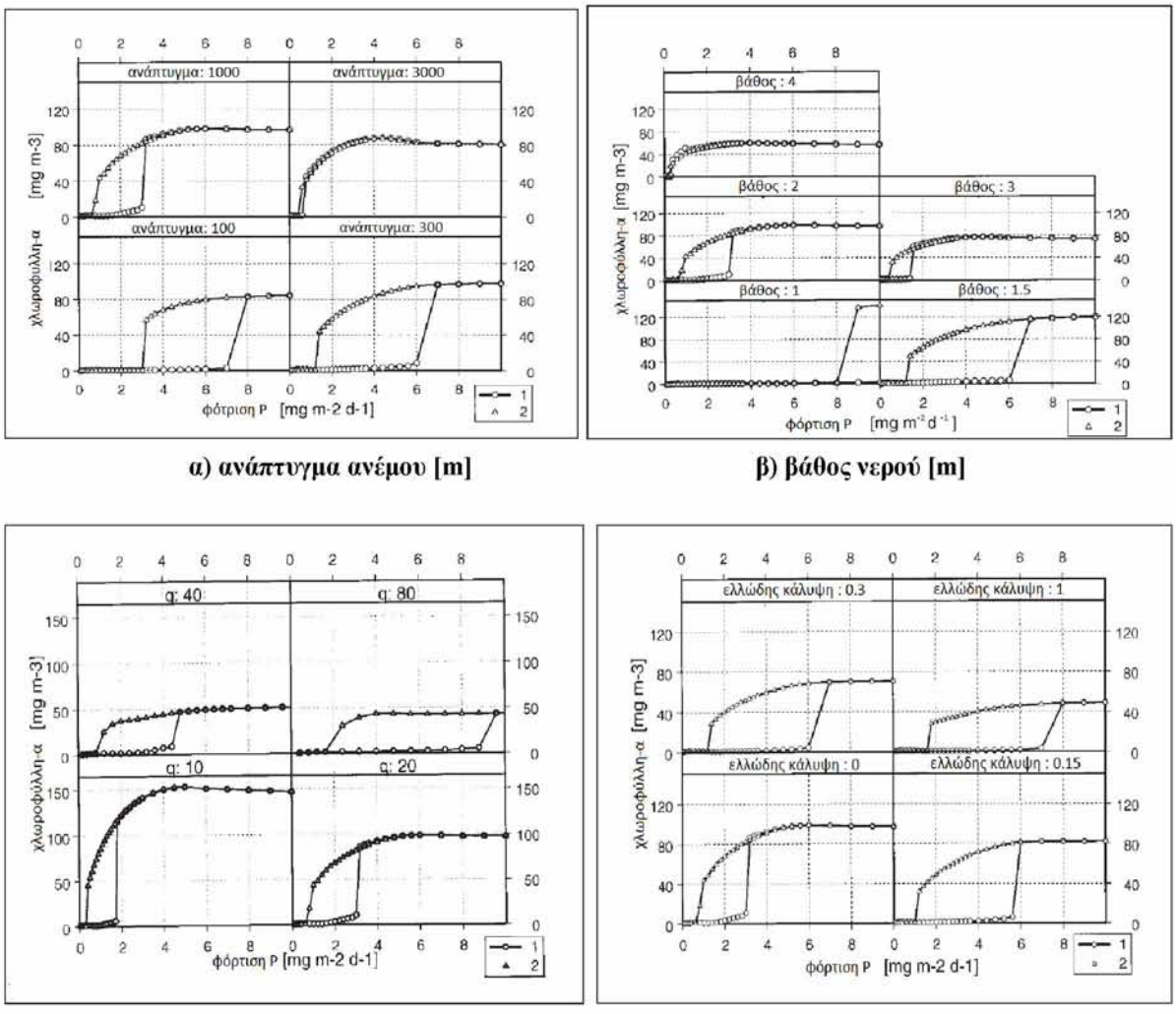
Τα μέσα θερινά αποτελέσματα της προσομοίωσης μετά από 20 έτη χρησιμοποιούνται για την ανάλυση. Τα 20 έτη είναι ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, ώστε να φτάσει το σύστημα στην καινούρια ισορροπία, παρότι για να ισορροπήσει ο P μπορεί να χρειάζεται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Οι τιμές του κρίσιμου φορτίου υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση. Η θερινή μέση φυτοκάλυψη επιλέγεται να είναι 20%, εφόσον η τιμή αυτή είναι αντιπροσωπευτική μιας λίμνης, η οποία βρίσκεται σε κατάσταση εναλλαγής των δύο φάσεων.

Με την ανάγνωση των Διαγραμμάτων 3.5 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Με την αύξηση του αναπτύγματος του ανέμου (επιφάνεια λίμνης), μειώνονται οι τιμές αμφότερων των κρίσιμων φορτίων. Η αύξηση του βάθους της λίμνης επίσης μειώνει τα δύο κρίσιμα φορτία. Το κρίσιμο φορτίο αυξάνεται με την υδραυλική παροχή (μειώνεται με τον χρόνο παραμονής). Η κρίσιμη φόρτιση είναι μικρότερη για λίμνες τυρφώδους πυθμένα, μεγαλύτερη για λίμνες αμμώδους πυθμένα και ενδιάμεση για λίμνες αργιλώδους πυθμένα. Η επίδραση των παραγόντων αναδεικνύεται για μεταβολή του καθενός ξεχωριστά, χωρίς να μεταβάλλονται οι υπόλοιποι. Αυτό πρακτικά είναι ανέφικτο, καθώς οι παράγοντες αλληλοσχετίζονται. Για παράδειγμα η υδραυλική παροχή έχει θετική συσχέτιση με την παροχή μάζας των θρεπτικών. Μεγαλύτερος ρυθμός ψαρέματος τείνει να αυξήσει το κρίσιμο φορτίο, αν και τα αποτελέσματα στο εύρος μελέτης που έχει γίνει, αφορούν κυρίως σε θολερή λίμνη,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

χωρίς να γίνεται η αλλαγή. Η ύπαρξη ελωδών περιοχών αυξάνει τα κρίσιμα φορτία σε μεγάλο βαθμό. Οι παραπάνω παρατηρήσεις γενικά αφορούν στα κρίσιμα φορτία και των δύο κατευθύνσεων μεταβολής, δεδομένου ότι οι μεταβολές του κρίσιμου φορτίου που αφορούν στη μεταβολή προς θολερή λίμνη είναι μεγαλύτερες. Δηλαδή οι μηχανισμοί που αντιστέκονται στον ευτροφισμό είναι πιο ευαίσθητοι. Επίσης η απόσταση στα διαγράμματα των δύο γονάτων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες. Σε ακραίες συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε πολύ μεγάλη επιφάνεια λίμνης, τα σημεία αλλαγής σχεδόν συμπίπτουν και έτσι το φαινόμενο της υστέρησης αποδυναμώνεται.

Οι μέσες θερινές συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης φαίνονται συναρτήσει του ολικού φωσφόρου εντός της λίμνης, έτσι ώστε τα κρίσιμα φορτίσεις να μεταφραστούν σε κρίσιμες συγκεντρώσεις φωσφόρου, μία μεταβλητή που μπορεί μετρηθεί πιο εύκολα από τους διαχειριστές της λίμνης (Διαγράμματα 3.6). Παρατηρείται ότι για τον πιο συχνό τύπο λίμνης, η κρίσιμη συγκέντρωση φωσφόρου κυμαίνεται από 0.03- 0.05 mg P m^{-3}, όταν η μετατροπή γίνεται από την θολερή κατάσταση, και 0.05- 0.1 mg P m^{-3} για την αντίθετη πορεία.

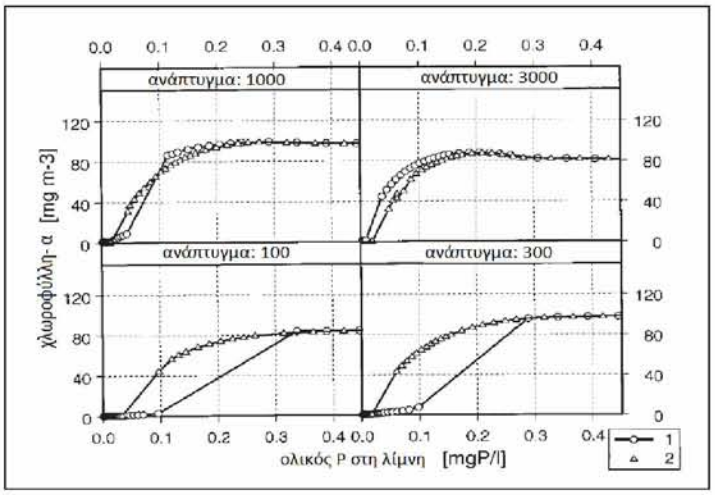


α) ανάπτυγμα ανέμου [m] **β) βάθος νερού [m]**

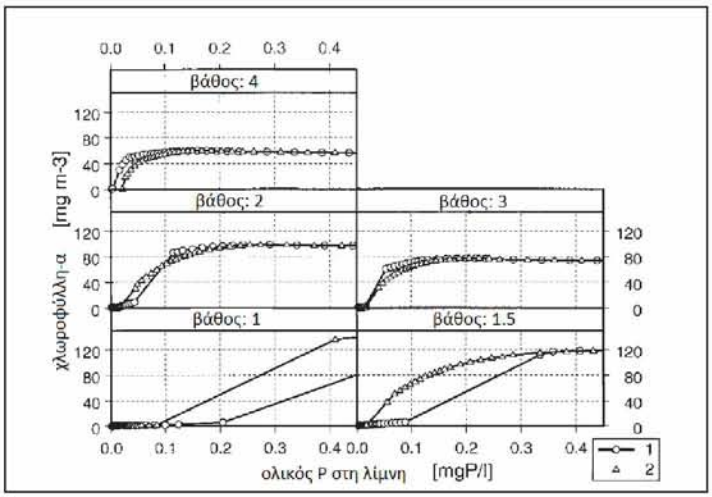
γ) ειδική παροχή [mm/d] **δ) κάλυψη ελωδών περιοχών [-]**

Διαγράμματα 3.5: Προσομοιώσεις διαφορετικών τύπων λιμνών για ένα εύρος τιμών φόρτισης με φώσφορο. Η ανά περίπτωση παράμετρος εισόδου εξετάζεται για διαφορετικές της τιμές, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές με τιμές αυτές της μέσης λίμνης. όλες οι προσομοιώσεις διεξάγονται για δύο αρχικές καταστάσεις (διαυγής: 1, θολερή: 2). Οι έξοδοι αφορούν στα μέσα θερινά επίπεδα χλωροφύλλης-α μετά από 20 έτη ίδιων συνθηκών φόρτισης φωσφόρου (P). (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

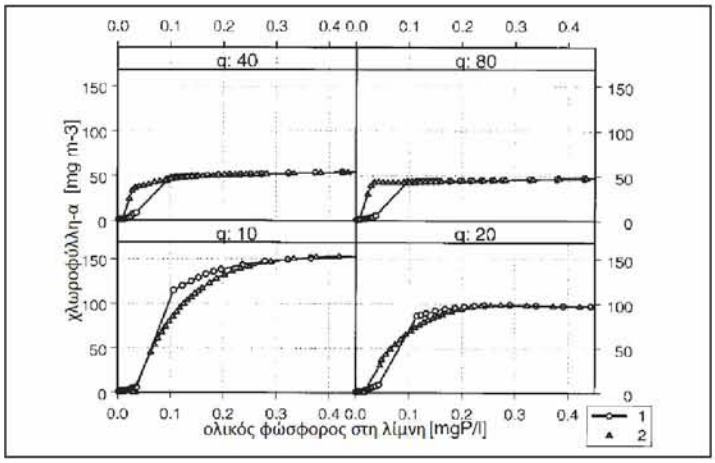
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



α) διαφορετικά αναπτύγματα ανέμου [m]



β) διαφορετικό βάθος νερού [m]



γ) διαφορετικές ειδικές υδραυλικές παροχές [mm/d]

Διαγράμματα 3.6: Προσομοιώσεις της χλωροφύλλης-α συναρτήσει των συγκεντρώσεων ολικού φωσφόρου στη λίμνη για διαφορετικούς τύπους λιμνών. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.5.4 Εμπλεκόμενοι μηχανισμοί

Το φαινόμενο της υστέρησης, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις μπορεί να εξηγηθεί από διάφορους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο μοντέλο. Η δυσκολία είναι ότι τόσο το φυτοπλαγκτόν όσο και τα μακρόφυτα, άμεσα ή έμμεσα προωθούν τις δικές τους ιδανικές συνθήκες διαβίωσης και λειτουργούν ανασταλτικά για τις συνθήκες διαβίωσης του άλλου.

Ο περιορισμός της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τα μακρόφυτα. Χρειάζονται διαυγές νερό, με την ηλιακή ακτινοβολία να φτάνει στον πυθμένα. Παράλληλα, κρατούν το νερό διαυγές με αρκετούς μηχανισμούς: η ειδική απορρόφηση φωτός των μακρόφυτων είναι χαμηλή (πολύ χαμηλότερη από αυτή του φυτοπλαγκτού), μειώνουν την επαναιώρηση σταθεροποιώντας τα ιζήματα και αναστέλλουν την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού με την ανταγωνιστική πρόσληψη των θρεπτικών. Επιπλέον, διαχειρίζονται την καθύψος ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού, υποβοηθώντας τα αρπακτικά ψάρια και εμποδίζοντας την πρόσληψη τροφής των βενθοβόρων ψαριών (όντας αυτά πλαγκτοβόρα σε μικρή ηλικία). Το φυτοπλαγκτόν, από την άλλη, υπερισχύει στον ανταγωνισμό σε πιο σκοτεινά και με μεγαλύτερο βάθος ύδατα, καθώς χρειάζεται λιγότερο φως για να αναπτυχθεί. Από τη στιγμή που θα κυριαρχήσει, κρατά το νερό θολερό, εξαιτίας της υψηλής απορρόφησης φωτός και επειδή εντείνει την ανακυκλοφορία των θρεπτικών στην υδάτινη στήλη. Τα ιζήματα που δεν καλύπτονται από βλάστηση, είναι πιο ευάλωτα σε επαναιώρηση, εξαιτίας της δράσης του ανέμου (κύματα) και της αναμόχλευσης από τα βενθοβόρα ψάρια. Έτσι υπάρχουν τρεις κύριοι μηχανισμοί που συνεργάζονται: οι επιδράσεις του φωτός, των θρεπτικών και της τροφικής αλυσίδας.

Άλλοι μηχανισμοί που έχουν παρουσιαστεί ή προταθεί και συμβάλλουν επίσης είναι οι εξής: η απελευθέρωση αλληλοπαθητικών ουσιών από τα μακρόφυτα που αναστέλλουν την ανάπτυξη των άλγεων, η επικράτηση μεγαλύτερων ειδών ζωοπλαγκτού σε διαυγές νερό από τη στιγμή που απαλλάσσεται το σύστημα από τα αρπακτικά ψάρια, και άλλοι. Άλλοι μηχανισμοί, σε αντίθεση, μπορεί να λειτουργούν αποσταθεροποιητικά προς την υφιστάμενη κατάσταση, όπως η εμφάνιση ειδών ψαριού τα οποία είναι πιο ευπροσάρμοστα στις συνθήκες έντονης βλάστησης, ή ανάπτυξη αμυντικών μηχανισμών από το φυτοπλαγκτόν, ώστε να μη μειώσει την μάζα του λόγω βόσκησης. Αυτοί οι μηχανισμοί δεν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο, καθώς θεωρούνται δευτερεύοντες.

Η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της λίμνης μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Με την αύξηση του αναπτύγματος ανέμου, προκύπτουν χαμηλότερες τιμές κρίσιμου φορτίου (το ανάπτυγμα υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας της λίμνης). Το ανάπτυγμα λαμβάνεται κυρίως υπόψη στο μοντέλο στις εξισώσεις επαναιώρησης και καθίζησης: μεγαλύτερο ανάπτυγμα προκαλεί αύξηση του ρυθμού επαναιώρησης και μείωση του ρυθμού καθίζησης των άλγεων και λοιπών αιωρούμενων σωματιδίων, ώστε να αναπαρασταθούν οι μεγαλύτερες επιδράσεις των κυμάτων σε μεγαλύτερες λίμνες. Έτσι, ένα μεγαλύτερο ανάπτυγμα μπορεί να ευνοήσει τη θολερή κατάσταση μιας λίμνης με δύο μηχανισμούς. Συγκεκριμένα, αυξάνεται η θολερότητα του νερού και η απελευθέρωση θρεπτικών από τα ιζήματα, λόγω φυσικών αιτίων.

Το βάθος νερού επιδρά στην ανάπτυξη των μακρόφυτων, μέσω της εξάρτησής της από τις συνθήκες φωτός κάτω από την επιφάνεια του νερού. Η εκθετική μείωση της έντασης του φωτός με το βάθος θέτει ένα όριο βάθους επιβίωσης των φυτών. Επίσης, οι περιορισμένες απώλειες θρεπτικών σε ιζήματα, όταν έχουμε μεγάλα βάθη, ευνοούν την ανάπτυξη φυτοπλαγκτού, το οποίο τα καταναλώνει πριν καθιζάνουν. Ομοίως, επιδρά και ο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής, δεδομένου ότι δεν αλλάζει η υδραυλική παροχή. Από την άλλη, ο ρυθμός επαναιώρησης είναι χαμηλότερος σε λίμνες με μεγαλύτερο βάθος, όπως μικρότερη είναι και η επίδραση των βενθοβόρων ψαριών. Συμπερασματικά, το μεγάλο βάθος μειώνει το κρίσιμο φορτίο.

Η αύξηση της υδραυλικής παροχής, διατηρώντας την παροχή μάζας θρεπτικών σταθερή, αυξάνει το ρυθμό απώλειας μάζας του φυτοπλαγκτού κι έτσι προκαλεί τη μείωση της βιομάζας των άλγεων, ευνοώντας την ανταγωνιστική ισχύ των μακρόφυτων. Από την άλλη, μειώνεται και η βόσκηση του ζωοπλαγκτού. Μια άλλη επίδραση είναι ότι από τις ομάδες του φυτοπλαγκτού επικρατούν περισσότερο τα διάτομα και οι υπόλοιπες άλγεις σε σχέση με τα αργά αναπτυσσόμενα κυανοβακτήρια. Τα πρώτα ανταπεξέρχονται καλύτερα στους

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

μεγαλύτερους ρυθμούς διάλυσης. Στην πραγματικότητα, η υδραυλική παροχή και η φόρτιση με θρεπτικά συσχετίζονται θετικά, ωστόσο, στο μοντέλο αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα.

Η θετική επίδραση των ελών μπορεί να αποδοθεί με αρκετούς μηχανισμούς του μοντέλου: η πρόσθεση μιας επιπλέον περιοχής καθίζησης, η πρόσληψη θρεπτικών από την βλάστηση των ελών, μεγαλύτερη απονιτροποίηση και εξασφάλιση καταφυγίου για τα αρπακτικά ψάρια (που μοντελοποιείται με μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα για αυτή την ομάδα). Τα τρία πρώτα είναι ευθέως ανάλογα της έκτασης του έλους, ενώ η φέρουσα ικανότητα αυξάνεται έως και 15 % της αρχικής της τιμής. Τα ψάρια μελετώνται ξεχωριστά: προκύπτει ότι επηρεάζουν μόνο το κρίσιμο φορτίο για την μετατροπή της λίμνης σε θολερή κι όχι την αντίθετη πορεία. Αυτό καταδεικνύει ότι τα αρπακτικά ψάρια κυρίως παίζουν ρόλο στην σταθεροποίηση της διαυγούς κατάστασης κι όχι τόσο στην αποκατάστασή της από θολερή.

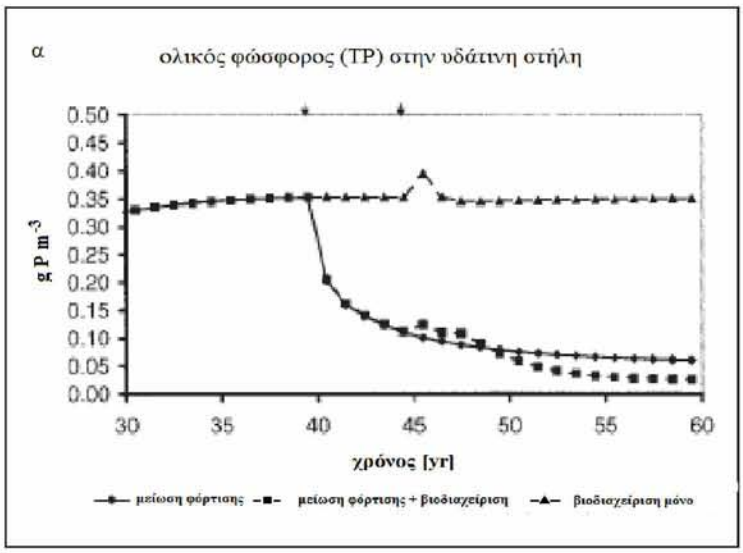
3.5.5 Υποδείξεις διαχείρισης

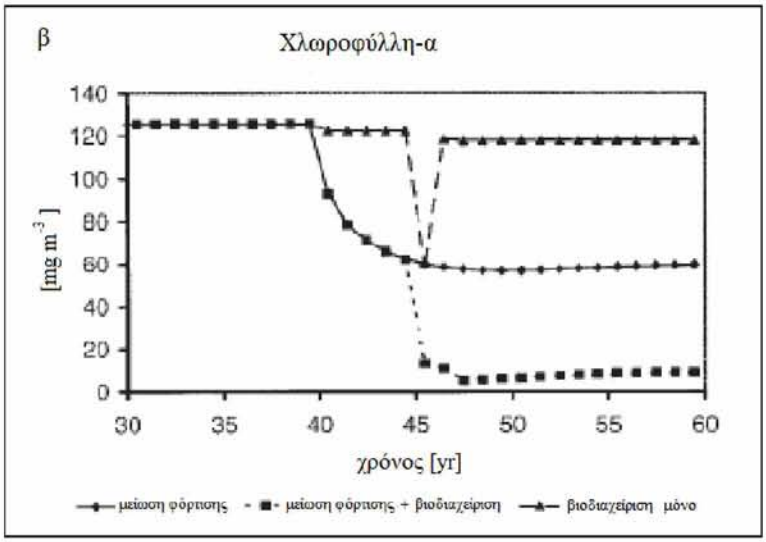
Η διαχείριση των λιμνών, γενικά, αποσκοπεί στην διατήρηση της κατάστασης επικράτησης μακρόφυτων, ή στην αποκατάσταση προς αυτή. Αυτό παρακινείται από το γεγονός, ότι αυτή η κατάσταση είναι η ιστορικά συνηθέστερη, χωρίς ανθρώπινη ακόμα παρέμβαση. Επίσης παρακινείται από την γενικότερη επιθυμία για υψηλότερη βιοποικιλότητα και την ανθρώπινη ανάγκη για νερό σε πόσιμη μορφή. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις προηγούμενες παραγράφους αναδεικνύουν το θετικό ρόλο που μπορεί να παίξει ένα μοντέλο, όπως το PClake, στην επιλογή μιας στρατηγικής διαχείρισης.

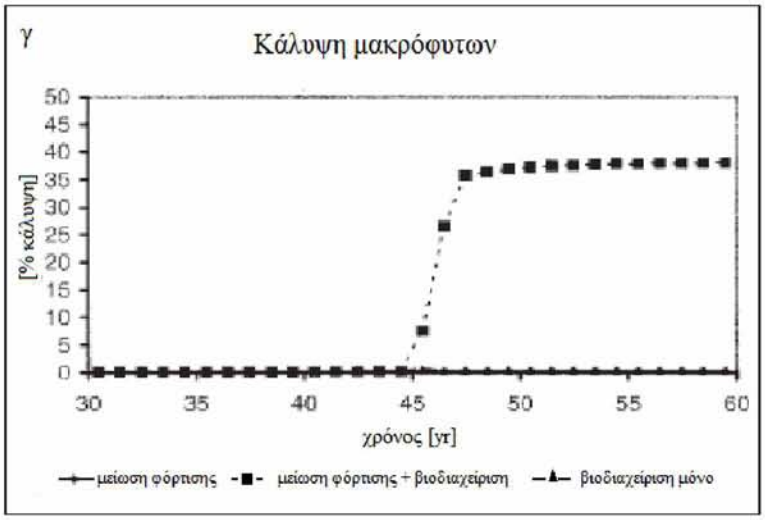
Η βασική στρατηγική διαχείρισης για αποκατάσταση μιας θολερής λίμνης είναι η μείωση της εξωτερικής φόρτισης με θρεπτικά σε ένα επίπεδο χαμηλότερο του κατωφλίου αποκατάστασης. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, ο στόχος δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί. Μερικές φορές, μπορεί να είναι δυνατή, η παρέμβαση σε μία από τις εισαγόμενες μεταβλητές, ώστε να αυξηθεί το κρίσιμο φορτίο των θρεπτικών της προκείμενης λίμνης. Από τις προσομοιώσεις προκύπτουν οι εξής επιλογές:

αύξηση της υδραυλικής παροχής και άρα μείωση χρόνου παραμονής (με προϋπόθεση ότι το επιπλέον νερό που εισέρχεται έχει λιγότερη συγκέντρωση P από τη λίμνη μείωση της επίδρασης του ανέμου στην καθίζηση κι επαναιώρηση, για παράδειγμα με τη δημιουργία παγίδων κατακράτησης ιζημάτων (εκβαθύνσεις) ή με διαμερισματοποίηση. μείωση του βάθους της λίμνης βελτίωση των συνθηκών επανακαθίδρυσης των ελωδών περιοχών που περιβάλλουν τη λίμνη ή συνδέονται με αυτή διαχείριση της βιοποικιλότητας με απομάκρυνση των πλαγκτοβόρων ψαριών Στα Διαγράμματα 3.7 φαίνονται οι επιδράσεις των υποδείξεων διαχείρισης για μέση φόρτιση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250







Διαγράμματα 3.7: Προσομοιώσεις διάφορων επιλογών διαχείρισης για τη μέση λίμνη, βάθους 2 m. Η λίμνη αρχικά μετατράπηκε από διαυγή σε θολερή μέσω αύξησης της φόρτισης σε θρεπτικά και ακολούθησαν 3 επιλογές: (1) μείωση της φόρτισης στο αρχικό μέσο επίπεδο, (2) ομοίως συνδυασμένο με βιοδιαχείριση 5 έτη αργότερα και (3) μόνο βιοδιαχείριση συνεχίζοντας την υψηλή φόρτιση. β) χλωροφύλλη-α και γ) κάλυψη μακρόφυτων. (Janse JH, 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

3.5.6 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα του μοντέλου συνάδουν με τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει για ρηχές λίμνες και καταδεικνύουν δύο εναλλακτικές καταστάσεις, διαυγούς και θολερού νερού (Timms & Moss, 1984; Hosper, 1989; Scheffer, 1990, 1998; Moss, 1990; Jeppesen et al., 1990b, 1997, μεταξύ άλλων). Πολλοί παράγοντες καθορίζουν ποια κατάσταση επικρατεί σε κάθε περίπτωση. Ένας γενικός περιοριστικός παράγοντας είναι η εξωτερική φόρτιση με θρεπτικά. Σε πολύ υψηλή φόρτιση, μόνο η θολερή κατάσταση είναι σταθερή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση επικρατεί η διαυγής. Για μια ενδιάμεση φόρτιση, μπορούν να συνυπάρχουν και οι δύο καταστάσεις και να εναλλάσσονται. Επειδή και οι δύο καταστάσεις διαθέτουν μια πληθώρα από αυτοσταθεροποιητικούς, ρυθμιστικούς μηχανισμούς, το επίπεδο της κρίσιμης φόρτισης, στο οποίο συμβαίνει αλλαγή, εξαρτάται από την αρχική κατάσταση της λίμνης. Η αλλαγή από θολερή σε διαυγή κατάσταση συμβαίνει σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης απ' ότι το αντίθετο (υστέρηση).

Οι προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι οι τιμές των δύο σημείων αλλαγής επηρεάζονται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της λίμνης, όπως είναι το βάθος του νερού, η υδραυλική παροχή, η επιφάνεια της λίμνης, ο τύπος ιζήματος, η αλιεία και η ύπαρξη ελώδους περιοχής. Τα σημεία αλλαγής των δύο κατευθύνσεων επηρεάζονται, σύμφωνα με το μοντέλο, εν μέρει με διαφορετικό τρόπο. Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να συσχετιστούν με συγκεκριμένους μηχανισμούς του μοντέλου. Για να αναλυθούν αυτές περισσότερο, δίνεται βαρύτητα στους αντίστοιχους οικολογικούς μηχανισμούς.

3.5.6.1 Οικολογικοί μηχανισμοί

Στη βιβλιογραφία, πολλές φορές περιγράφονται τα φαινόμενα του ευτροφισμού και του ολιγοτροφισμού σε ρηχές λίμνες (e.g. Scheffer, 1998, Hosper, 1997, et al). Σε μία διαυγή, ολιγο-μεσοτροφική λίμνη, η βιομάζα των άλγεων διατηρείται χαμηλή, λόγω του περιορισμού των θρεπτικών. Μια μέτρια αύξηση της εξωτερικής φόρτισης με θρεπτικά μπορεί να αντιμετωπιστεί από τα μακρόφυτα. Τα μακρόφυτα διατηρούν το νερό διαυγές, συγχρόνως ευνοώντας τις συνθήκες ανάπτυξής τους. Μία επιπλέον αύξηση της φόρτισης σταδιακά οδηγεί σε αύξηση της θολερότητας, λόγω της ανάπτυξης των άλγεων, έως ότου φτάσει το σύστημα σε συγκεκριμένη θολερότητα, όπου τα μακρόφυτα καταρρέουν. Η βιομάζα των άλγεων μπορεί να αυξηθεί περεταίρω με την αύξηση της φόρτισης, μέχρι να σταθεροποιηθεί, λόγω του περιορισμού του φωτός.

Στην αντίθετη κατεύθυνση, καθώς η φόρτιση μειώνεται, οι συνθήκες ανάπτυξης των άλγεων αλλάζουν. Από περιοριστικός παράγοντας η ηλιακή ακτινοβολία, γίνεται πλέον περιοριστικός παράγοντας ο φώσφορος (P). Η βιομάζα των άλγεων σταδιακά μειώνεται μετά την μείωση της φόρτισης. Ο λόγος της χλωροφύλλης προς τον ολικό φώσφορο σταδιακά αυξάνεται (Van Liere & Janse, 1992; Janse et al., 1992, κεφάλαιο 10 της διατριβής). Εξαιτίας της έλλειψης των μακρόφυτων, το νερό παραμένει θολερό. Σε μία συγκεκριμένη φάση, η διαύγεια αυξάνεται αρκετά, ώστε να επιτρέπεται η επαναδημιουργία των μακρόφυτων, οδηγώντας σε αλλαγή της κατάστασης, με τα άλγη να διατηρούν χαμηλή βιομάζα.

Στην προσπάθεια να εκτιμηθούν οι τιμές των δύο σημείων αλλαγής σε συγκεκριμένους τύπους λιμνών, οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται και η αβεβαιότητα των τιμών αυτών, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

ποιοι είναι οι ρυθμιστικοί μηχανισμοί της κάθε κατάστασης
πως επηρεάζονται αυτοί οι μηχανισμοί από την φόρτιση με θρεπτικά
πώς αυτοί οι μηχανισμοί επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά της λίμνης και τις παραμέτρους του μοντέλου.
Οι μηχανισμοί που εμπεριέχονται στο PCLake, μπορούν χονδρικά να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τρεις θεματικές: τα θρεπτικά (N), το φως (L) και την τροφική αλυσίδα (F). Οι μηχανισμοί που ρυθμίζουν την διαυγή κατάσταση και άρα οδηγούν στην θετική μετατόπιση του σημείου αλλαγής προς τη θολερή είναι:

α) (N) τα μακρόφυτα ανταγωνίζονται τα άλγη στην πρόσληψη αζώτου και φωσφόρου

β) (N) τα μακρόφυτα προωθούν τη μείωση του αζώτου, μέσω της απονιτροποίησης (αυξάνοντας το οξυγόνο στα ιζήματα)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

γ) (L+N) τα μακρόφυτα μειώνουν την επαναιώρηση των ιζημάτων (σωματίδια και θρεπτικά), σταθεροποιώντας τα, κι έτσι διατηρούν την διαφάνεια σε αρκετά υψηλά επίπεδα, ώστε να ευνοηθεί η ανάπτυξή τους

δ) (L+N) τα μακρόφυτα εμποδίζουν την επιβίωση των βενθοβόρων ψαριών, μειώνοντας έτσι την αναμόχλευση που προκαλούν αυτά

ε) (F) τα μακρόφυτα προάγουν τον περιορισμό της καθύψος ανάπτυξης των άλγεων, προάγοντας την ανάπτυξη των ιχθυοφάγων ψαριών (με παροχή καταφυγίου) και προστατεύοντας το ζωοπλαγκτόν από τα πλαγκτοβόρα ψάρια

στ) (λοιπά που δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο) η απελευθέρωση αλληλοπαθητικών ουσιών από τα μακρόφυτα που είναι επιβλαβείς για τις άλγεις

Αν ένας ή περισσότεροι από αυτούς τους μηχανισμούς υποχωρήσει, η βλάστηση μπορεί να καταρρεύσει, πιθανώς κυρίως υποκινούμενη από μείωση του φωτός κάτω από την επιφάνεια του νερού. Το μοντέλο υποθέτει ότι οι περίοδοι με περισσότερη ευαισθησία είναι η Άνοιξη, πριν την επανανάπτυξη των μακρόφυτων μετά το Χειμώνα, και το Φθινόπωρο, όταν αρχίζει να υποχωρεί η ανάπτυξή τους κι απονεκρώνονται. Αν το φυτοπλαγκτόν αναπτυχθεί, έστω και λίγο, σε μία από αυτές τις περιόδους, τότε αυξάνεται η πιθανότητα να επικρατήσει στα επόμενα έτη.

Η ρυθμιστική ικανότητα των μηχανισμών α) και β), που αφορά σε διαθεσιμότητα θρεπτικών, μειώνεται όσο αυξάνεται η φόρτιση σε θρεπτικά. Το ίδο συμβαίνει στους μηχανισμούς γ) και δ), όταν αρχίζει η αντίστροφη μέτρηση της σταδιακής αύξησης των συγκεντρώσεων των N και P στα ιζήματα. Το μοντέλο προτείνει ότι καθώς τα μακρόφυτα επικρατούν, η ανάπτυξη των άλγεων περιορίζεται από το άζωτο παρά από τον φώσφορο. Αυτό επιβεβαιώνεται από πειραματικές μετρήσεις, σε διάφορες περιπτώσεις (e.g. Van Donk & Gulati, 1995). Έτσι, υψηλή φόρτιση με άζωτο είναι δυνητικά πιο επιβλαβής από τη φόρτιση με φώσφορο σε αυτή τη φάση.

Επίσης, η ρύθμιση που επιτελείται από τον μηχανισμό ε) απειλείται εμμέσως από την αύξηση της φόρτισης με θρεπτικά, καθώς η βιομάζα των ψαριών γενικά αυξάνεται, λόγω της διαθεσιμότητας σε τροφή (Hanson & Leggett, 1982). Οι τροφικές σχέσεις αναδεικνύονται ως πολύ σημαντικός παράγοντας: η αύξηση της κατανάλωσης του ζωοπλαγκτού από τα μικρά ψάρια μειώνει εμμέσως την πίεση βόσκησης στις άλγεις. Η σημαντικότητα αυτού του μηχανισμού εξαρτάται από την ποιότητα της λίμνης, και το κατά πόσο μπορεί αυτή να προσφέρει καταφύγιο στα ιχθυοφάγα ψάρια. Αν η λίμνη είναι όντως φιλόξενη στα ιχθυοφάγα ψάρια, τότε αυτά με τη σειρά τους μπορούν να ελέγξουν την ανάπτυξη των λευκοκορέγονων κατά τι περισσότερο. Έτσι, το σημείο αλλαγής μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Όσο η λίμνη διατηρείται διαυγής, η αυξανόμενη βιομάζα των βενθοβόρων ψαριών δεν είναι από μόνη της τόσο επιβλαβής, σύμφωνα με το μοντέλο, καθώς η αναμόχλευση που προκαλούν αυτά παρεμποδίζεται από την βλάστηση.

Οι μηχανισμοί που ρυθμίζουν τη θολερή κατάσταση, και άρα τείνουν να εμποδίζουν την αποκατάσταση, όπως περιλαμβάνονται στο μοντέλο, είναι:

α) (N) το φυτοπλαγκτόν γίνεται πιο ολιγαρκές σε φώσφορο (υψηλότερη βιομάζα / φώσφορο) σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις του

β) (F + απώλεια) η επικράτηση των κυανοβακτηρίων σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις P, που δεν είναι βρώσιμα από το ζωοπλαγκτόν και έχουν μικρότερο ρυθμό καθίζησης

γ) (L) η υψηλή θολερότητα (λόγω άλγεων και νεκρής αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης) αναστέλλει την ανάπτυξη των μακρόφυτων και άρα αυξάνει την ανταγωνιστική ισχύ των άλγεων

δ) (L + N) η επαναιώρηση των καθιζάνοντων σωματιδίων και θρεπτικών κρατά τη θολερότητα και την απελευθέρωση θρεπτικών υψηλή

ε) (L + N) η επαναιώρηση που προκαλείται από την αναμόχλευση από βενθοβόρα ψάρια και επίσης κρατά τη θολερότητα και την απελευθέρωση θρεπτικών υψηλή

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

στ) (F) η σχετικά χαμηλή πίεση βόσκησης στο φυτοπλαγκτόν, εξαιτίας των ιχθυοφάγων ψαριών χαμηλά και των πλαγκτοβόρων ψαριών ψηλά

η) (N) (μοντελοποιήθηκε εν μέρει) η ανάπτυξη των άλγεων προάγει την εσωτερική αύξηση της ποσόστωσης του φωσφόρου, λόγω του υψηλού pH και των συνθηκών χαμηλού οξυγόνου στα ιζήματα (e.g. Hosper, 1997)

Η διεργασία η), ωστόσο, δεν εντοπίζεται μόνο στα άλγη αλλά και σε περιπτώσεις υψηλών πυκνοτήτων μακρόφυτων (Barko & James, 1998; Søndergaard & Moss, 1998). Στο μοντέλο αυτή η συσχέτιση εισάγεται μόνο μέσω του οξυγόνου, ενώ το pH δε λαμβάνεται υπόψη.

Καθώς η φόρτιση με θρεπτικά μειώνεται, η αυτορρύθμιση που ενεργοποιείται από τους μηχανισμούς α) και πιθανώς η) εξασθενεί. Οι ρυθμοί ανάπτυξης μειώνονται, ενώ οι αναπόφευκτες διαδικασίες απώλειας δεν αναστρέφονται. Η βιομάζα των άλγεων μειώνεται και η διαφάνεια του νερού αυξάνεται σταδιακά, μέχρι ενός επιπέδου που τα μακρόφυτα δύνανται να επικρατήσουν. Το μοντέλο προτείνει ότι η πιο ευαίσθητη περίοδος του χρόνου είναι αργά την Άνοιξη (Μάιος). Εάν το νερό διατηρηθεί καθαρό αρκετά, ώστε να επιτραπεί στα μακρόφυτα ένα καλό έναυσμα ανάπτυξης, τα τελευταία έχουν την ευκαιρία περεταίρω ανάπτυξης στα επόμενα έτη.

3.5.6.2 Σύγκριση με εμπειρικά στοιχεία: η επίδραση των χαρακτηριστικών των λιμνών

α) Το μέγεθος της λίμνης

Το μοντέλο προβλέπει ότι μικρότερες λίμνες είναι πιο ευνοϊκές στα μακρόφυτα από ότι μεγαλύτερες, σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις πεδίου (e.g. Van Geest και άλλοι, 2003). Ο μηχανισμός που εξηγεί αυτή τη συσχέτιση είναι οι υψηλότεροι ρυθμοί καθίζησης και χαμηλότεροι επαναιώρησης σε μικρές λίμνες (μικρότερη επίδραση κυμάτων). Αν και η πρόβλεψη είναι σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις, υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί που λειτουργούν αντίθετα. Ο άνεμος και κατ' επέκταση οι κυματισμοί μπορούν να παρεμποδίσουν άμεσα την ανάπτυξη της βλάστησης ή την επιβίωσή της. Άλλοι μηχανισμοί συσχετίζονται με το μήκος του αναπτύγματος της παράκτιας γραμμής των μικρών λιμνών. Οι μικρές λίμνες τείνουν να είναι πιο ρηχές κοντά στην ακτή τους, πράγμα το οποίο δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την εγκατάσταση των μακρόφυτων. Έτσι μπορούν να εξαπλωθούν σε όλη την λίμνη (Van den Berg, 1999). Μία μεγαλύτερη ακτογραμμή, η οποία συχνά καλύπτεται από ελόφυτα, επίσης ευνοεί τα ιχθυοφάγα ψάρια και παρέχει καταφύγιο στο ζωοπλαγκτόν (Jeppesen et al., 1990a; Grimm, 1989). Τέλος, έχει παρατηρηθεί, ότι οι φυσικοί θάνατοι των ψαριών το Χειμώνα, λόγω της ανεπάρκειας οξυγόνου, συμβαίνουν πιο συχνά σε μικρές λίμνες (Jeppesen et al., 1990a), αν και αυτό το συμπέρασμα δεν μπορεί να διεξαχθεί από τα αποτελέσματα του μοντέλου. Επίσης, ο Van Geest el al. (2003) αναφέρει πιο συχνούς θανάτους ψαριών σε μικρές λίμνες, αν και θεωρεί έμμεση τη συσχέτιση αυτή και άμεση τη συσχέτιση του θανάτου των ψαριών με τη θερινή περίοδο, όταν η στάθμη του νερού είναι χαμηλή. Παρόλα αυτά, οι θάνατοι των ψαριών λειτουργούν ως ένα φυσικό πείραμα βιοδιαχείρισης, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ως προς την επικράτηση της βλάστησης σε συγκεκριμένες λίμνες. Ο Van Geest et al (2003), μετά από διασταύρωση των αναλύσεών του με τις μελέτες των ρηχών πλημμυρικών λιμνών στην Ολλανδία, επιβεβαιώνει την σημαντικότητα των παραπάνω παρατηρήσεων, ως επικρατέστερες εξηγήσεις της αρνητικής επίδρασης του μεγέθους της λίμνης στην επικράτηση των μακρόφυτων.

β) Το βάθος λίμνης

Η μεγάλη επίδραση του βάθους νερού στην ανάπτυξη των μακρόφυτων (η χαμηλή πιθανότητα επιβίωσης των μακρόφυτων σε μεγάλα βάθη) επιβεβαιώνεται μέσω εμπειρικών παρατηρήσεων και μελετών. Το μέγιστο βάθος επιβίωσης των μακρόφυτων είναι συνάρτηση της διαφάνειας του νερού. Οι παραπάνω μελέτες δεν επεκτείνονται σε ρηχές και θολερές λίμνες. Το PCLake προβλέπει μία απότομη αύξηση των κρίσιμων φορτίων για βάθος νερού ενός μέτρου ή λιγότερο, υπονοώντας ότι οι πολύ ρηχές λίμνες παρουσιάζουν μεγάλη πιθανότητα διατήρησης της διαυγούς κατάστασης, παρά την κάποια θολερότητα και αυξημένο επίπεδο θρεπτικών. Το μοντέλο φαίνεται αρκετά αισιόδοξο ως προς την επικράτηση των μακρόφυτων, σε αντίθεση με τις μελέτες πεδίου στις ολλανδικές λίμνες Randmeren (Meijer et al., 1999b). Μία πιθανή αιτία είναι ότι το μοντέλο προσομοιώνει τα μακρόφυτα ως ένα είδος, το οποίο κατανέμεται ισομερώς στην υδάτινη στήλη. Είδη με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

διαφορετική ανάπτυξη, όπως τα χαρόφυτα, τα οποίο αναπτύσσονται πιο κοντά στον πυθμένα, είναι πιο τρωτά. Ο Blindow (1992) παρατήρησε ότι σε αντίθεση με τα χαρόφυτα που μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγαλύτερα βάθη και καθαρά νερά (λόγω της ικανότητάς τους επιβίωσης σε συνθήκες χαμηλού φωτός), τα αγγειόσπερμα ευνοούνται σε πιο θολερά νερά, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της βιομάζας τους βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια.

γ) Οι ελώδεις περιοχές

Υπάρχουν καθαρές ενδείξεις ότι οι ελώδεις περιοχές αποτελούν παράγοντα καθαρισμού των λιμνών (Johnston (1991), Mitsch (1995), Verhoeven & Meuleman (1999), μεταξύ άλλων). Ο Richardson et al. (1997) συμπεραίνει ότι οι φυσικοί υγροβιότοποι μπορούν να απορροφούν φορτίο φωσφόρου έως και 1-2 gP m-2 y-1. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να αποδώσουν ακόμη περισσότερο, ανάλογα με τη δομή τους και τη διαχείρισή τους. Το παράδειγμα του συστήματος υγροβιότοπων Kis-Balaton (Somlyódy, 1998), που χρησιμοποιήθηκε για την προστασία της λίμνης Balaton (Ουγγαρία) καθαρίζοντας το νερό του ποταμού πριν εισέλθει στη λίμνη, ανέδειξε την ιδιότητα αυτή των ελών.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου συνάδουν με τις γενικότερες παρατηρήσεις ότι οι υγροβιότοποι πρέπει να καλύπτουν μία αρκετά μεγάλη επιφάνεια, έτσι ώστε να έχουν μία σημαντική επίδραση στην ποιότητα του νερού. Τα ποσοτικά δεδομένα σχετικά με τα φυσικά συστήματα είναι σπάνια, αλλά η απώλεια των ελωδών πλημμυρικών περιοχών γύρω από τις λίμνες της περιοχής Friesland στην βόρεια Ολλανδία θεωρείται υπεύθυνη για την αλλαγή των λιμνών σε ευτροφικές. Αυτοί οι υγροβιότοποι προέκυψαν λόγω της φυσικής διακύμανσης της στάθμης του νερού (Waterschap Friesland, 1993; Klinge et al, 1995).

3.5.6.3 Σύγκριση με άλλα μοντέλα

Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα που καλύπτουν διάφορες πτυχές του ευτροφισμού σε λιμναία οικοσυστήματα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της προσέγγισης και των υποθέσεων αυτών των μοντέλων καθώς και ποιά ερωτήματα δύνανται να απαντήσουν. Τα μοντέλα διαχωρίζονται σε στατικά, τα οποία βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις και σε δυναμικά μοντέλα, που βασίζονται σε οικολογικές διεργασίες και μπορούν με τη σειρά τους να διαχωριστούν σε υποκατηγορίες. Αυτή η διάκριση δεν είναι απόλυτη, καθώς τα δυναμικά μοντέλα συχνά επίσης βασίζονται και σε εμπειρικές σχέσεις.

Αρχικά κατασκευάζονται μοντέλα που συσχετίζουν την εξωτερική φόρτιση με τις συγκεντρώσεις ολικού φωσφόρου και αζώτου, τα επίπεδα της χλωροφύλλης-α και τη διαφάνεια μεταξύ άλλων, που βασίζονται σε σειρές δεδομένων πολλών λιμνών. Κριτική αυτών των τύπων μοντέλων κάνουν οι Reckhow & Chapra (1983) and Hosper (1997). Τα πιο απλά μοντέλα αυτής της κατηγορίας συσχετίζουν το μέγιστο επίπεδο χλωροφύλλης με τις συγκεντρώσεις του ολικού φωσφόρου (TP) και ολικού αζώτου (TN) (Lijklema et al., 1998; Hosper, 1997; Portielje & Van der Molen, 1997). Αυτά τα μοντέλα παραμένουν πολύ χρήσιμα σε μια πρώτη εκτίμηση της τροφικής κατάστασης και της βιομάζας των άλγεων στη λίμνη, αλλά δεν είναι κατάλληλα για πρόβλεψη, όταν παίζει σημαντικό ρόλο η ύπαρξη μακρόφυτων. Το PCLake, συγκρινόμενο με τέτοιου είδους εμπειρικά μοντέλα, έχει ρεαλιστικά αποτελέσματα όσον αφορά στον ολικό φώσφορο και στη χλωροφύλλη-α.

Τα δυναμικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί ποικίλλουν ως προς την πολυπλοκότητά τους. Συγκεκριμένα, εμπεριέχουν διαφορετικό αριθμό μεταβλητών και λειτουργικών ομάδων, μπορεί να έχουν σταθερή ή μεταβλητή, χωρικά και χρονικά, στοιχειομετρία, διαφορετική προσέγγιση των ιζημάτων και τέλος διαφορετική χωρική διακριτοποίηση, αν υπάρχει. Δημοφιλή δυναμικά μοντέλα είναι το DBS (Delwaq-BLOOM-Switch) και το PROTECH (Reynolds et al., 2001).

Τα μοντέλα που προσομοιώνουν τα μακρόφυτα είναι σπάνια, σε σχέση με αυτά που προσομοιώνουν τα άλγη. Ακόμα λιγότερα προσομοιώνουν και τα δύο συγχρόνως, όπως το PCLake. Άλλα μοντέλα συμπεριλαμβάνουν μακρόφυτα και άλγη είναι τα μοντέλα των C.J. Walters and R.A. Park (Le Cren & Lowe-McConnell, 1980, ch. 5), των Voinov & Tonkikh (1987), των Muhammetoglu & Soyupak (2000) και το LakeWeb των Hakanson & Boulion (2002).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Μία ενδιαφέρουσα τάση είναι η κατασκευή των δυναμικών «minimodels». Είναι απλοποιητικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για να εξεταστούν μεμονωμένες πτυχές ενός λιμναίου οικοσυστήματος, να γίνουν γρήγορες εκτιμήσεις, συγκρίσεις και να αναδεικνύεται η σημαντικότητα κάποιων μεταβλητών.

Μία άλλη προσέγγιση μοντελοποίησης είναι τα επονομαζόμενα « individual-based» μοντέλα, που χρησιμοποιούν ως μονάδα προσομοίωσης τον ίδιο εκάστοτε οργανισμό, δηλαδή είναι διακριτά ως προς του ζωντανούς οργανισμούς, όπως τα ψάρια, διάφορα είδη φυτών κ.α. Τέτοια μοντέλα είναι πολύπλοκα και απαιτούν αρκετό υπολογιστικό χρόνο, αλλά είναι πιο ακριβή ως προς την ποσοτική προσέγγιση των παραπάνω οργανισμών. Παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το Charisma (Van Nes et al., 2002).

Τα αποτελέσματα του PCLake συνάδουν με τις προβλέψεις των «minimodels» και των «individual-based models», καθώς και με τα εμπειρικά δεδομένα που υπάρχουν.

Η συνεισφορά του PCLake είναι τριπλή:

- εκτιμά τα επίπεδα κρίσιμης φόρτισης για ρηχές λίμνες και της βαρύτητας των διαφόρων παραγόντων σε αυτά.
- συνεκτιμά την επιρροή συνδυασμένων των παραγόντων στον ευτροφισμό και κατά συνέπεια στην αποκατάσταση
- συνεκτιμά την επιρροή των μηχανισμών και των οικολογικών διεργασιών

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PCLAKE ΣΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ

4.1 Δεδομένα εισόδου

Το PCLake αποτελεί ένα εξαιρετικά ευέλικτο εργαλείο, που αφήνει αρκετούς βαθμούς ελευθερίας στον μελετητή. Συνυπολογίζει μία πληθώρα παραμέτρων, αρχικών συνθηκών και μεταβλητών, που ανήκουν σε διαφορετικά πεδία, όπως την υδρολογία, την μετεωρολογία, την βιολογία, την γεωλογία της λίμνης. Ωστόσο, στην προσομοίωση ενός υδάτινου οικοσυστήματος σύνηθες πρόβλημα αποτελεί η έλλειψη δεδομένων, είτε λόγω παρέλευσης του χρόνου, όταν αυτά αποτελούν ιστορικά στοιχεία, όπως για παράδειγμα μία χρονοσειρά υετόπτωσης, είτε λόγω υψηλής απαίτησης σε εξειδικευμένες μετρήσεις εργαστηρίου. Το PCLake, όπως εξηγείται αναλυτικά στο κεφάλαιο «Περιγραφή του PCLake», δίνει τη δυνατότητα στον μελετητή να παρακάμψει, με το αντίστοιχο κόστος, όσα από τα δεδομένα εισόδου δεν δύναται να εκτιμήσει με σχετική ασφάλεια. Η προσομοίωση, γίνεται με σχετική ασφάλεια, ενώ οι άγνωστες παράμετροι συνυπολογίζονται με τιμές από έναν κατάλογο προεπιλογών, που προκύπτουν από στοχαστική διαδικασία πολλαπλών πραγματώσεων για ρηχές λίμνες. Οι προεπιλεγμένες τιμές που προκύπτουν αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές Ευρωπαϊκών ρηχών λιμνών. Μία δικλείδα ασφαλείας, επιπλέον, αποτελεί ότι τα σφάλματα που προκύπτουν από την παραδοχή των τιμών των παραμέτρων, δεν μεταδίδονται από υπορουτίνα σε υπορουτίνα, αλλά περιορίζονται σε δράση εντός της υπορουτίνας που εξυπηρετούν άμεσα.

Ασφαλώς, όσες περισσότερες από τις παραμέτρους εκτιμηθούν για το συγκεκριμένο υδάτινο οικοσύστημα μελέτης, τόσο ασφαλέστερη είναι η εκτίμηση της προσομοίωσης. Για τα δεδομένα εισόδου, επίσης, υπάρχει ιεράρχηση σημαντικότητας στην προσομοίωση. Έτσι, για παράδειγμα, η ηλιοφάνεια αποτελεί μία σημαντική παράμετρο εισόδου που θα επηρέαζε αισθητά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δημιουργώντας σημαντικές αποκλίσεις, με ενδεχόμενη λανθασμένη εκτίμησή της.

Με βάση τα παραπάνω, δηλαδή την σημαντικότητα των δεδομένων εισόδου, τον βαθμό επηρεασμού τους στις επιθυμητές υπορουτίνες μελέτης και την διαθεσιμότητα ή δυνατότητα προσδιορισμού τους, και κατόπιν γραπτής σύστασης του J.H. Janse, έγινε η επιλογή των δεδομένων εισόδου.

Πίνακας 4.1: δεδομένα εισόδου

μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (cLDayAve)	μέση ετήσια εξάτμιση από την επιφάνεια της λίμνης (cQEvAve)
μέση διάρκεια ημέρας (cfDayAve)	τυπική απόκλιση εξάτμισης από την επιφάνεια της λίμνης (cQEvVar)
τυπική απόκλιση ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (cLdayVar)	παροχές εισόδου (cQin)
τυπική απόκλιση διάρκειας ημέρας (cfDayVar)	τύπος ιζήματος
μέση ετήσια θερμοκρασία μέσα στο νερό (cTmAve)	φόρτιση αζώτου N (cNLoad)
τυπική απόκλιση θερμοκρασίας μέσα στο νερό (cTmVar)	φόρτιση φωσφόρου P (cPLoad)
ανάπτυγμα ανέμου (cFetch)	αρχικό μέσο βάθος λίμνης (sDepthWO)
μέση ταχύτητα ανέμου (cVWind)	ποσοστό έκτασης περιοχών με καλάμους (fmarsh)
ρυθμός υπόγειων διαφυγών (cQinf)	ένταση αλιείας

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το PCLake δίνει την δυνατότητα για τα δεδομένα εισόδου που είναι δυναμικά, δηλαδή μεταβλητά στον χρόνο, να εισαχθούν είτε ως μέση όροι με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση, είτε ως χρονοσειρές οποιουδήποτε χρονικού βήματος. Το δεύτερο ενδεχόμενο είναι επιθυμητό ως ακριβέστερο και προτιμάται όπου είναι δυνατό. Ο χρόνος προσομοίωσης αποτελεί ένα ημερολογιακό έτος, από τον Ιανουάριο έως το Δεκέμβριο του 2012 σε μηνιαίο βήμα. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει μέτρηση κάποιου μήνα, εκτιμάται με παρεμβολή ή χρησιμοποιείται η αντίστοιχη μέτρηση του ίδιου μήνα κάποιου άλλου έτους, προηγούμενο ή επόμενο, αναλόγως την φύση του φυσικού μεγέθους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

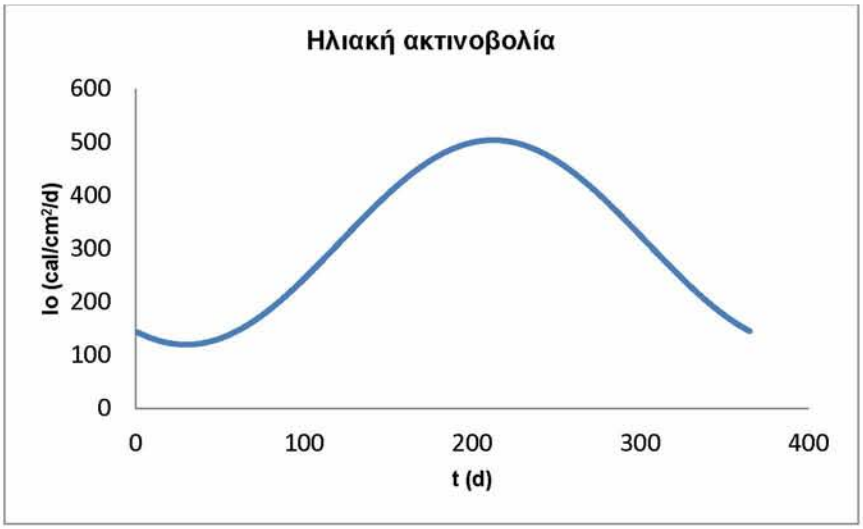
4.1.1 Παράμετροι

4.1.1.1 Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία - μέση διάρκεια ημέρας

Η ταχύτητα ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού εξαρτάται τόσο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία I_0, όσο και από τη διάρκεια της, που εκφράζεται με την φωτοπερίοδο F, ως κλάσμα της ημέρας. Με βάση τις τιμές από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και προηγούμενες μελέτες οι διακυμάνσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και του συντελεστή φωτοπεριόδου εκφράζονται με τις εξισώσεις 4.1 και 4.2. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η ρύπανση, οι υδρατμοί και η νεφοκάλυψη.

$$I_0 = 120 + 192 * \left[1 - cos\frac{(t-30)*360}{365}\right],\ \sigma\varepsilon\ cal/cm^2 \qquad (4.1)$$

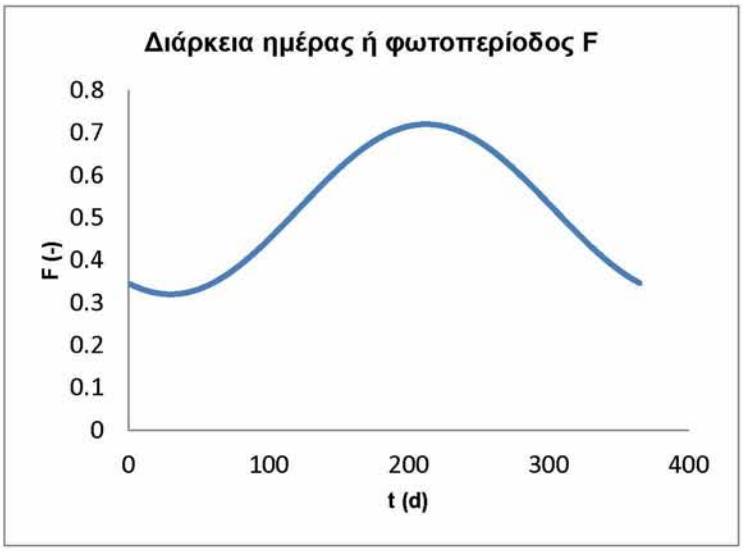
όπου t, ο χρόνος σε ημέρες με αρχή την 1η Ιανουαρίου



Διάγραμμα 4.1: ηλιακή ακτινοβολία- χρόνος

$$F = 0.320 + 0.200 * \left[1 - cos\frac{(t-30)*360}{365}\right],\ αδιάστατο, κλάσμα\ του\ 24ώρου \qquad (4.2)$$

όπου t, ο χρόνος σε ημέρες με αρχή την 1η Ιανουαρίου



Διάγραμμα 4.2: διάρκεια ημέρας ή φωτοπερίοδος- χρόνος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των παραπάνω μεγεθών προκύπτουν λογισμικά: cLdayAve= 13.057.637,8 joule/m^2, cLDayVar= 5.687.425,9 joule/m^2, cfDayAve= 0,520089, cfDayVar=0,141597.

4.1.1.2 Θερμοκρασία μέσα στο νερό

Η θερμοκρασία μέσα στο νερό εισάγεται ως μηνιαία χρονοσειρά ενός έτους, σύμφωνα με μετρήσεις πεδίου που γίνονται τακτικά σε πελαγικό σταθμό στην λίμνη (ST1). Κάθε φορά ακολουθείται η ίδια σειρά επισκέψεων, ώστε σε κάθε σταθμό η δειγματοληψία να γίνεται περίπου την ίδια ώρα της ημέρας, πρώτες πρωινές ώρες (7:30 έως 11:00). Η δειγματοληψία περιλαμβάνει τη διεξαγωγή in situ μετρήσεων με φορητό ψηφιακό πολυόργανο τύπου HQD40d της Γερμανικής εταιρίας Hach. (πηγή: *Επιδράσεις υδρολογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων στη συγκέντρωση των μικροκυστινών: μια μαθηματική προσομοίωση στη λίμνη Κάρλα*, Μαρία Χαμόγλου, Βόλος 2013)



Εικόνα 4.1: αεροφωτογραφία της λίμνης με κόκκινη σήμανση στον σταθμό μέτρησης της θερμοκρασίας. (Κάγκαλου, κ.α., 2012)

Πίνακας 4.2: μηνιαίες μετρήσεις θερμοκρασίας μέσα στο νερό της λίμνης στον σταθμό ST1 (K1) για το 2012

μήνας του 2012	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
θερμοκρασία σε °C	-	-	19.5	16.9	20.6	26.7	28.7	27.2	24.1	21.45	17.5	7.9

4.1.1.3 Μέση ταχύτητα ανέμου

Η μέση ταχύτητα ανέμου υπολογίσθηκε ως ετήσιος μέσος όρος για το 2012 από το διάγραμμα μέτρου ταχυτήτων – χρόνου που παρέχει η ADCON TELEMETRY, μέσω ελεύθερου διαδικτυακού λογισμικού. Οι μετρήσεις είναι συνεχής και άρα ο μέσος όρος προκύπτει με χρήση του εργαλείου ολοκλήρωσης που είναι ενσωματωμένο στο προκείμενο λογισμικό. Η ολοκλήρωση και ο μέσος όρος αφορούν το χρονικό διάστημα από 01/01/2012 έως 01/01/2013.

Η μέση ταχύτητα ανέμου προκύπτει ίση με cVWind=2,2 m/s κι επικρατέστερη φορά την Ανατολική.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.1.1.4 Ρυθμός υπόγειων διαφυγών

Ο ρυθμός υπόγειων διαφυγών εισάγεται ως χρονοσειρά μηνιαίου βήματος σύμφωνα με την συνάρτηση που προτείνει το ΥΠΕΧΩΔΕ, η Γενική Γραμματεία Δημόσιων Έργων και η Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων στο τεύχος *Επαναδημιουργία λίμνης Κάρλας: Περιβαλλοντική- Τεχνική Έκθεση, Μελέτη κόστους- οφέλους και υποστηρικτικές μελέτες. Αθήνα 1999.* Η χρονοσειρά που προκύπτει από την συνάρτηση αυτή, γενικά υπερεκτιμά κάπως τις υπόγειες διαφυγές συγκριτικά με εκτιμήσεις προσομοιώσεων που έχουν γίνει από το ερευνητικό εργαστήρι υπόγειας υδρολογίας του τμήματος πολιτικών μηχανικών του Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας.

Οι υπόγειες διαφυγές ορίζονται ως συνάρτηση του απόλυτου υψόμετρου στάθμης ύδατος σε hm^3/month (Εξ. 4.3). Η αναγωγή σε mm/d γίνεται με χρήση της συνάρτησης επιφάνειας ύδατος Ε (Σ.Υ.) (Εξ. 4.4) που επίσης προτείνει το ΥΠΕΧΩΔΕ.

$$cQinf = 4 * 10^{-67} * \Sigma.Y., \qquad \sigma\varepsilon\ hm^3/month \tag{4.3}$$

όπου cQinf, οι υπόγειες διαφυγές και Σ.Υ. το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης ύδατος.

$$E(\Sigma.Y.) = \frac{\Sigma.Y. - 44{,}3}{0{,}051}, \qquad \sigma\varepsilon\ hm^2 \quad \gamma\iota\alpha\ \Sigma.Y. \leq 46{,}35\ m$$

$$E(\Sigma.Y.) = \frac{\Sigma.Y. - 46{,}35}{2{,}5} + 40{,}196, \quad \sigma\varepsilon\ hm^2\ \ \gamma\iota\alpha\ \Sigma.Y. > 46{,}35\ m \tag{4.4}$$

Οι τιμές των υπόγειων διαφυγών για το ημερολογιακό έτος του 2012 προκύπτουν όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: υπόγειες διαφυγές από τον πυθμένα της λίμνης σε hm3 και mm/d για το 2012

μήνας του 2012	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
υπόγειες διαφυγές σε hm^3	1.450	2.005	2.059	2.408	2.649	2.581	2.246	1.886	1.654	1.640	1.846	2.023
υπόγειες διαφυγές σε mm/d	1.84	2.11	1.99	2.18	2.19	2.24	2.05	1.94	1.94	1.87	1.99	1.98

4.1.1.5 Εξάτμιση από την επιφάνεια της λίμνης

Η εξάτμιση ($Q_{εξάτμισης}$ ή cQev) υπολογίζεται ως προσαύξηση κατά 30% της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (ET) κατά Thonthwaite (Efstratiadis, et al., 2002 και Loukas, et al., 2005). (Εξίσωση 4.5).

$$ET = 16 * L_{di} * \left(\frac{10 * T_i}{\Sigma I_i}\right)^{\alpha}, \quad \text{σε mm/month} \tag{4.5}$$

όπου L_d ο λόγος της μέσης διάρκειας ημέρας κάθε μήνα προς ημέρα διάρκειας 12 ωρών, T_i η μέση θερμοκρασία του αέρα και I ένας ετήσιος δείκτης θερμότητας που υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.6:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{Ti}{5}\right]^{1{,}514}, \quad \text{αδιάστατο} \tag{4.6}$$

Ο εκθέτης α προκύπτει από την Εξίσωση 4.7:

$$\alpha = 0{,}000000675 * I3 - 0.0000771 * I2 + 0{,}01792 * I + 0{,}49239, \quad \text{αδιάστατο} \tag{4.7}$$

ενώ ο παράγοντας Ld εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος σε συνάρτηση με το μήνα του έτους. Οι μέσες μηνιαίες τιμές τις θερμοκρασίας αέρα εκτιμήθηκαν με ολοκλήρωση των διαγραμμάτων του ελεύθερου λογισμικού της ADCON TELEMETRY, ακριβώς όπως και για την μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου.

Οι τιμές της εξάτμισης για το ημερολογιακό έτος 2012 προκύπτουν όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 ενώ οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Πίνακας 4.4: μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα για το 2012

μήνας του 2012	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
θερμοκρασία σε °C	3.1	3.7	10.1	15.3	19.2	25.4	27.7	26.1	21.9	18.9	12.9	5.9

Πίνακας 4.5: εξάτμιση στην επιφάνεια της λίμνης σε hm3 και mm/d για το 2012

μήνας του 2012	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
εξάτμιση σε hm^3	0.092	0.160	1.119	2.721	4.779	7.675	8.310	6.224	3.780	2.602	1.287	0.348
εξάτμιση σε mm/d	0.12	0.17	1.08	2.46	3.95	6.66	7.60	6.40	4.43	2.97	1.39	0.34

4.1.1.6 Παροχές εισόδου

Το PCLake από υδρολογικής άποψης, χρησιμοποιεί μία ενιαία παροχή εισόδου (cQ_{in}) χωρίς την διάκριση της προέλευσης, δηλαδή αν αποτελεί υετόπτωση, στραγγίδια, απορροή, πιθανή είσοδο από κάποιον ποταμό, στην προκείμενη περίπτωση τον Πηνειό. Στην ουσία, ως δεδομένο εισόδου δέχεται το άθροισμα των παραπάνω ή όσων από τα παραπάνω υπάρχουν (Εξ. 4.9). Εξαίρεση αποτελεί μόνο η πιθανή υπόγεια τροφοδότηση, μέσω του πυθμένα την οποία δέχεται ως υπόγειες διαφυγές με αρνητική σήμανση. Στην προκείμενη περίπτωση δεν υπάρχει υπόγεια τροφοδότηση.

Ο ορθόδοξος τρόπος εκτίμησης των παροχών εισόδου, θα ήταν να εκτιμηθούν ή μετρηθούν οι επιμέρους παροχές και να αθροιστούν, Ωστόσο οι συγκεκριμένες χρονοσειρές μετρήσεων είναι επιμέρους ελλιπείς. Η εκτίμηση της χρονοσειράς παροχών εισόδου γίνεται με αντίστροφη διαδικασία. Μέσω της πλήρους χρονοσειράς μέσων απόλυτων σταθμών της λίμνης και άρα και των όγκων νερού της λίμνης, με χρήση της συνάρτησης στάθμης-όγκου που προτείνει το ΥΠΕΧΩΔΕ (Εξ. 4.12), είναι δυνατό να προκύψει η χρονοσειρά της παροχής εισόδου από το υδατικό ισοζύγιο (Εξ. 4.11). Είναι ήδη γνωστές οι χρονοσειρές υπόγειων διαφυγών και εξάτμισης ενώ οι παροχή εξόδου προς εκμετάλλευση ή άλλο λόγο θεωρείται μηδενική, αφού το δίκτυο άρδευσης για το προκείμενο χρονικό διάστημα δεν έχει τεθεί σε λειτουργία. Επιπλέον, ο *Φορέας Διαχείρισης Περιοχής Οικοανάπτυξης Καρλας -Μαυροβουνίου- Κεφαλόβρυσου- Βελεστίνου* επιβεβαιώνει ρητά ότι δεν υπάρχουν άλλες παροχές εξόδου πέραν της εξάτμισης και υπόγειων διαφυγών (Εξ. 4.10).

$$\Delta V(\Sigma.Y.) = Q_{απορροής} + P + Q_{Πηνειού} + Q_{στραγγιδίων} - Q_{υπόγειων\ διαφυγών}(\Sigma.Y.) - Q_{εξάτμισης} - Q_{εκμετάλλευσης} \quad (4.8)$$

$$cQ_{in} = Q_{απορροής} + P + Q_{Πηνειού} + Q_{στραγγιδίων} \quad (4.9)$$

$$Q_{εκμετάλλευσης} = 0 \quad (4.10)$$

από τις Εξισώσεις (4.8), (4.9) και (4.10) προκύπτει η Εξίσωση (4.11):

$$cQ_{in} = Q_{υπόγειων\ διαφυγών}(\Sigma.Y.) + Q_{εξάτμισης} + \Delta V(\Sigma.Y.) \quad (4.11)$$

$$\Delta V(\Sigma.Y.) = \Delta\left(\frac{\Sigma.Y.-44{,}713}{0{,}0276}\right) \quad (4.12)$$

Στους Πίνακες 4.6 έως 4.8 παρουσιάζονται η χρονοσειρά απόλυτης στάθμης ύδατος που προκύπτει από τις μετρήσεις της ADCON TELEMETRY, η χρονοσειρά του όγκου της λίμνης, η χρονοσειρά των μηνιαίων διαφορών όγκου και τέλος η εκτίμηση της χρονοσειράς των παροχών εισόδου. Η τελευταία χρονοσειρά επαληθεύεται για τους μήνες που είναι δυνατό, δηλαδή όπου υπάρχει διαθεσιμότητα δεδομένων, με το άθροισμα $Q_{απορροής} + P + Q_{Πηνειού} + Q_{στραγγιδίων}$. Η επαλήθευση αναδεικνύει την ρεαλιστική και συνήθως ακριβή εκτίμηση της αντίστροφης οδού (Πίν. 4.9). Σε κάθε περίπτωση, η εκτίμηση μέσω του ισοζυγίου και των σταθμών θεωρείται ασφαλέστερη.

Πίνακας 4.6: απόλυτη στάθμη ύδατος και όγκος της λίμνης για το 2012

μήνας του 2012	(2011) ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
απόλυτη στάθμη ύδατος σε	45.62	45.60	45.97	46.00	46.18	46.29	46.26	46.10	45.90	45.75	45.74	45.88	45.98

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

m													
όγκος λίμνης σε hm^3	32.72	32.14	45.54	46.63	53.15	57.14	56.05	50.25	43.01	37.57	37.21	42.10	45.91

Πίνακας 4.7: μηνιαίες διαφορές όγκων σε hm^3 για το 2012

μήνας του 2012	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
διαφορά όγκου λίμνης σε hm^3	-0.58	13.41	1.09	6.52	3.99	-1.09	-5.80	-7.25	-5.43	-0.36	4.89	3.80

Πίνακας 4.8: παροχές εισόδου σε hm^3 και mm/d όπως υπολογίζονται βάση του ισοζυγίου της λίμνης για το 2012

μήνας του 2012	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
παροχή εισόδου σε hm^3	0.962	15.571	4.265	11.650	11.413	9.169	4.759	0.864	0.000	3.880	8.024	6.175
παροχή εισόδου σε mm/d	1.218	16.397	4.127	10.535	9.436	7.953	4.350	0.888	0.000	4.432	8.661	6.047

Πίνακας 4.9: επαλήθευση της εκτίμησης των μηνιαίων παροχών εισόδου

μήνας του 2012	εκτίμηση παροχής εισόδου μέσω αθροίσματος επιμέρους παροχών εισόδου (mm/d)	εκτίμηση παροχής εισόδου μέσω αντίστροφης διαδικασίας με χρήση του υδατικού ισοζυγίου και των απόλυτων σταθμών ύδατος (mm/d)
ΙΑΝ	-	1.22
ΦΕΦ	-	16.40
ΜΑΡ	**5.42**	**4.13**
ΑΠΡ	**13.02**	**10.54**
ΜΑΙ	**9.18**	**9.44**
ΙΟΥΝ	**2.95**	**7.95**
ΙΟΥΛ	-	4.35
ΑΥΓ	-	0.89
ΣΕΠ	-	0.00
ΟΚΤ	**0.34**	**4.43**
ΝΟΕ	**8.63**	**8.66**
ΔΕΚ	**6.07**	**6.05**

4.1.1.7 Ανάπτυγμα ανέμου

Το ανάπτυγμα ανέμου (cFetch) υπολογίσθηκε με βάση την μέση επιφάνεια της λίμνης 38.000.000 m^2, ως η τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας, cFetch=6,164 m.

4.1.1.8 Κάλυψη της λίμνης με υγροτοπικές εκτάσεις

Η λίμνη θεωρήθηκε ότι καλύπτεται από καλάμους με έκταση 10% του συνόλου της, fmarsh=0.1. (Laspidou, 2006)

4.1.1.9 Τύπος ιζήματος

Ο πυθμένας της λίμνης κατατάσσεται στους αργιλώδεις με τα χαρακτηριστικά του πίνακα 10.

Πίνακας 4.10: χαρακτηριστικά αργιλωδών πυθμένων λιμνών

ξηρή μάζα (fDTotSO)	Περιεκτικότητα σε οργανική ύλη (fDOrgSO)	Ιλύς	Fe	Al
0.3 g DW/g sed	0.08 (g Org/g DW)	0.4 g lutum/g AFDW	0.04 g Fe/g AFDW	0.04 g Al/g AFDW

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.1.1.10 Φόρτιση θρεπτικών

Η φόρτιση των θρεπτικών παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση μέσα στο έτος εξαιτίας της εποχιακής λίπανσης των αγροτικών εκτάσεων της λεκάνης απορροής της Κάρλας, οι αποπλύσεις των οποίων οδηγούν σε τροφοδότηση της με αυτά. Ωστόσο, κάποια εκτίμηση ή μέτρηση μηνιαία της φόρτισης θρεπτικών δεν είναι διαθέσιμη. Η ακρίβεια της προσομοίωσης περιορίζεται στην χρήση των εκτιμήσεων των μέσων ετήσιων φορτίσεων με θρεπτικά που έχει γίνει στην *ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΥΠΟ-ΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ: ΕΙΝΑΙ ΕΦΙΚΤΗ Η 'ΚΑΛΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ' ΜΕΧΡΙ ΤΟ 2015* (Κάγκαλου, κ.α., 2012).

Υπολογίζοντας το ετήσιο φορτίο φωσφόρου που απορρέει στη λίμνη προέρχεται από ορεινές απορροές (5408 kg), από την πεδινή-αγροτική περιοχή (4734 kg) και από την υπόλοιπη βοσκολιβαδική έκταση (25350 kg), εκτιμάται ότι η απορροή φωσφόρου στην σημερινή έκταση της λίμνης ανέρχεται σε 0.934 g/P m^{-2} $year^{-1}$ Αντίστοιχα, το συνολικό ετήσιο φορτίο αζώτου (ως άθροισμα διαλυμένου ανόργανου αζώτου, DIN) ανέρχεται σε 39.104 kg (ΥΠΕΧΩΔΕ 2004) και αντιστοιχεί σε εισροή προς την λίμνη ποσότητας 10.26 g/N m^{-2} $year^{-1}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η φόρτιση θεωρείται για τον φώσφορο και άζωτο αντίστοιχα: cNLoad=10.26 gN/m^2/yr και cPLoad=0.938 gP/m^2/yr.

4.1.2 Αρχικές συνθήκες

Το PCLake, σε αντιστοιχία με τις παραμέτρους, προσφέρει τη δυνατότητα να ορίσει ο μελετητής μία πληθώρα αρχικών συνθηκών. Όπως είναι λογικό, όσες περισσότερες συνθήκες οριστούν τόσο ακριβέστερη θα είναι η αποτύπωση της κατάστασης στη λίμνη. Ωστόσο, η εκτίμηση ή ο προσδιορισμός των ακριβών τιμών των αρχικών συνθηκών αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις εξειδικευμένες μετρήσεις . Για τις περιπτώσεις που δεν υπάρχει η επιθυμητή μέτρηση, ο Janse στο *Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches, 2004*, προσφέρει μία σειρά εκτιμήσεων των μέσων τιμών που εμφανίζουν διάφορα μεγέθη σε ρηχές λίμνες, προτείνοντας στην ουσία αρχικές τιμές για τα μεγέθη που είναι δύσκολο να εκτιμηθούν Τονίζει δε ότι κατά τους υπολογισμούς το PCLake το σύστημα γρήγορα έρχεται στην επιθυμητή ισορροπία που αρμόζει στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε υπό μελέτη λίμνης. Οι αρχικές συνθήκες που προσαρμόστηκαν στην λίμνη Κάρλα, για την αποφυγή χοντροειδούς λάθους, είναι το αρχικό μέσο βάθος της λίμνης sDepthW= 1,26 m, που υπολογίστηκε ως τον αρχικό όγκο νερού της λίμνης δια την αρχική επιφάνειά της και οι αρχικές συγκεντρώσεις αμμωνιακών, νιτρικών, και φωσφορικών ιόντων που αποτελούν τα κύρια στοιχεία δημιουργίας του ευτροφισμού, sNH4W= 0,025 mg N/l, sNO3W= 0,2 mgN/l και sPO4W = 0.01 mgP/l, αντίστοιχα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Οι παράμετροι του μοντέλου, 494 στον αριθμό, επηρεάζουν όλες μεν, αλλά σε διαφορετικό βαθμό τις διαφορετικές υπορουτίνες του προσομοιωτή. Μετά από στοχαστική προσέγγιση μεγάλου αριθμού πραγματώσεων προσομοίωσης για αρκετές λίμνες της Ευρώπης και της Αυστραλίας, προκύπτει η κατάταξη των παραμέτρων, αλλά και άλλων μεταβλητών, όσον αφορά στο βαθμό επιρροής τους ανά υπορουτίνα, όπως αυτή παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες (4.11 και 4.12).

Πίνακας 4.11 και 4.12: ταξινόμηση δεδομένων εισόδου ανάλογα με την ευαισθησία των υπορουτίνων σε αυτά. Παρουσιάζονται μόνο τα 5 με τον μεγαλύτερο βαθμό επιρροής ανά υπορουτίνα

Πίνακας 4.11

χλωροφύλλη-α	**βλάστηση**	**Secchi**	**αρπακτικοί ιχθείς**	**λευκοκορέγονοι**
cVSetGren	sDepthW0	kDRespZoo	cFiltMax	fDAssZoo
coNIn	kDRespZoo	fDAssFiJv	hFilt	cFiltMax
cFiltMax	cQ10RespVeg	cFunTauSetDiat	cFunTauResus	kDRespZoo
cMuMaxGren	kDRespGren	cPrefDet	fDAssZoo	cTmOptFish

Πίνακας 4.12

κυανοβακτήρια	**διάτομα**	**πράσινα άλγη**	**ολικός φώσφορος**	**ολικό άζωτο**
cQIn	kDRespDiat	cFiltMax	coPIn	coNIn
cVSetGren	cSiDDiat	cVSetGren	sDepthW0	cFiltMax
sDepthW0	cMuMaxDiat	cMuMaxGren	cQIn	cQIn
cMuMaxGren	kResusPhytRe	cQIn	cMuMaxGren	fNDissIn

Κάποια από τα παραπάνω δεδομένα εισόδου είναι εύκολο να εκτιμηθούν ως φυσικά μεγέθη, όπως για παράδειγμα το μέσο βάθος της λίμνης. Οι υπόλοιπες παράμετροι αποτελούν αντικείμενο εξειδικευμένης τεχνογνωσίας ή και κάποιες φορές δεν αναπαριστούν κάποιο ευκολονόητο ή καν υπαρκτό φυσικό μέγεθος. Ο ρόλος των τελευταίων είναι η ρύθμιση, μετά από δοκιμές ή αριθμητική μέθοδο βελτιστοποίησης, του μοντέλου, η βαθμονόμησή του δηλαδή, ώστε να πλησιάσει η προσομοίωση όσο το δυνατόν περισσότερο την πραγματική κατάσταση της λίμνης.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται, εν προκειμένω για τις υπορουτίνες της χλωροφύλλης-α και του βάθους δίσκου secchi, ενώ επηρεάζονται θετικά και οι υπόλοιπες υπορουτίνες καθώς η μία επηρεάζει την άλλη. Οι διαθέσιμες χρονοσειρές των δύο παραπάνω μεγεθών είναι μόνο ενός έτους, που σημαίνει ότι η βαθμονόμηση είναι αρκετά ανεπαρκής και χωρίς δυνατότητα διαδικασίας αξιολόγησης των παραμέτρων σε μία δεύτερη χρονοσειρά. Ωστόσο, εκπληρώνεται ένας αρχικός στόχος, της προσέγγισης της τάξης των τιμών των δύο μεγεθών, της ικανοποίησης των μέγιστων και ελάχιστων μετρήσεων καθώς και μιας γενικότερης μορφολογικής τάσης της κατανομής με τα αύξοντα και φθίνοντα τμήματα να συμπίπτουν σε κάποιο βαθμό εποχιακά.

Διαθέσιμες χρονοσειρές άλλων μεγεθών από τα 10 παραπάνω που προτείνονται κι αντιστοιχούν σε υπορουτίνες που περιγράφουν τον ευτροφισμό δεν υπάρχουν για την λίμνη Κάρλα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.2.1 Μέθοδος βαθμονόμησης

Για μία σειρά δοκιμών και με διάφορες τιμές παραμέτρων υπολογίζονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός έτους κι από τις μετρήσεις του βάθους Secchi και χλωροφύλλης-α (Χαμόγλου, 2013) οι ποσότητες:

$$Sum\ of\ Squares_{secchi} = \sum_t (obs_{secchi,t} - model_{secchi,t})^2 \quad (4.13)$$

όπου $obs_{secchi,t}$: η μέτρηση του βάθους Secchi σε χρόνο t

και $model_{secchi,t}$: η προσομοιωμένη τιμή του βάθους Secchi σε χρόνο t

και

$$Sum\ of\ Squares_{chla} = \sum_t (obs_{chla,t} - model_{chla,t})^2 \quad (4.14)$$

όπου $obs_{chla,t}$: η μέτρηση της χλωροφύλλης-α σε χρόνο t

και $model_{secchi,t}$: η προσομοιωμένη τιμή της χλωροφύλλης-α σε χρόνο t

Ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων προκύπτει για την μέγιστη τιμή της συνάρτησης posterior density (4.15).

$$posterior\ density = \prod_{var=2}^{n} (sum\ of\ squares_{var})^{\frac{-n_{var}}{2}} \quad (4.15)$$

όπου var: οι μεταβλητές Secchi και χλωροφύλλη-α

και n_{var}: ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε μεταβλητή, εν προκειμένω n_{var}=12 (μετρήσεις ενός έτους με μηνιαίο βήμα)

Οι δοκιμές γίνονται για συνδυασμούς των παραμέτρων cFiltMax (maximum filtering rate) με όρια από 2 έως 6 $l*mg^{-1}Dd^{-1}$ και kDRespZoo (zooplankton respiration rate) με όρια από 0,07 έως 0,225 d^{-1}.

4.2.2 Αποτέλεσμα βαθμονόμησης

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 4.13) παρουσιάζονται ενδεικτικά δοκιμές και οι αντίστοιχες ποσότητες $Sum\ of\ Squares_{secchi}$, $Sum\ of\ Squares_{chla}$ και *posterior density*. Όπως είναι εμφανές η μέγιστη ποσότητα *posterior density* προκύπτει ίση με 2,91 $*10^{-24}$ και αντιστοιχεί σε cFiltMax= 4 $l*mg^{-1}Dd^{-1}$ και kDRespZoo=0,225 d^{-1}.

Για το βαθμονομημένο μοντέλο, όπως ποιοτικά μπορεί να παρατηρηθεί στα διαγράμματα 4.3 και 4.4, τα επίπεδα του βάθους Secchi και της χλωροφύλλης-α διατηρούνται κοντά στις παρατηρημένες τιμές, ακολουθώντας μάλιστα και τις γενικότερες τάσεις αυξομείωσης των αντίστοιχων κατανομών εποχιακά. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στο βάθος Secchi παρατηρούνται μεγαλύτερα επίπεδα, 0,3 έως 0,5 m τους χειμερινούς μήνες του έτους, ενώ τους θερινούς πέφτουν οι τιμές σε 0,15 έως 0,3. Όσον αφορά στην χλωροφύλλη-α, αντίστοιχα τους χειμερινούς μήνες παραμένει σε χαμηλά επίπεδα 25 έως 150 mg/m^3, ενώ τους θερινούς αυξάνεται έως και 300 mg/m^3, αιχμή που το βαθμονομημένο μοντέλο αδυνατεί να ακολουθήσει εμφανίζοντας χαμηλότερη αιχμή 250 mg/m^3.

Το μοντέλο γενικότερα φαίνεται να αδυνατεί να ακολουθήσει τις έντονες διακυμάνσεις των παρατηρημένων τιμών, παρουσιάζοντας μία πιο ομαλή κατανομή. Αυτό οφείλεται μεταξύ άλλων στο γεγονός ότι οι παρατηρημένες τιμές αποτελούν στιγμιαίες τυχαίες μετρήσεις μέσα στον εκάστοτε μήνα, ενώ οι προσομοιωμένες τιμές αποτελούν μέσες μηνιαίες τιμές των –με βήμα ημέρας- προσομοιωμένων τιμών. Επιπλέον βασικός παράγοντας ομαλοποίησης των δύο κατανομών αποτελεί η παραδοχή για ετησίως σταθερή παροχή μάζας ολικού φωσφόρου (TP) και ολικού αζώτου (TN), γεγονός που δεν ανταποκρίνεται καθόλου στην πραγματικότητα, καθότι τα τελευταία παρουσιάζουν πολύ υψηλότερα επίπεδα τους μήνες λίπανσης.

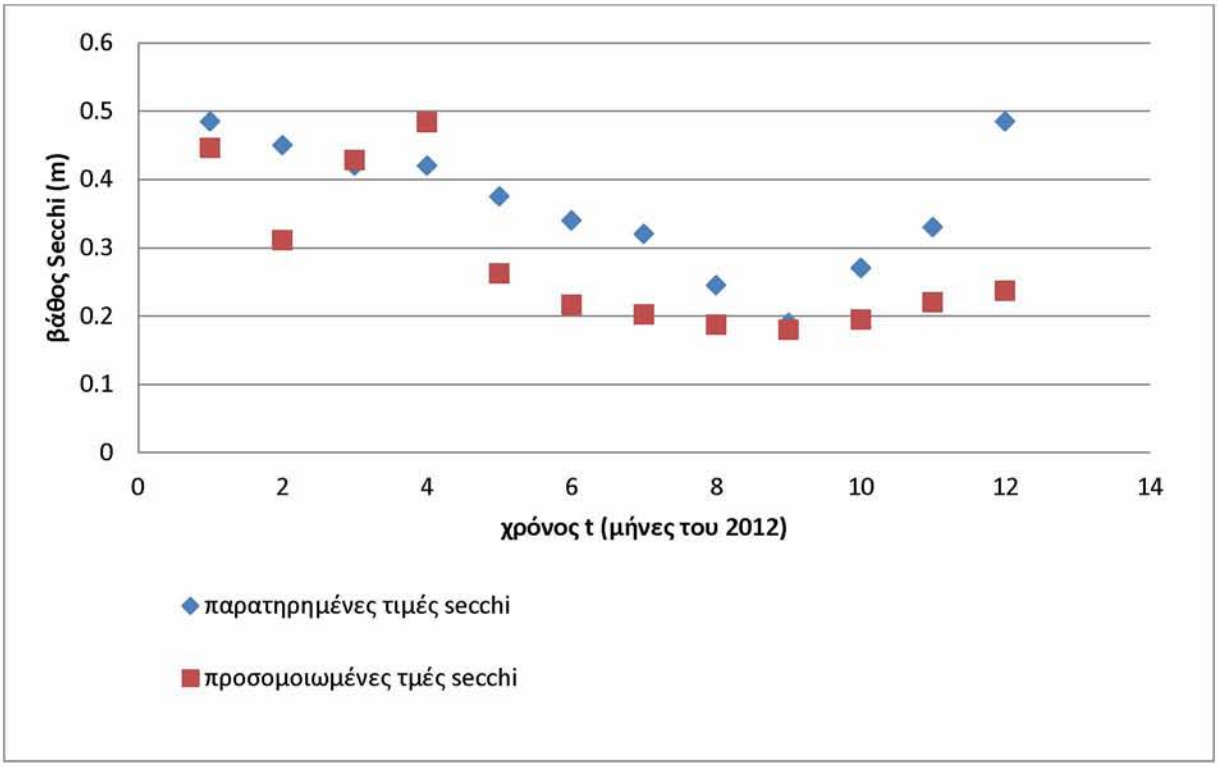
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Συνεπώς το μοντέλο μπορεί να αδυνατεί να δώσει χρήσιμη σημειακή-μηνιαία πληροφορία, ωστόσο μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την εποχιακή κι πολύ περισσότερο πολυετή εικόνα του λιμναίου οικοσυστήματος όσον αφορά στον ευτροφισμό.

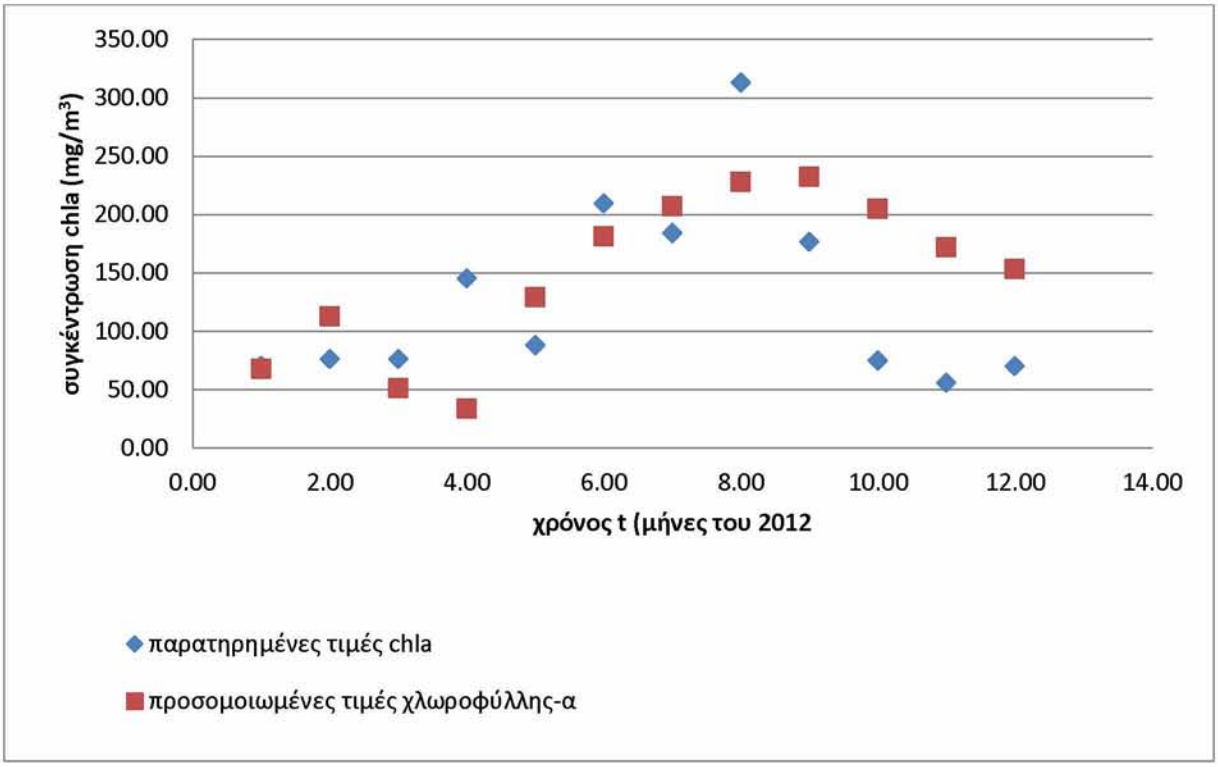
Πίνακας 4.13: δοκιμές βαθμονόμησης

cFiltMax	kDRespZoo	$Sum\ of\ Squares_{secchi}$	$Sum\ of\ Squares_{chla}$	$post.density$
4,0	**0,225**	0,1286	65043	**2,91 *10^{-24}**
4,1	0,225	0,1885	76460	1,12 *10^{-25}
4,2	0,225	0,1857	76561	1,21 *10^{-25}
4,3	0,225	0,1846	76445	1,27 *10^{-25}
4,4	0,225	0,1764	75879	1,74 *10^{-25}
4,5	0,007	0,4714	74438	5,36 *10^{-28}
4,5	0,12	0,4021	126643	5,73 *10^{-29}
4,5	0,15	0,2575	66120	4,11 *10^{-26}
4,5	0,17	0,2136	67444	1,12 *10^{-25}
4,5	0,22	0,1798	74018	1,8 *10^{-25}
4,6	0,07	0,5346	120363	1,41*10^{-29}
4,6	0,12	0,4687	123400	2,67*10^{-29}
4,6	0,15	0,3812	128797	7,14 *10^{-29}
4,6	0,17	0,3179	136263	1,51 *10^{-28}
4,6	0,22	0,2625	161435	1,73 *10^{-28}
4,7	0,07	0,5509	85359	9,25 *10^{-29}
4,7	0,12	0,5433	122949	1,13 *10^{-29}
4,7	0,15	0,3911	69125	2,56 *10^{-27}
4,7	0,17	0,3135	66763	1,19 *10^{-26}
4,7	0,22	0,2745	151943	1,9 *10^{-28}
4,8	0,225	0,2289	68345	6,82 *10^{-26}
4,9	0,225	0,2702	67098	2,82 *10^{-26}
5,0	0,225	0,3802	67858	3,39 *10^{-27}
5,1	0,225	0,4261	72006	1,59 *10^{-25}

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 4.3: σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών βάθους Secchi



Διάγραμμα 4.4: σύγκριση παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών χλωροφύλλης-α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.3 Βασικό σενάριο

4.3.1 Ετήσια πραγμάτωση για τα δεδομένα εισόδου του έτους 2012

Γίνεται εφαρμογή του μοντέλου PCLake για τα δεδομένα εισόδου του έτους 2012, συγκεκριμένα τις ετήσιες χρονοσειρές θερμοκρασίας, παροχής εισόδου, εξάτμισης και υπόγειων διαφυγών, τα μετεωρολογικά, γεωμετρικά, γεωλογικά δεδομένα καθώς και τις ετήσιες παροχές εισόδου των θρεπτικών. Η εφαρμογή γίνεται για τις παραμέτρους που προκύπτουν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τις χρονοσειρές του βάθους Secchi και της χλωροφύλλης-α του ίδιου έτους και με αρχικές τιμές που συσχετίζονται με τα ενδεικτικά φυσικά μεγέθη της τροφικής κατάστασης της λίμνης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επίπεδα των ιχθύων (μικρά, μεγάλα, αρπακτικά και το σύνολο), του διαλυμένου οξυγόνου, της βυθισμένης βλάστησης, του βάθους Secchi, της χλωροφύλλης-α (των κυανοβακτηρίων, των διατόμων, των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων και το σύνολο), των αμμωνιακών, νιτρικών και φωσφορικών ιόντων, καθώς και του συνολικού αζώτου kjeldahl (TKN). Το TKN είναι το σύνολο του οργανικού αζώτου, της αμμωνίας και των αμμωνιακών ιόντων. Τα ψάρια και η βυθισμένη βλάστηση παρουσιάζονται σε γραμμάρια ξηρής μάζας ανά επιφάνεια (g D/$m^{2)}$, το διαλυμένο οξυγόνο σε mg O_2/l, το βάθος Secchi σε μέτρα (m) και η χλωροφύλλη-α σε mg/m^3.

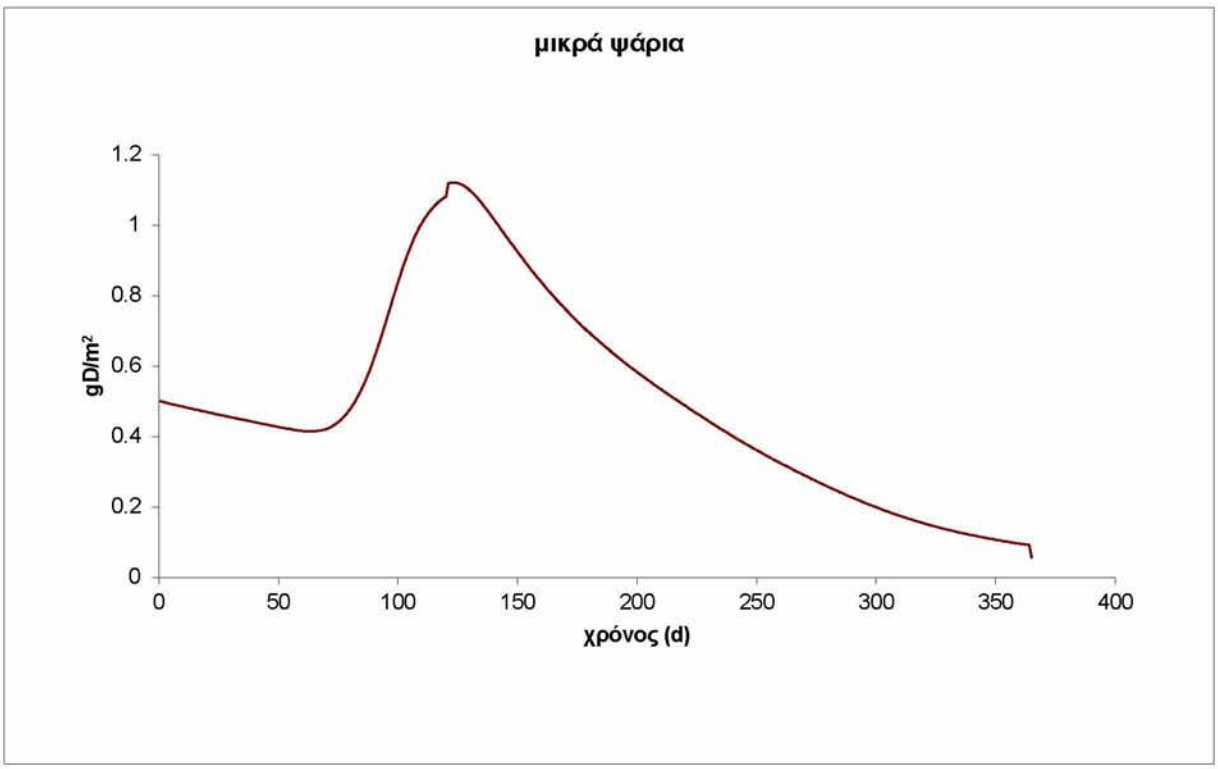
Τα ψάρια, όπως φαίνεται, και στο σύνολό τους, αλλά και στις επιμέρους κατηγορίες τους μειώνονται ετησίως. Τα μικρά ψάρια παρουσιάζουν εποχιακή αύξηση, συγκεκριμένα υπερδιπλασιάζονται από τον Μάρτιο, με μέγιστο επίπεδο τον Απρίλιο, ενώ ξαναμειώνονται σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα μέχρι το τέλος του έτους. Η αύξηση αυτή συμπίπτει με την περίοδο αναπαραγωγής. Τα μεγάλα και τα αρπακτικά ψάρια παρουσιάζουν σταδιακή μόνιμη μείωση. Η μείωση αυτή επικρατεί και στο σύνολο των ψαριών, με μία μικρή ανάκαμψη κατά την αύξηση των μικρών ψαριών. Γενικά, η πτωτική τάση της ξηρής μάζας των ψαριών υποδεικνύει επιδείνωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης (Διαγράμματα 4.5 έως 4.8).

Την επιδείνωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης αναδεικνύουν, πιο εμφανώς, η μείωση της διαφάνειας του νερού (διάγραμμα βάθους Secchi-χρόνου) και η αύξηση της χλωροφύλλης-α στο σύνολό της, αλλά και επιμέρους. Ο κύριος όγκος της χλωροφύλλης προέρχεται από τα κυανοβακτήρια, αλλά και τα διάτομα και λοιπές μικρές βρώσιμες άλγεις αποτελούν υπολογίσιμα μεγέθη, ιδίως την περίοδο από Ιανουάριο έως Μάρτιο (Διαγράμματα 4.11 έως 4.15).

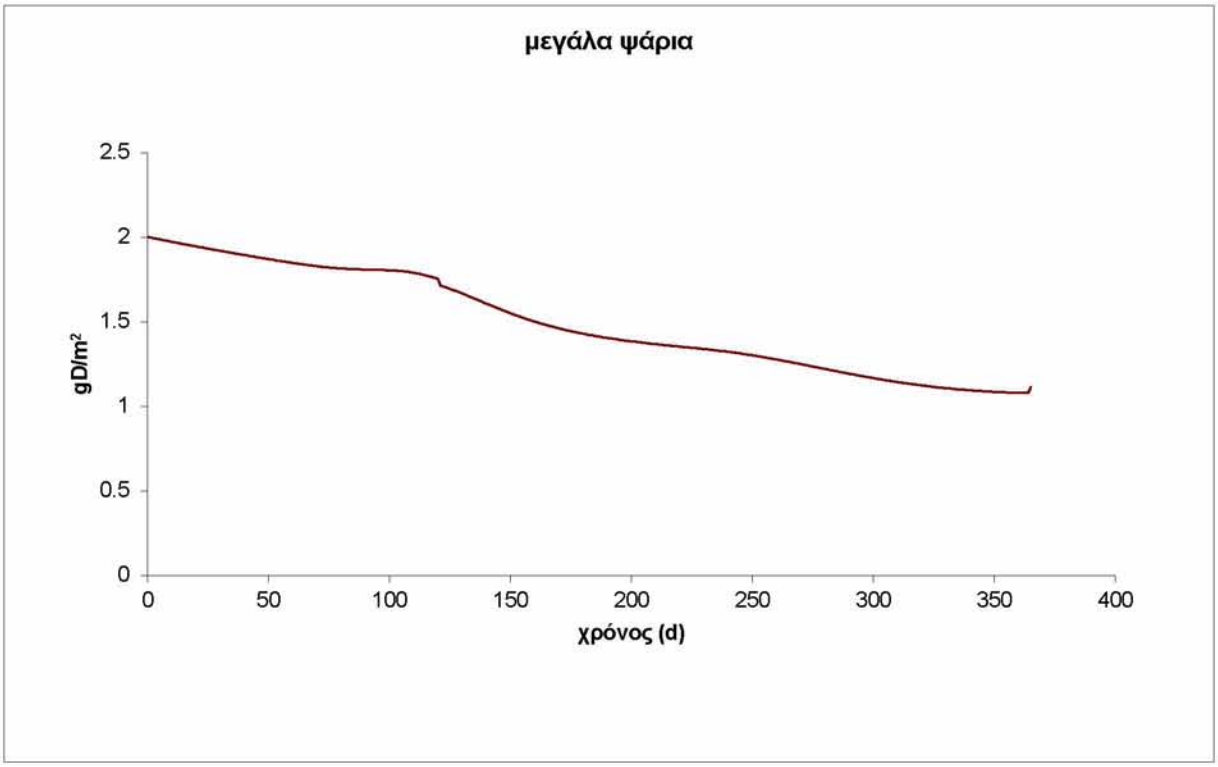
Η βλάστηση ακολουθεί εποχιακή ανοδική τάση την Άνοιξη, όπως όλοι οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί (περίοδος βλάστησης), ωστόσο ετησίως σημειώνει μείωση (Διάγραμμα 4.10). Αυτό αποτελεί επίσης ένδειξη επιδείνωσης της τροφικής κατάστασης της λίμνης. Με τον όρο επιδείνωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης εννοείται η σταθεροποίηση της λίμνης σε υπερευτροφική κατάσταση και η απομάκρυνσή της από το να πέσει από υπερευτροφική σε ευτροφική, πόσω δε μάλλον σε μεσοτροφική. Πιο αναλυτικά σχολιάζεται η τροφική κατάσταση της λίμνης και με χρήση των τροφικών δεικτών του Carlson σε επόμενο κεφάλαιο.

Πρέπει να σημειωθεί, σε αυτό το σημείο, ότι τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι μόνο ενός έτους και δεν προλαβαίνουν να σταθεροποιηθούν οι τάσεις τους στον χρόνο, ειδικά αν συνυπολογιστεί η παράμετρος ότι οι περισσότερες αρχικές συνθήκες του μοντέλου είναι αμφίβολης ακρίβειας ή ακόμη χειρότερα, παντελώς άγνωστες. Ο Janse προτείνει ότι αυτή η ανεπάρκεια γνώσης των αρχικών συνθηκών μπορεί να παρακαμφθεί με προσομοίωση μεγαλύτερου χρόνου, εωσότου το μοντέλο σταθεροποιηθεί κι αναδείξει τις πραγματικές συνθήκες και τάσεις που επικρατούν.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

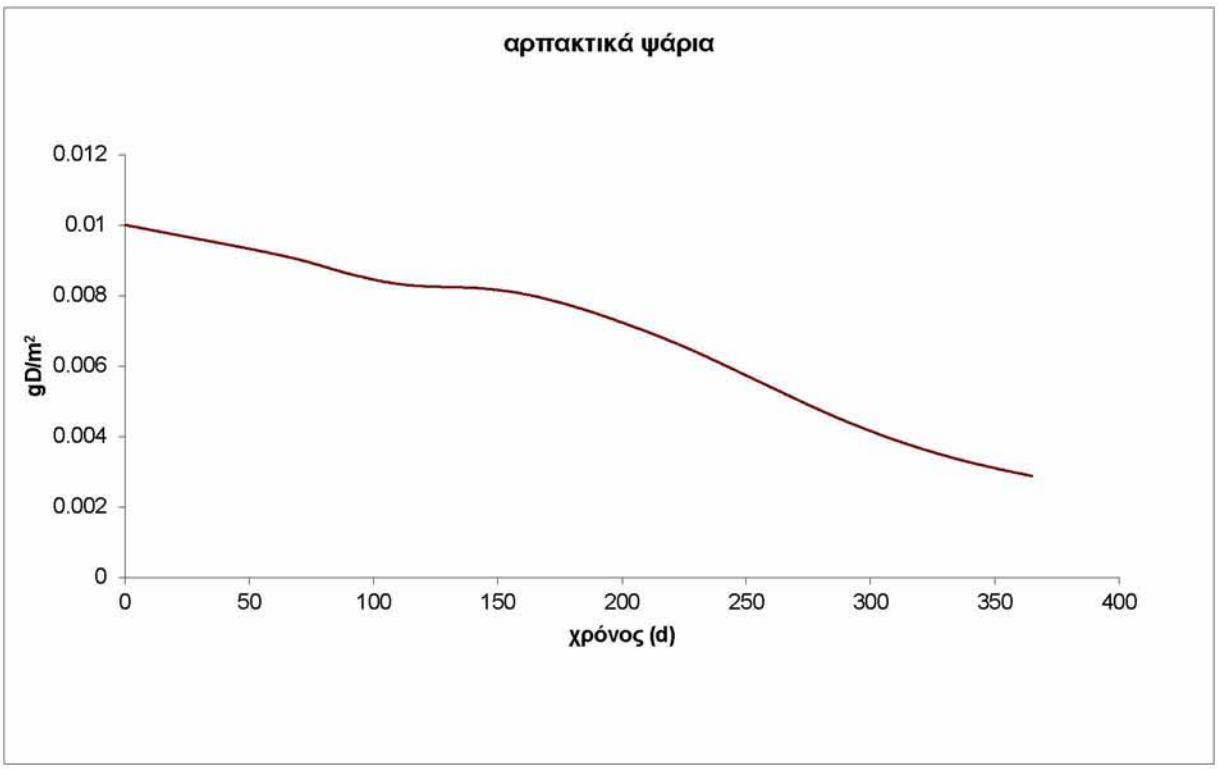


Διάγραμμα 4.5: μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

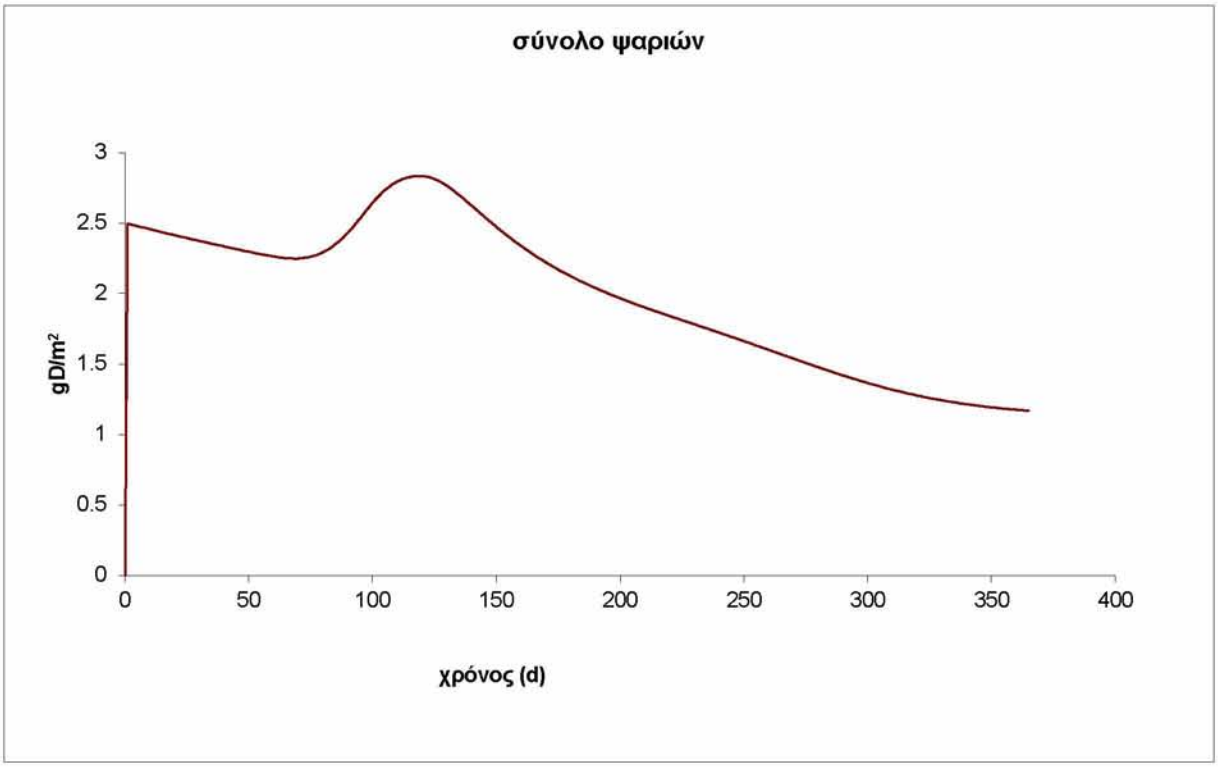


Διάγραμμα 4.6: μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

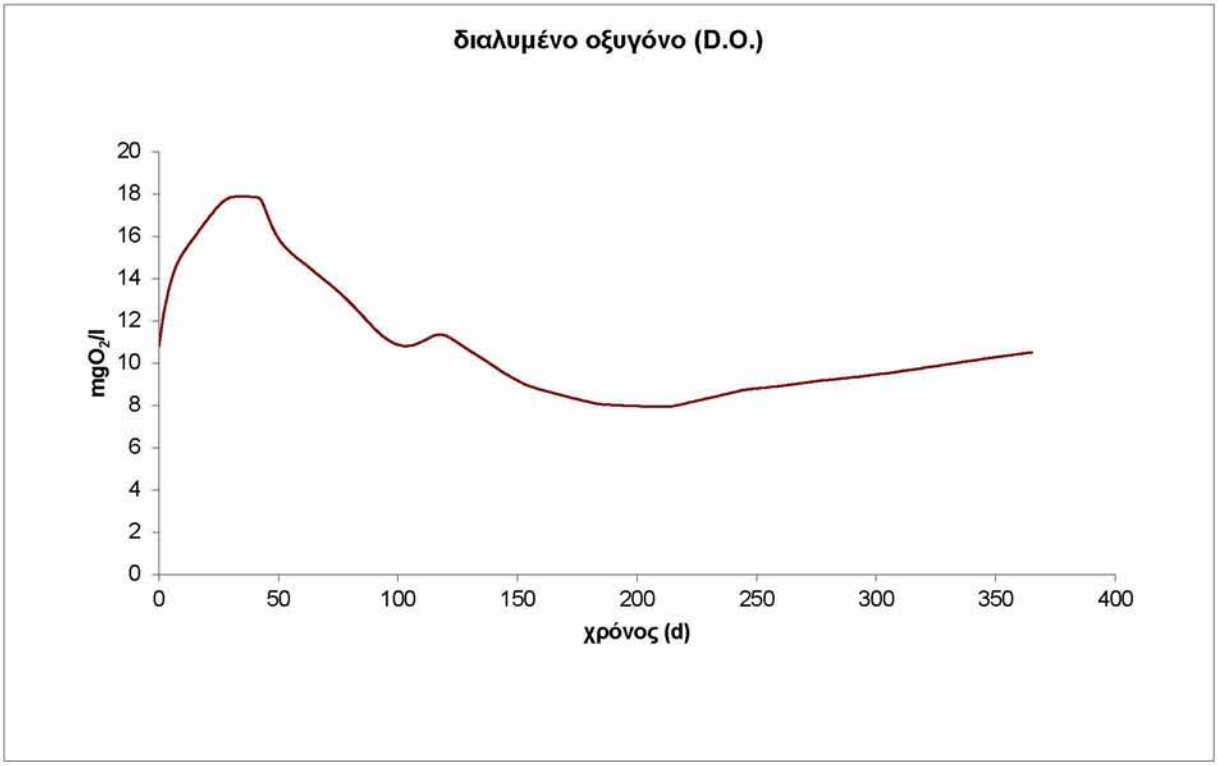


Διάγραμμα 4.7: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

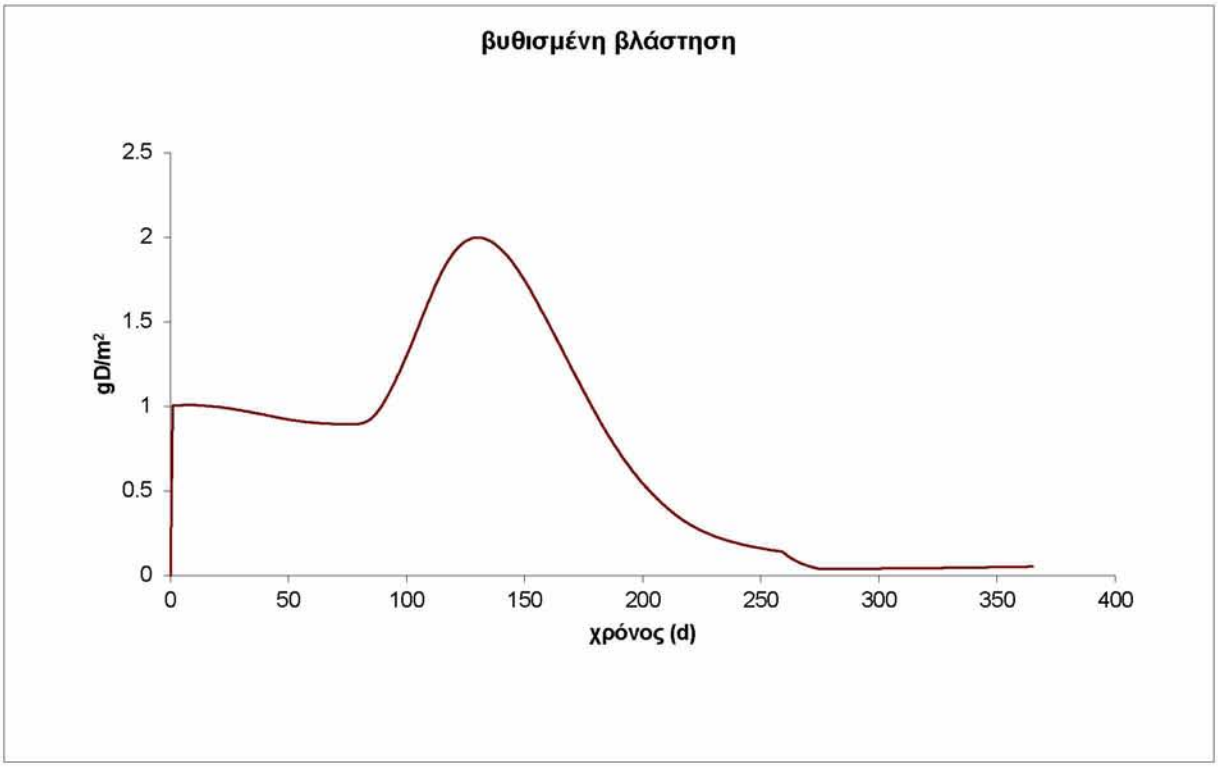


Διάγραμμα 4.8: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

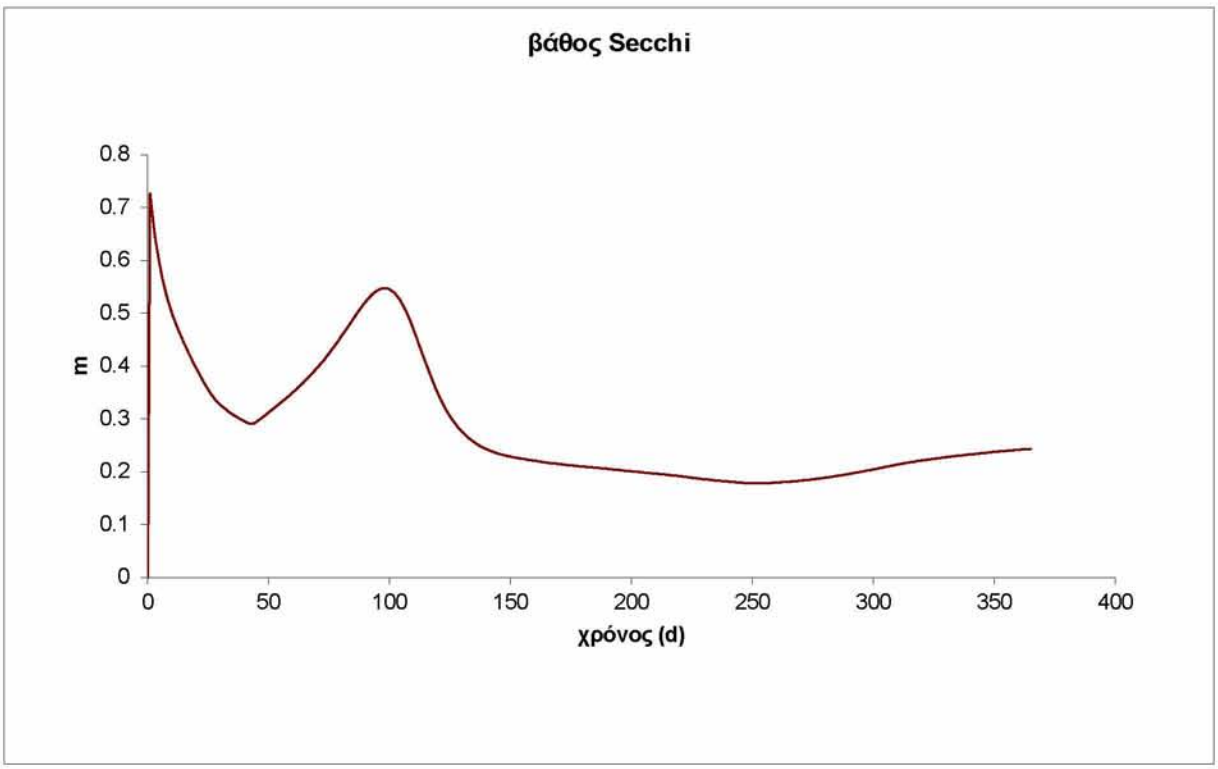


Διάγραμμα 4.9: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

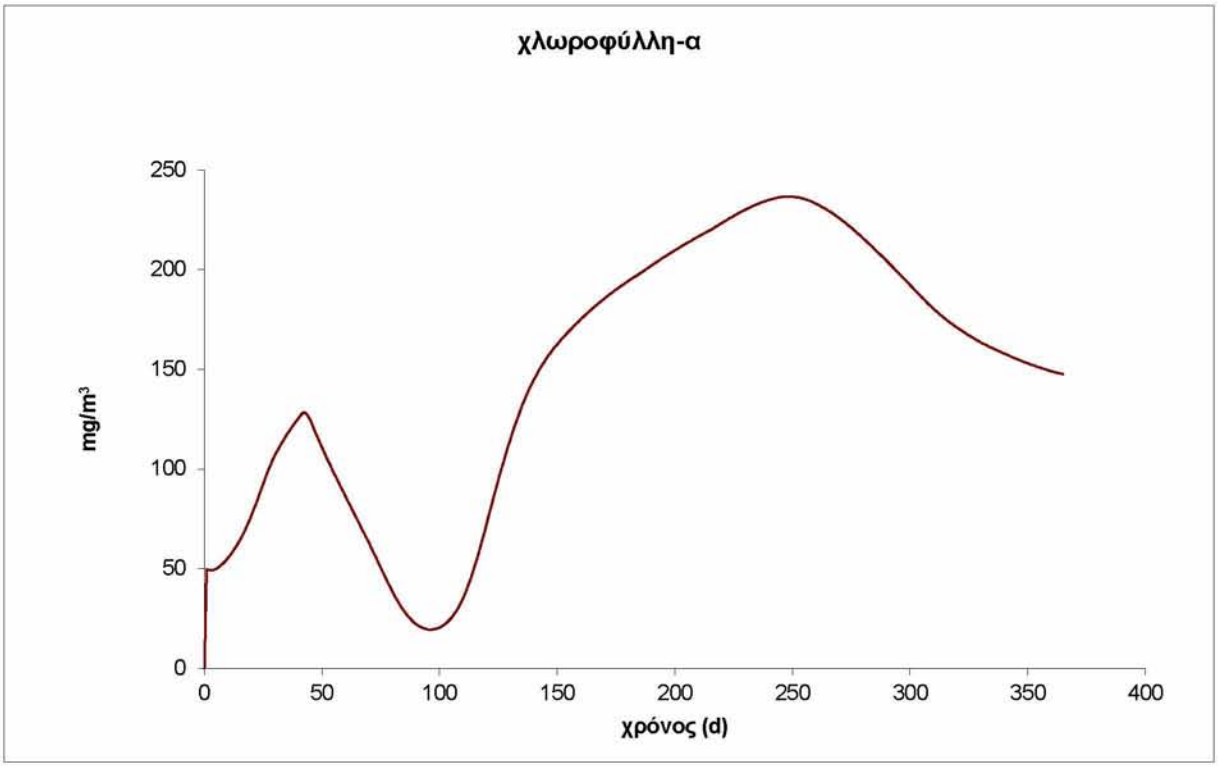


Διάγραμμα 4.10: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

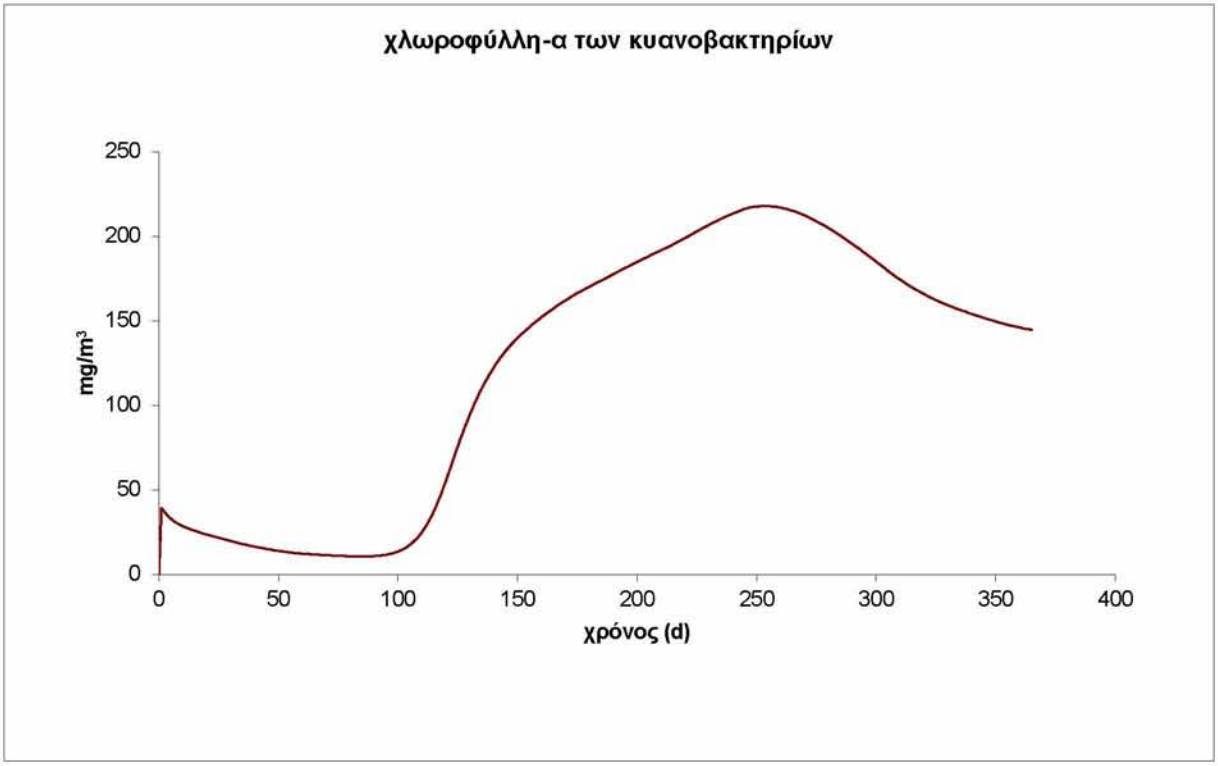


Διάγραμμα 4.11: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

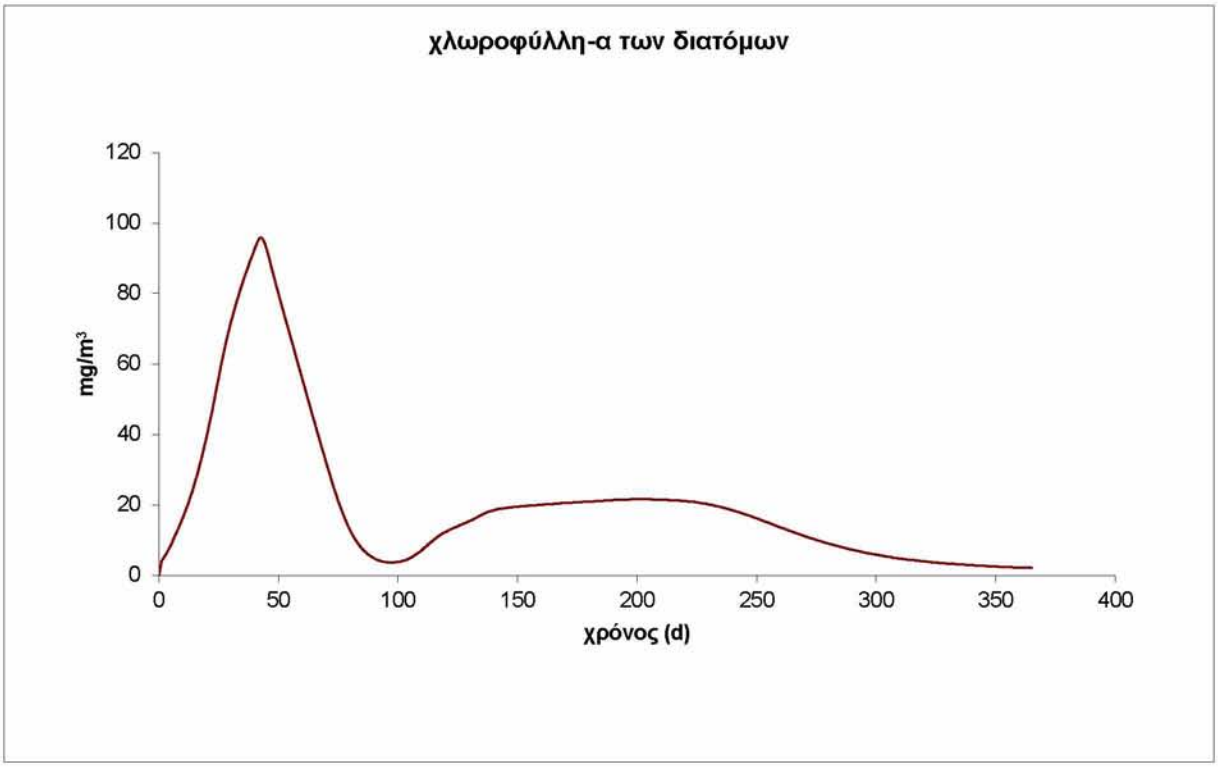


Διάγραμμα 4.12: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

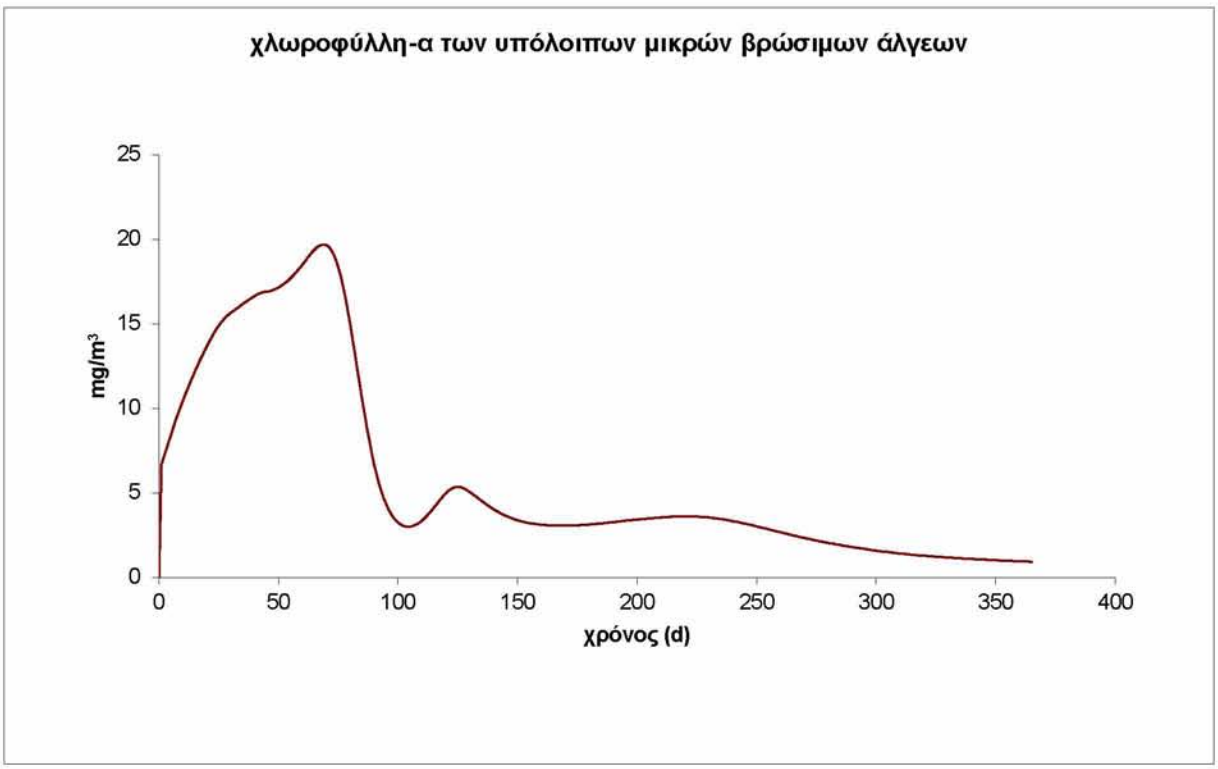


Διάγραμμα 4.13: χλωροφύλλη-α των κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

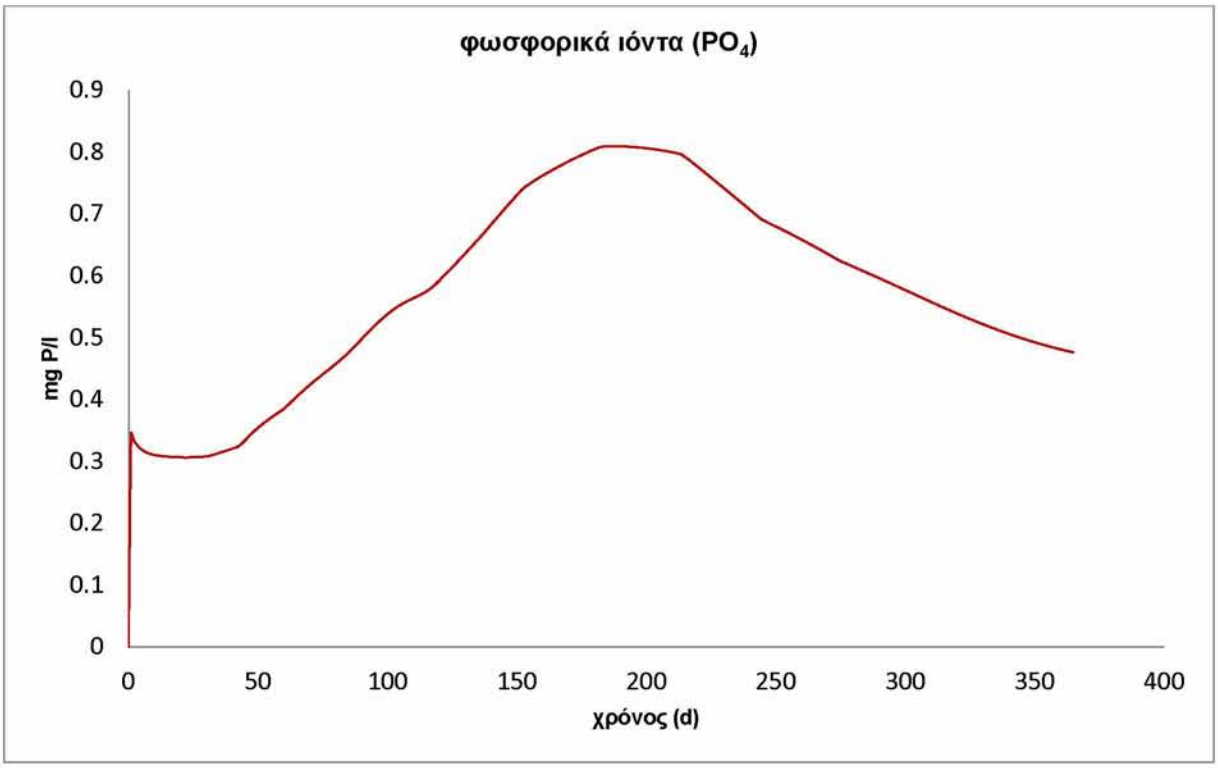


Διάγραμμα 4.14: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

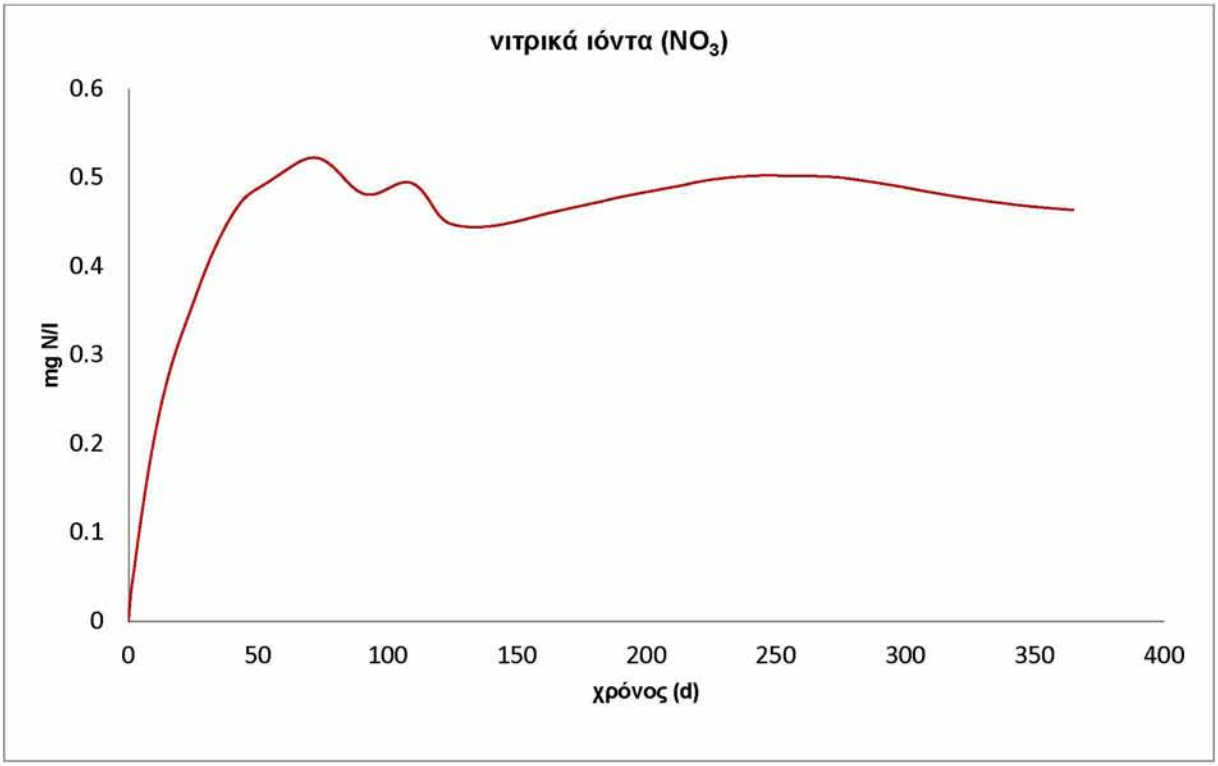


Διάγραμμα 4.15: χλωροφύλλη-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης

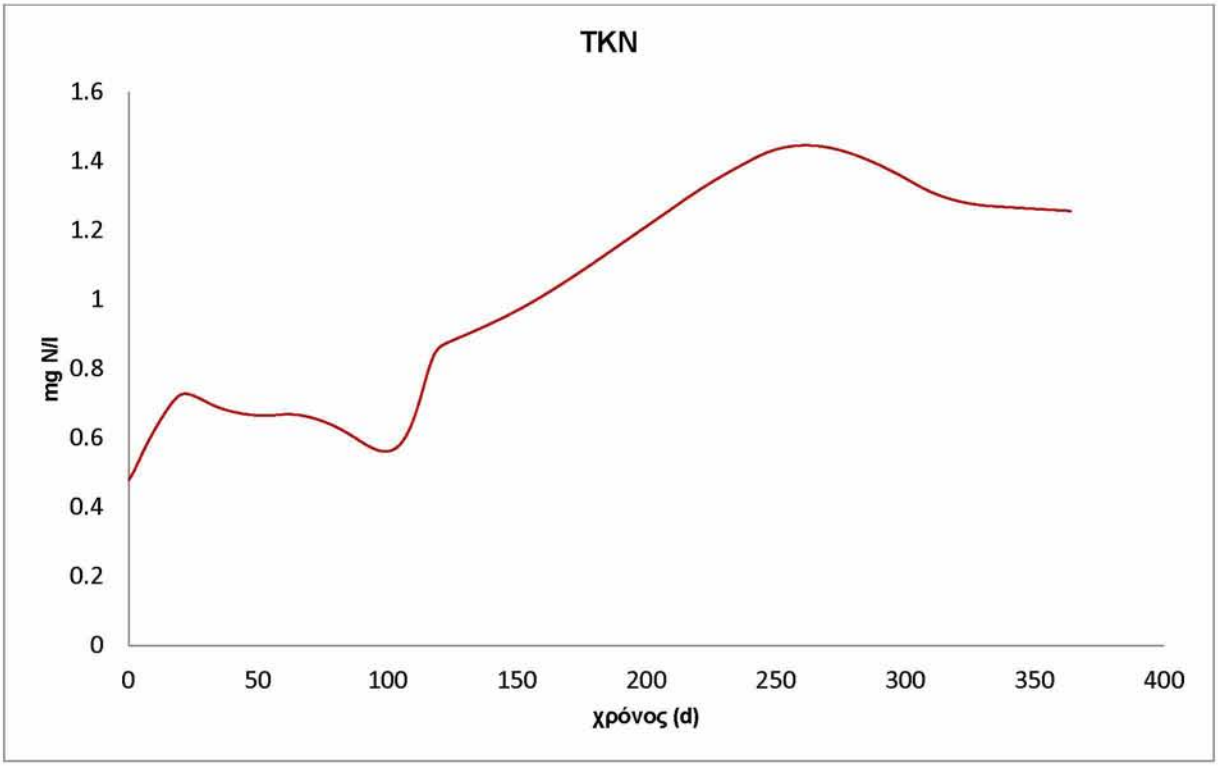


Διάγραμμα 4.1: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

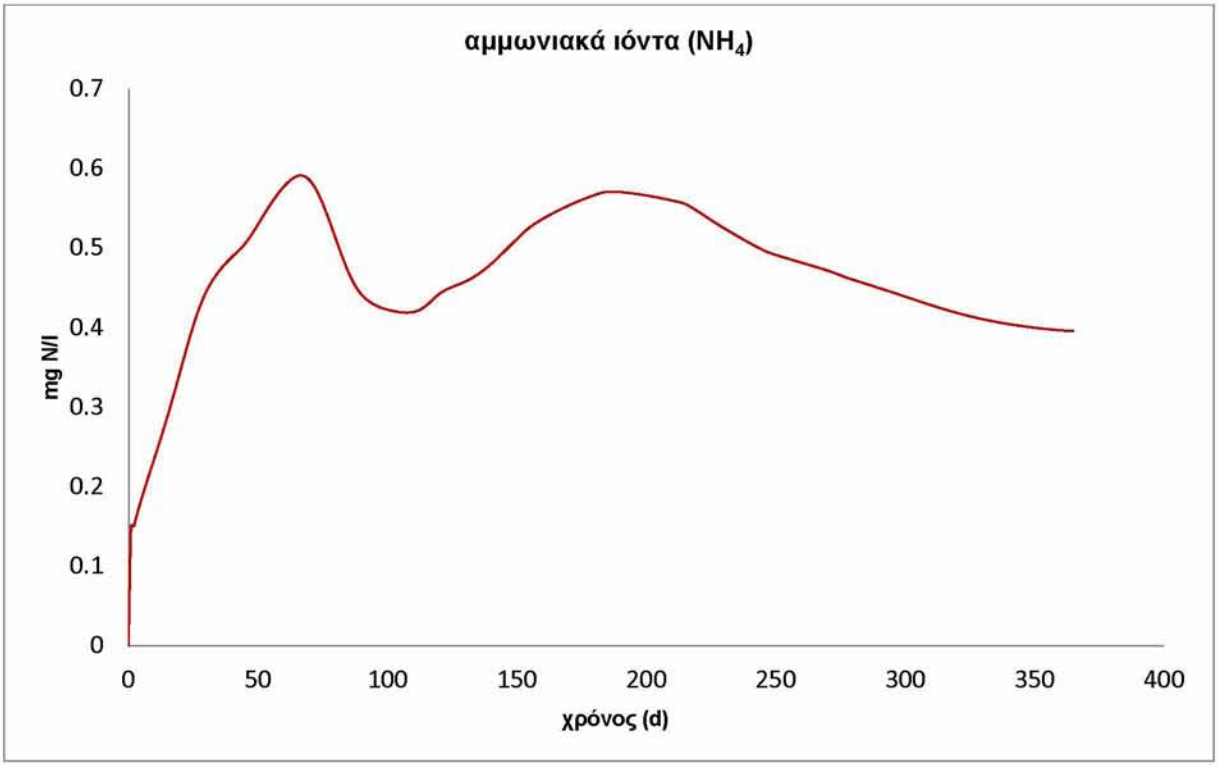


Διάγραμμα 4.17: νιτρικά ιόντα (NO_3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης



Διάγραμμα 4.18: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 4.19: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης

4.3.2 Ελάχιστη απαραίτητη παροχή εισόδου

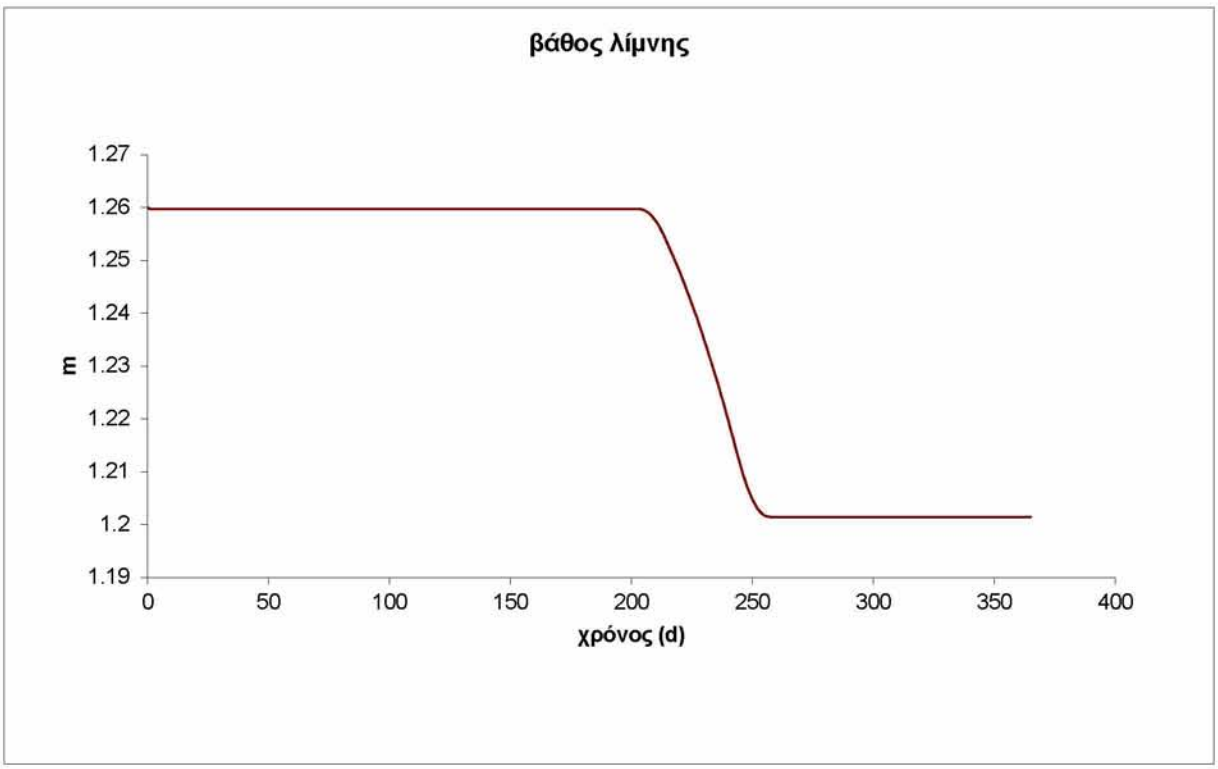
Από το διάγραμμα βάθους λίμνης- χρόνου (Διάγραμμα 4.20), παρατηρείται μείωση της στάθμης νερού της λίμνης. Η εφαρμογή του μοντέλου για περισσότερα έτη αναδεικνύει το ούτως ή άλλως εμφανές πρόβλημα, της ανεπάρκειας υδάτινου όγκου. Η ανεπάρκεια νερού όχι μόνο και όπως θα αποδειχθεί και σε επόμενο κεφάλαιο επιδεινώνει την τροφική κατάσταση της λίμνης, αλλά πρωτίστως διακυβεύει την ίδια την ύπαρξη της λίμνης. Με συνέχιση της ίδιας υδρολογικής κατάστασης το μοντέλο εμφανίζει ότι έχει στερέψει η λίμνη σε δύο έως τρία έτη. Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφέρουμε ότι το μοντέλο για να επιλύσει τις μαθηματικές εξισώσεις προσομοίωσης, χρειάζεται έναν ελάχιστο όγκο νερού. Φυσικά αυτό ερμηνεύεται ως τον ελάχιστο όγκο νερού που πρέπει να έχει η λίμνη ώστε να μην έχει στην ουσία μετατραπεί σε βάλτο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι οι υδατικές συνθήκες του 2012 αποτελούν πολύ δυσμενή κι ακραία περίπτωση και δεν θεωρείται πιθανό να επαναληφθούν, πόσω δε μάλλον σε συναπτά έτη.

Με δοκιμές για πενταετές πλάνο προσομοίωσης, προκύπτει η ελάχιστη υδρολογική παροχή εισόδου που διατηρεί οριακά θετικό ισοζύγιο στη λίμνη. Η παροχή αυτή είναι 12 mm/d, ενώ αυτή συνεκτιμά και τη βροχόπτωση. Για μέση μηνιαία βροχόπτωση 2.5 mm/d για το έτος 2012, η ελάχιστη μέση μηνιαία παροχή εισόδου από τον Πηνειό και τους υπόλοιπους συλλεκτήρες από τη λεκάνη απορροής του Πηνειού προκύπτει ίση με 9.5 mm/d ή περίπου 132 hm^3/yr.

Για το μοντέλο σε όλες τις πραγματώσεις που γίνονται στην πορεία της παρούσας εργασίας, έχει τεθεί η ελάχιστη παροχή εισόδου που καθιστά την λίμνη τουλάχιστον βιώσιμη από υδρολογικής άποψης. Τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου παραμένουν ως έχουν, συνθέτοντας έτσι το βασικό σενάριο, δηλαδή το σενάριο που λειτουργεί ως σημείο αναφοράς και υποβοηθά την σύγκριση με άλλα σενάρια.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 4.20: βάθος λίμνης- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης

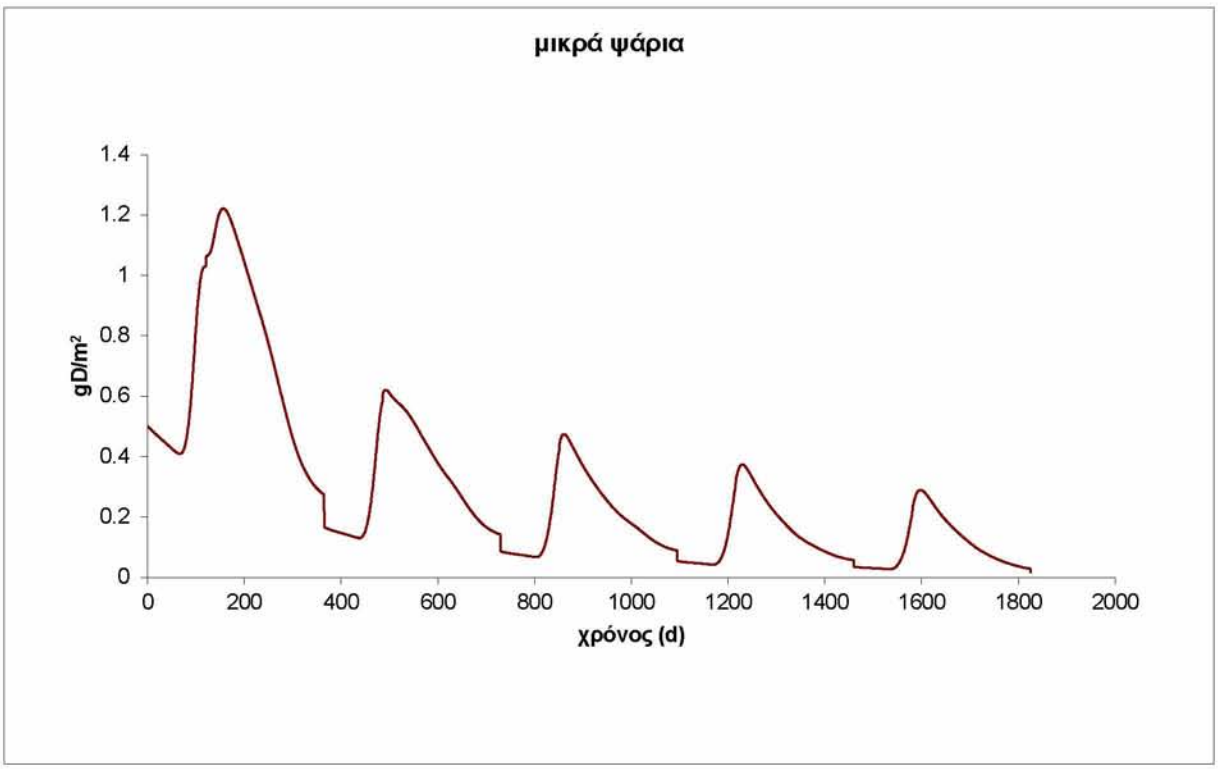
4.3.3 Πενταετής πραγμάτωση για το βασικό σενάριο

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα πενταετίας για το βασικό σενάριο, που ακολουθούν, για πολλά από τα φυσικά μεγέθη, είναι απαραίτητη η πραγμάτωση για περισσότερο του ενός έτους ώστε να σταθεροποιηθούν σε ρεαλιστικότερες τιμές, που ξεφεύγουν από το σφάλμα της εκάστοτε αρχικής συνθήκης. Αυτό είναι εμφανές κυρίως στα διαγράμματα 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.26 και 4.31.

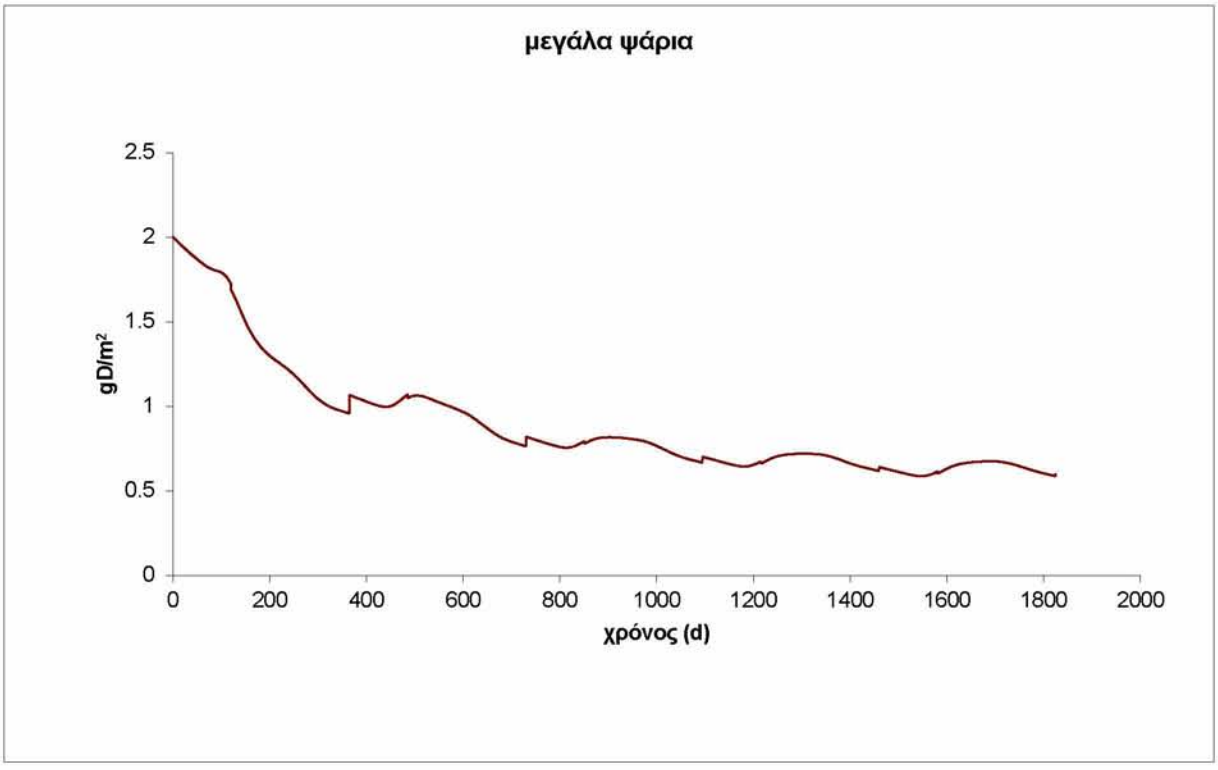
Οι τάσεις, ωστόσο των μεγεθών, παραμένουν όπως φαίνονται και στα μη σταθερά διαγράμματα του ενός έτους. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αυξητικές τάσεις στην συνολική χλωροφύλλη-α, στα νιτρικά ιόντα και στο ΤΚΝ, ενώ μειώνονται το βάθος Secchi, το σύνολο των ψαριών και οι επιμέρους κατηγορίες και τα φωσφορικά ιόντα. Τα διάτομα, η βυθισμένη βλάστηση, το διαλυμένο οξυγόνο, οι λοιπές μικρές βρώσιμες άλγεις και τα αμμωνιακά ιόντα διατηρούν σταθερά επίπεδα (Διαγράμματα 4.21 έως 4.35)

Γενικά, από την αύξηση της χλωροφύλλης-α και τη μείωση του βάθους Secchi, φαίνεται ότι η τροφική κατάσταση της λίμνης επιδεινώνεται σταδιακά. Το συνολικό άζωτο, ειδικά τα νιτρικά ιόντα σε αντίθεση με τα φωσφορικά ιόντα αυξάνονται, εξαιτίας της μεγάλης εξωτερικής φόρτισης θρεπτικών, πράγμα που αναδεικνύει τον φώσφορο ως περιοριστικό παράγοντα. Τα ψάρια μειώνονται σε όλες τις κατηγορίες και στο σύνολό τους, υποβαθμίζεται, δηλαδή, η βιοποικιλότητα της λίμνης. Η βλάστηση παραμένει μεν σταθερή, αλλά σε πολύ χαμηλά επίπεδα κάνοντας σαφές ότι η λίμνη βρίσκεται σε κατάσταση επικράτησης των άλγεων έναντι των μακρόφυτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

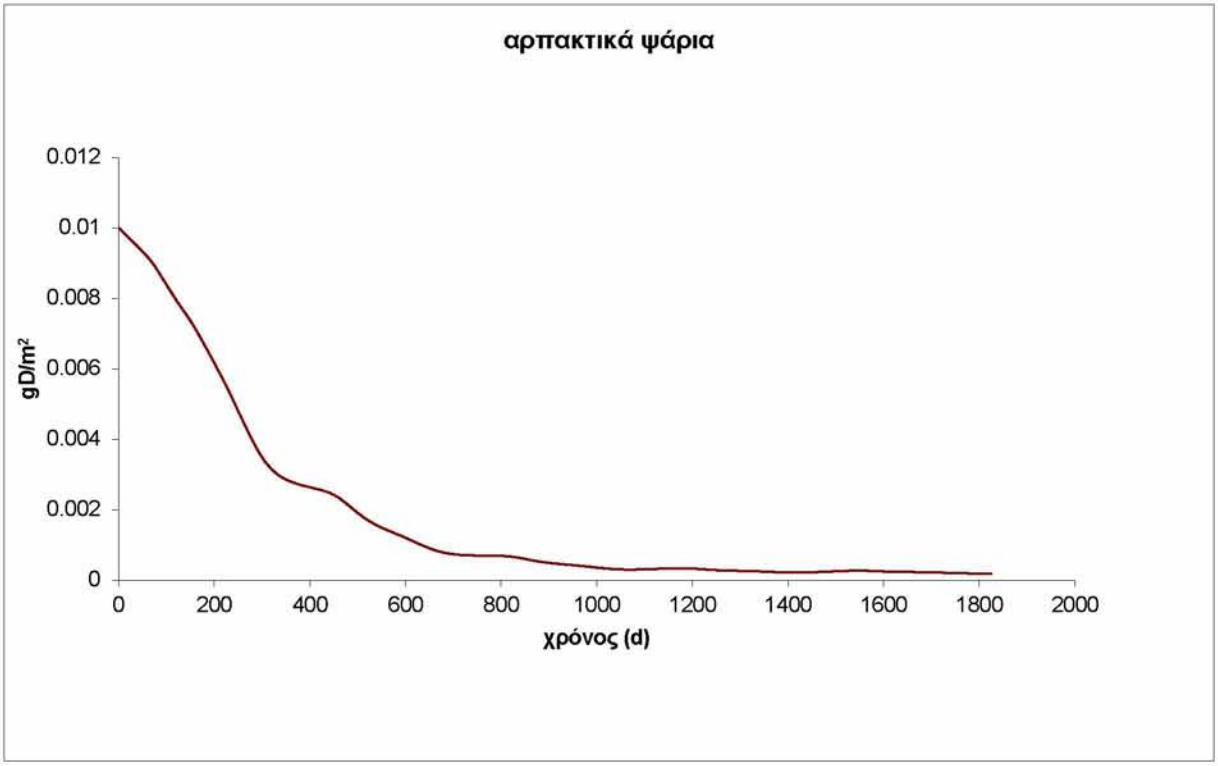


Διάγραμμα 4.21: μικρά ψάρια- χρόνος για βασικό σενάριο

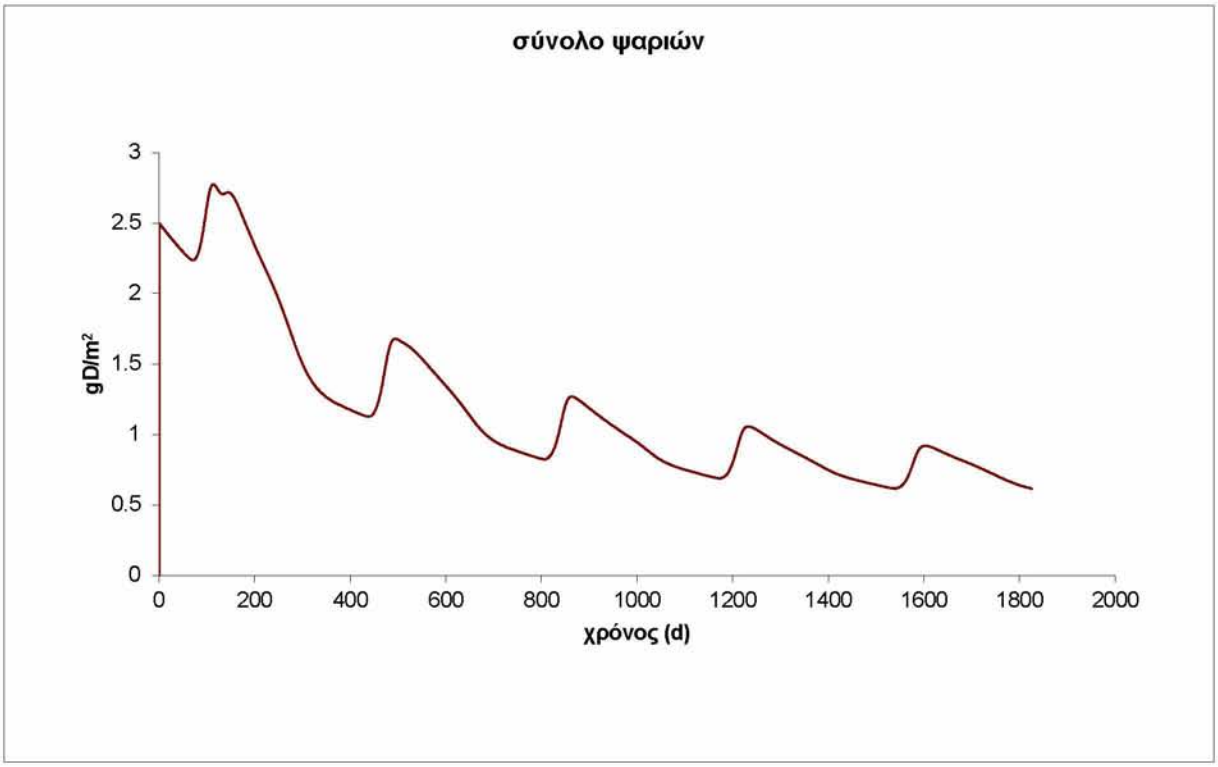


Διάγραμμα 4.22: μεγάλα ψάρια- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

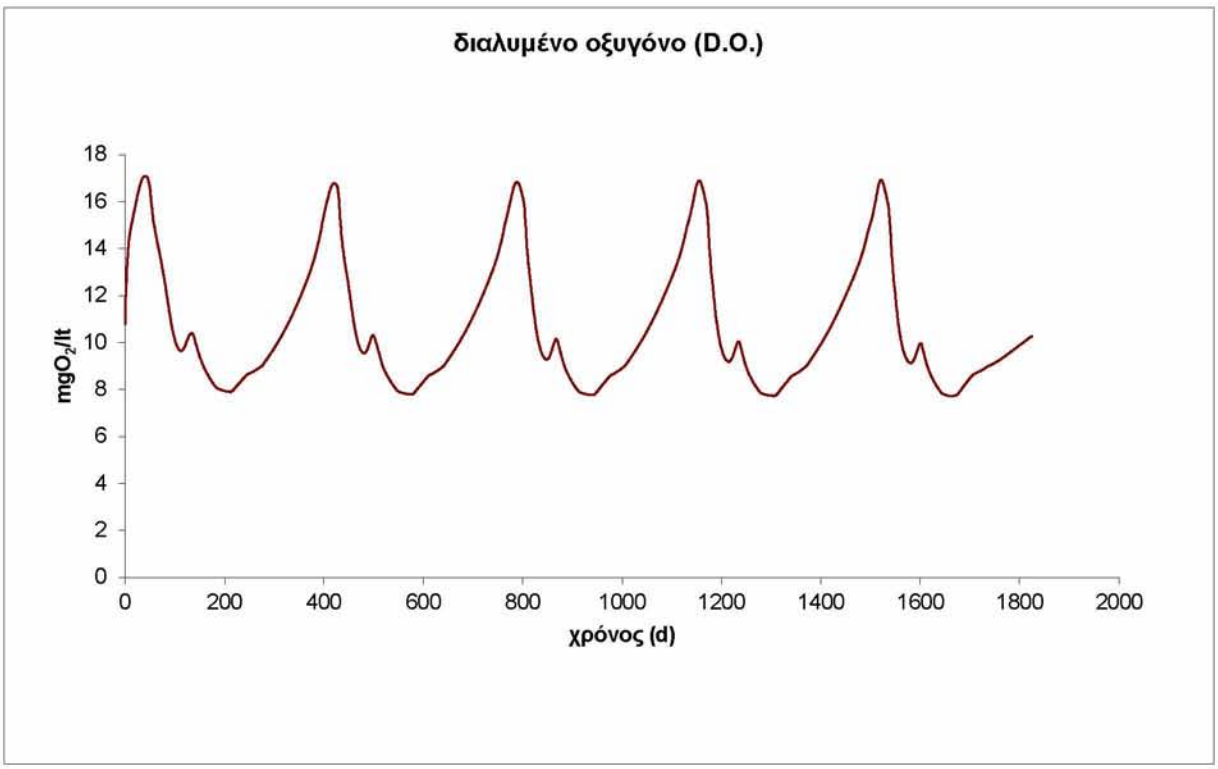


Διάγραμμα 4.23: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για βασικό σενάριο

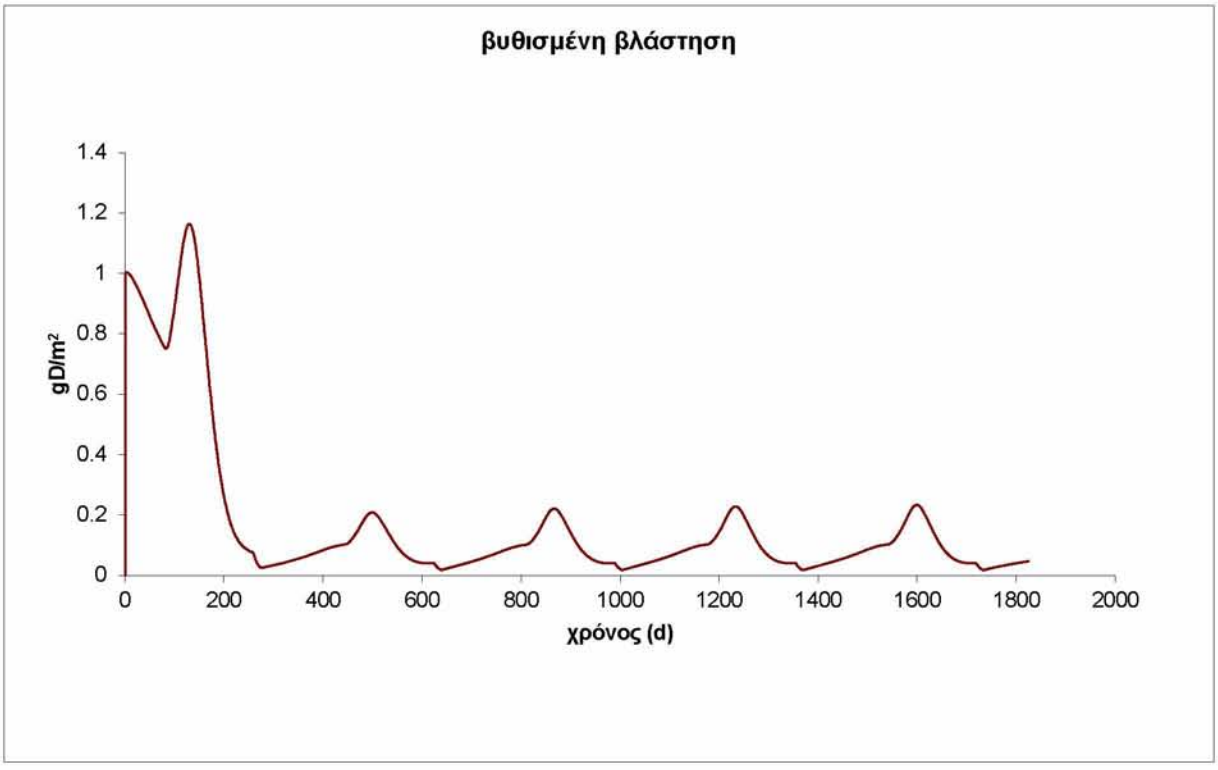


Διάγραμμα 4.24: σύνολο ψαριών- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

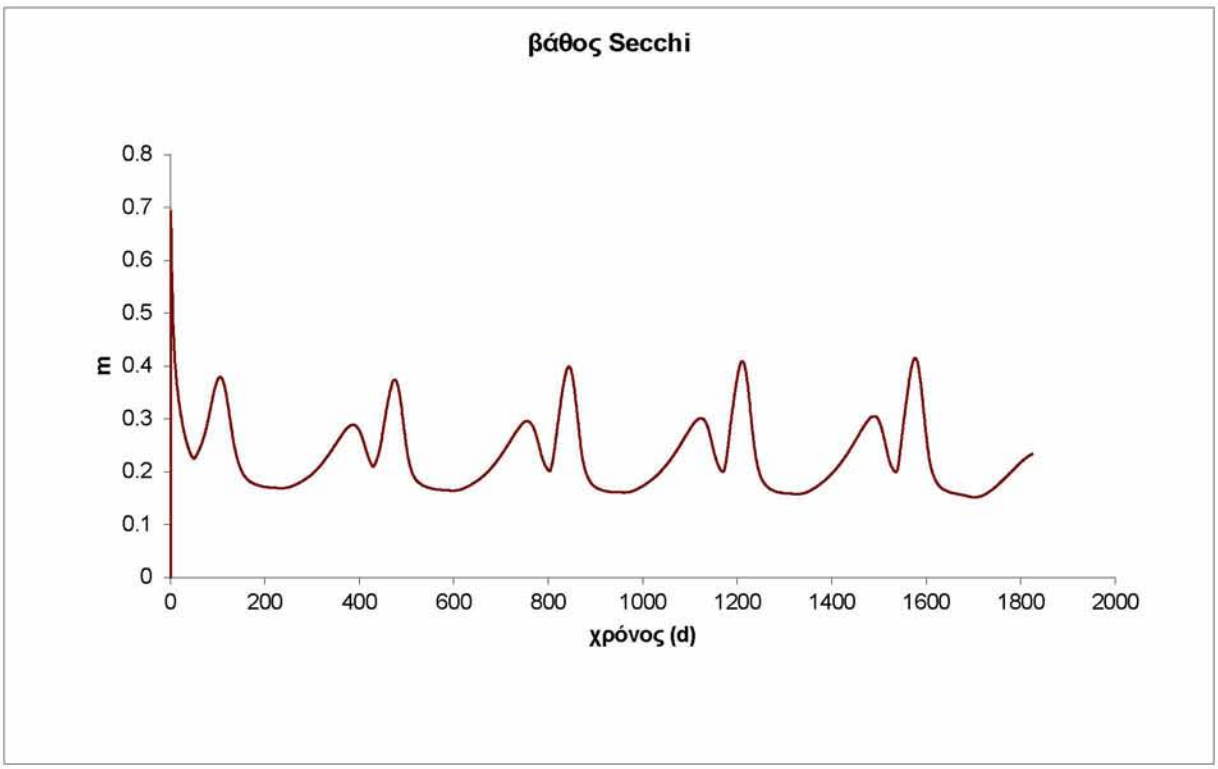


Διάγραμμα 4.25: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για βασικό σενάριο

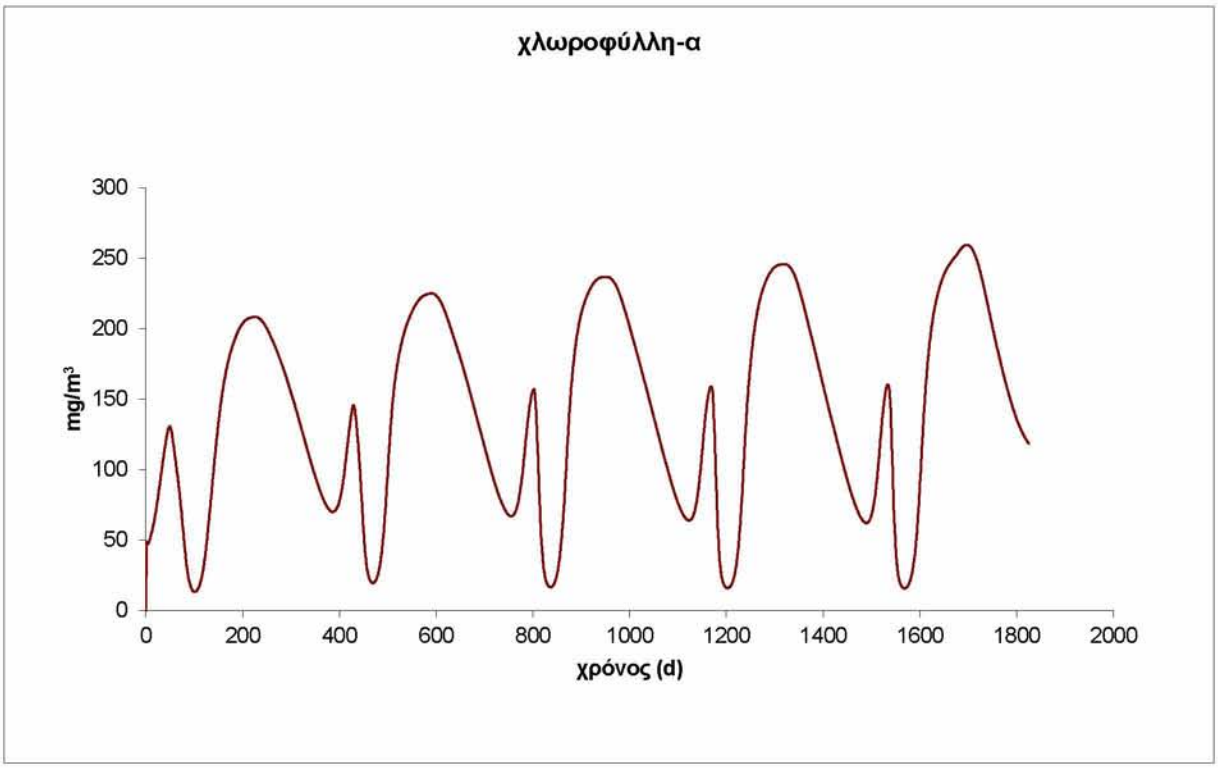


Διάγραμμα 4.26: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

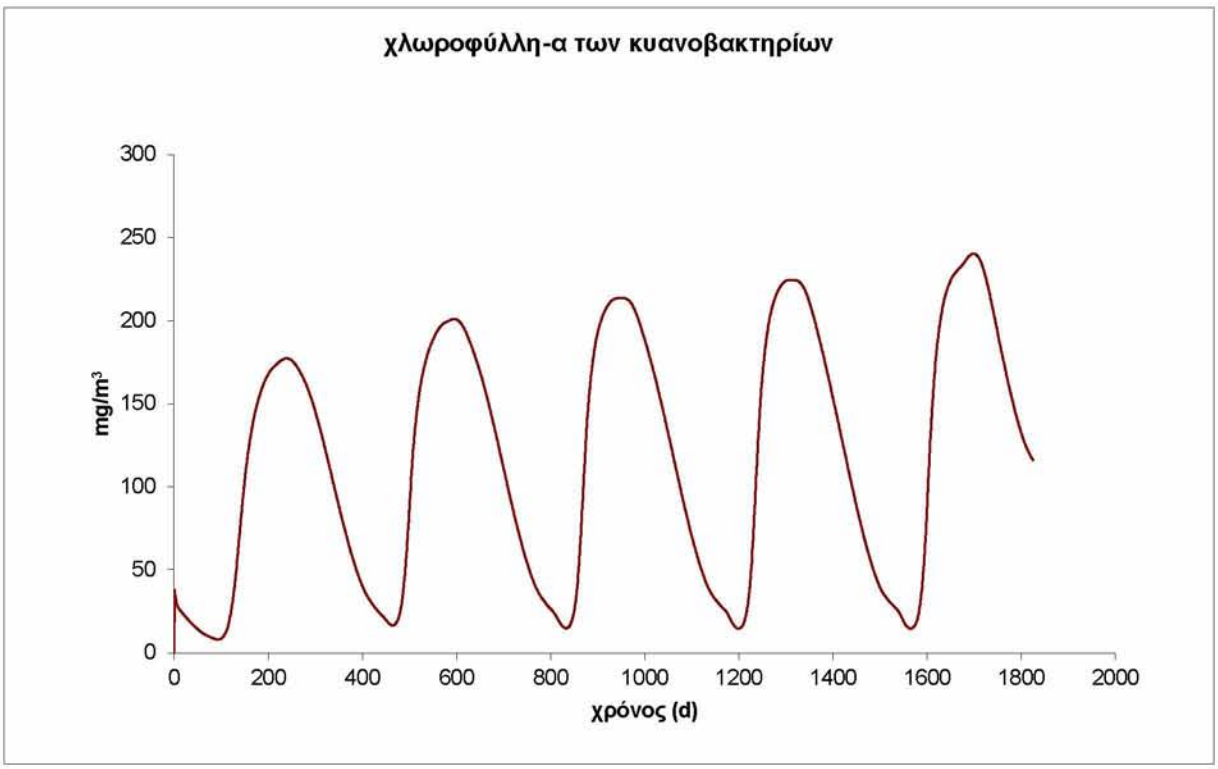


Διάγραμμα 4.27: βάθος Secchi- χρόνος για βασικό σενάριο

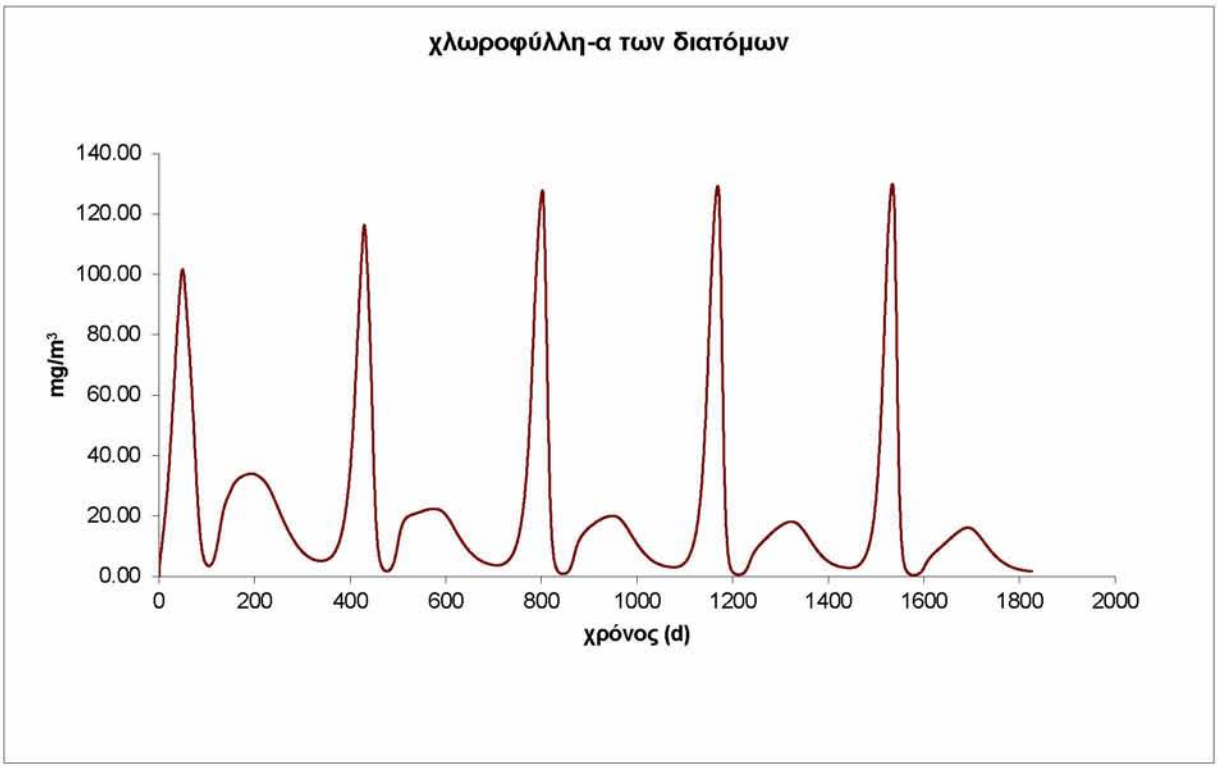


Διάγραμμα 4.28: χλωροφύλλη-α- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

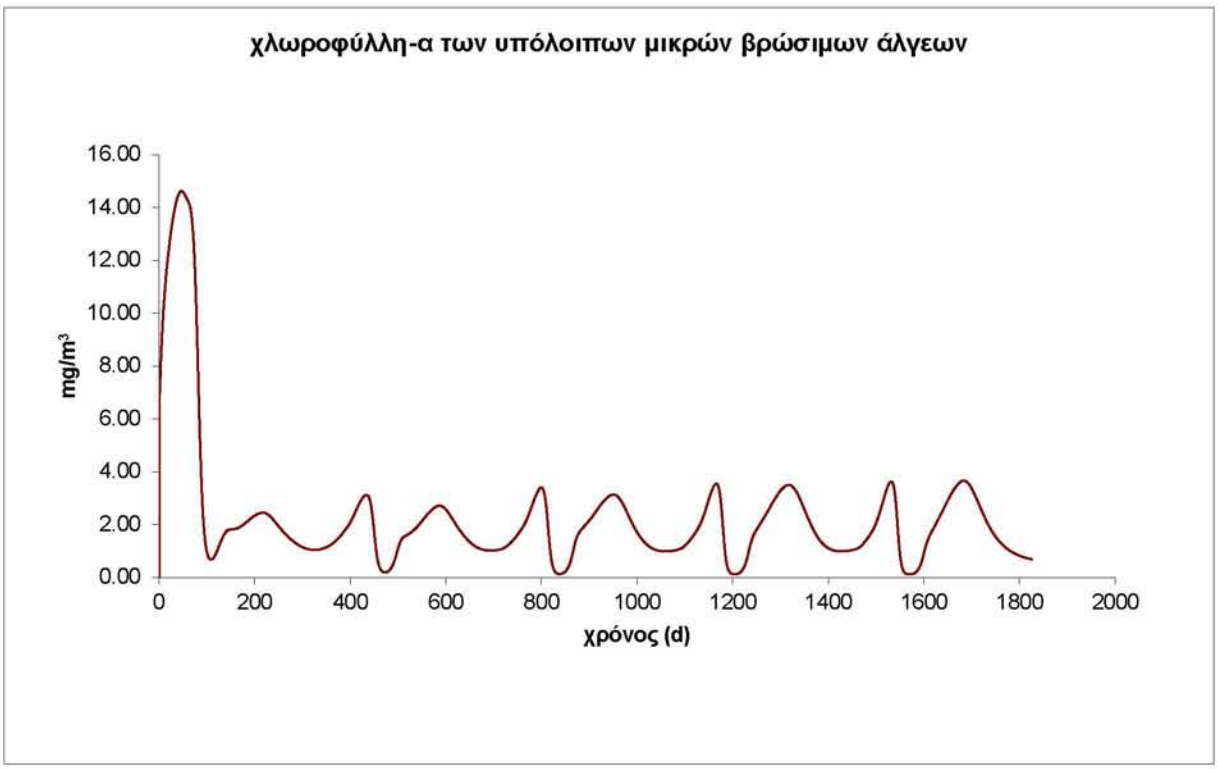


Διάγραμμα 4.29: χλωροφύλλη-α των κυανοβακτηρίων- χρόνος για βασικό σενάριο

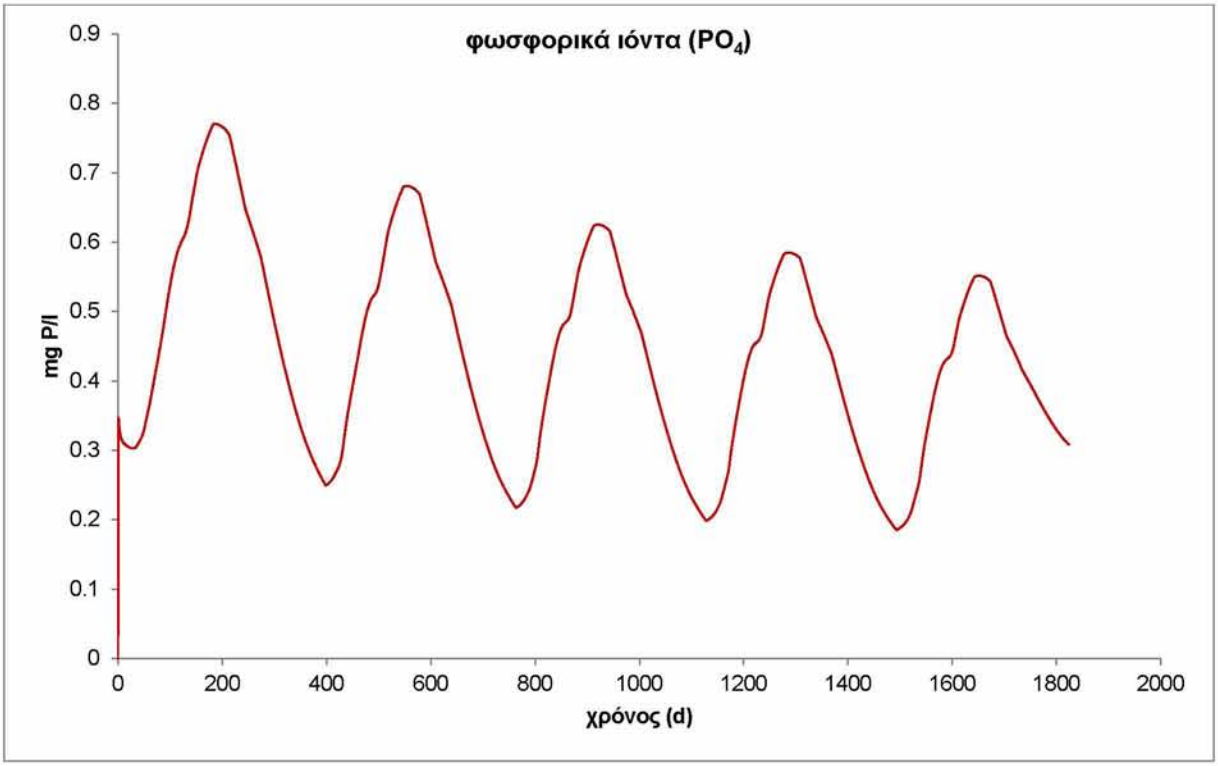


Διάγραμμα 4.30: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

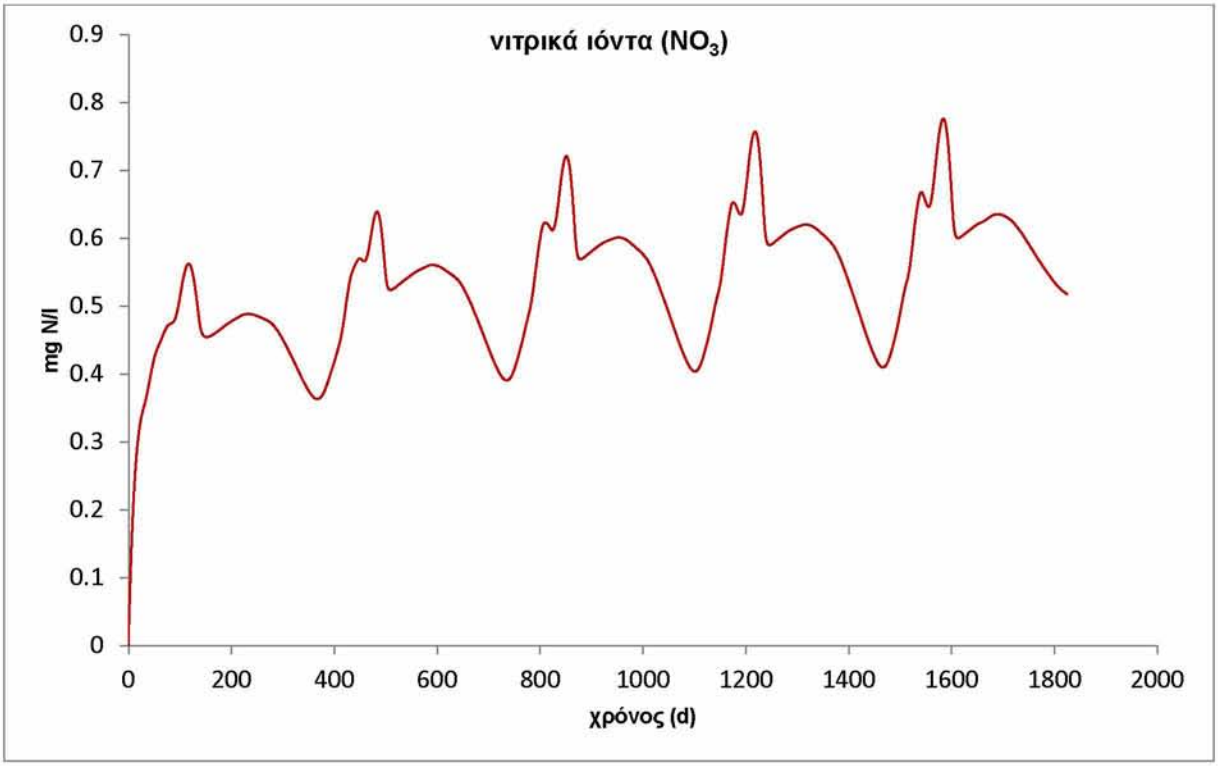


Διάγραμμα 4.31: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος για βασικό σενάριο

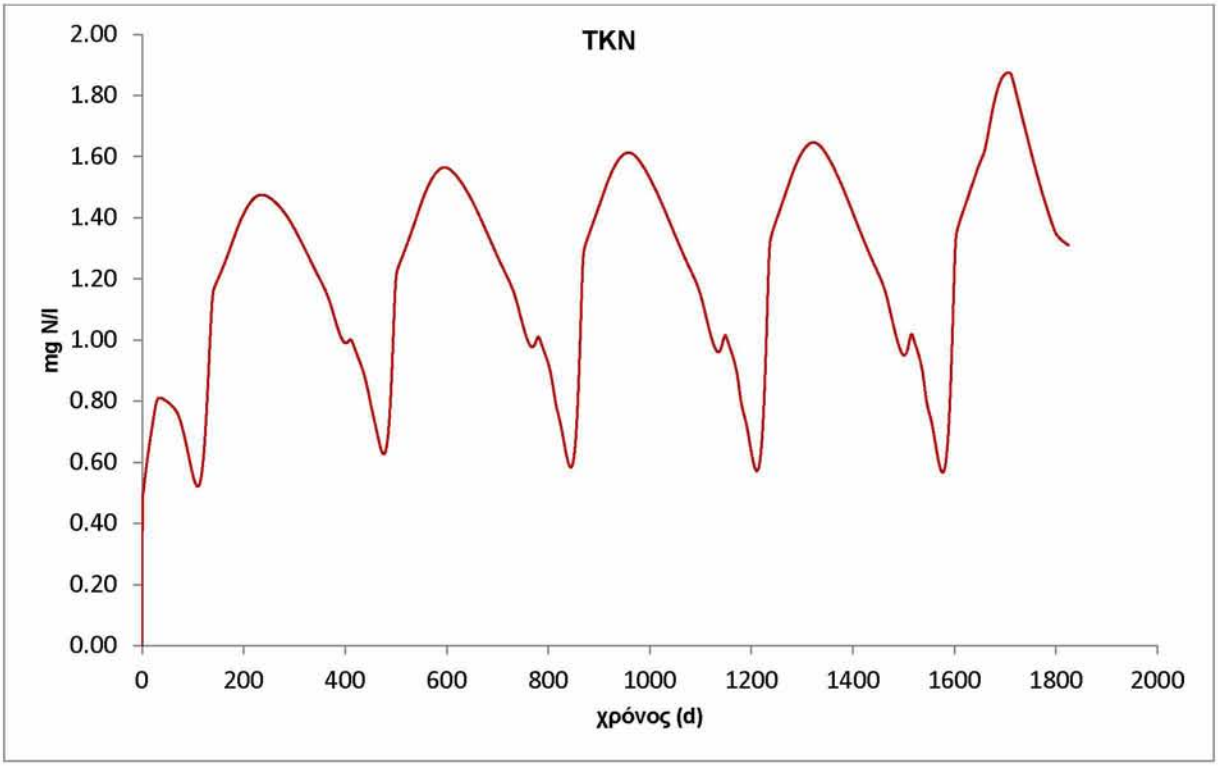


Διάγραμμα 4.32: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

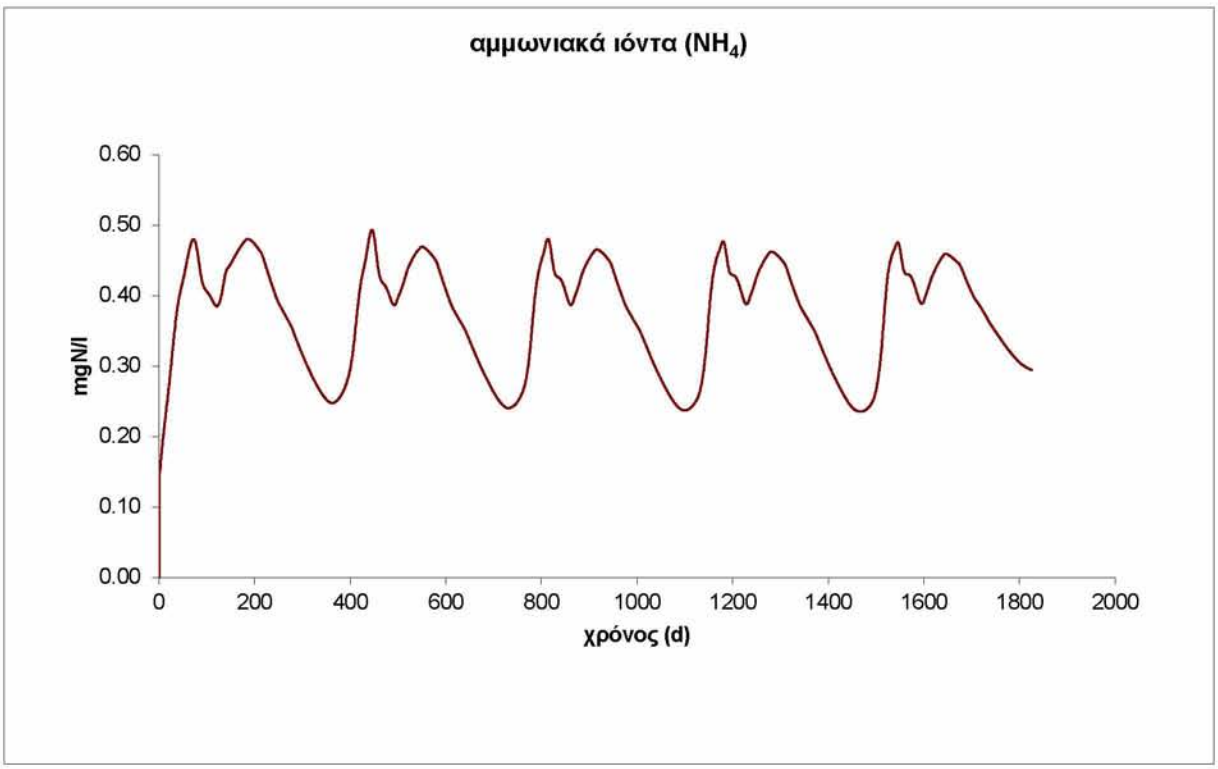


Διάγραμμα 4.33: νιτρικά ιόντα (NO_3)- χρόνος για βασικό σενάριο



Διάγραμμα 4.34: TKN- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 4.35: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος για βασικό σενάριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

4.4 Επεξεργασία εξόδων μοντέλου

Για την ανάλυση και την κατανόηση της επίδρασης διάφορων παραμέτρων στην τροφική κατάσταση της λίμνης, γίνονται εφαρμογές του μοντέλου για έναν ικανοποιητικό αριθμό τιμών των παραμέτρων αυτών και μετέπειτα σύγκριση των εξόδων. Για να γίνει η σύγκριση αυτή, χρησιμοποιούνται οι μέσες θερινές τιμές των φυσικών μεγεθών της λίμνης, (χλωροφύλλη-α, βάθος Secchi κ.τ.λ.) για το τελευταίο έτος της πενταετίας των προσομοιώσεων.

Οι θερινοί μήνες θεωρούνται ιδανική περίοδος για έλεγχο της τροφικής κατάστασης, καθότι το καλοκαίρι οι συνθήκες ευνοούν την επιδείνωση της και άρα σε αυτή την περίοδο εντοπίζεται η δυσμενέστερη περίπτωση.

Μία από τις εξόδους του μοντέλου που παρουσιάζεται είναι τα ψάρια και οι τρεις υποκατηγορίες τους. Τα σχετικά διαγράμματα δεν περιγράφουν ικανοποιητικά τους κύκλους ζωής των μεσογειακών ψαριών που περιέχει η Κάρλα, όπως τα κυπρινοειδή. Το μοντέλο εμφανίζει μεν πολύ χαμηλές, σχεδόν μηδενικές τιμές βλάστησης, αλλά όχι εντελώς μηδενικές. Επίσης, η βυθισμένη βλάστηση, στην λίμνη Κάρλα είναι μηδενική, εξαιτίας του χαλαρού πυθμένα της λίμνης. Ωστόσο τα διαγράμματα παρατίθενται για λόγους πληρότητας και εμβάθυνσης στην κατανόηση των γενικότερων αρχών που διέπουν τις σχέσεις μιας τροφικής αλυσίδας.

Παρότι είναι δυνατό να διεξάγονται αποτελέσματα από τις τάσεις όλων των φυσικών μεγεθών της λίμνης, ωστόσο εισάγεται επιπλέον ο δείκτης τροφικής κατάστασης TSI (trophic state index) του Carlson, ο οποίος βοηθάει στην γρήγορη κατάταξη της λίμνης σε ολιγοτροφική, μεσοτροφική, ευτροφική και υπερευτροφική. Ο δείκτης Carlson αποτελεί έναν από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους τροφικούς δείκτες, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών. Η τροφική κατάσταση ορίζεται ως το συνολικό βάρος της βιομάζας σε ένα δεδομένο όγκο νερού τη στιγμή της μέτρησης.

Τρείς ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του δείκτη Carlson: η επιφανειακή χλωροφύλλη- α, ο ολικός φώσφορος και το βάθος Secchi. Από τις τρεις αυτές, η επιφανειακή χλωροφύλλη-α δίνει ίσως τα πιο ακριβή αποτελέσματα, καθώς αποτελεί τον πιο ακριβή δείκτη εκτίμησης της βιομάζας. Ο φώσφορος αποτελεί μια πιο ακριβή εκτίμηση της τροφικής κατάστασης ενός υδάτινου σώματος τη θερινή περίοδο από ότι η χλωροφύλλη. Τέλος, το βάθος Secchi είναι πιθανώς ο λιγότερο ακριβής δείκτης, αλλά επίσης και ο πιο εύκολος στη μέτρηση. Συνεπώς τα προγράμματα παρακολούθησης χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο το βάθος Secchi. Μεταφράζοντας τις τιμές διαφάνειας Secchi σε μία λογαριθμική κλίμακα με βάση το 2, κάθε διαδοχικός διπλασιασμός της βιομάζας αντιπροσωπεύεται από έναν ακέραιο αριθμό- δείκτη σύμφωνα με την εξίσωση:

$$TSI(\beta\acute{\alpha}\theta o\varsigma\ Secchi) = 10 * (6 - \frac{\ln(\beta\acute{\alpha}\theta o\varsigma\ Secchi)}{ln2}) \quad (4.16)$$

Ο δείκτης Carlson αποτελεί έναν από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους τροφικούς δείκτες, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών. Η τροφική κατάσταση ορίζεται ως το συνολικό βάρος της βιομάζας σε ένα δεδομένο όγκο νερού τη στιγμή της μέτρησης.

Τρείς ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του δείκτη Carlson: η επιφανειακή χλωροφύλλη- α, ο ολικός φώσφορος και το βάθος Secchi. Από τις τρεις αυτές, η επιφανειακή χλωροφύλλη-α δίνει ίσως τα πιο ακριβή αποτελέσματα, καθώς αποτελεί τον πιο ακριβή δείκτη εκτίμησης της βιομάζας. Ο φώσφορος αποτελεί μια πιο ακριβή εκτίμηση της τροφικής κατάστασης ενός υδάτινου σώματος τη θερινή περίοδο από ότι η χλωροφύλλη. Τέλος, το βάθος Secchi είναι πιθανώς ο λιγότερο ακριβής δείκτης, αλλά επίσης και ο πιο εύκολος στη μέτρηση. Συνεπώς τα προγράμματα παρακολούθησης χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο το βάθος Secchi. Μεταφράζοντας τις τιμές διαφάνειας Secchi σε μία λογαριθμική κλίμακα με βάση το 2,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

κάθε διαδοχικός διπλασιασμός της βιομάζας αντιπροσωπεύεται από έναν ακέραιο αριθμό- δείκτη σύμφωνα με την εξίσωση:

Μία λίμνη συνήθως κατατάσσεται σύμφωνα με τρείς διαφορετικές κατηγορίες που είναι η ολιγοτροφική, η μεσοτροφική και η ευτροφική. Λίμνες με ακραίους τροφικούς δείκτες μπορούν να θεωρηθούν ως υπερευτροφικές (Πίνακας 4.15).

Μία **ολιγοτροφική** λίμνη είναι μία λίμνη με χαμηλή πρωτογενή παραγωγικότητα και είναι αποτέλεσμα χαμηλής συγκέντρωσης σε θρεπτικά. Οι λίμνες αυτές παρουσιάζουν μικρή ανάπτυξη άλγεων, και κατά συνέπεια, έχουν συχνά πολύ διαυγή νερά και υψηλής ποιότητας πόσιμο νερό. Τα νερά του πυθμένα τέτοιων λιμνών έχουν συνήθως αρκετό οξυγόνο και έτσι μπορούν να αναπτυχθούν πολλά είδη ψαριών, όπως οι πέστροφες λίμνης, οι οποίες απαιτούν κρύο, καλά οξυγονωμένο, νερό.

Οι οικολόγοι χρησιμοποιούν τον όρο ολιγοτροφική για να διακρίνουν τις μη παραγωγικές λίμνες , οι οποίες χαρακτηρίζονται από ανεπάρκεια θρεπτικών, από τις παραγωγικές ευτροφικές λίμνες με περίσσεια θρεπτικών. Οι ολιγοτροφικές λίμνες συναντώνται πιο συχνά σε ψυχρές περιοχές.

Οι **μεσοτροφικές** λίμνες παρουσιάζουν ενδιάμεση παραγωγικότητα. Αυτές οι λίμνες χαρακτηρίζονται από διαυγή ύδατα, από βυθισμένα υδρόβια φυτά και από μέσου επιπέδου θρεπτικά.

Ένα **ευτροφικό** υδάτινο σώμα, συνήθως μια λίμνη, παρουσιάζει υψηλή βιολογική παραγωγικότητα. Λόγω των υπερβολικών συγκεντρώσεων με θρεπτικά, κυρίως αζώτου και φωσφόρου, αυτά τα υδάτινα σώματα είναι σε θέση να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των υδρόβιων φυτών. Συνήθως τα ύδατα κυριαρχούνται είτε από υδρόβια φυτά είτε από άλγεις. Όταν κυριαρχούν τα υδρόβια φυτά, το νερό τείνει να είναι διαυγές. Όταν κυριαρχούν οι άλγεις το νερό τείνει να είναι θολερό. Οι άλγεις εμπλέκονται στη φωτοσύνθεση, η οποία προμηθεύει με οξυγόνο τα ψάρια και τους βιοτικούς παράγοντες που ζουν σε αυτά τα νερά. Περιστασιακά λαμβάνει χώρα μια υπερβολική άνθιση των άλγεων και έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση των ψαριών λόγω των συνθηκών έλλειψης οξυγόνου από την αναπνοή των άλγεων και των βακτηρίων του πυθμένα. Η κατάσταση του ευτροφισμού μπορεί να επέλθει με φυσικό τρόπο, άλλα και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και παρεμβάσεις

Οι **υπερευτροφικές** λίμνες είναι πλούσιες σε θρεπτικά και χαρακτηρίζονται από συχνή και υπερβολική άνθιση των άλγεων και από χαμηλή διαφάνεια. Η υπερβολική ανάπτυξη των άλγεων μπορεί να μειώσει σημαντικά τα επίπεδα οξυγόνου και αν αποτρέψει την ύπαρξη ζωντανών οργανισμών σε μεγαλύτερα βάθη, δημιουργώντας νεκρές ζώνες κάτω από την επιφάνεια.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μία αντιστοιχία των τιμών TSI με τις αντίστοιχες του βάθους Secchi της επιφανειακής χλωροφύλλης-α και του επιφανειακού φωσφόρου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Πίνακας 4.14: ενδεικτικές τιμές TSI και αντιστοιχίες τους στο βάθος Secchi, την επιφανειακή χλωροφύλλη-α και τον επιφανειακό φώσφορο

TSI	βάθος Secchi (m)	επιφανειακή χλωροφύλλη-α (mg/m^3)	επιφανειακός φώσφορος (mg/m^3)
0	64	0.04	0.75
10	32	0.12	1.5
20	16	0.34	3
30	8	0.94	6
40	4	2.6	12
50	2	6.4	24
60	1	20	48
70	0.5	56	96
80	0.25	154	192
90	0.12	427	384
100	0.062	1183	768

Πίνακας 4.15: κατάταξη μιας λίμνης στις τέσσερις κλάσεις τροφικής κατάστασης

TSI	βάθος Secchi (m)	επιφανειακή χλωροφύλλη-α (mg/m^3)	επιφανειακός φώσφορος (mg/m^3)	τροφική κλάση
<30-40	>8-4	<30-40	0-12	ολιγοτροφική
40-50	4-2	40-50	12-24	μεσοτροφική
50-70	2-0.5	50-70	24-96	ευτροφική
70-100+	0.5-<0.25	70-100+	96-384+	υπερευτροφική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο η επίδραση του χρόνου παραμονής του νερού της λίμνης στην τροφική της κατάσταση. Το μέγεθος του χρόνου παραμονής εισάγεται εμμέσως στον προσομοιωτή PCLake, μέσω της εισαγωγής διαφορετικών υδραυλικών παροχών εισόδου (Εξίσωση 5.2). Σε κάθε περίπτωση, η στάθμη της λίμνης παραμένει σταθερή, ανεξαρτήτως παροχής εισόδου, πράγμα που σημαίνει ότι η παροχή εξόδου είναι ίση με την παροχή εισόδου (Εξίσωση 5.1). Η εκάστοτε παροχή εξόδου, άρα, λειτουργεί πλεονασματικά, δηλαδή αποτελεί αξιοποιήσιμο υδατικό όγκο, προς άρδευση ή οποιαδήποτε άλλη χρήση. Άλλωστε μεταξύ των σκοπιμοτήτων του ταμιευτήρα κύρια είναι η άρδευση των αγροτικών περιοχών στην παρακείμενη περιοχή.

$$Q_{in} = Q_{out} \tag{5.1}$$

όπου Q_{in}, η συνολική παροχή εισόδου του νερού συμπεριλαμβανομένης της βροχόπτωσης, της εισόδου του Πηνειού και των στραγγιδίων

όπου Q_{out}, η παροχή εξόδου του νερού προς εκμετάλλευση.

$$\tau = \frac{E(h)*h}{Q_{in}} \tag{5.2}$$

Όπου τ, ο χρόνος παραμονής

h, το μέσο βάθος λίμνης

E(h), η επιφάνεια της λίμνης συναρτήσει του μέσου βάθους.

Ο χρόνος παραμονής της λίμνης αναμένεται να αποτελεί καθοριστικό μέγεθος για την τροφική κατάσταση της λίμνης. Συγκεκριμένα, η ενεργοποίηση των εκροών αποτελεί μία από τις δύο βασικές προτάσεις βελτίωσης της τροφικής κατάστασης της λίμνης (Κάγκαλου, κ.α., 2012). Οι περισσότεροι μηχανισμοί επικράτησης των άλγεων έναντι της βλάστησης, απαιτούν υψηλό χρόνο παραμονής ώστε να ενεργοποιηθούν, όπως η καθίζηση των θρεπτικών.

Εξετάζονται διάφοροι χρόνοι παραμονής, που αντιστοιχούν σε παροχές εισόδου-εξόδου από 12 mm/d έως 32 mm/d (Πίνακας 5.1). Οι παραπάνω παροχές εξετάζονται για τα σενάρια της χαμηλής και μέσης στάθμης. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 1 οι χρόνοι παραμονής κυμαίνονται από 125 έως 47 ημέρες για τη χαμηλή στάθμη και από 292 έως 109 ημέρες για τη μέση στάθμη, για ειδικές παροχές από 12mm/d έως 32 mm/d αντίστοιχα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Πίνακας 5.1: αντιστοιχία ειδικών παροχών με χρόνους παραμονής για χαμηλή και μέση στάθμη

q_{in} (mm/d)	Q_{in} για 1.5m (m^3/d)	Q_{in} για 3.5m (m^3/d)	τ για 1.5m (d)	τ για 3.5m (d)
12	362400	832800	125	292
13	392600	902200	115	269
14	422800	971600	107	250
15	453000	1041000	100	233
16	483200	1110400	94	219
17	513400	1179800	88	206
18	543600	1249200	83	194
19	573800	1318600	79	184
20	604000	1388000	75	175
21	634200	1457400	71	167
22	664400	1526800	68	159
23	694600	1596200	65	152
24	724800	1665600	63	146
25	755000	1735000	60	140
26	785200	1804400	58	135
27	815400	1873800	56	130
28	845600	1943200	54	125
29	875800	2012600	52	121
30	906000	2082000	50	117
31	936200	2151400	48	113
32	966400	2220800	47	109

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

5.1 Τάσεις φυσικών μεγεθών της λίμνης για την διάρκεια ενός τυπικού έτους για 12, 18, 26 και 32 mm/d και χαμηλή στάθμη λίμνης

Για να αναδειχθεί ο ρόλος της υδραυλικής παροχής εισόδου στη διάρκεια ενός ολόκληρου τυπικού έτους, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα των τάσεων σημαντικών μεγεθών της λίμνης, για τέσσερεις διαφορετικές υδραυλικές παροχές εισόδου, 12, 18, 26 και 32 mm/d, που αφορούν στο πέμπτο έτος προσομοίωσης, καθώς σε αυτό το έτος θεωρείται ότι έχουν σταθεροποιηθεί οι τάσεις κι έχει εξαλειφθεί το σφάλμα που εισάγουν οι πιθανώς ανακριβείς αρχικές τιμές εισόδου. (Διαγράμματα 5.1 έως 5.16)

Το σύνολο των ψαριών φαίνεται ότι επηρεάζεται σημαντικά από την υδραυλική παροχή εισόδου. ενώ για μεγαλύτερες τιμές παροχών, αλλάζει ακόμη και η μορφή της καμπύλης. Τους θερινούς μήνες, για τις μεγαλύτερες παροχές, σχεδόν διπλασιάζεται το σύνολο των ψαριών, ενώ για μικρότερες παροχές, υπάρχει μικρότερη αύξηση. Ο κυρίως όγκος του συνόλου των ψαριών αποτελείται από τα μικρά και μεγάλα ψάρια και πολύ λιγότερο από τα αρπακτικά. Στην αρχή του έτους τα μεγάλα ψάρια υπερέχουν συγκριτικά με τα μικρά, ενώ από τον Απρίλιο και μετά τα μικρά ξεπερνούν και σταδιακά (θερινή περίοδος) αποκτούν πολύ μεγαλύτερη μάζα από τα μεγάλα. Αυτό οφείλεται στην θνησιμότητα των μεγάλων αφενός, στην ανάπτυξη των μικρών αφετέρου. Με το τέλος του καλοκαιριού παρατηρείται μείωση των μικρών ψαριών κι επαναφορά στα αρχικά επίπεδα. Η μείωση αυτή συμπίπτει χρονικά με την αύξηση του επιπέδου της τροφικής κατάστασης TSI. (Διαγράμματα 5.1 έως 5.4 και 5.16)

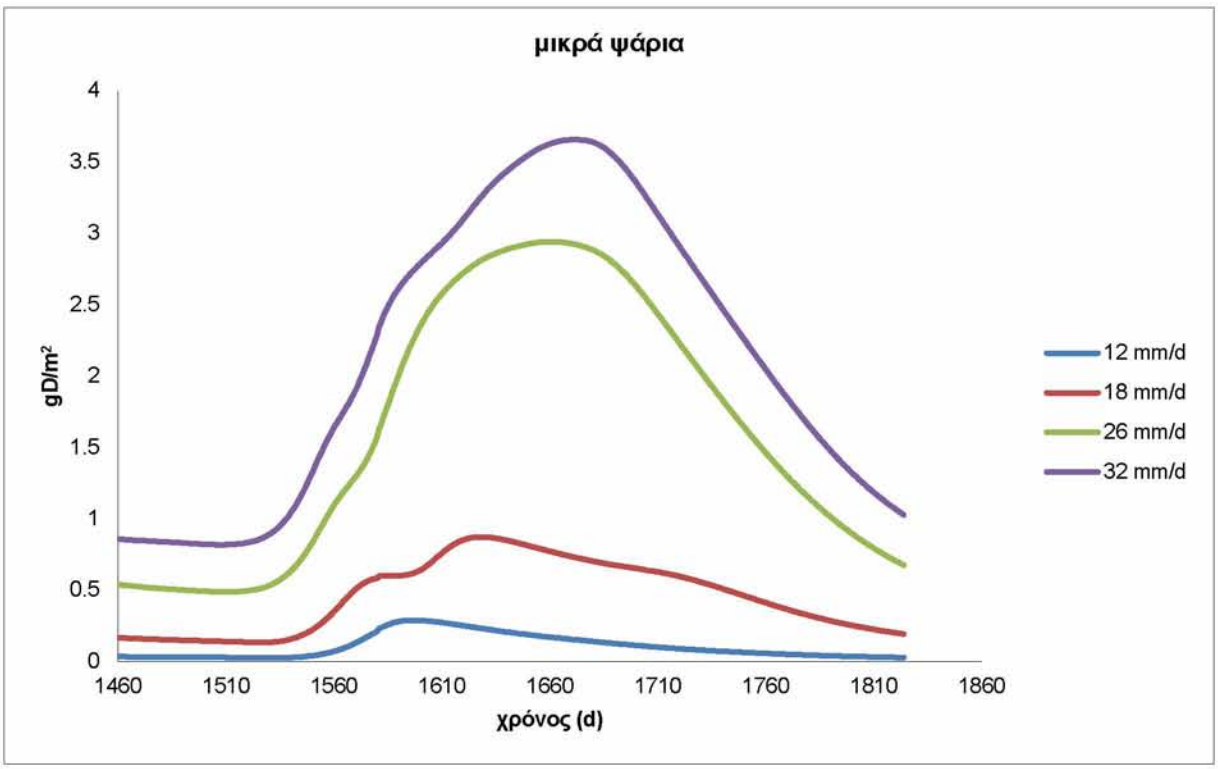
Το διαλυμένο οξυγόνο διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ τους θερινούς μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην κατανάλωσή του από τους οργανισμούς που αυξάνονται κατά τους θερινούς μήνες. Η βυθισμένη βλάστηση έχει υψηλά επίπεδα την άνοιξη, ενώ κατά το καλοκαίρι υποχωρεί παραχωρώντας την κυριαρχία στην χλωροφύλλη-α. Το βάθος Secchi ακολουθεί αντίστροφη πορεία από την χλωροφύλλη-α, όπως είναι φυσικό. (Διαγράμματα 5.5 έως 5.8)

Η χλωροφύλλη-α προέρχεται κυρίως από τα κυανοβακτήρια, λιγότερο από τα διάτομα και σε πολύ μικρότερο ποσοστό από τις υπόλοιπες μικρές βρώσιμες άλγεις. Σε όλες τις περιπτώσεις καθώς και στην συνολική χλωροφύλλη-α, η υδραυλική παροχή εισόδου επηρεάζει αρκετά τα επίπεδά της, κυρίως τους θερινούς μήνες, που πλέον ξεκάθαρα η αύξηση της παροχής εισόδου, οδηγεί σε μείωση της χλωροφύλλης-α. Τους υπόλοιπους μήνες επικρατεί μία πιο άναρχη κατάσταση, ειδικά στα κυανοβακτήρια και τα διάτομα, χωρίς να υπάρχει συσχέτιση των δύο μεγεθών σε τόσο εμφανή βαθμό, όσο στο καλοκαίρι. (Διαγράμματα 5.8 έως 5.11)

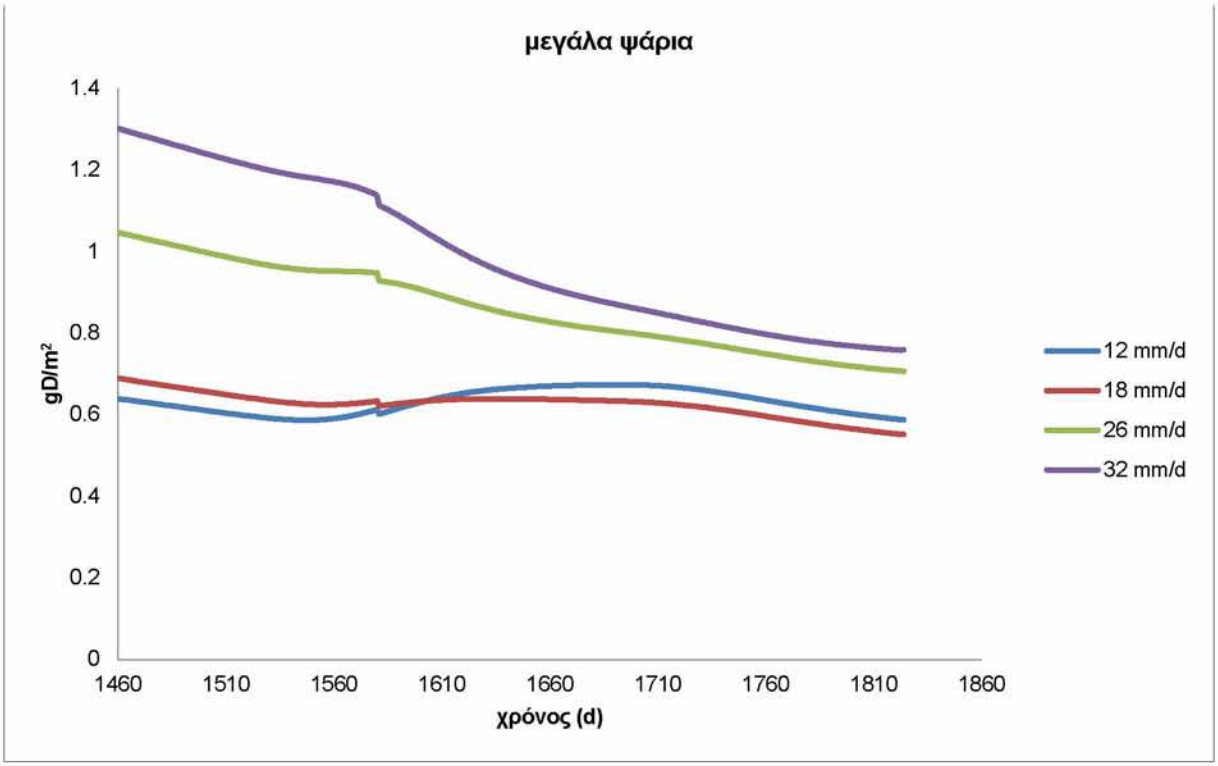
Οι αζωτούχες και φωσφορικές ενώσεις επηρεάζονται αρνητικά από την αύξηση της παροχής, όπως είναι λογικό, καθώς μεγαλύτερη παροχή εισόδου, αφενός «ξεπλένει» περισσότερο τις διαλυμένες χημικές ουσίες του νερού (νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά ιόντα), αφετέρου καταστέλλει τις διεργασίες του ευτροφισμού (οργανικό άζωτο, μέρος του ΤΚΝ). Στην διάρκεια του έτους τα νιτρικά και φωσφορικά ιόντα αρχικά αυξάνονται έως την αρχή του καλοκαιριού κι έπειτα μειώνονται, με μία κάποια υστέρηση των φωσφορικών έναντι των νιτρικών. Το ΤΚΝ αυξάνεται όταν μειώνονται τα νιτρικά και φωσφορικά, όταν δηλαδή αρχίζει η διαδικασία της κατανάλωσης των θρεπτικών από τους οργανισμούς. Ακολουθεί το τελευταίο την τάση της χλωροφύλλης-α. (Διαγράμματα 5.12 έως 5.15)

Η τροφική κατάσταση της λίμνης εκφρασμένη σε TSI ακολουθεί περίπου την τάση της χλωροφύλλης-α. Όπως είναι αναμενόμενο, για μεγαλύτερες παροχές εισόδου, μικρούς χρόνους παραμονής και άρα γρήγορο ξέπλυμα του νερού της λίμνης, η τροφική κατάστασή της βελτιώνεται αισθητά. Με την μέγιστη παροχή που ελέγχεται, ακραία και μη εφικτή περίπτωση, η τροφική κατάσταση βελτιώνεται στην τάξη της μείωσης βαθμών TSI κατά 10 % περίπου, πάντα παραμένοντας πάνω από το όριο των 70 βαθμών. Αυτό σημαίνει ότι στο δεδομένο χαμηλό βάθος της λίμνης και χωρίς άλλα μέτρα διαχείρισης, δεν είναι δυνατόν να αναβαθμιστεί η κατηγορία της λίμνης από υπερευτροφική σε ευτροφική, ωστόσο μπορεί να βελτιωθεί αισθητά.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

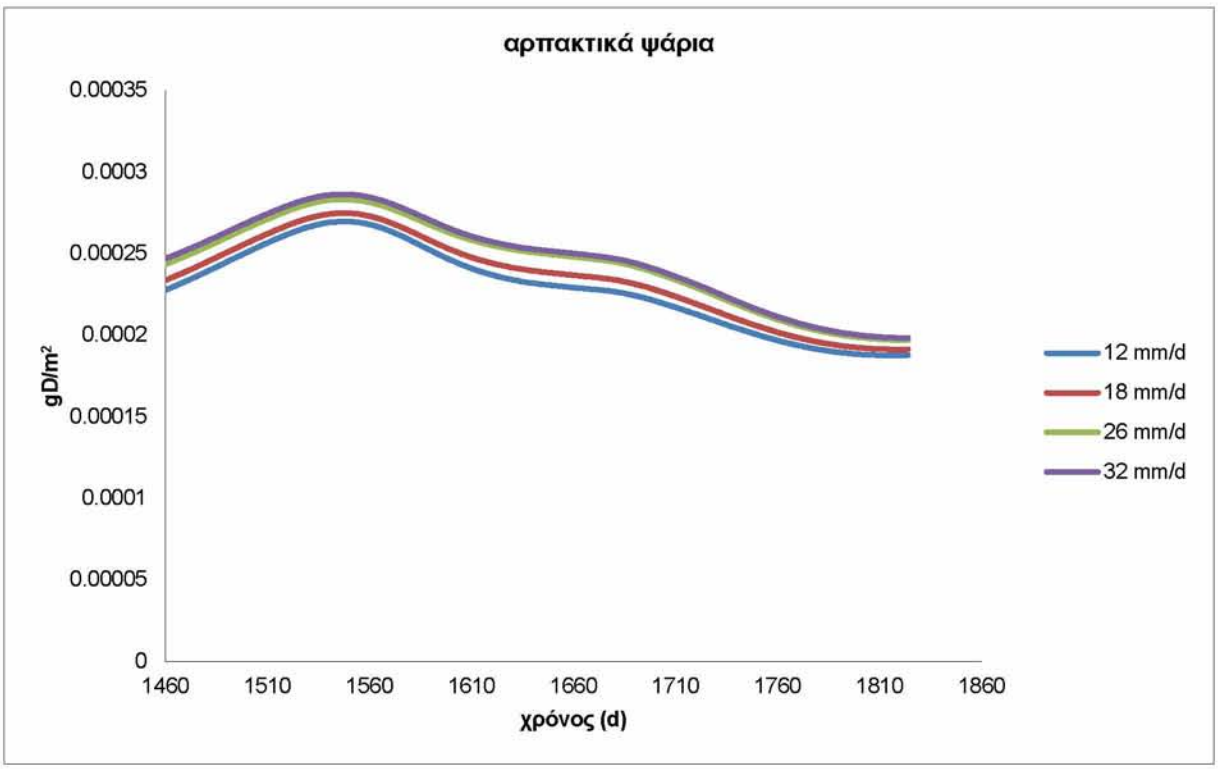


Διάγραμμα 5.2 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

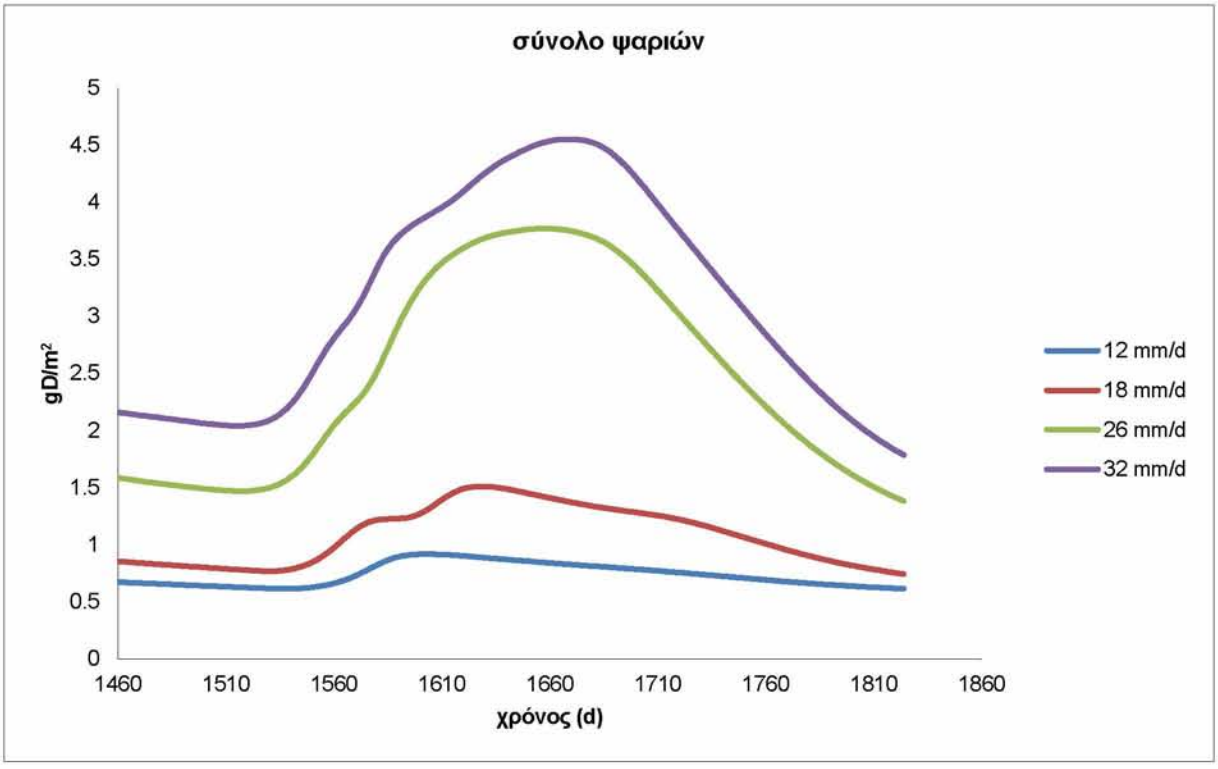


Διάγραμμα 5.3 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

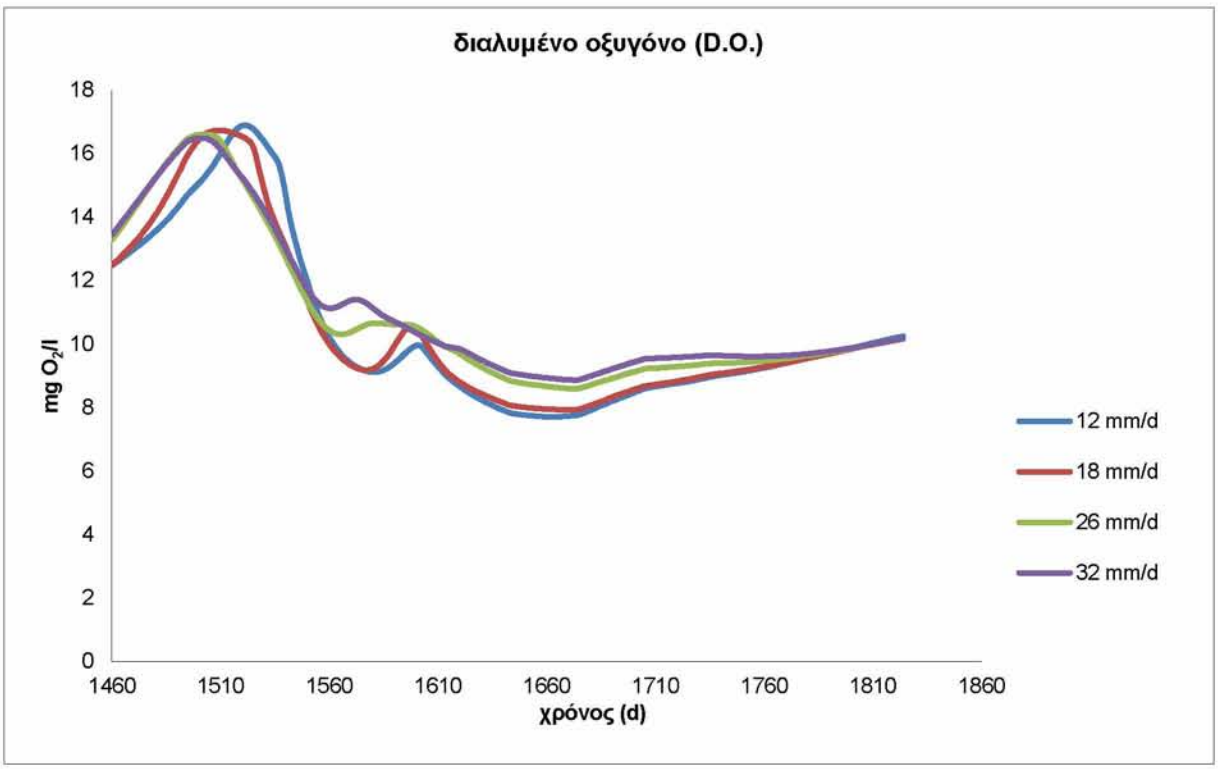


Διάγραμμα 5.4: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

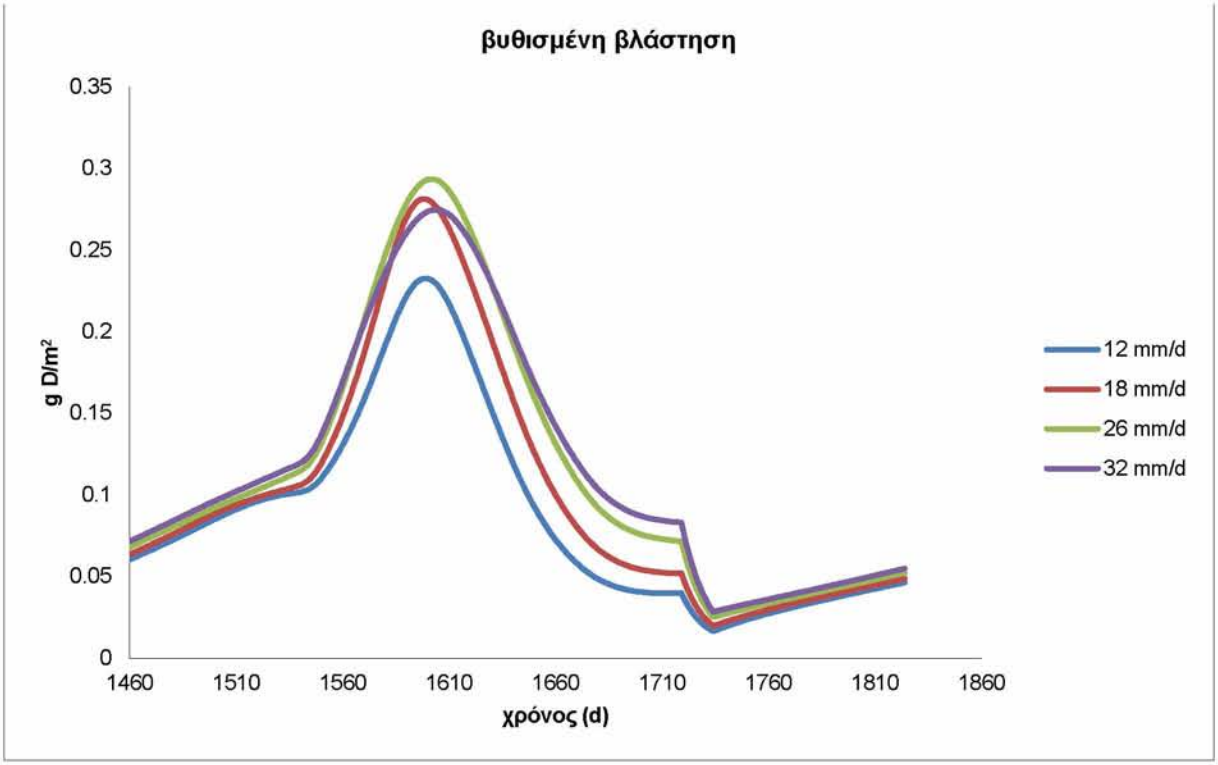


Διάγραμμα 5.5: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

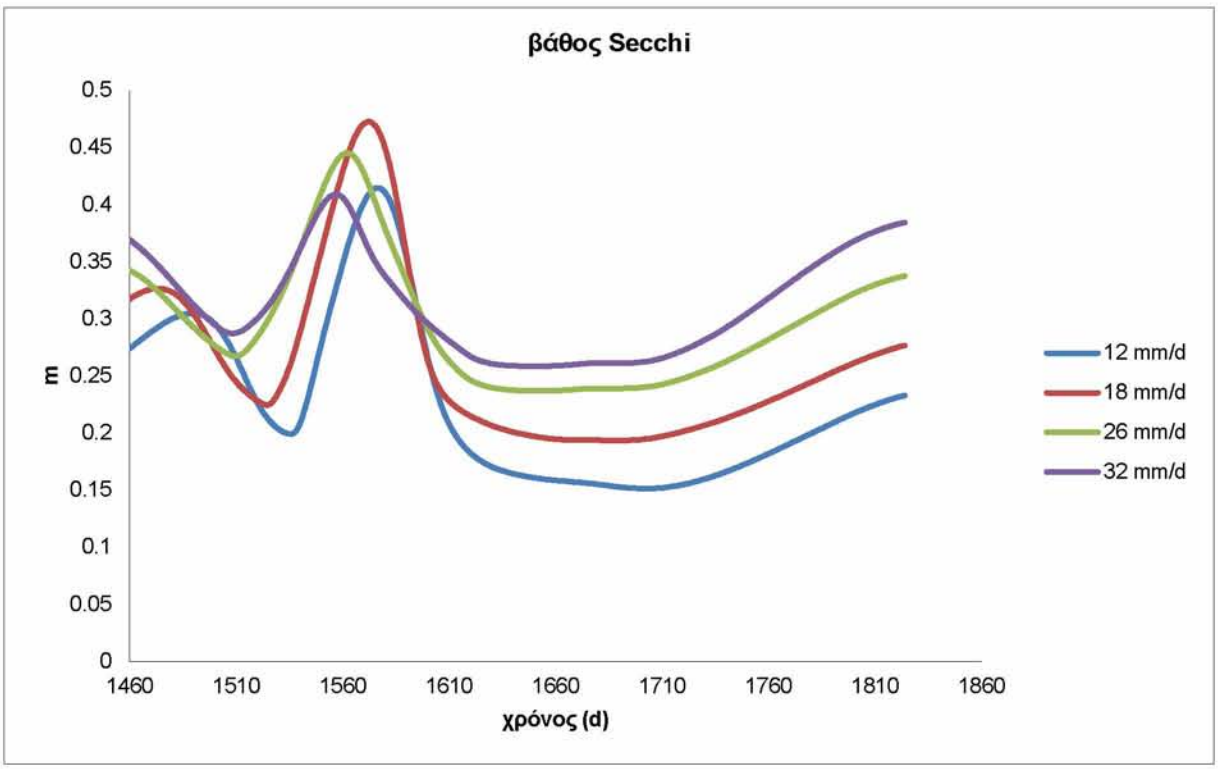


Διάγραμμα 5.6: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

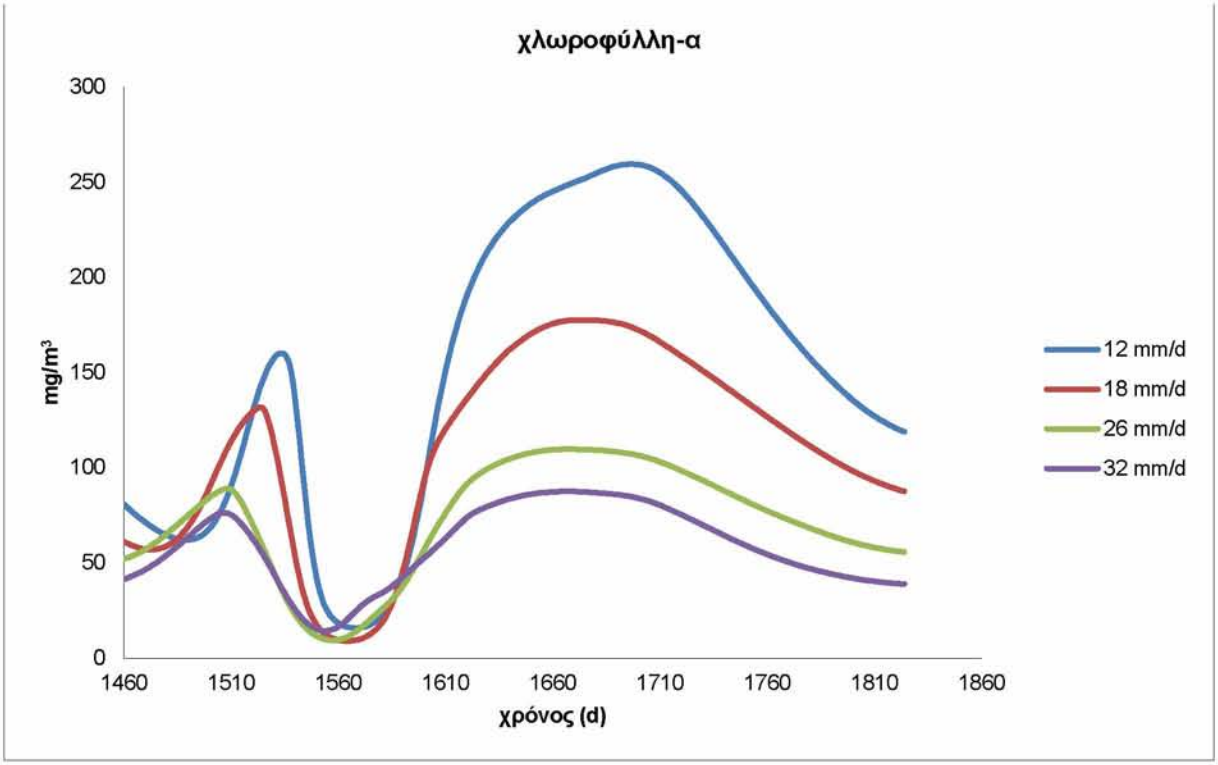


Διάγραμμα 5.7: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

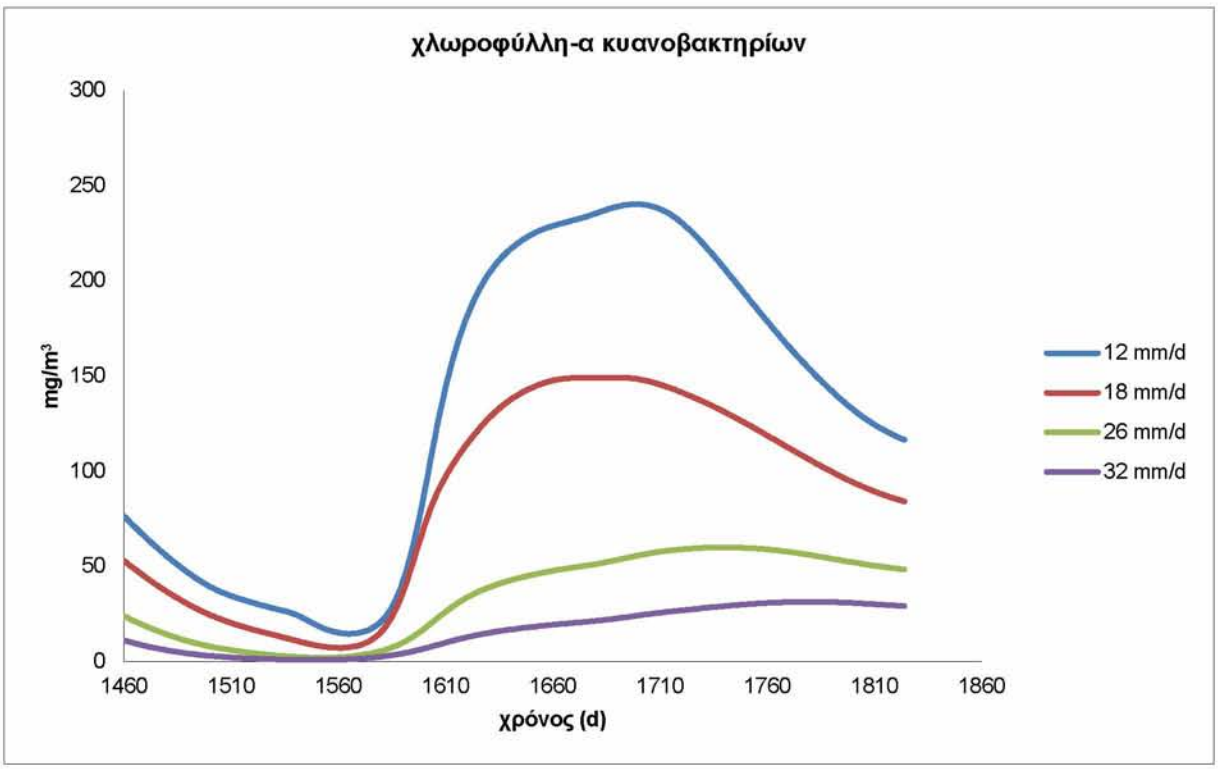


Διάγραμμα 5.8: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

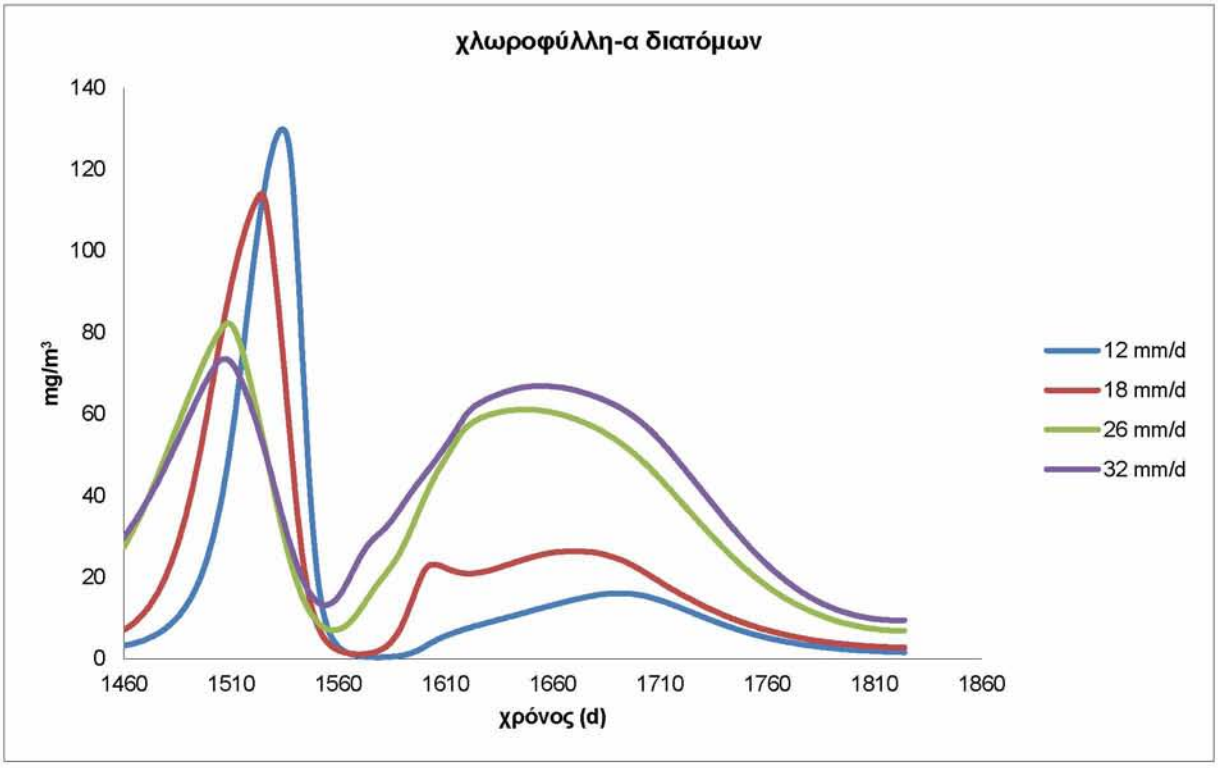


Διάγραμμα 5.9: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

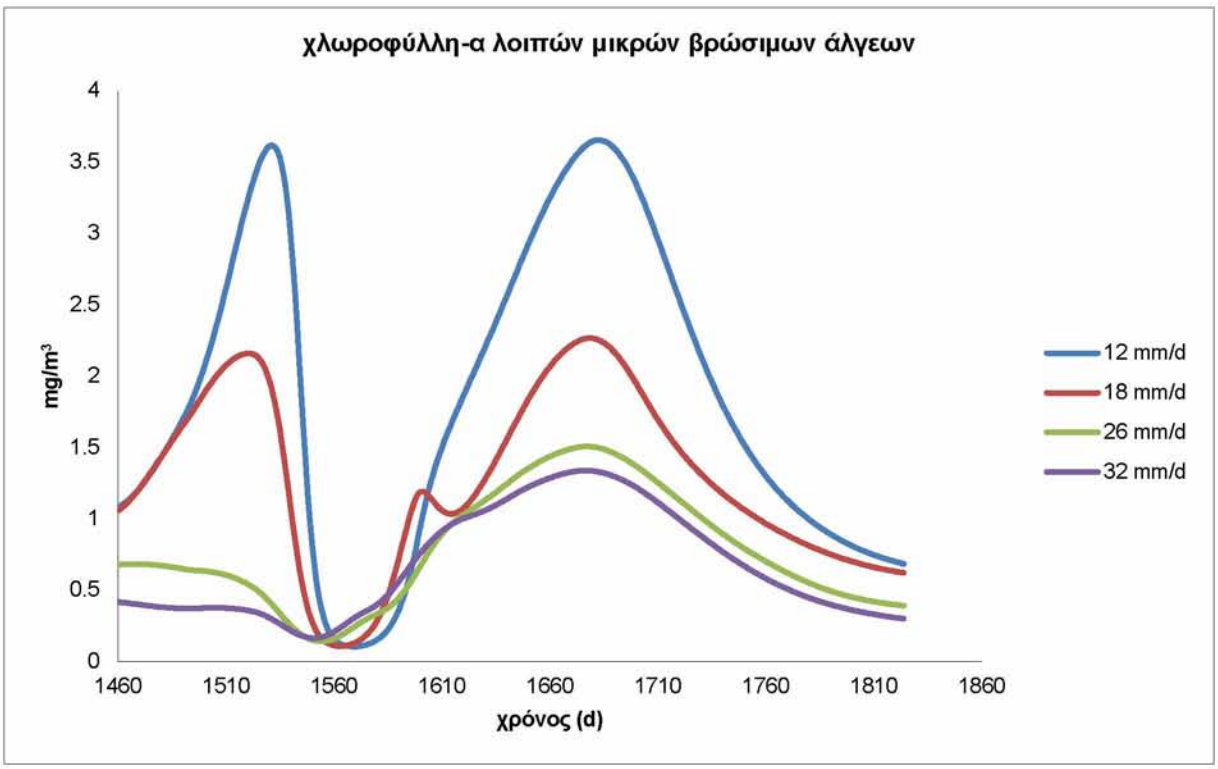


Διάγραμμα 5.10: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

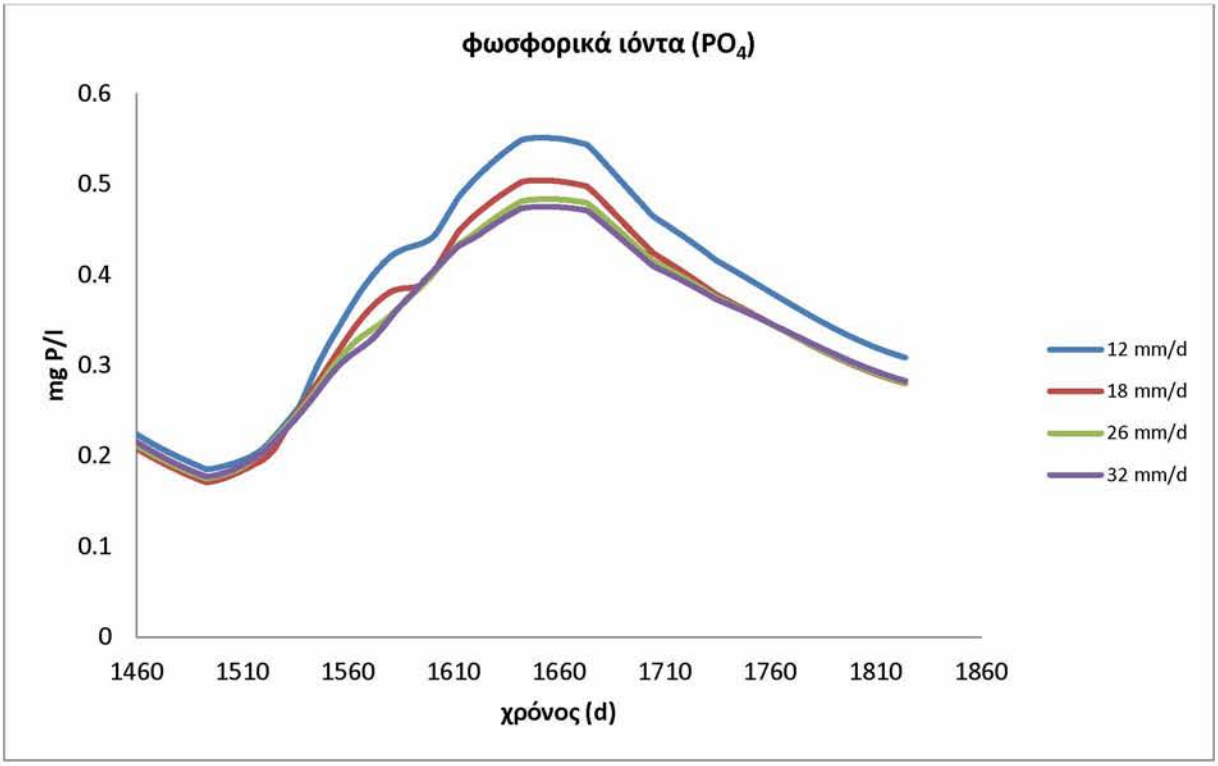


Διάγραμμα 5.11: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

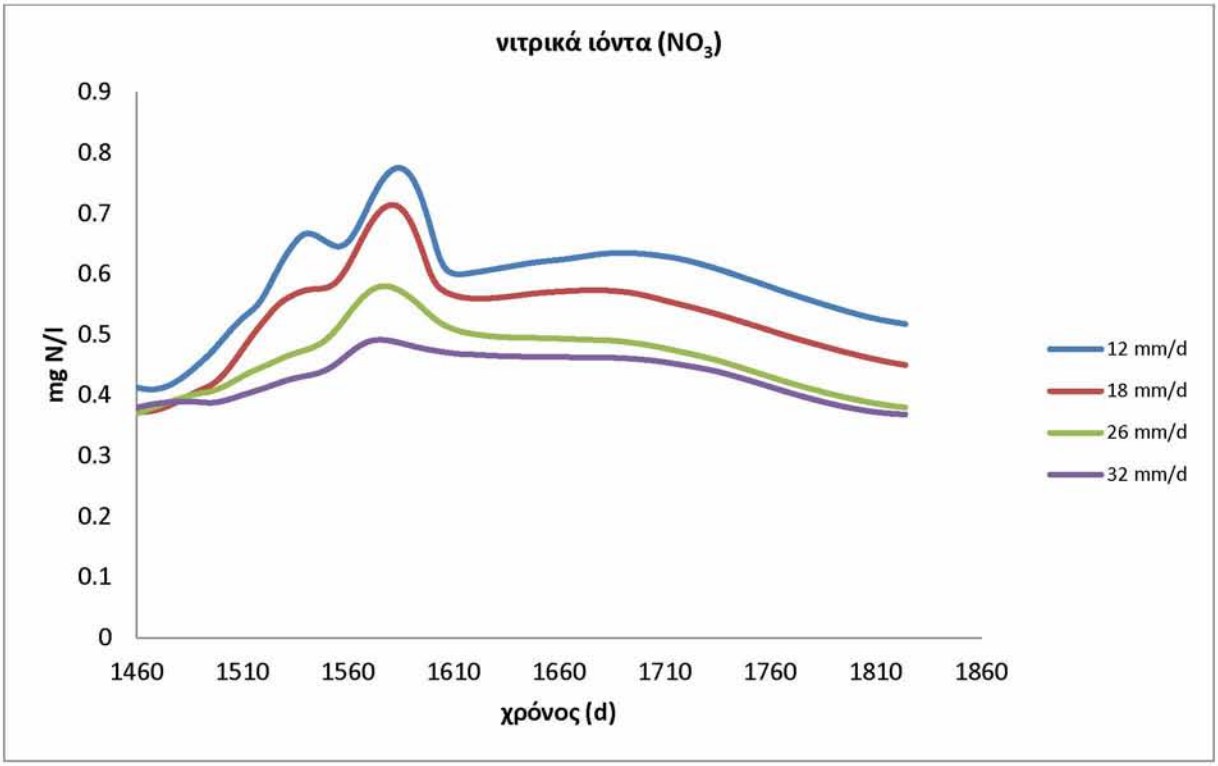


Διάγραμμα 5.12: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

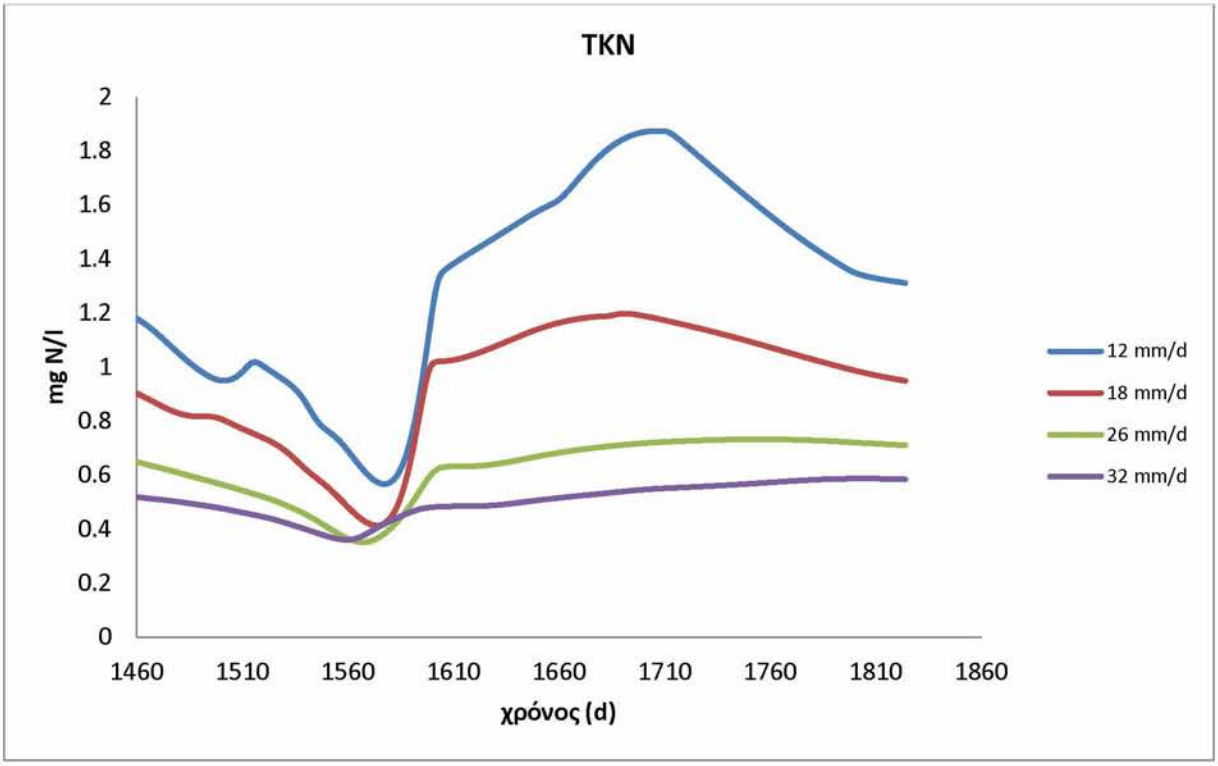


Διάγραμμα 5.13: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

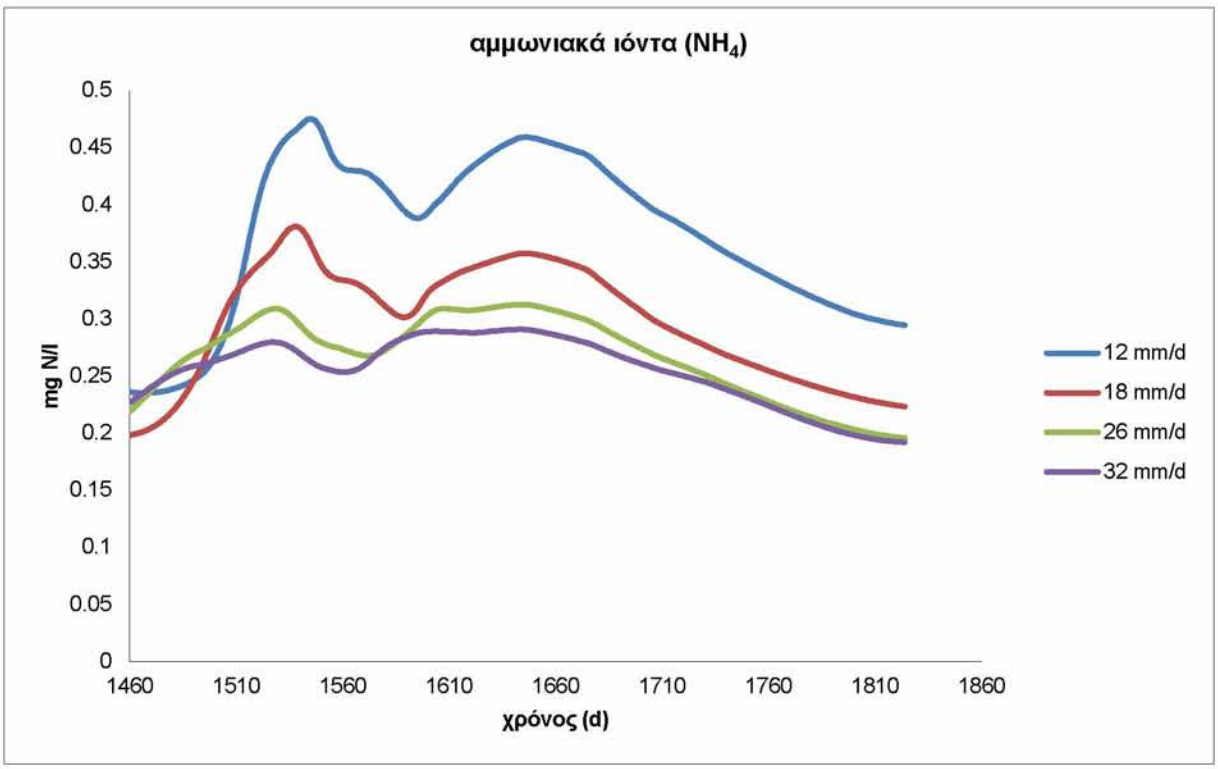


Διάγραμμα 5.14: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

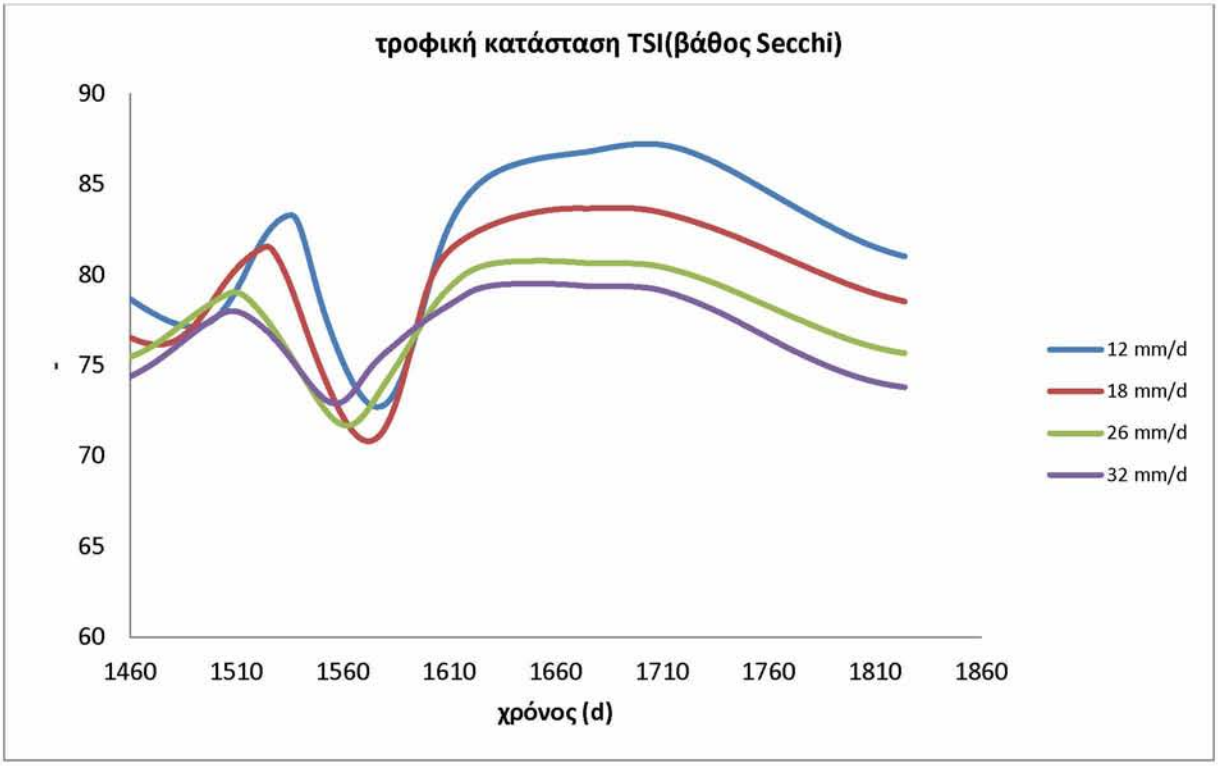


Διάγραμμα 5.15: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 5.16: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη



Διάγραμμα 5.17: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για χαμηλή στάθμη

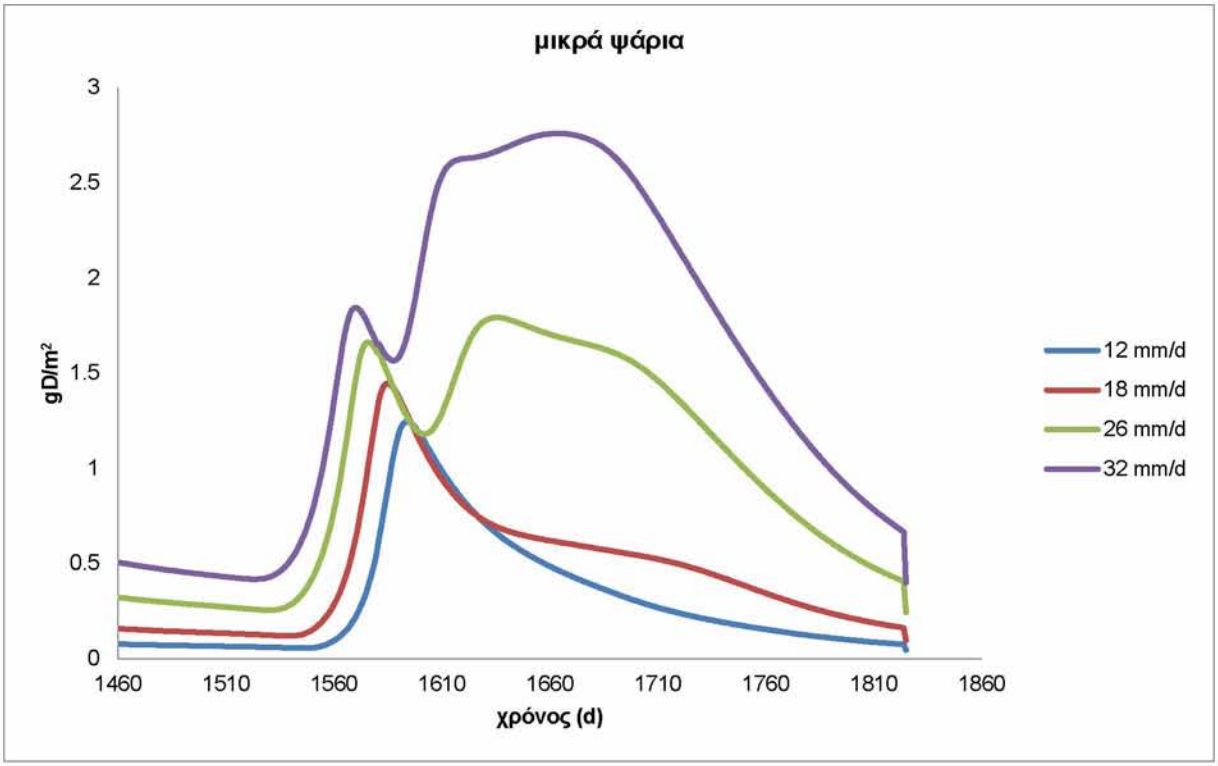
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

5.2 Τάσεις φυσικών μεγεθών της λίμνης για την διάρκεια ενός τυπικού έτους για 12, 18, 26 και 32 mm/d και μέση στάθμη λίμνης

Για μέση στάθμη λίμνης 3.5 m είναι εμφανής η εντυπωσιακή βελτίωση της λίμνης, σε όλα τα επίπεδα. Όσον αφορά στα ψάρια υπάρχει κάποια μείωση μικρής τάξης σε όλα τα υποσύνολα. Είναι αξιοσημείωτο, ότι για μικρές παροχές εισόδου τα ψάρια εμφανίζουν ένα πρώιμο ανοιξιάτικο μέγιστο κι έπειτα ακολουθούν πτωτική τάση μέχρι το τέλος της χρονιάς, ενώ για μεγαλύτερες παροχές ακολουθεί ένα δεύτερο θερινό μέγιστο σχεδόν διπλάσιο του ανοιξιάτικου. Παρατηρείται, επίσης ότι, αυτό το θερινό μέγιστο, έχει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια για λίμνη μέσης στάθμης παρά για χαμηλής στάθμης, που η μάζα των ψαριών υποχωρεί πιο απότομα σε μικρά επίπεδα. Τα αρπακτικά ψάρια δεν παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις και δεν διαφέρουν για διαφορετικές παροχές. (Διαγράμματα 5.17 έως 5.20)

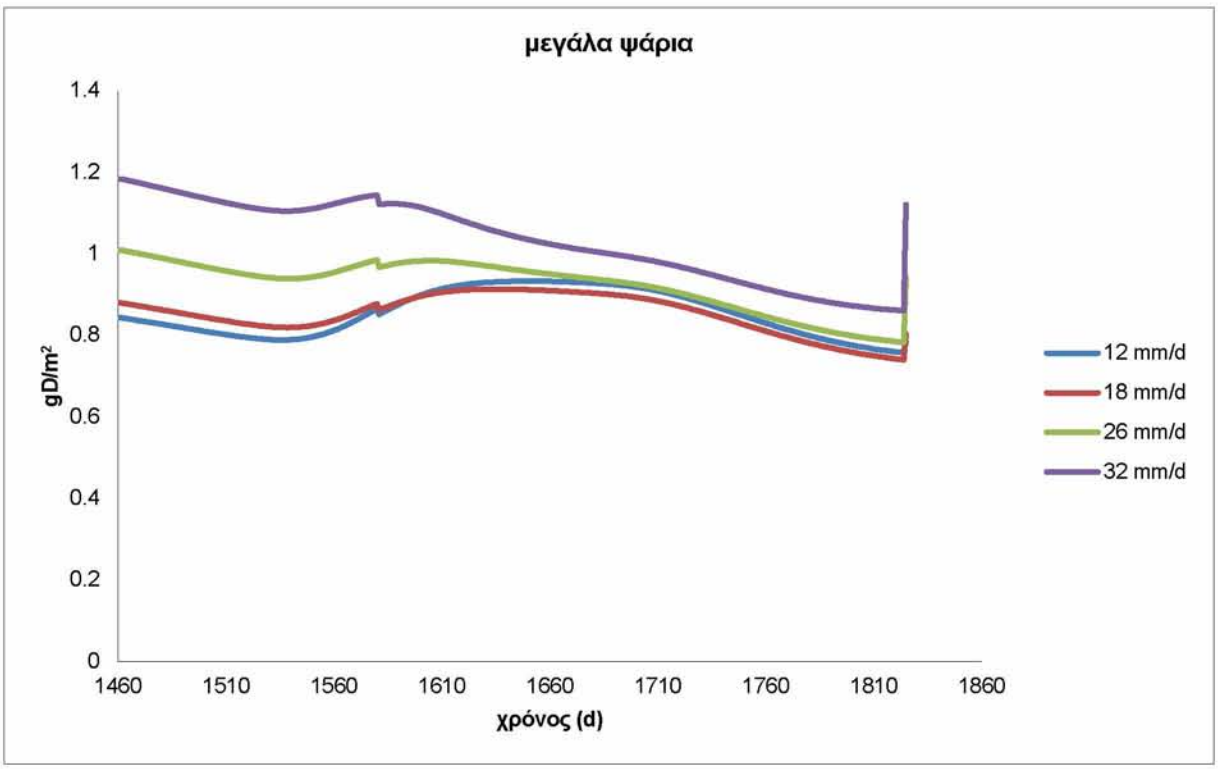
Η βυθισμένη βλάστηση παρουσιάζει διαφορές μόνο στους ανοιξιάτικες μήνες για διαφορετικές παροχές. Η βλάστηση μειώνεται για μέση στάθμη στο μισό σε σχέση με αυτή της χαμηλής στάθμης. Τον υπόλοιπο χρόνο τα διαγράμματα ταυτίζονται. Η χλωροφύλλη-α, και ο Secchi εμφανίζουν τις τάσεις που περιγράφονται στην παράγραφο 5.3, αλλά με πολύ καλύτερα επίπεδα, ως προς την τροφική κατάσταση. Η χλωροφύλλη-α όπως και η βλάστηση υποδιπλασιάζεται για τη μέση στάθμη σε σχέση με την χαμηλή. (Διαγράμματα 5.22 έως 5.26)

Τα υπόλοιπα μεγέθη ακολουθούν τις αναμενόμενες αυξομειώσεις, που βασίζονται κυρίως στην αραίωση λόγω περισσότερου όγκου νερού στην δεύτερη περίπτωση. Η τροφική κατάσταση εμφανίζει μικρότερα επίπεδα βαθμών TSI, μάλιστα για αρκετούς μήνες πέφτει κάτω από το όριο των εβδομήντα. Για μεγαλύτερες παροχές πέφτει περισσότερο. (Διάγραμμα 5.32)

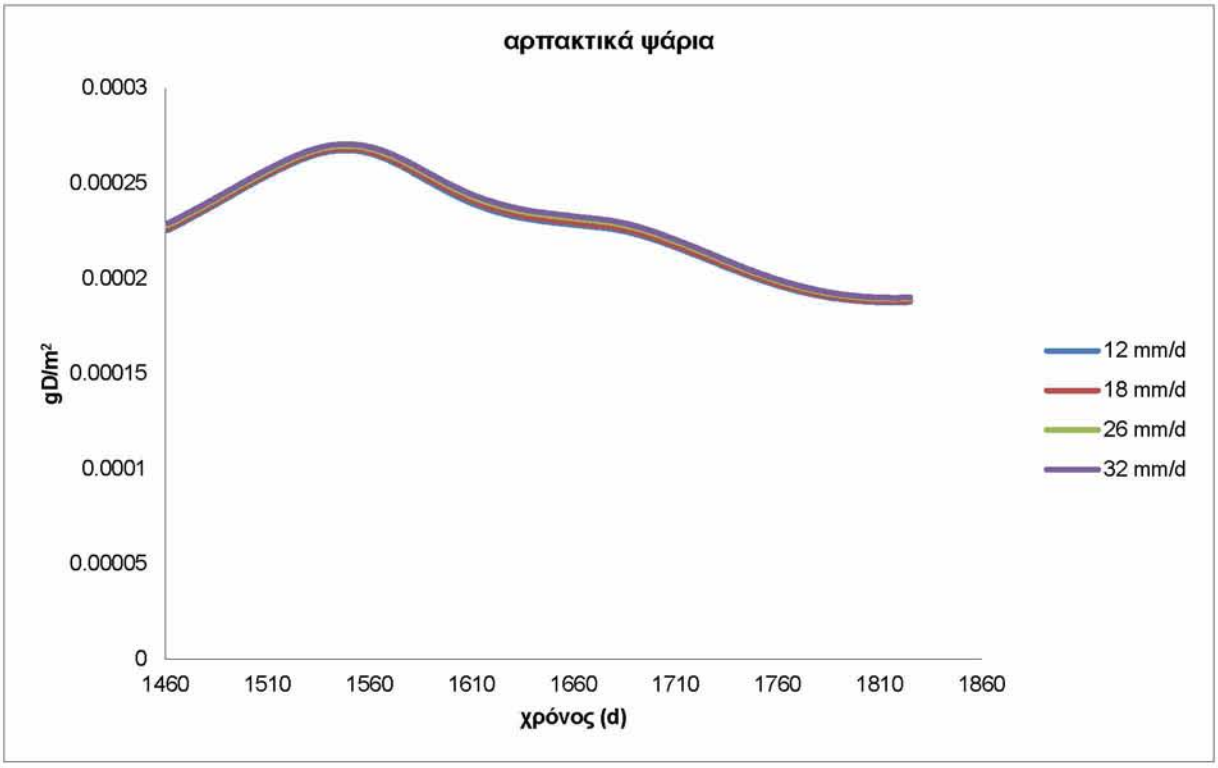


Διάγραμμα 5.18: μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

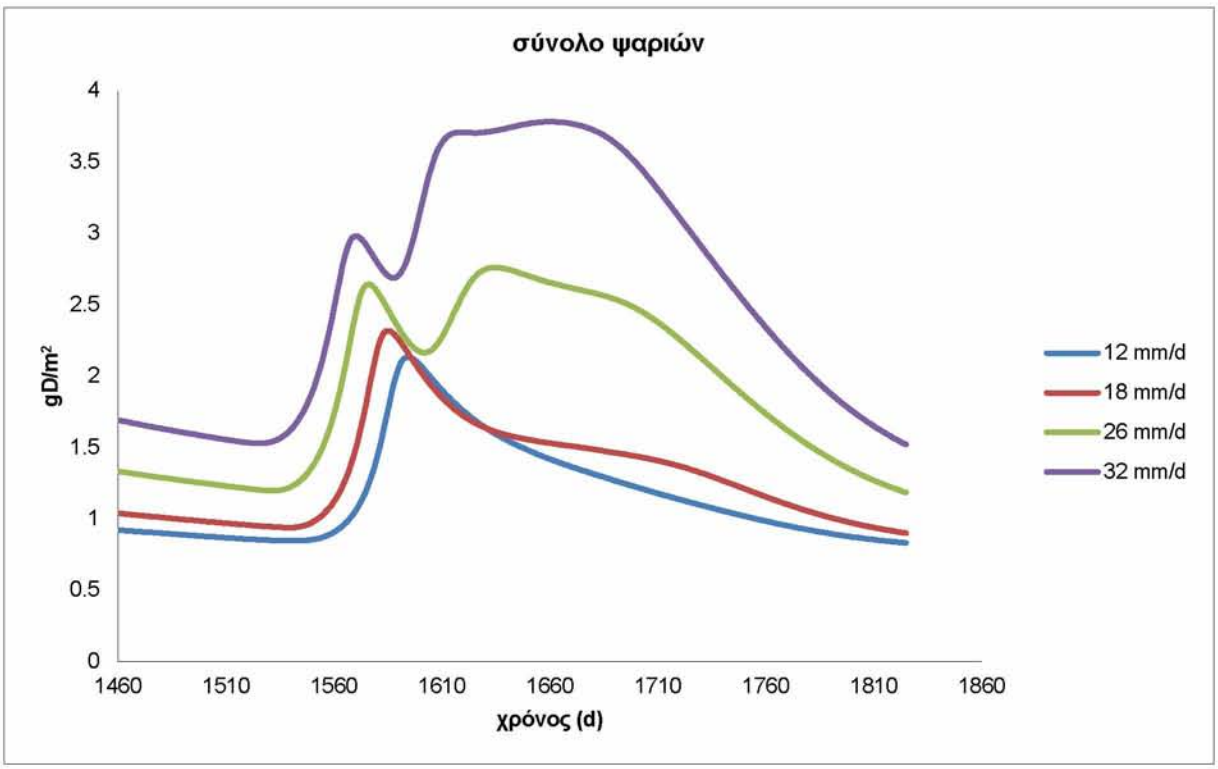


Διάγραμμα 5. 19: μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

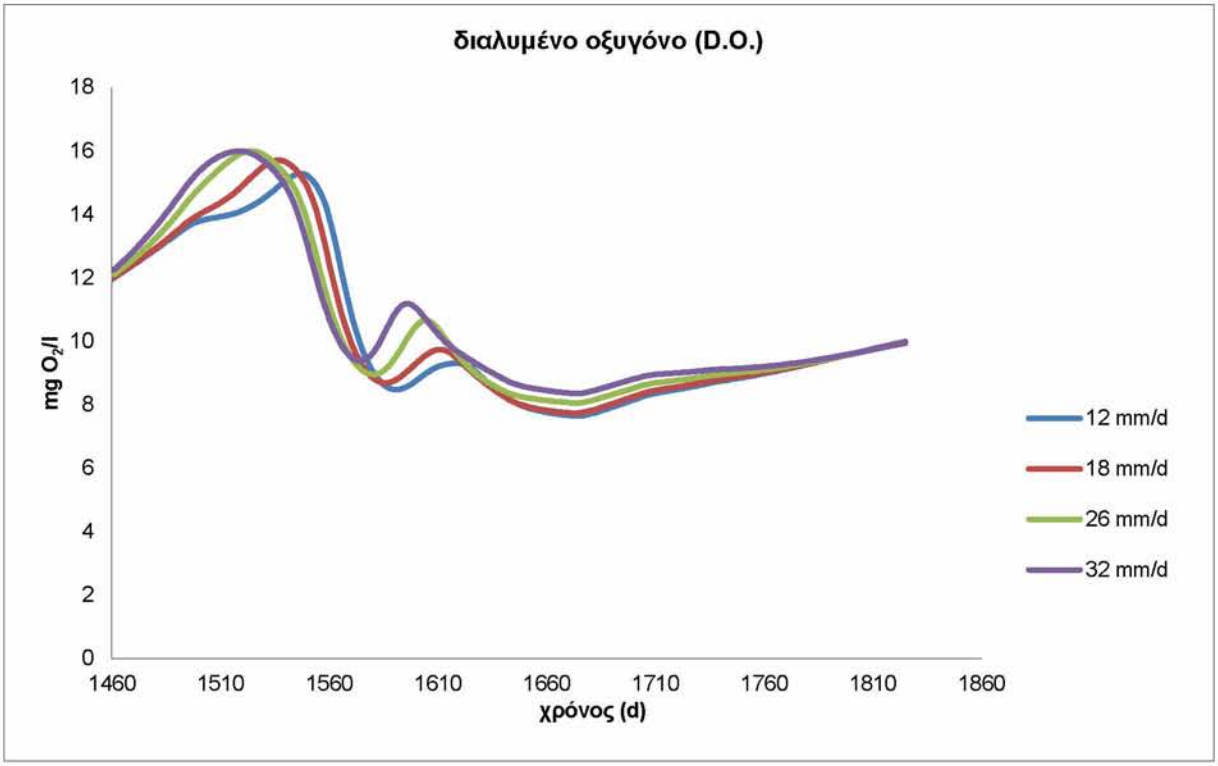


Διάγραμμα 5.20: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

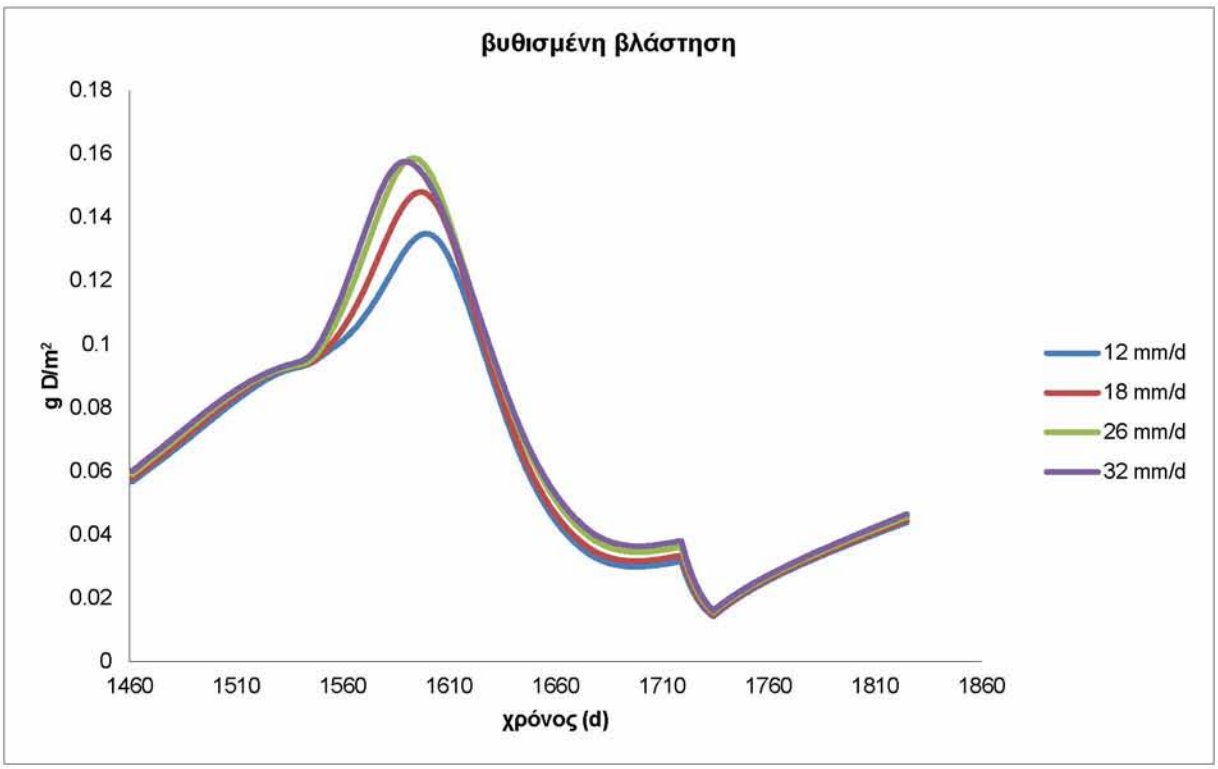


Διάγραμμα 5.21: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

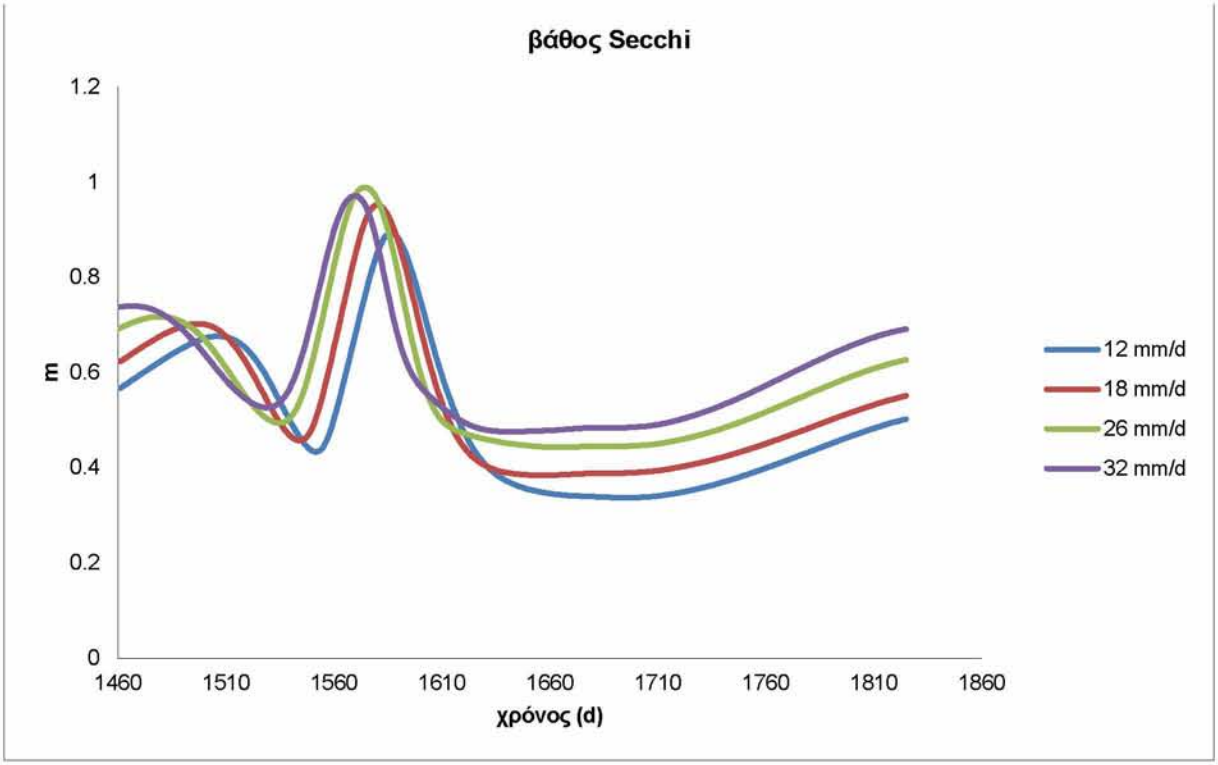


Διάγραμμα 5.22: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

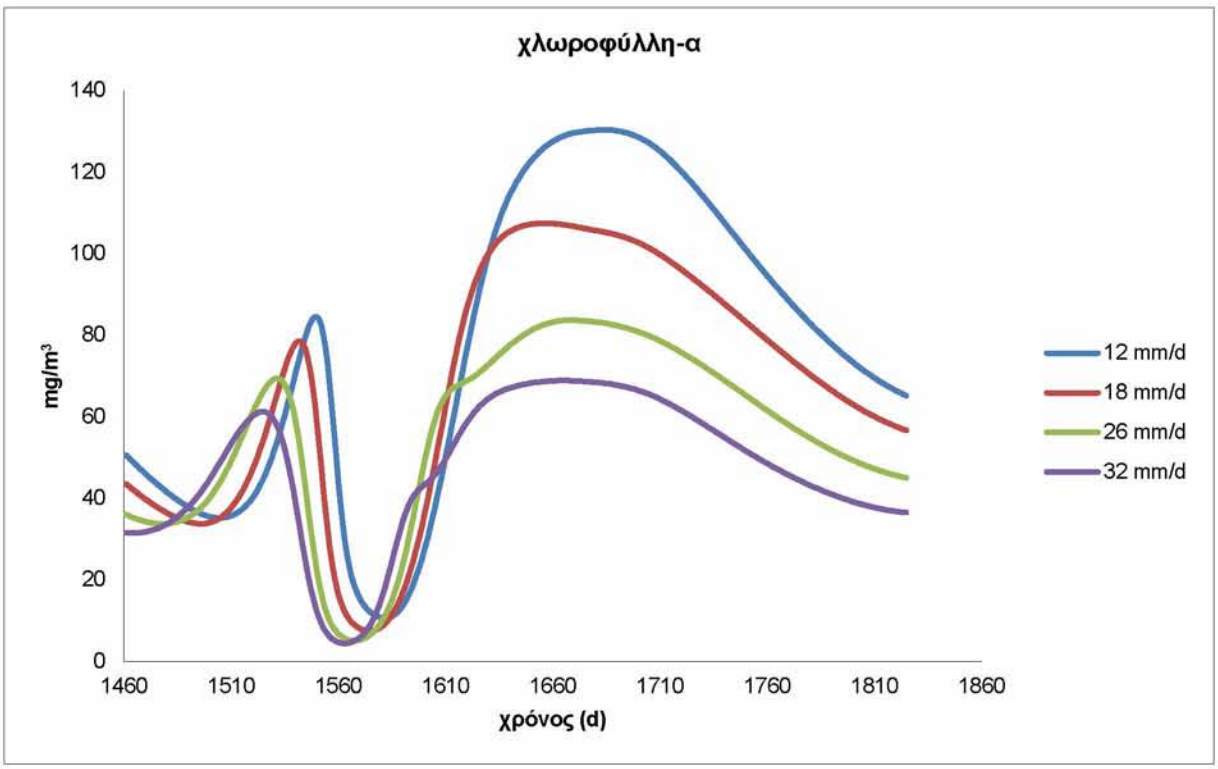


Διάγραμμα 5.23: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

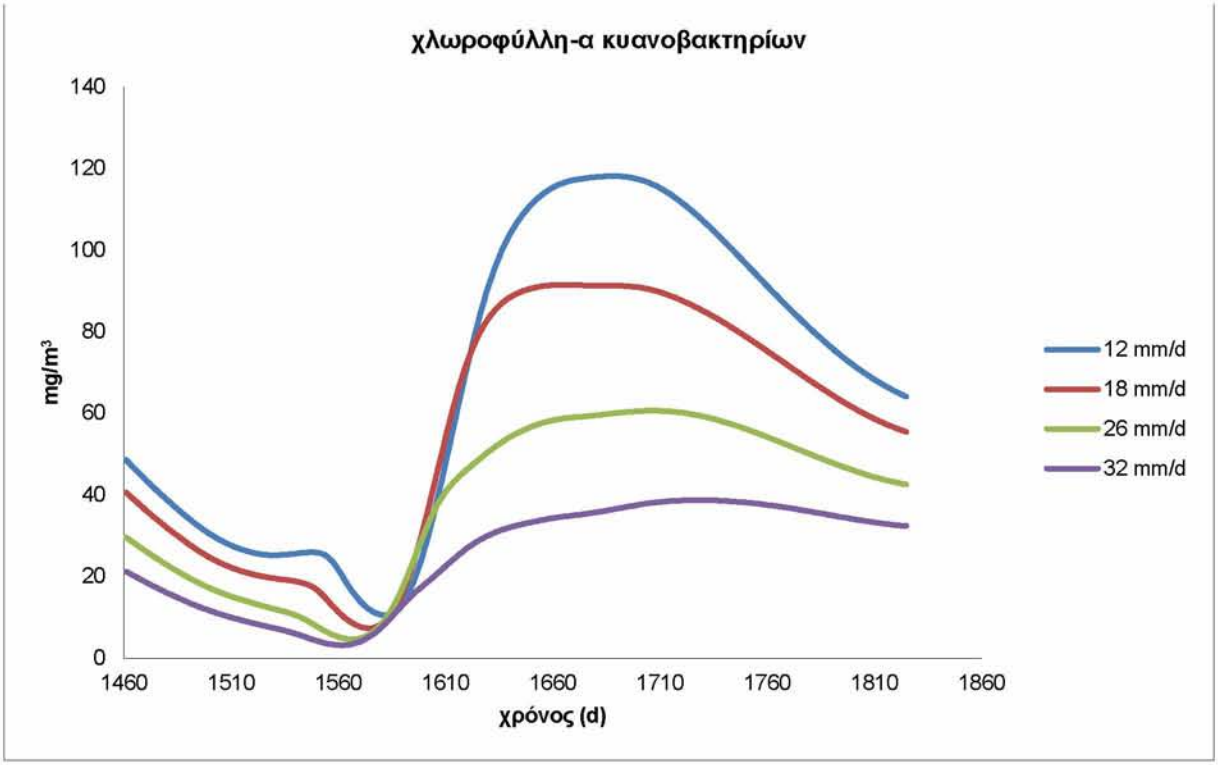


Διάγραμμα 5.24: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

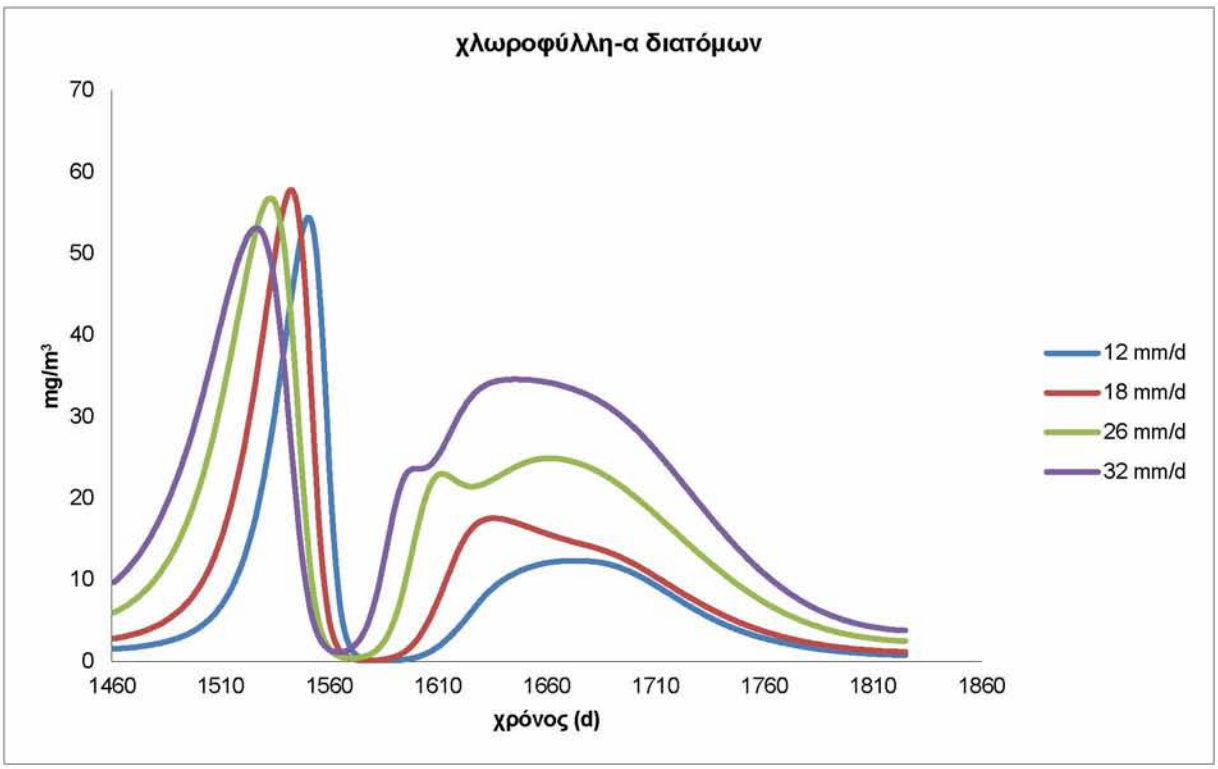


Διάγραμμα 5.25: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

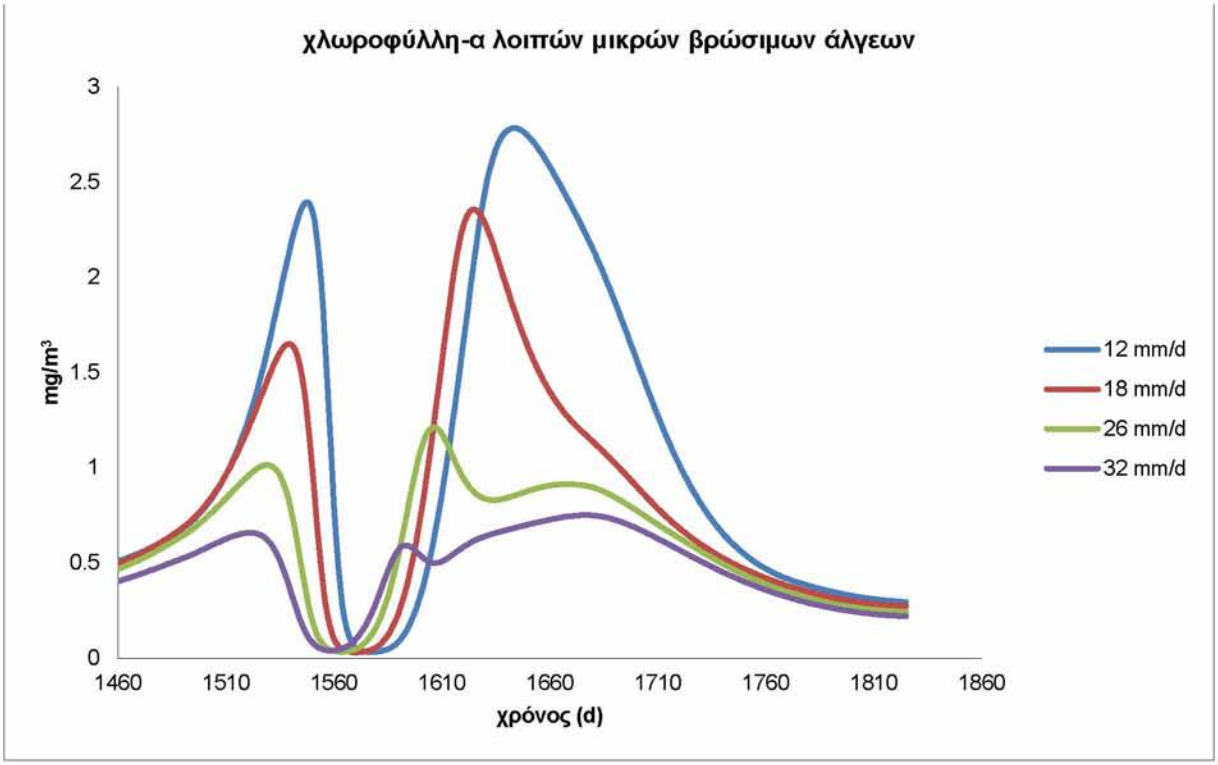


Διάγραμμα 5.26: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

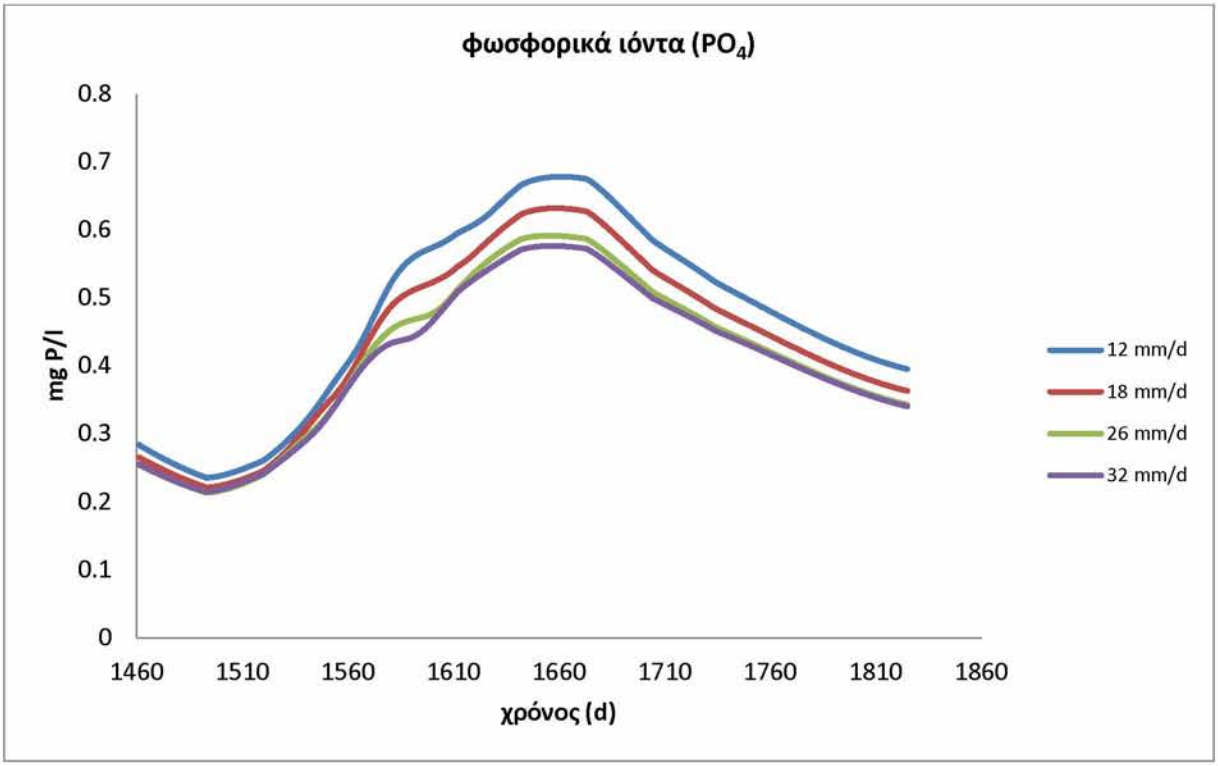


Διάγραμμα 5.27: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

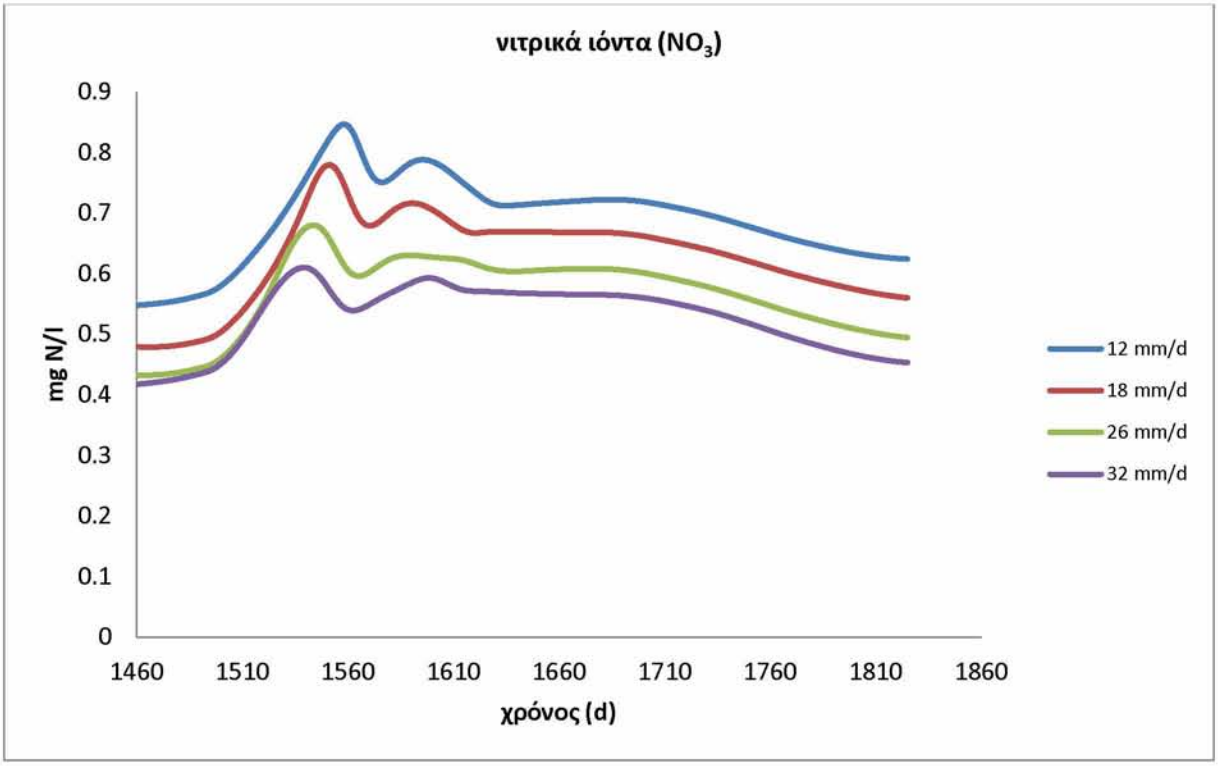


Διάγραμμα 5.28: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

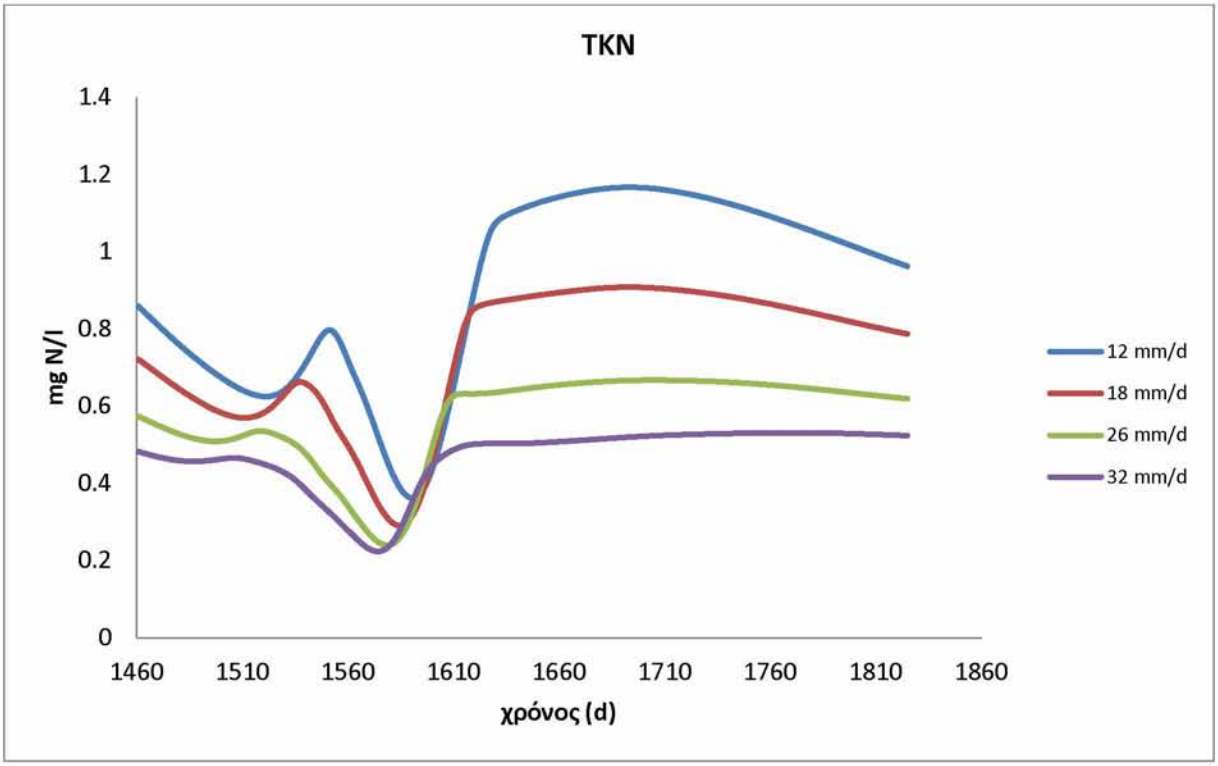


Διάγραμμα 5.29: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

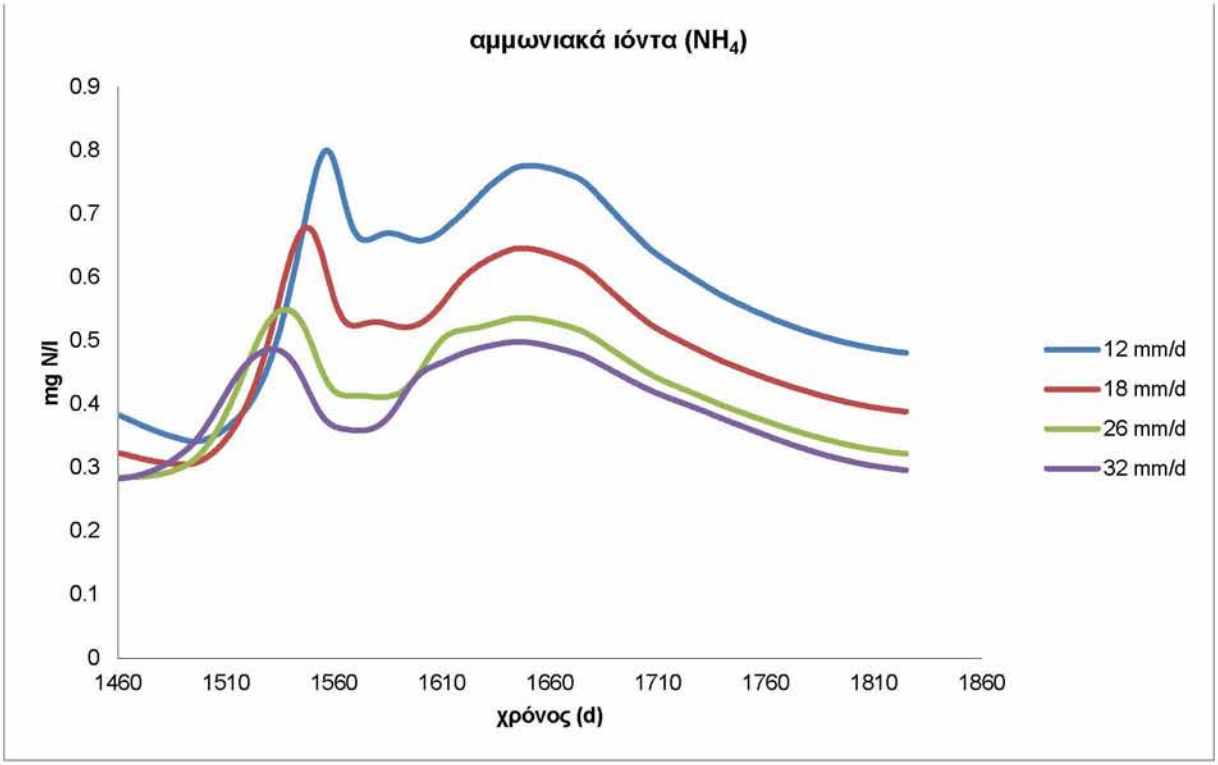


Διάγραμμα 5.30: νιτρικά ιόντα (NO_3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

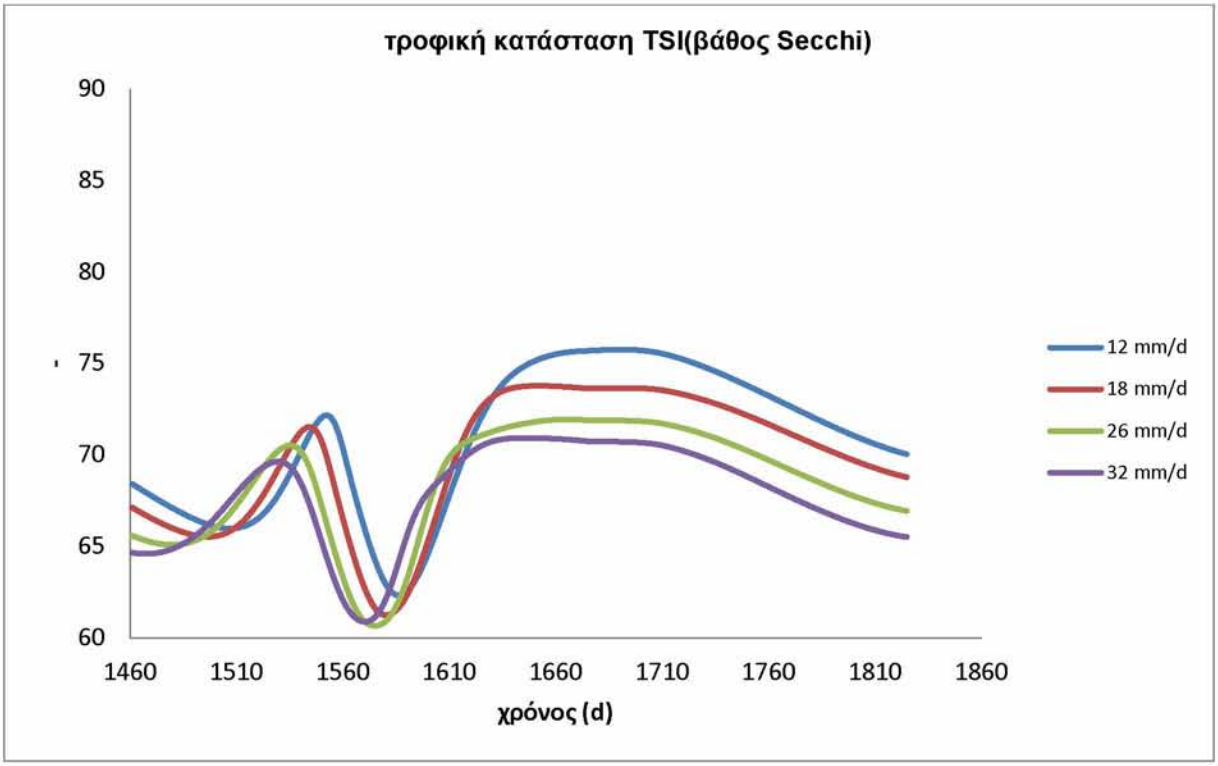


Διάγραμμα 5.31: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης: για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη



Διάγραμμα 5.32: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 5.33: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές υδραυλικές παροχές εισόδου για μέση στάθμη

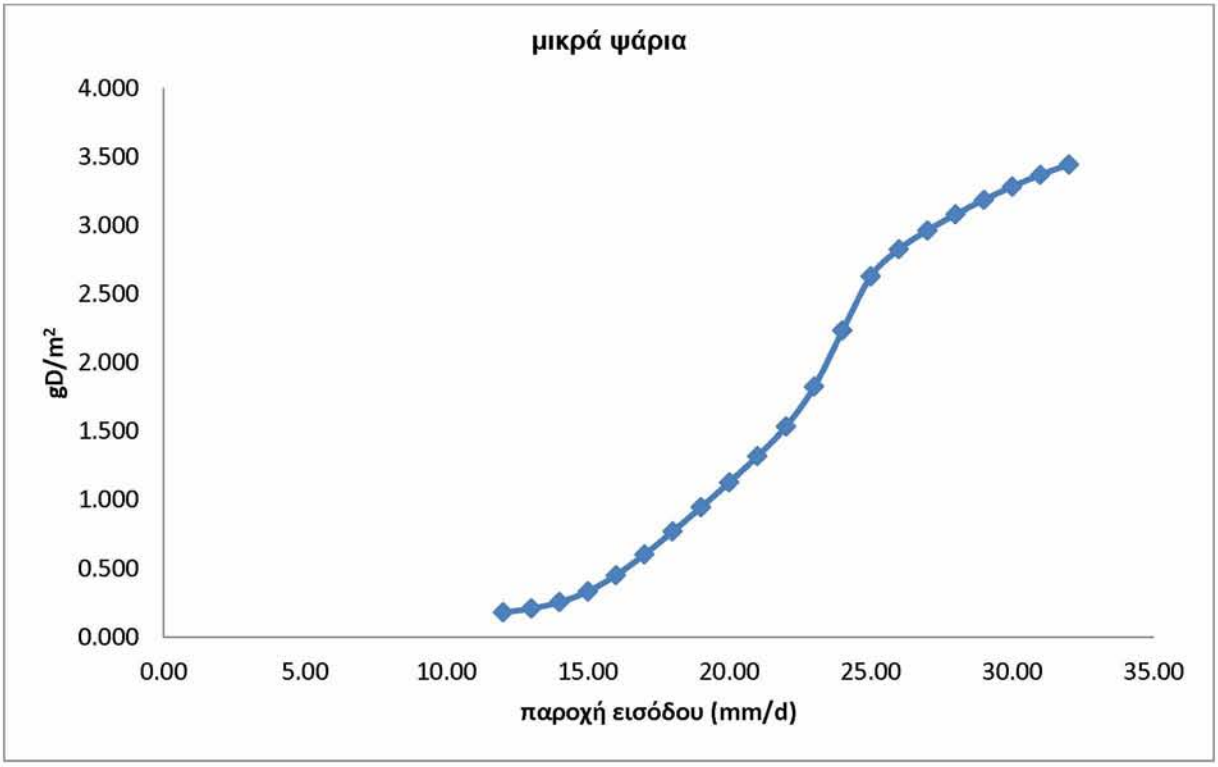
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

5.3 Η επίδραση του χρόνου παραμονής στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης για χαμηλή στάθμη

Στα διαγράμματα που ακολουθούν αναδεικνύονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και για μικρό βήμα υδραυλικής παροχής εισόδου (1mm/d) , οι τάσεις που περιγράφονται στην παράγραφο 5.1. Η παροχή εισόδου και εξόδου, άρα ο χρόνος παραμονής παίζει καθοριστικό ρόλο στα σημαντικά μεγέθη της λίμνης που αφορούν στην τροφική κατάσταση.

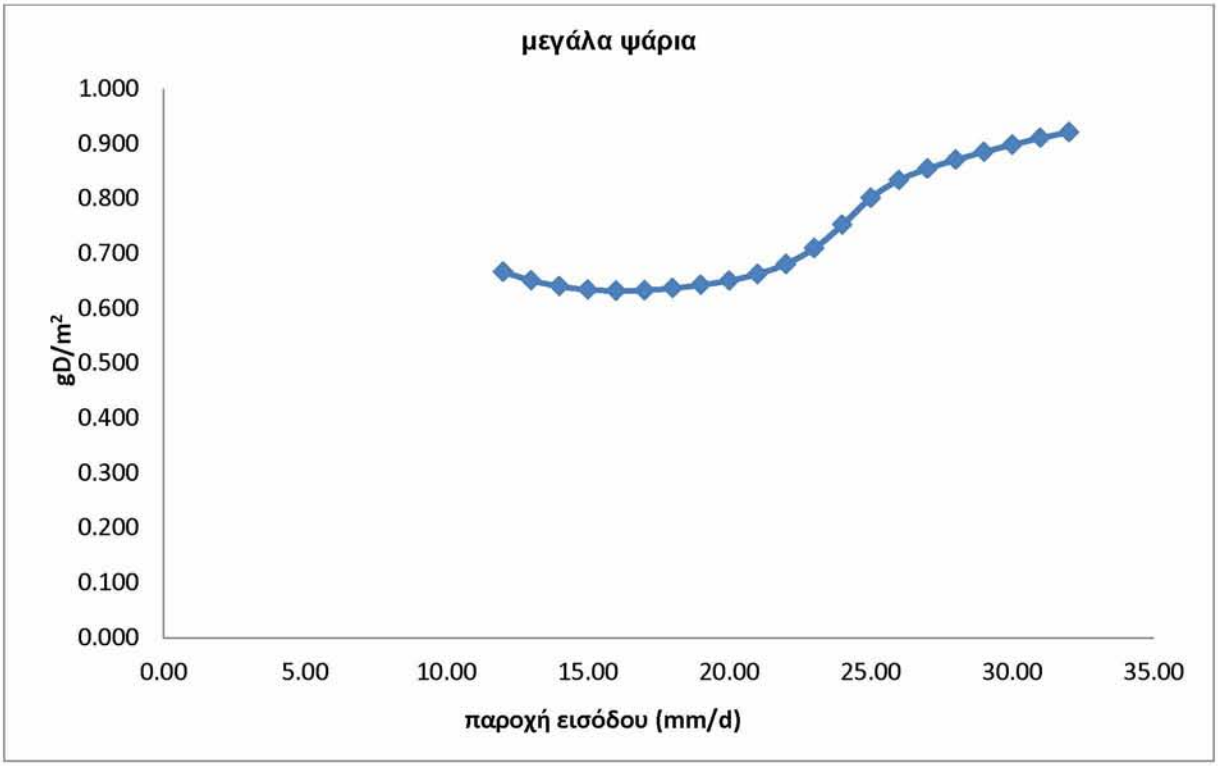
Η επίδραση της παροχής φαίνεται πολύ έντονη και θετική στα μικρά ψάρια και στο σύνολο των ψαριών. Στα μεγάλα και στα αρπακτικά ψάρια η επίδραση πάλι είναι θετική, αλλά σχεδόν αμελητέα. Έντονα αυξητική τάση παρουσιάζουν, επίσης, το βάθος Secchi και τα διάτομα. Η χλωροφύλλη-α στο σύνολό της καθώς κι επιμέρους τα κυανοβακτήρια και οι υπόλοιπες μικρές άλγεις, μειώνονται αισθητά με την αύξηση της παροχής, σε αντίθεση με τα διάτομα. Σε αυτό το σημείο είναι εμφανές ότι με τη βελτίωση της τροφικής κατάστασης υποχωρούν μεν τα κυανοβακτήρια, δίνοντας χώρο στην ανάπτυξη των διατόμων, ενώ αθροιστικά μειώνονται. Τέλος έντονη μείωση παρουσιάζουν τα φωσφορικά και νιτρικά ιόντα και το ΤΚΝ, αφού υπάρχει αραίωση για τα δύο πρώτα και βελτίωση της τροφικής κατάστασης για το τελευταίο. (Διαγράμματα 5.33 έως 5.47)

Η τροφική κατάσταση βελτιώνεται, με μείωση από τους 86 στους 78 βαθμούς TSI για παροχές 12 mm/d έως 32 mm/d αντίστοιχα. Παραμένει υπερευτροφική λίμνη ακόμη και για το ακραίο σενάριο πολύ υψηλής παροχής εισόδου. (Διάγραμμα 5.48)

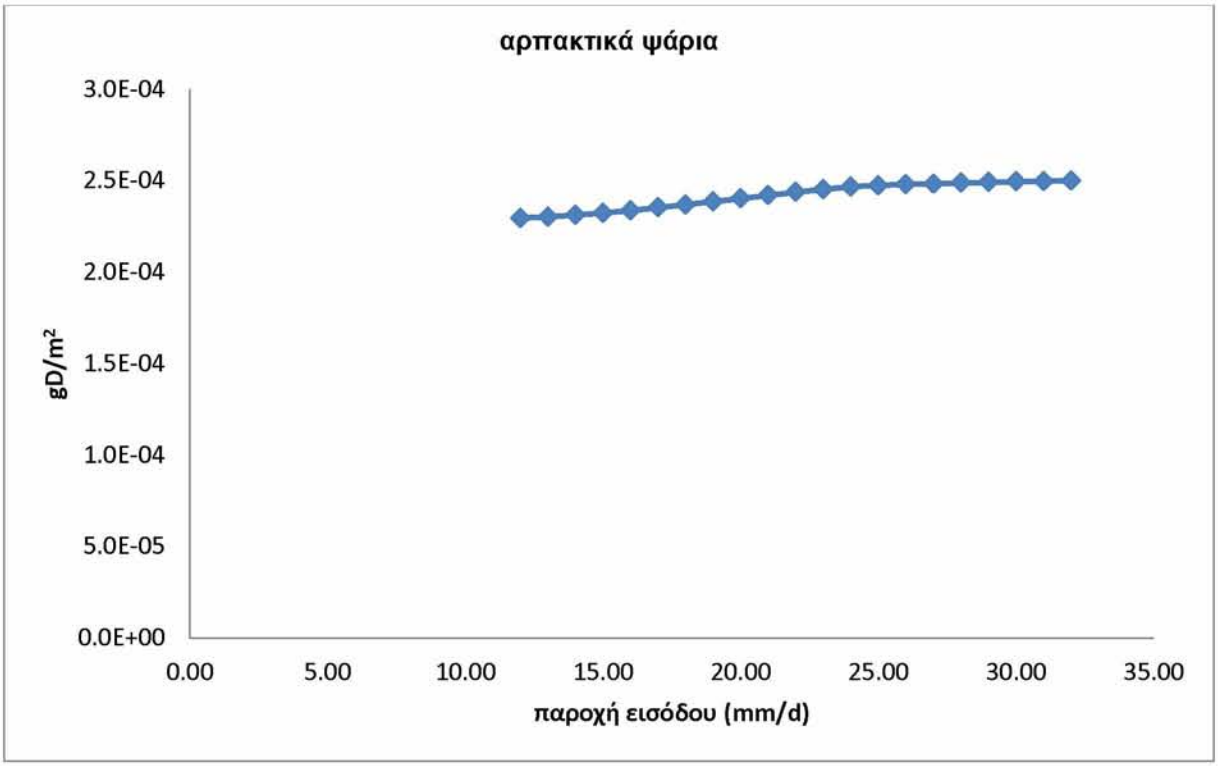


Διάγραμμα 5.34: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

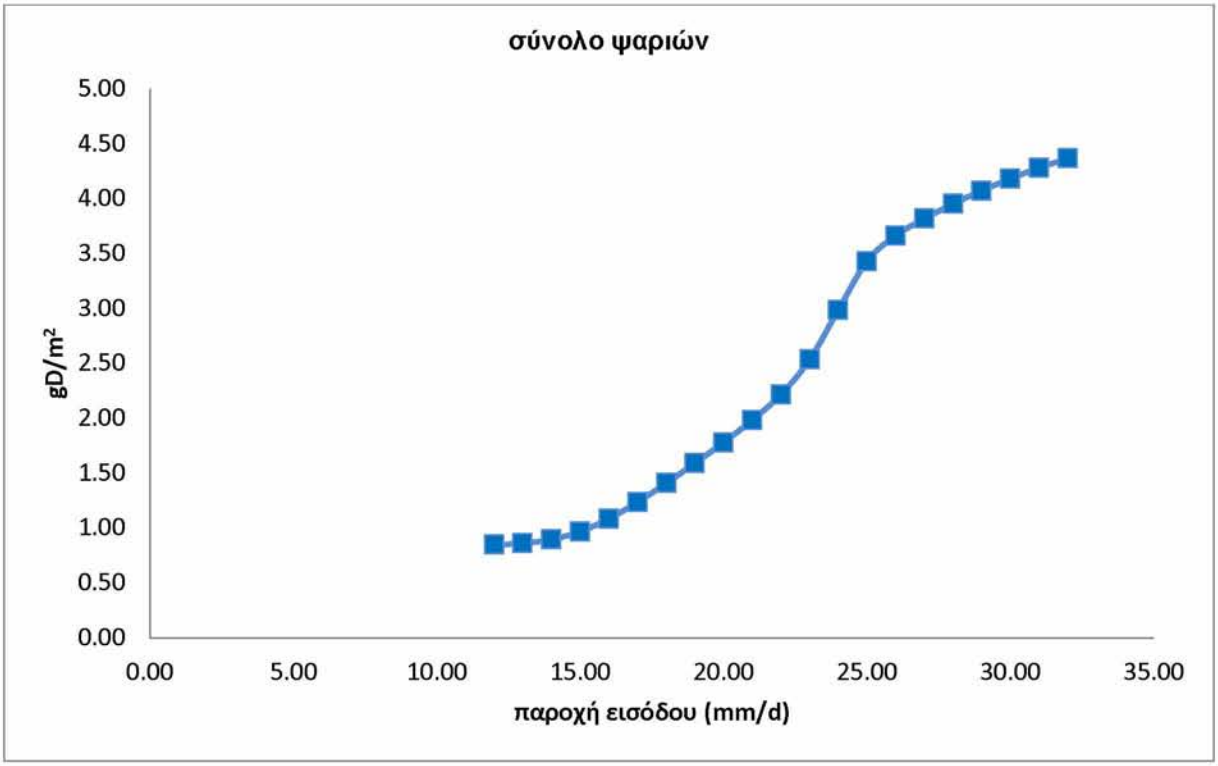


Διάγραμμα 5.34: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

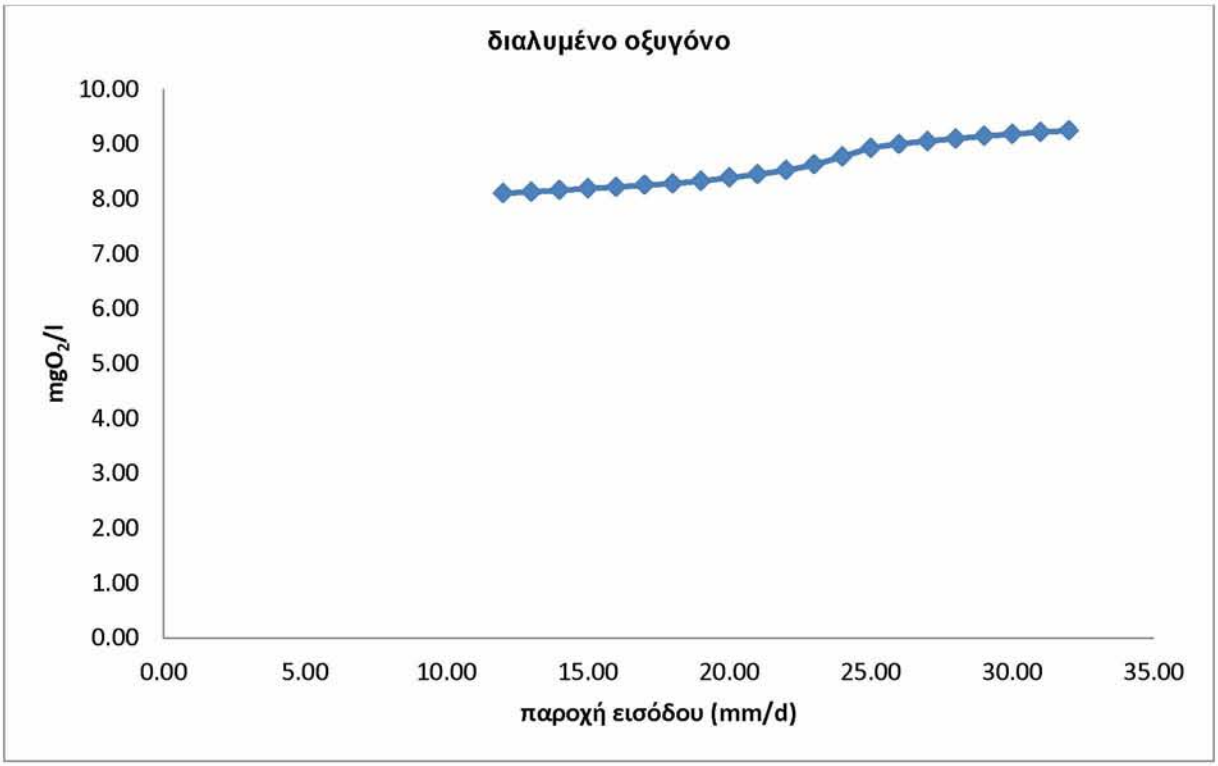


Διάγραμμα 5.35: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

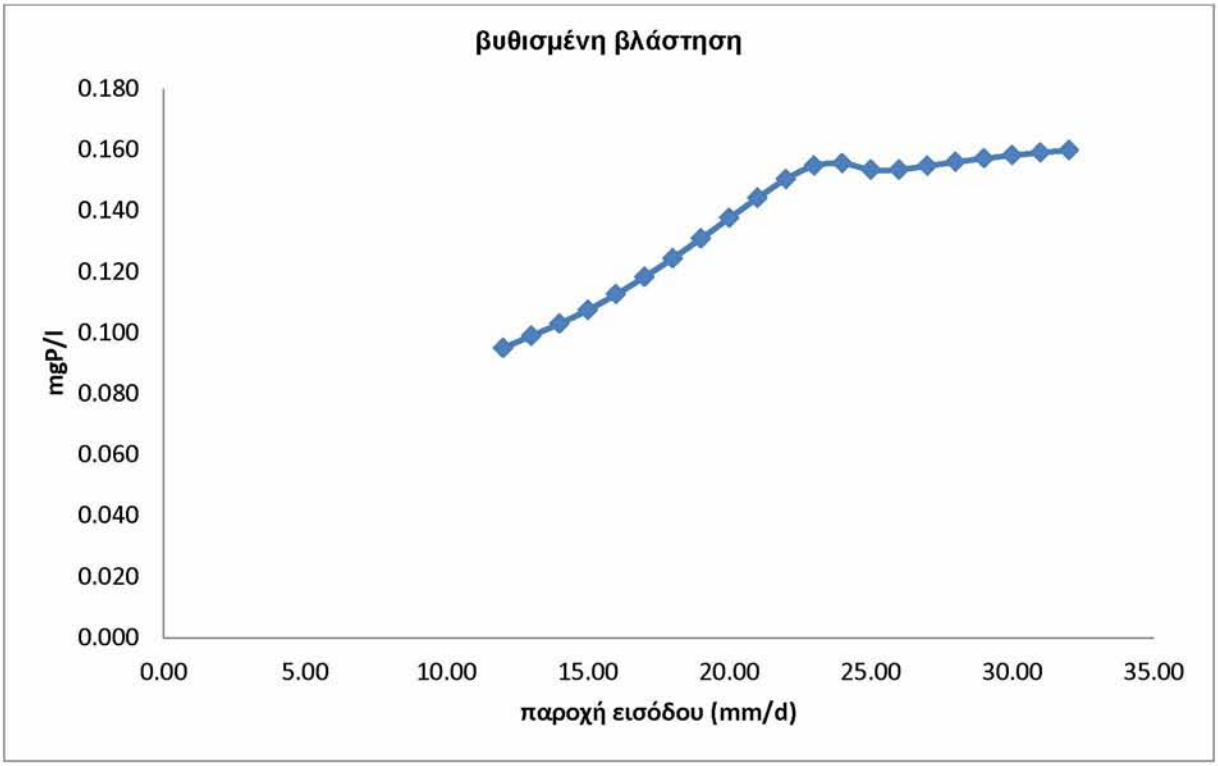


Διάγραμμα 5.36: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

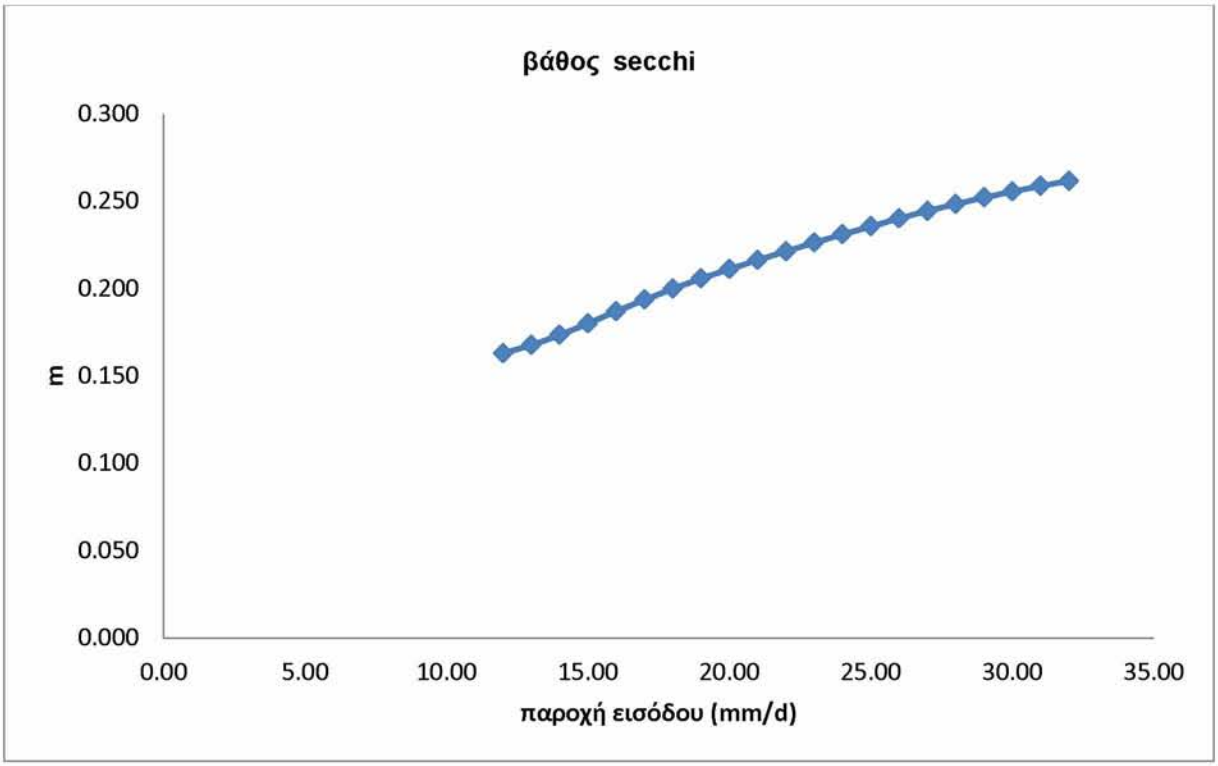


Διάγραμμα 5.37: μέσο θερινό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου– υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

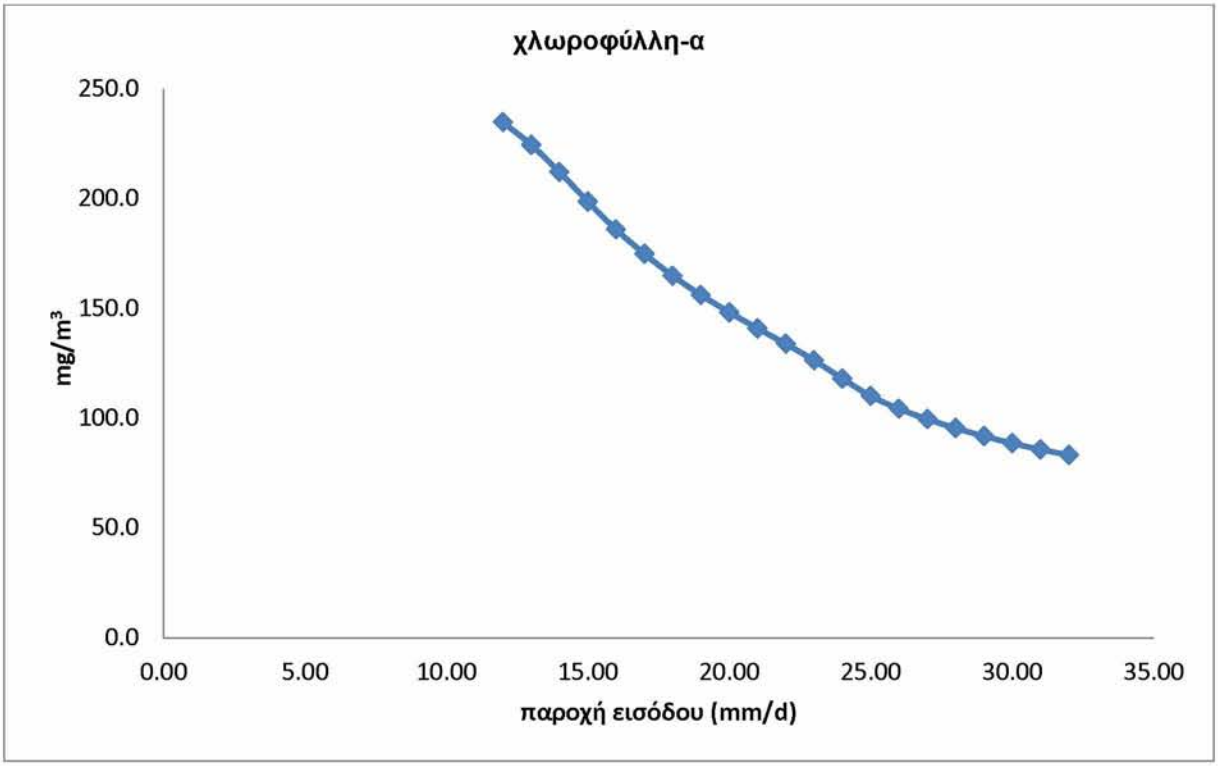


Διάγραμμα 5.38: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης– υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

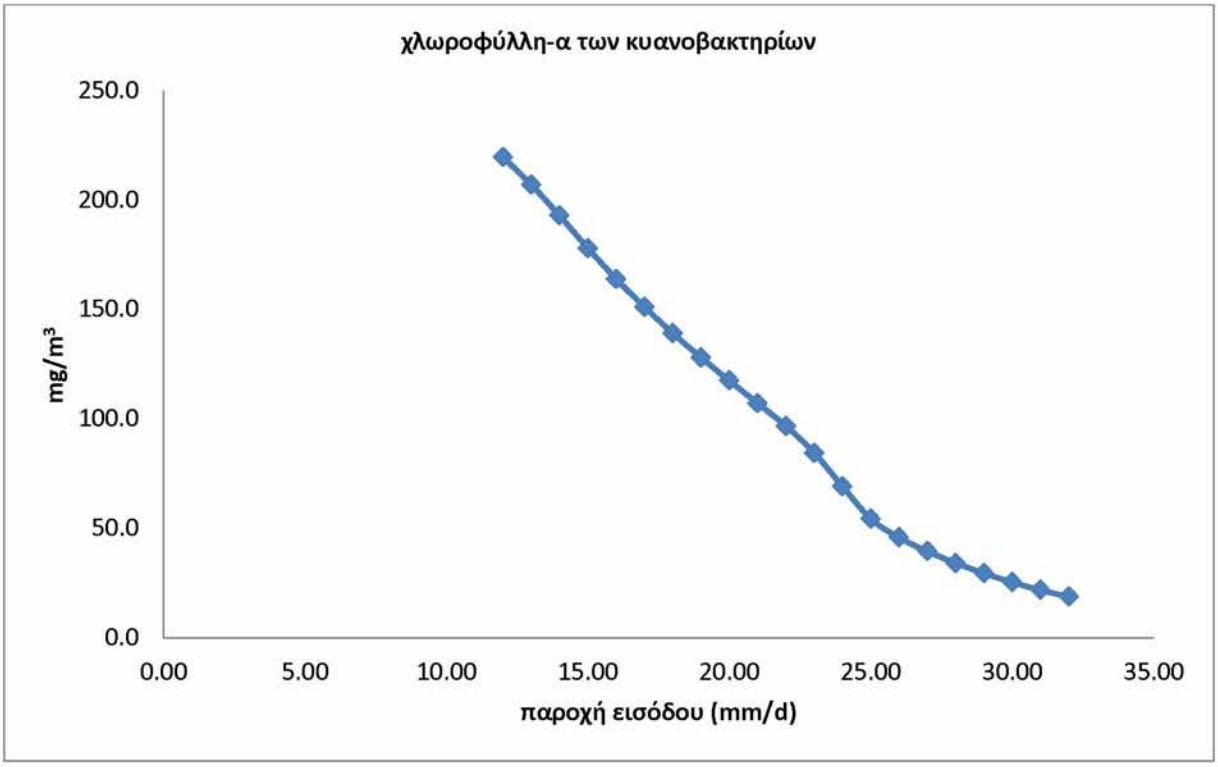


Διάγραμμα 5.39: μέσο θερινό βάθους Secchi – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

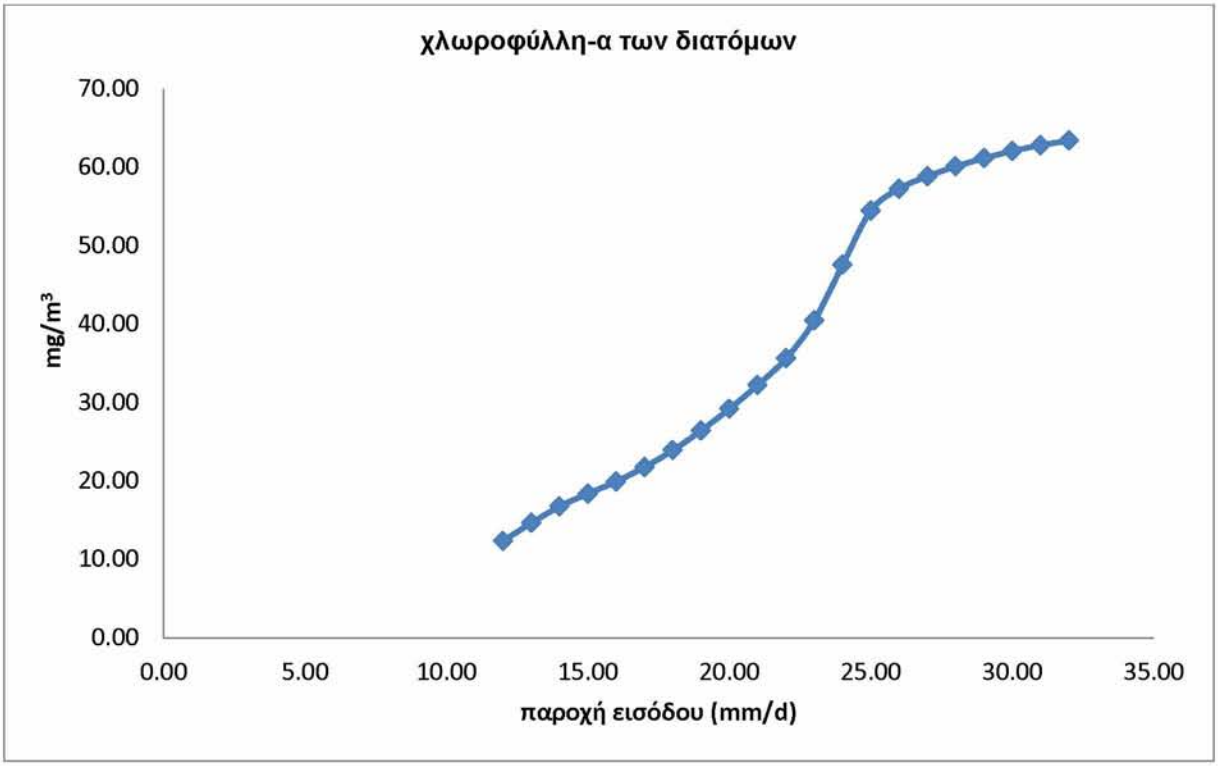


Διάγραμμα 5.40: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

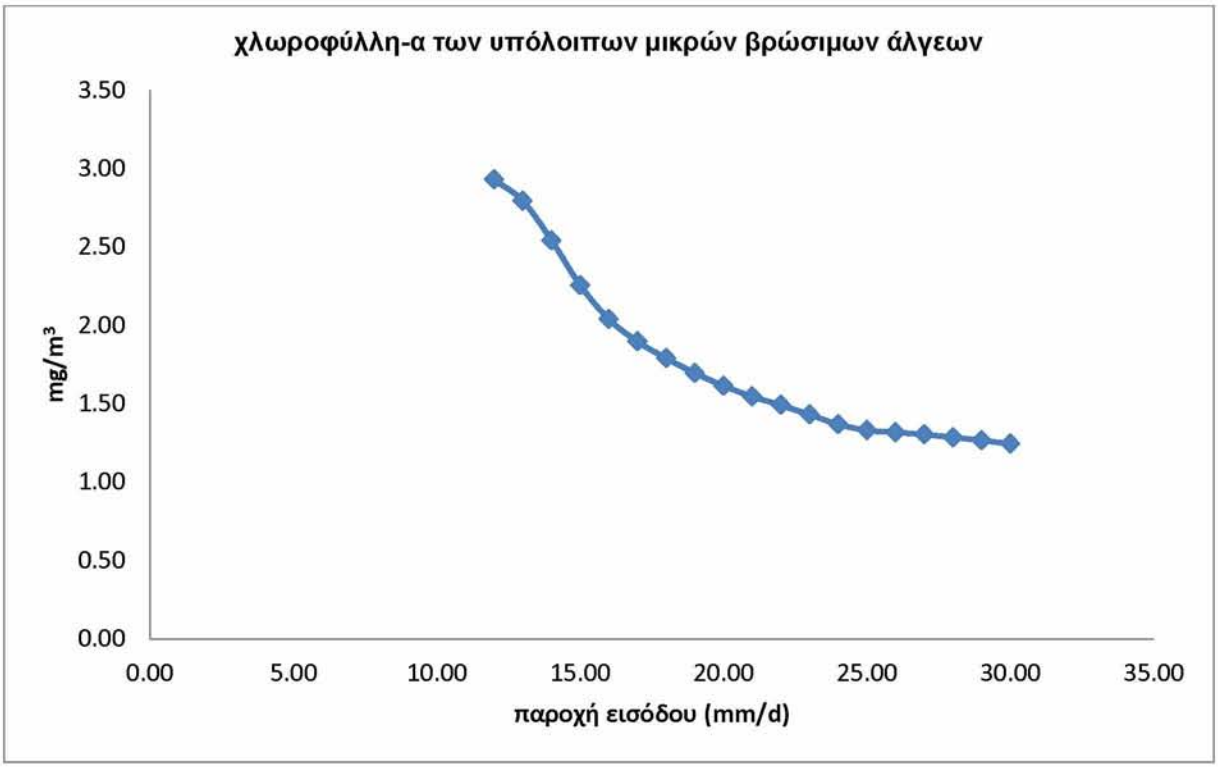


Διάγραμμα 5.41: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

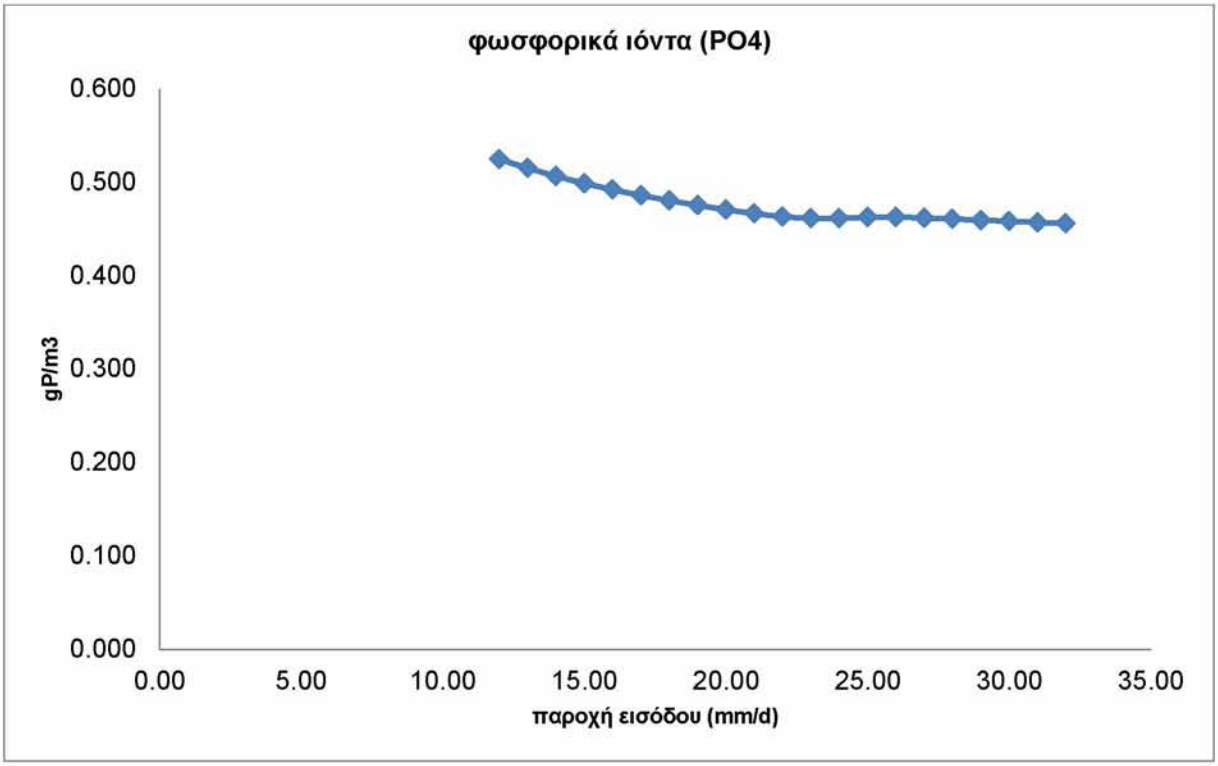


Διάγραμμα 5.42: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

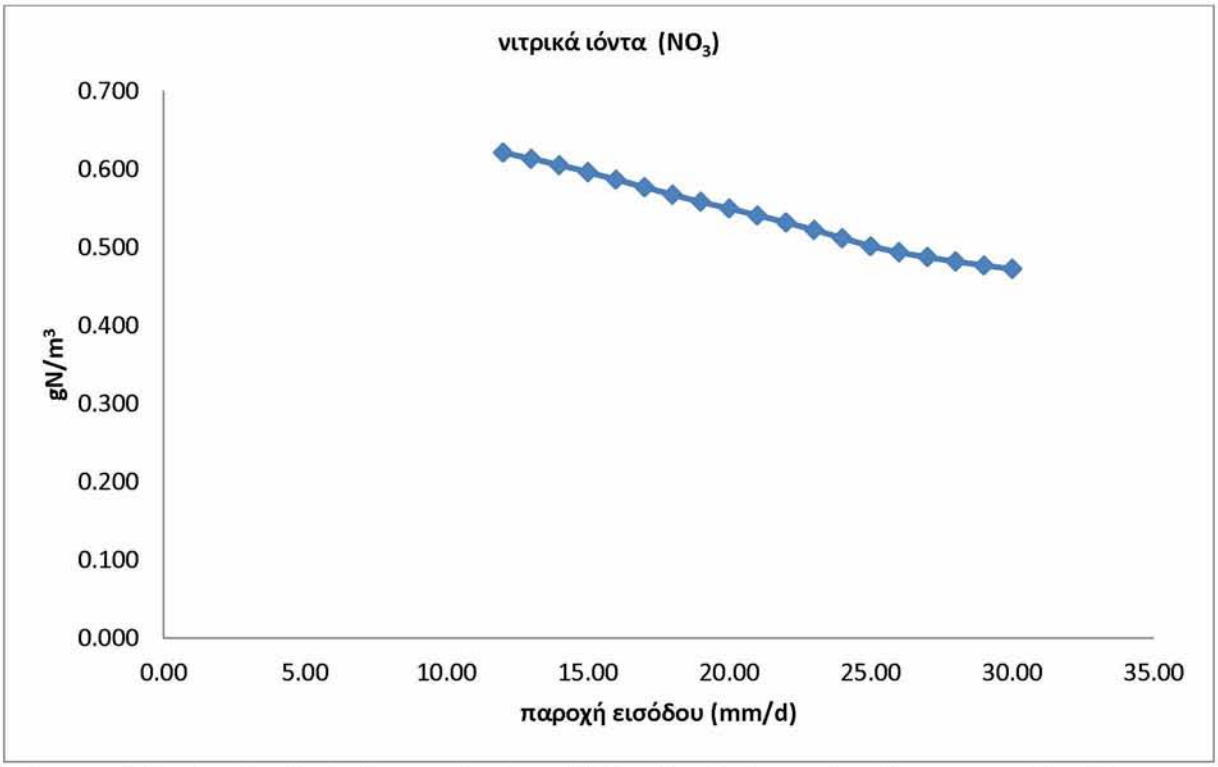


Διάγραμμα 5.43: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

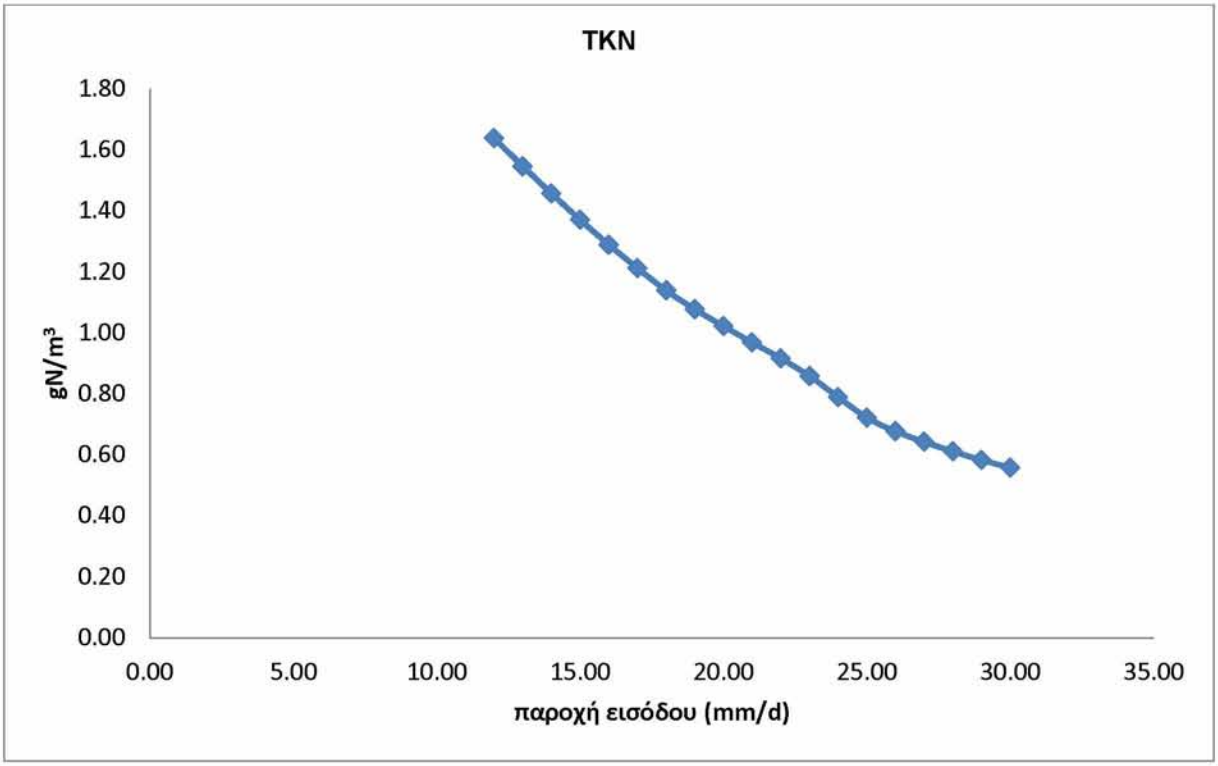


Διάγραμμα 5.44: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

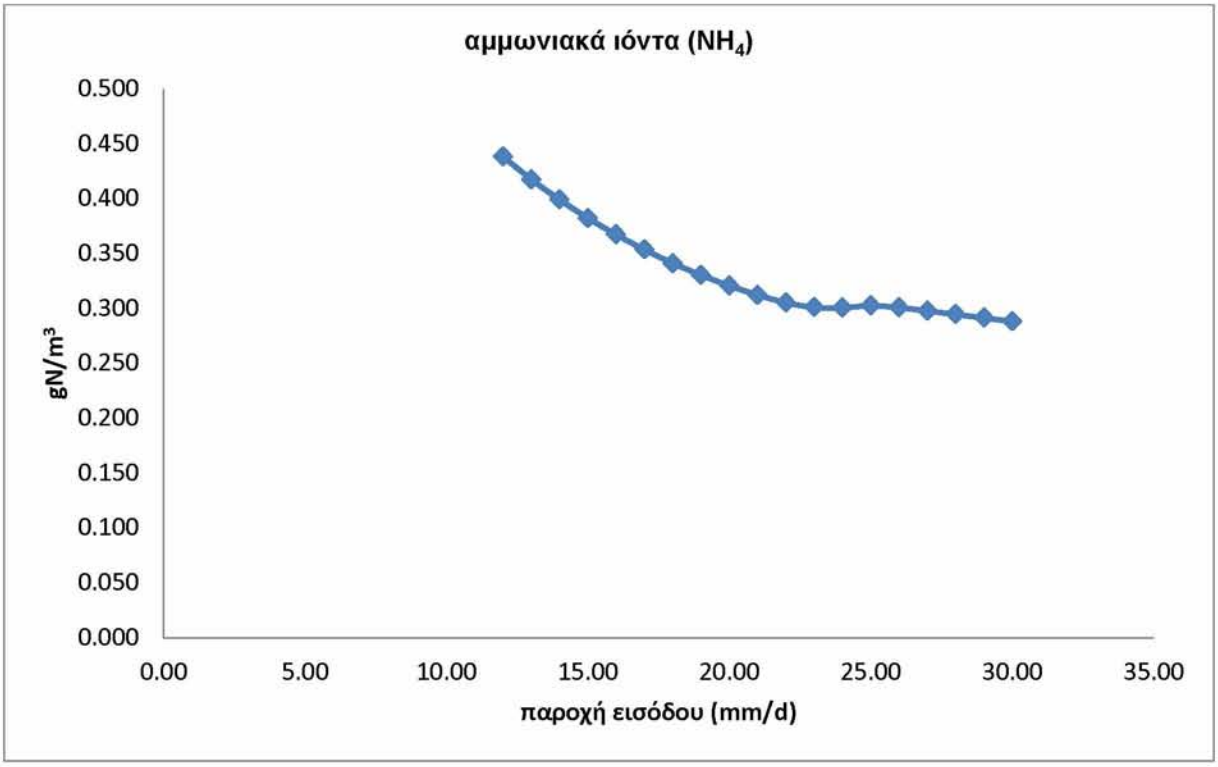


Διάγραμμα 5.45: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

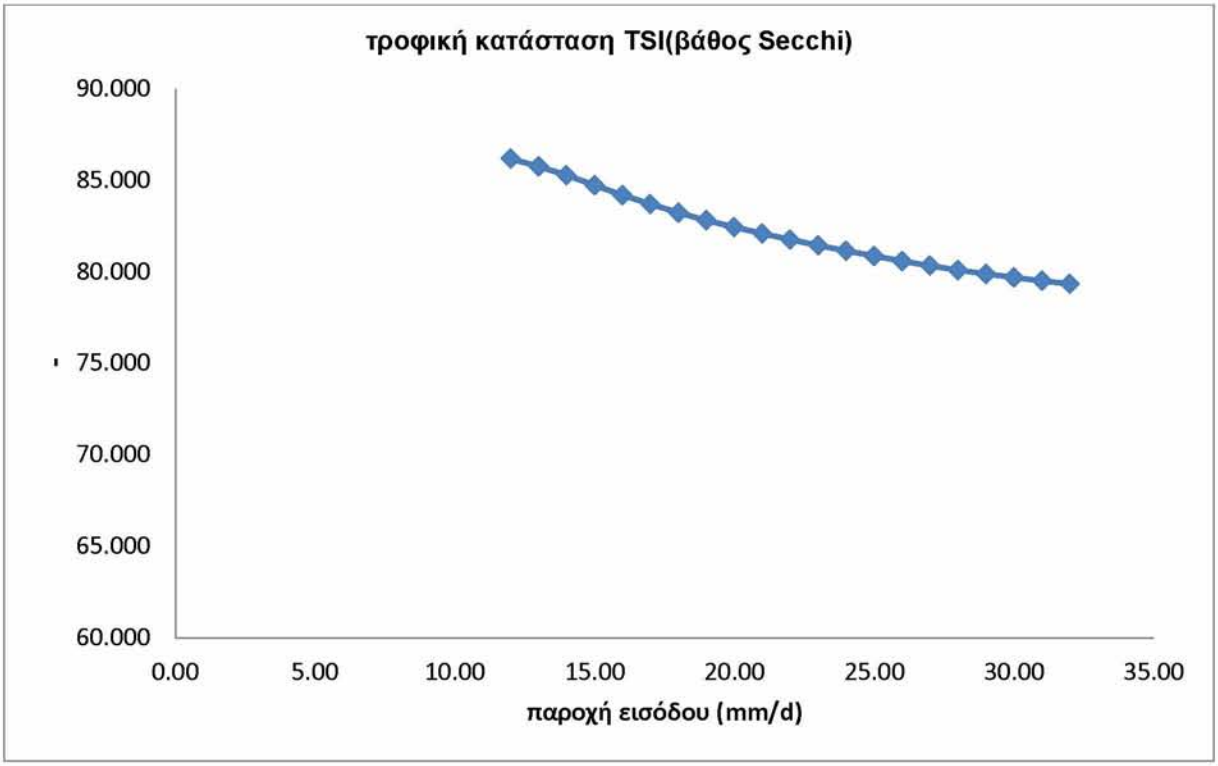


Διάγραμμα 5.46: μέσο θερινό επίπεδο TKN – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη



Διάγραμμα 5.47: μέσο θερινό επίπεδο αμμωνιακών ιόντων (NH_4) – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

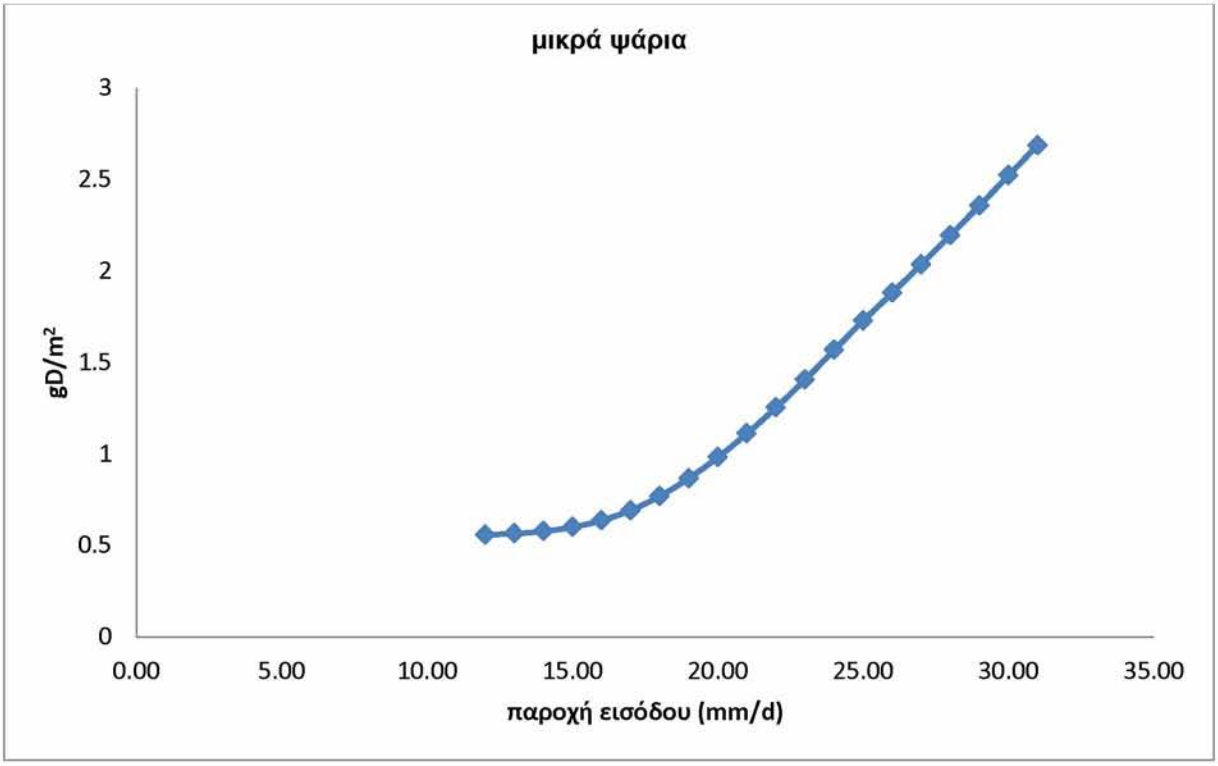


Διάγραμμα 5.48: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

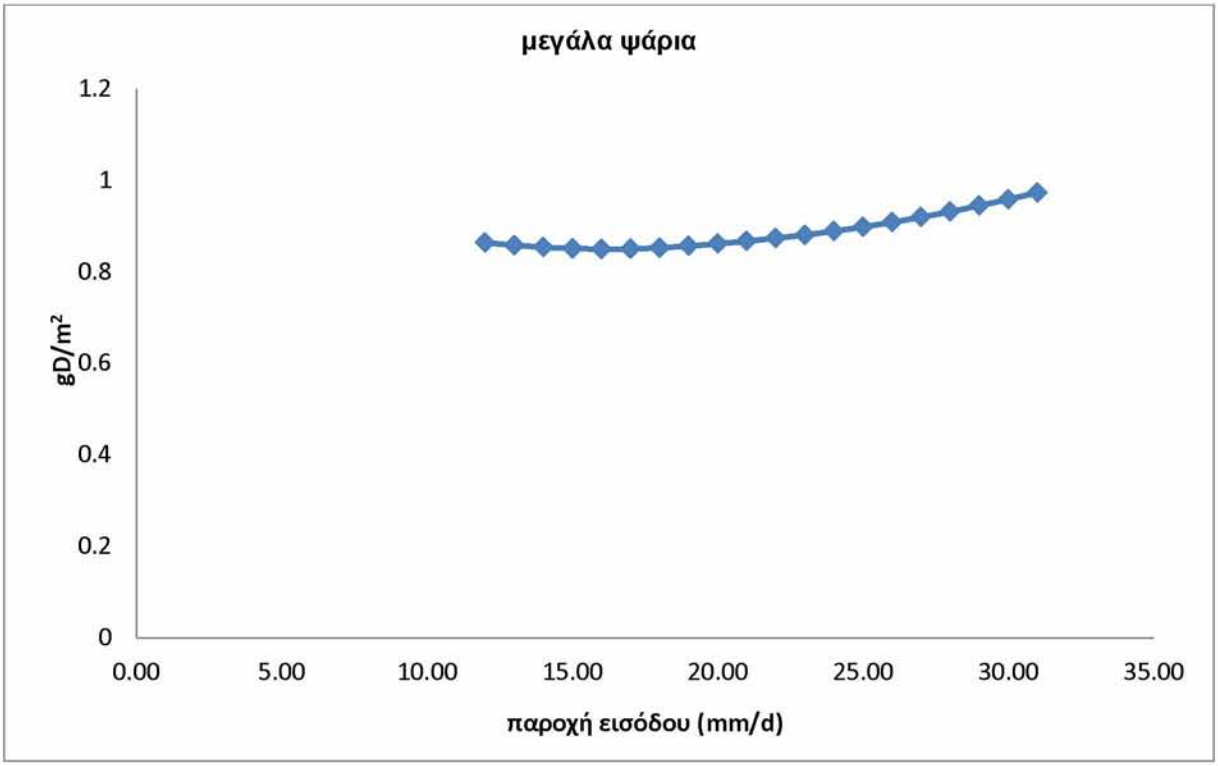
5.4 Η επίδραση του χρόνου παραμονής στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης για μέση στάθμη

Αντίστοιχες αυξομειώσεις ακολουθούν τα μεγέθη της λίμνης για μέση στάθμη, όπως και για χαμηλή, σύμφωνα με τα διαγράμματα που ακολουθούν. Παρουσιάζονται ωστόσο πολύ καλύτερα επίπεδα ως προς την τροφική κατάσταση, δηλαδή χαμηλότερα επίπεδα χλωροφύλλης-α και βλάστησης ενώ αυξάνεται το βάθος Secchi. Οι βαθμοί TSI για μέση στάθμη κυμαίνονται από 74 έως 70, δηλαδή για την οριακή παροχή που εξετάζεται, των 32 mm/d , η λίμνη προσεγγίζει την αναβάθμισή της από υπερευτροφική σε ευτροφική.

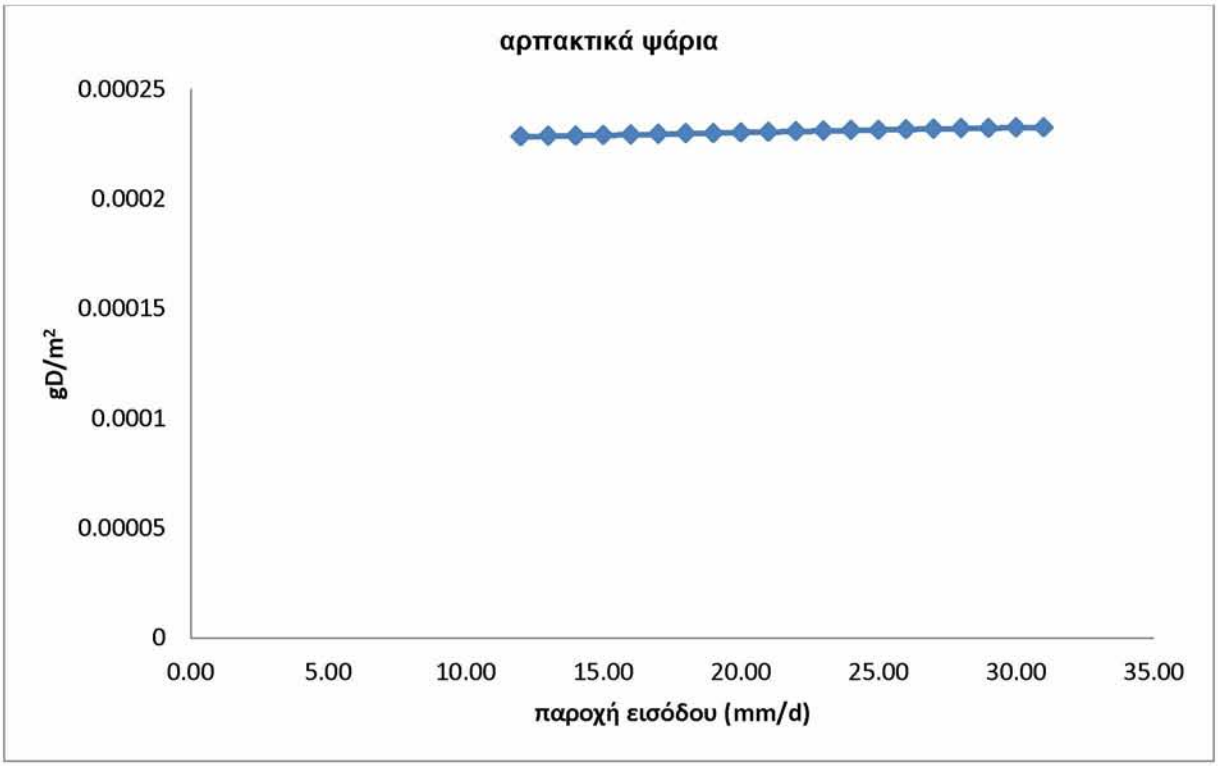


Διάγραμμα 5.49: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

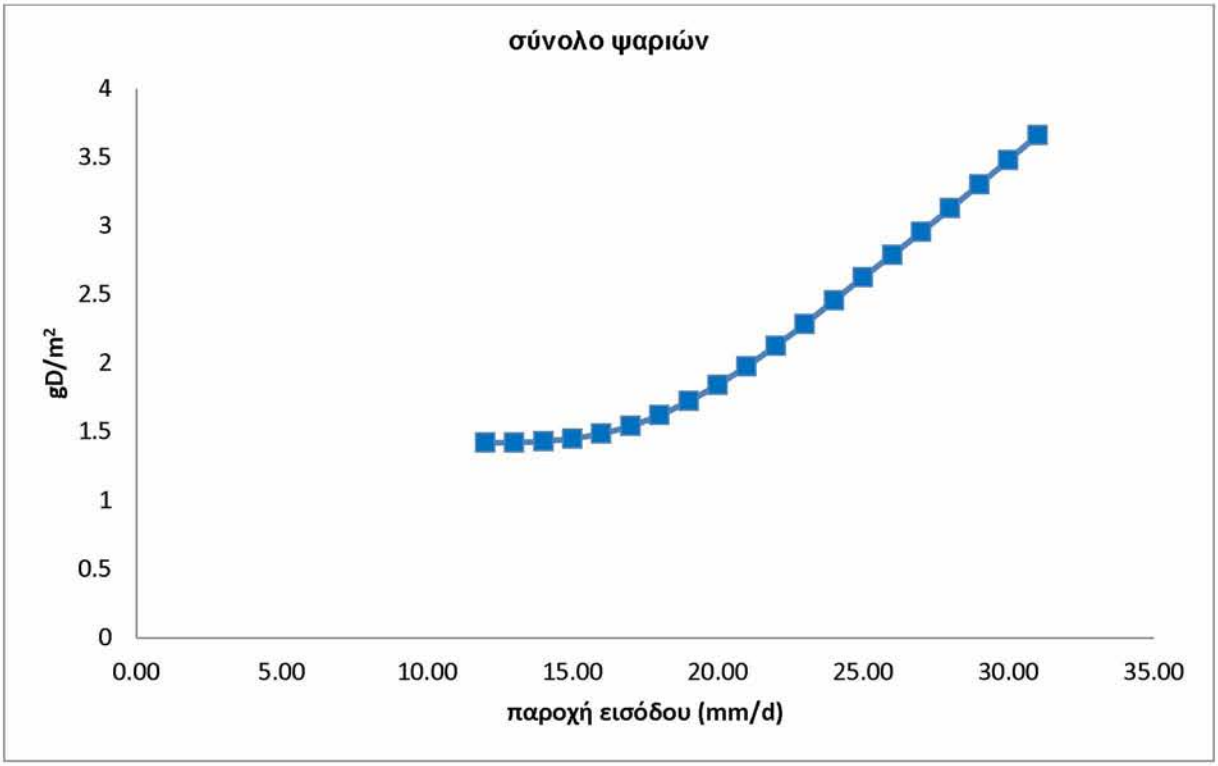


Διάγραμμα 5.50: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών– υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

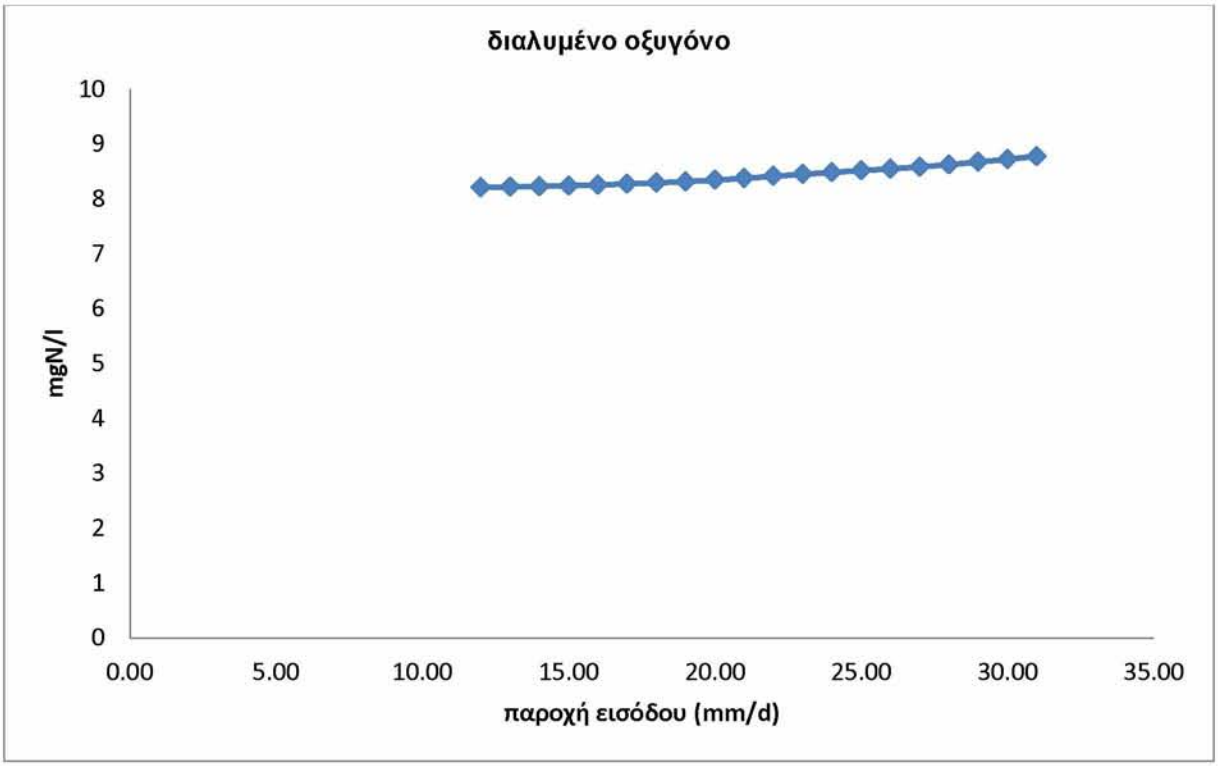


Διάγραμμα 5.51: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών– υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

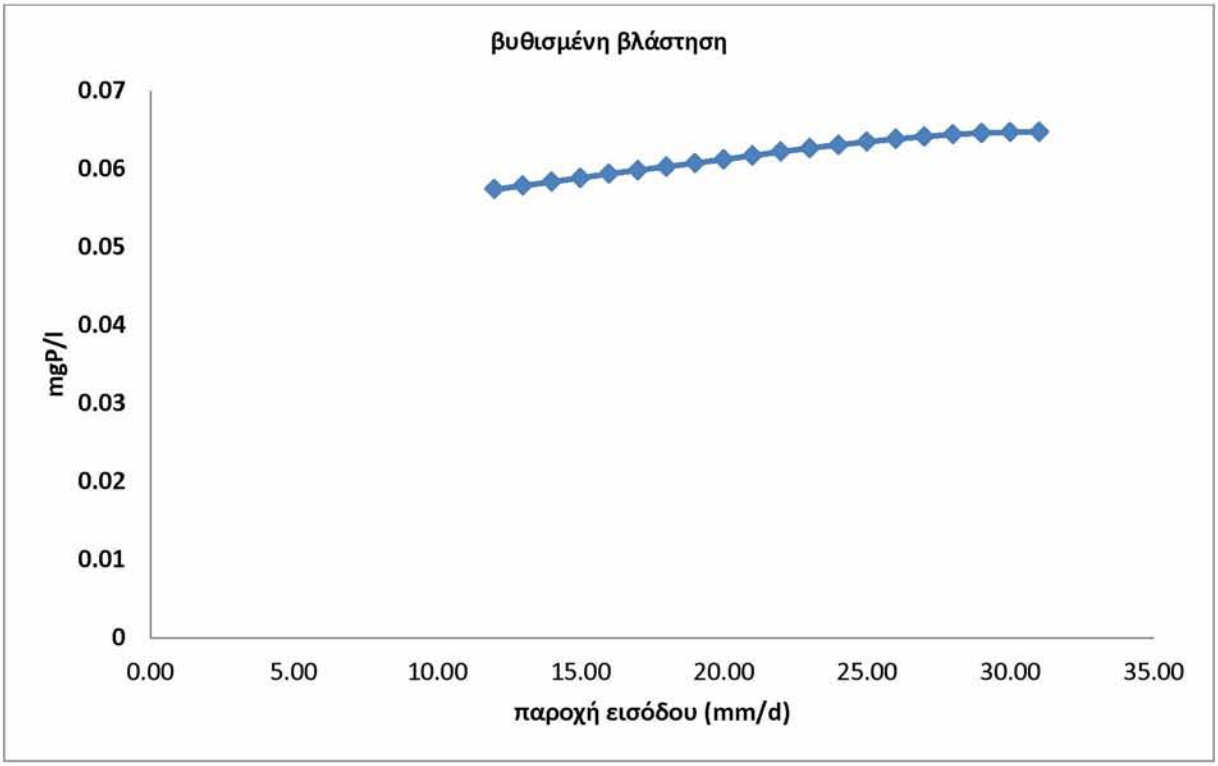


Διάγραμμα 5.52: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

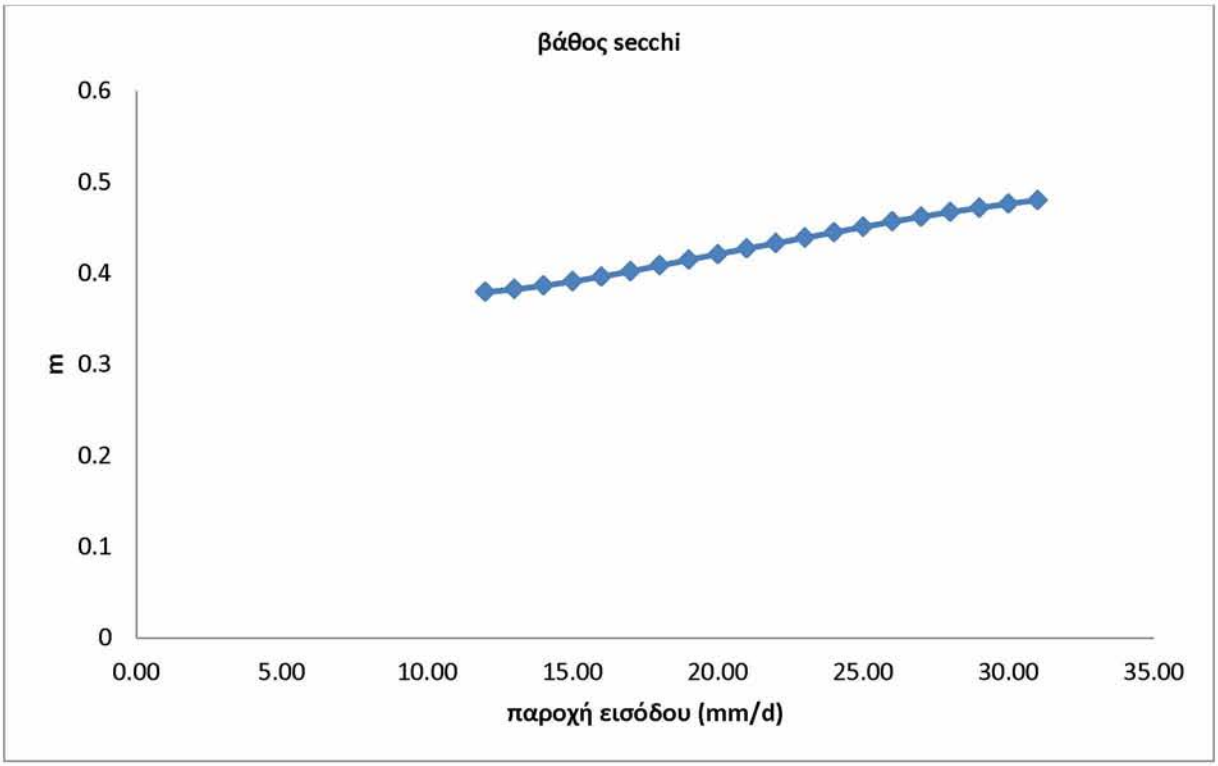


Διάγραμμα 5.53: μέσο θερινό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

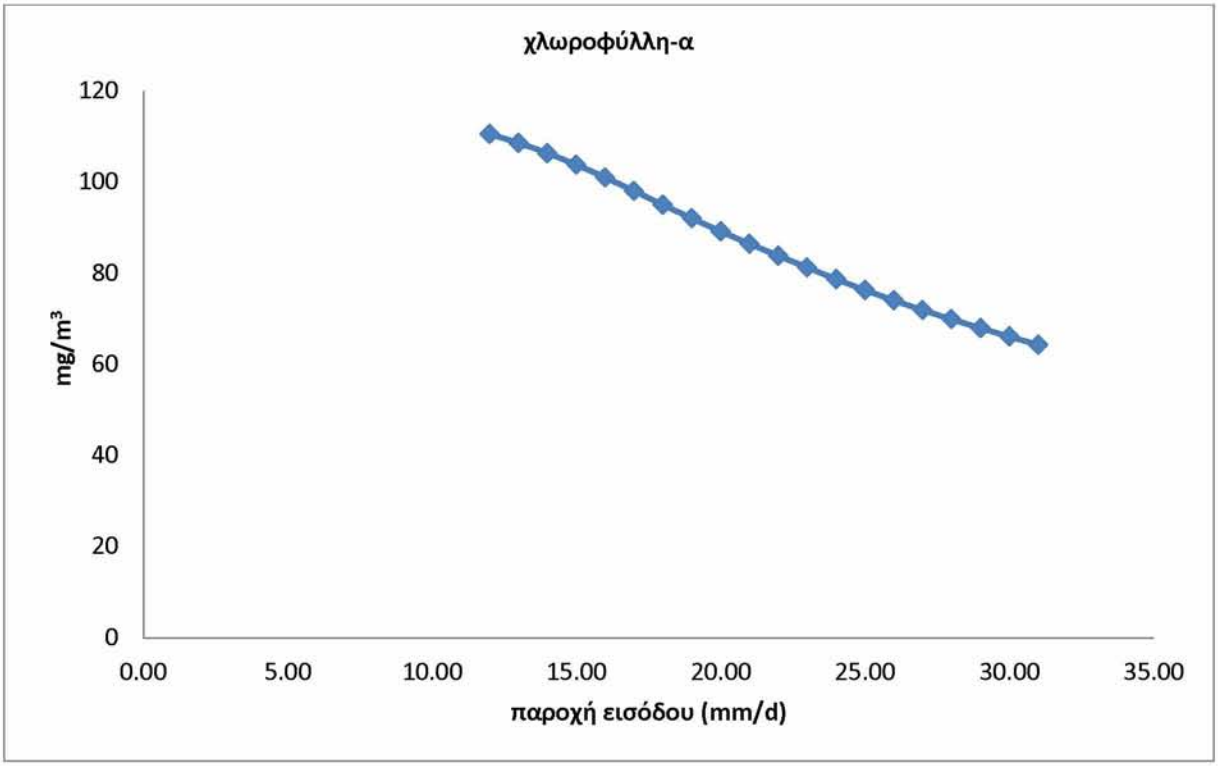


Διάγραμμα 5.54: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

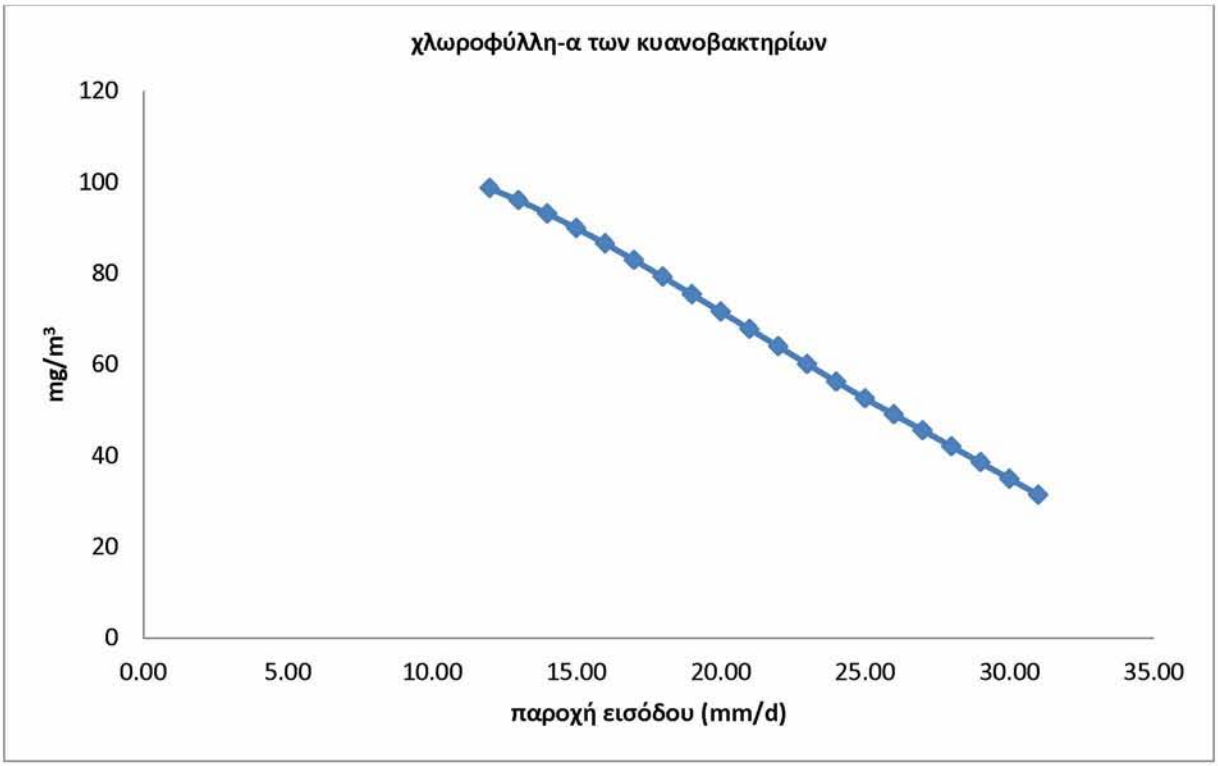


Διάγραμμα 5.55: μέσο θερινό επίπεδο βάθους Secchi – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

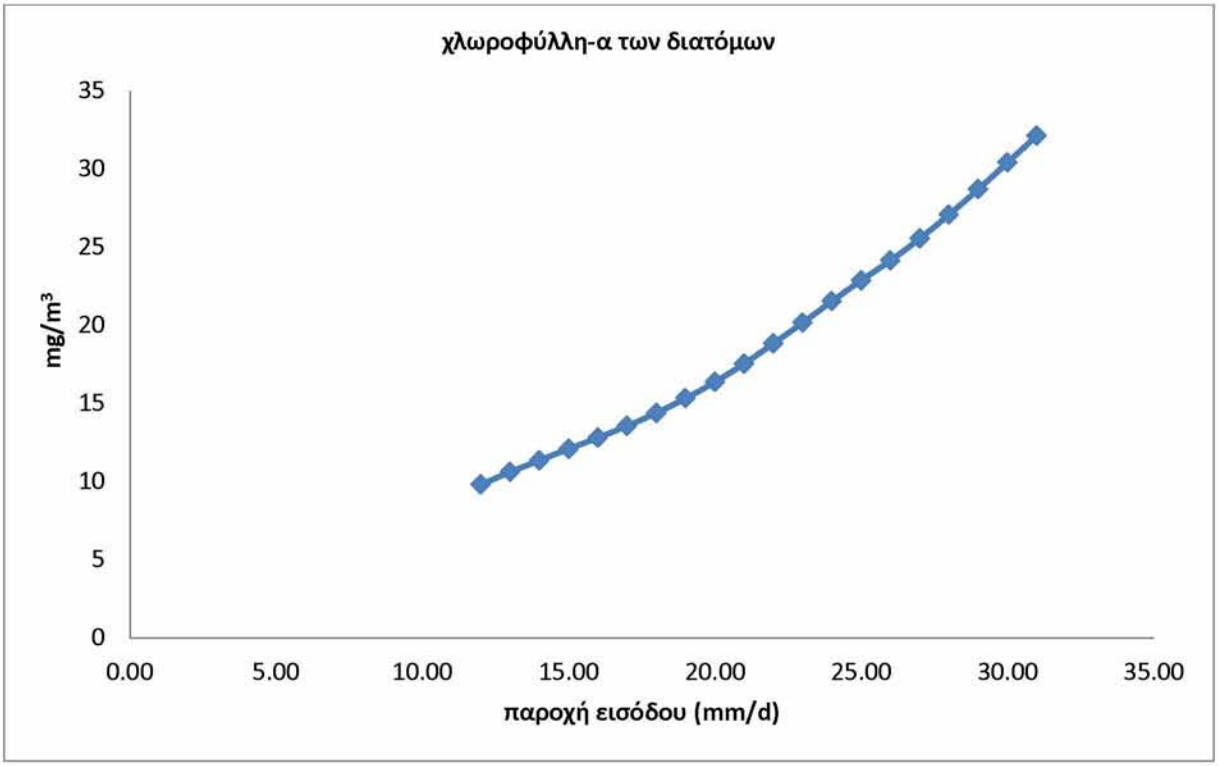


Διάγραμμα 5.56: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

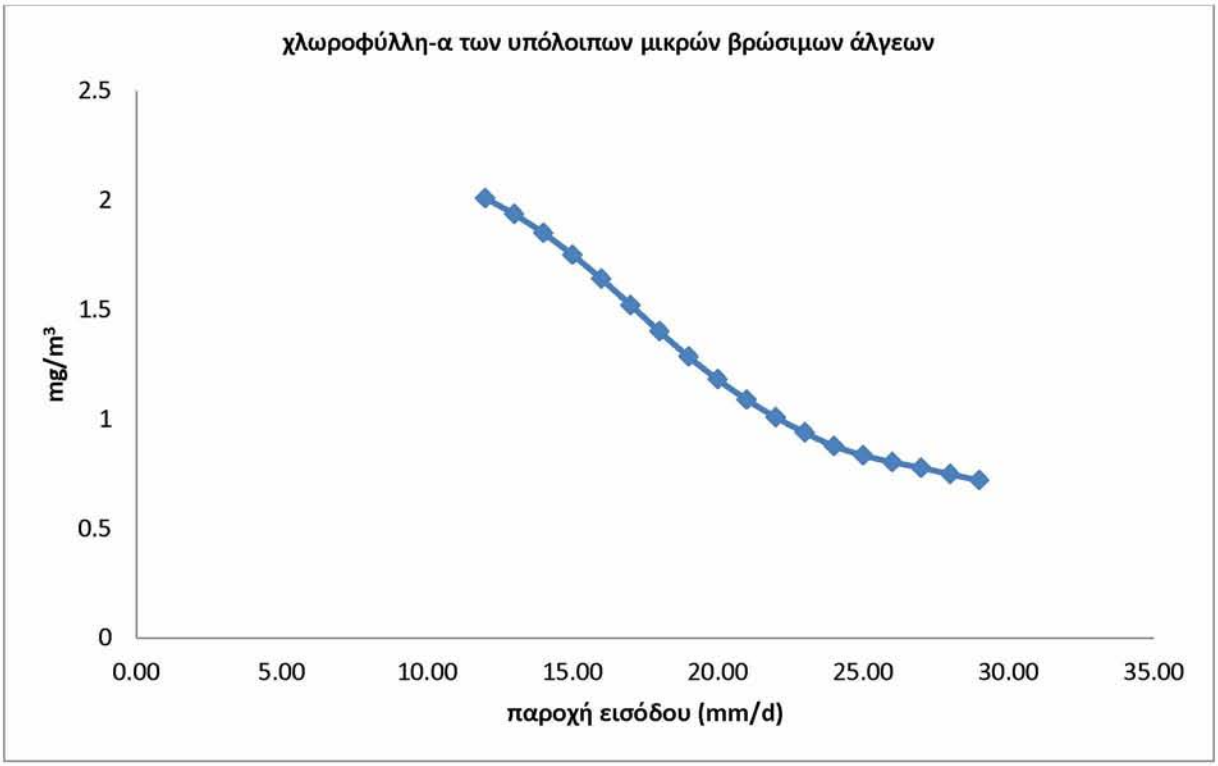


Διάγραμμα 5.57: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

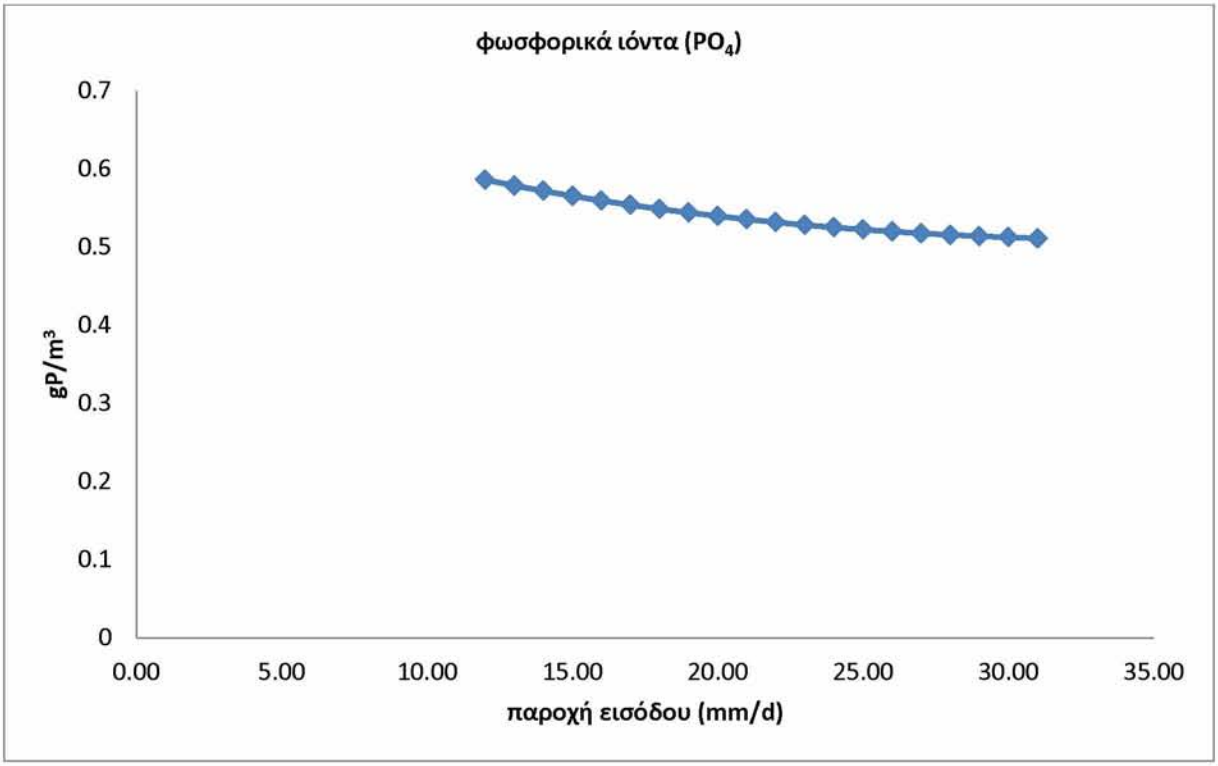


Διάγραμμα 5.58: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

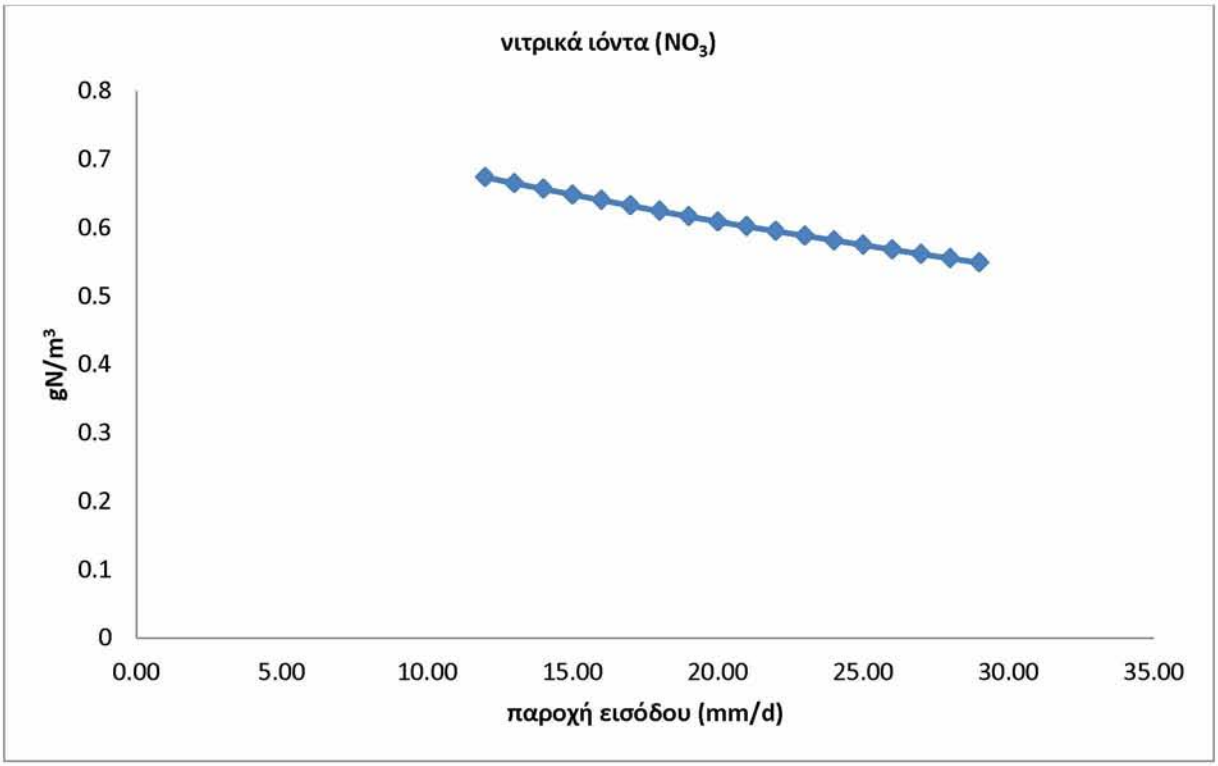


Διάγραμμα 5.59: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων των κυανοβακτηρίων – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

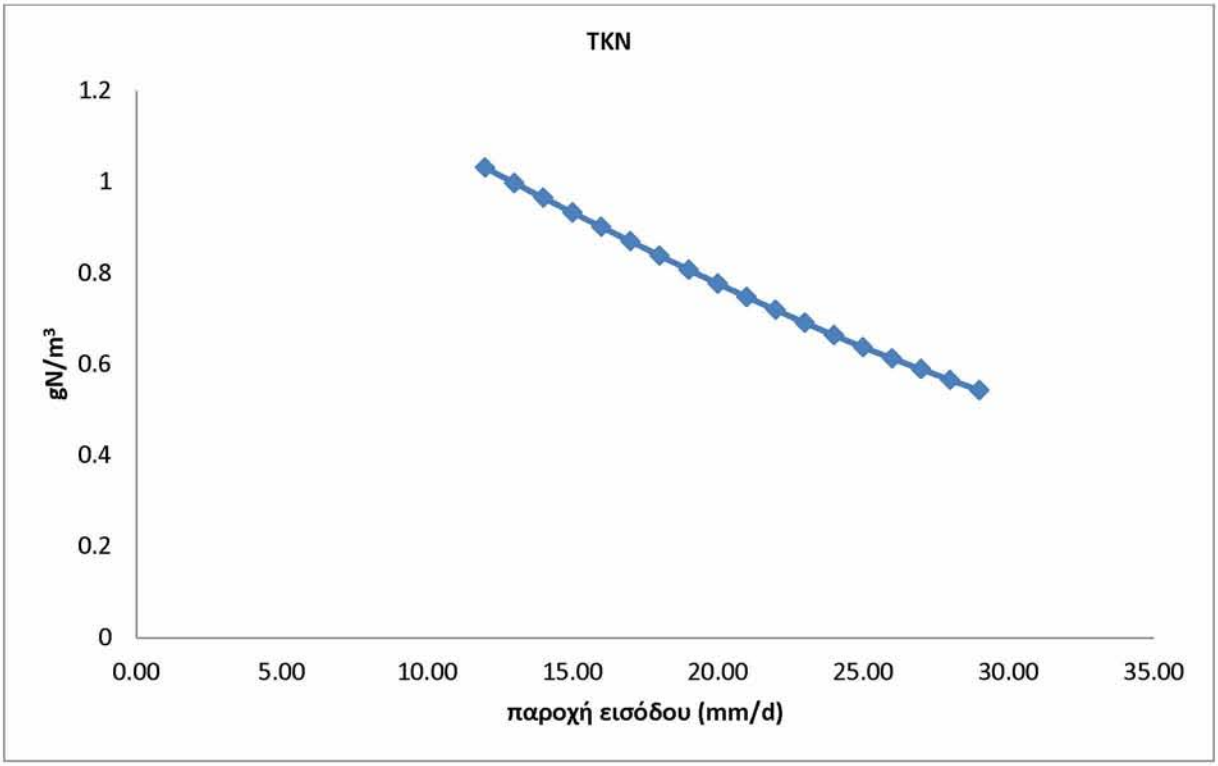


Διάγραμμα 5.60: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

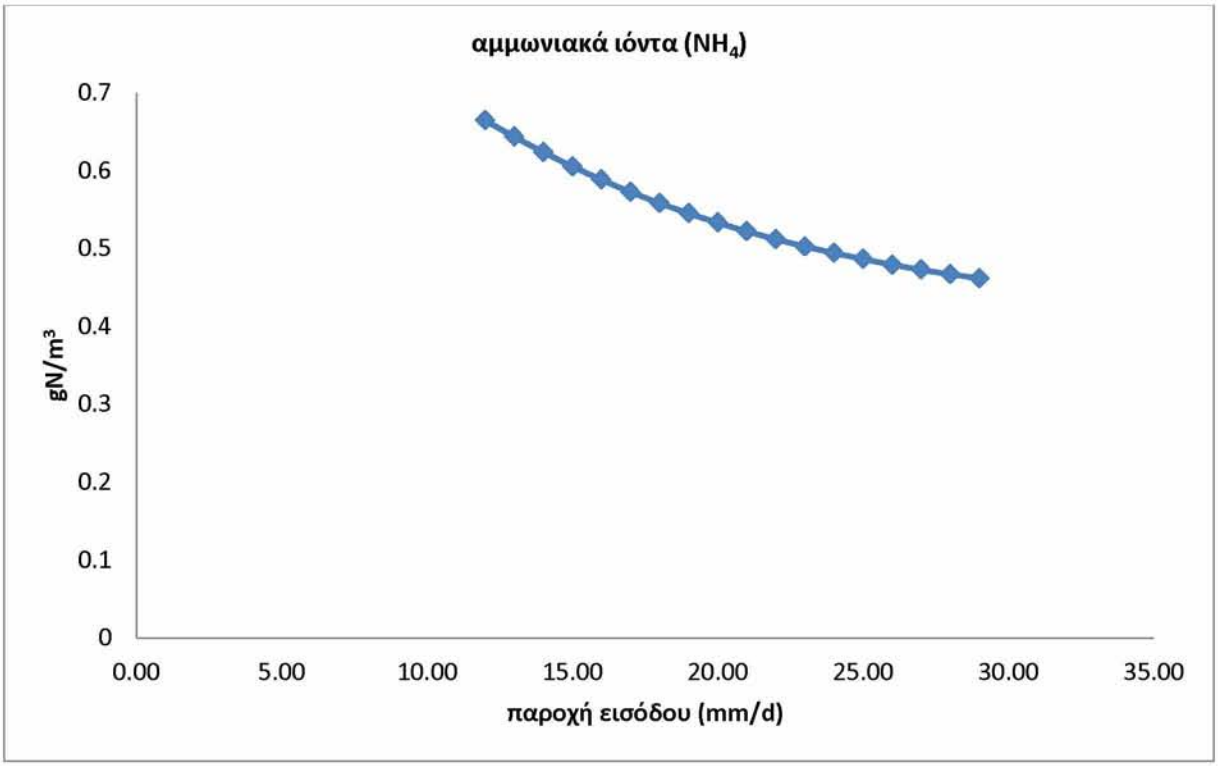


Διάγραμμα 5.61: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

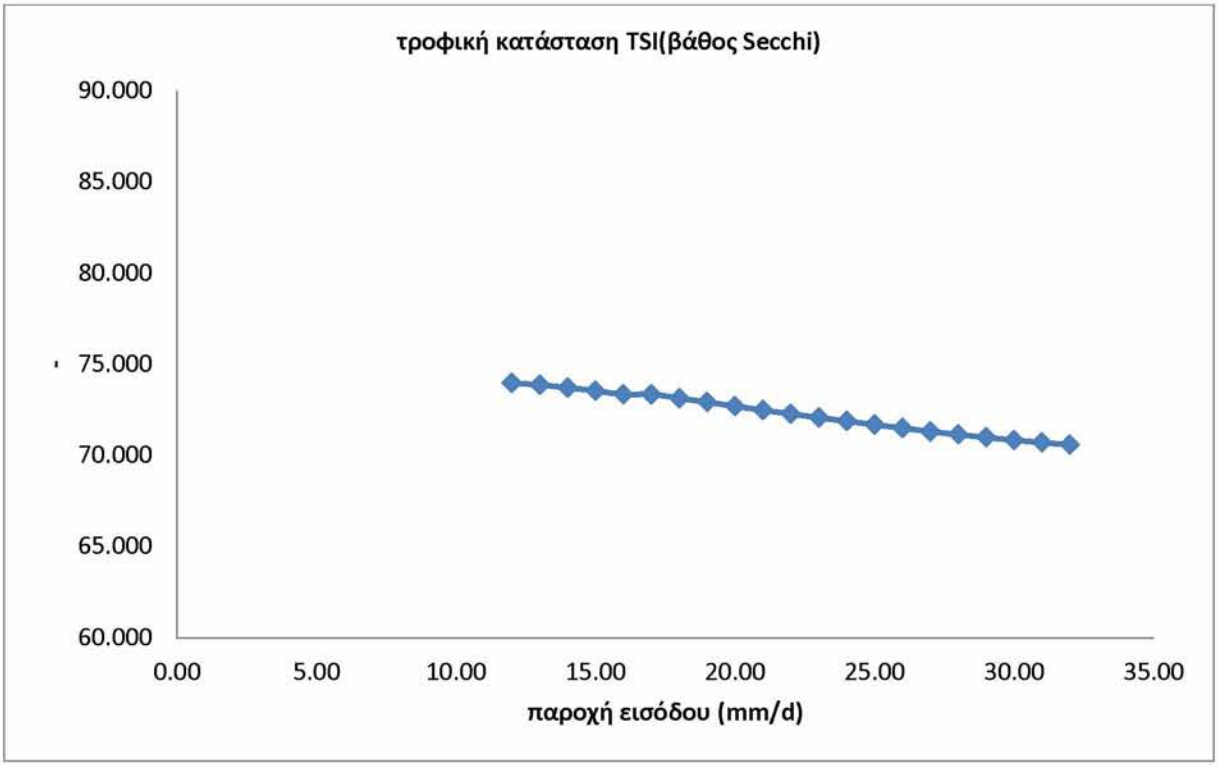


Διάγραμμα 5.62: μέσο θερινό επίπεδο TKN – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη



Διάγραμμα 5.63: μέσο θερινό επίπεδο αμμωνιακών ιόντων (NH_4) – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 5.64: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΏΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Η λίμνη Κάρλα, όπως διαπιστώνεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, βρίσκεται σε μία υπερευτροφική κατάσταση κυρίως λόγω της υψηλής ετήσιας φόρτισης με θρεπτικά. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τον κυρίως αγροτικό χαρακτήρα της ευρύτερης λεκάνης απορροής . Οι μεγάλες μάζες θρεπτικών που εισρέουν στη λίμνη προέρχονται από καλλιέργειες που έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε θρεπτικά. Επιπλέον επικρατεί ακατάσχετη σπατάλη των λιπασμάτων και καμία ορθολογιστική εφαρμογή της λίπανσης ως προς την αειφορία. (Laspidou et al., 2011)

Ο αντίκτυπος της αλόγιστης χρήσης λιπασμάτων στη λίμνη, είναι η υπερβολική φόρτιση με θρεπτικά συστατικά, φώσφορο (P) και άζωτο (N), που με τη σειρά της οδηγεί σε τροφική υποβάθμιση της λίμνης, επικράτηση των άλγεων και όλα τα επακόλουθα του ευτροφισμού.

Είναι προφανές, ότι μεταξύ των μέτρων διαχείρισης, βασικότερο αποτελεί η άμεση μείωση των επιπέδων των θρεπτικών που εισέρχονται στη λίμνη. Τα τωρινά επίπεδα της φόρτισης θρεπτικών εκτιμώνται περί τα 10,26 g N /m^2/yr και 0.934 g P /m^2/yr (Κάγκαλου κ.α. 2012; Kagalou et al, 2008). Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της φόρτισης θρεπτικών στην τροφική κατάσταση της λίμνης. Εξετάζεται εύρος φόρτισης από μηδενική φόρτιση Αζώτου (N) έως 30 g N /m^2/yr. Εξετάζονται ακραίες και μη εφικτές τιμές φόρτισης για λόγους πληρότητας, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζουν περισσότερο οι τιμές από 4 έως 12 g N /m^2/yr , καθώς γίνεται έλεγχος της τροφικής κατάστασης της λίμνης για δραστική μείωση των θρεπτικών έως και μια μικρή αύξηση. Η αναλογία φωσφόρου- αζώτου διατηρείται σταθερή 1 προς 10.

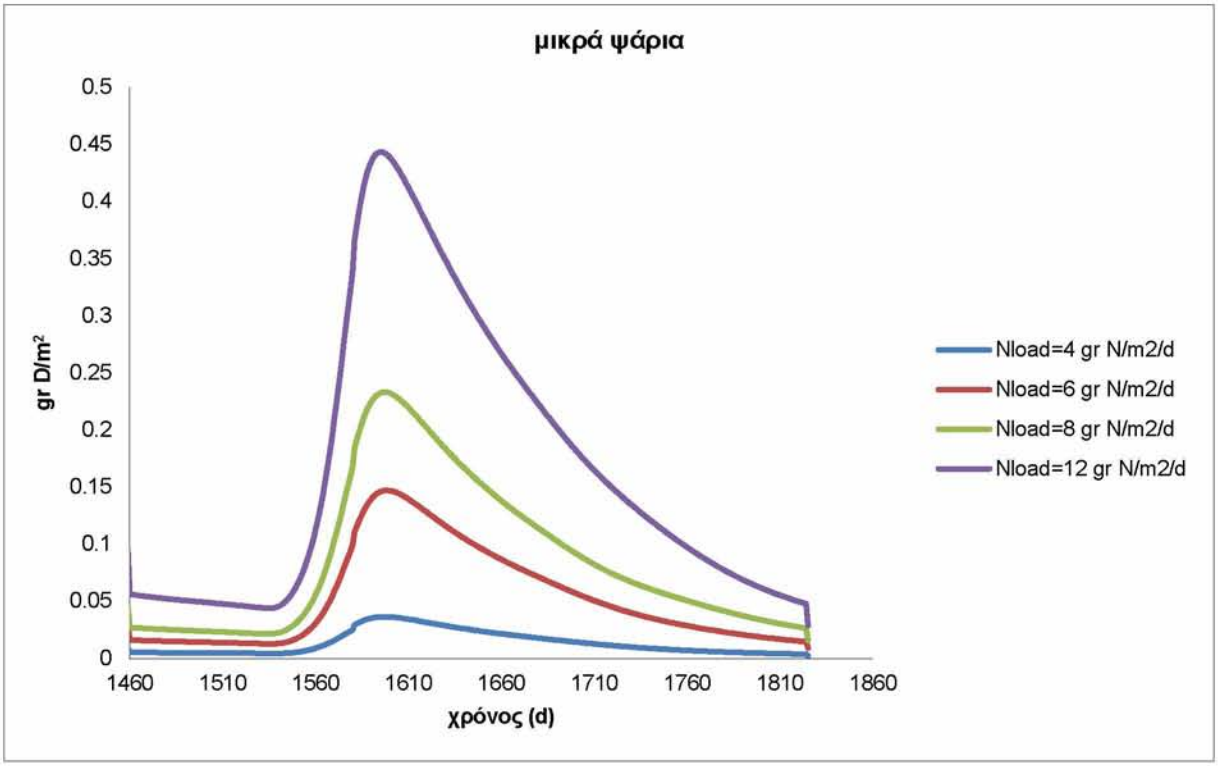
6.1 Τάσεις φυσικών μεγεθών της λίμνης για τη διάρκεια ενός τυπικού έτους για 4, 16, 8 και 12 gr N/m^2 και χαμηλή στάθμη λίμνης

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 6.1 έως 6.4, η φόρτιση με θρεπτικά παίζει σημαντικό ρόλο στην μάζα των μικρών και μεγάλων ψαριών. Στα μικρά ψάρια η επίδραση αφορά κυρίως στους θερινούς μήνες ενώ είναι ενδεικτικός ο δεκαοχταπλασιασμός της μέγιστης μάζας για τριπλασιασμό τον θρεπτικών. Τα μεγάλα ψάρια για τριπλασιασμό του φορτίου θρεπτικών τετραπλασιάζονται περίπου, ενώ διατηρούν σχεδόν σταθερή τη μάζα τους στο πέρας του χρόνου. Τα αρπακτικά ψάρια δεν επηρεάζονται, σχεδόν καθόλου από την αλλαγή της φόρτισης. Η αύξηση της μάζας μιας κατηγορίας ψαριών, δεν είναι το ζητούμενο της βελτίωσης της τροφικής κατάστασης μιας λίμνης. Σκοπός είναι η διατήρηση μιας ισορροπίας μεταξύ των διαφορετικών ειδών και ηλικιών των ψαριών, όπως και η επιβίωση με επάρκεια οξυγόνου όλων των ομάδων.

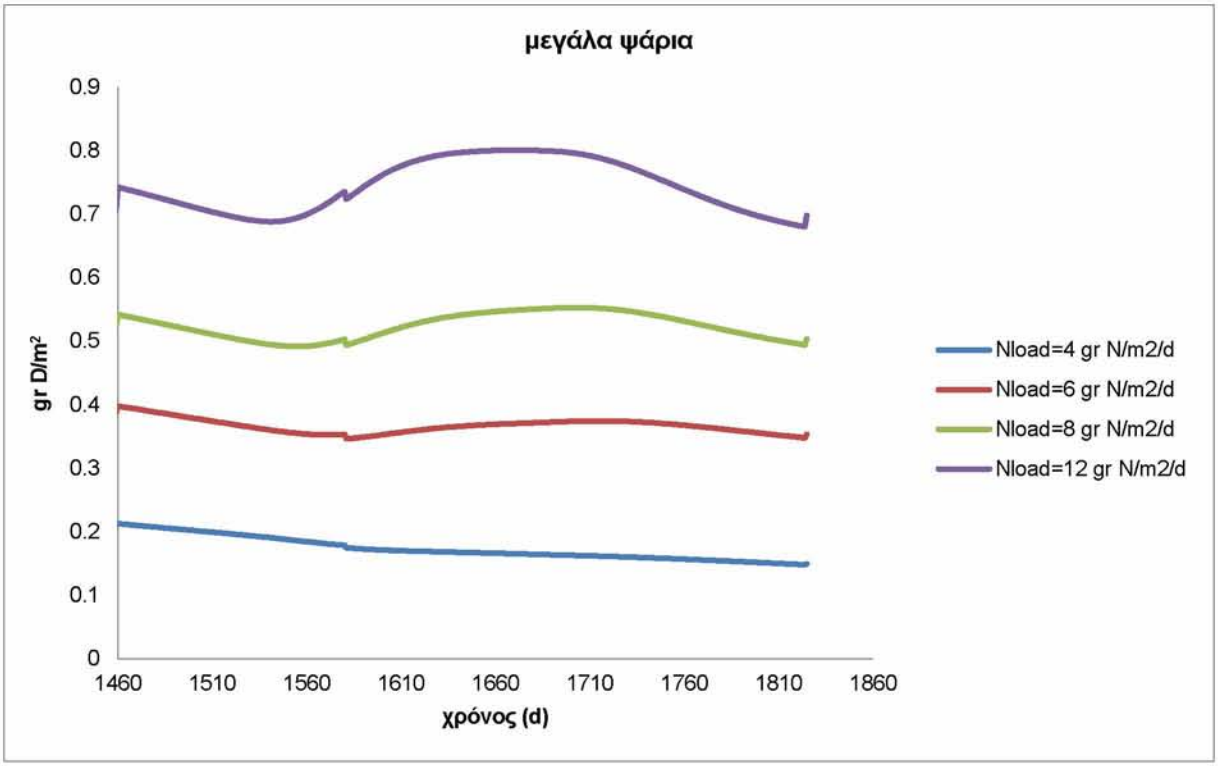
Το διαλυμένο οξυγόνο όπως είναι φυσικό μειώνεται κατά τη θερινή περίοδο που αυξάνονται τα ψάρια, ενώ διατηρεί σχεδόν τα ίδια επίπεδα για τις διάφορες φορτίσεις. Η βλάστηση αυξάνεται κατά τη μείωση της φόρτισης. Αυτό εξηγείται από την ανταγωνιστική σχέση της βλάστησης και των άλγεων και την τελική όλο και εντονότερη επικράτηση των δεύτερων σε πιο ευτροφικές συνθήκες. (Διαγράμματα 6.5 και 6.6)

Το βάθος Secchi και η χλωροφύλλη-α καθώς και οι βαθμοί TSI ακολουθούν τάσεις που αποδεικνύουν υποβάθμιση της τροφικής κατάστασης της λίμνης για υψηλότερες φορτίσεις. Συγκεκριμένα το βάθος Secchi κυμαίνεται από 0.15 m στη χειρότερη, έως 0.45m στην καλύτερη περίπτωση. Το σύνολο της χλωροφύλλης-α κυμαίνεται από 50 έως 180 mg/m^3 κατά τους χειμερινούς μήνες και από 140 έως 280 mg/m^3 κατά τους θερινούς. Σε όλες τις περιπτώσεις το σύνολο της χλωροφύλλης-α αποτελείται κυρίως από διάτομα το χειμώνα και από κυανοβακτήρια το καλοκαίρι. Ανάλογη τάση ακολουθεί το TKN. Η τροφική κατάσταση κυμαίνεται από 70 έως 90 βαθμούς TSI. Ακόμα και στην καλύτερη των περιπτώσεων, για χαμηλή στάθμη λίμνης, η λίμνη δεν είναι δυνατόν να αναβαθμιστεί σε ευτροφική από υπερευτροφική με μόνο σχέδιο διαχείρισης τη μείωση των θρεπτικών. (Διαγράμματα 6.7 έως 6.16)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

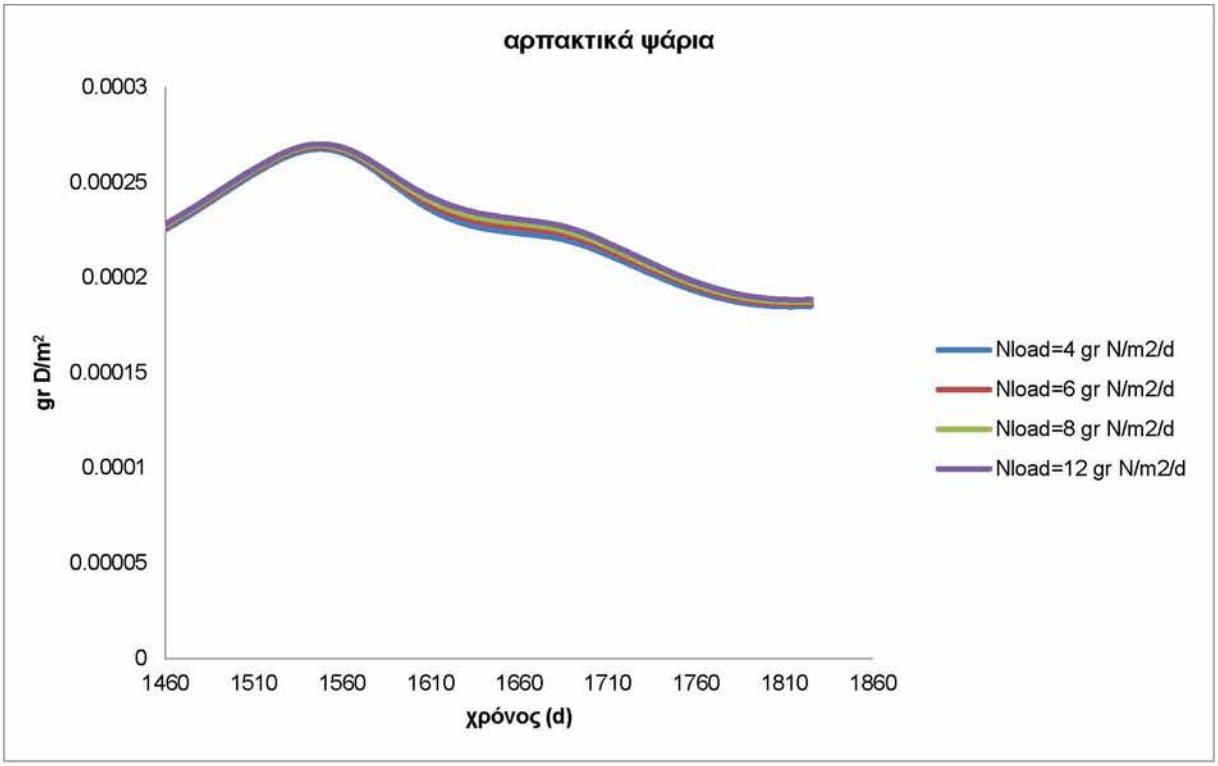


Διάγραμμα 6.35 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

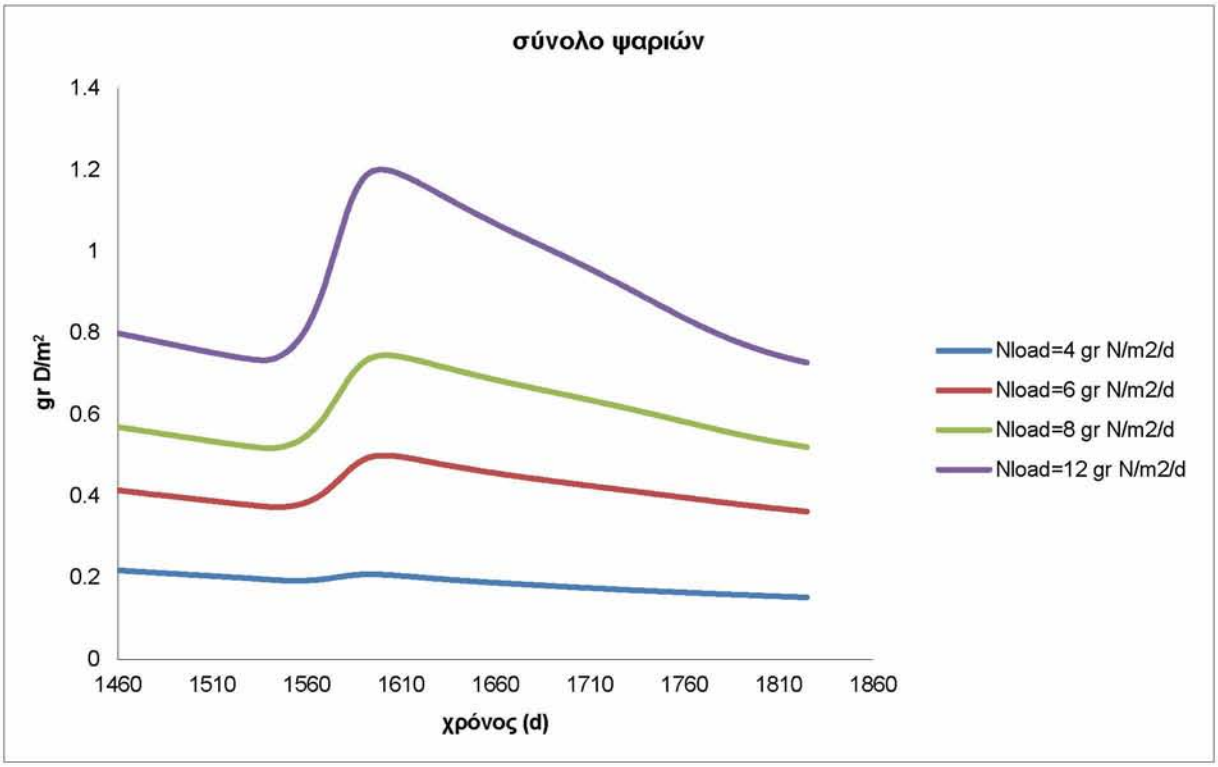


Διάγραμμα 6.36 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

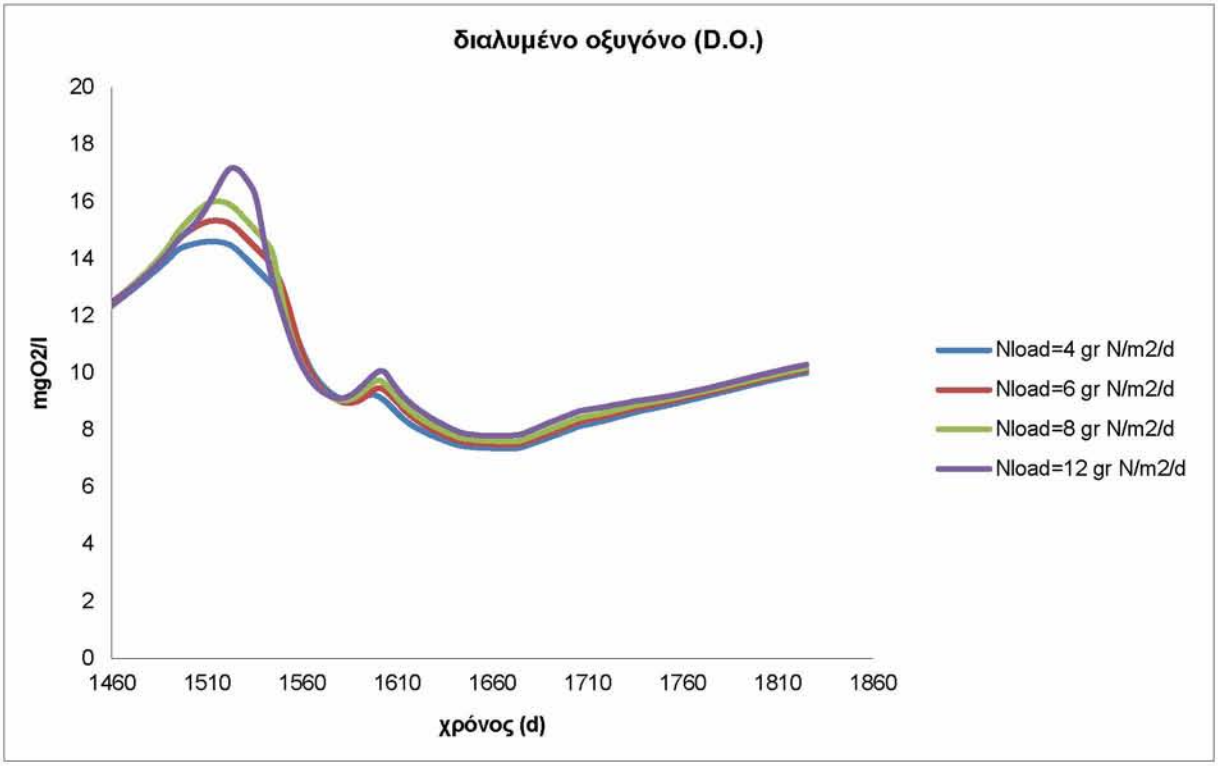


Διάγραμμα 6.37: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

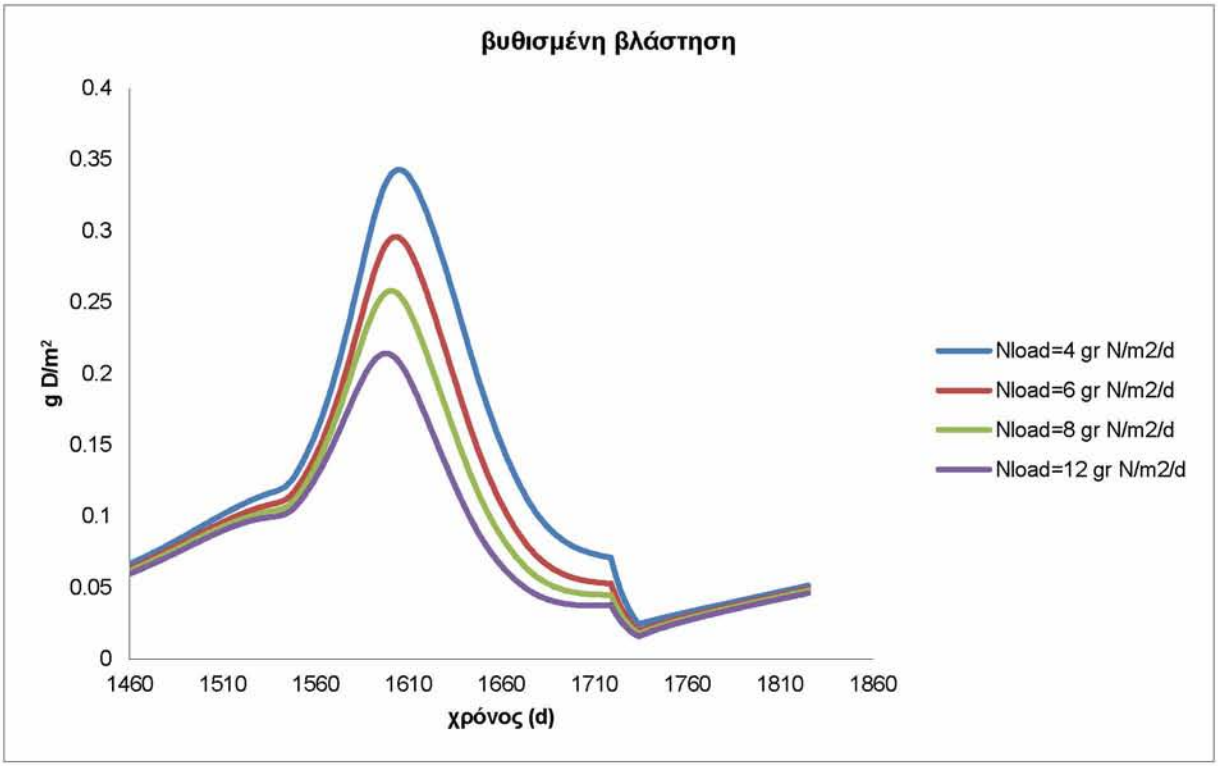


Διάγραμμα 6.38: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

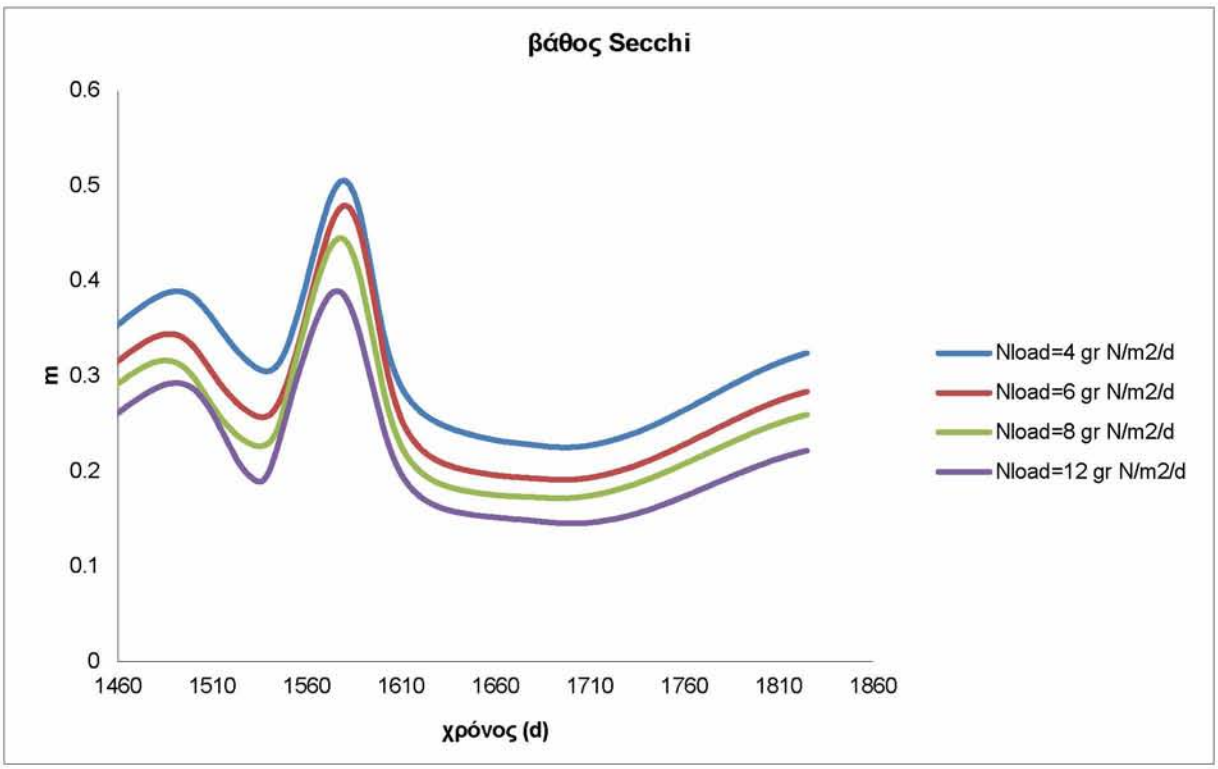


Διάγραμμα 6.39: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

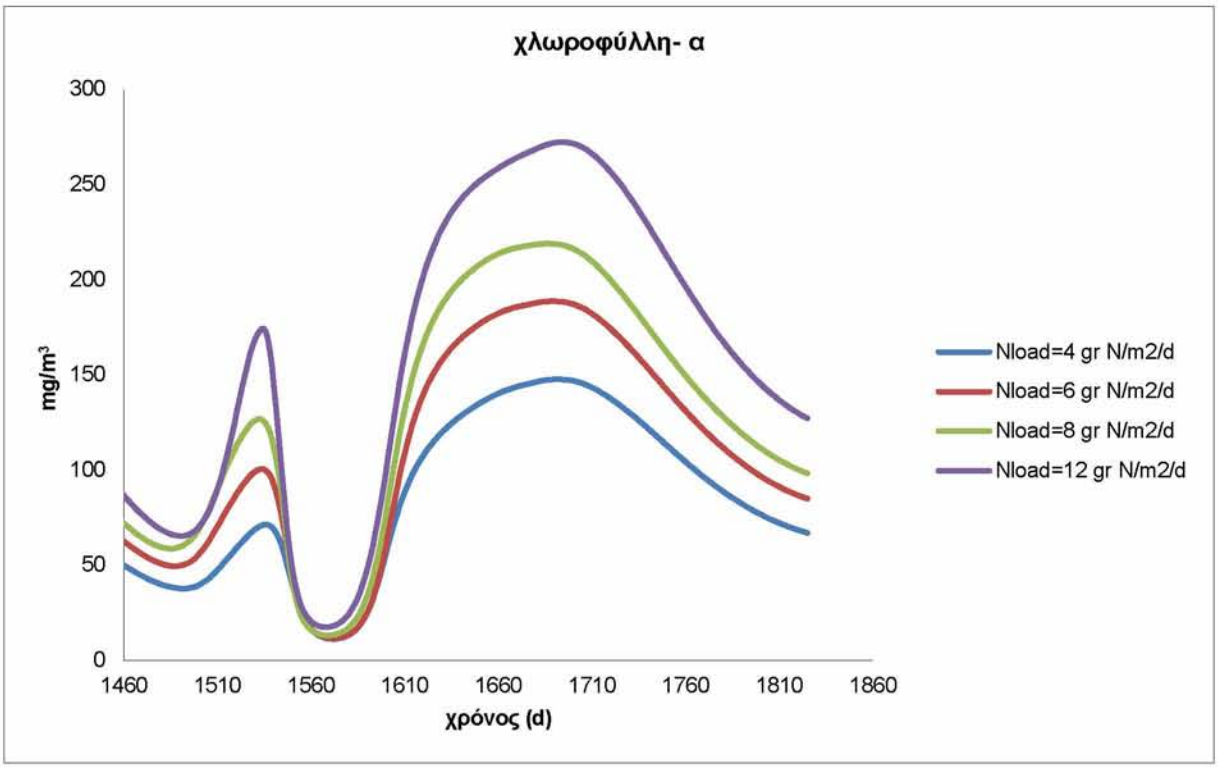


Διάγραμμα 6.40: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών εισόδου για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

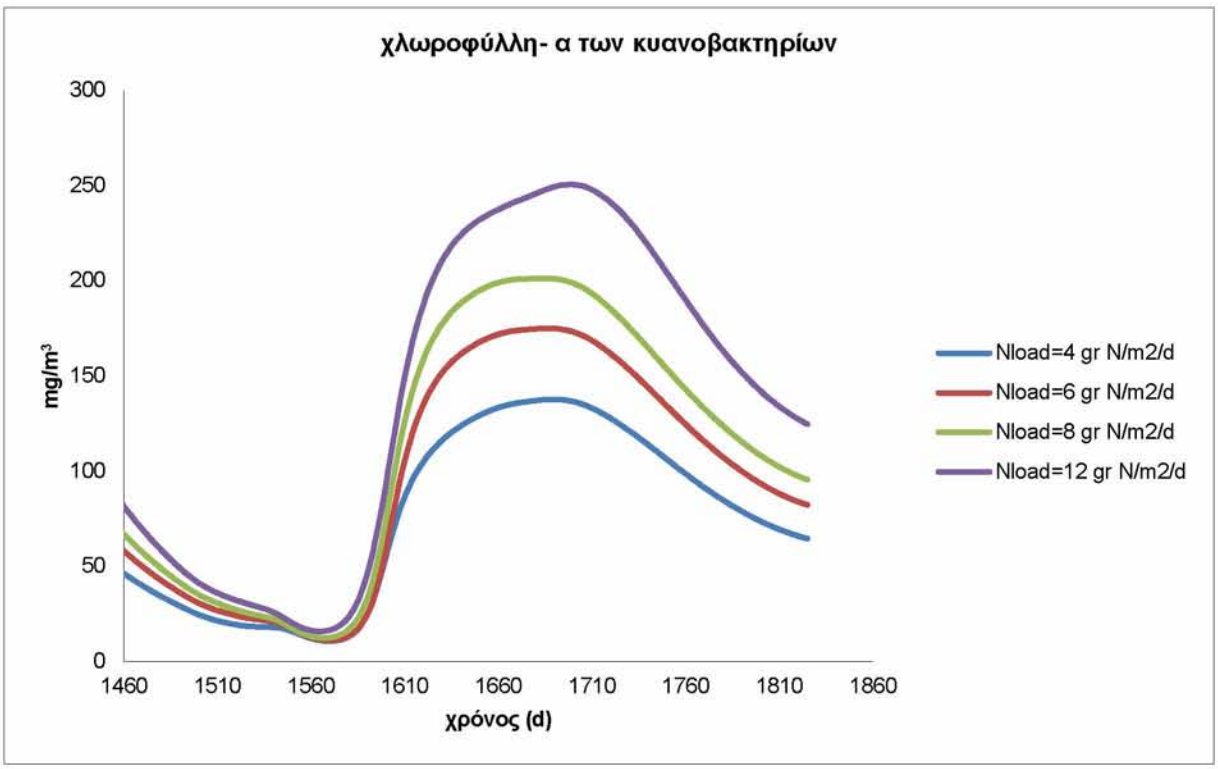


Διάγραμμα 6.41: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

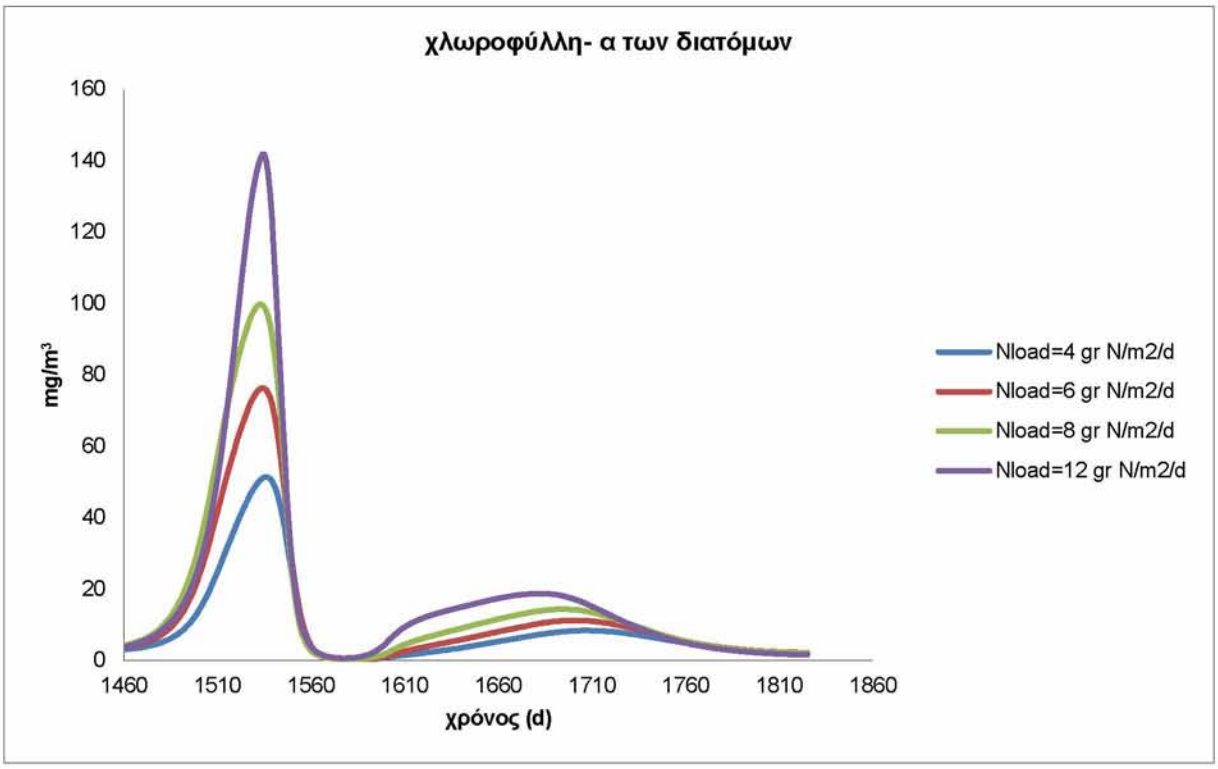


Διάγραμμα 6.42: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 6.43: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

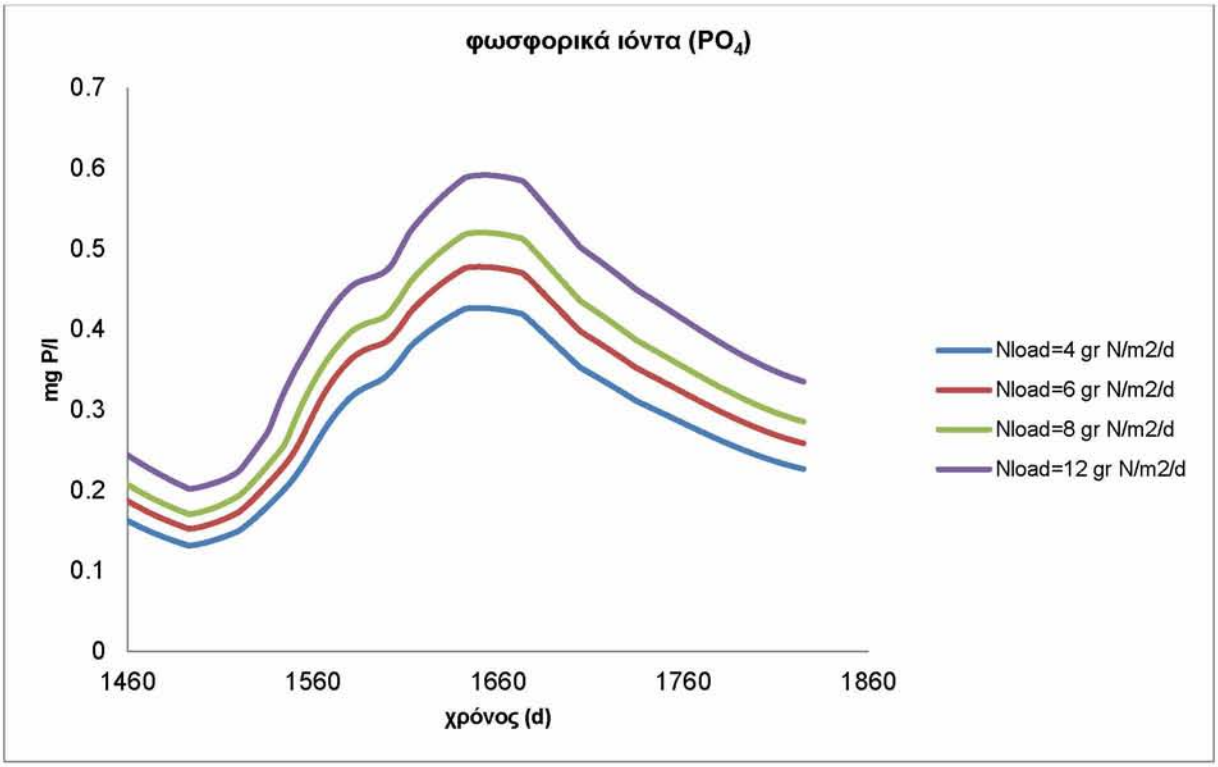


Διάγραμμα 6.10: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

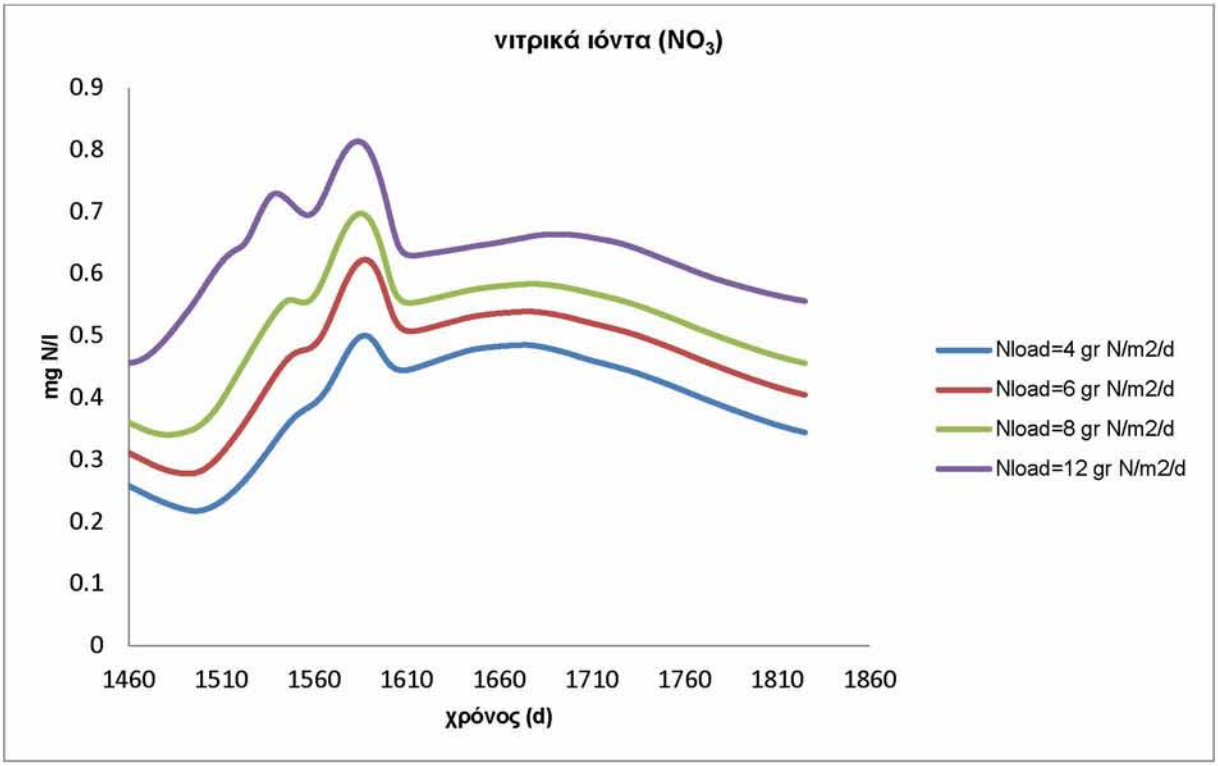


Διάγραμμα 6.44: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

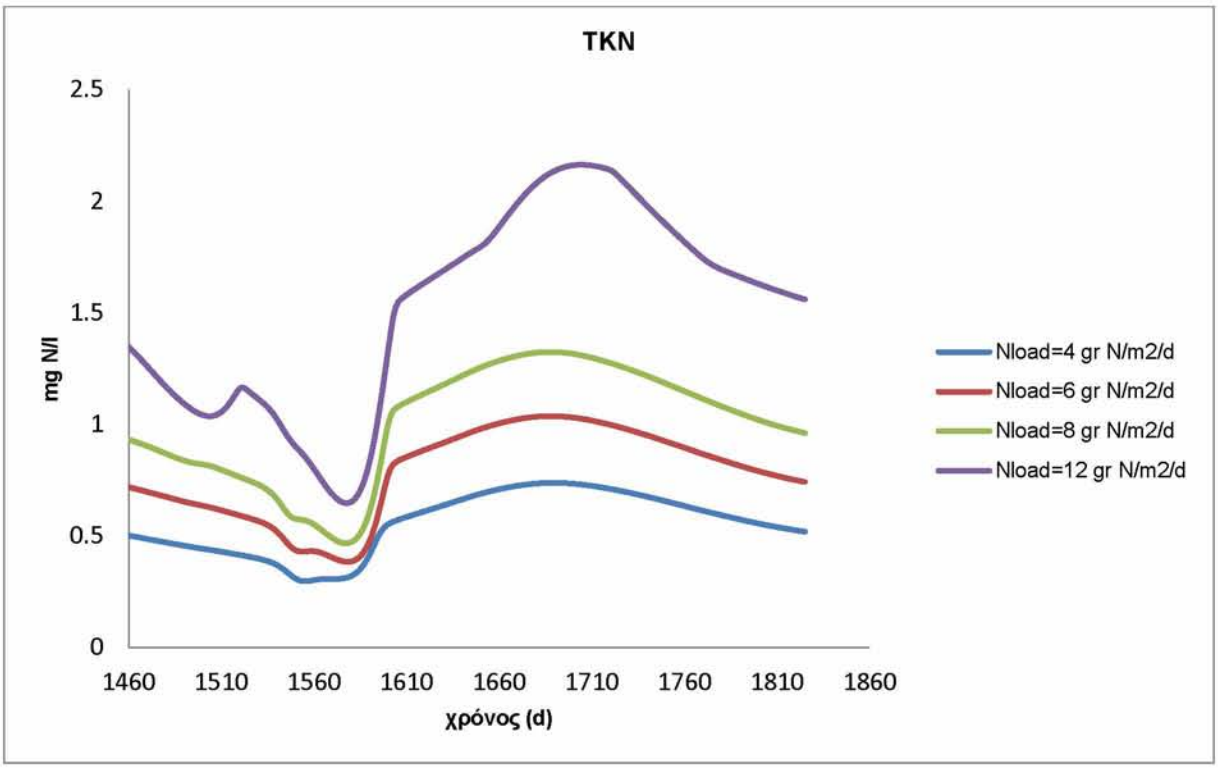


Διάγραμμα 6.45: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

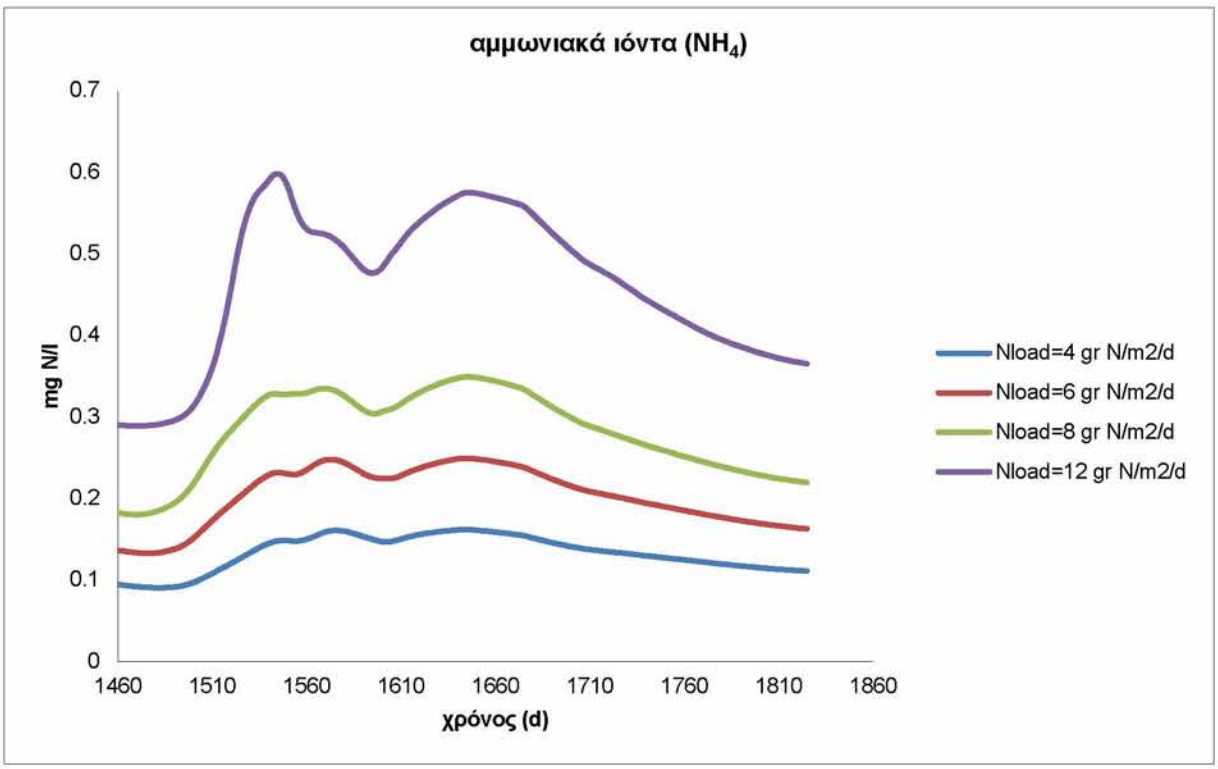


Διάγραμμα 6.46: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

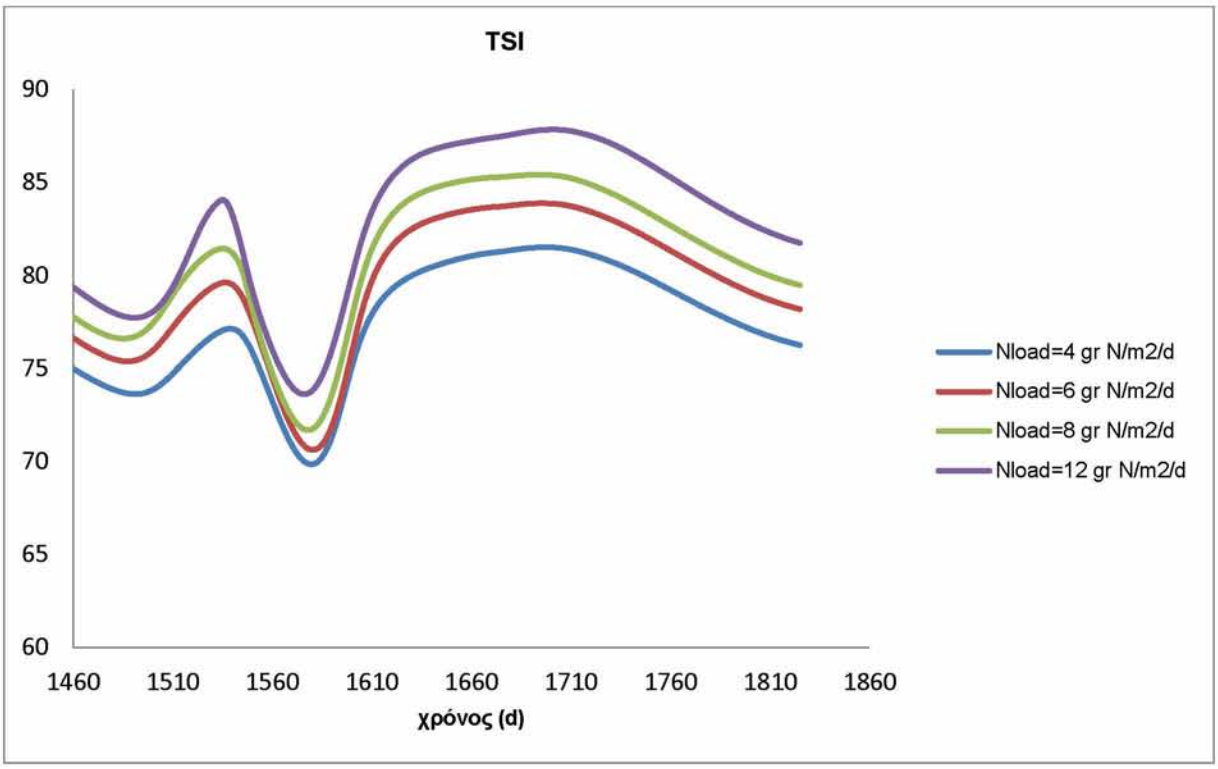


Διάγραμμα 6.47: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 6.48: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη



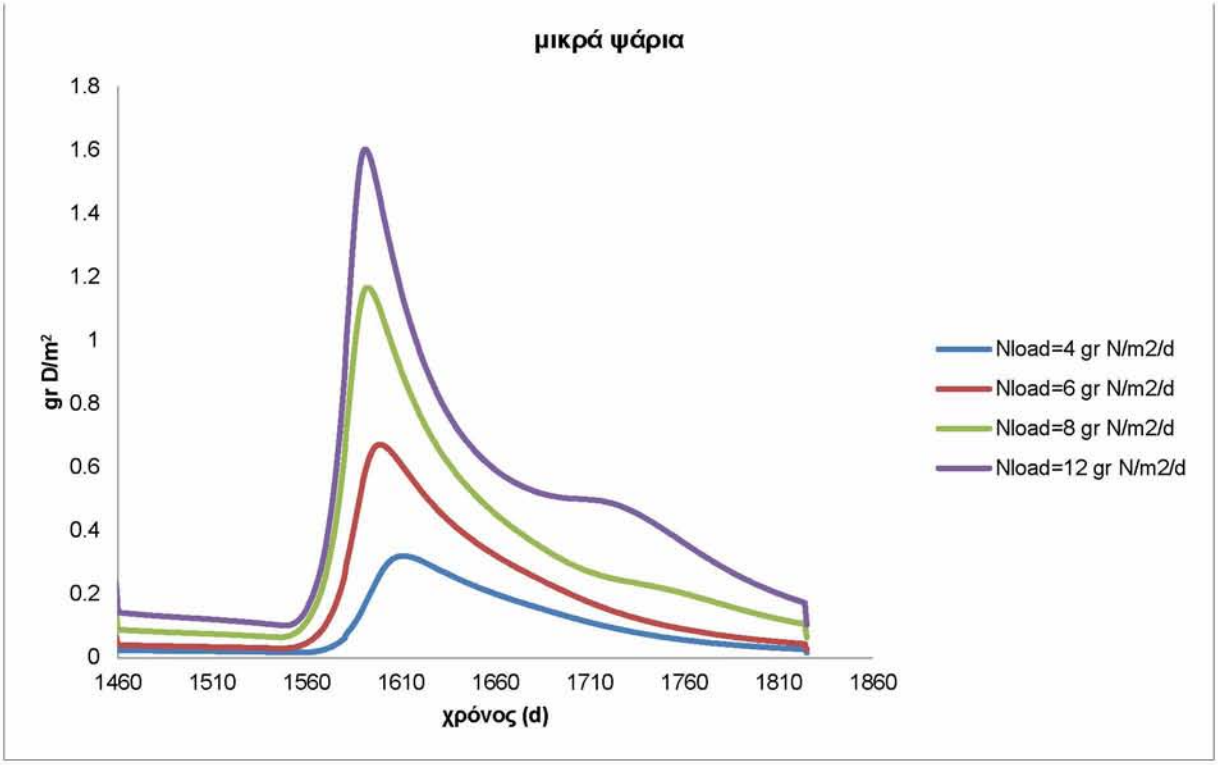
Διάγραμμα 6.49: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

6.2 Οι καμπύλες φυσικών μεγεθών της λίμνης για την διάρκεια ενός τυπικού έτους για 4, 6, 8 και 12 gr N/m² και μέση στάθμη λίμνης

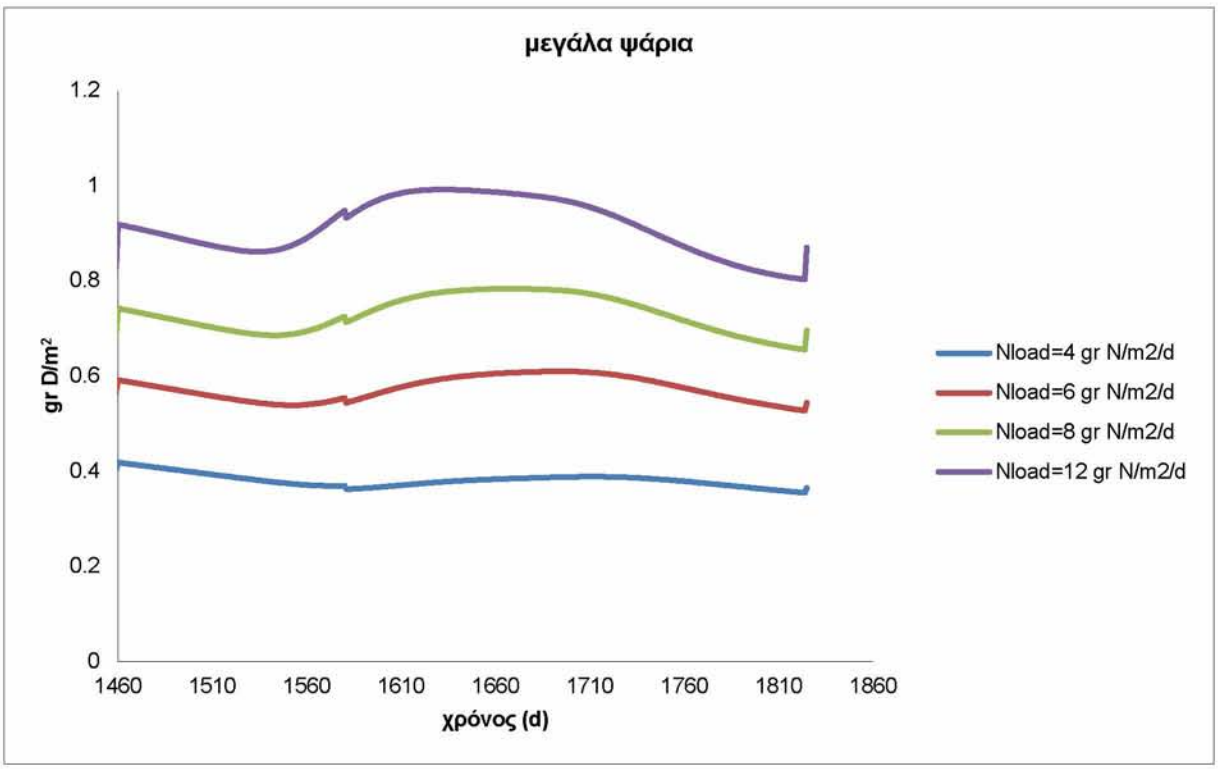
Για μέση στάθμη λίμνης, η κατάσταση βελτιώνεται αρκετά σε όλες τις φορτίσεις. Δεν εντοπίζεται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή στις τάσεις. Τα μεγέθη ακολουθούν τις ίδιες καμπύλες, αλλά σε καλύτερα, ως προς την τροφική κατάσταση, επίπεδα. (Διαγράμματα 6.17 έως 6.32)

Συγκεκριμένα, η χλωροφύλλη-α κυμαίνεται μεταξύ των 20 και 80 mg/m^3 για τον χειμώνα και μεταξύ 80 και 140 mg/m^3 το καλοκαίρι, το βάθος Secchi κυμαίνεται μεταξύ 0.3 m και 0.9 m τιμή που εμφανίζεται για χαμηλή φόρτιση θρεπτικών (4 g N /m^2/yr) την άνοιξη. Η τροφική κατάσταση εμφανίζεται συγκριτικά θεαματικά καλή τον χειμώνα, για όλες τις ενδεικτικές φορτίσεις που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.32 παραμένοντας χαμηλότερες του 70, ενώ το καλοκαίρι, ακόμα και με την χαμηλή φόρτιση των 4 g N /m^2/yr, δεν κατεβαίνει κάτω από το όριο των 70.

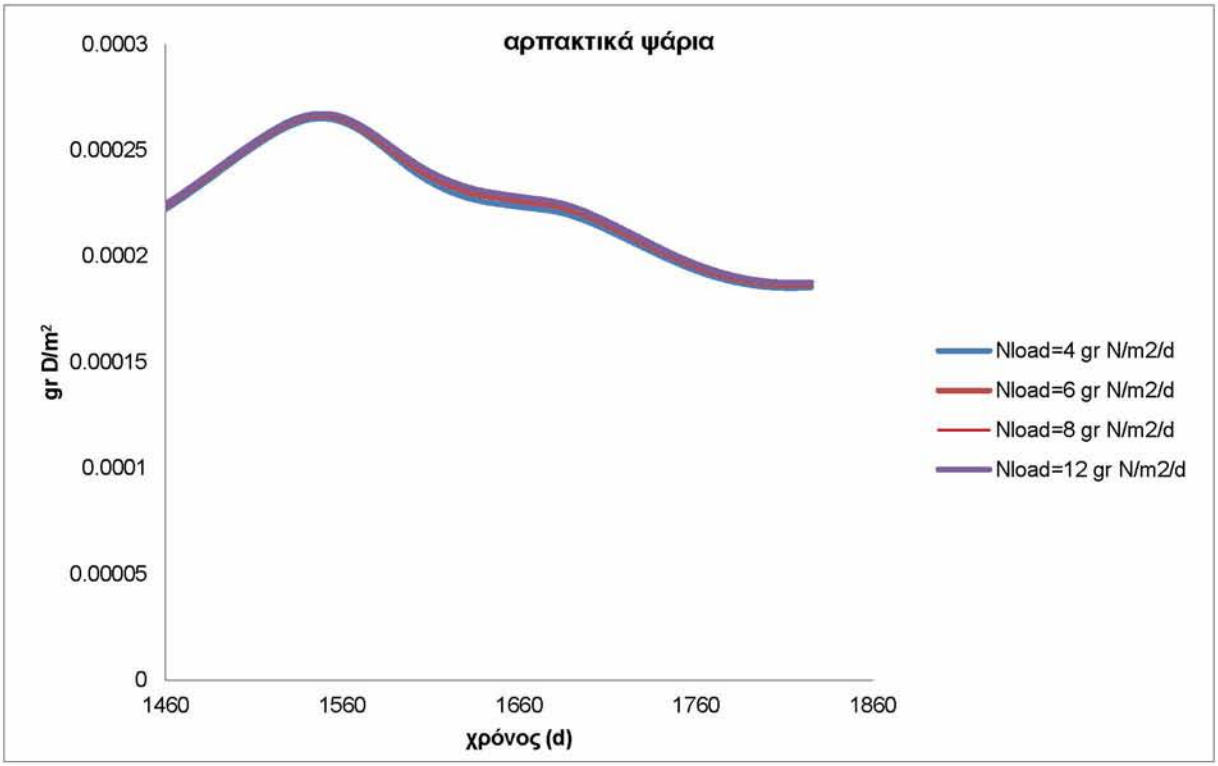


Διάγραμμα 6.50: μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

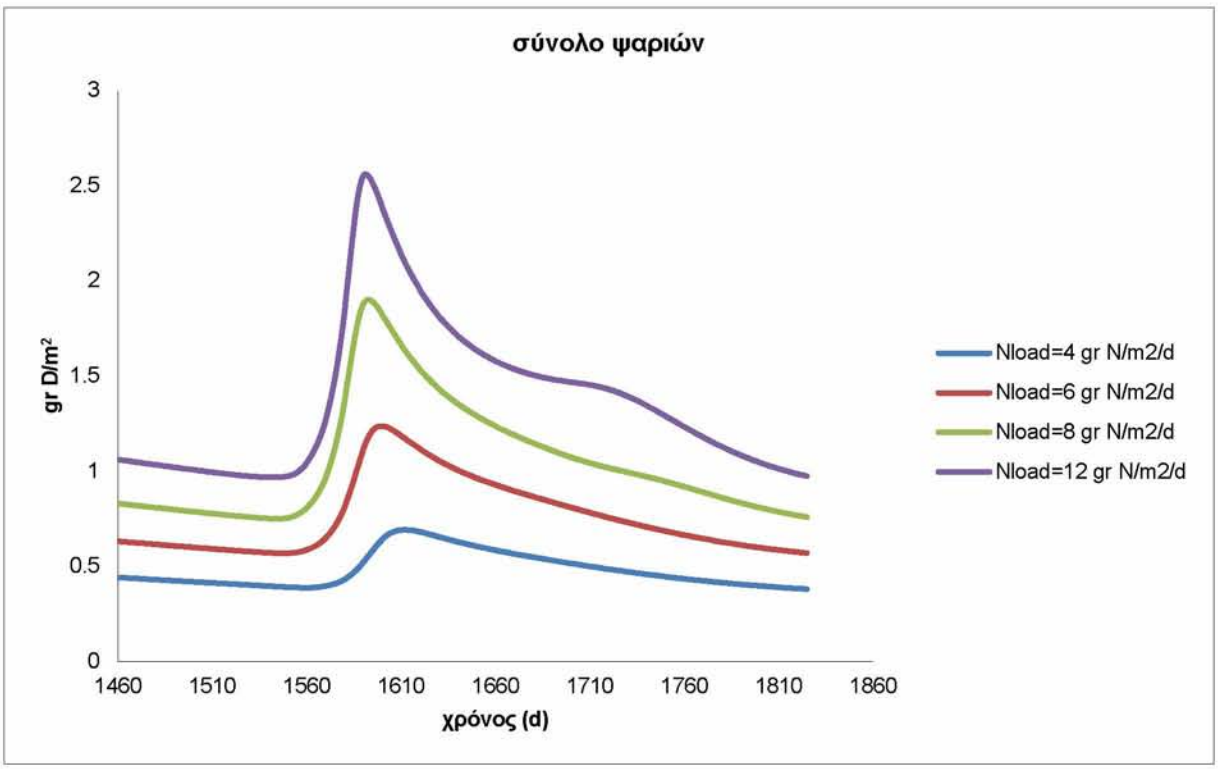


Διάγραμμα 6. 51: μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

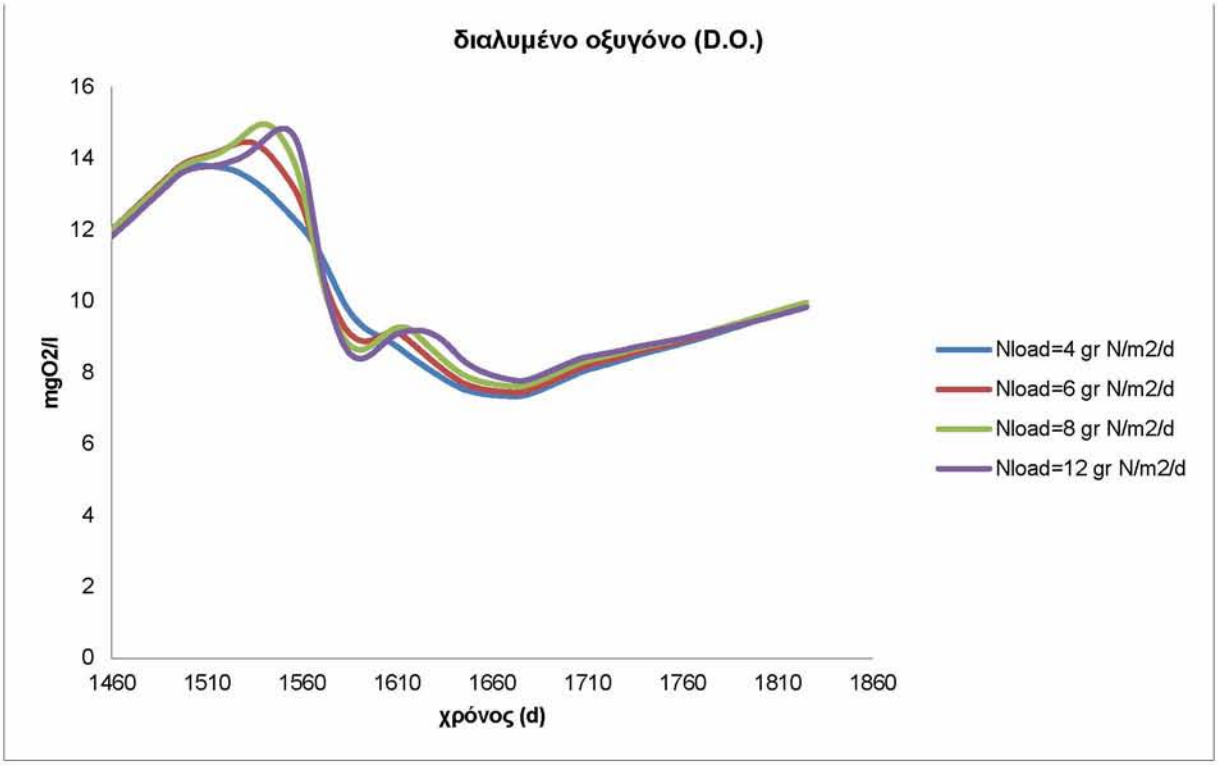


Διάγραμμα 6.52: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

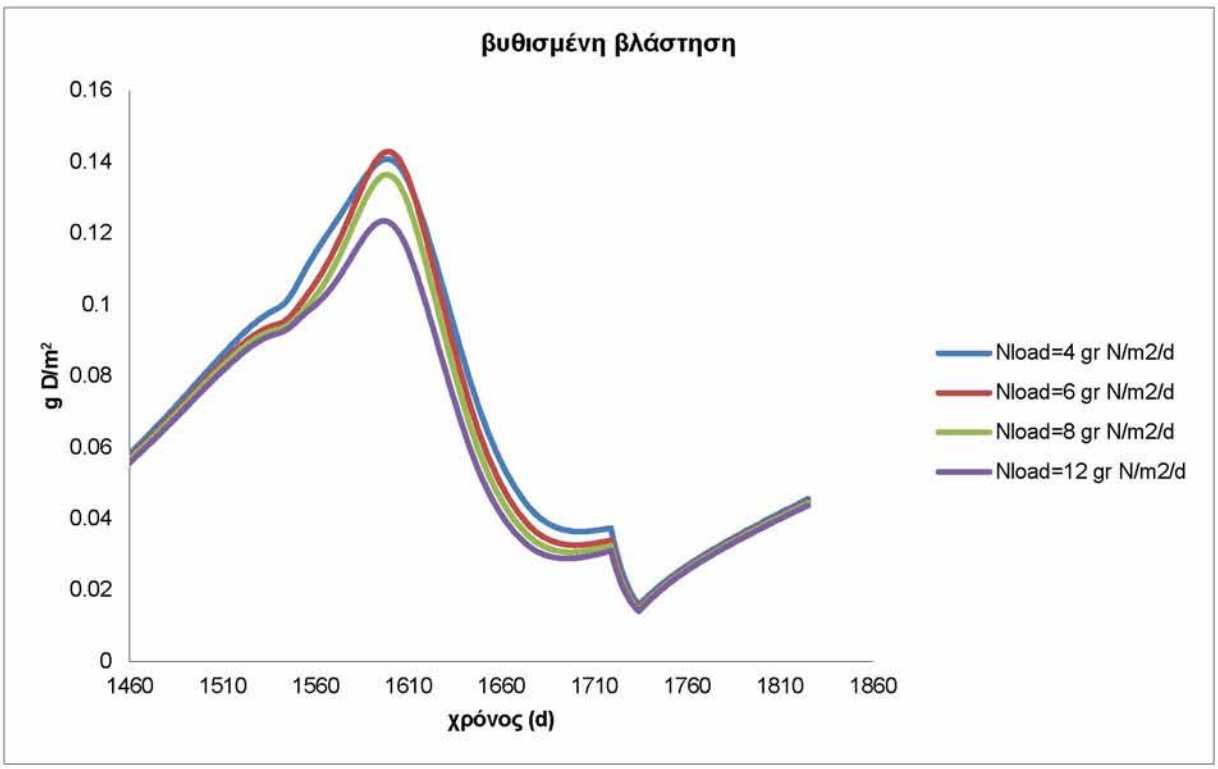


Διάγραμμα 6.20: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

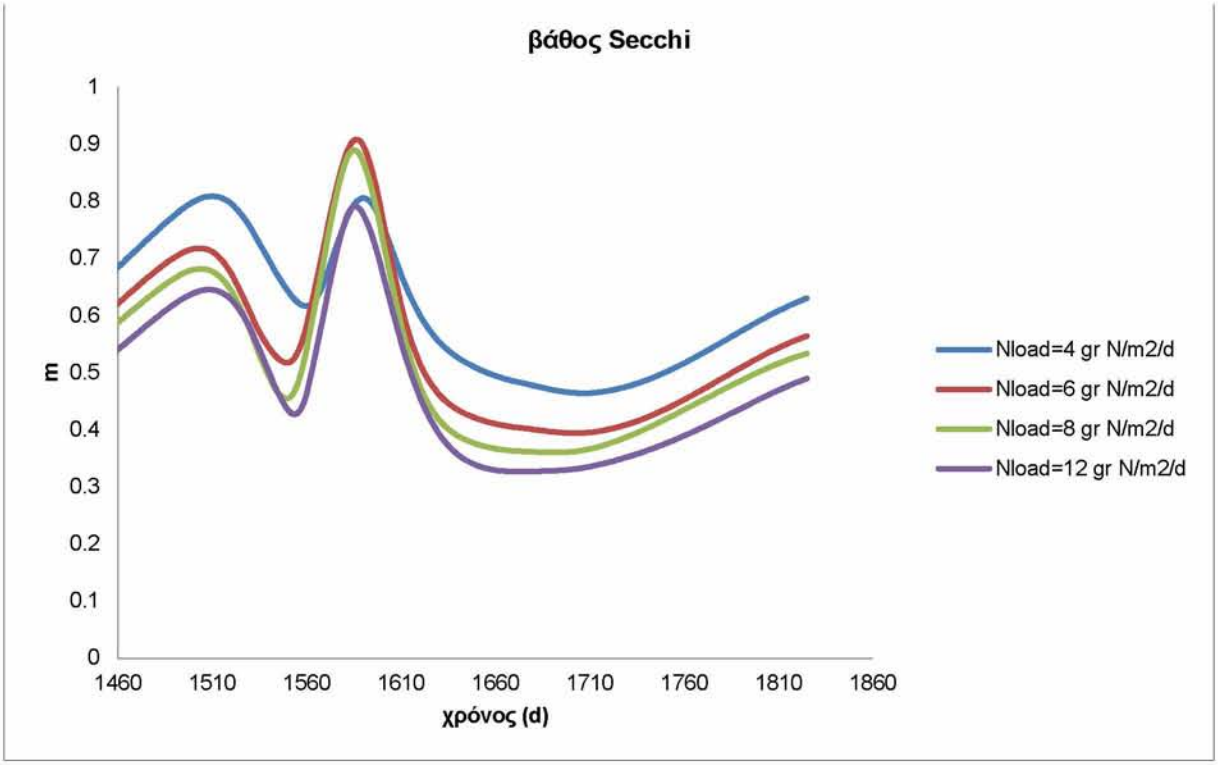


Διάγραμμα 6.53: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

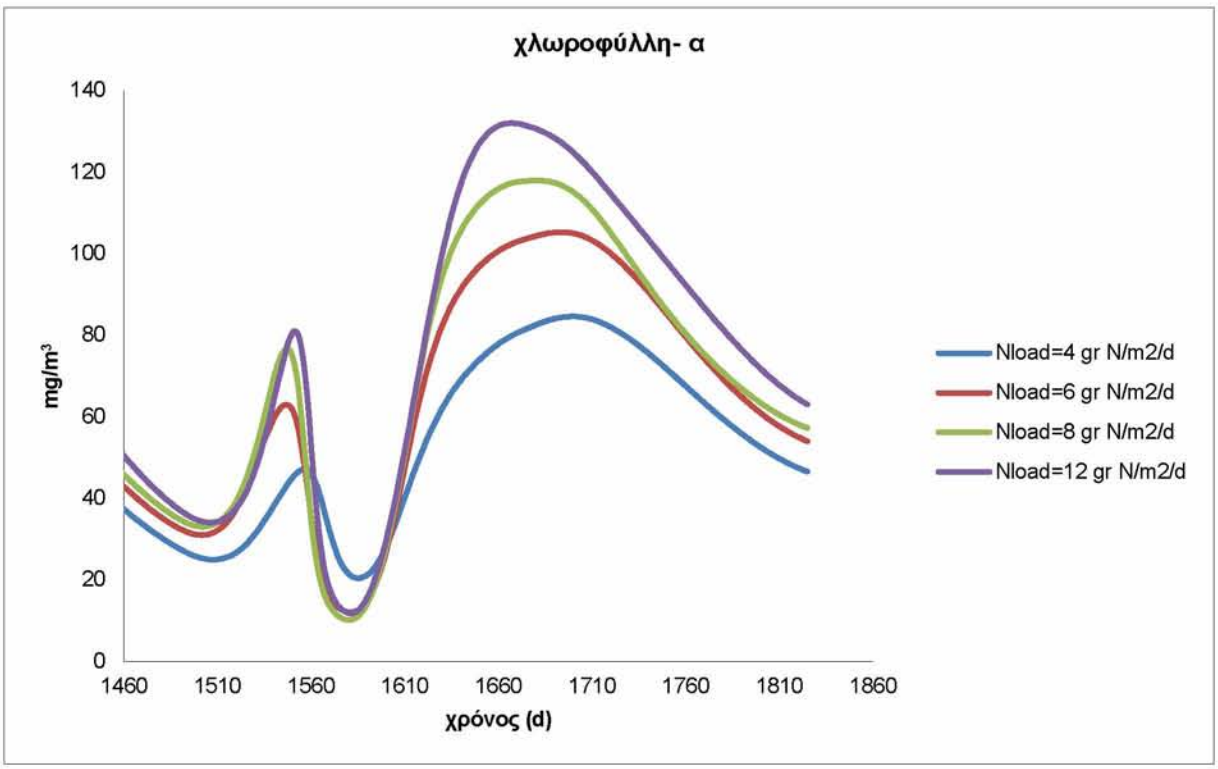


Διάγραμμα 6.22: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

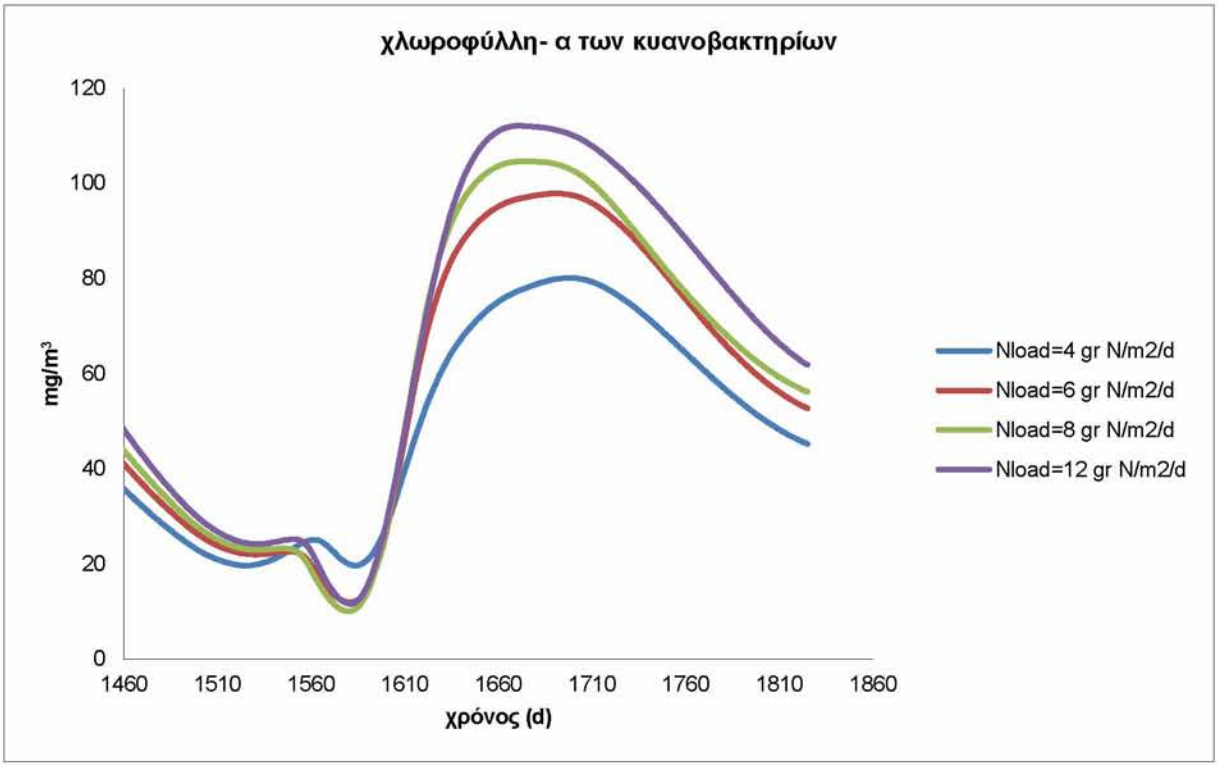


Διάγραμμα 6.23: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

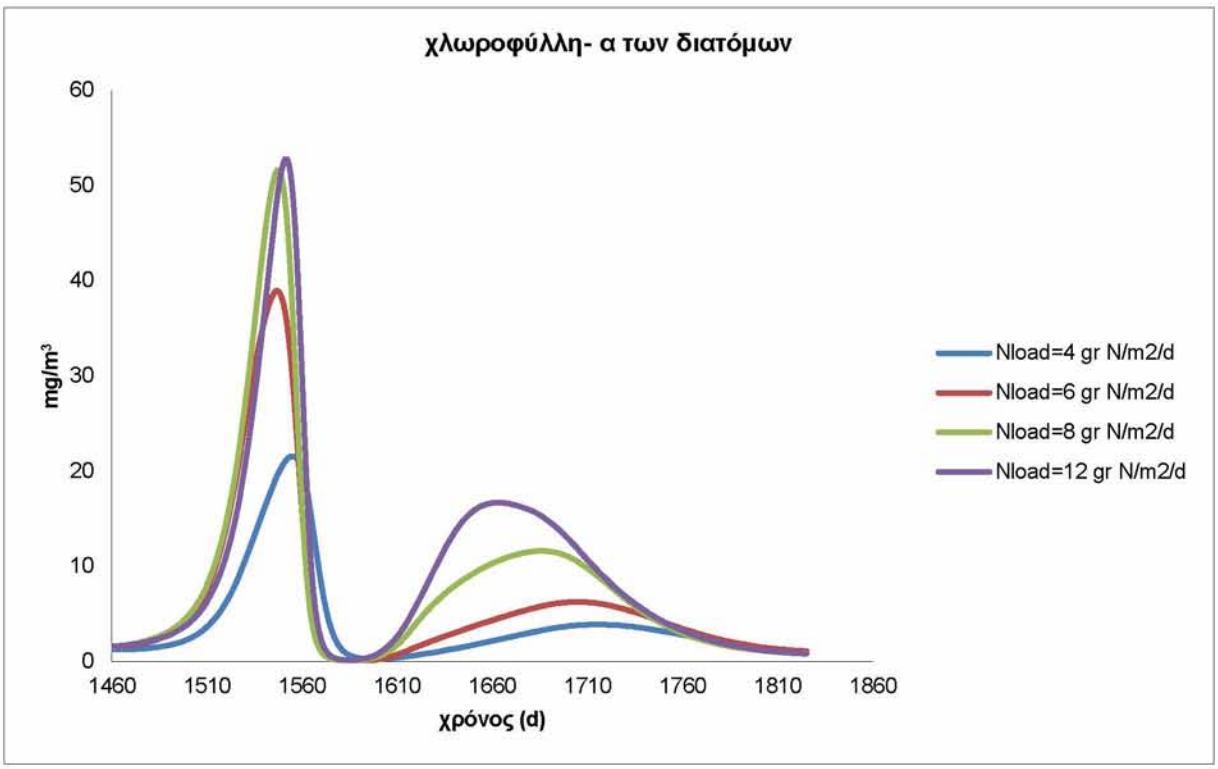


Διάγραμμα 6.54: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

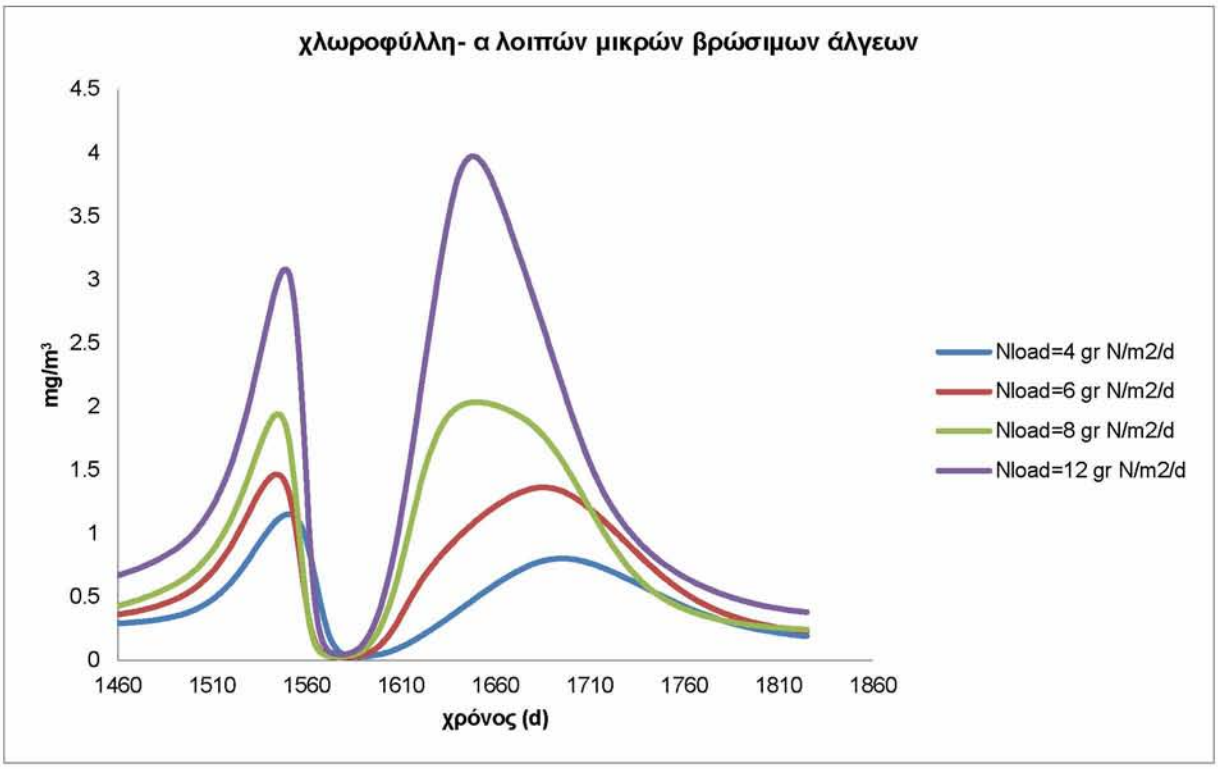


Διάγραμμα 6.55: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

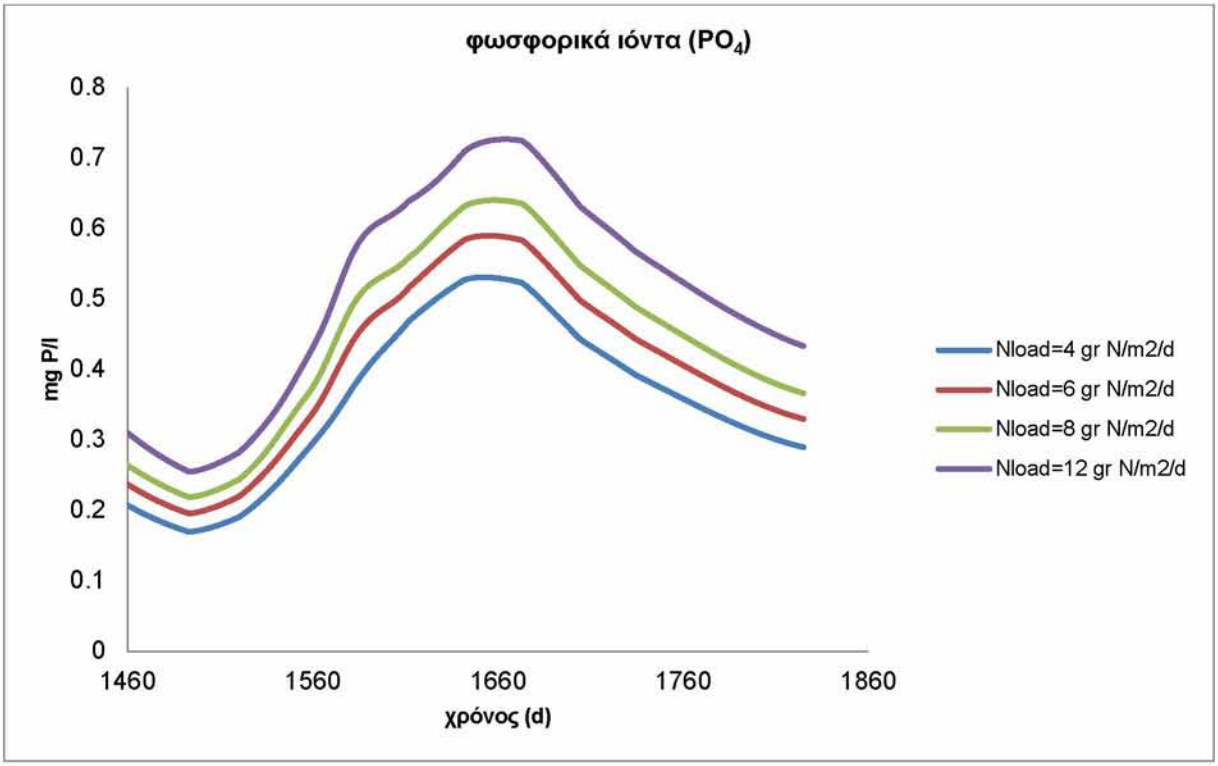


Διάγραμμα 6.56: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

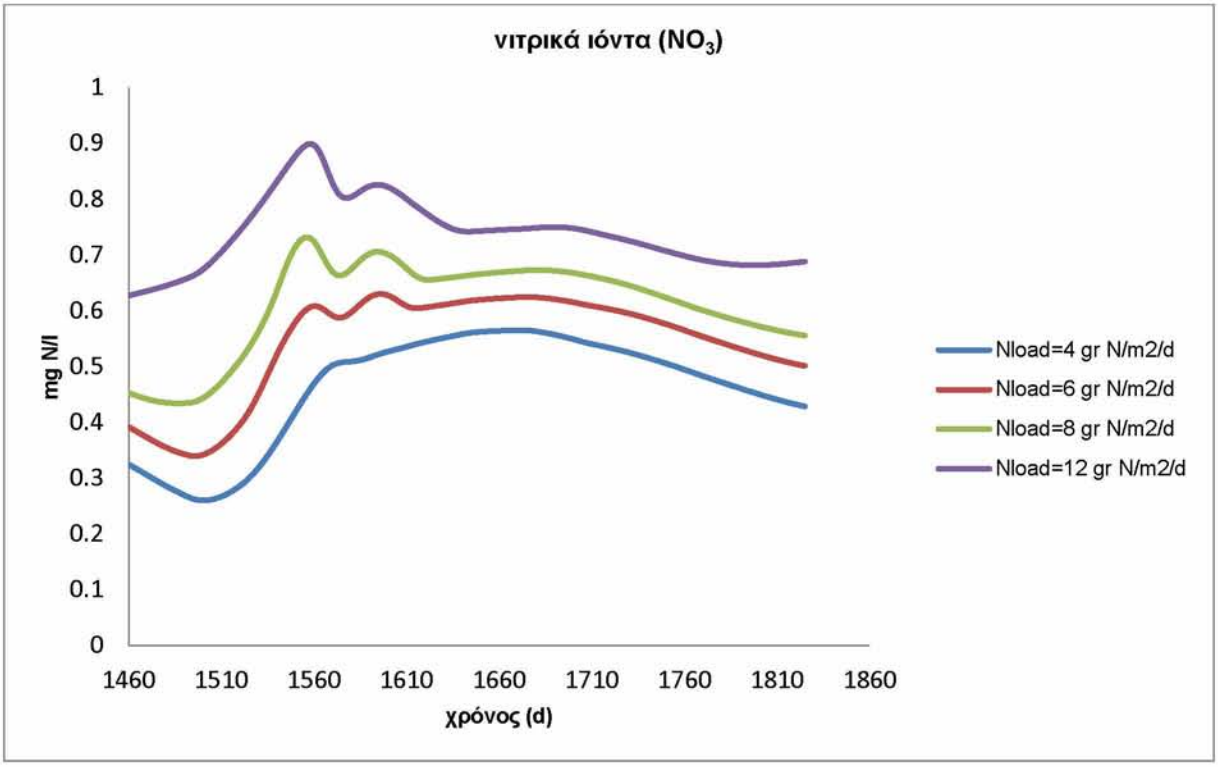


Διάγραμμα 6.57: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

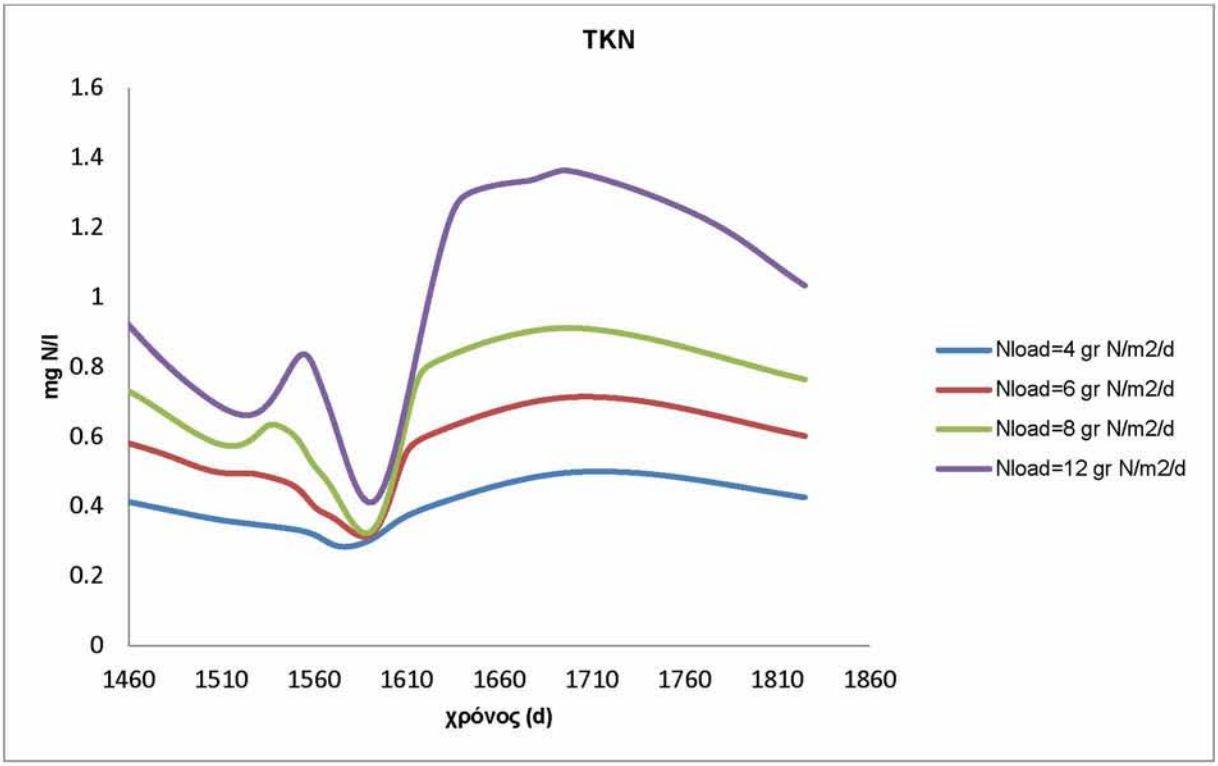


Διάγραμμα 6.58: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

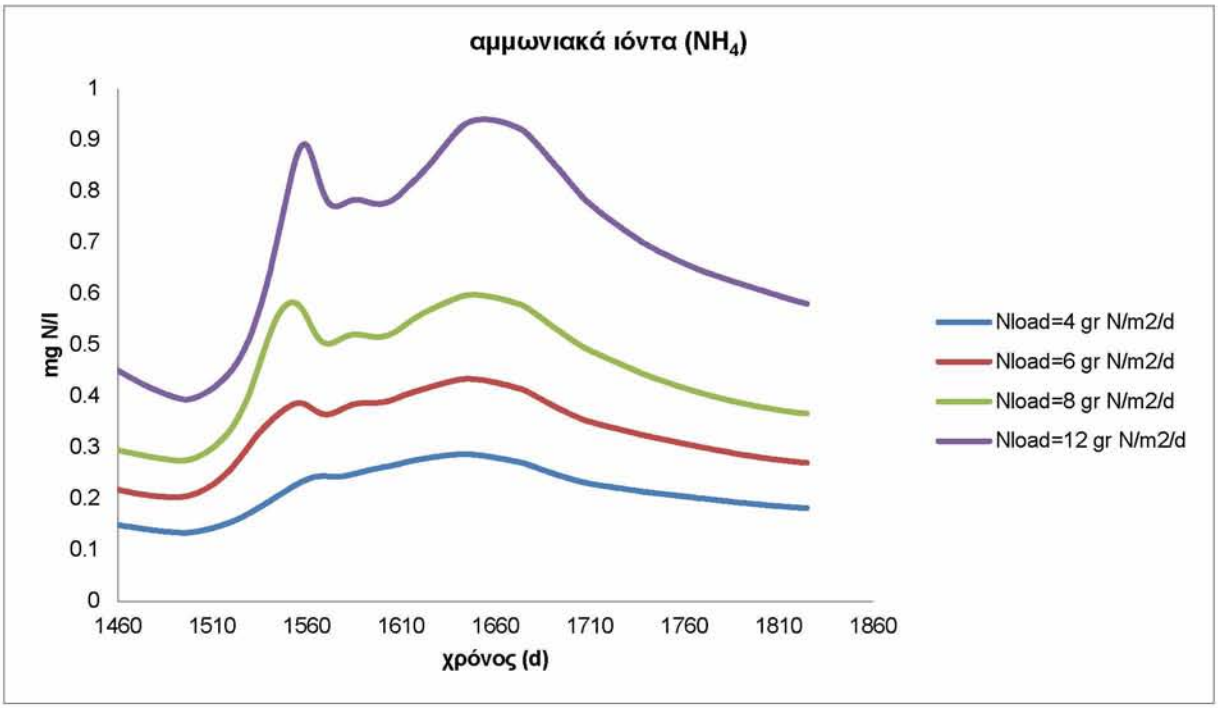


Διάγραμμα 6.59: νιτρικά ιόντα (NO_3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

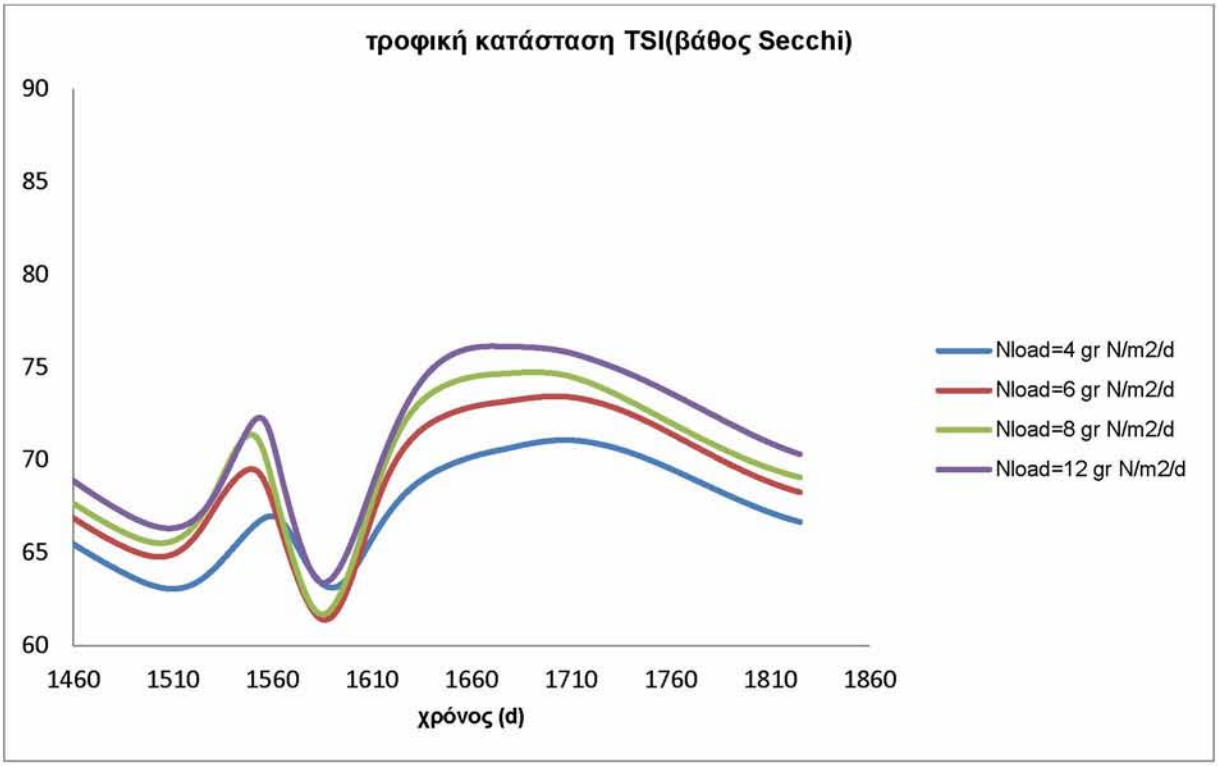


Διάγραμμα 6.60: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης: για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη



Διάγραμμα 6.61: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



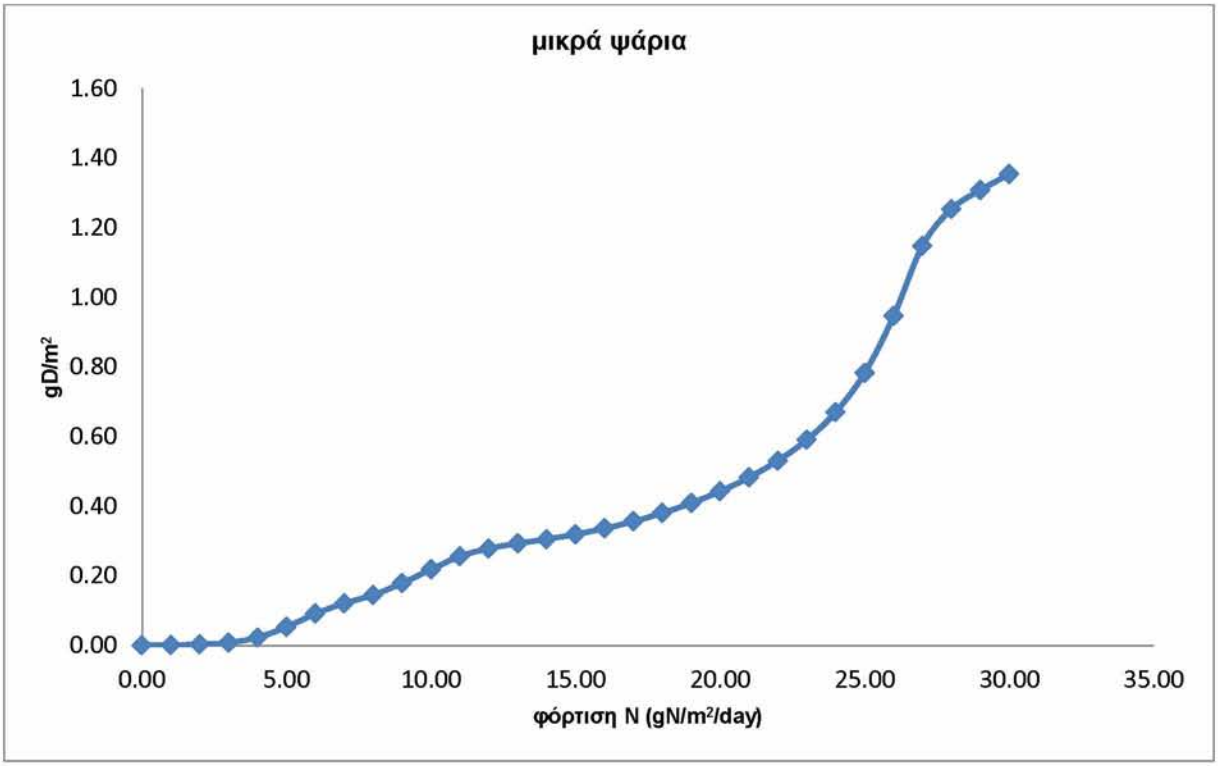
Διάγραμμα 6.62: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές φορτίσεις θρεπτικών για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

6.3 Η επίδραση της φόρτισης θρεπτικών στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης για χαμηλή στάθμη

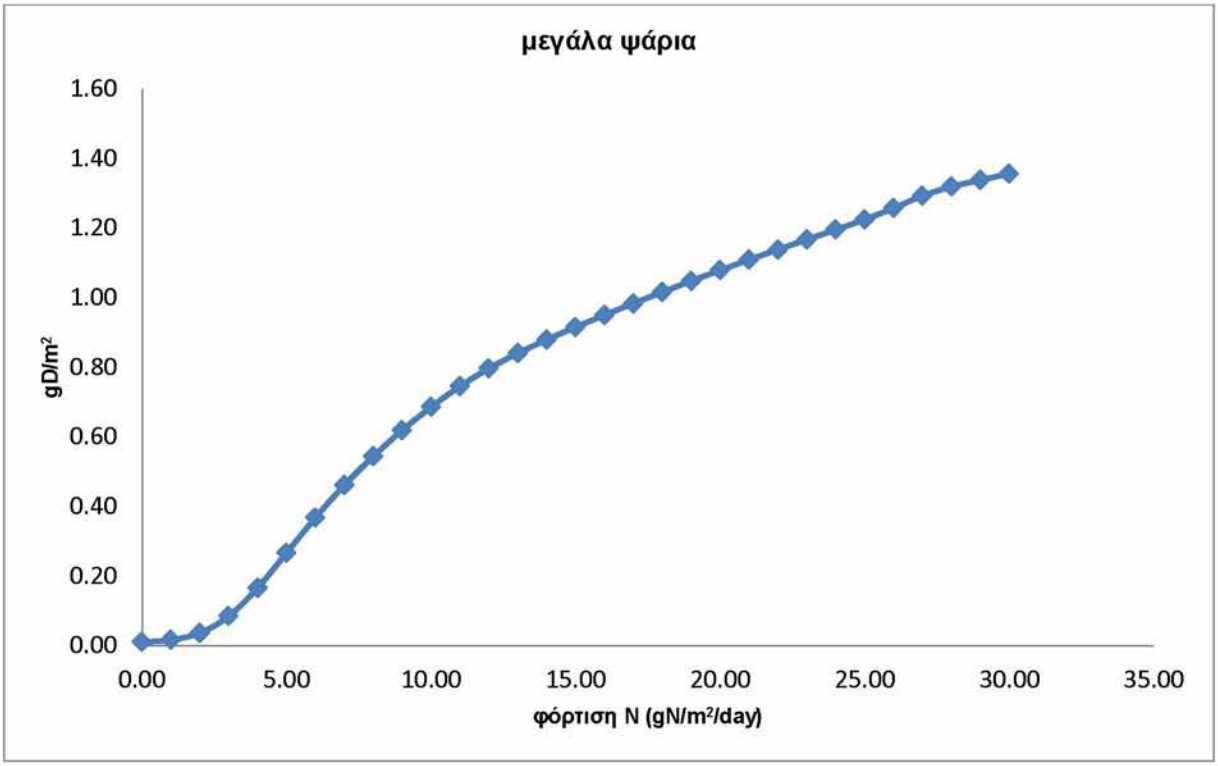
Κατά την αύξηση των θρεπτικών, από μηδενική φόρτιση έως τα 30 g $N/m^2/day$, ακολουθούν σχεδόν γραμμική αύξηση τα μικρά ψάρια μέχρι τα 20 g $N/m^2/day$, τα μεγάλα ψάρια το σύνολο των ψαριών, το διαλυμένο οξυγόνο (με μικρή κλίση), οι λοιπές μικρές βρώσιμες άλγεις, τα φωσφορικά και νιτρικά ιόντα (με εξαίρεση τις εκθετικά αυξανόμενες αρχικές τιμές τους). Το TKN ακολουθεί κι αυτό γραμμική αύξηση έως τα 25 g $N/m^2/day$, που παίρνει την μέγιστη τιμή των 3.5 g N/m^3 κι έπειτα πιθανώς λόγω φαινομένων κορεσμού πέφτει για τις πολύ υψηλές φορτίσεις. (Διαγράμματα 6.33 έως 6.46)

Η τροφική κατάσταση της λίμνης για φόρτιση θρεπτικών έως 10 g $N/m^2/day$ μεταβάλλεται με γρήγορους ρυθμούς, ενώ για μεγαλύτερη φόρτιση μεταβάλλεται ήπια προς χειρότερα επίπεδα. Το όριο των 70 βαθμών TSI αντιστοιχεί σε φόρτιση σχεδόν μηδενική. Δεν είναι δυνατόν δηλαδή, λίμνη με τόσο χαμηλή στάθμη να βελτιώσει αρκούντως την ευτροφική της κατάσταση με διαχείριση που αφορά μόνο στην φόρτιση θρεπτικών. (Διάγραμμα 6.47)

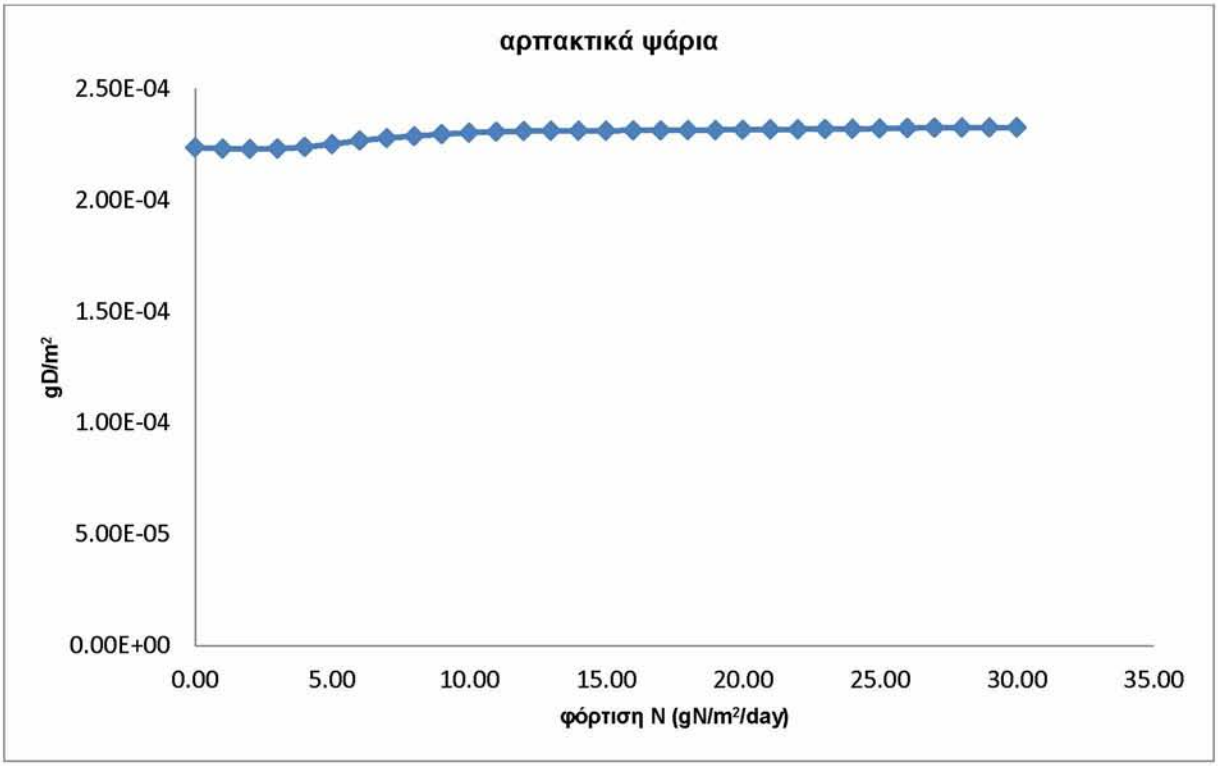


Διάγραμμα 6.33: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

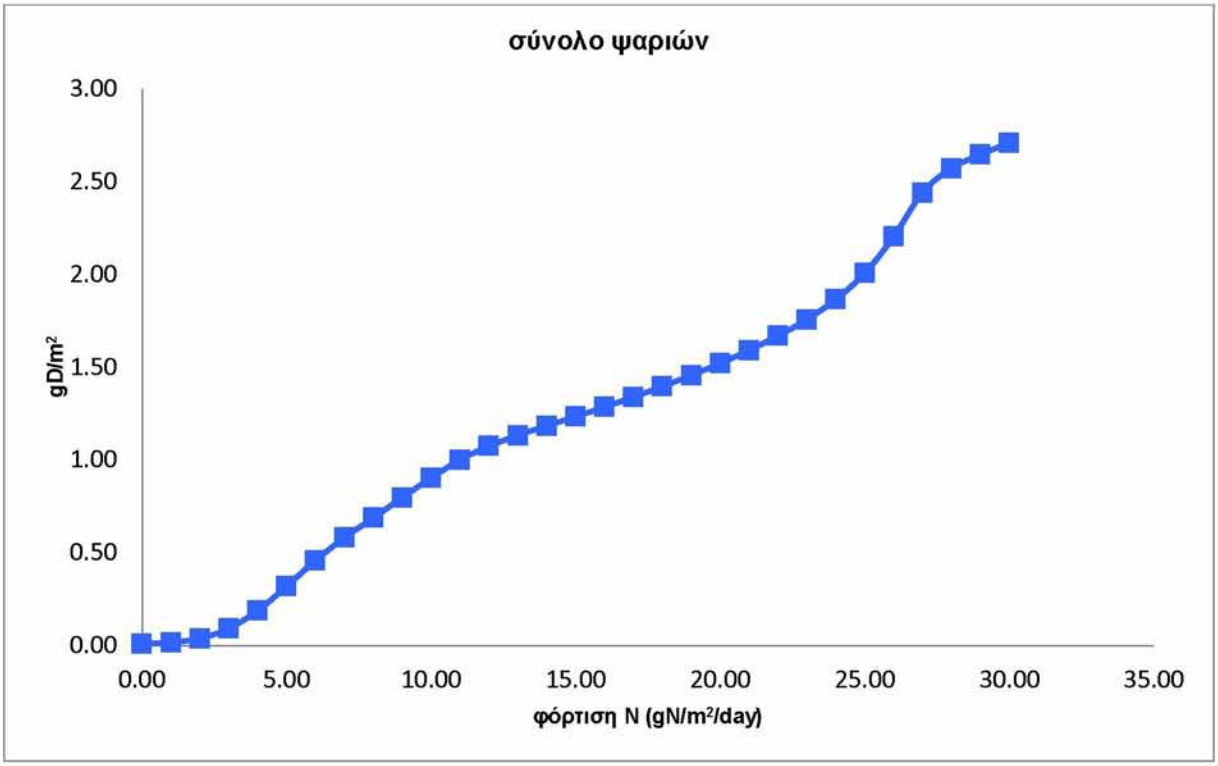


Διάγραμμα 6.34: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

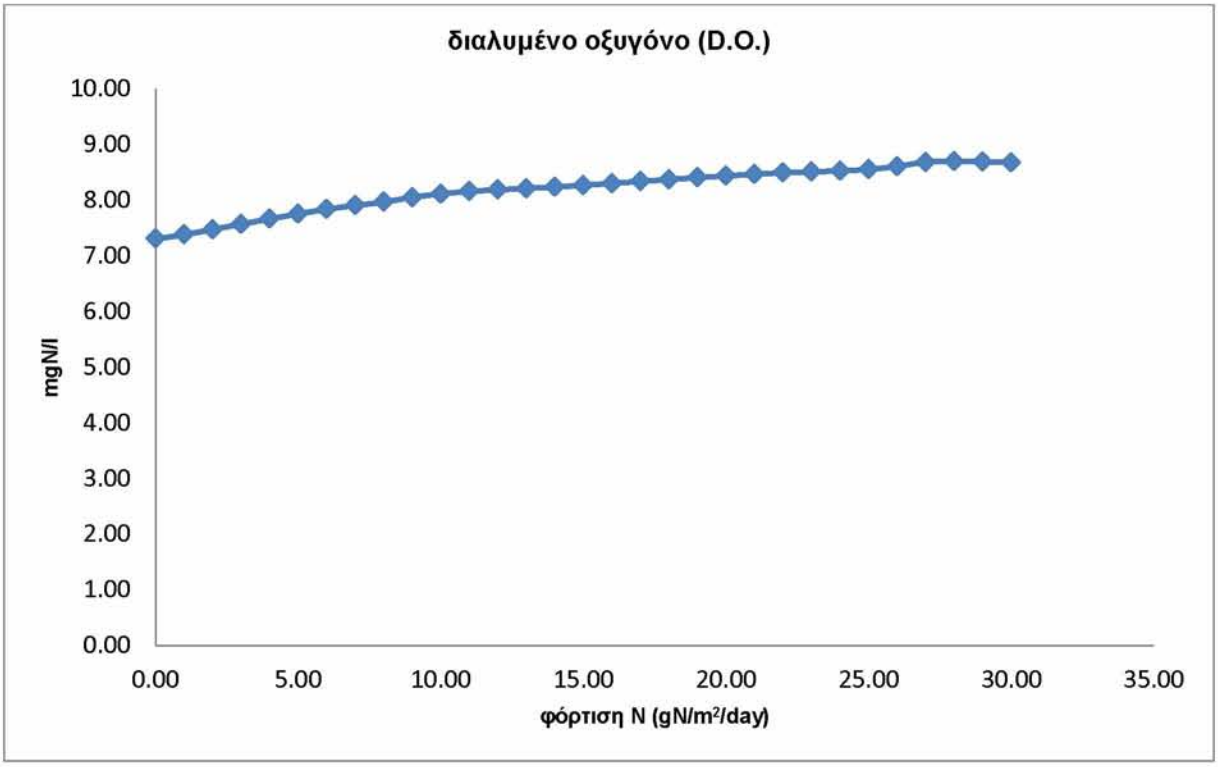


Διάγραμμα 6.35: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

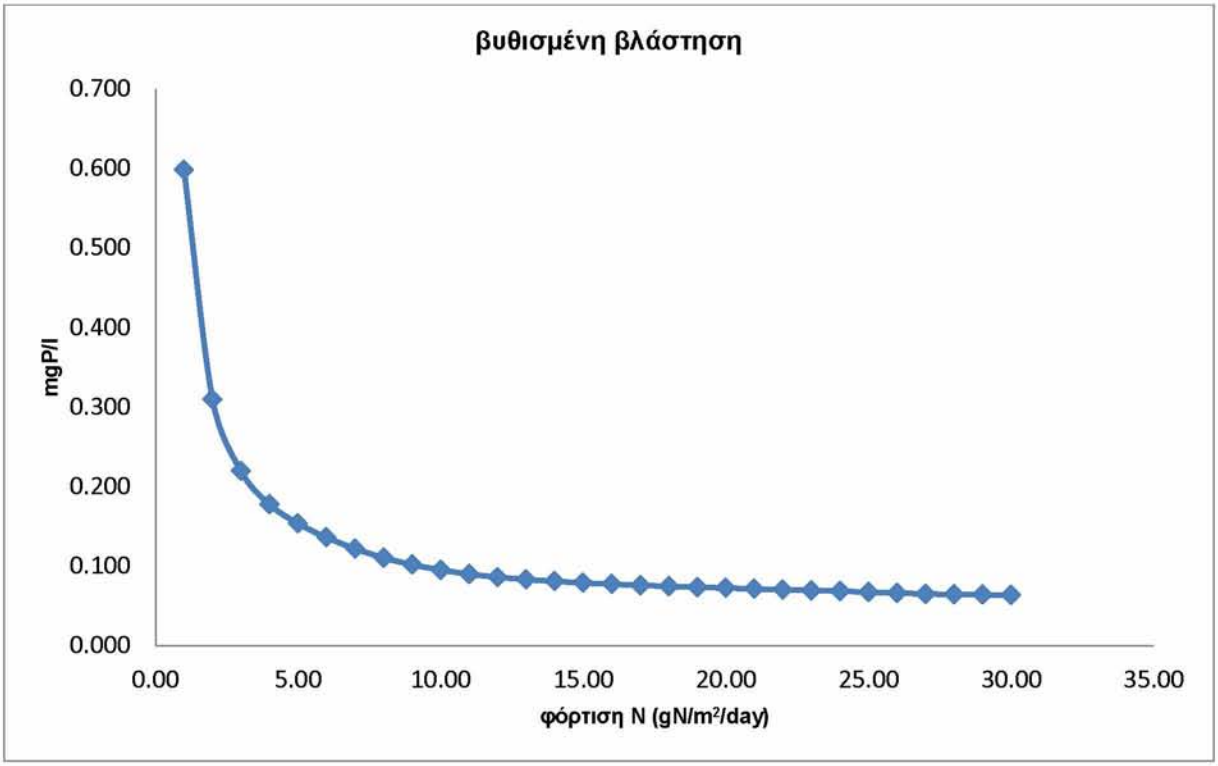


Διάγραμμα 6.36: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

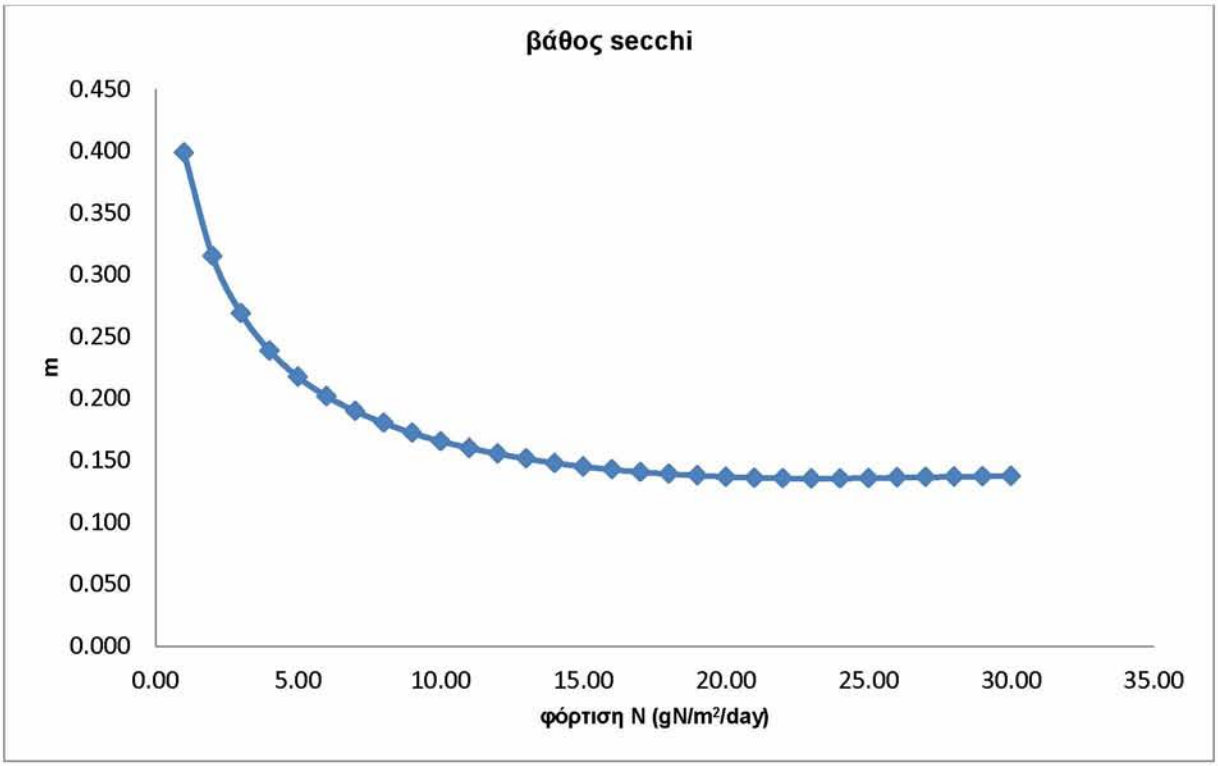


Διάγραμμα 6.37: μέσο θερινό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου– φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

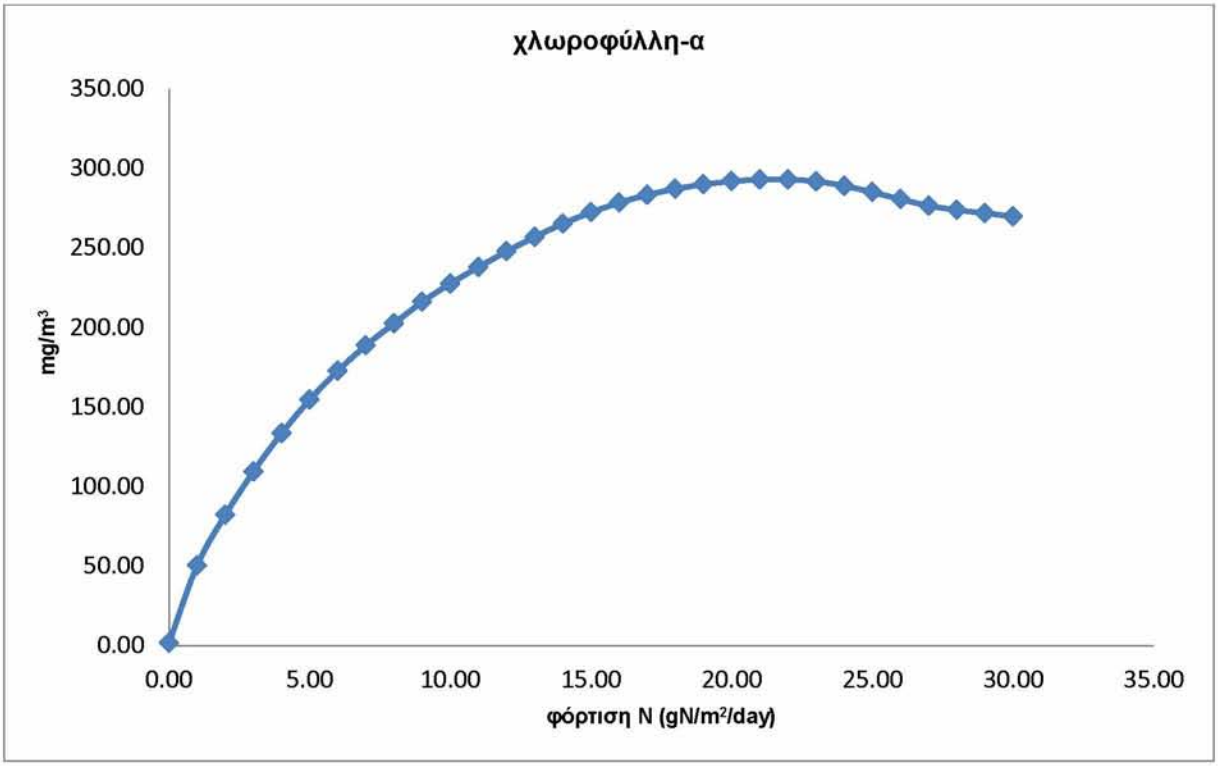


Διάγραμμα 6.38: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης– φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

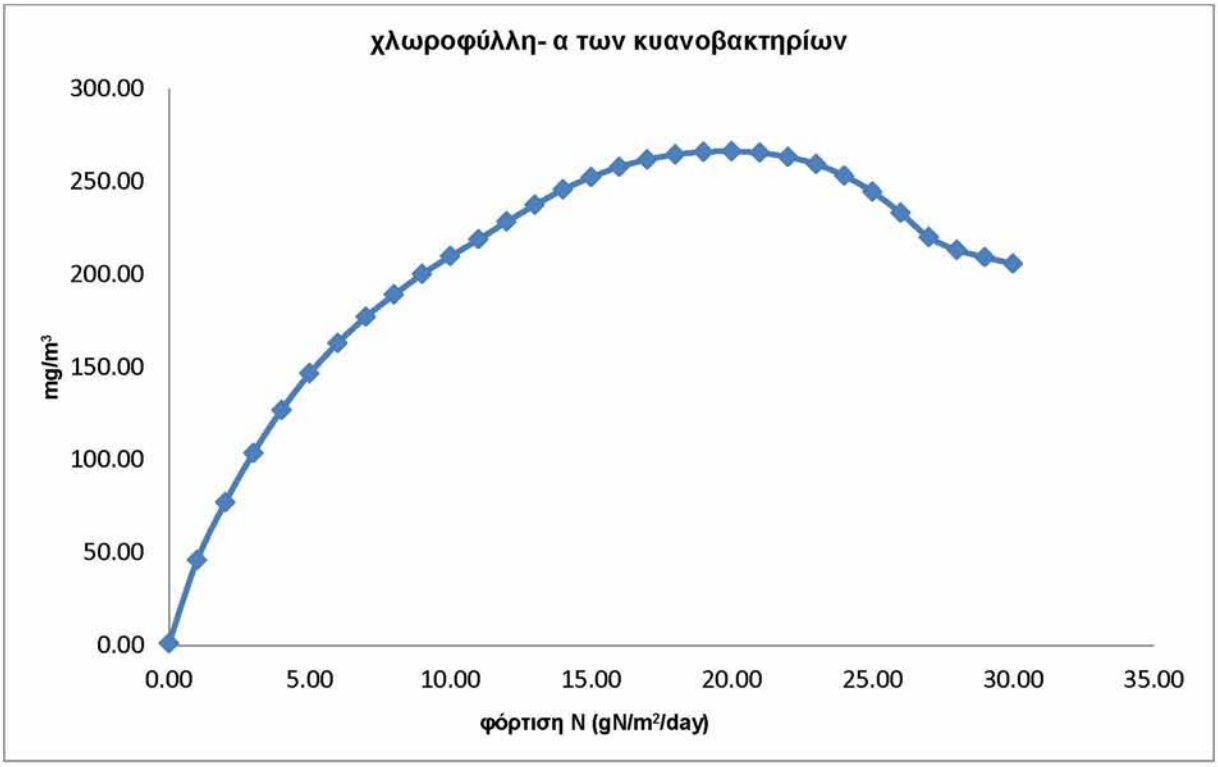


Διάγραμμα 6.39: μέσο θερινό βάθους Secchi – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

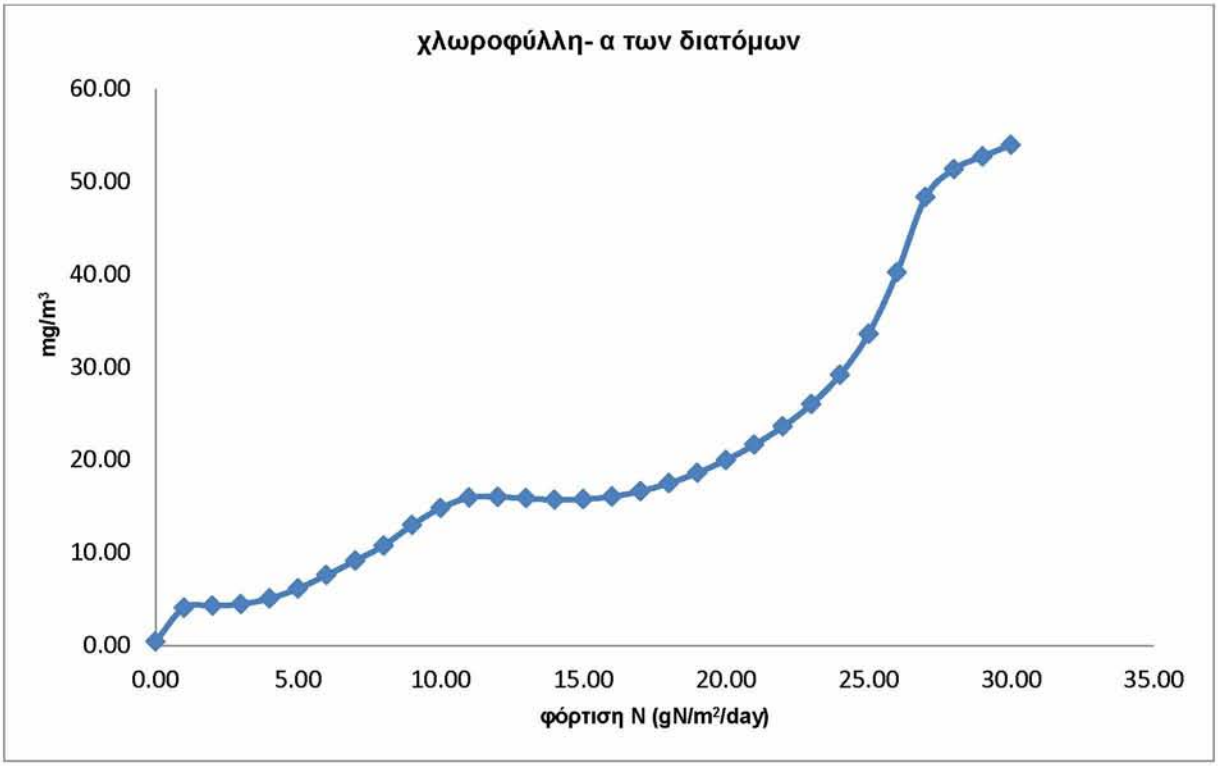


Διάγραμμα 6.40: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

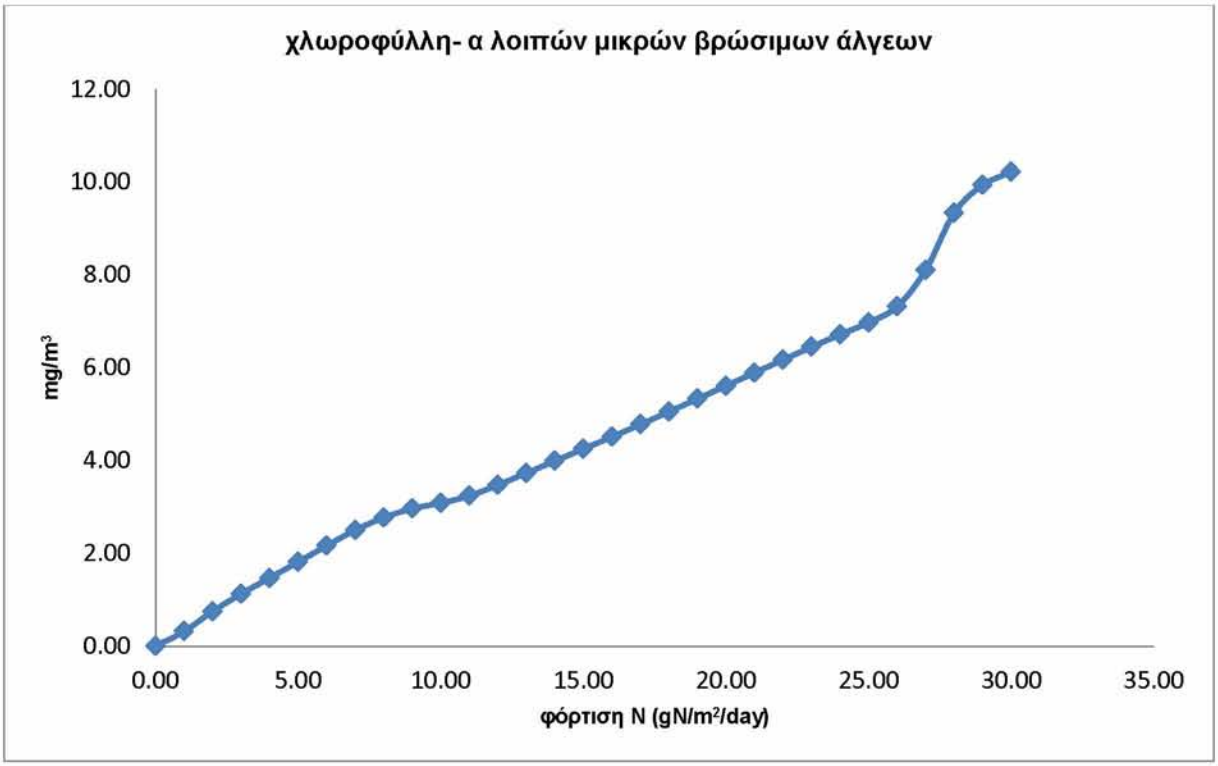


Διάγραμμα 6.41: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

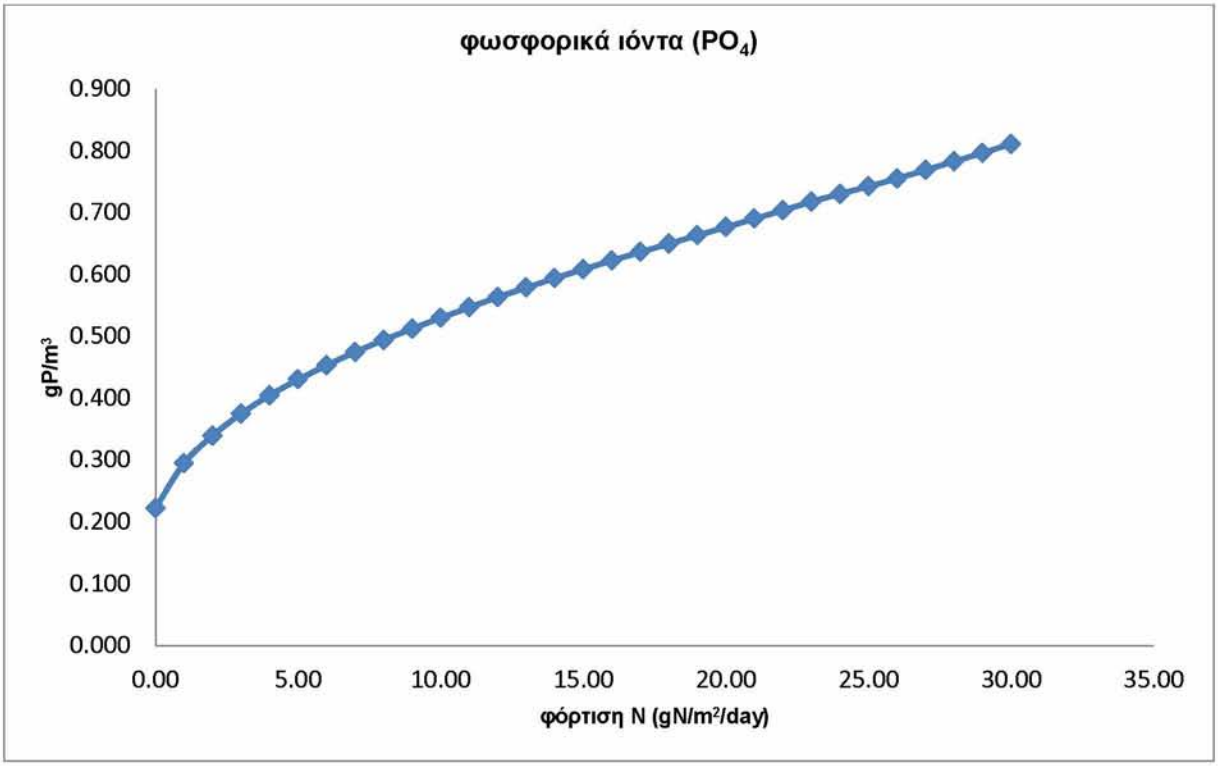


Διάγραμμα 6.42: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

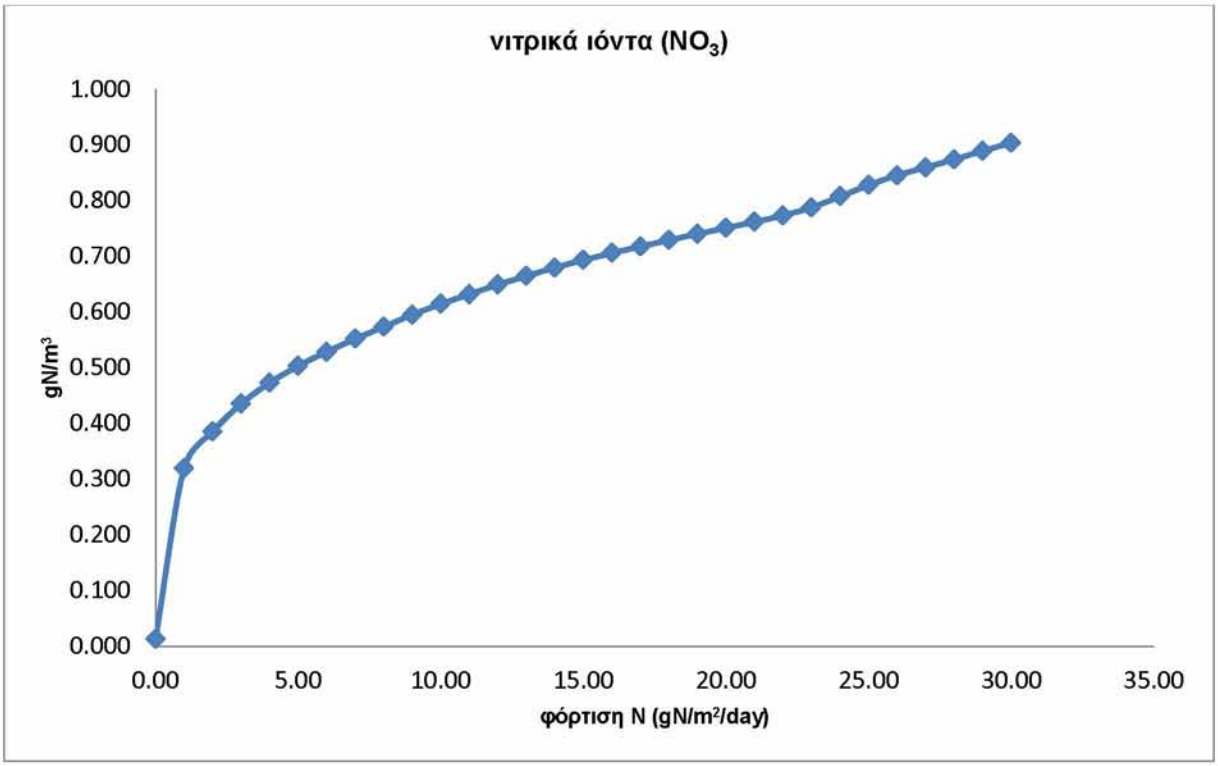


Διάγραμμα 6.43: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

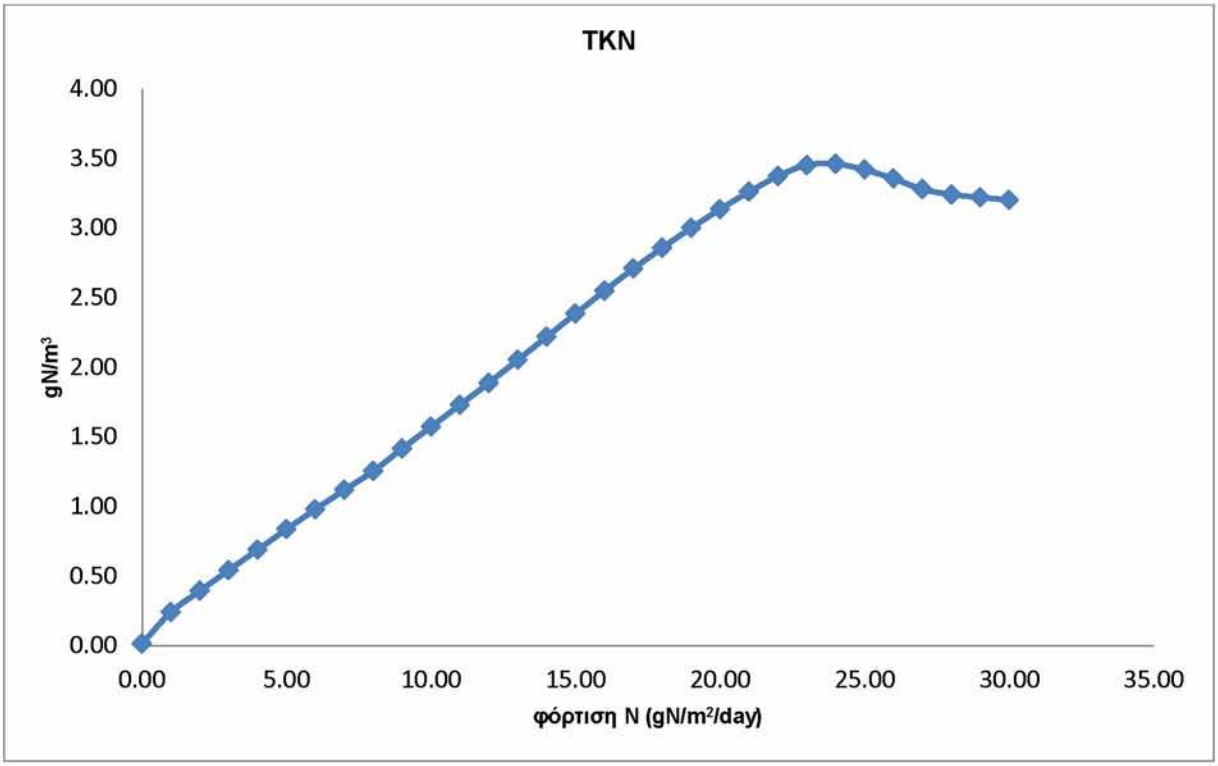


Διάγραμμα 6.44: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

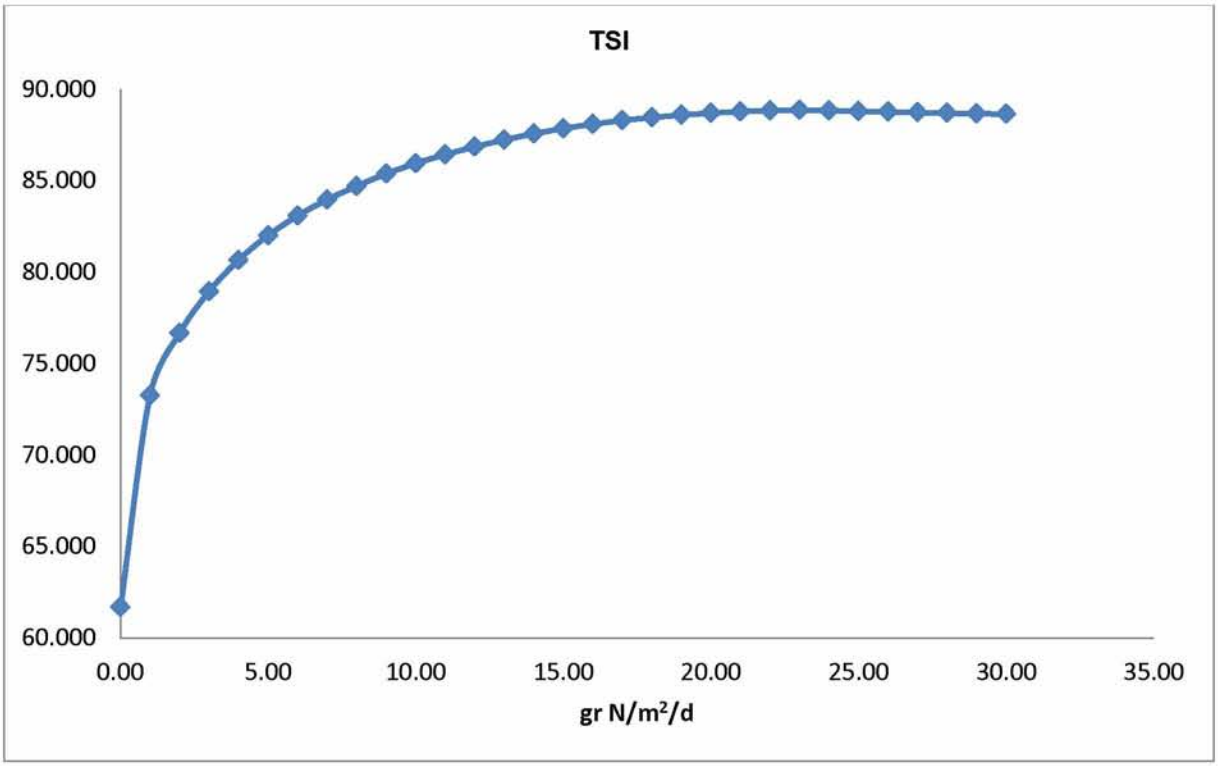


Διάγραμμα 6.45: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 6.46: μέσο θερινό επίπεδο TKN – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

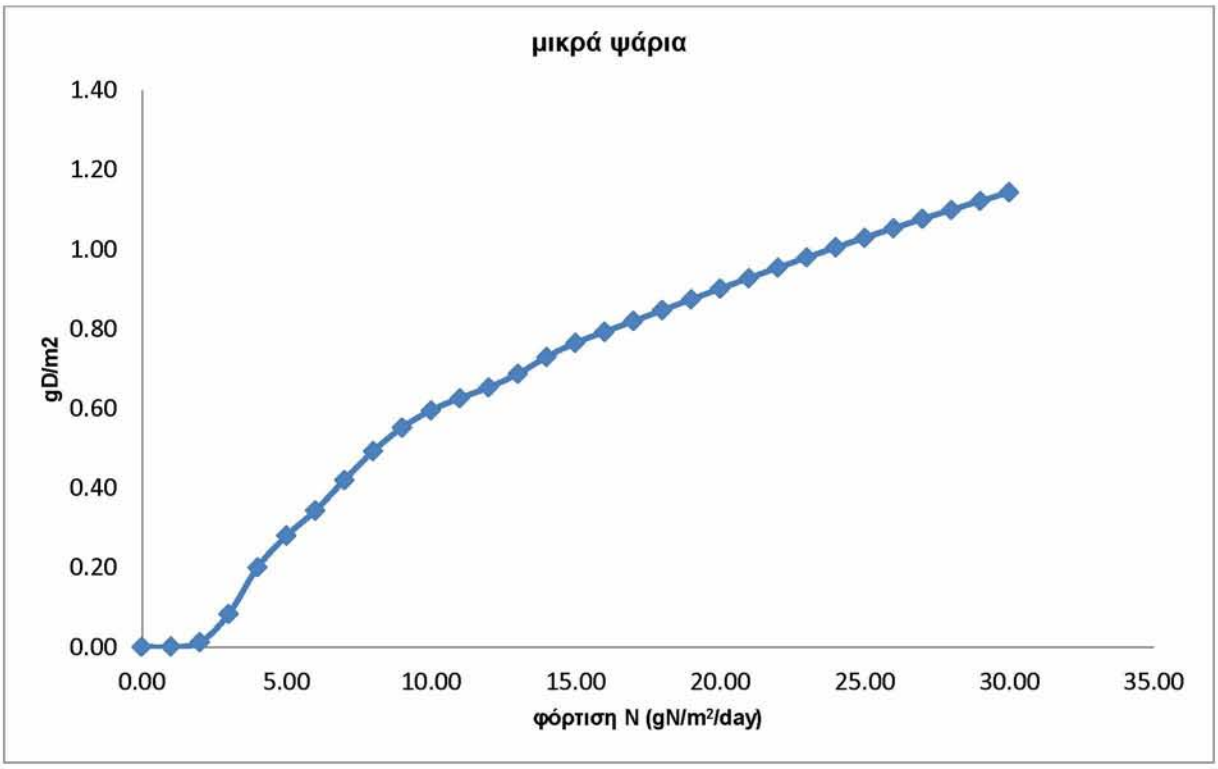


Διάγραμμα 6.47: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – φόρτιση αζώτου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

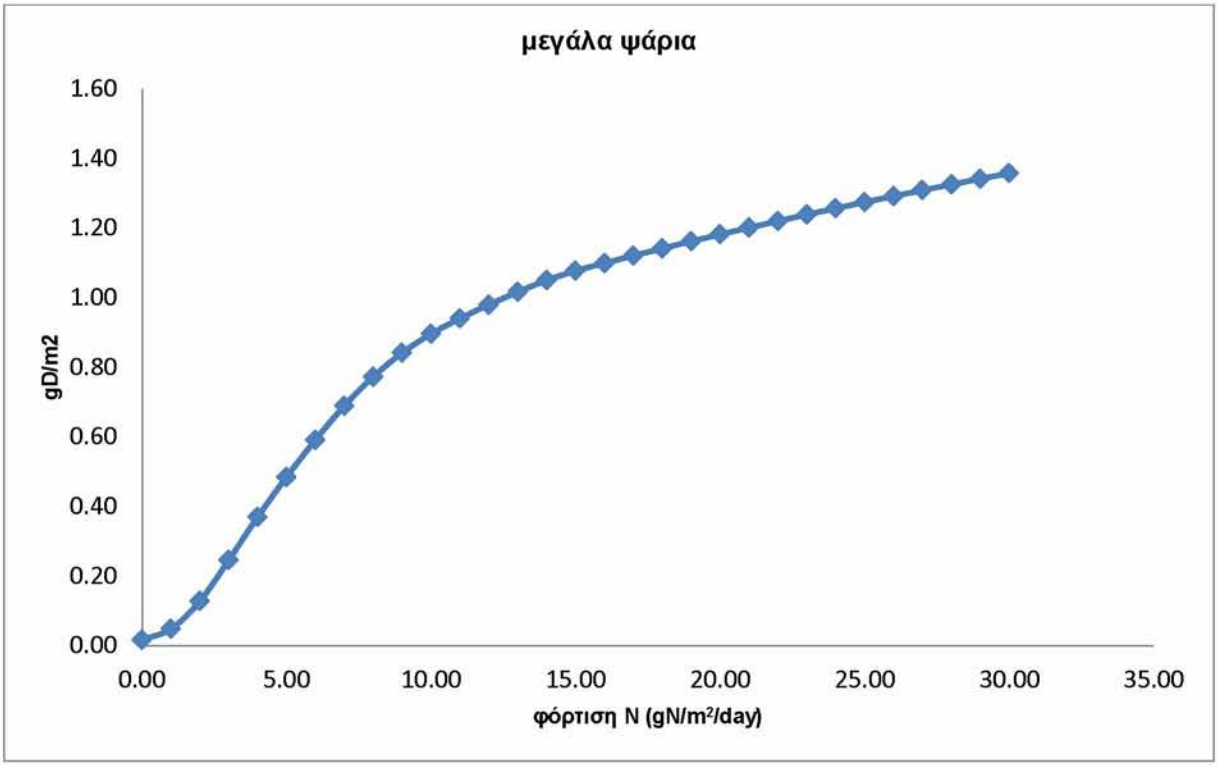
6.4 Η επίδραση της φόρτισης θρεπτικών στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης για μέση στάθμη

Για την λίμνη, με μέση στάθμη, τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο θετικά. Τα βάθος Secchi και η συνολική χλωροφύλλη-α μεταβάλλονται έντονα για φόρτιση μέχρι τα 10 g $N/m^2/day$ και μάλιστα σε πολύ πιο ικανοποιητικά μέσα θερινά επίπεδα από αυτά της χαμηλής στάθμης, 0.37 m και 120 mg/m^3 αντίστοιχα. Οι βαθμοί TSI πέφτουν κάτω από το όριο των 70 για χαμηλή φόρτιση έως 4 g $N/m^2/day$. (Διαγράμματα 6.48 έως 6.61)

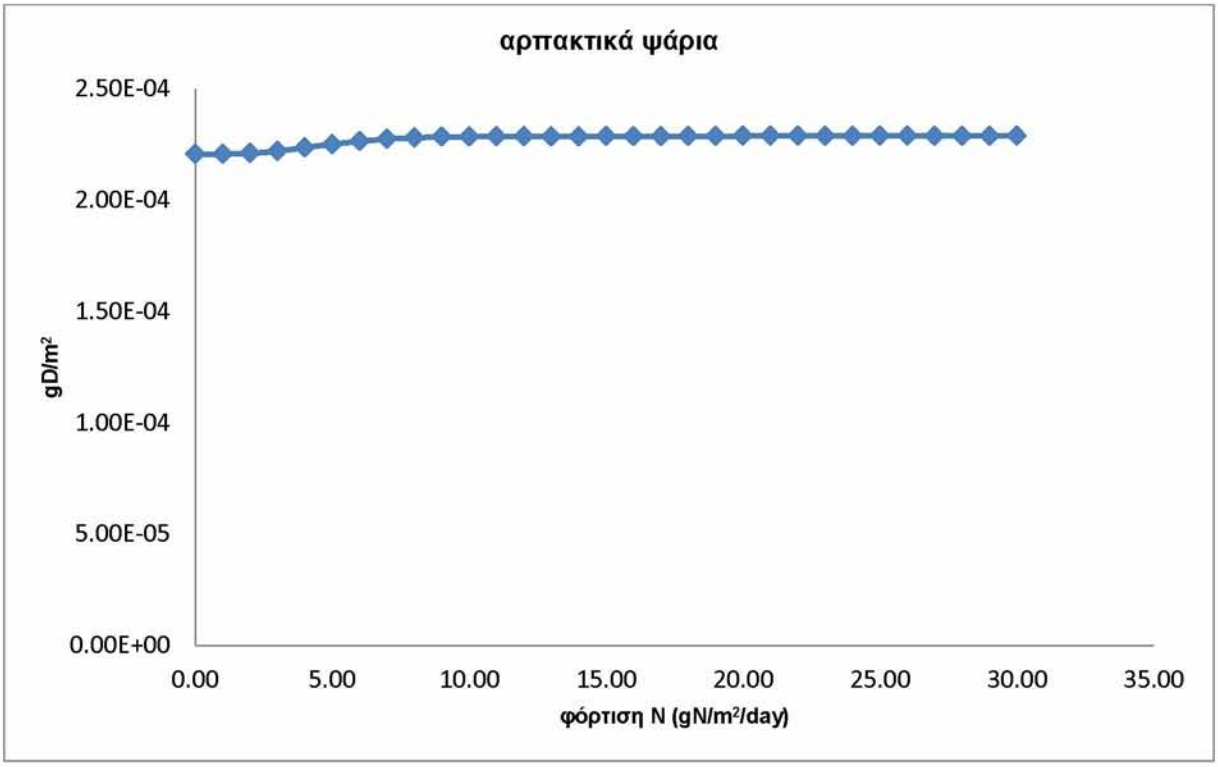


Διάγραμμα 6.48: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

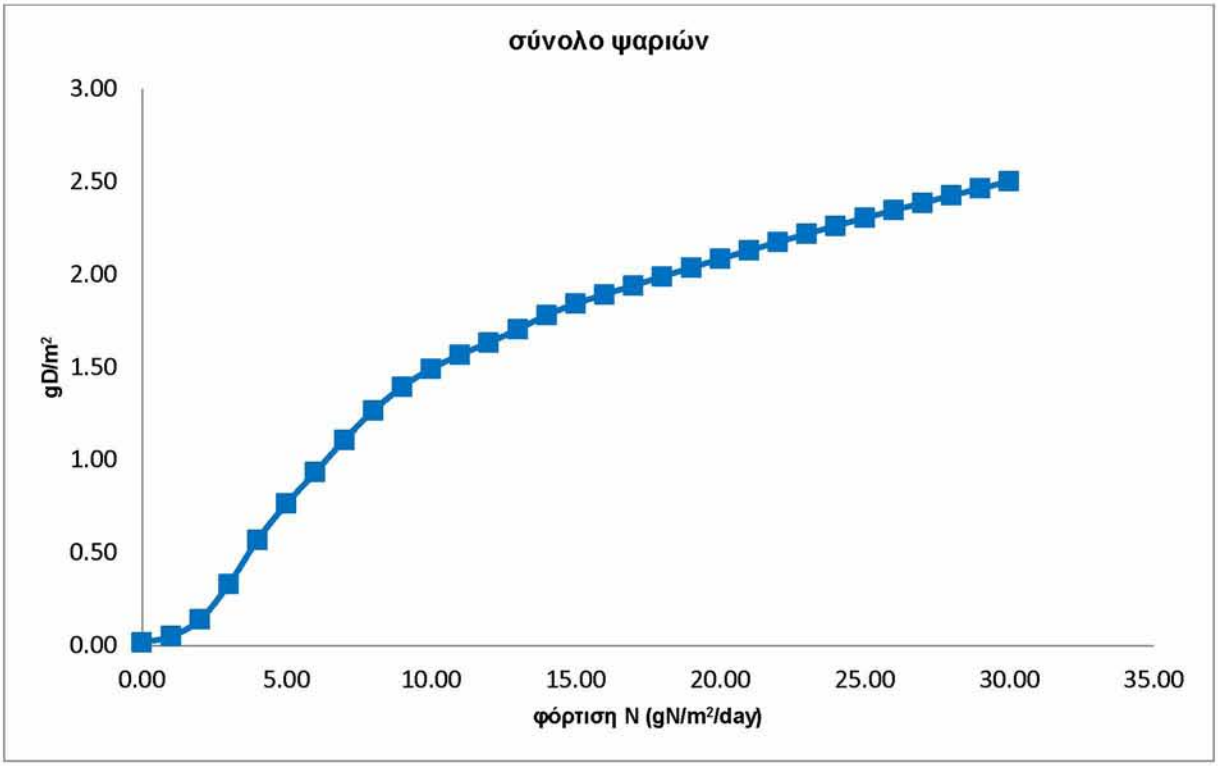


Διάγραμμα 6.49: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών– φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

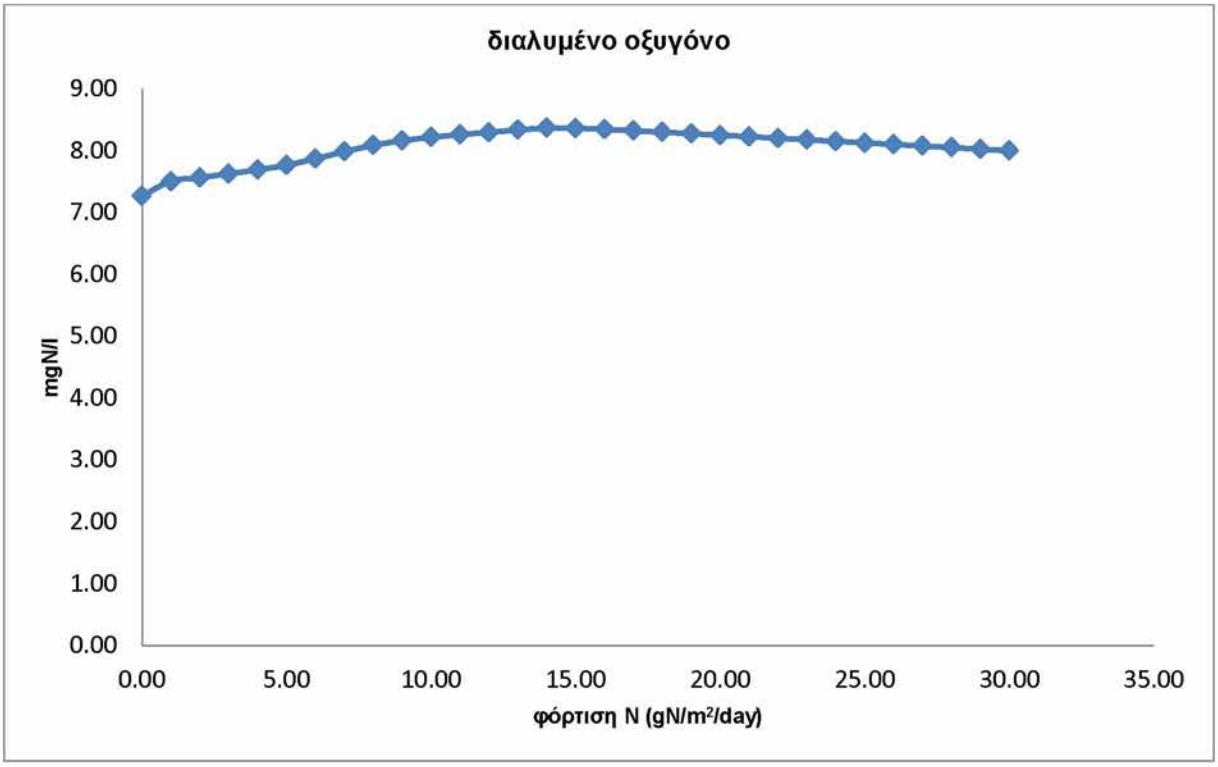


Διάγραμμα 6.50: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών– φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

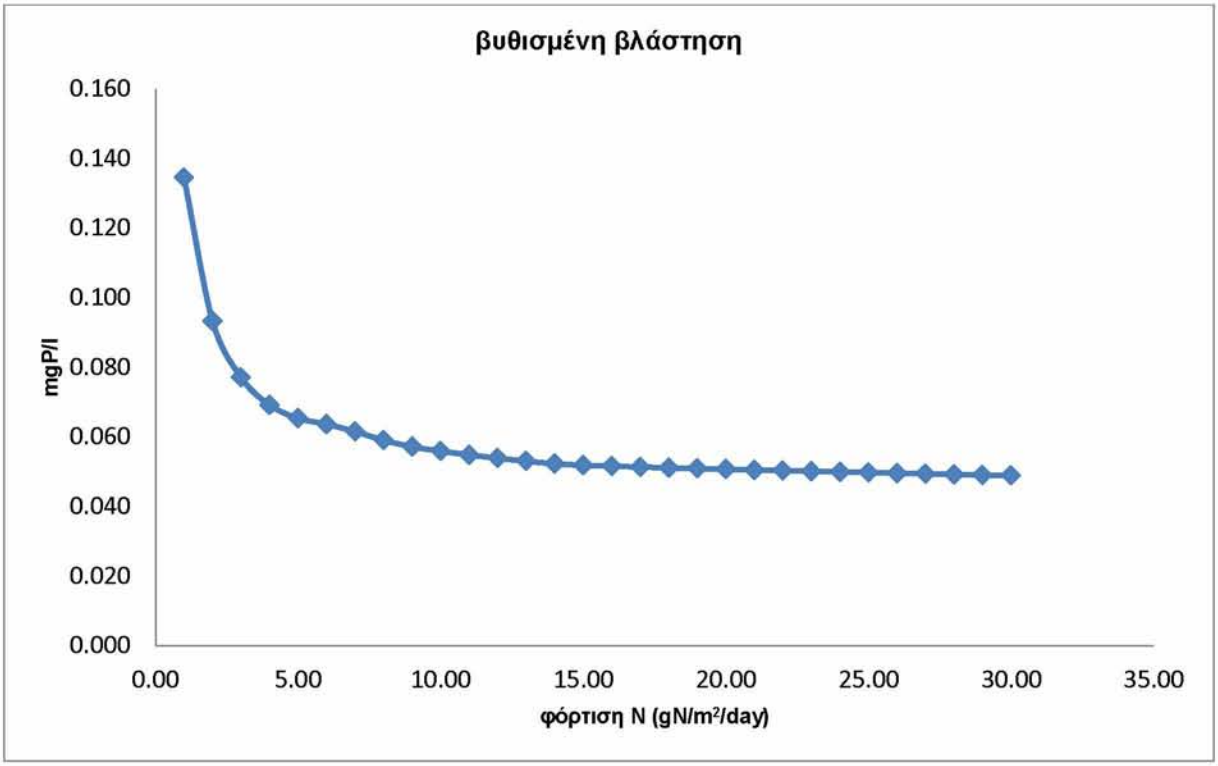


Διάγραμμα 6.51: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

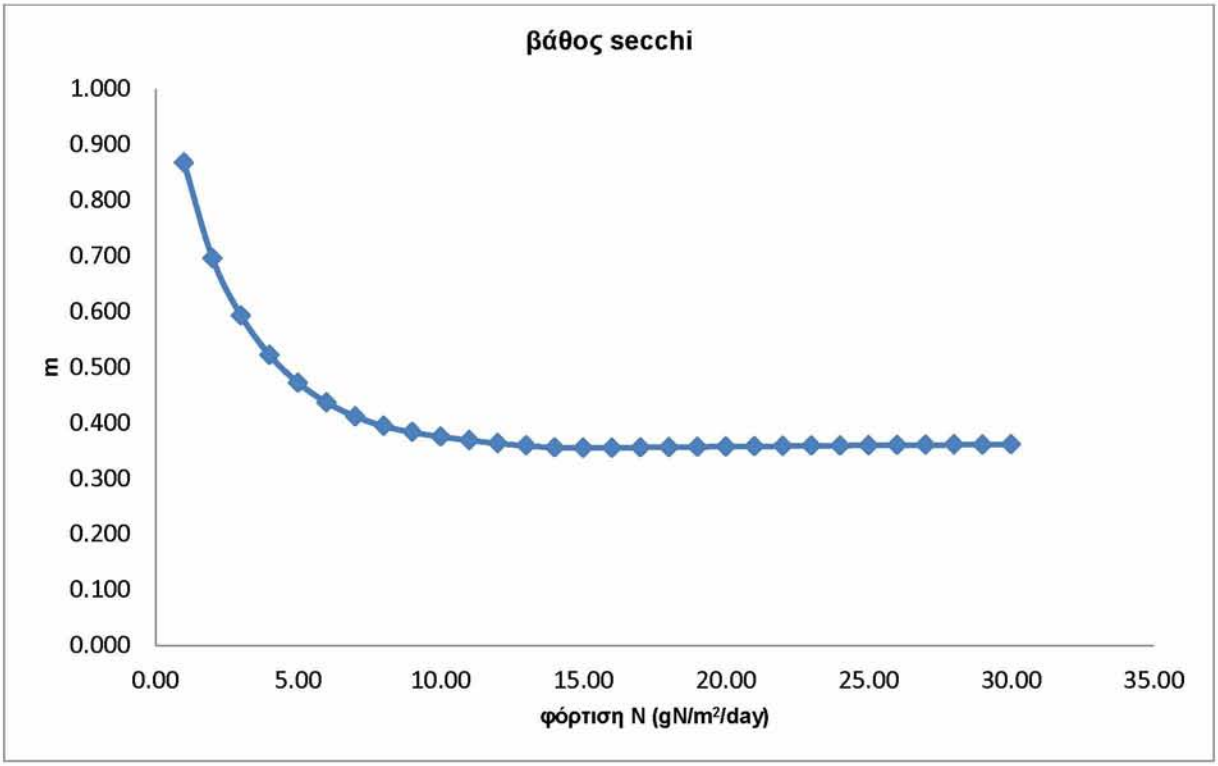


Διάγραμμα 6.52: μέσο θερινό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

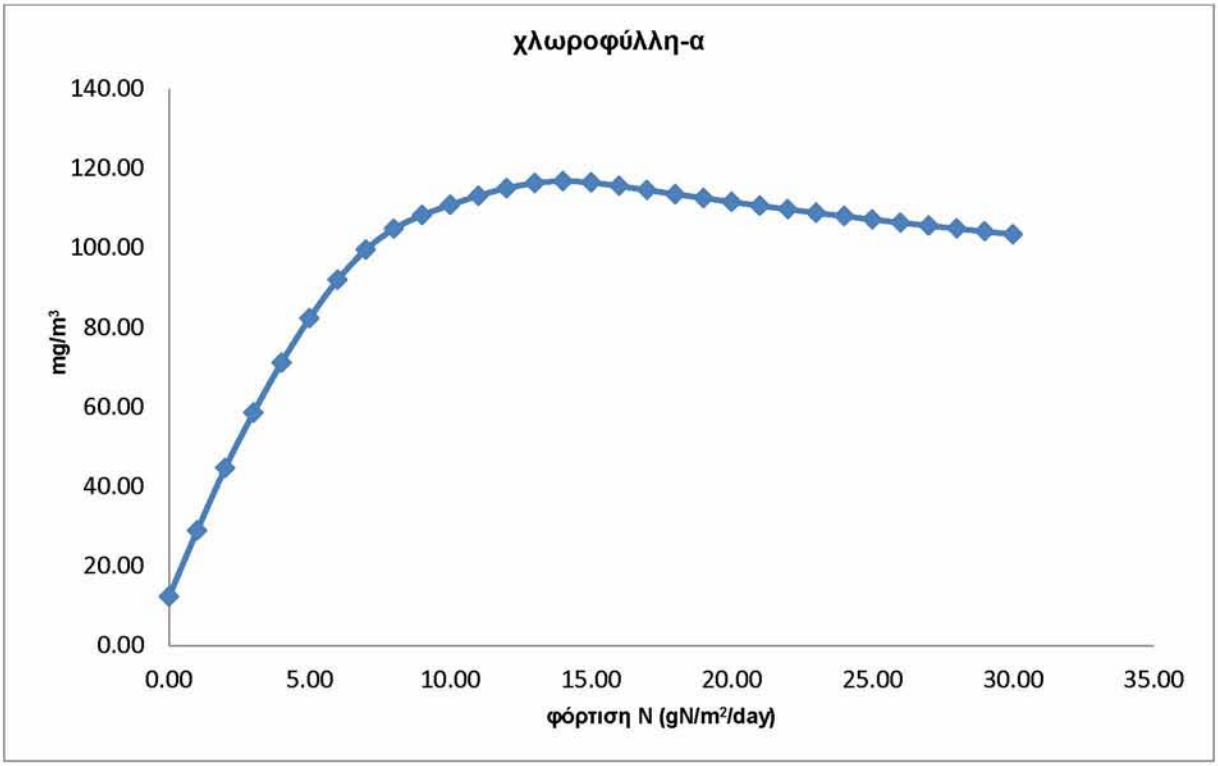


Διάγραμμα 6.53: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

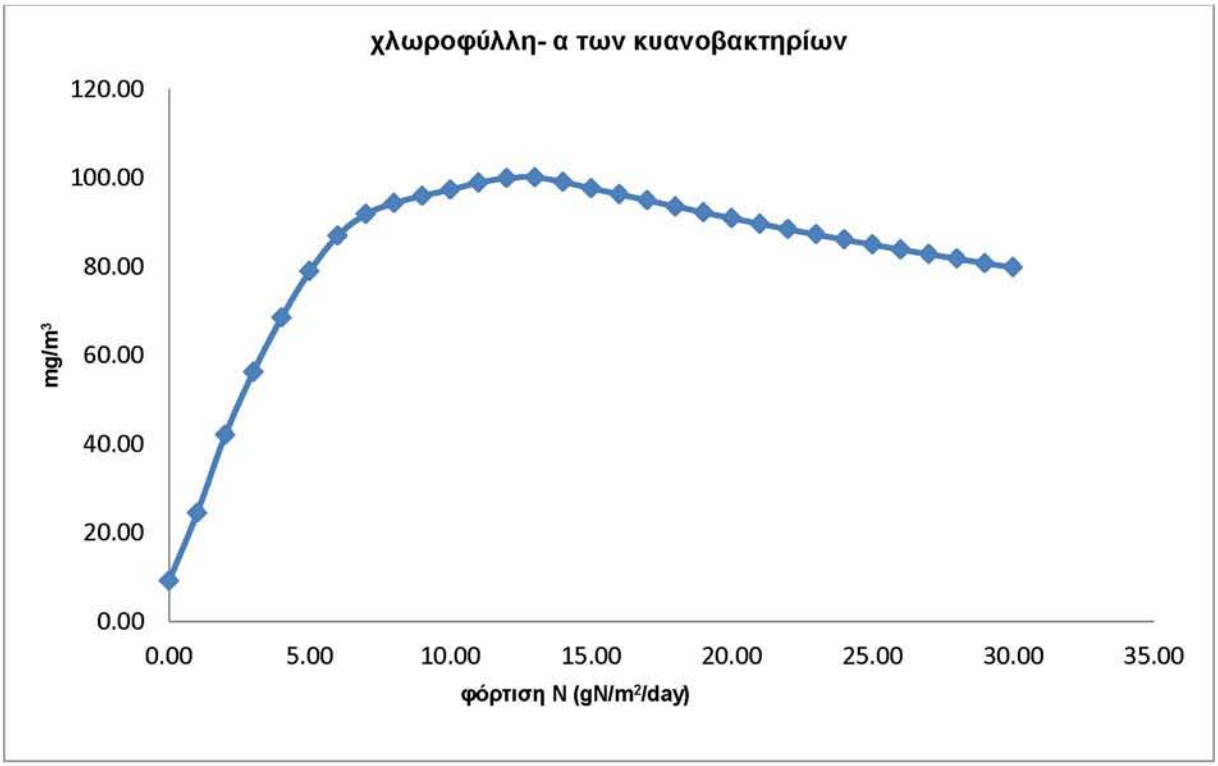


Διάγραμμα 6.54: μέσο θερινό επίπεδο βάθους Secchi – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

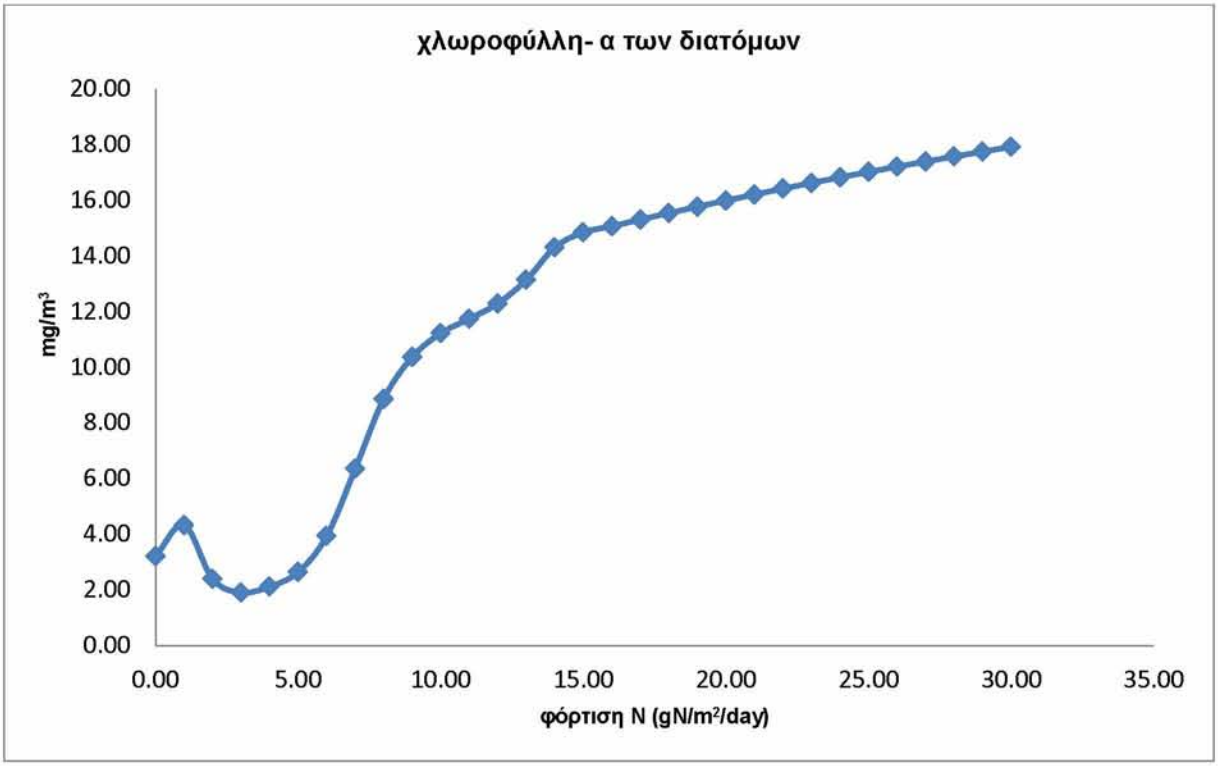


Διάγραμμα 6.53: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

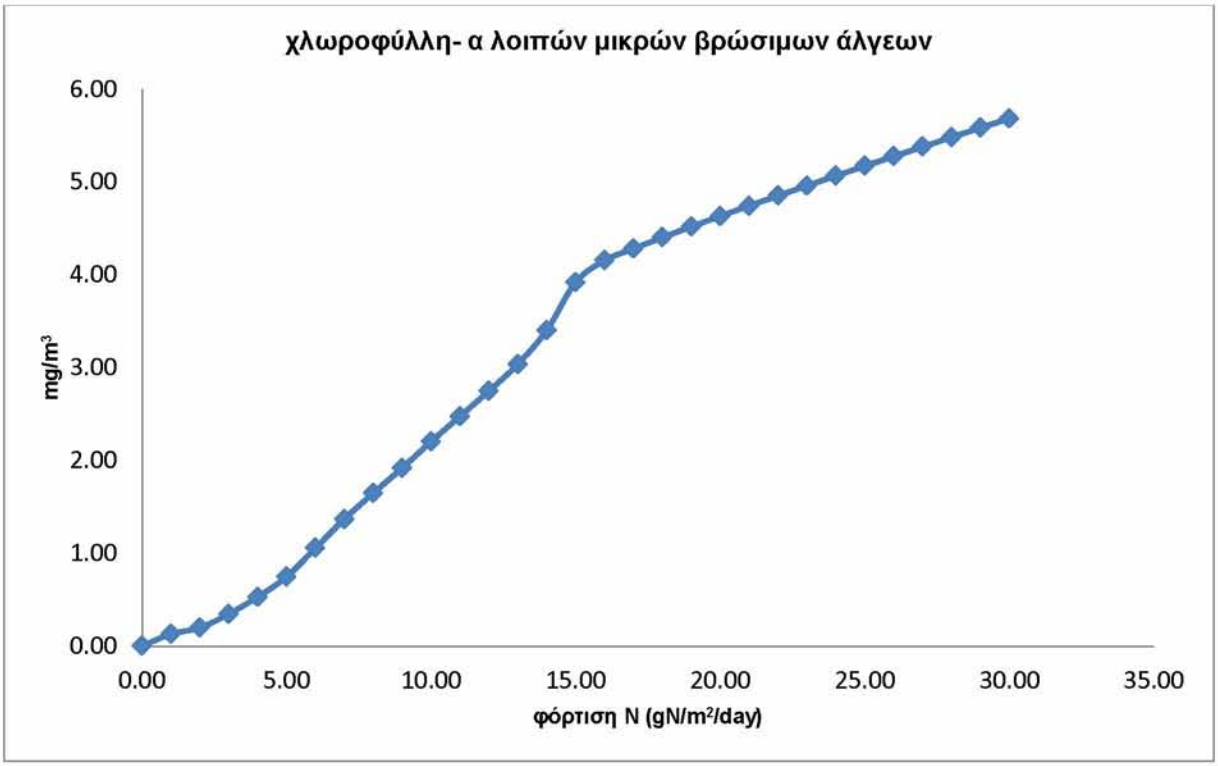


Διάγραμμα 6.54: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

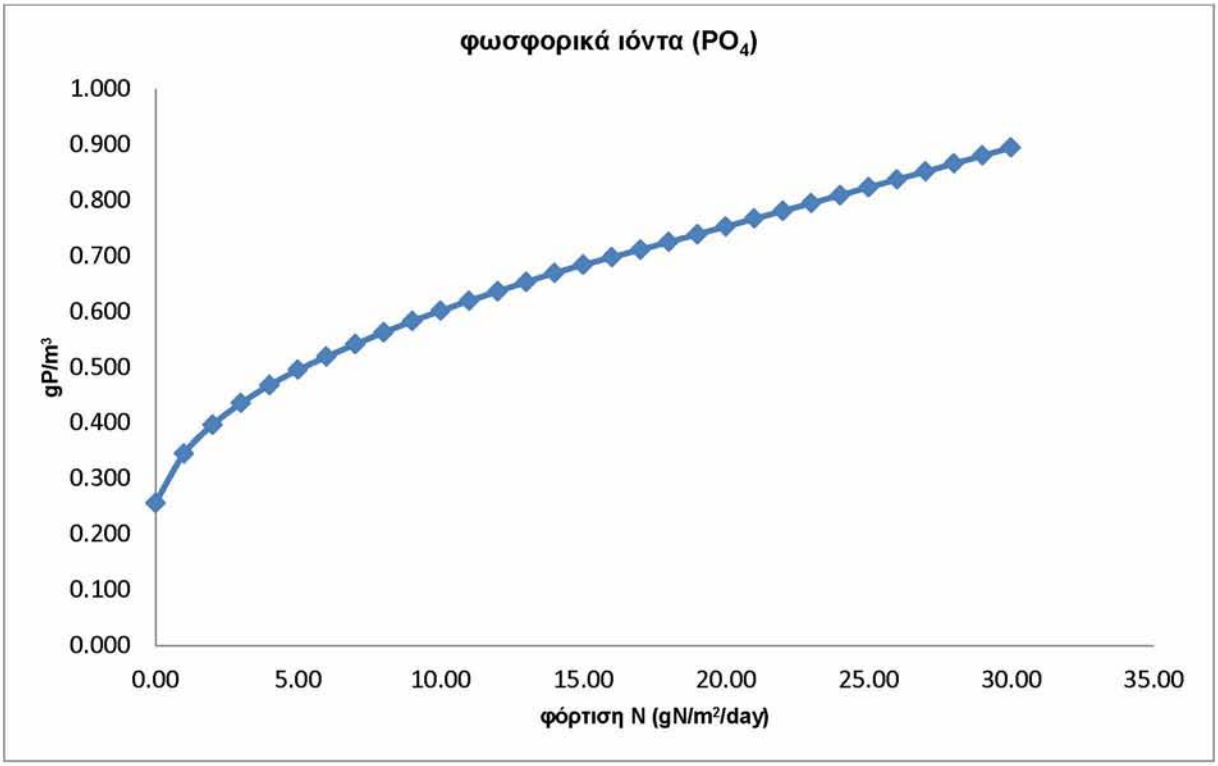


Διάγραμμα 6.55: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

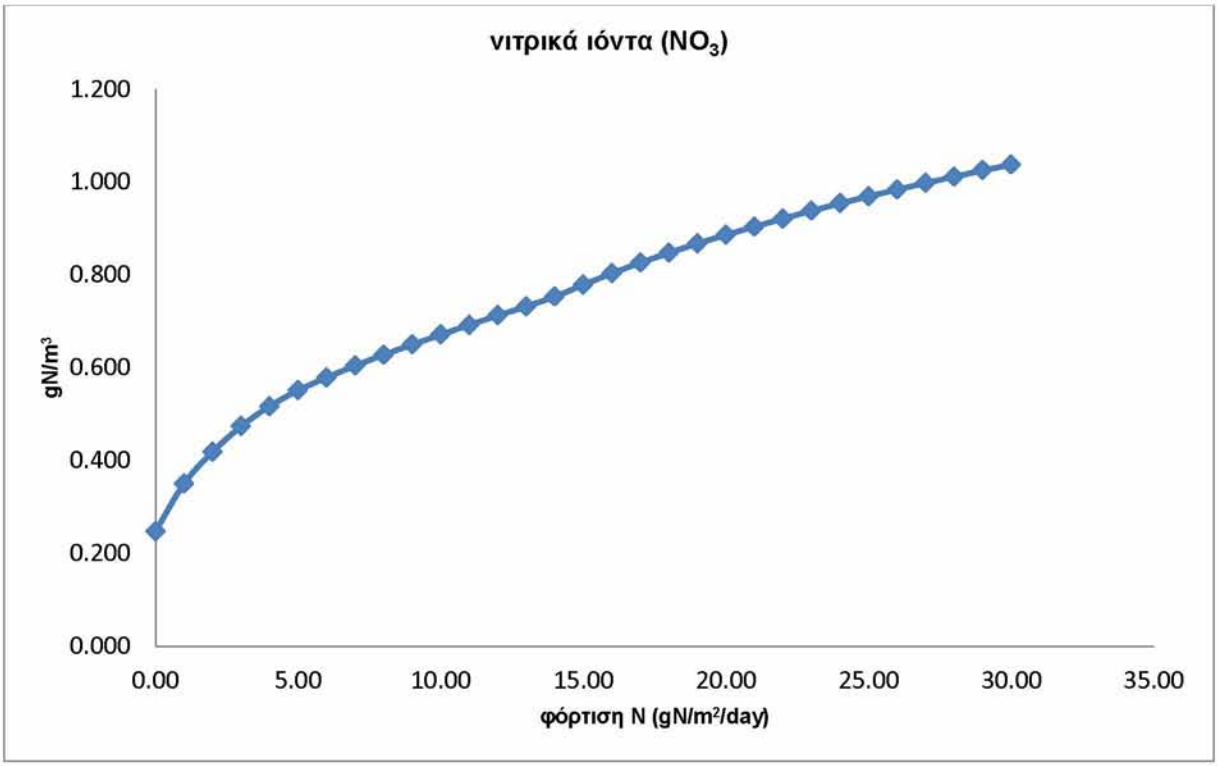


Διάγραμμα 6.56: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων των κυανοβακτηρίων – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

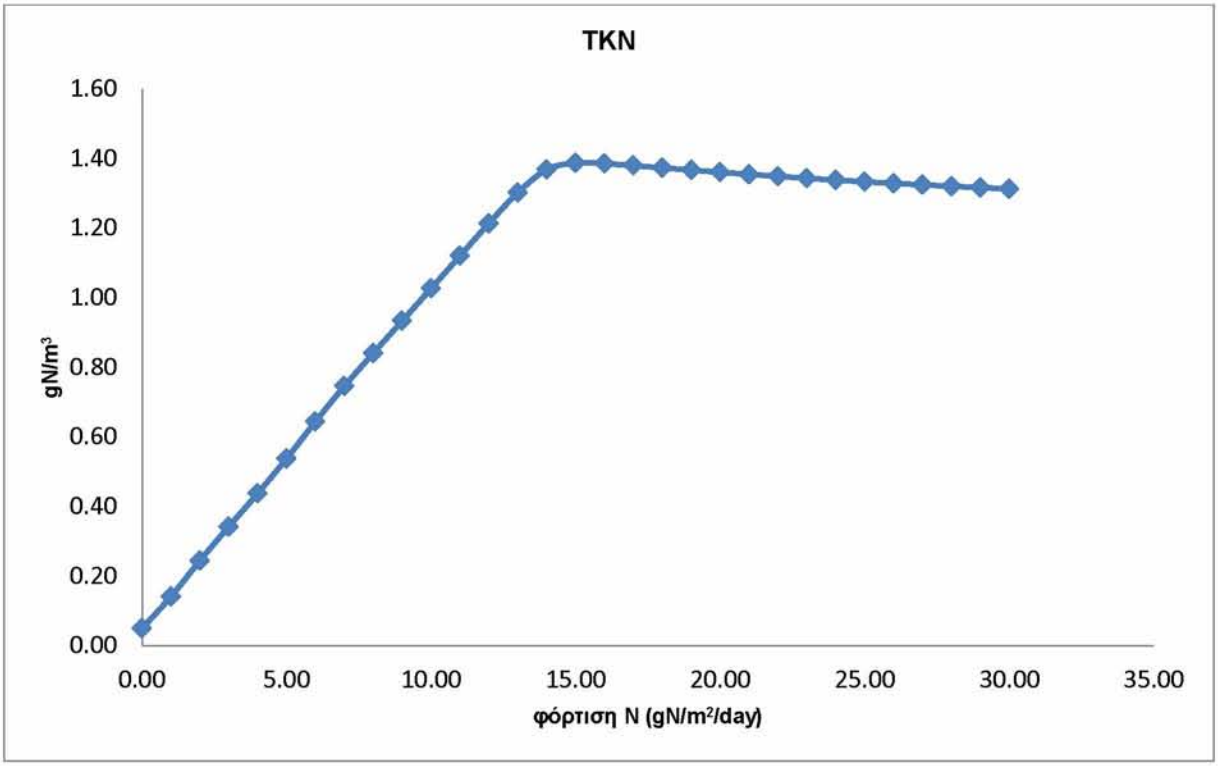


Διάγραμμα 6.57: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

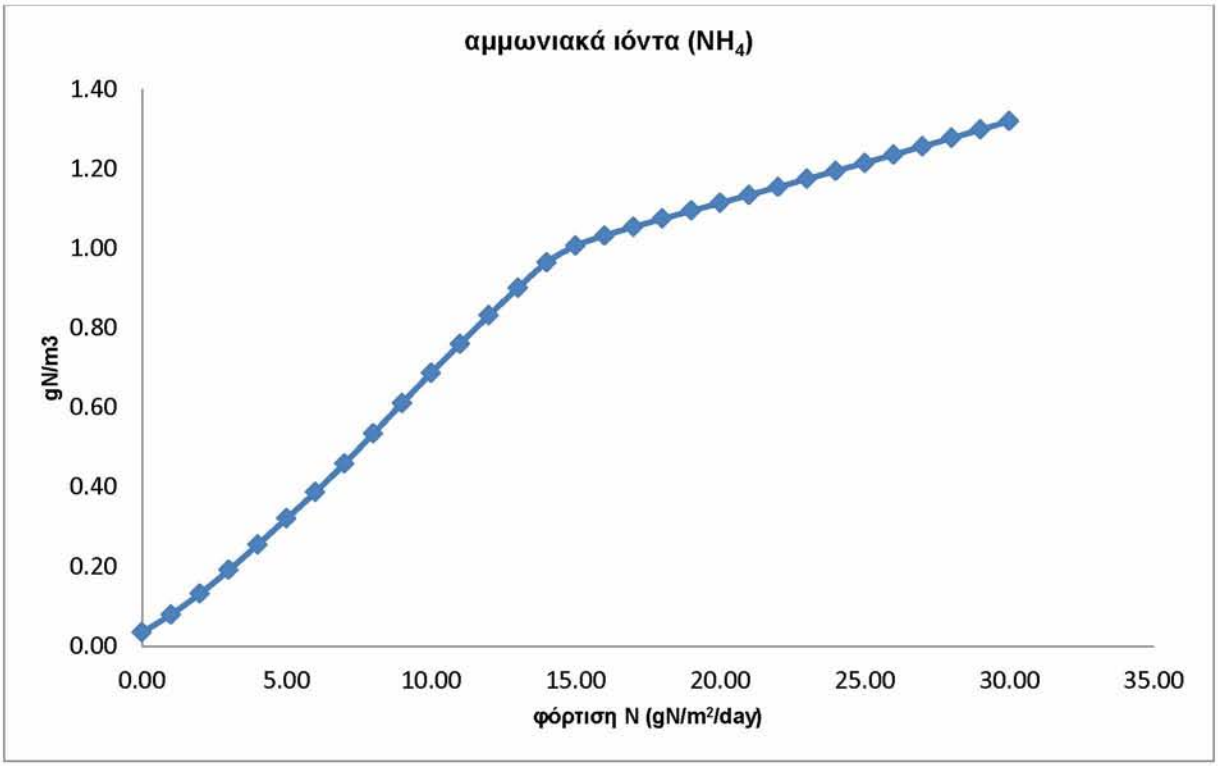


Διάγραμμα 6.58: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

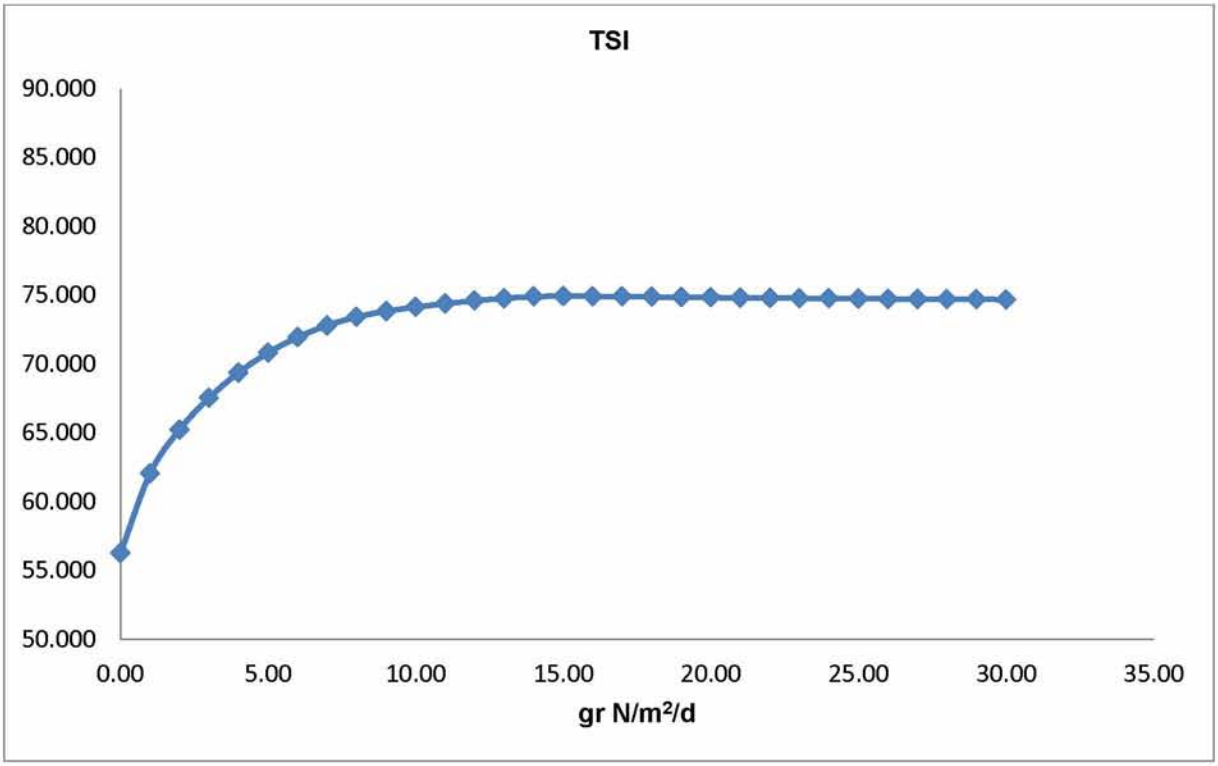


Διάγραμμα 6.59: μέσο θερινό επίπεδο TKN – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη



Διάγραμμα 6.60: μέσο θερινό επίπεδο αμμωνιακών ιόντων (NH_4) – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 6.61: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – φόρτιση αζώτου, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΥΓΡΟΤΟΠΙΚΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Οι υγροτοπικές εκτάσεις μέσα και περιφερειακά της λίμνης, λειτουργούν ευεργετικά έως ενός σημείου, για την τροφική κατάσταση της λίμνης. Μεταξύ των πολλών λειτουργιών τους είναι το φιλτράρισμα, η απορρόφηση των θρεπτικών που ειδάλλως θα κατέληγαν στη λίμνη και η παροχή καταφυγίου για τα μικρά ψάρια. (Laspidou et al., 2005) Αναλυτικότερα περιγράφονται οι μηχανισμού αυτών των περιοχών στα κεφάλαια 2 και 3 (λεπτομερέστερα).

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση αυτών των περιοχών στην λίμνη Κάρλα για χαμηλή και μέση στάθμη, όσον αφορά στην τροφική της κατάσταση. Εξετάζεται συγκεκριμένα η επίδραση για ένα εύρος περιοχών από 0% έως 40%. Το 40% κάλυψη με περιοχές καλάμων, φυσικά, αποτελεί ακραία περίπτωση, ωστόσο εξετάζεται έως αυτή την τιμή για λόγους πληρότητας.

7.1 Τάσεις φυσικών μεγεθών της λίμνης για την διάρκεια ενός τυπικού έτους για κάλυψη με περιοχές καλάμων κατά 0, 10, 20 και 30% και χαμηλή στάθμη λίμνης

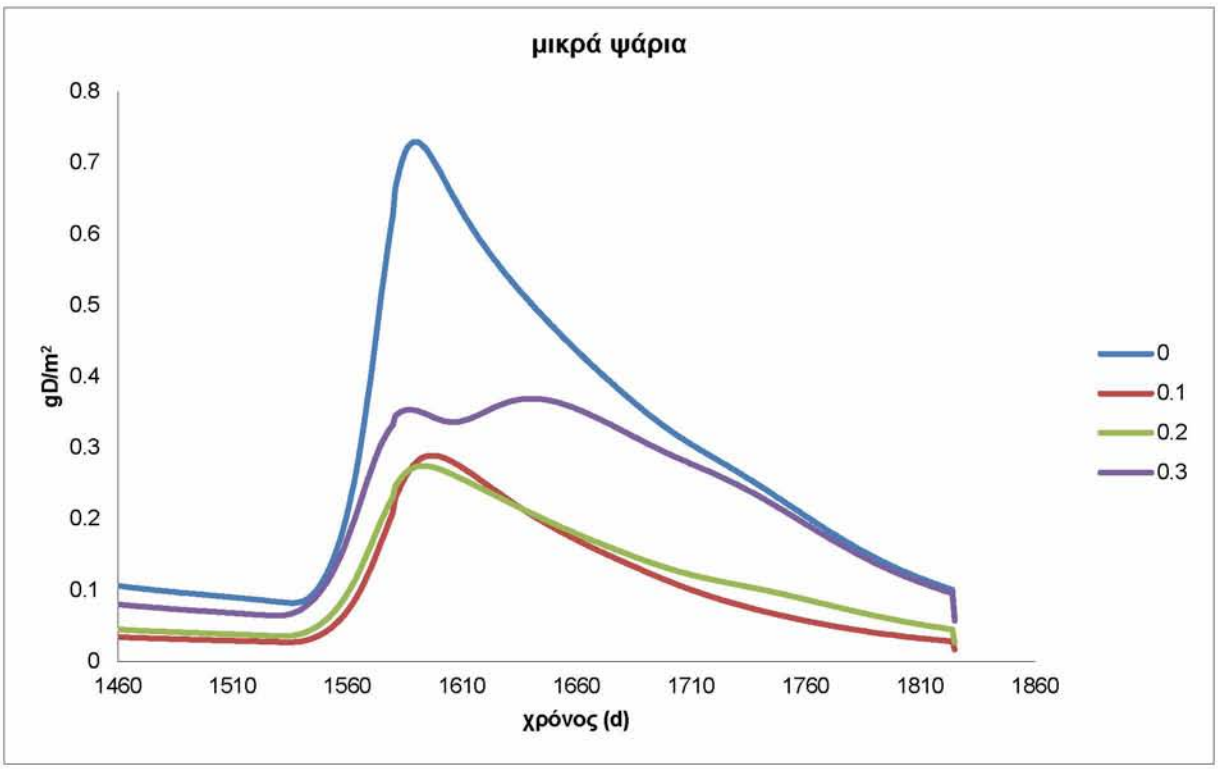
Τα μικρά ψάρια φαίνεται ότι απουσία περιοχών καλάμων κρατούν υψηλές τιμές. Αυτό αποτελεί ακραία μη επιθυμητή περίπτωση αφού στις ίδιες ακριβώς μηδενικές τιμές περιοχών καλάμων παρατηρούνται πολύ υψηλά επίπεδα χλωροφύλλης-α και κακή τροφική κατάσταση. Τα μικρά ψάρια αποκτούν πάλι υψηλές τιμές για όλο και αυξανόμενη κάλυψη καλάμων και μάλιστα σε πολύ καλύτερη τροφική ισορροπία. Τα μεγάλα ψάρια μειώνονται πάντα, με την αύξηση των καλάμων και διατηρούνται σε σχετικά σταθερά επίπεδα κατά τη διάρκεια του έτους. Τα αρπακτικά ψάρια δεν επηρεάζονται. (Διαγράμματα 7.1 έως 7.4)

Η βυθισμένη βλάστηση παρά τη δέσμευση των θρεπτικών από τους καλάμους, αυξάνεται με την αύξηση των καλάμων. Αυτό σημαίνει ότι υπερτερεί η ανταγωνιστική σχέση που έχουν τα μακρόφυτα με τις άλγεις. Οι άλγεις με την σειρά τους αναστέλλονται από την αύξηση των καλάμων και συνεπώς την συγκράτηση των θρεπτικών από τους τελευταίους. Η χλωροφύλλη-α αναδεικνύει την τάση των άλγεων. Το βάθος Secchi αυξάνεται όσο αυξάνονται οι κάλαμοι. (Διαγράμματα 7.5 έως 7.11)

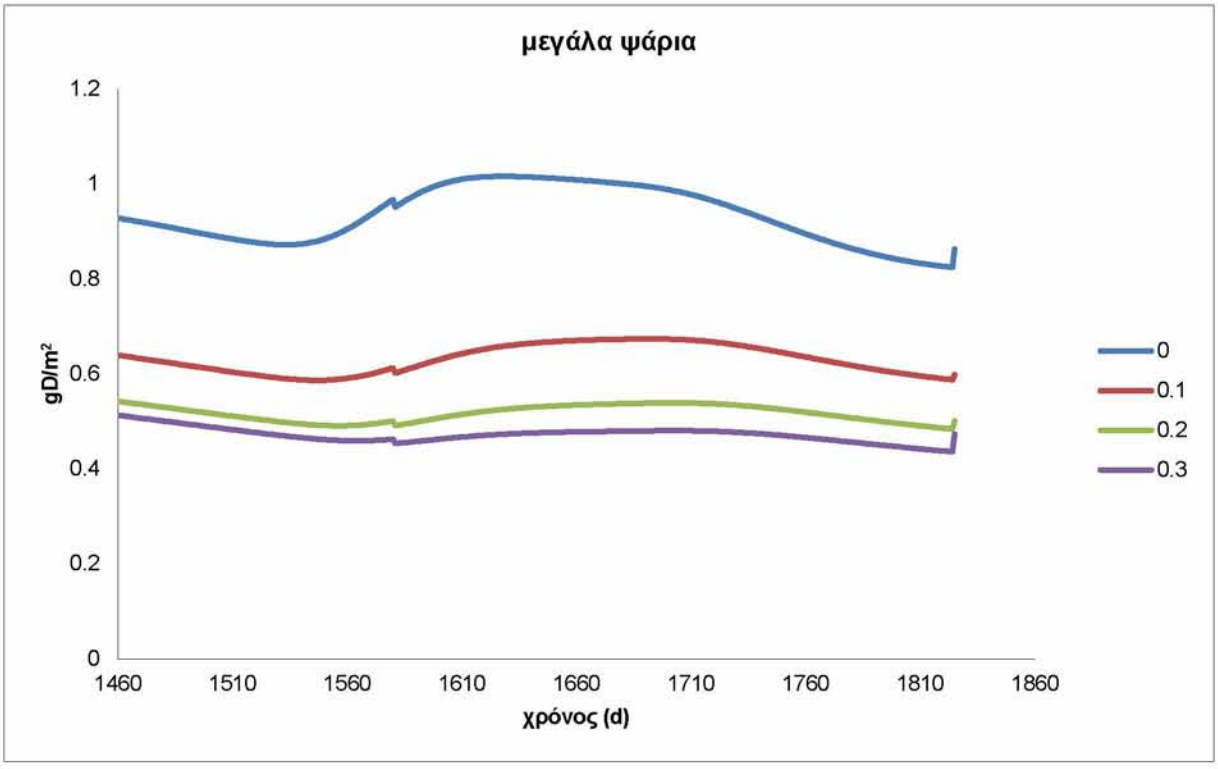
Τα νιτρικά, τα αμμωνιακά και φωσφορικά ιόντα μειώνονται με την αύξηση των καλάμων καθώς και το οργανικό άζωτο ΤΚΝ. (Δια γράμματα 7.12 έως 7.15)

Η τροφική κατάσταση της λίμνης κυμαίνεται μεταξύ 75 και 90 βαθμών TSI με τοπικό ελάχιστο την άνοιξη που μόνο για κάλυψη 30% πέφτει κάτω από το όριο των 70. (Διάγραμμα 7.16)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

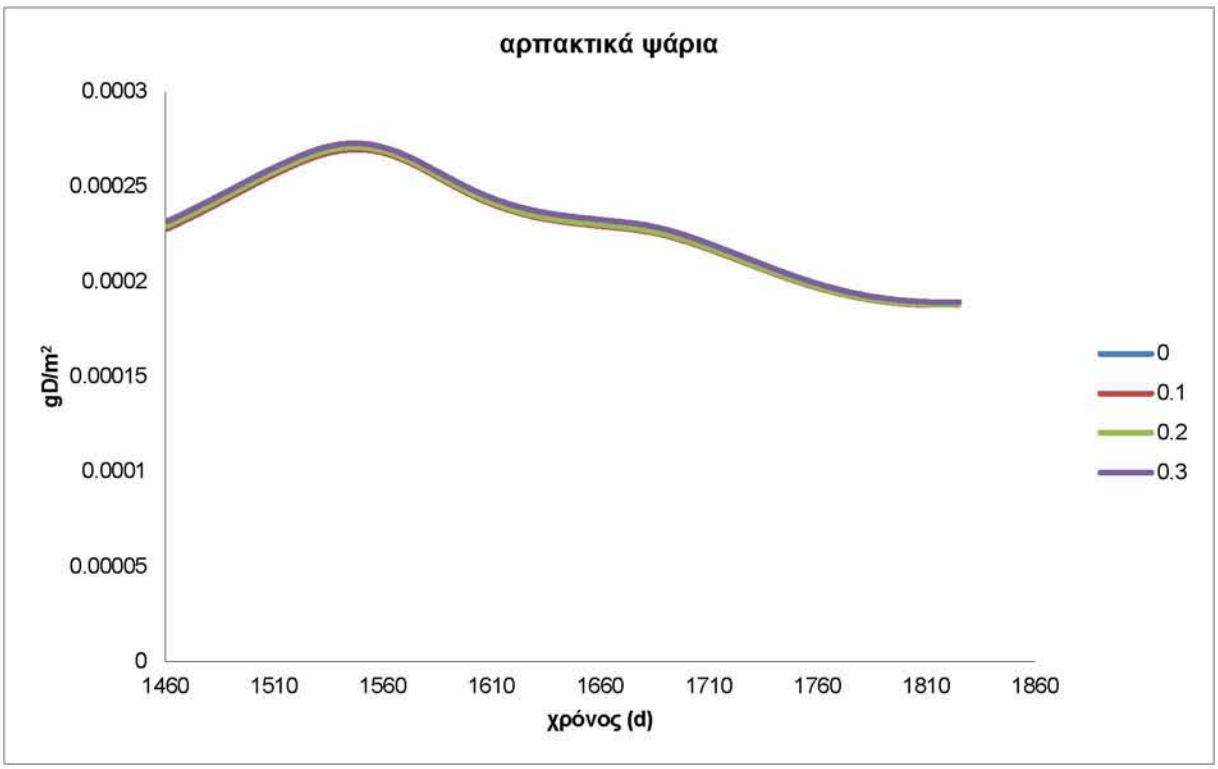


Διάγραμμα 7.63 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

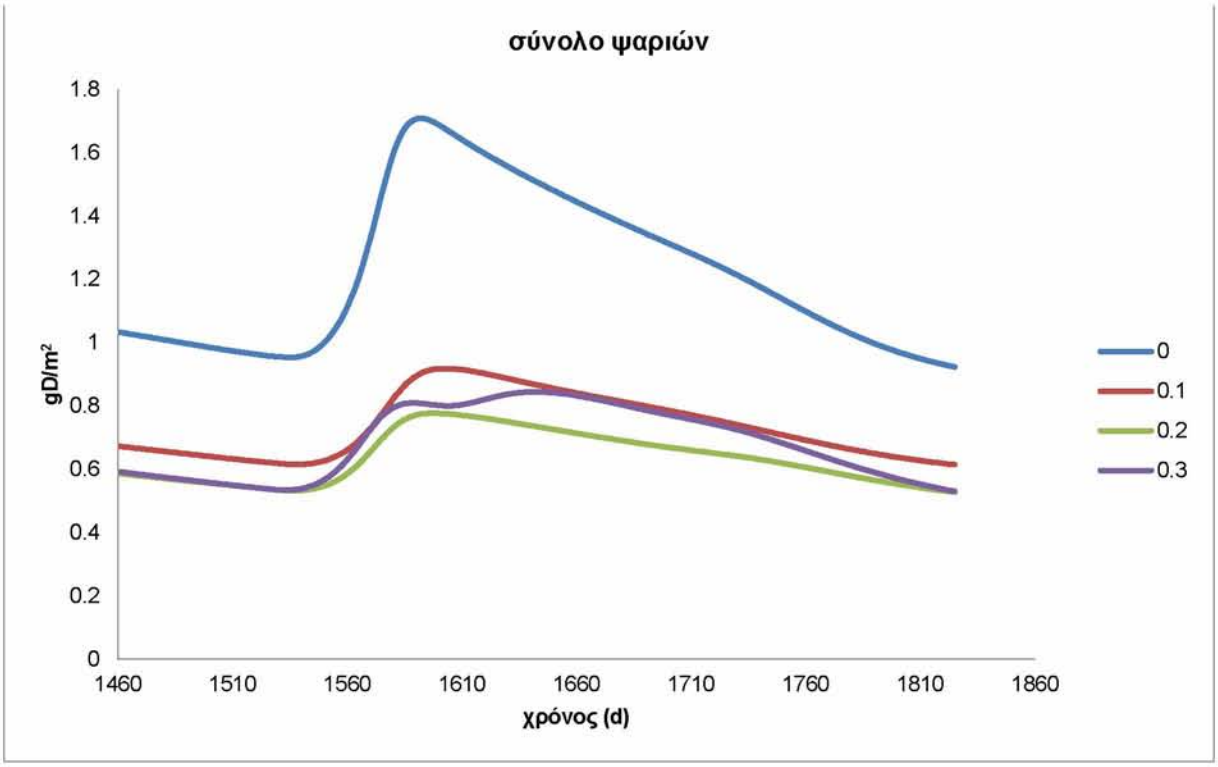


Διάγραμμα 7.64 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

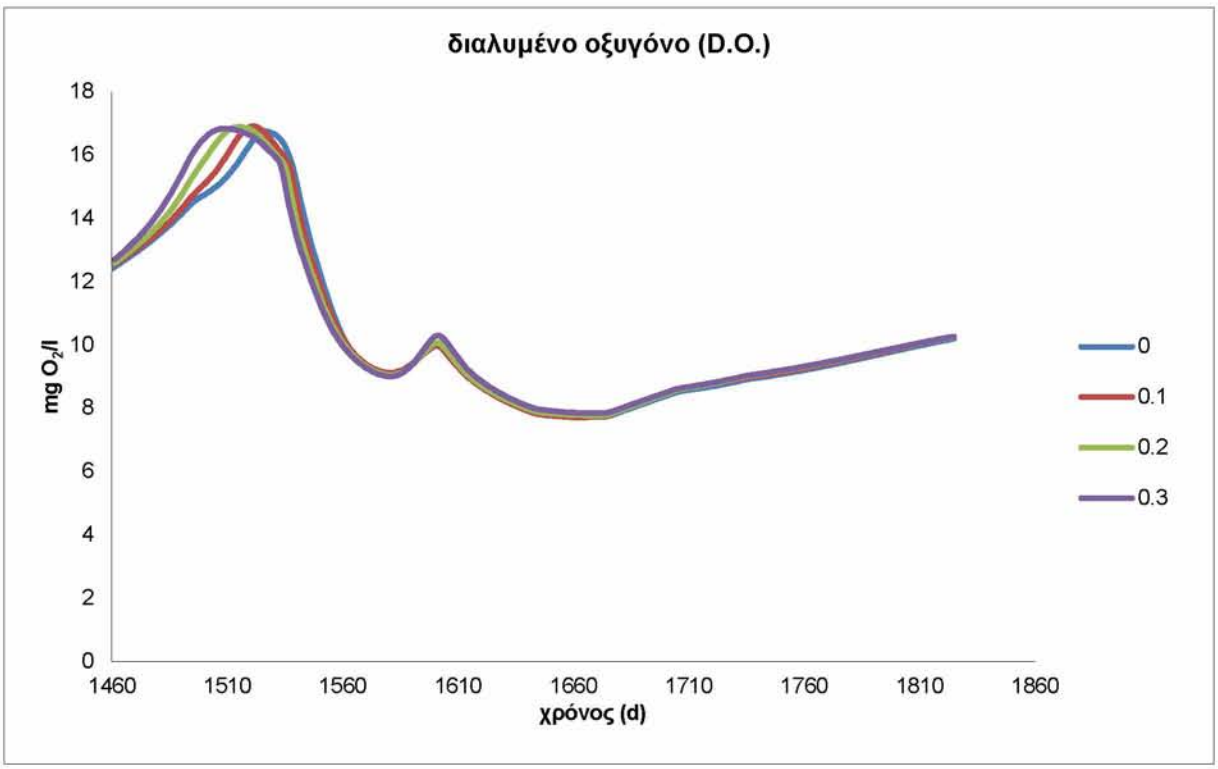


Διάγραμμα 7.65: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

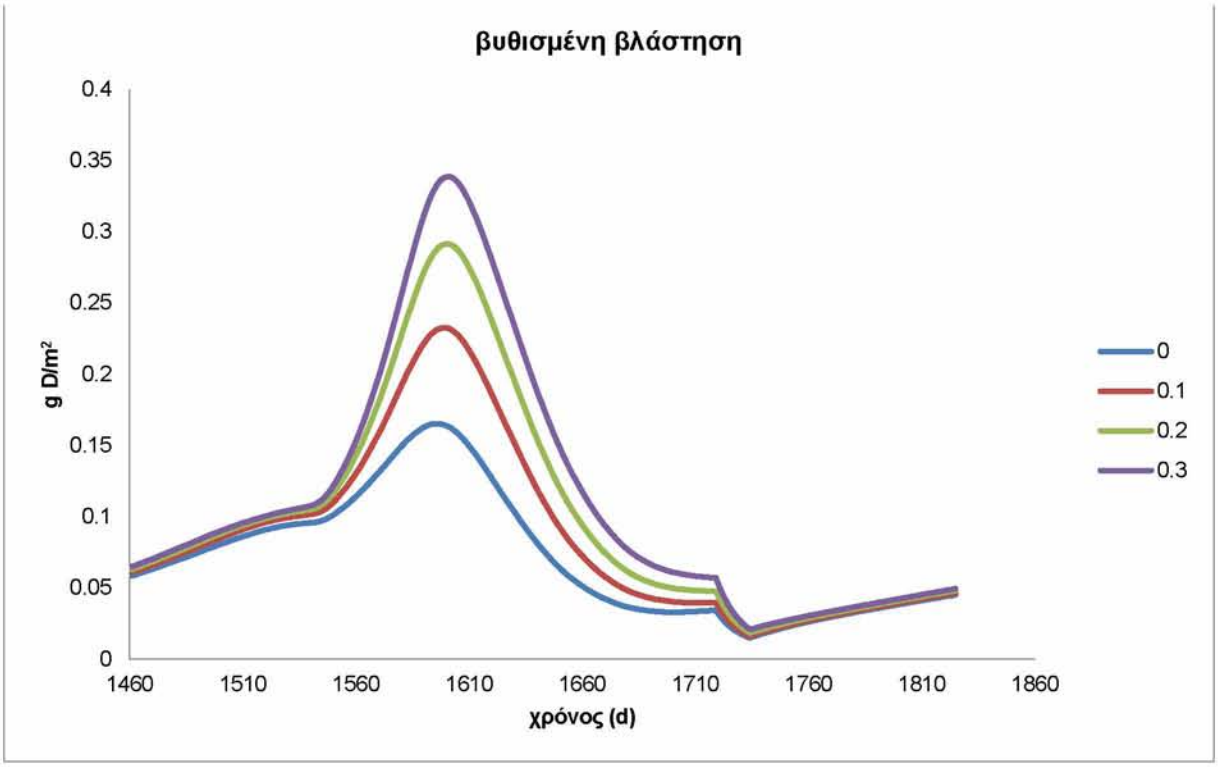


Διάγραμμα 7.66: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

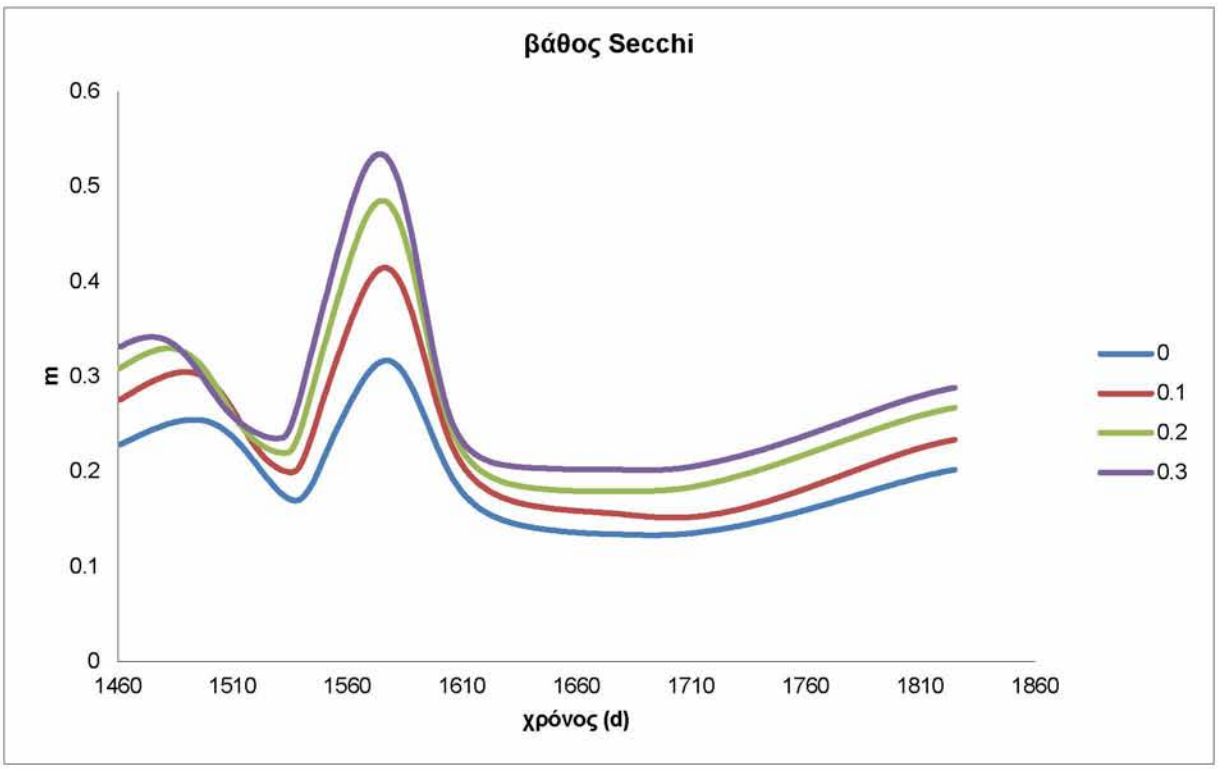


Διάγραμμα 7.67: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

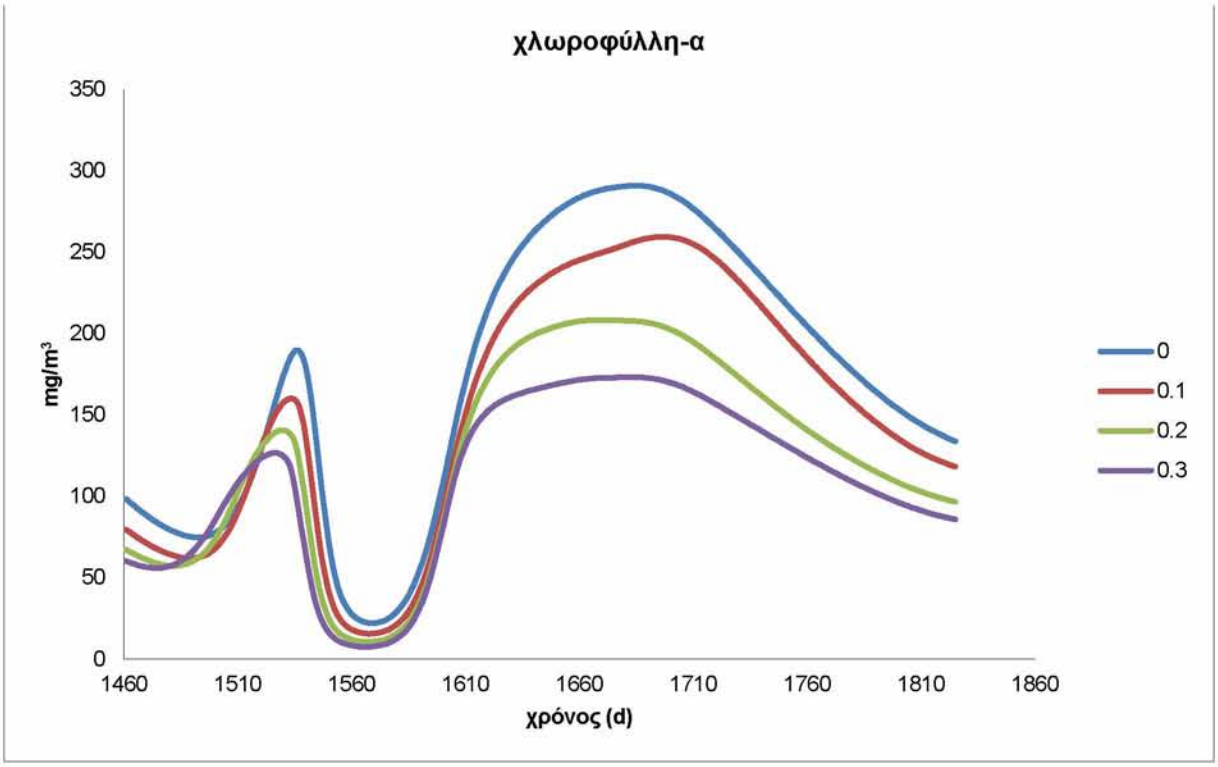


Διάγραμμα 7.68: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

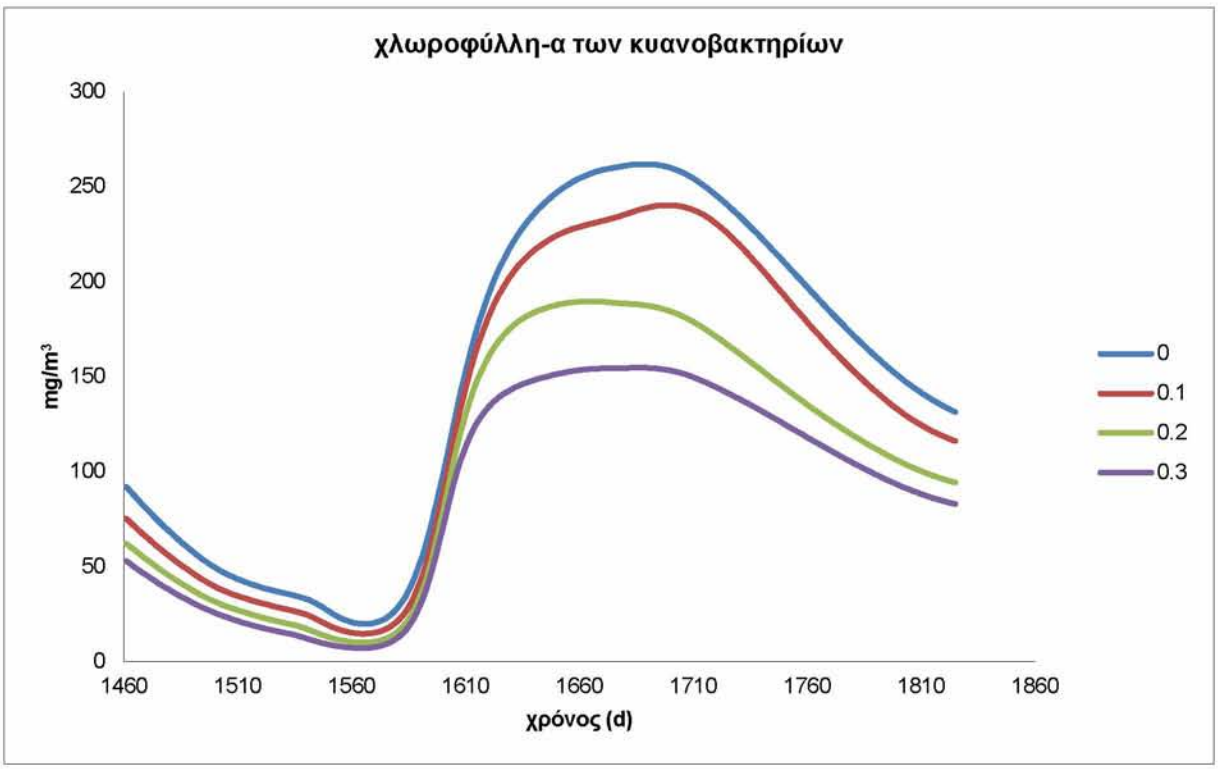


Διάγραμμα 7.69: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

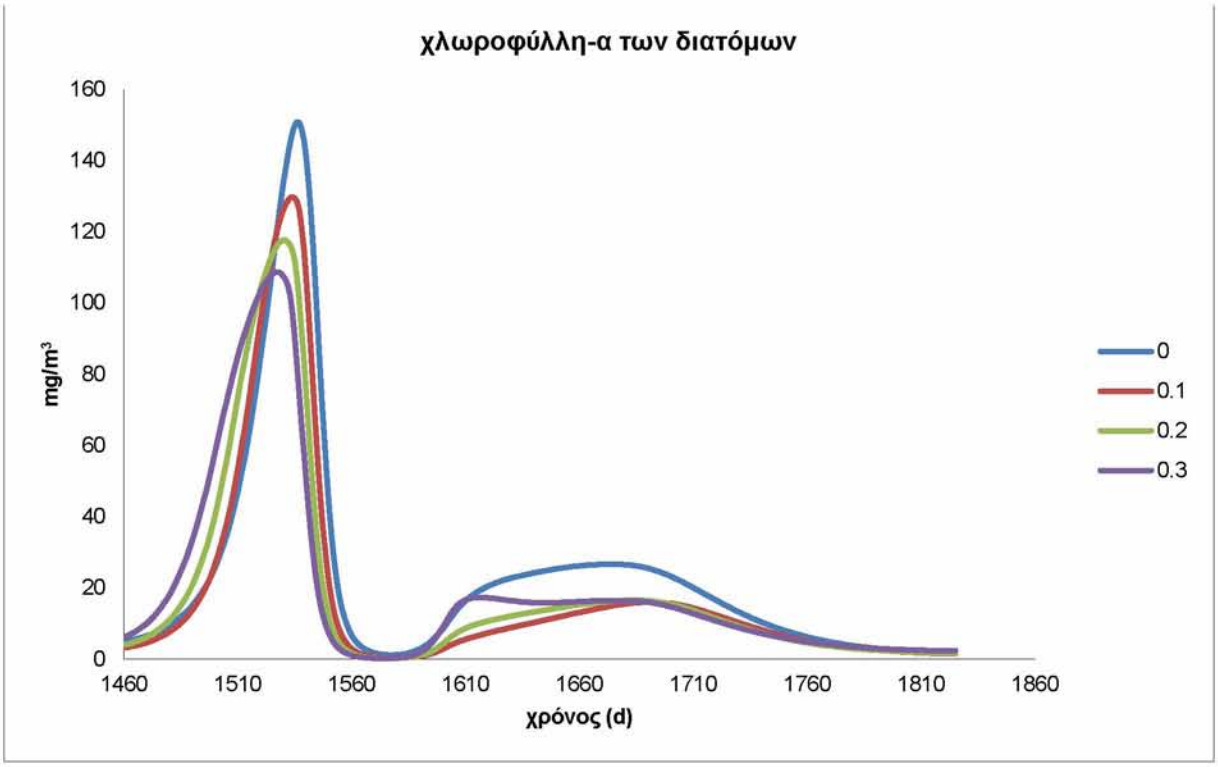


Διάγραμμα 7.70: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

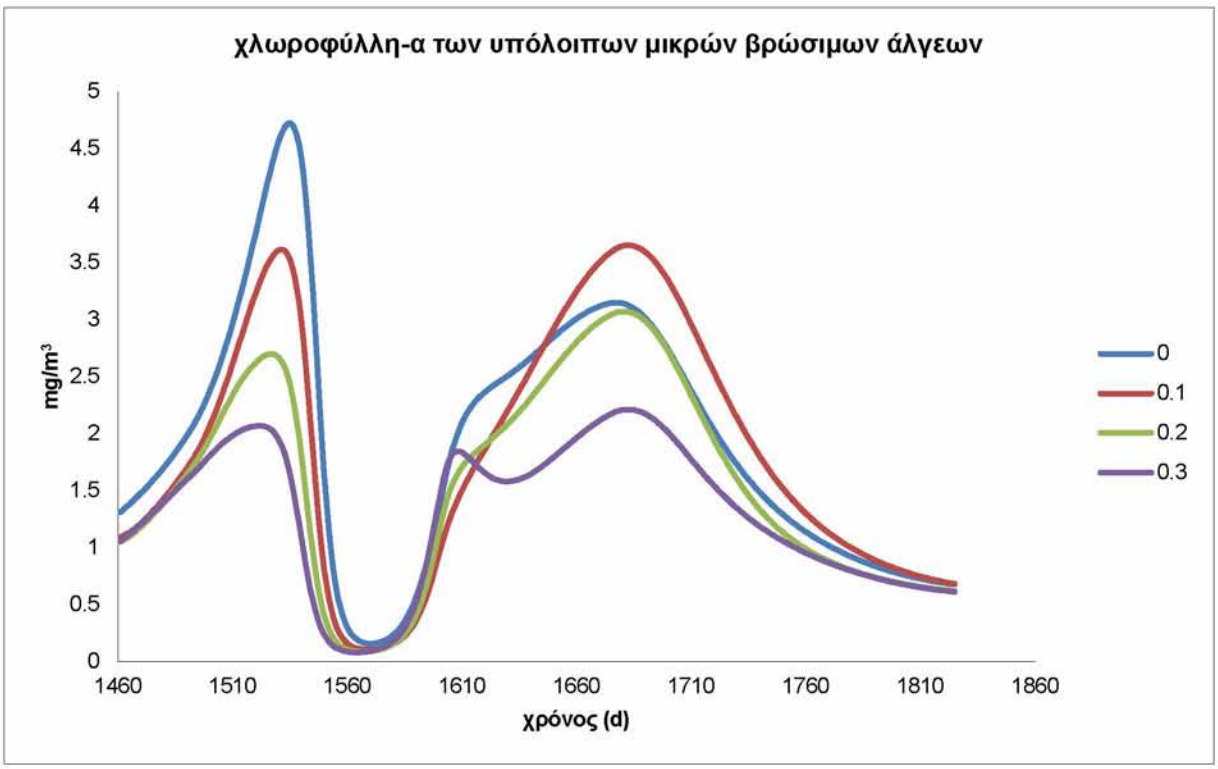


Διάγραμμα 7.71: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

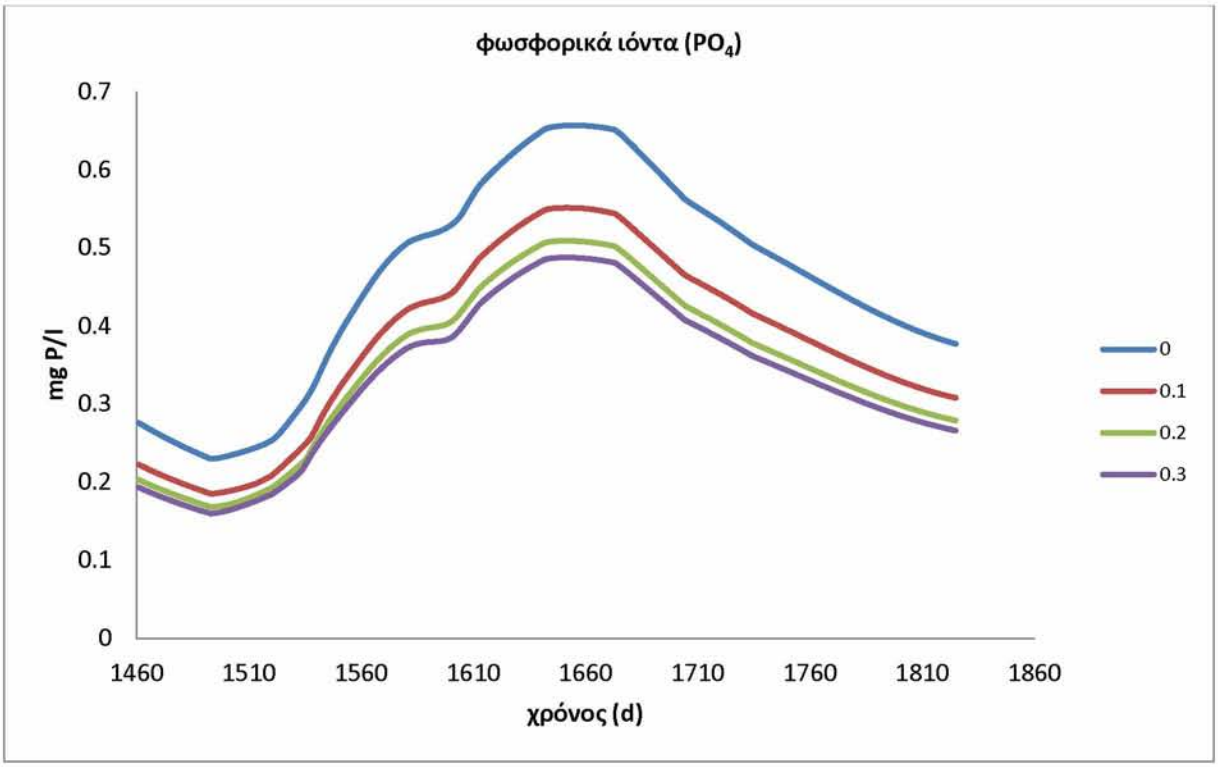


Διάγραμμα 7.72: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

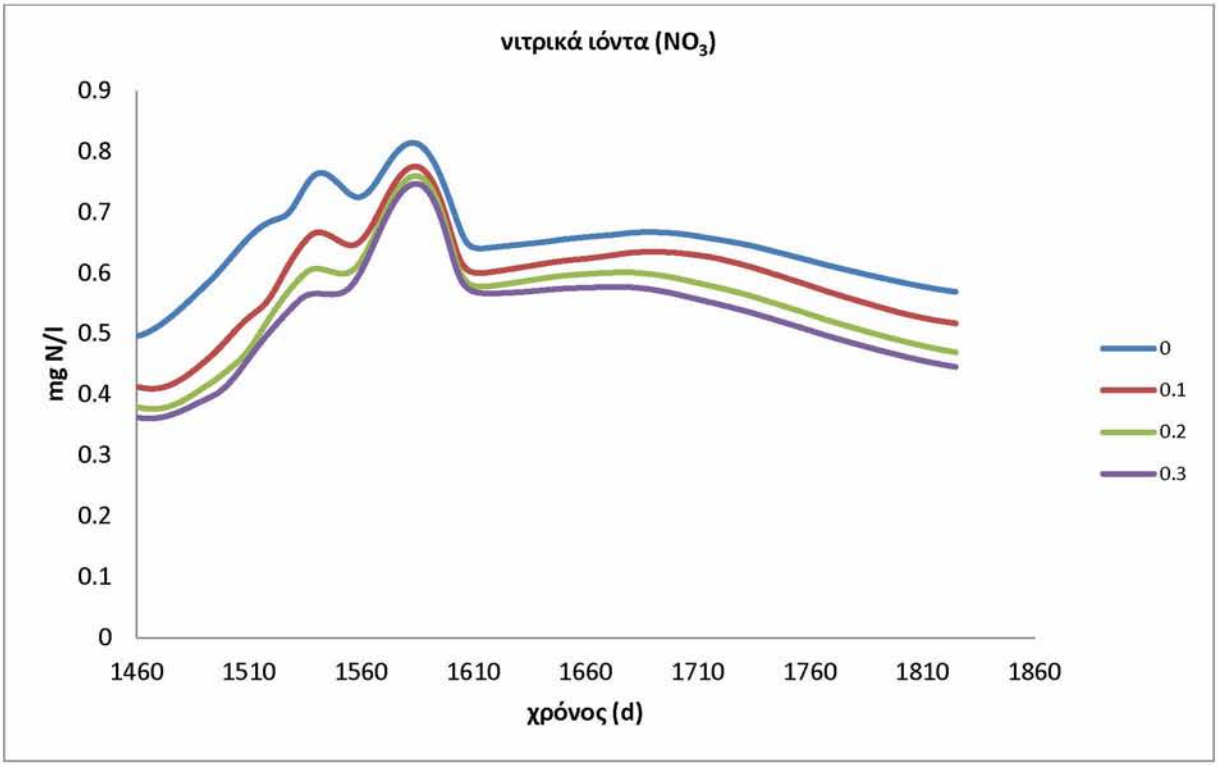


Διάγραμμα 7.73: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

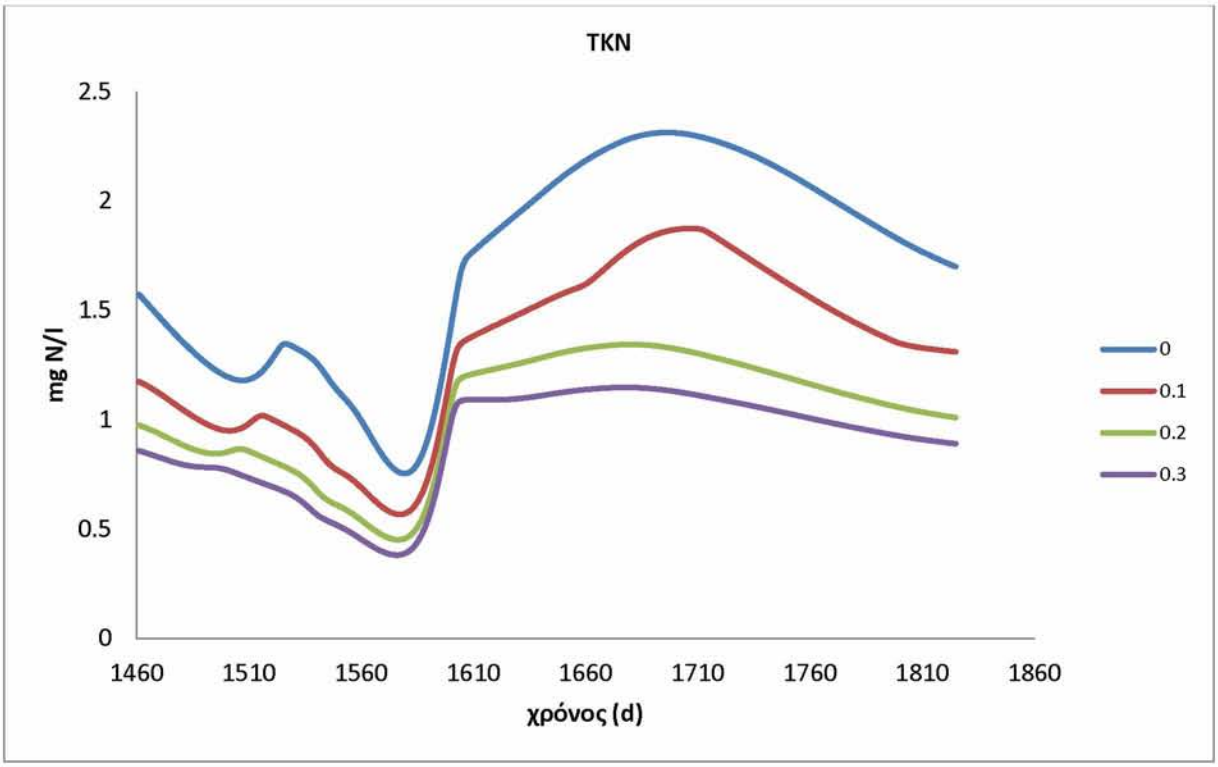


Διάγραμμα 7.74: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

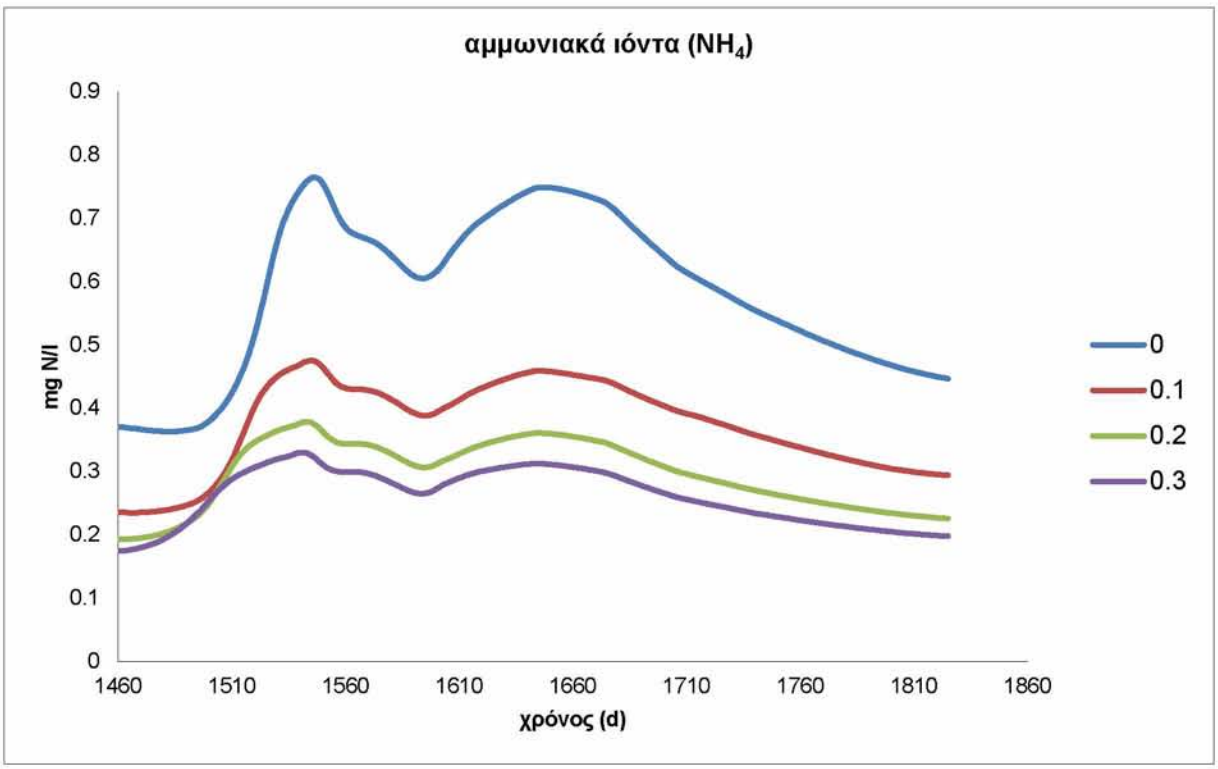


Διάγραμμα 7.75: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

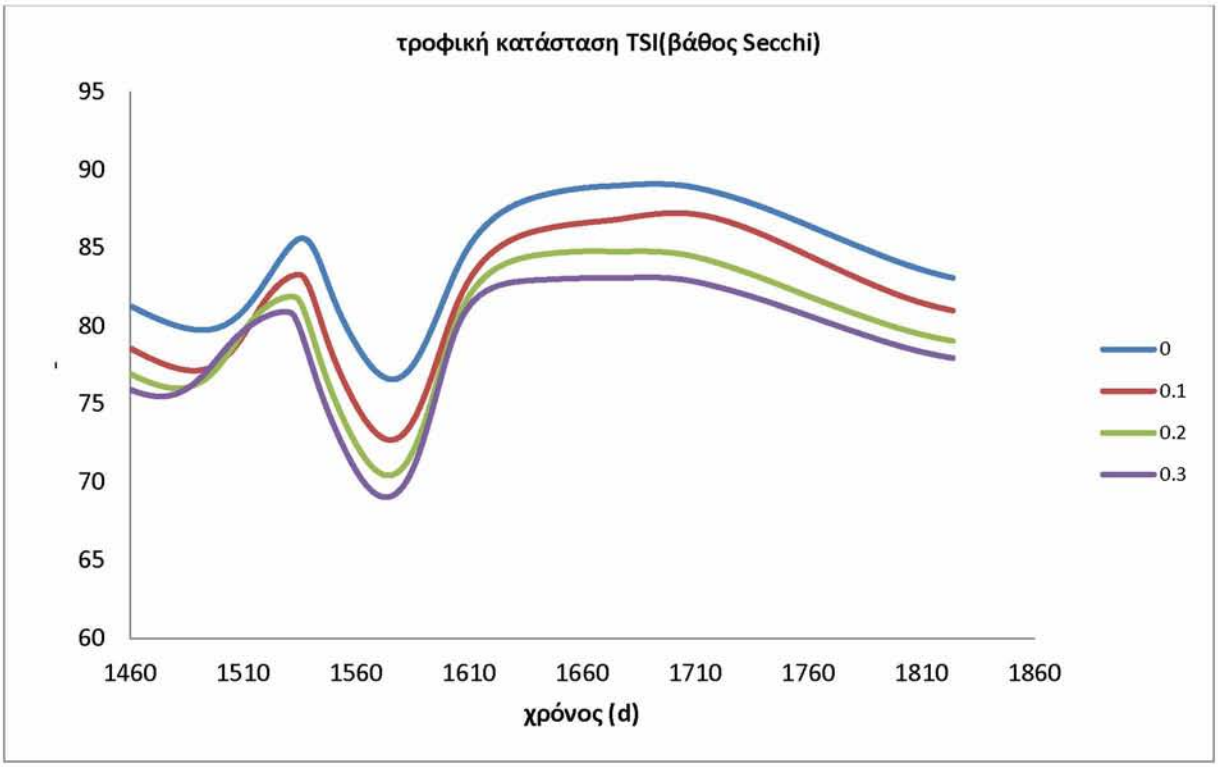


Διάγραμμα 7.76: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 7.77: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη



Διάγραμμα 7.78: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για χαμηλή στάθμη

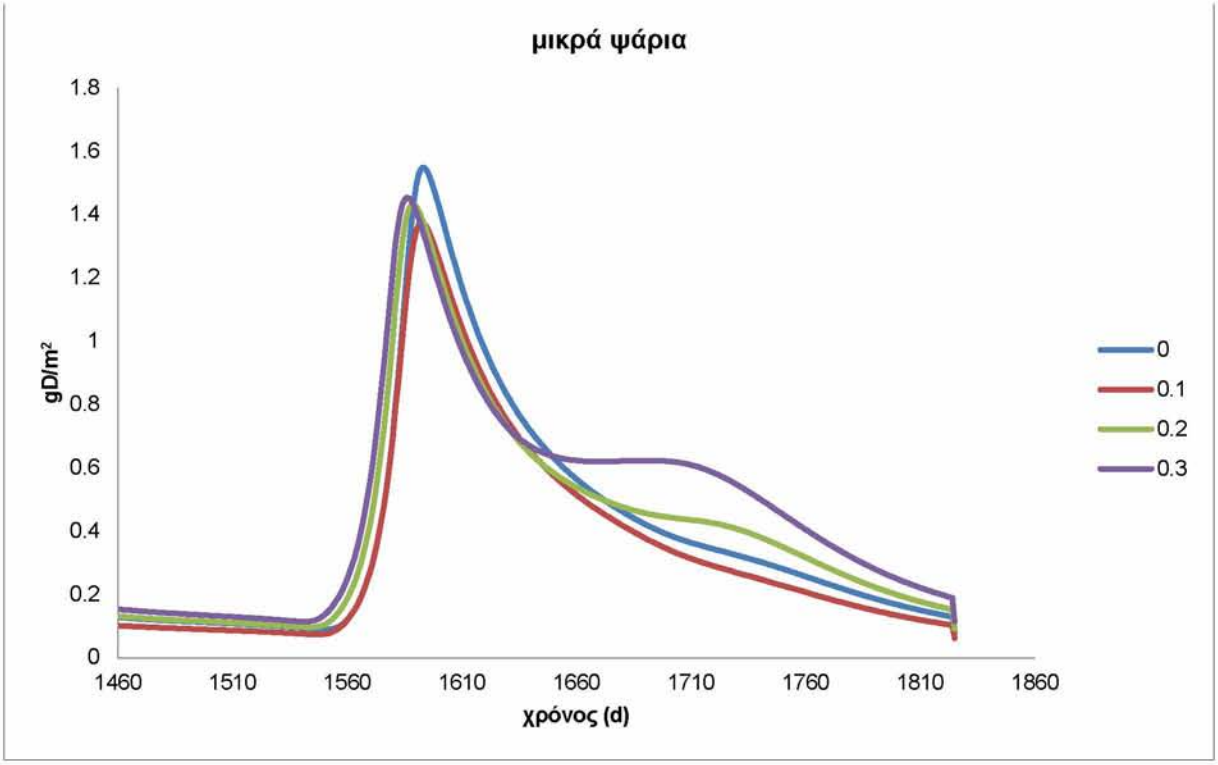
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

7.2 Οι καμπύλες φυσικών μεγεθών της λίμνης για την διάρκεια ενός τυπικού έτους για κάλυψη κατά 0, 10, 20 και 30% και μέση στάθμη λίμνης

Οι περιοχές καλάμων δεν φαίνεται να επηρεάζουν για λίμνη μέση στάθμης, σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο για χαμηλής, τα μεγέθη της λίμνης που πιο έμμεσα συνδέονται με τον ευτροφισμό, όπως τα ψάρια. (Διαγράμματα 7.17 έως 7.20)

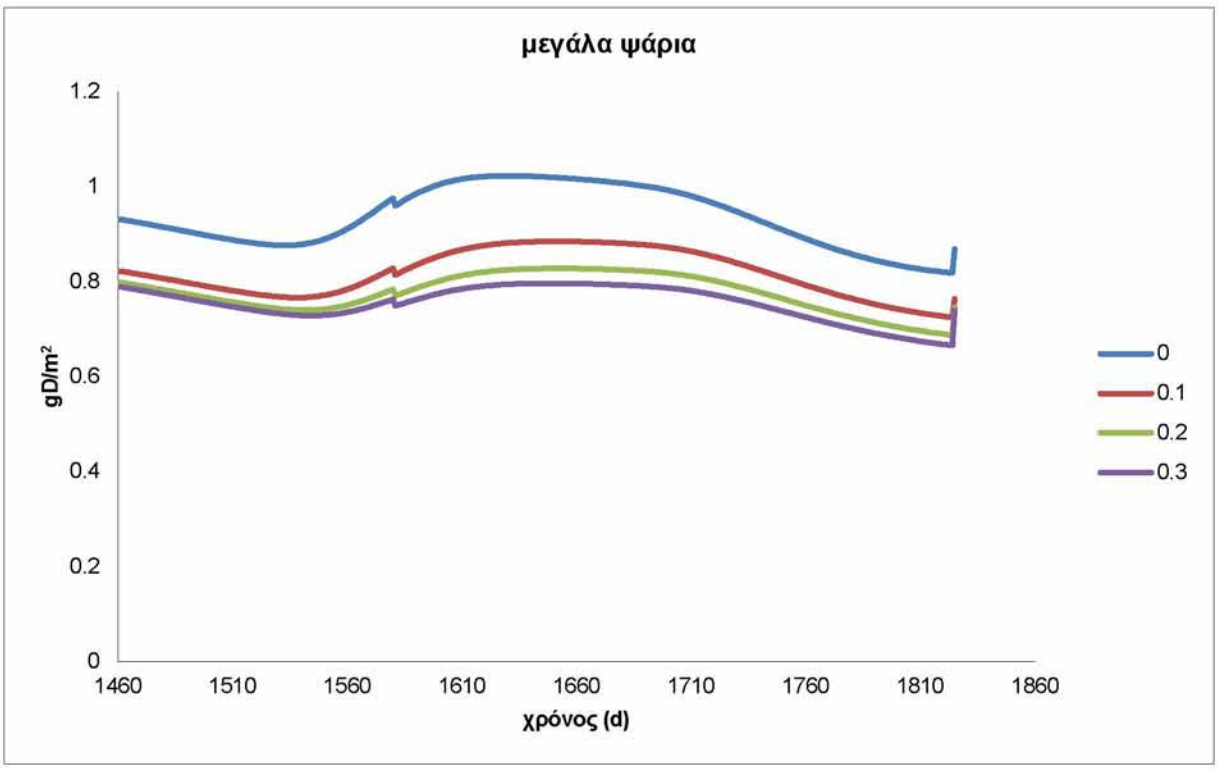
Αυτά που επηρεάζονται αισθητά είναι η χλωροφύλλη-α των κυανοβακτηρίων, τα αμμωνιακά ιόντα και το οργανικό άζωτο και δευτερεύοντας τα φωσφορικά και νιτρικά ιόντα.

Η τροφική κατάσταση για λίμνη μέσης στάθμης δεν επηρεάζεται θεαματικά, αλλά αποτελεί κρίσιμο σημείο η θερινή μείωση κατά 5 βαθμούς TSI από κάλυψη 0% έως 30%. Οι 5 βαθμοί αυτοί, καταφέρνουν να ρίξουν το επίπεδο τροφικής κατάστασης κάτω από το όριο των 70 βαθμών TSI για ολόκληρο το έτος. Αυτό βέβαια γίνεται για υψηλή κάλυψη, αλλά ξαι με μικρότερες καλύψης, τα αποτελέσματα είναι κάπως ικανοποιητικά. (Διαγράμματα 7.21 έως 7.32)

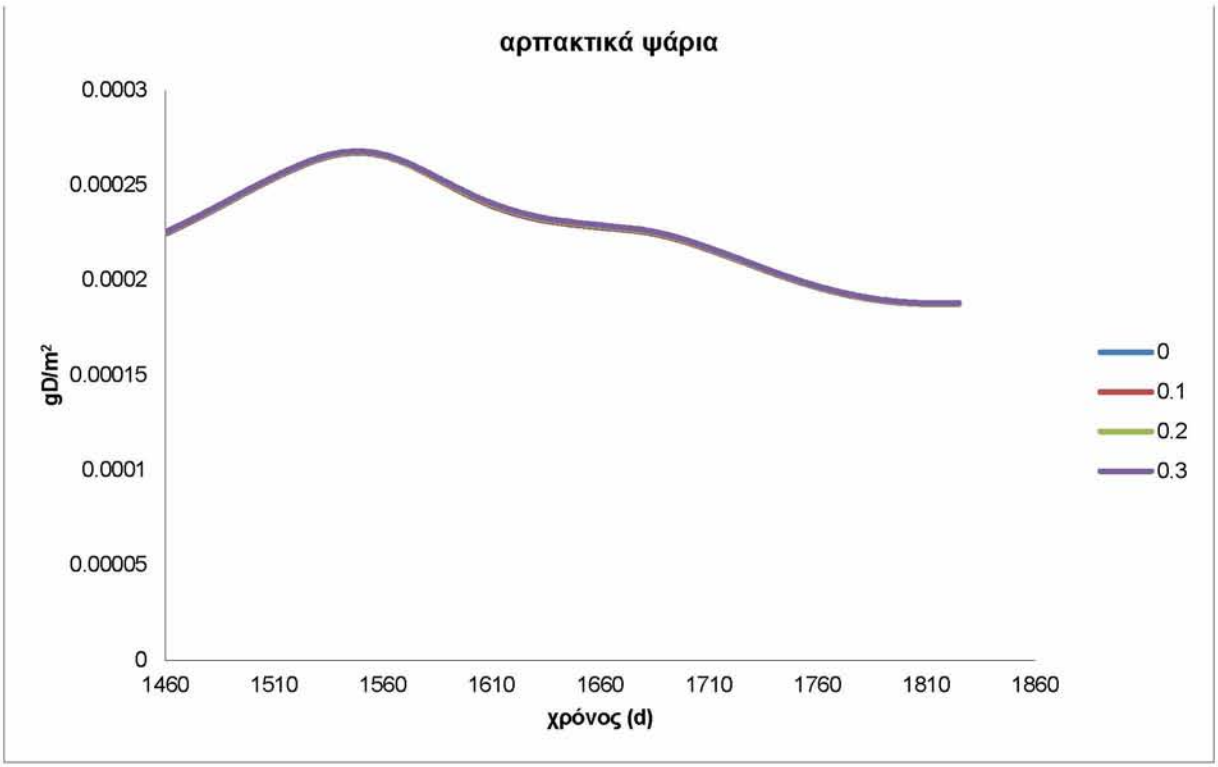


Διάγραμμα 7.79: μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

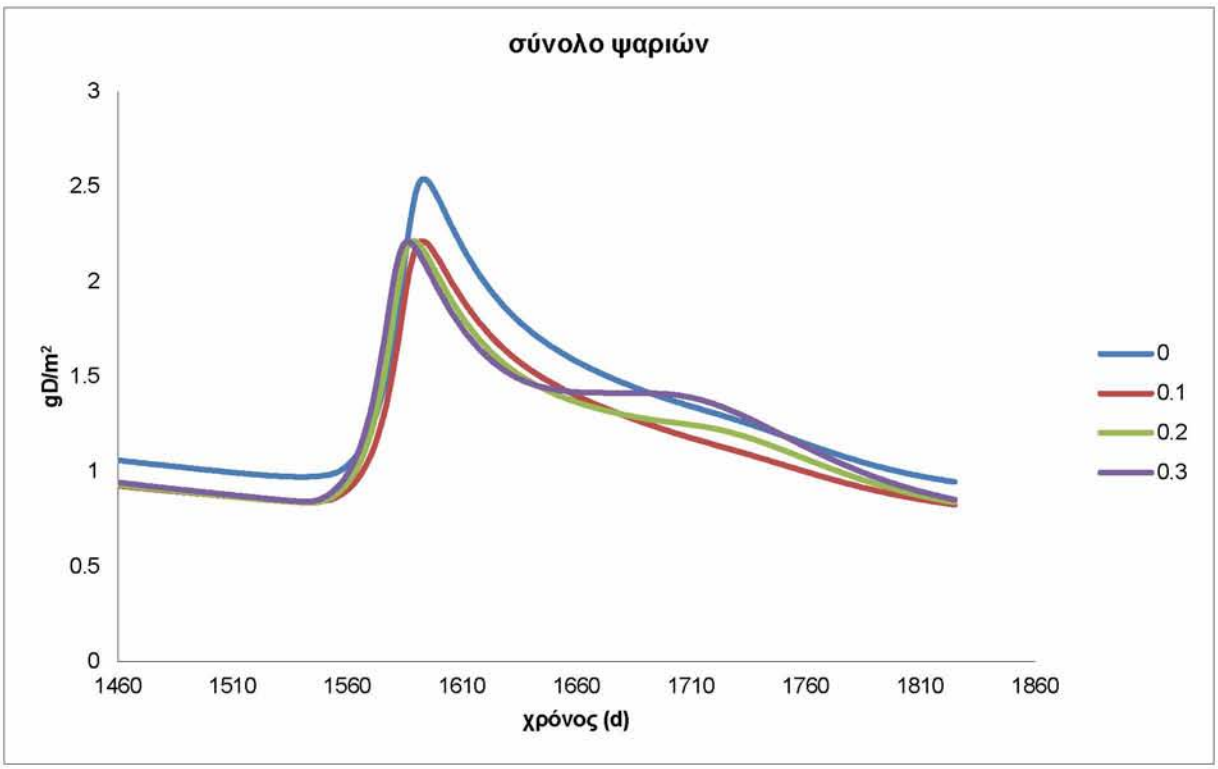


Διάγραμμα 7. 80: μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

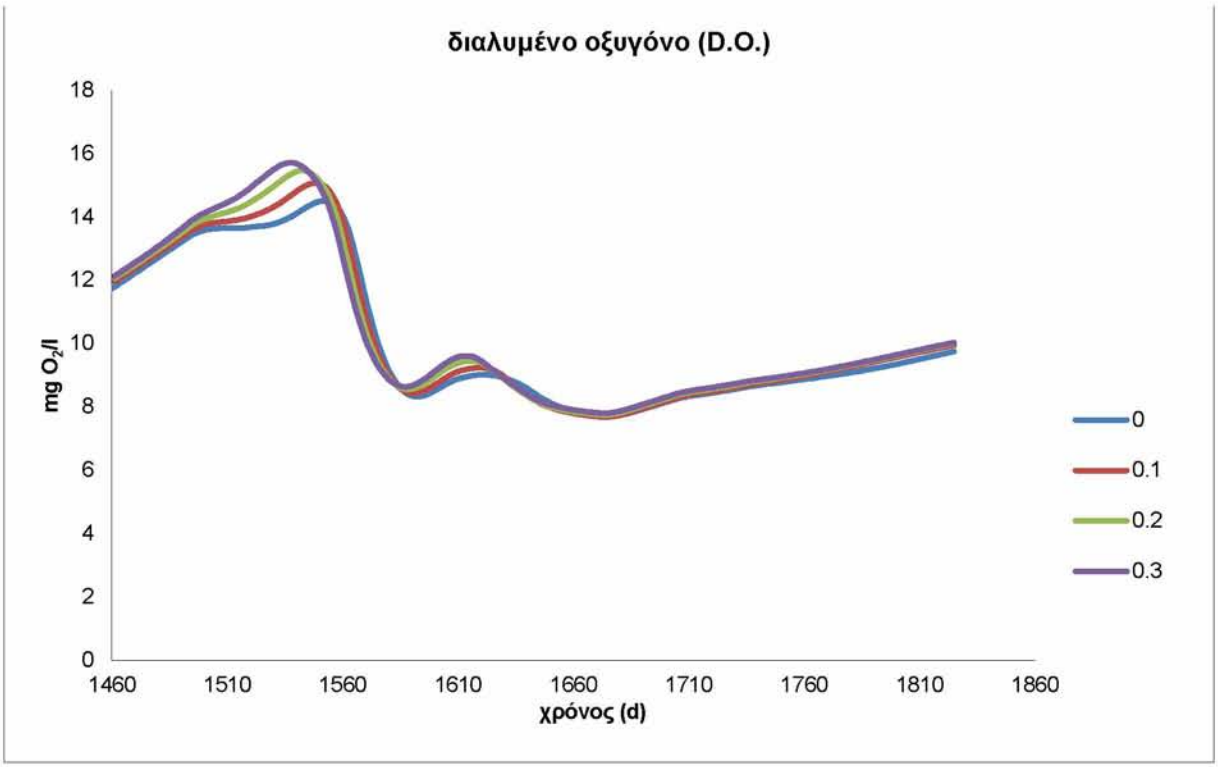


Διάγραμμα 7.81: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

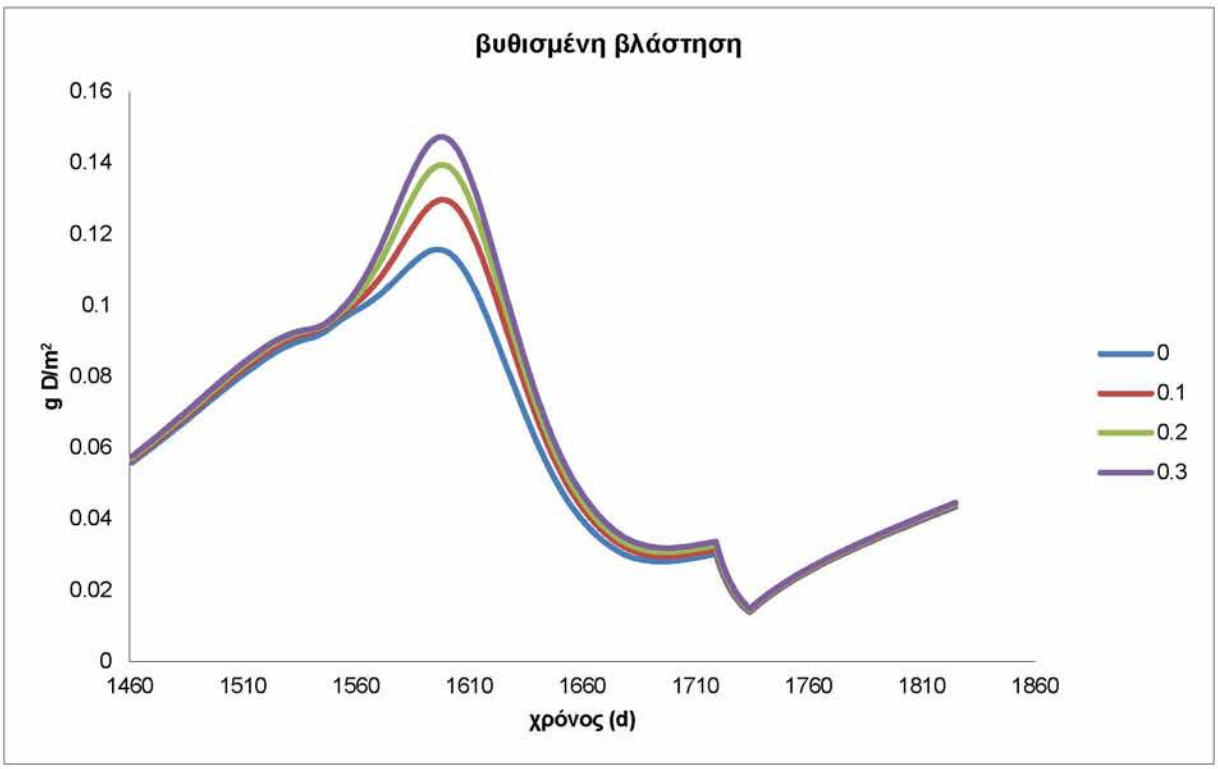


Διάγραμμα 7.82: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

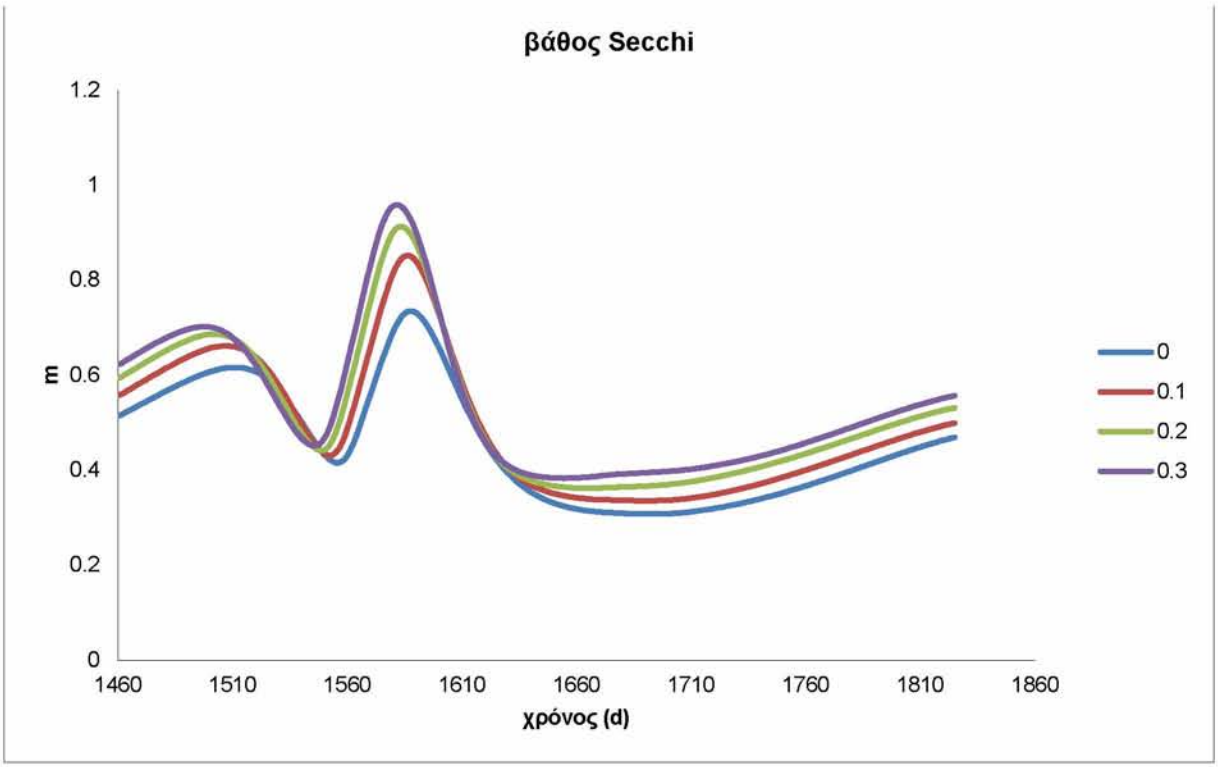


Διάγραμμα 7.83: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

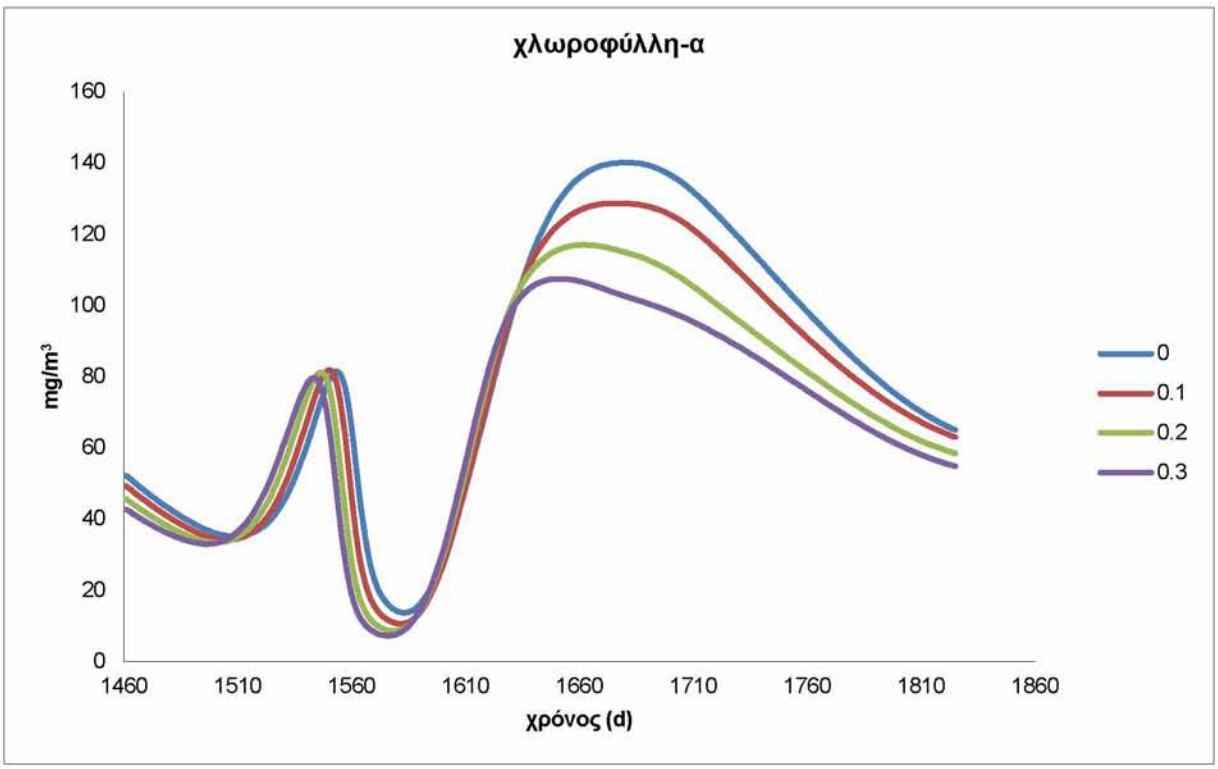


Διάγραμμα 7.84: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

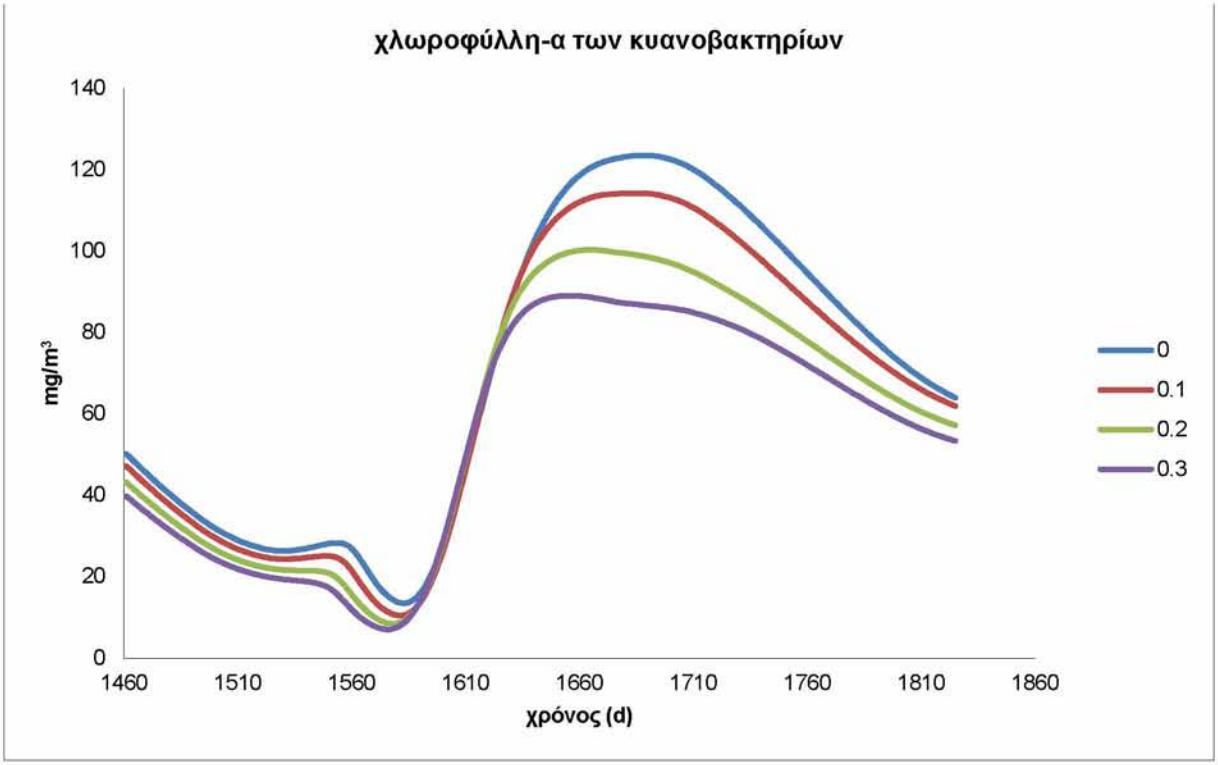


Διάγραμμα 7.85: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

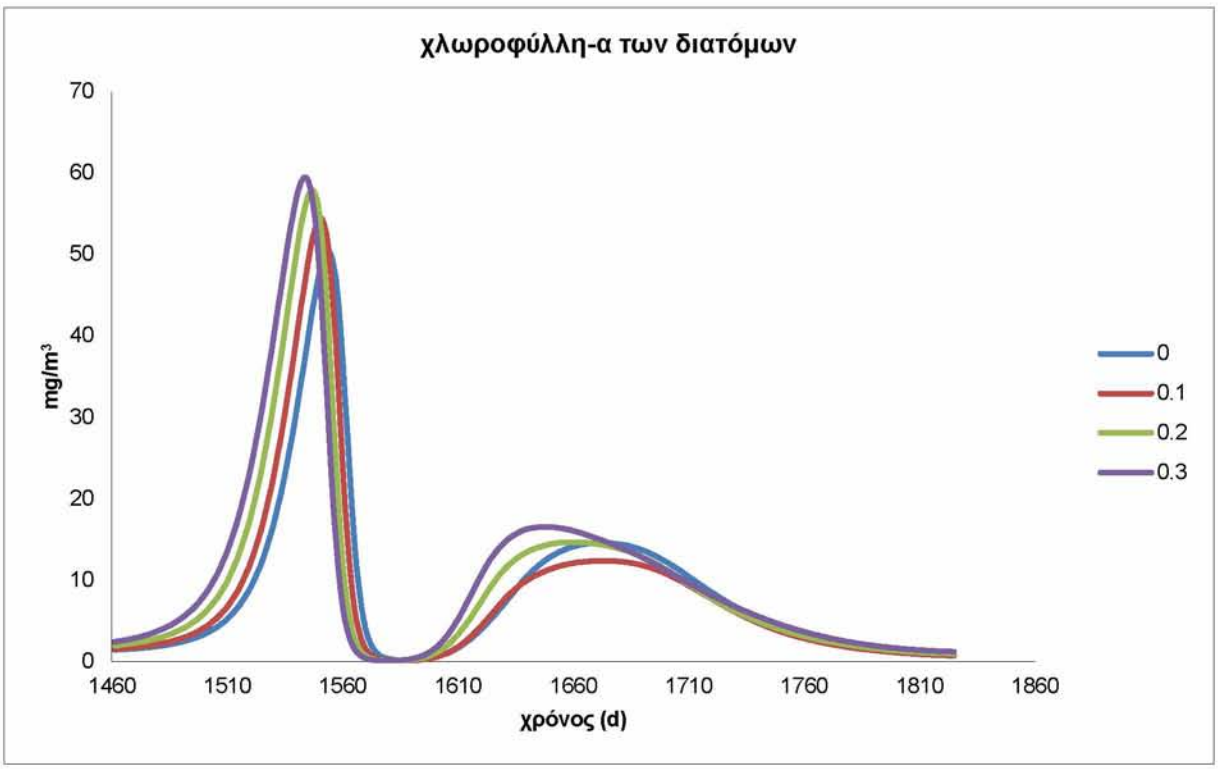


Διάγραμμα 7.86: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

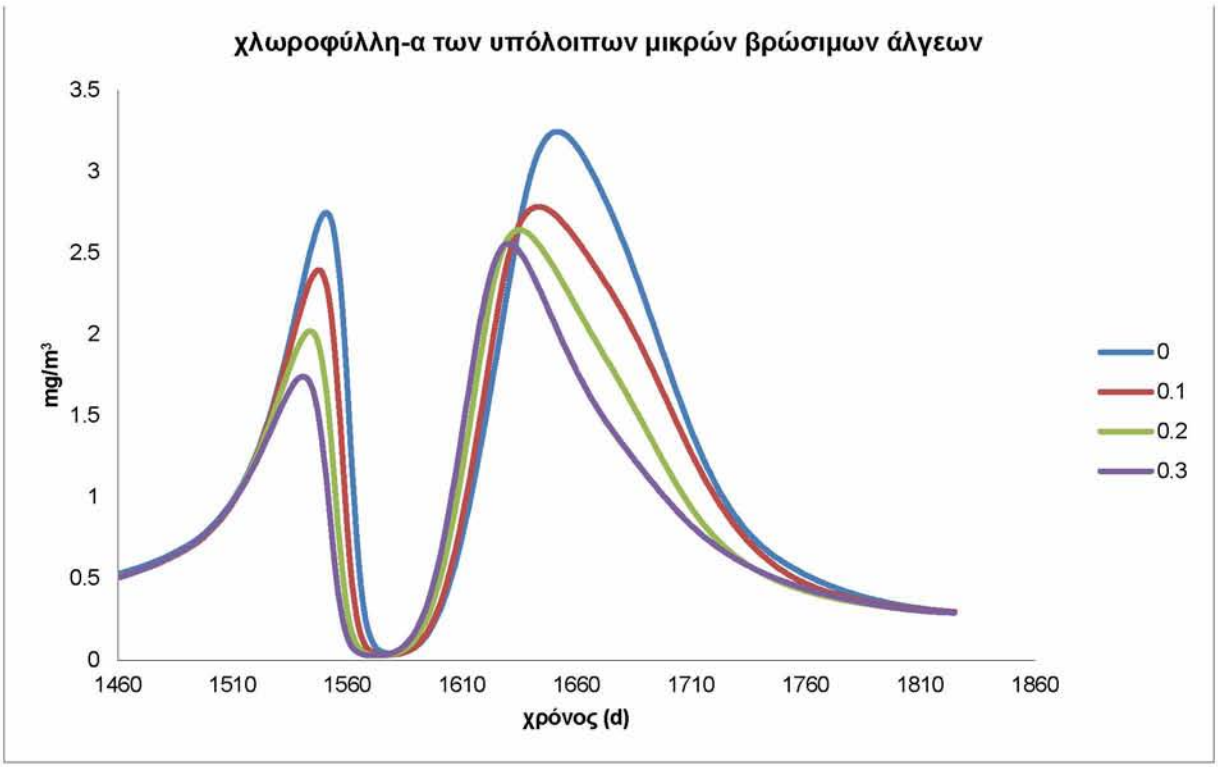


Διάγραμμα 7.87: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

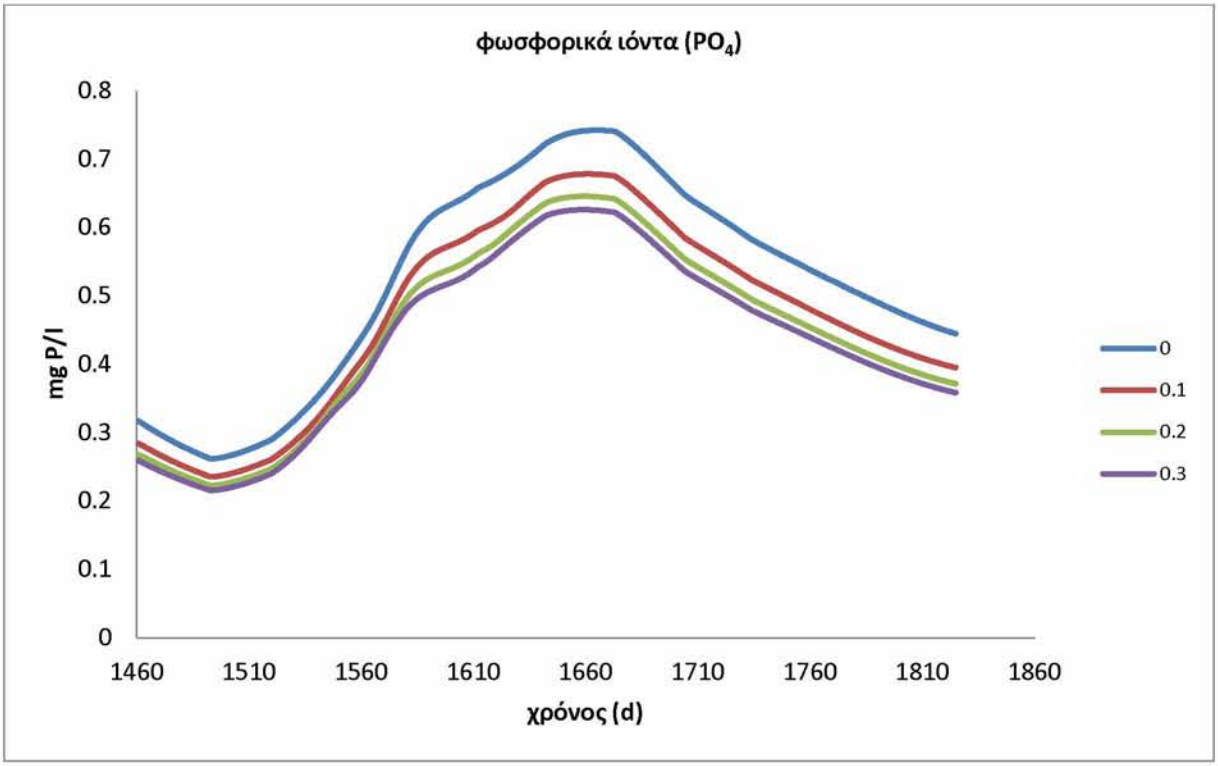


Διάγραμμα 7.88: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

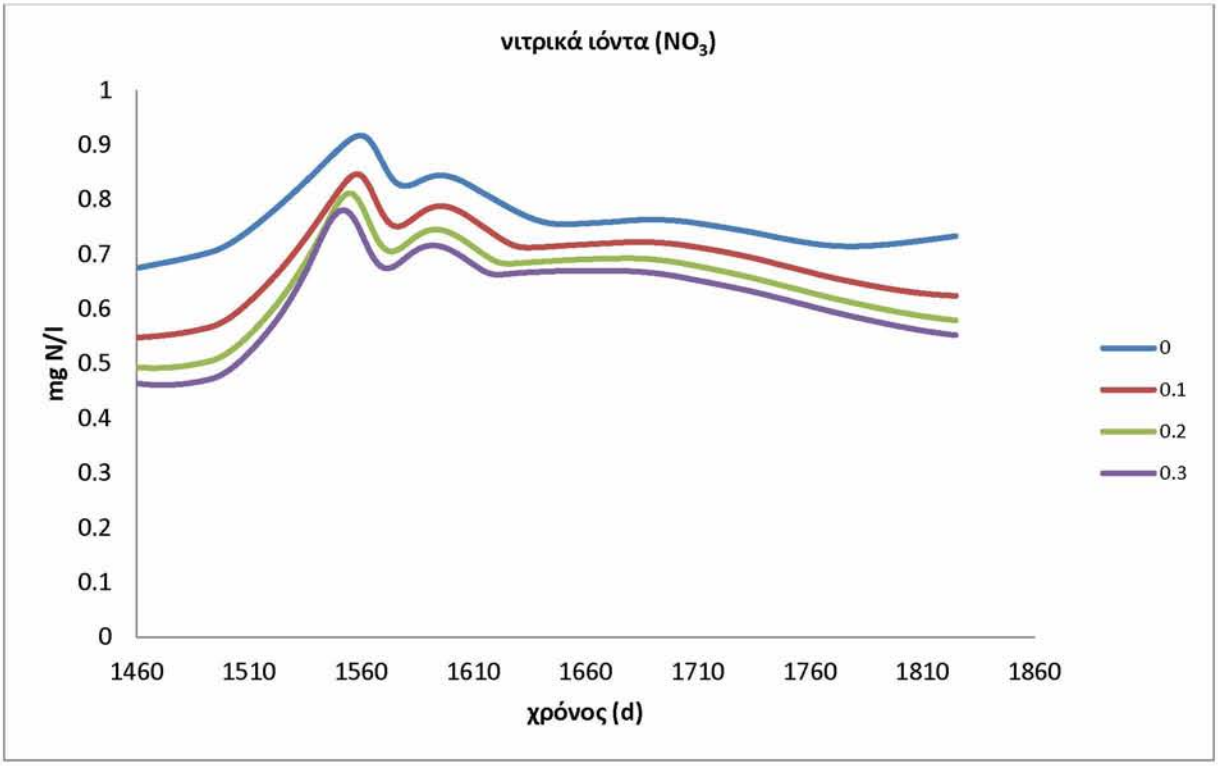


Διάγραμμα 7.89: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

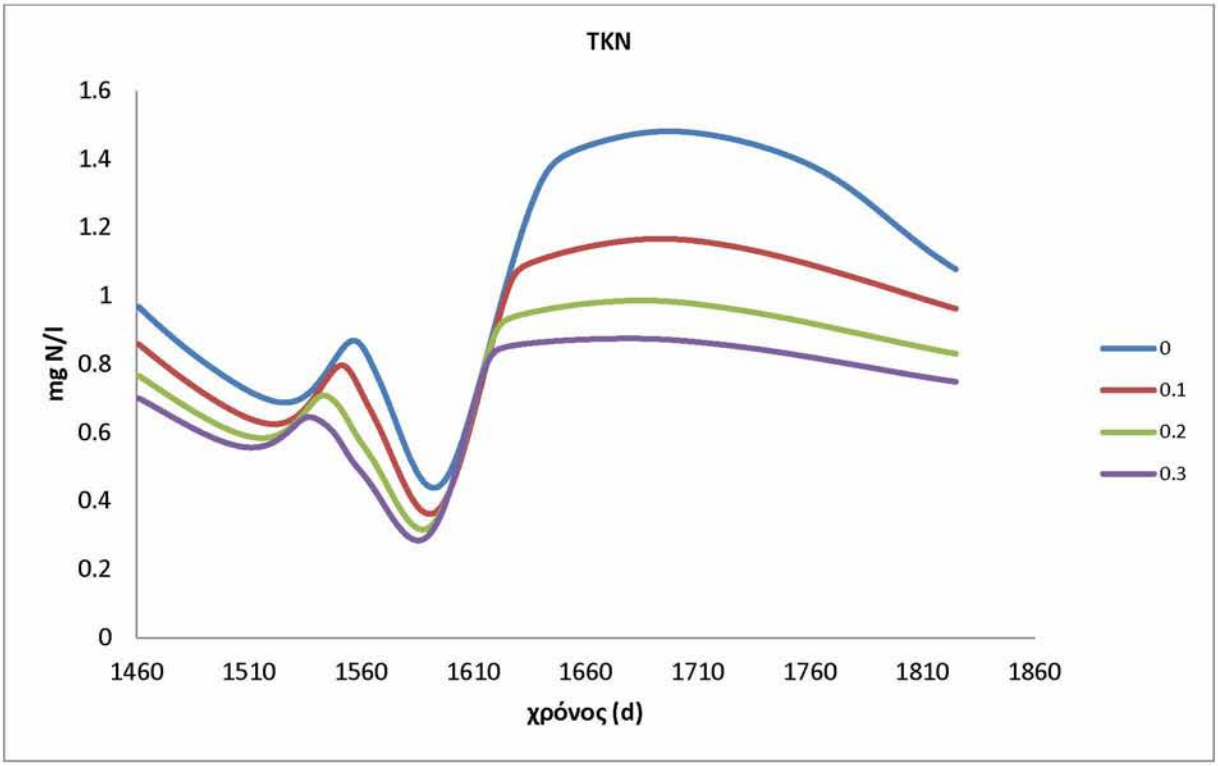


Διάγραμμα 7.90: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

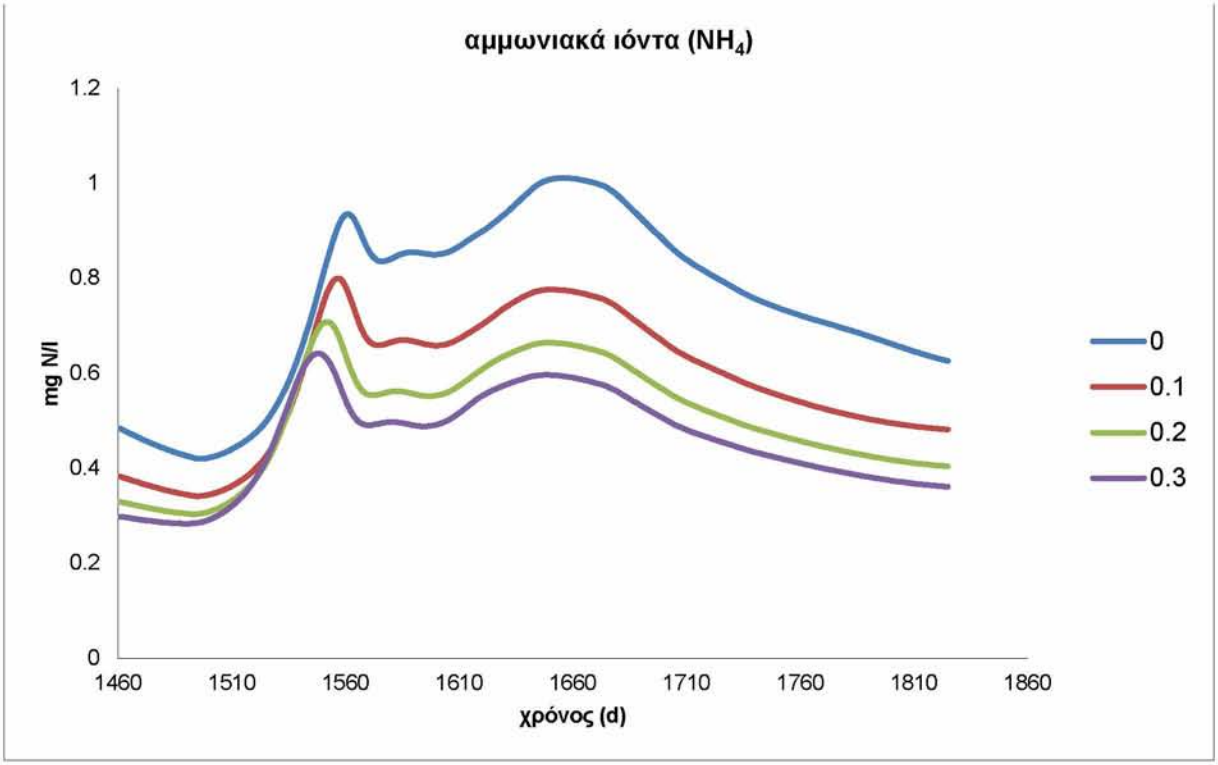


Διάγραμμα 7.91: νιτρικά ιόντα (NO_3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

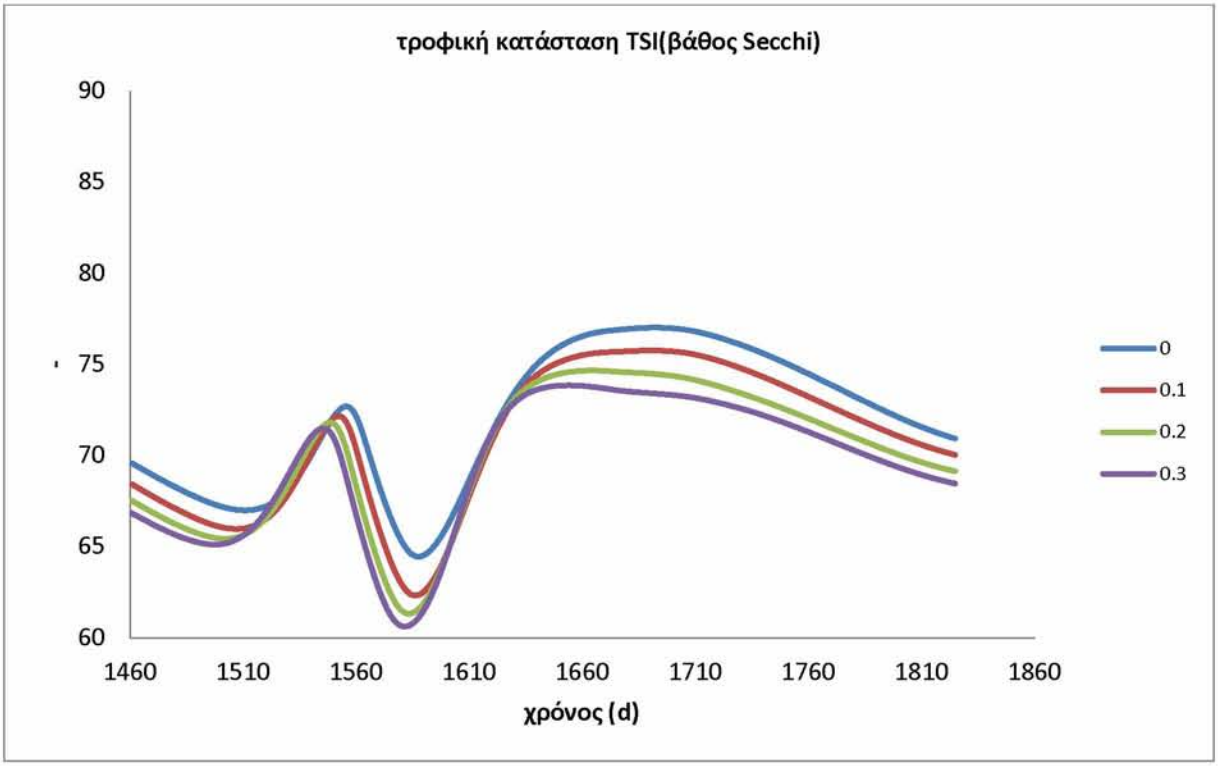


Διάγραμμα 7.92: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης: για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη



Διάγραμμα 7.93: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



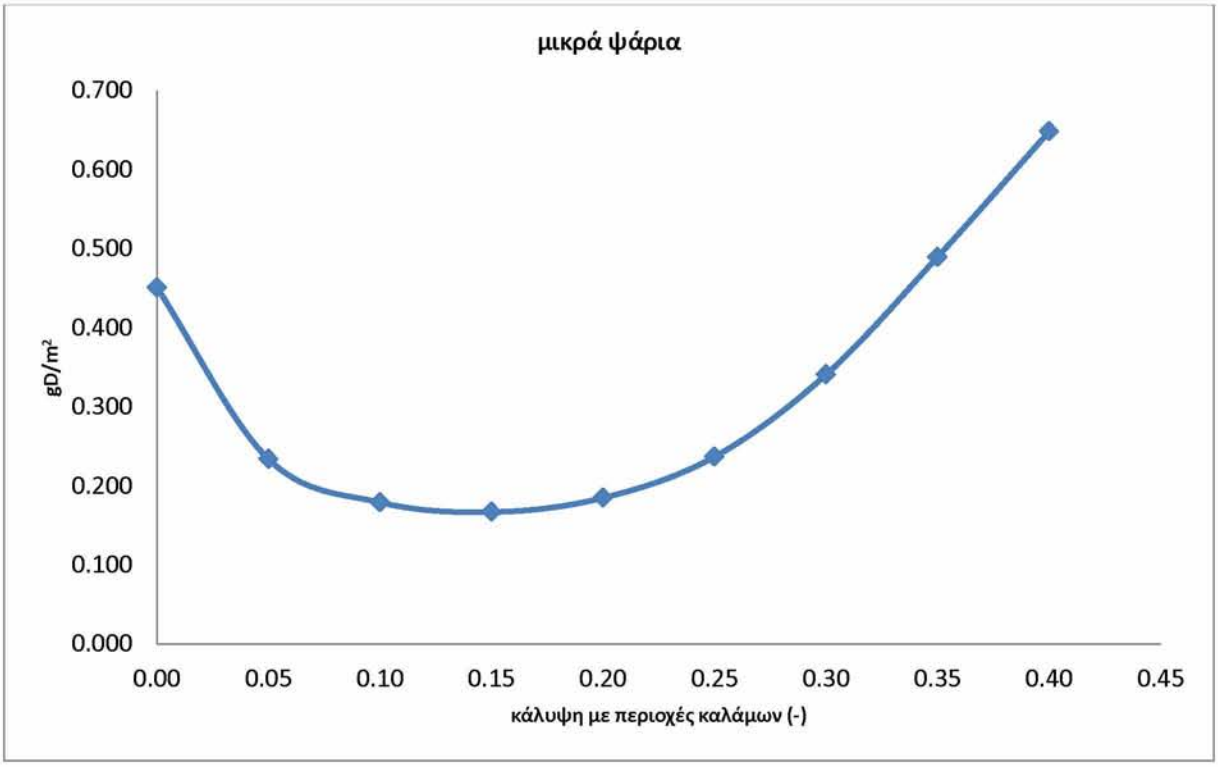
Διάγραμμα 7.94: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές καλύψεις με περιοχές καλάμων για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

7.3 Η επίδραση της κάλυψης των περιοχών με καλάμους στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης για χαμηλά στάθμη

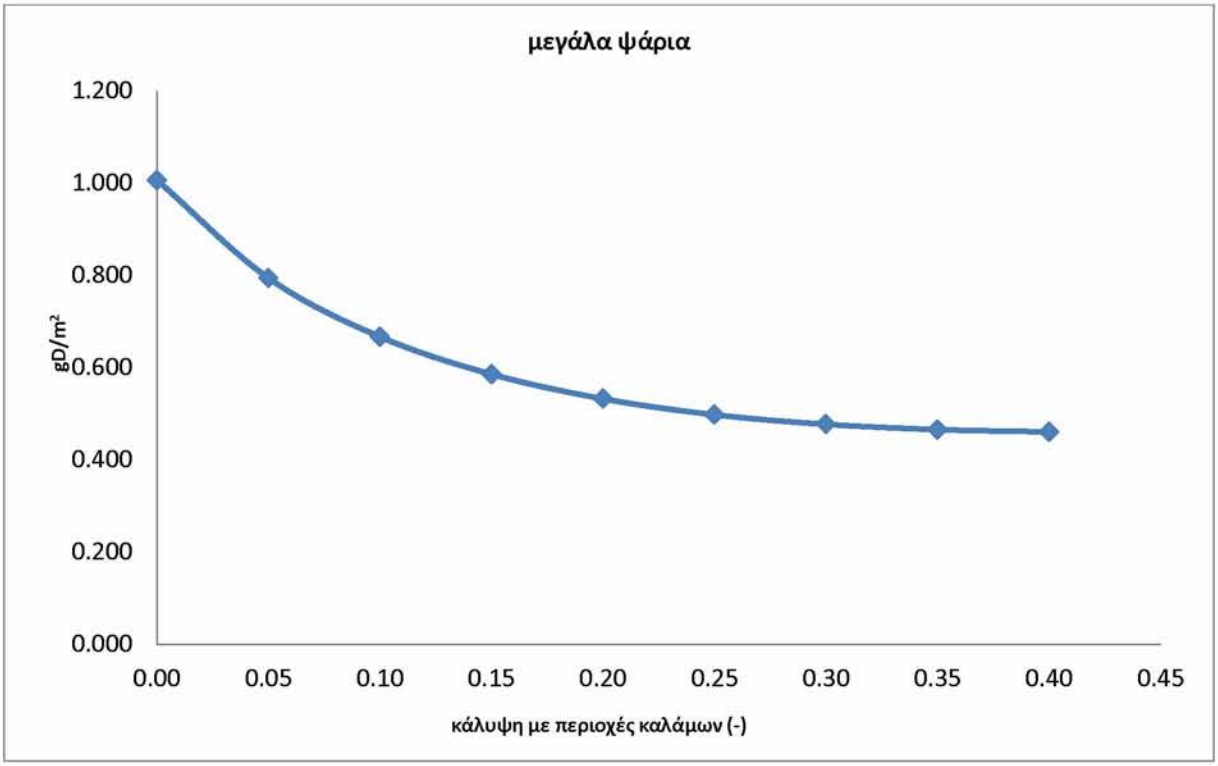
Στα συγκριτικά διαγράμματα της επίδρασης όλου του εύρους περιοχής καλάμων στη μέση θερινή τροφική κατάσταση, αναδεικνύεται πιο καθαρά ο ρόλος των καλάμων. Στα μικρά ψάρια είναι εμφανές ότι το τοπικό ελάχιστο που ήδη υπήρχε υποψία από την προηγούμενη παράγραφο ότι υπάρχει, είναι στα 15 % κάλυψης. Η περιοχή από 0 % έως 15% όμως, παρότι βρίσκει τα μικρά ψάρια σε καλά επίπεδα, άλλα κρίσιμα μεγέθη κυμαίνονται σε ανεπίτρεπτες περιοχές. Ενδεικτικά το βάθος Secchi έχει τιμές χαμηλότερες του 0.20 m.

Για να βελτιωθεί η κατάσταση χρειάζεται να ανέβουμε σε τιμές κάλυψης μεγαλύτερες του 20%. Όλα τα μεγέθη μετά από αυτή την τιμή ακολουθούν γραμμικές μεταβολές προς μία υγιέστερη κατάσταση. Άρα στην ουσία, όσο μεγαλύτερη κάλυψη υπάρχει, όσο είναι δυνατόν, τόσο το καλύτερο για την τροφική κατάσταση της λίμνης.

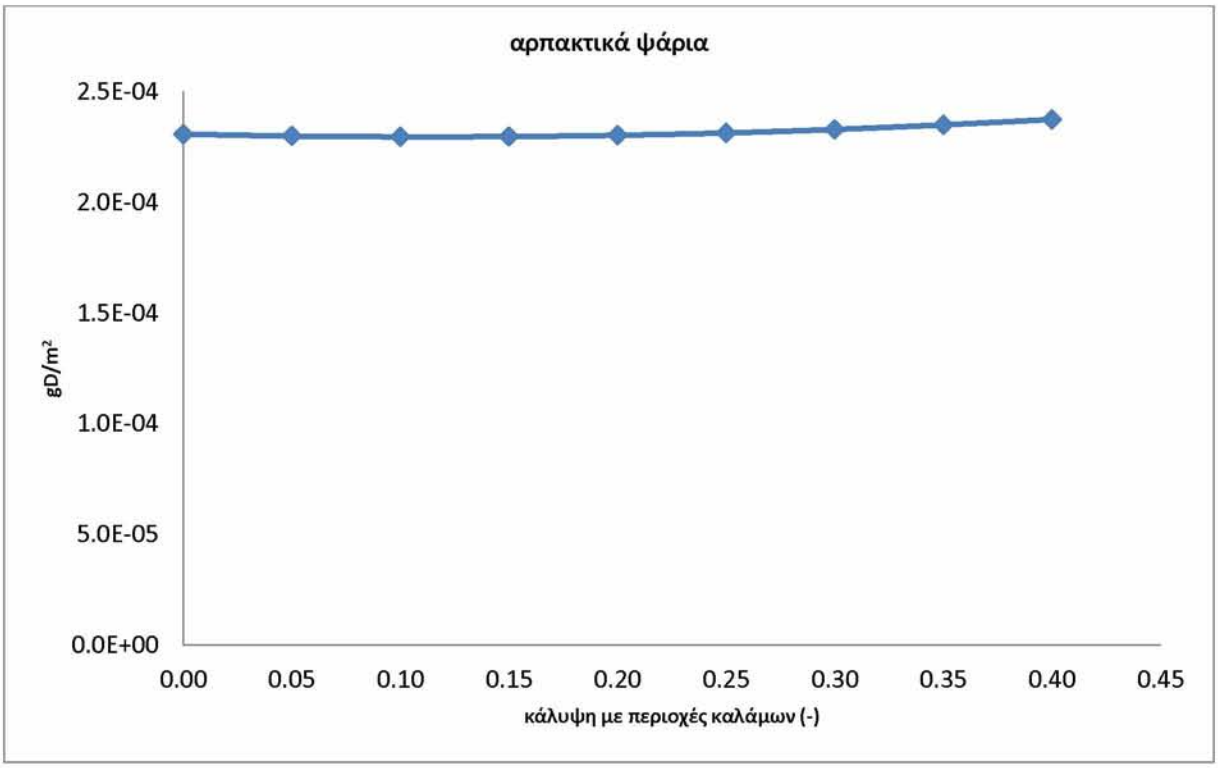


Διάγραμμα 7.95: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

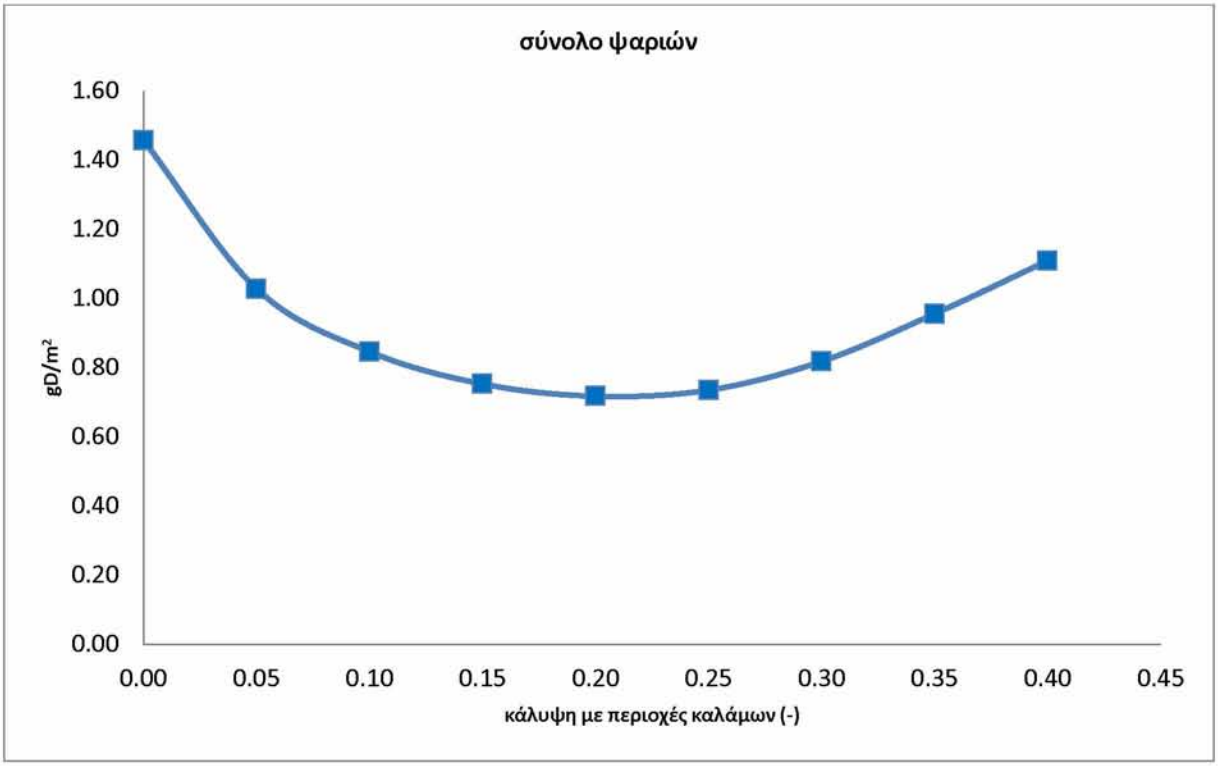


Διάγραμμα 7.34: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

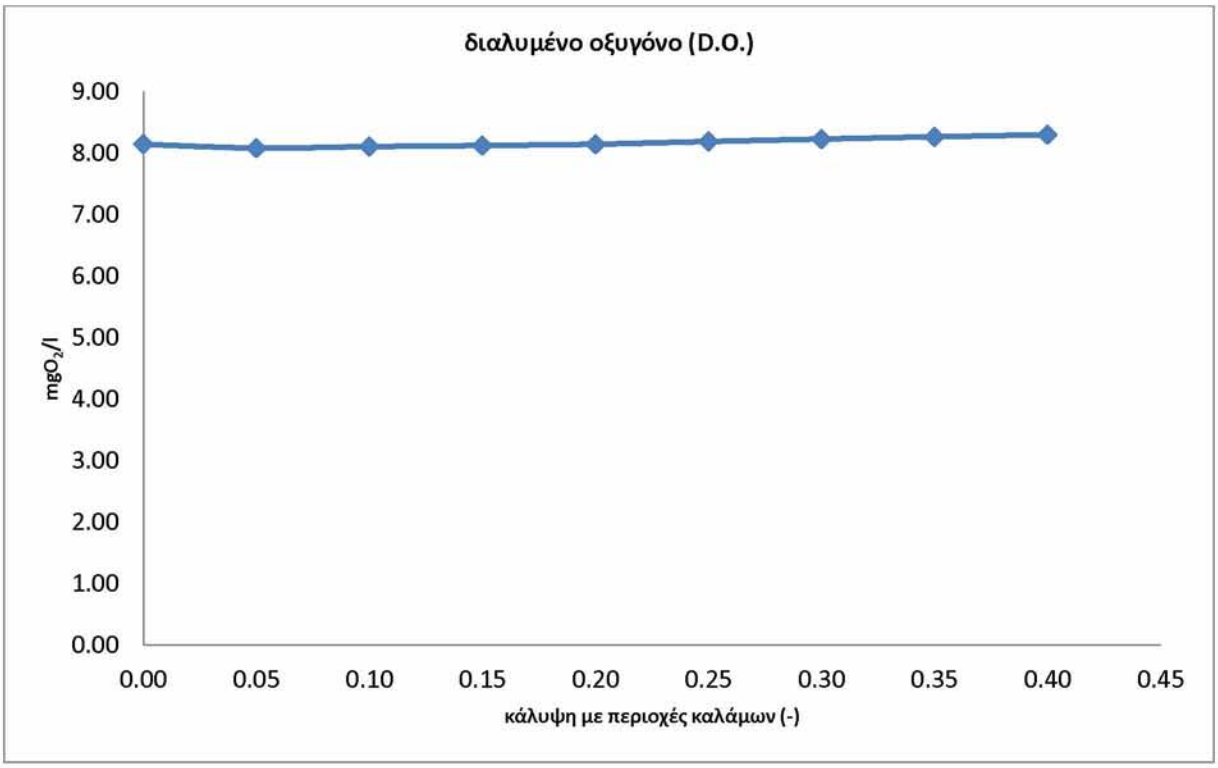


Διάγραμμα 7.35: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

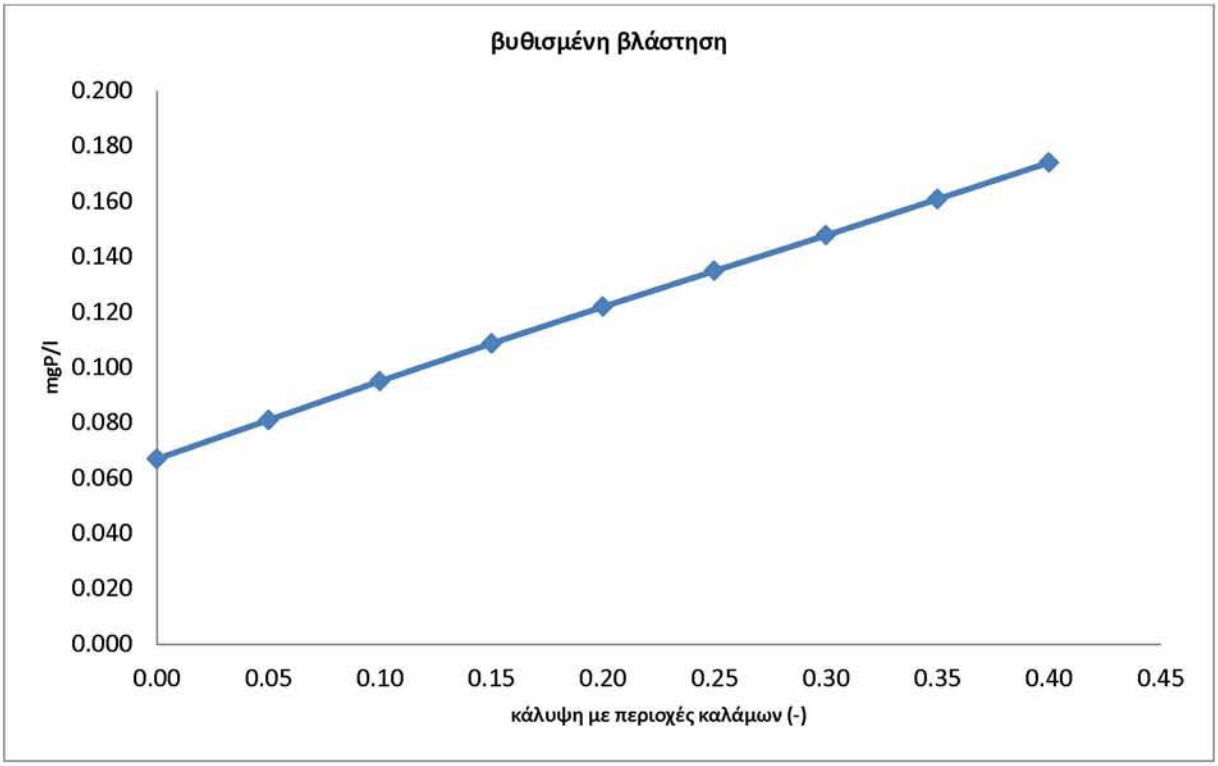


Διάγραμμα 7.36: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

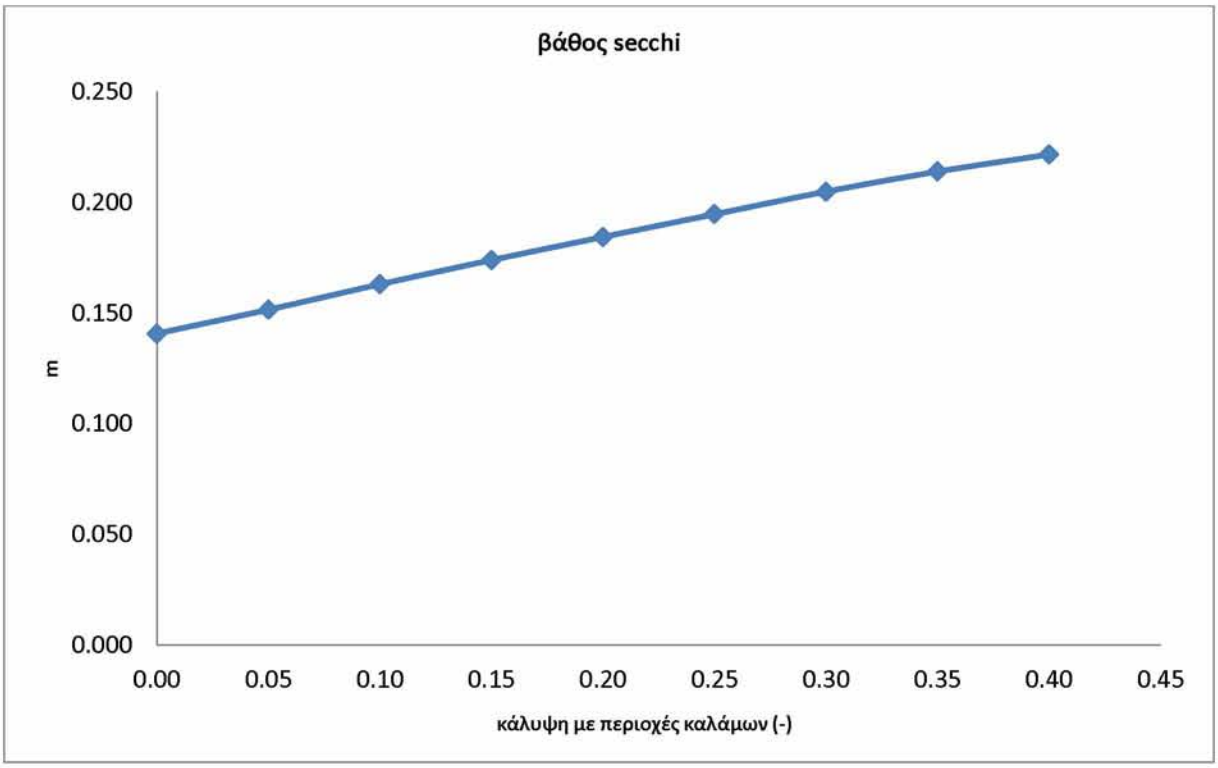


Διάγραμμα 7.37: μέσο θερινό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου– υδραυλική παροχή εισόδου, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

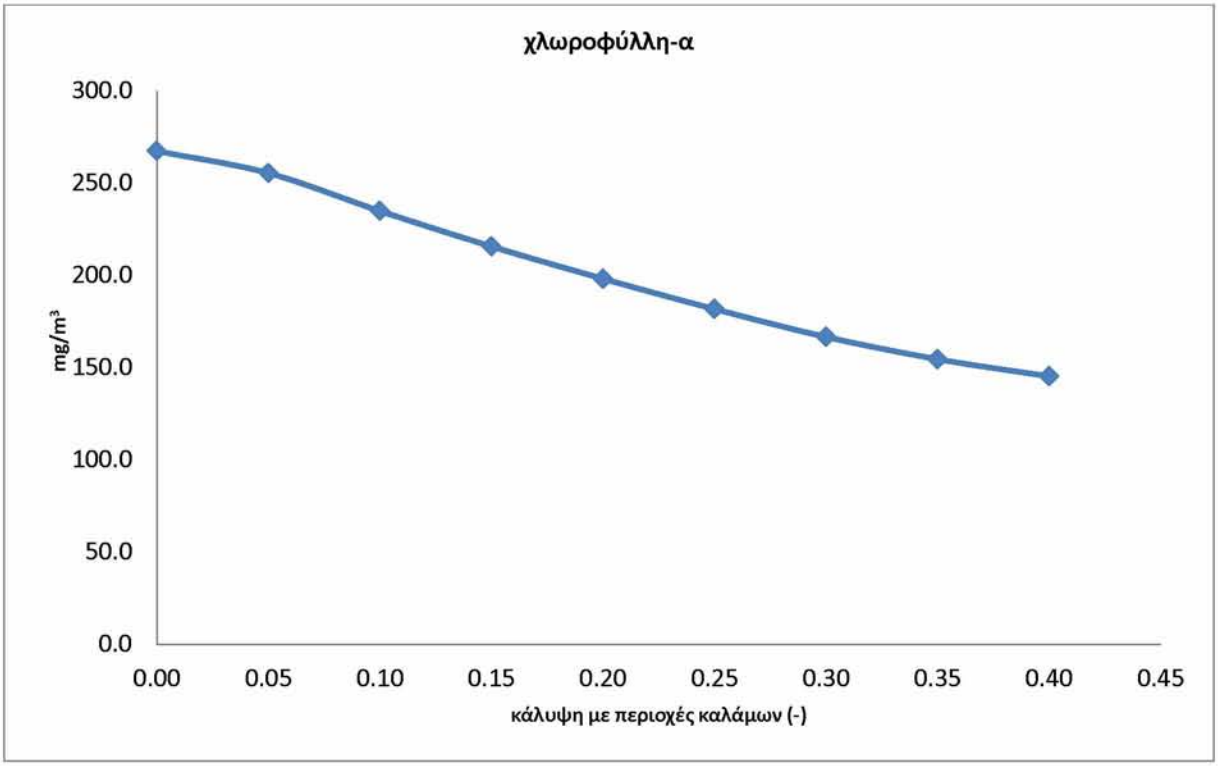


Διάγραμμα 7.38: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης– κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

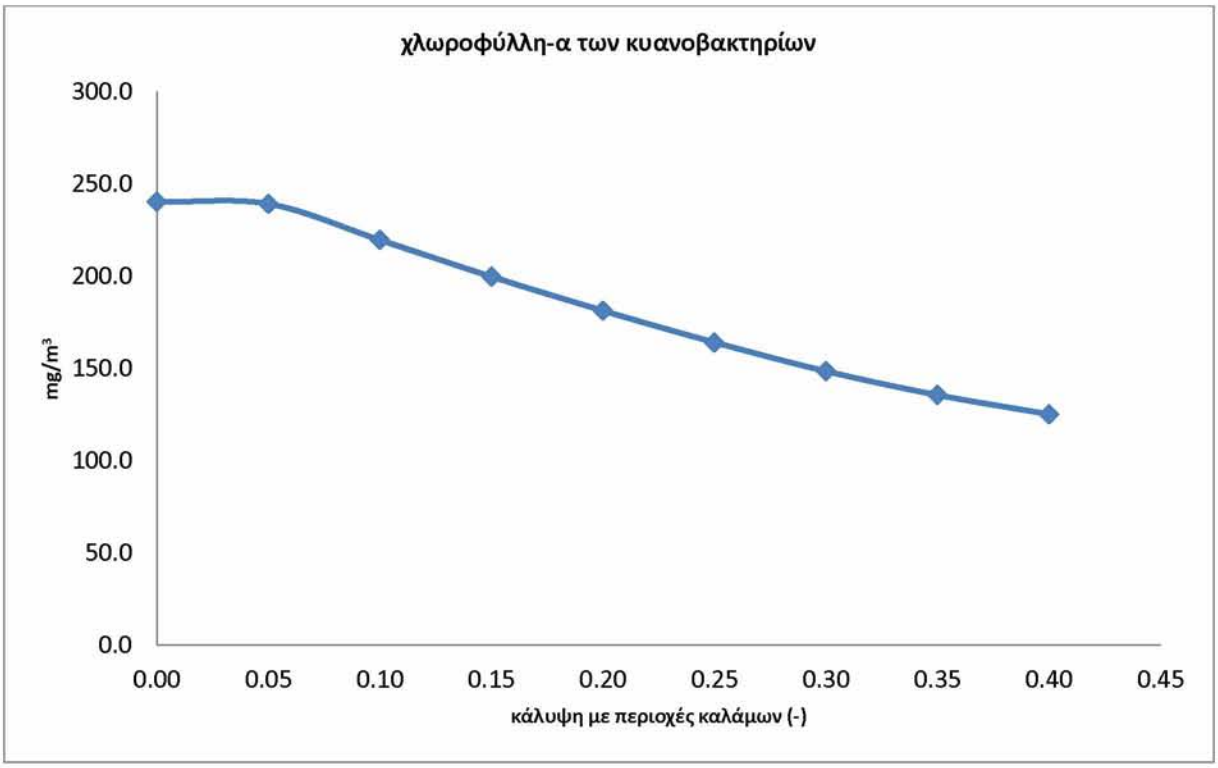


Διάγραμμα 7.39: μέσο θερινό βάθους Secchi – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

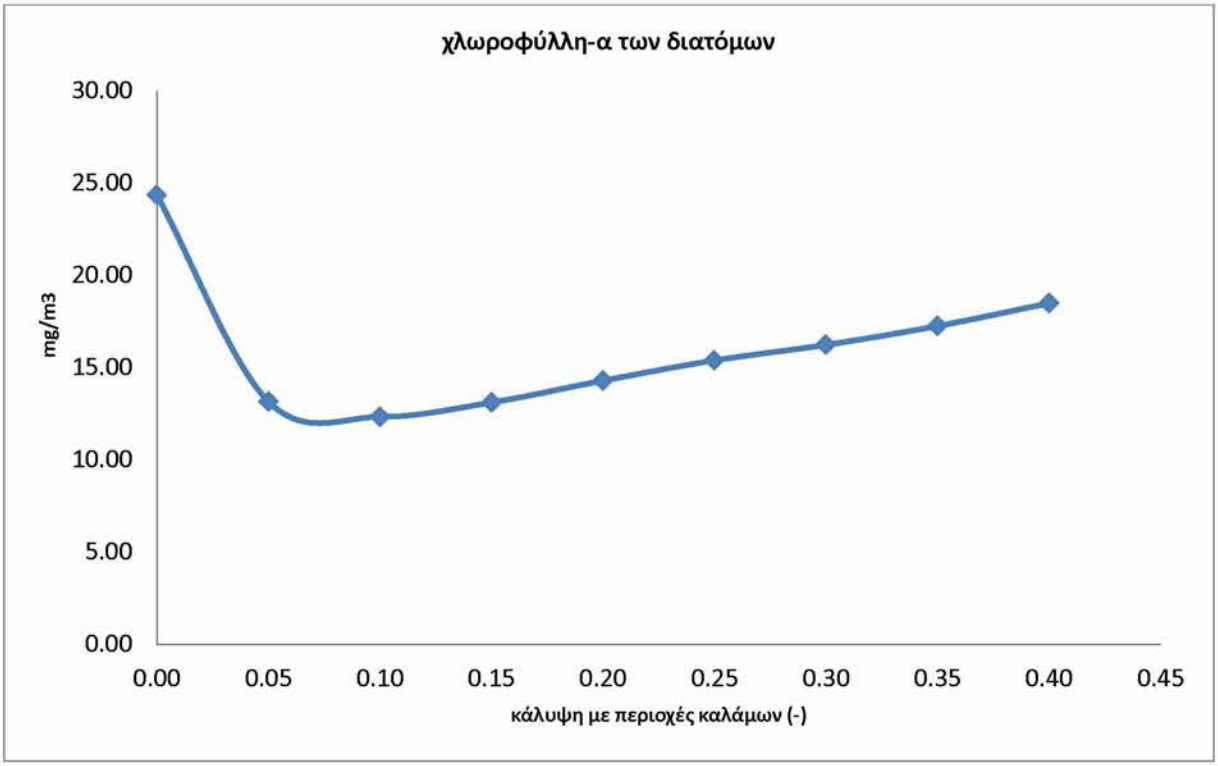


Διάγραμμα 7.40: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

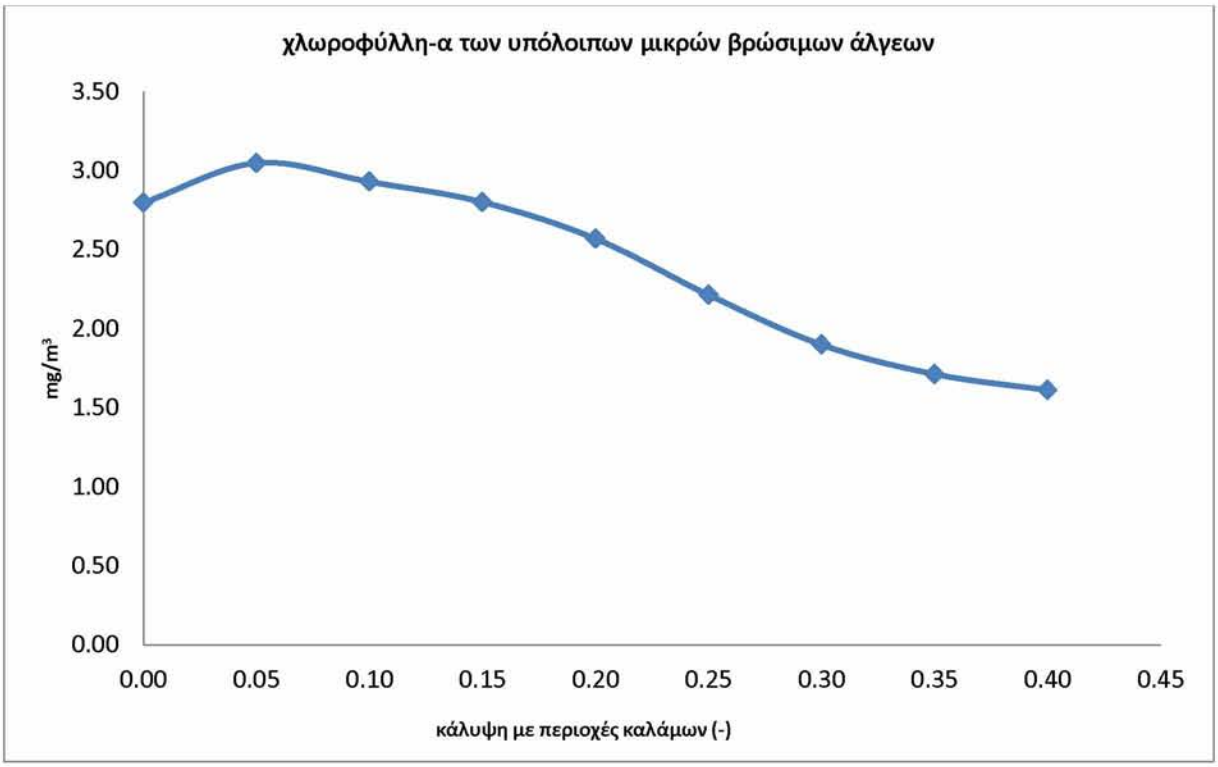


Διάγραμμα 7.41: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

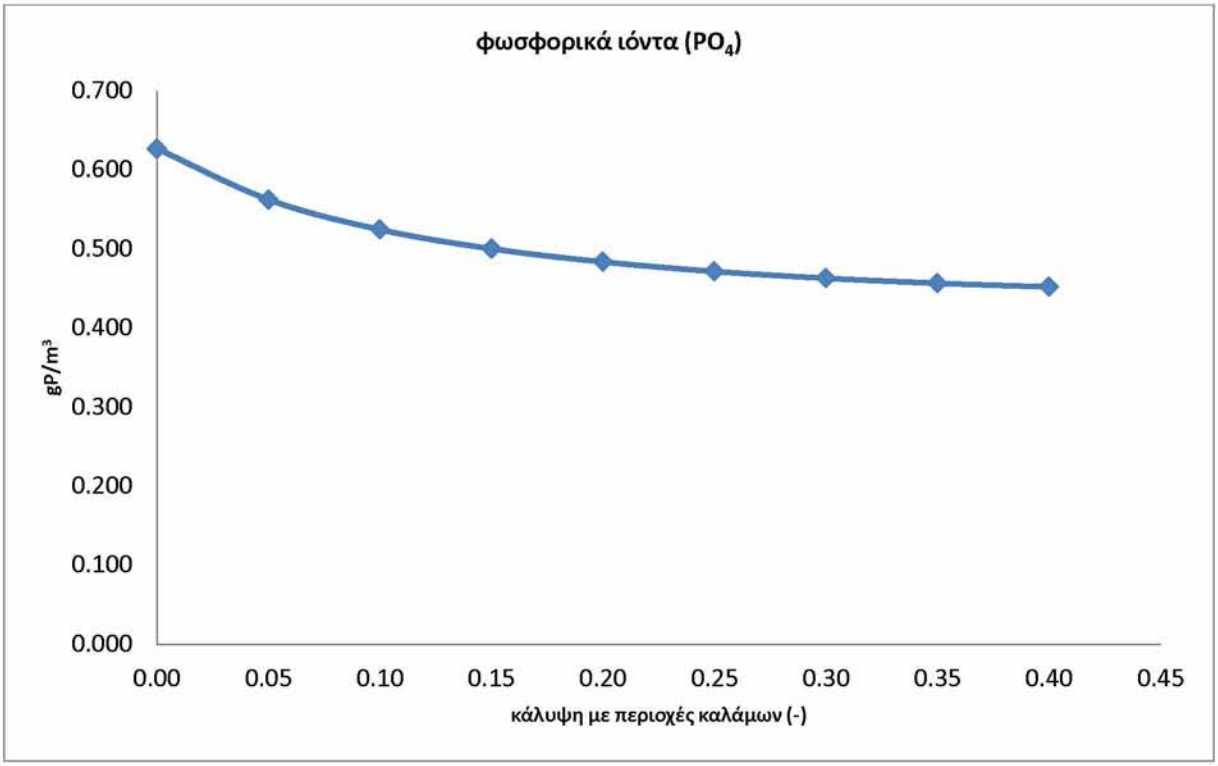


Διάγραμμα 7.42: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

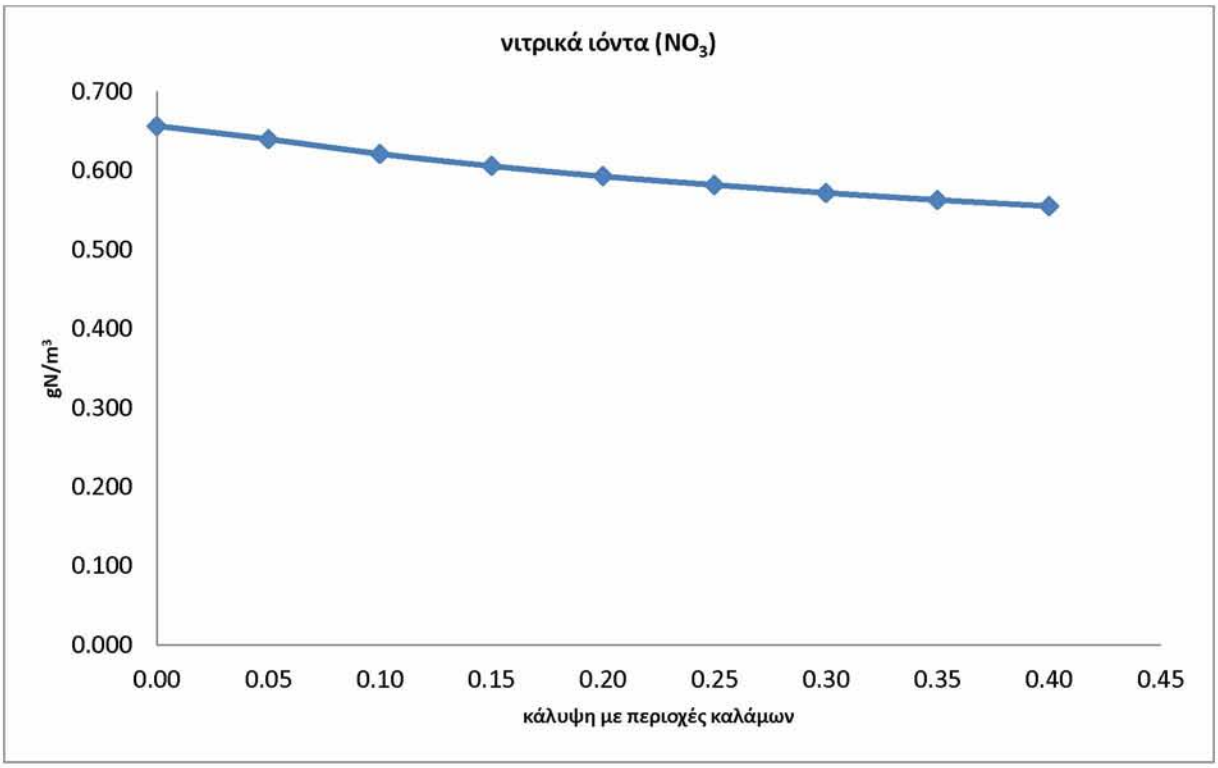


Διάγραμμα 7.43: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

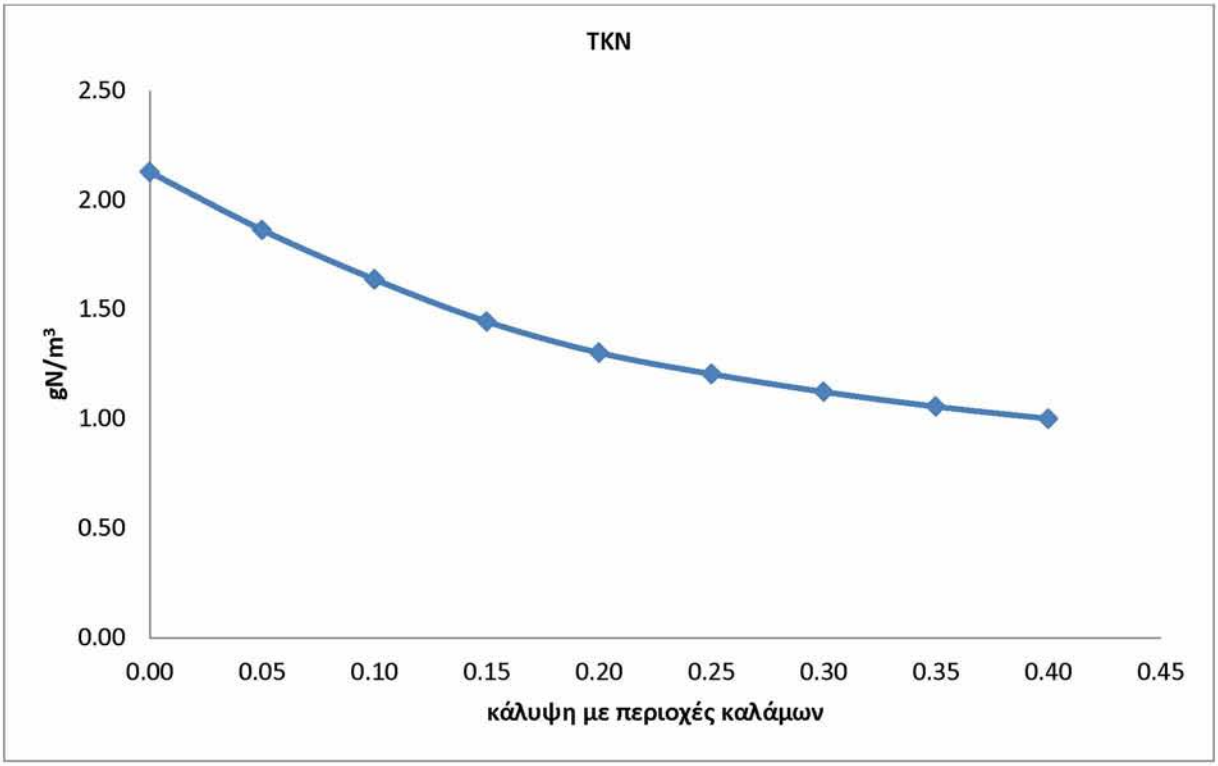


Διάγραμμα 5.44: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

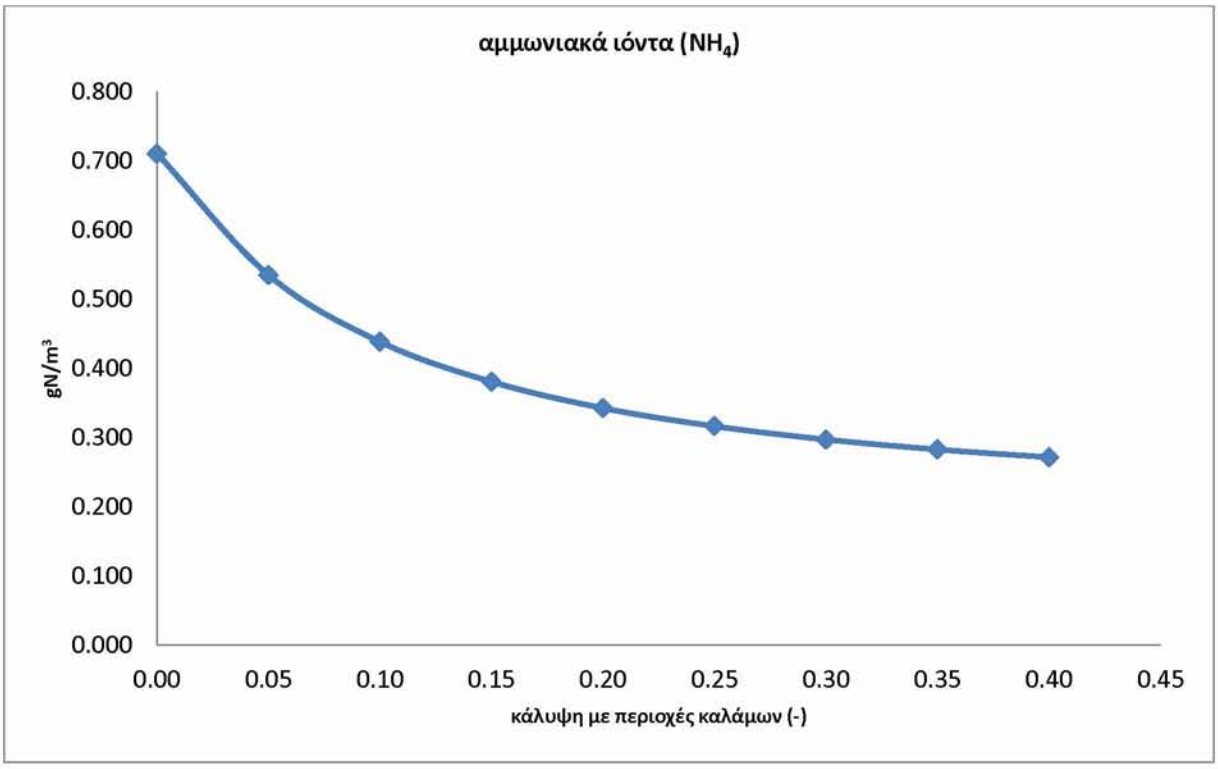


Διάγραμμα 5.45: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

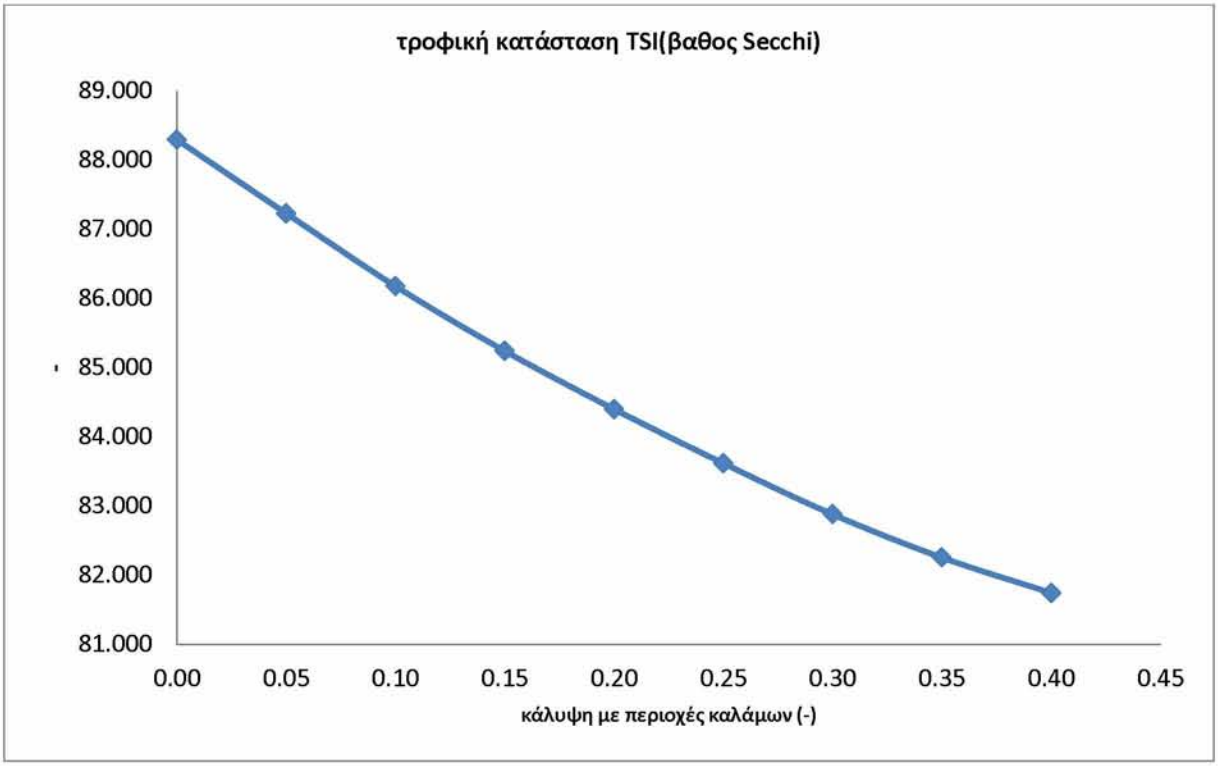


Διάγραμμα 5.46: μέσο θερινό επίπεδο TKN – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη



Διάγραμμα 5.47: μέσο θερινό επίπεδο αμμωνιακών ιόντων (PO_4) - κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



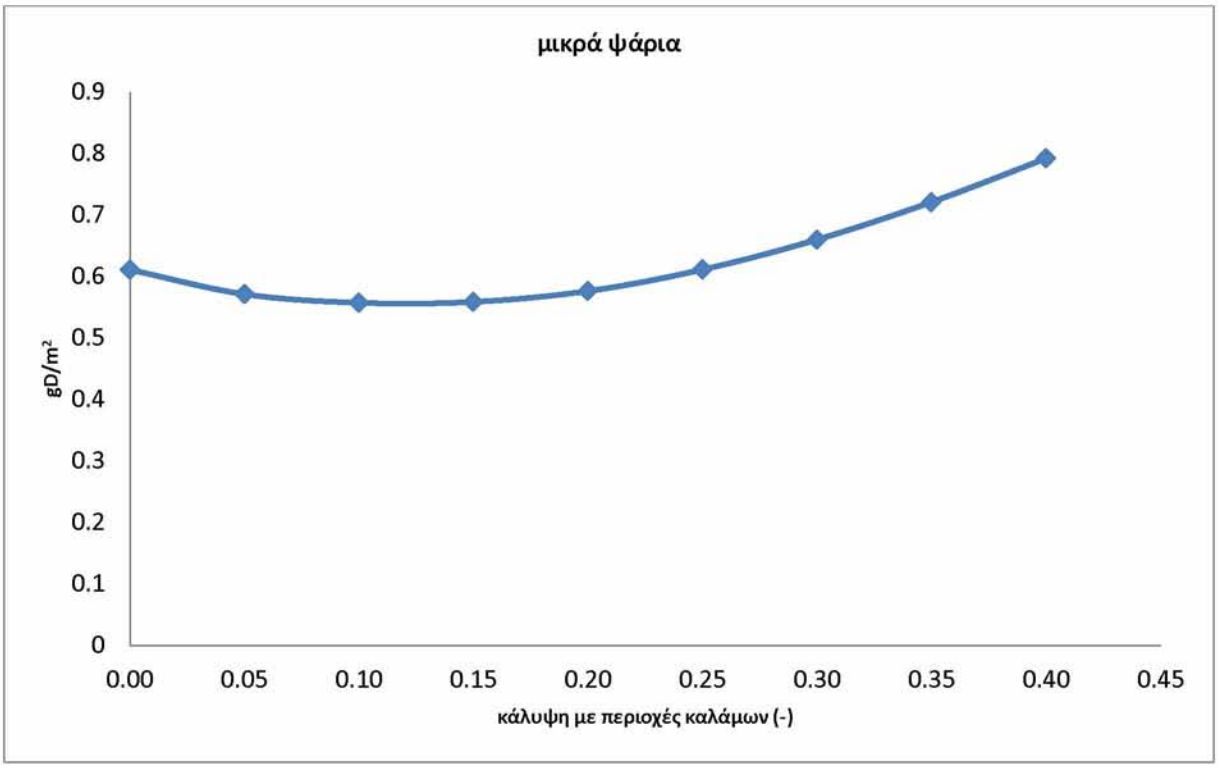
Διάγραμμα 7.48: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για χαμηλή στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

7.4 Η επίδραση της κάλυψης των περιοχών με καλάμους στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης για μέση στάθμη

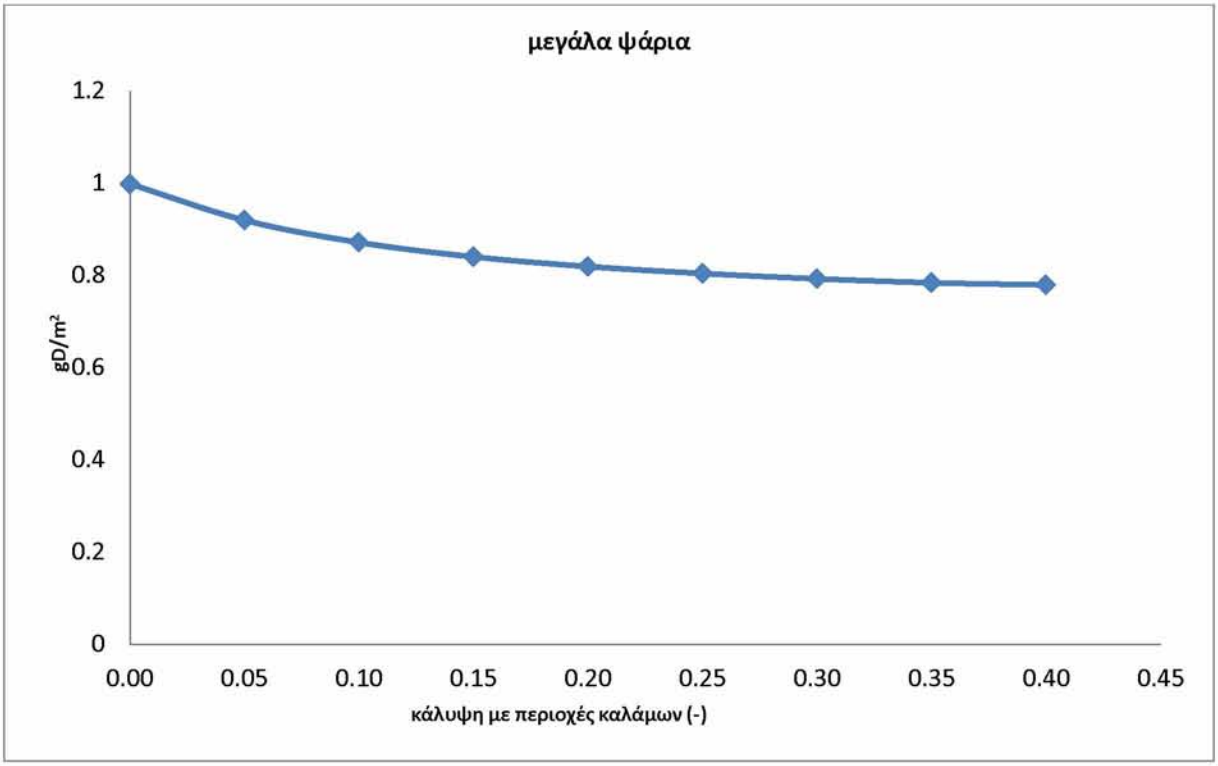
Για μέση στάθμη τα αποτελέσματα είναι πιο ικανοποιητικά όπως πάντα συγκριτικά με την χαμηλή. Η επίδραση των καλάμων ωστόσο παρουσιάζει πολύ μικρότερες κλίσεις. Αυτό είναι λογικό, καθώς οι ίδια βαθμίδα αλλαγής κάλυψης καλάμων καλείται να επηρεάσει μεγαλύτερο όγκο νερού.

Η τροφική κατάσταση, για μέσης στάθμης λίμνη, για τα μέσα θερινά επίπεδα, βελτιώνεται όπως και στη χαμηλή στάθμη γραμμικά, κυμαίνεται μετατοπισμένη σε πολύ καλύτερα επίπεδα από αυτά της χαμηλής στάθμης, αλλά δεν πέφτει κάτω από τους 70 βαθμούς TSI.

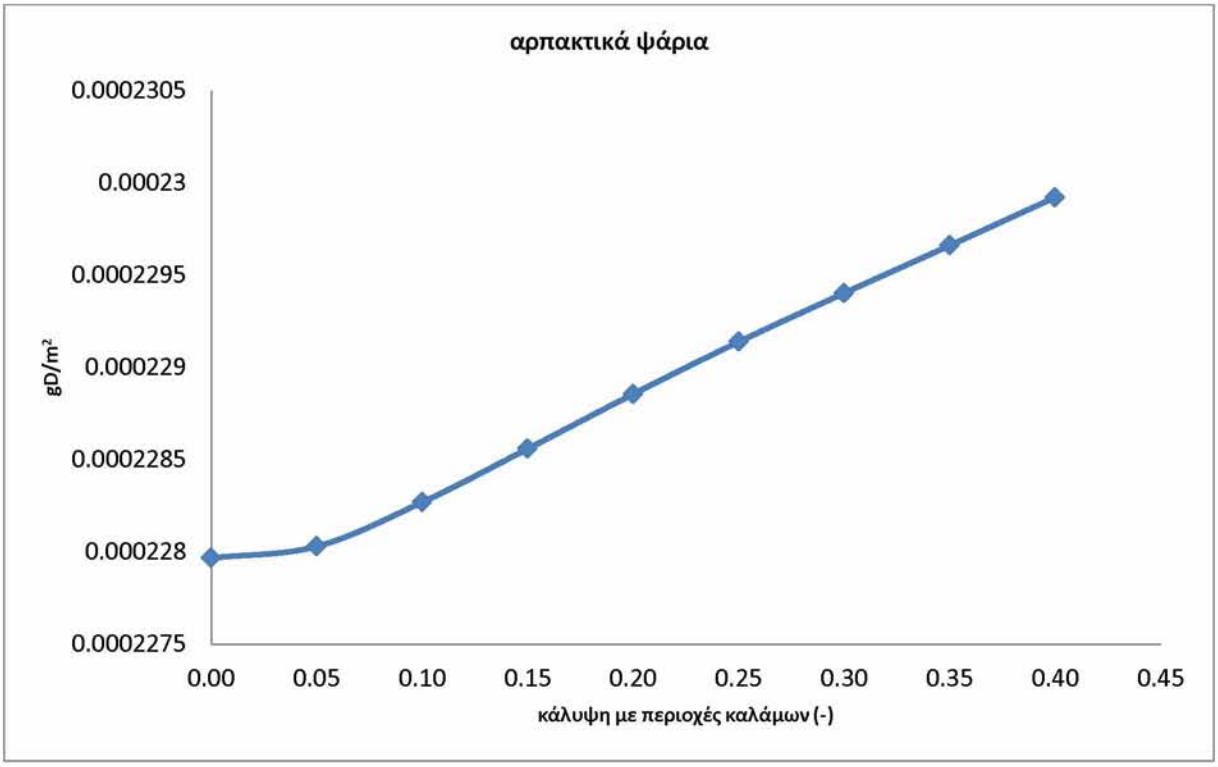


Διάγραμμα 7.49: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

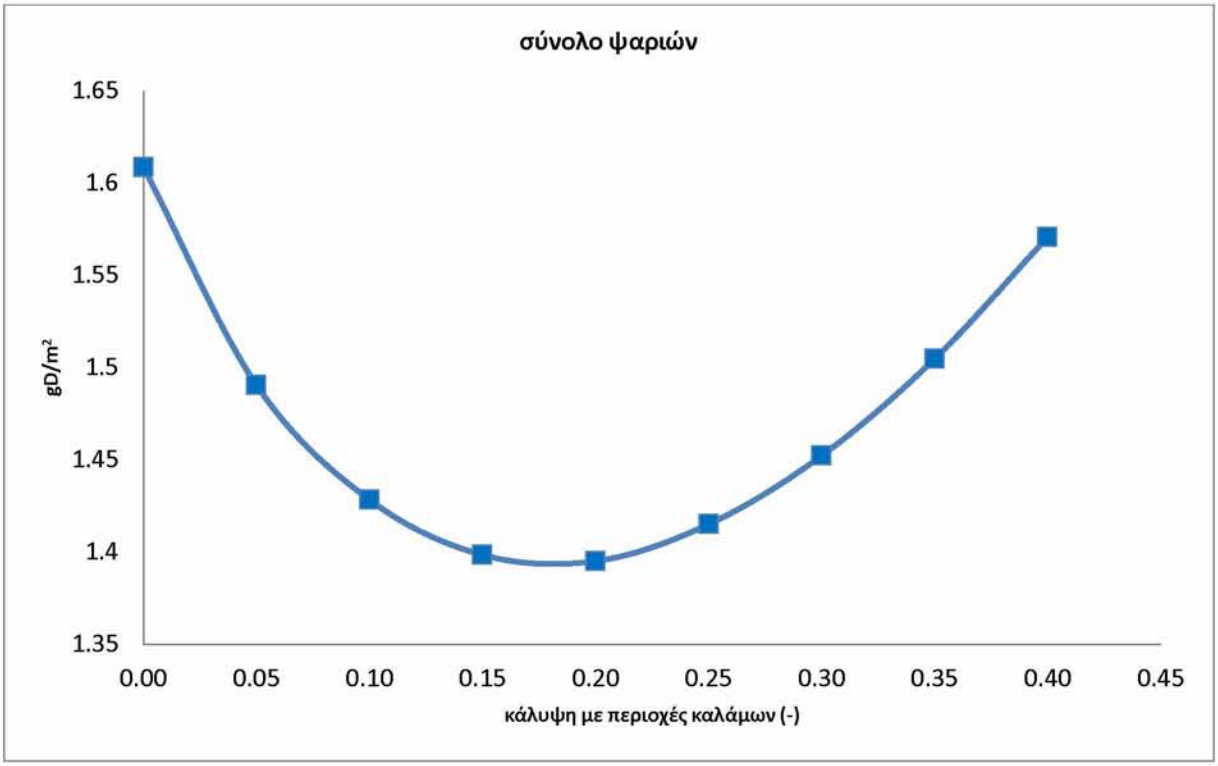


Διάγραμμα 7.50: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών– κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

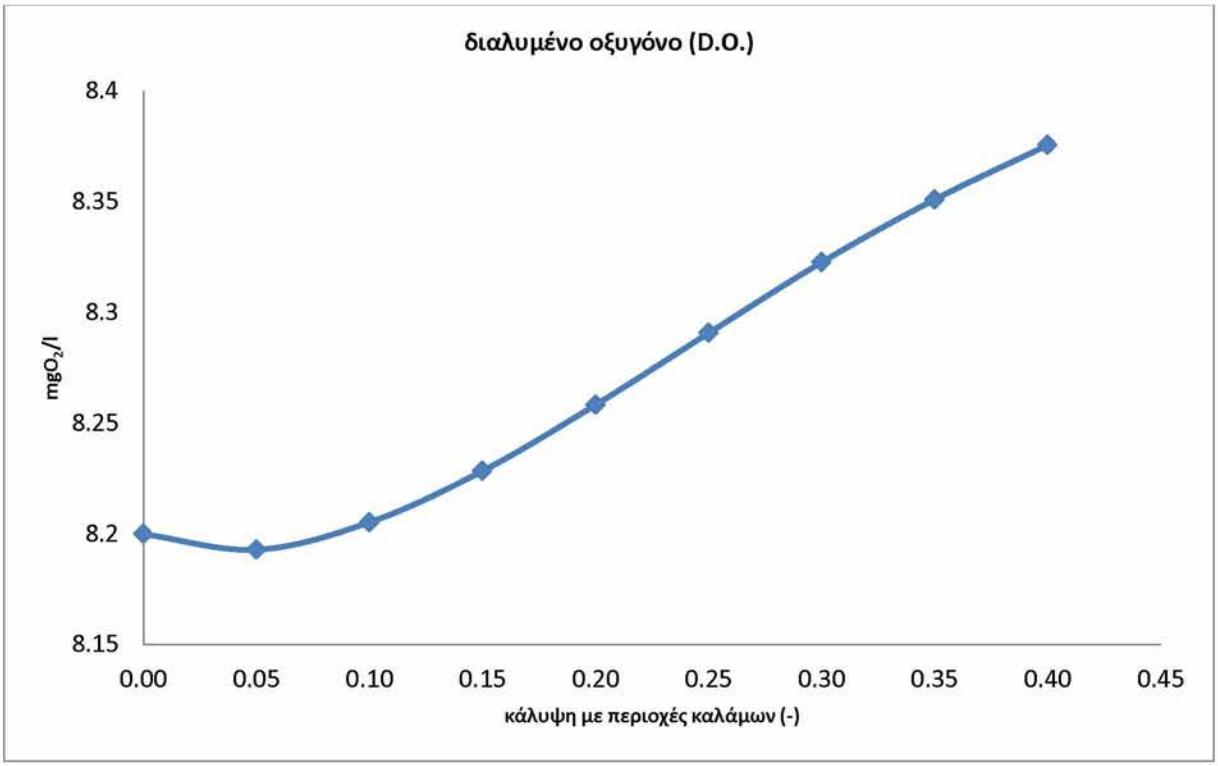


Διάγραμμα 7.51: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών– κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

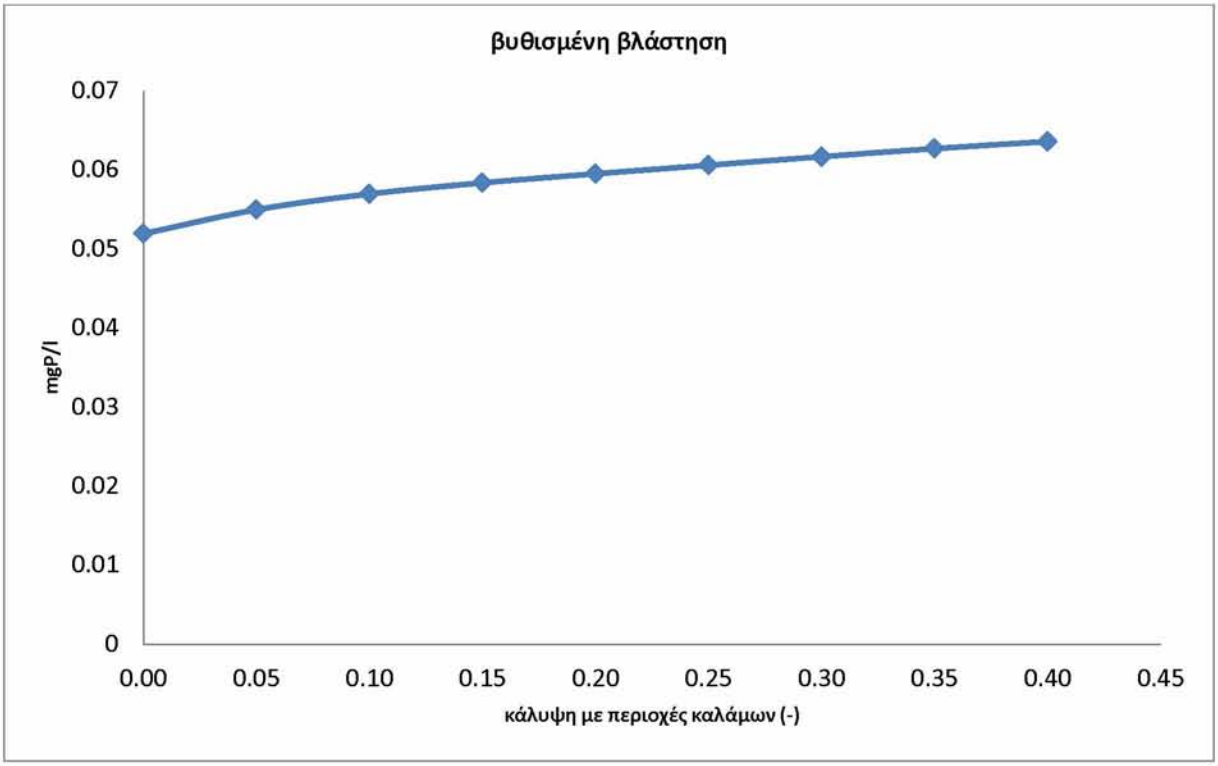


Διάγραμμα 7.52: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

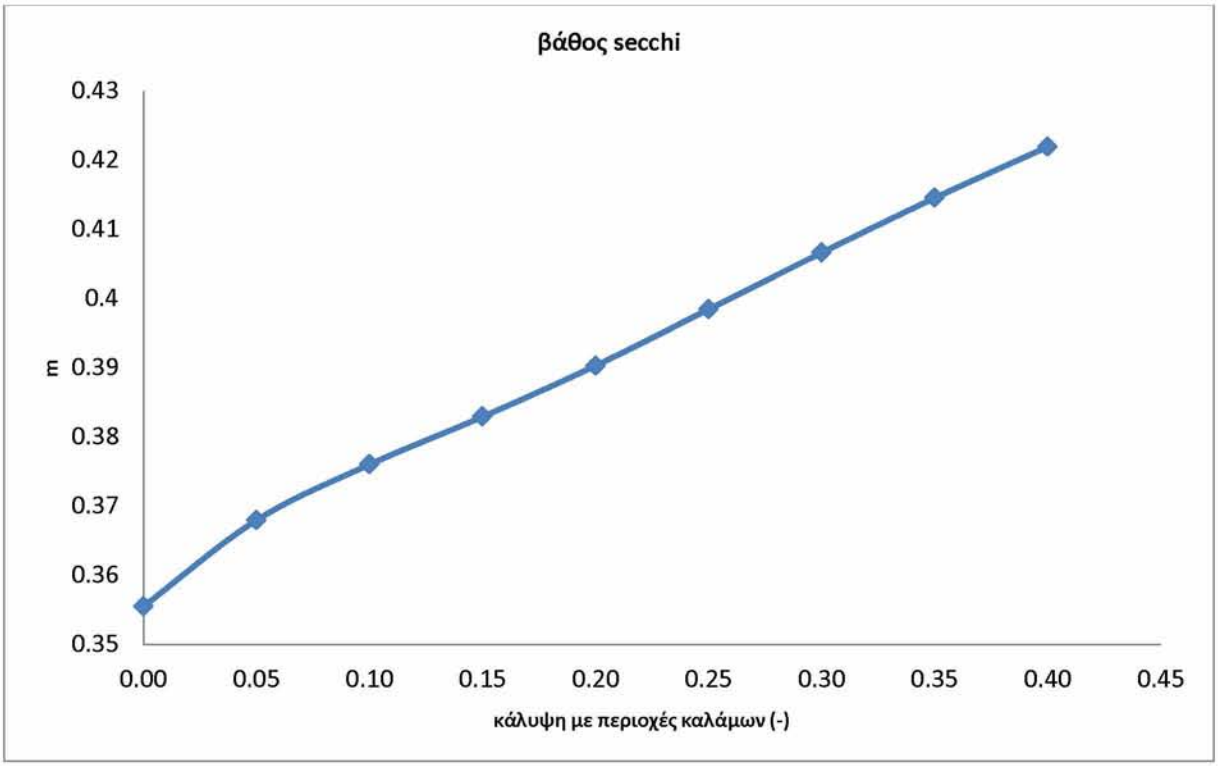


Διάγραμμα 7.53: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

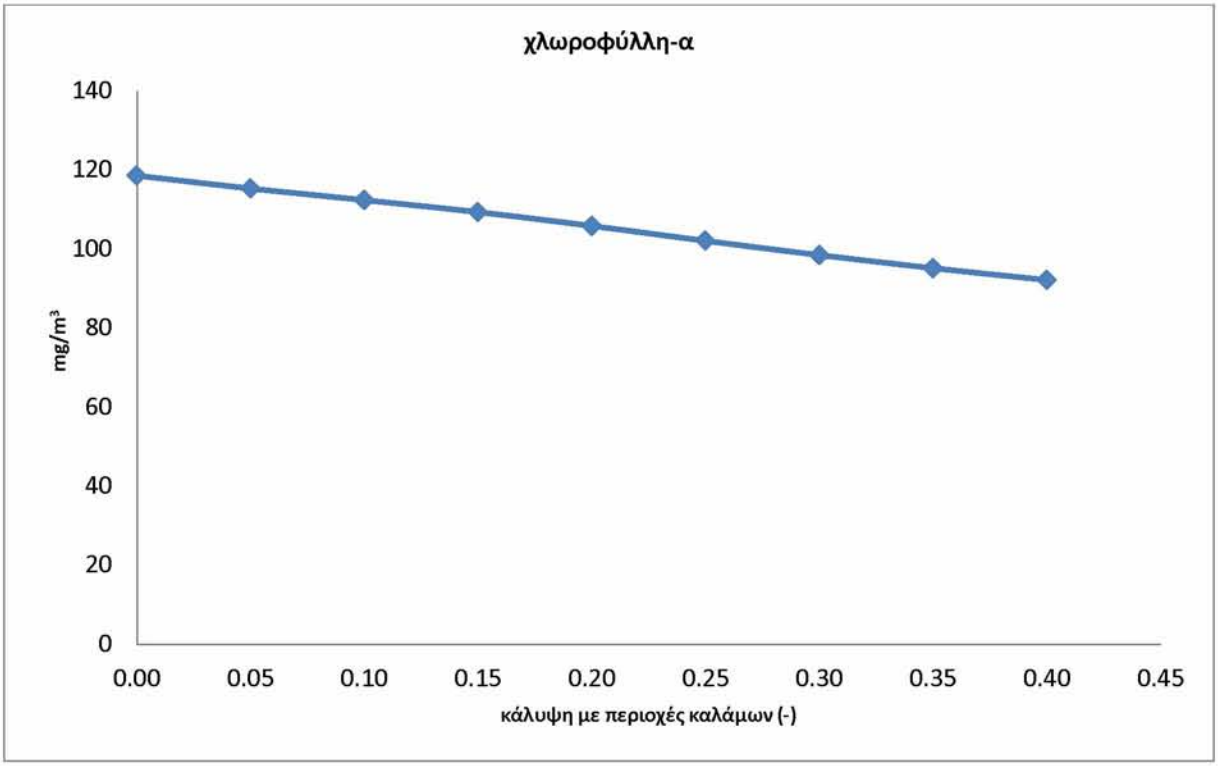


Διάγραμμα 7.54: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

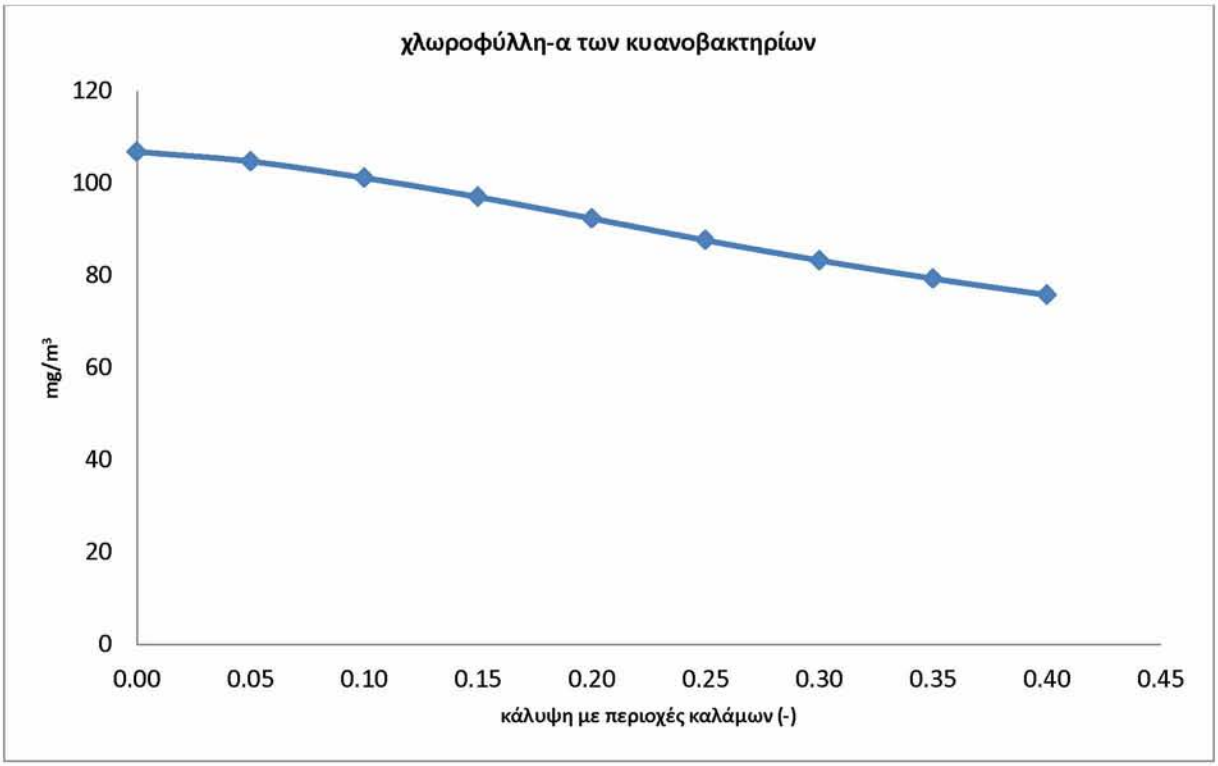


Διάγραμμα 7.55: μέσο θερινό επίπεδο βάθους Secchi – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

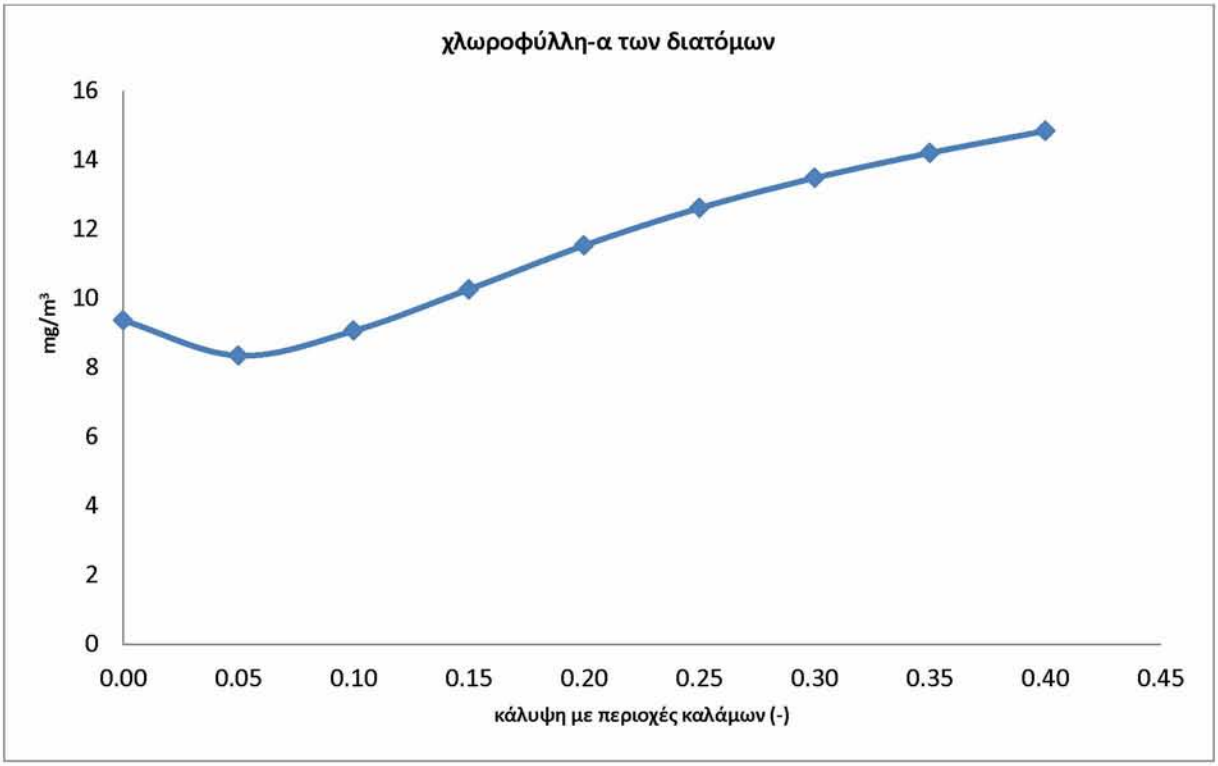


Διάγραμμα 7.56: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

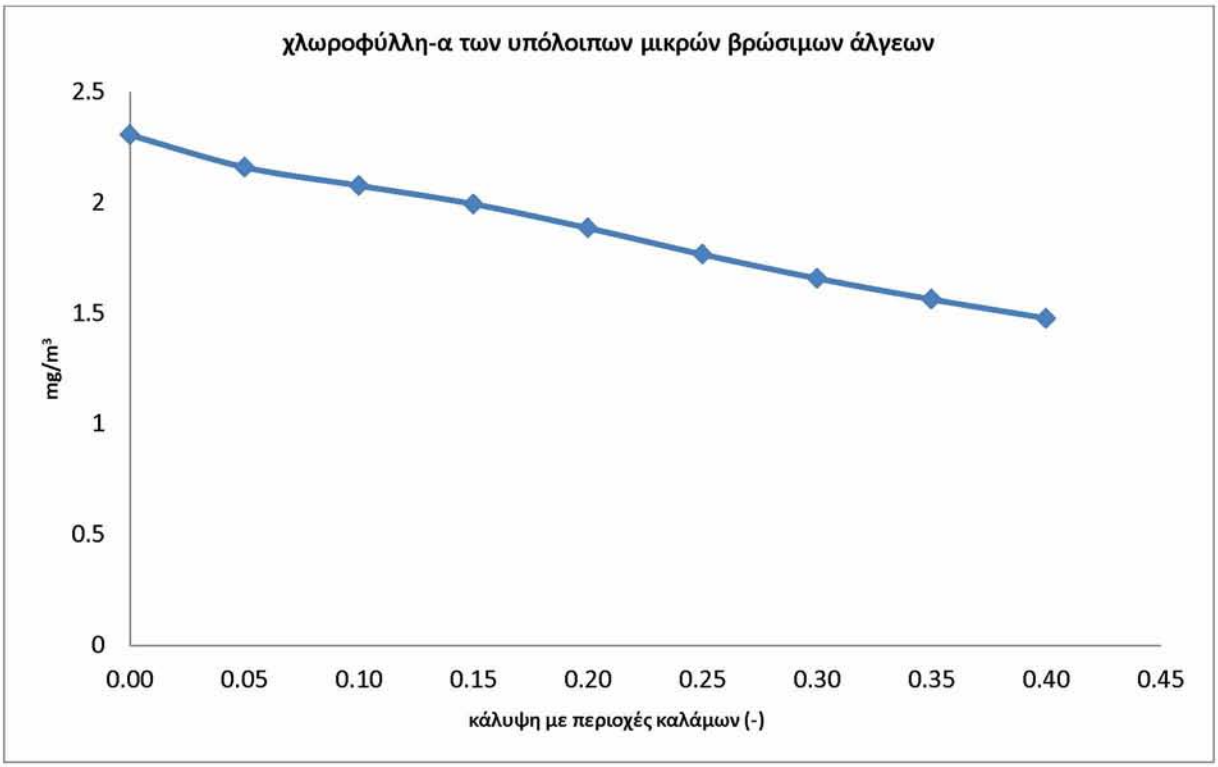


Διάγραμμα 7.57: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

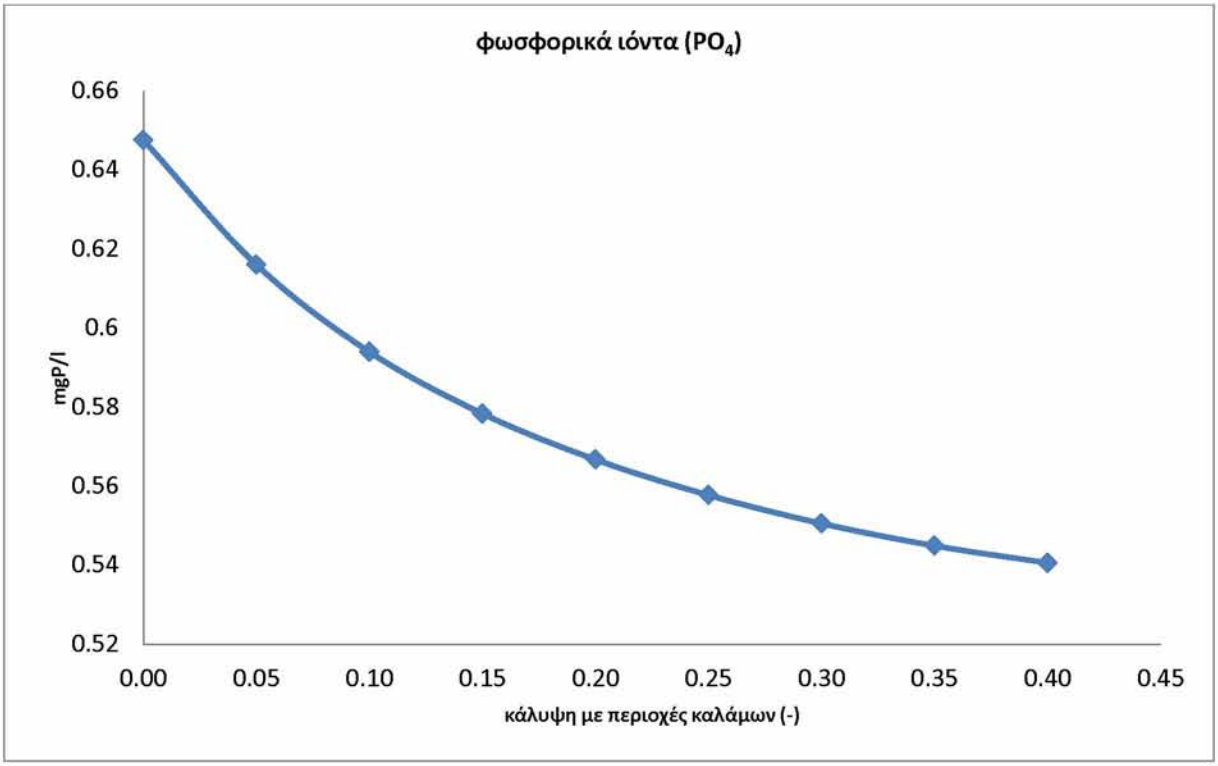


Διάγραμμα 7.58: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

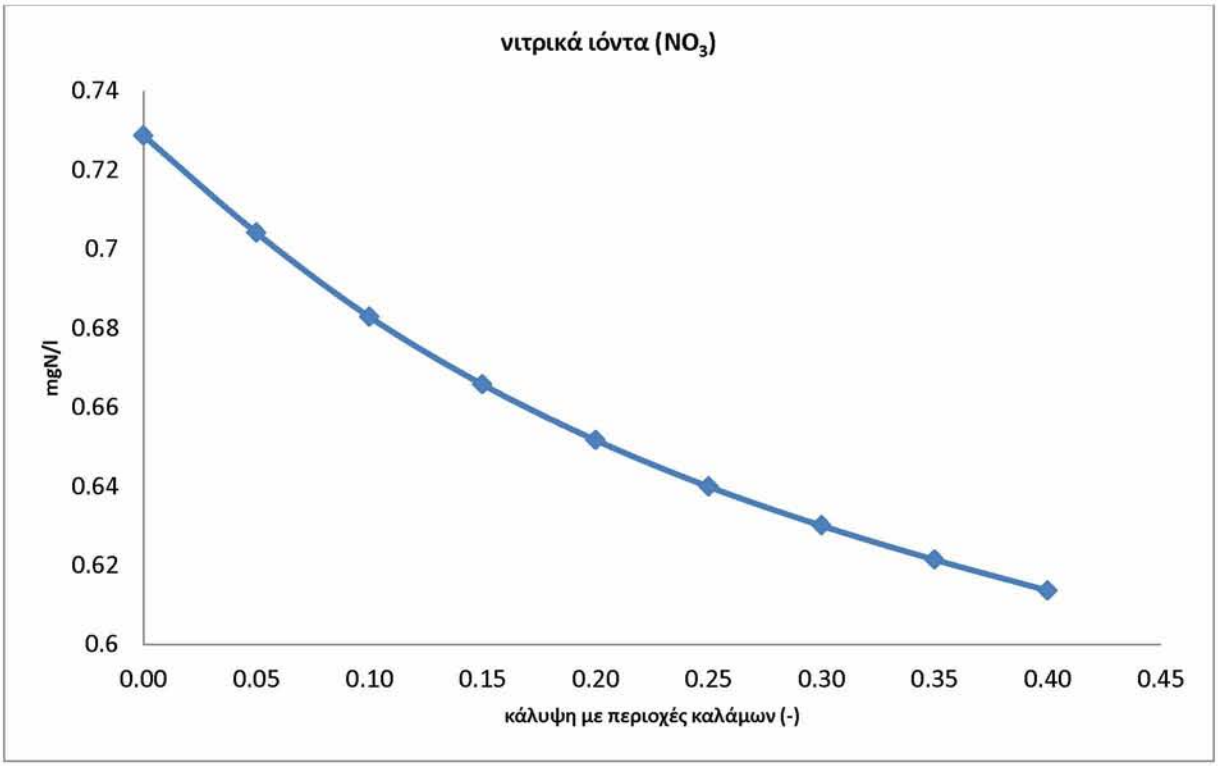


Διάγραμμα 7.59: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων των κυανοβακτηρίων – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

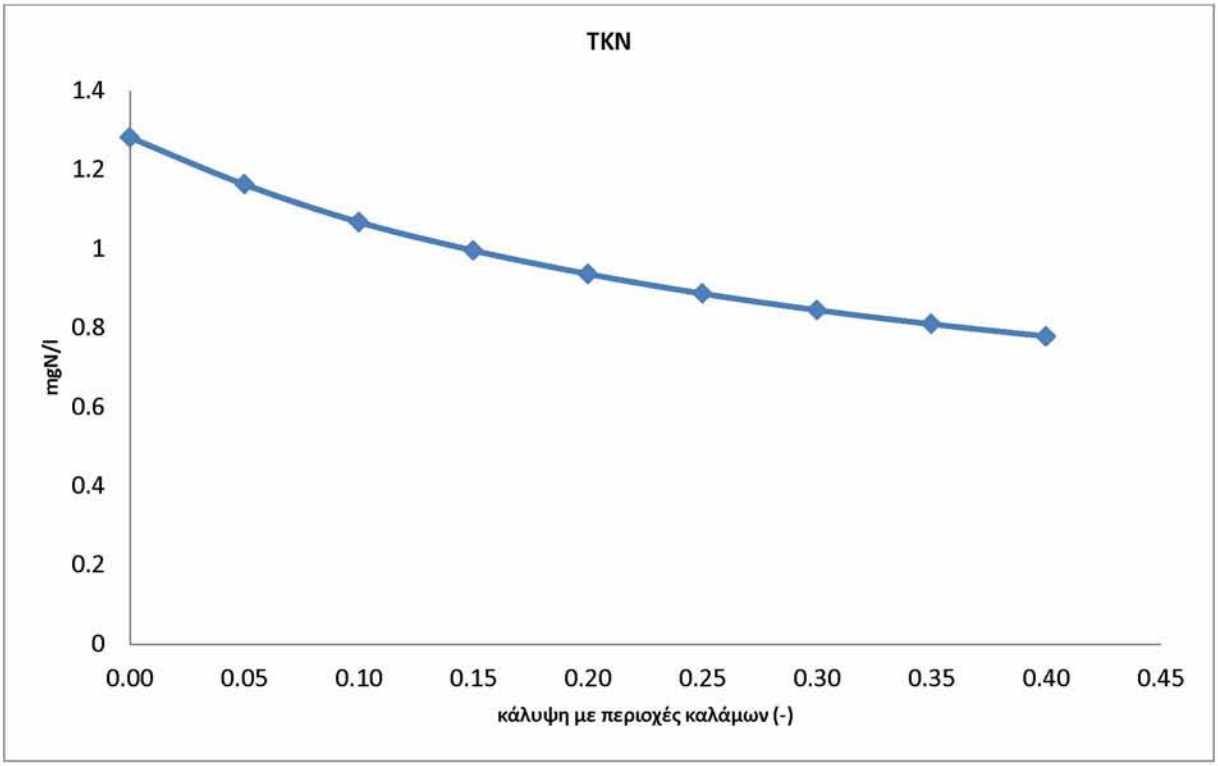


Διάγραμμα 5.60: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – υδραυλική παροχή εισόδου, για μέση στάθμη

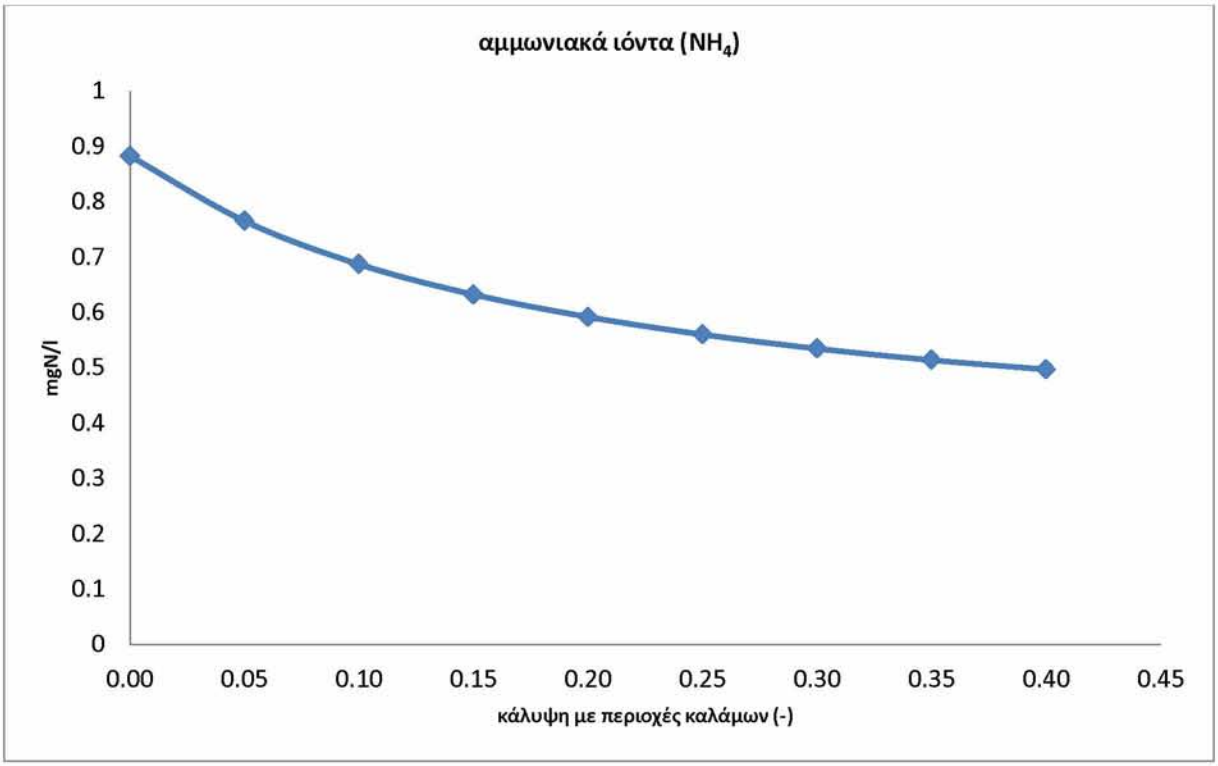


Διάγραμμα 7.61: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

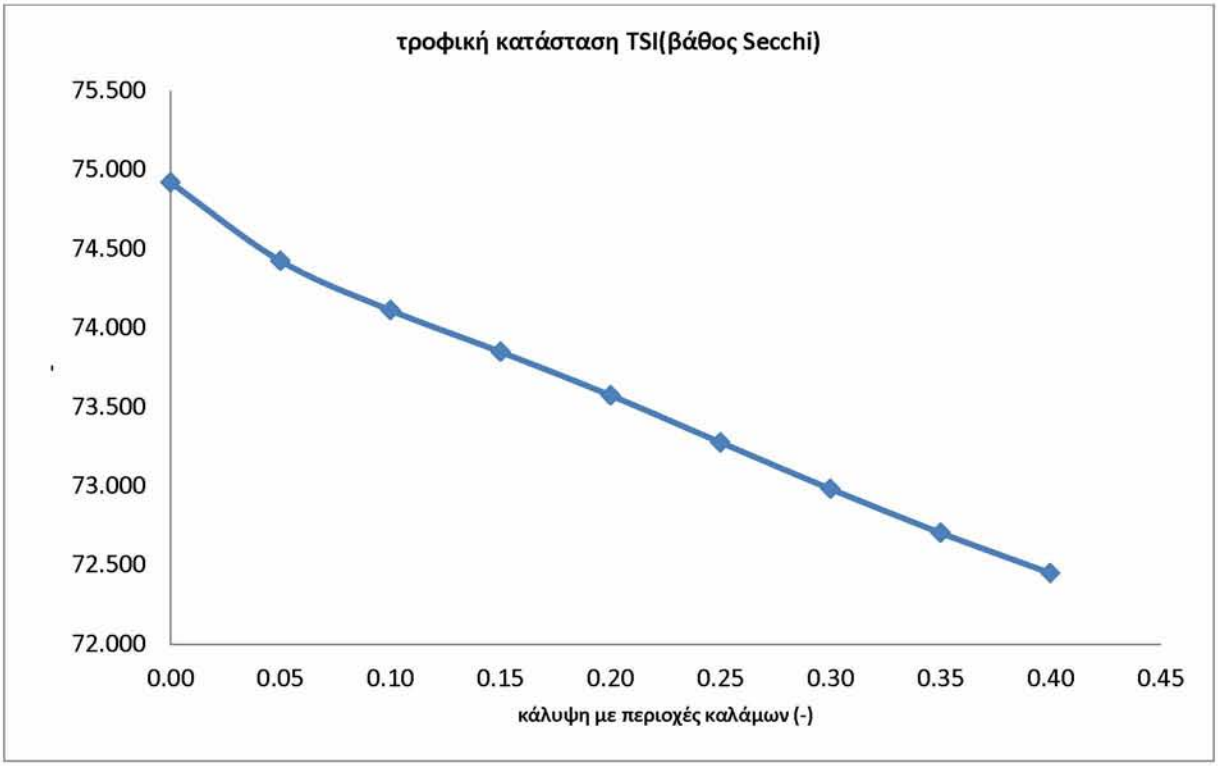


Διάγραμμα 7.62: μέσο θερινό επίπεδο TKN – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη



Διάγραμμα 7.63: μέσο θερινό επίπεδο αμμωνιακών ιόντων (NH_4) – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 7.64: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – κάλυψη με περιοχές καλάμων, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα φαινόμενο που απασχολεί όλο και περισσότερο, καθότι μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας, κυρίως, αναμένεται να αλλάξει μία αλληλουχία φυσικών διεργασιών. Εν προκειμένω, μία θερμοκρασιακή αλλαγή επηρεάζει ένα λιμναίο οικοσύστημα, με πολλούς τρόπους. Αρχικά, η ίδια η θερμοκρασία αποτελεί κύριο παράγοντα των βιοχημικών αντιδράσεων, συνήθως επιταχύνοντάς τες. Δεύτερον, αλλά εξίσου σημαντικό, μία αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την εξάτμιση και άρα επηρεάζει το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης ελλειμματικά. Τρίτον, η μείωση του υδάτινου όγκου, μέσω της εξάτμισης, προκαλεί αφενός μείωση της στάθμης, αφετέρου μείωση της επιφάνειας και του αναπτύγματος επίδρασης ανέμου. Οι παραπάνω μεταβολές συνυπολογίστηκαν κι εξετάστηκαν στην προσομοίωση της λίμνης Κάρλας για τη μέση στάθμη της λίμνης ως αρχική συνθήκη και όλους τους άλλους παράγοντες να είναι αυτοί του έτους 2012. Τα σενάρια που εξετάζονται είναι προϊόν προσομοίωσης και ανάλυσης ευαισθησίας μόνο ως προς τη θερμοκρασία. Υπάρχουν κι άλλες κλιματικές παράμετροι που ενδεχομένως επηρεάζουν το σύστημα, όπως η ηλιοφάνεια, η νέφωση και η βροχόπτωση. Επίσης, τα δεδομένα εισόδου της θερμοκρασίας δεν είναι προϊόν κλιματικής προσομοίωσης, αλλά υποθετικών σεναρίων αύξησης θερμοκρασίας.

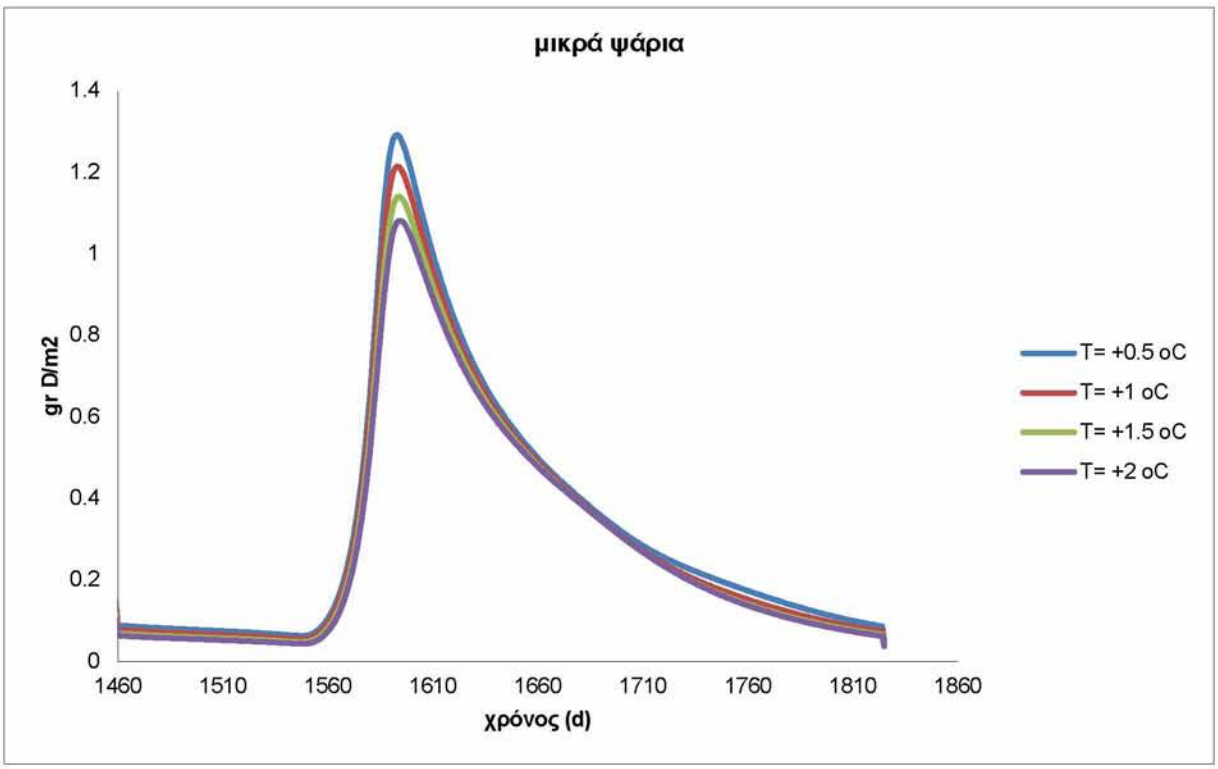
Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής σε ένα τυπικό έτος στο οποίο προσαυξάνεται για κάθε δοκιμή, η θερμοκρασία με βήμα 0.5° C (παράγραφος 8.1). Αντίστοιχα επηρεάζονται όλοι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στο μοντέλο. Ακολουθούν διαγράμματα που αφορούν στα μέσα θερινά επίπεδα των φυσικών μεγεθών της λίμνης (Παράγραφος 8.2).

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων, τα οποία παρουσιάζονται με στρεβλή κλίμακα για λόγους εύκολης ανάγνωσης, παρατηρείται ότι η κλιματική αλλαγή παίζει σημαντικό ρόλο μόνο στις αιχμές των καμπυλών των φυσικών μεγεθών. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε ευτροφικότερες συνθήκες στις περιοχές των τοπικών ακρότατων. Ειδικά στα μεγάλα ψάρια, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωσή τους σταθερή σε όλο το έτος.

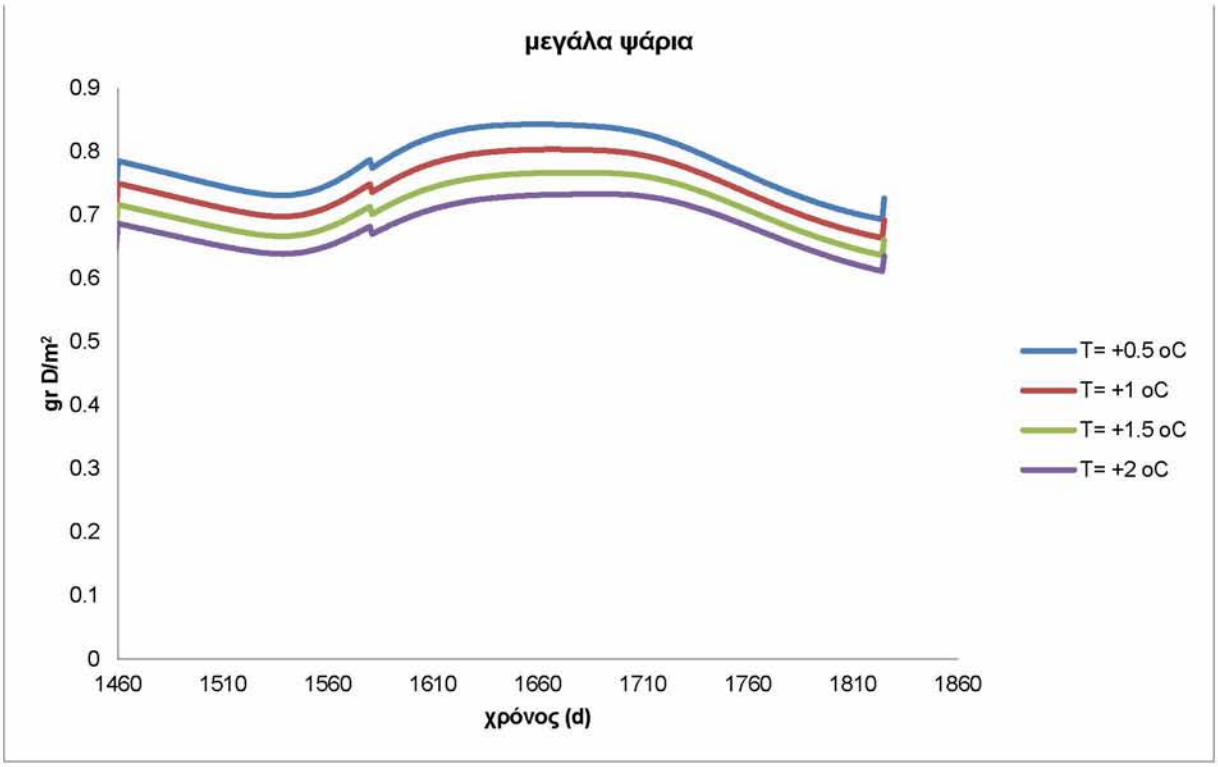
Η χλωροφύλλη-α, για μεγαλύτερη θερμοκρασία, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τοπικών μεγίστων, επιδεινώνοντας την τροφική κατάσταση της λίμνης, ειδικά τους θερινούς μήνες. Συγχρόνως, η θερμοκρασιακή αύξηση οδηγεί σε αρνητική χρονική μετατόπιση των αιχμών της χλωροφύλλης-α των λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων, έως και για έναν μήνα περίπου.

Η τροφική κατάσταση σε βαθμούς TSI χειροτερεύει ανεπαίσθητα, ίσως μόνο κατά το καλοκαίρι. (Διαγράμματα 8.1 έως 8.32) Τα διαγράμματα που αφορούν σε λίμνη χαμηλής στάθμης δεν παρουσιάζονται, καθότι ακολουθούν ακριβώς τις ίδιες μικρές μεταβολές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

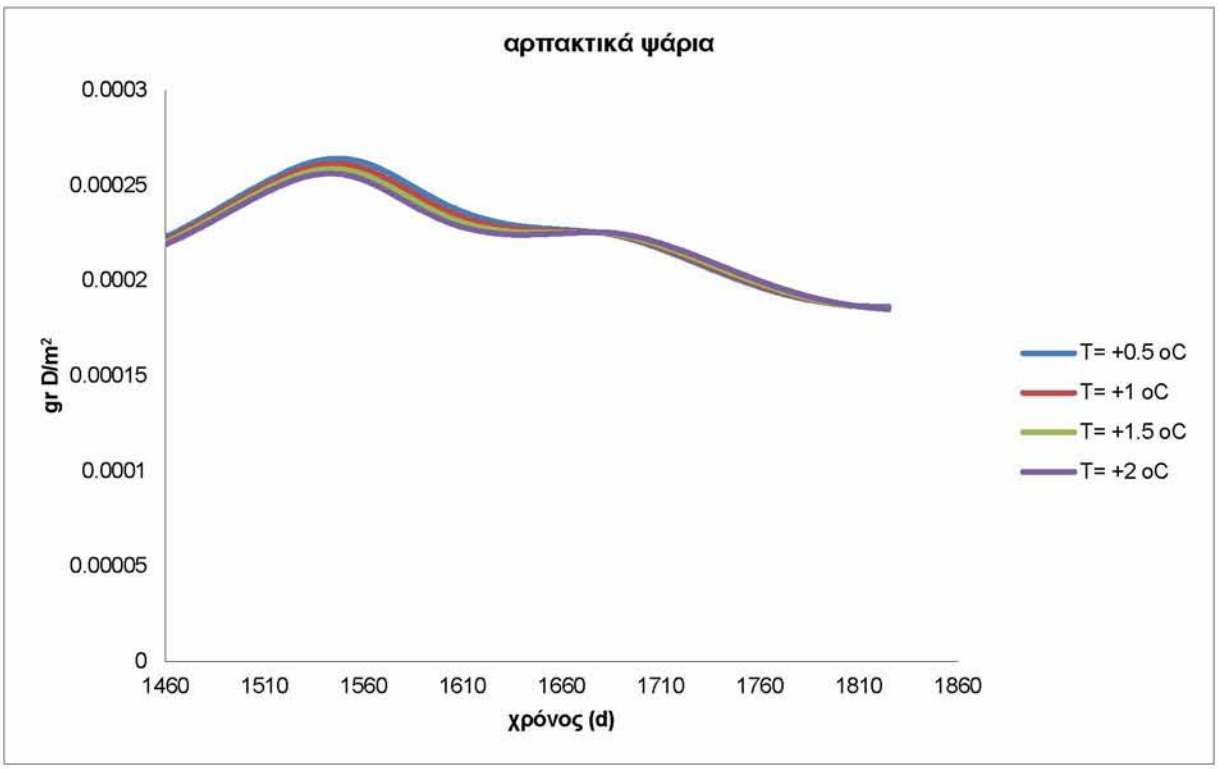


Διάγραμμα 8.1: μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

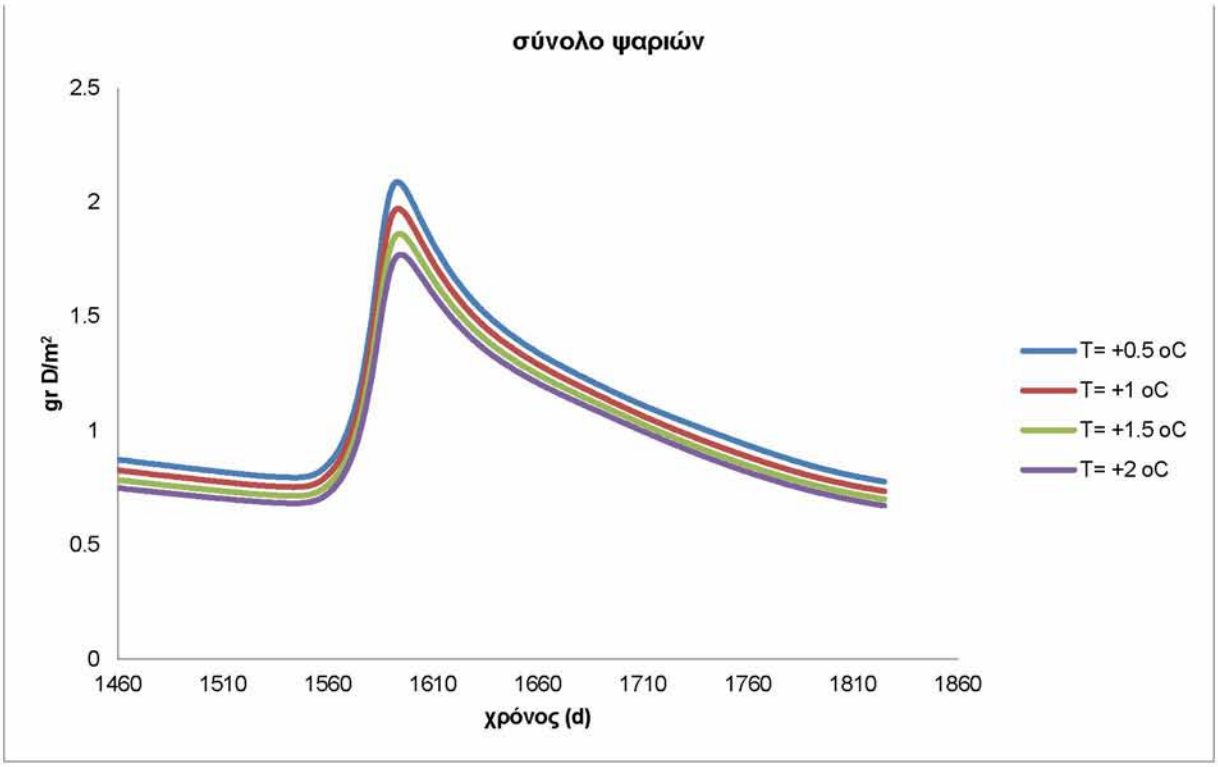


Διάγραμμα 8.2: μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

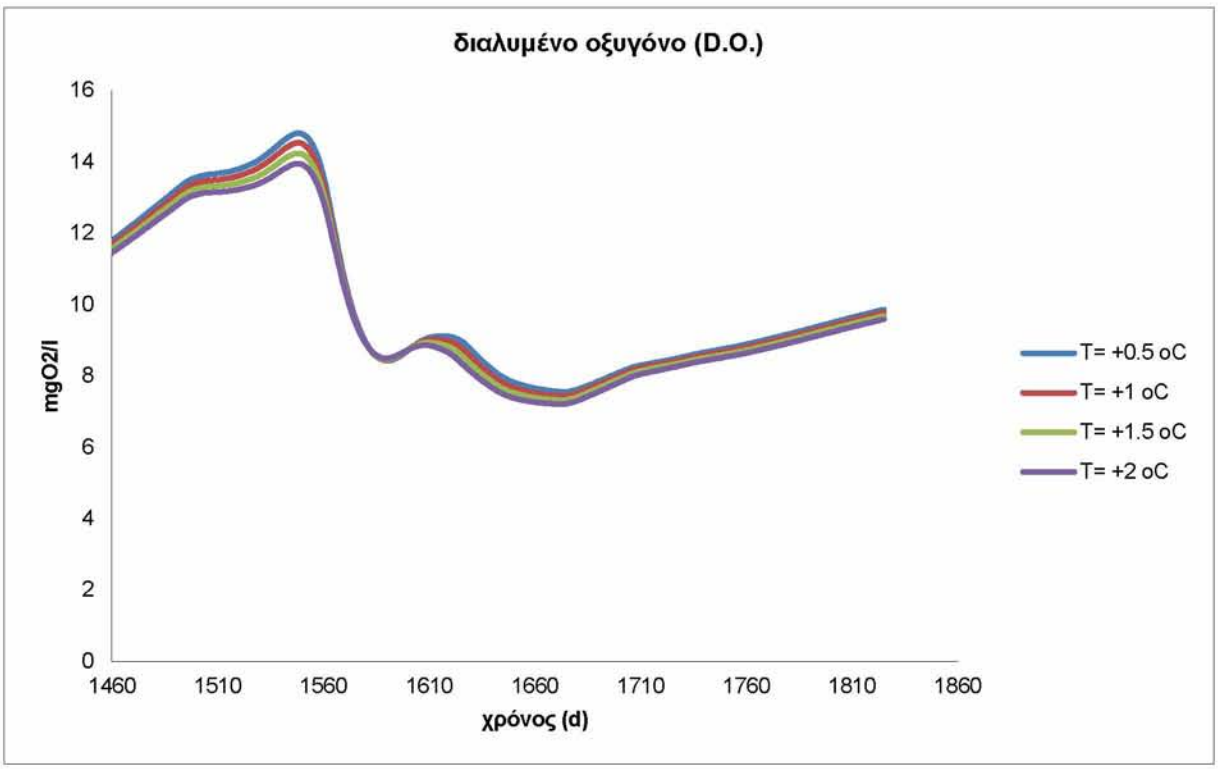


Διάγραμμα 8.3: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

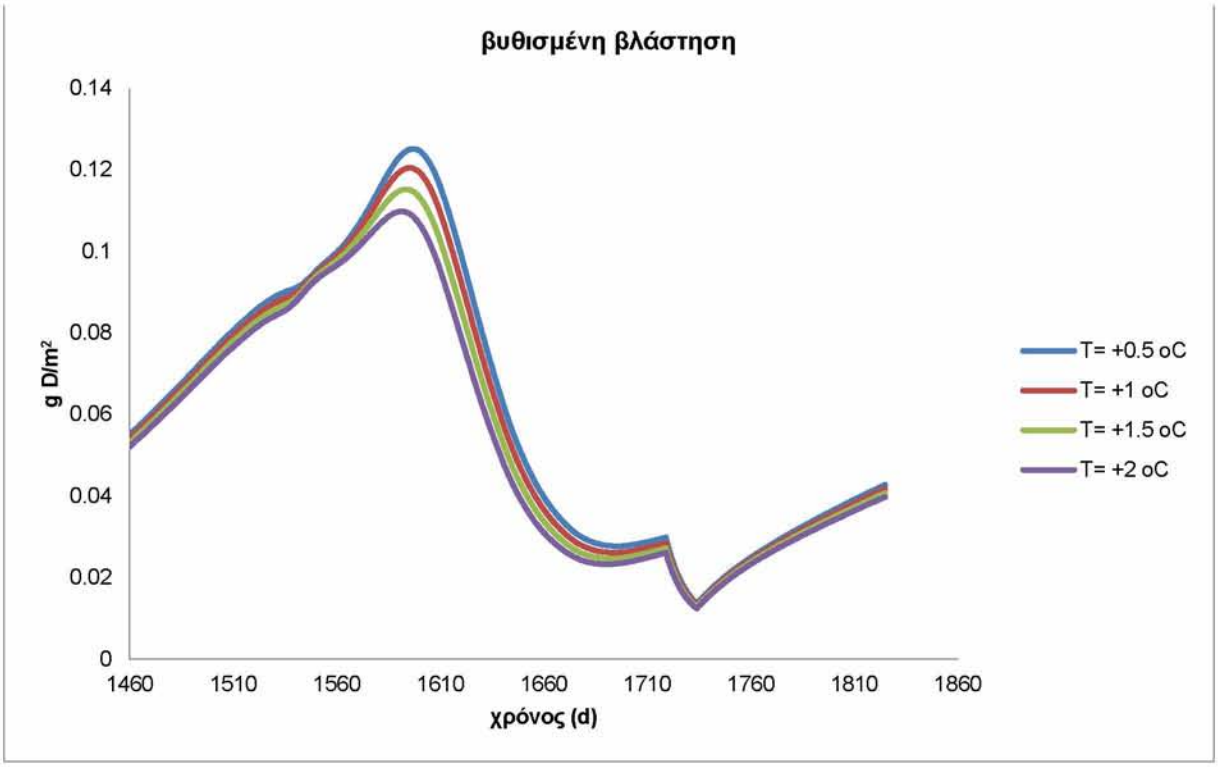


Διάγραμμα 8.4: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

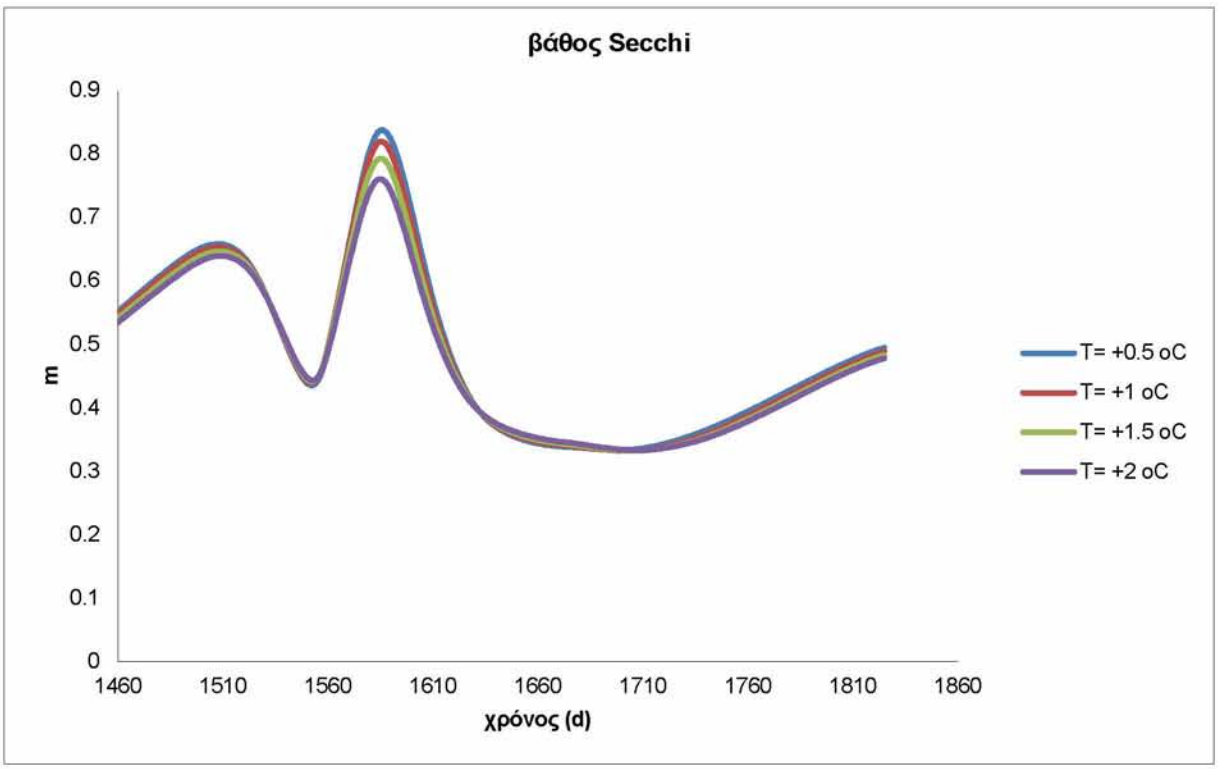


Διάγραμμα 8.5: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

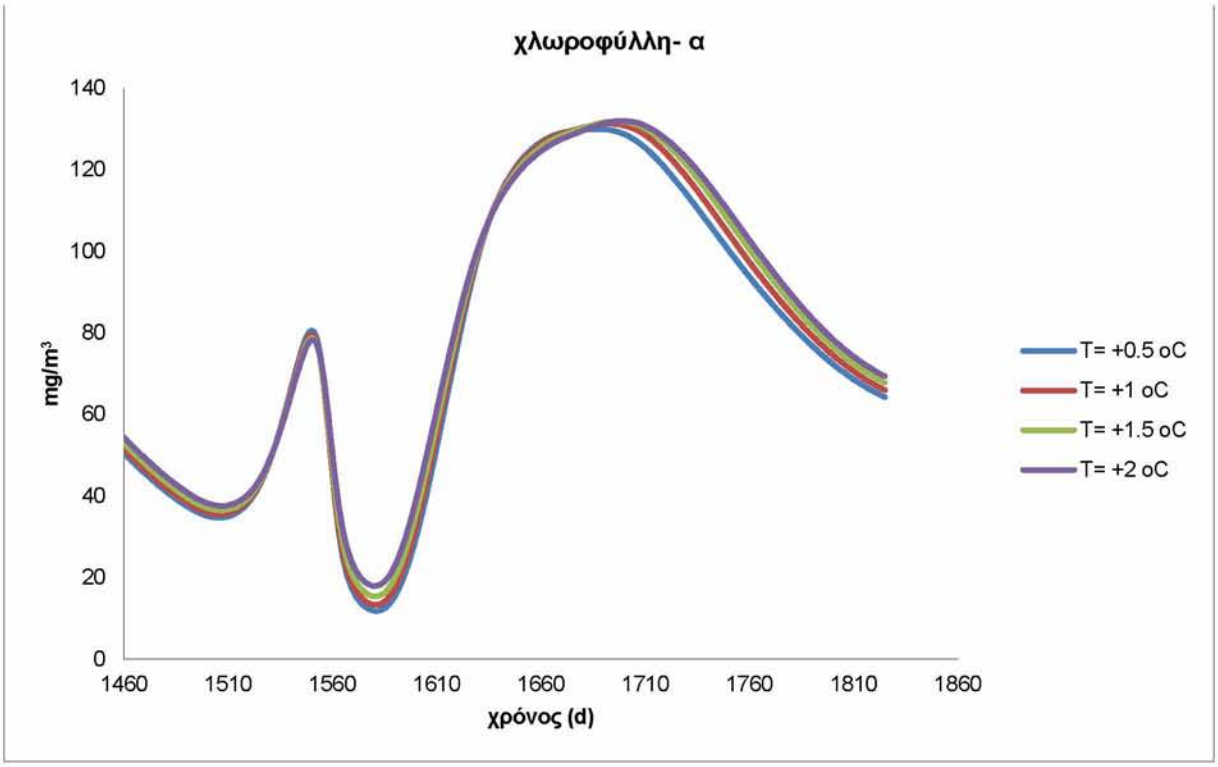


Διάγραμμα 8.6: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

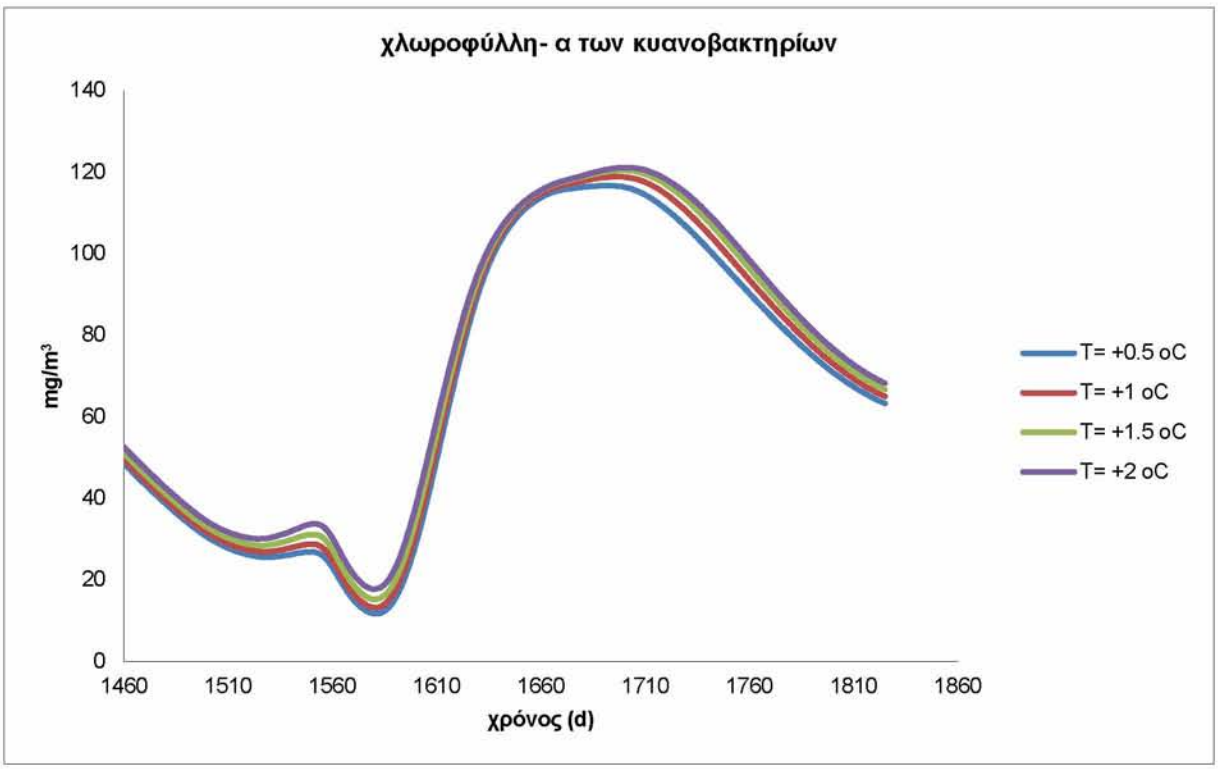


Διάγραμμα 8.7: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

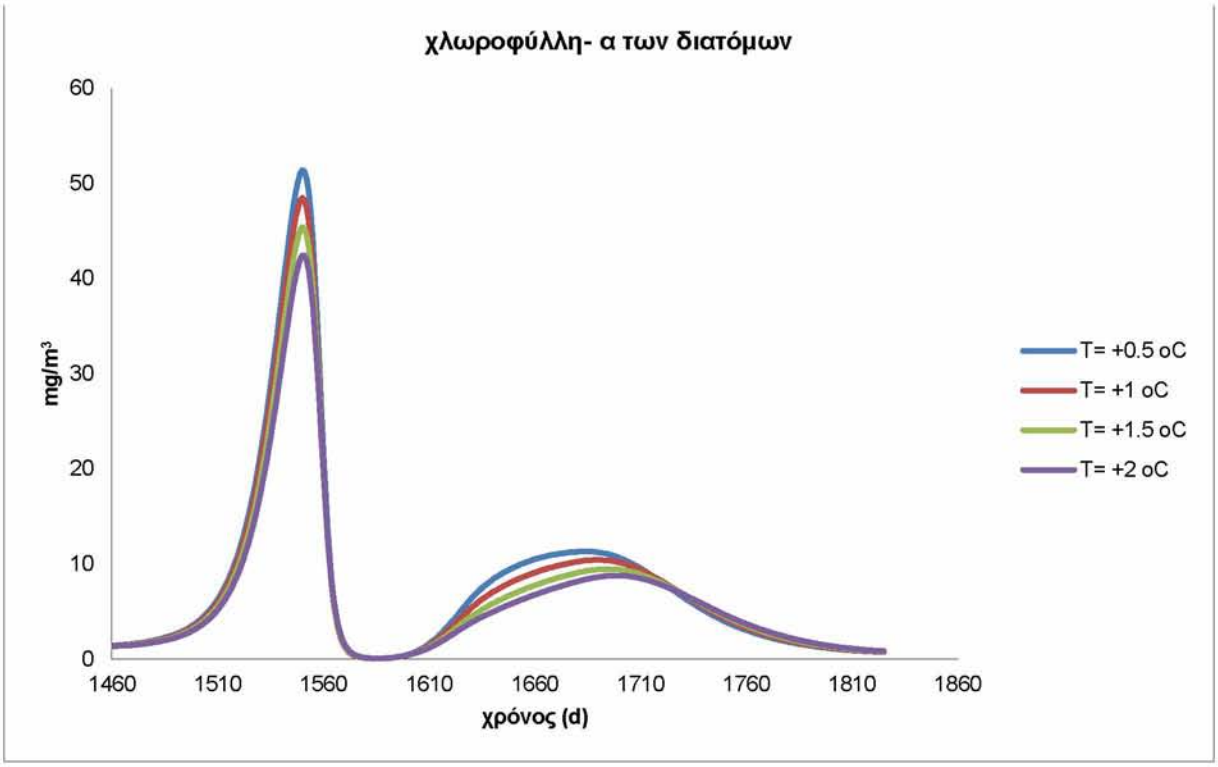


Διάγραμμα 8.8: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 8.9: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

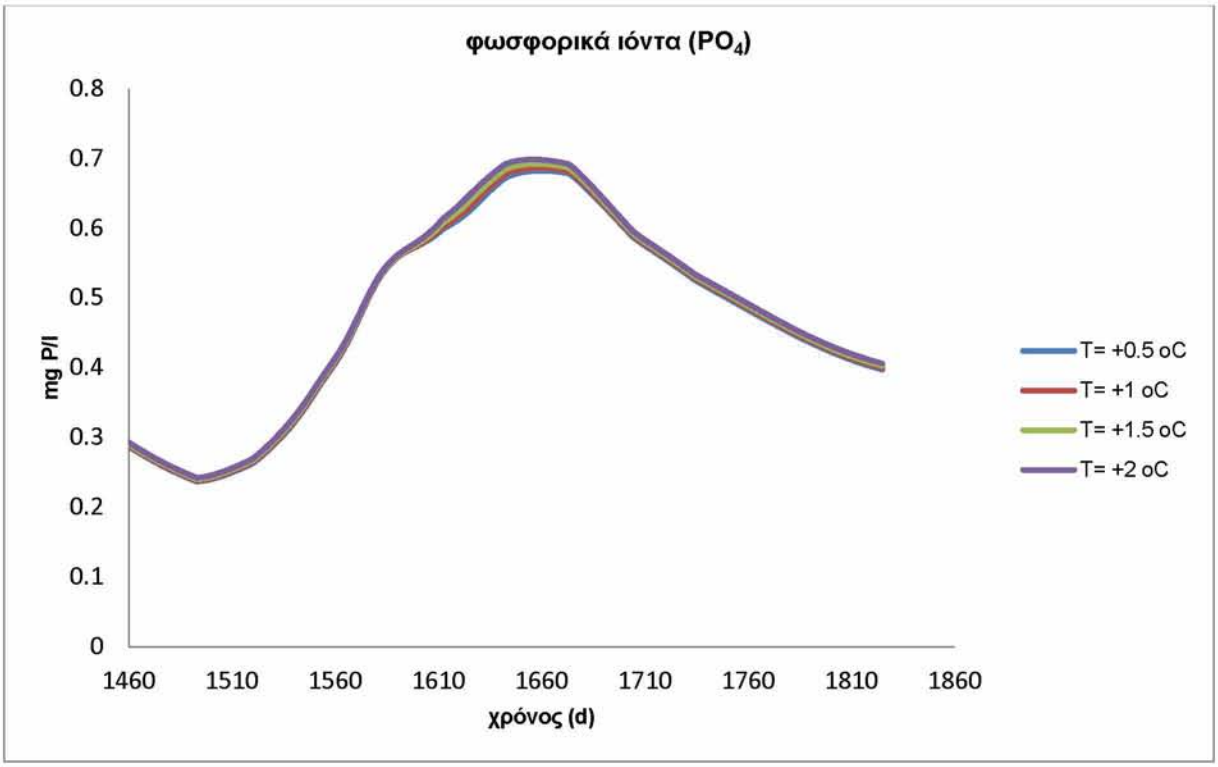


Διάγραμμα 8.10: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

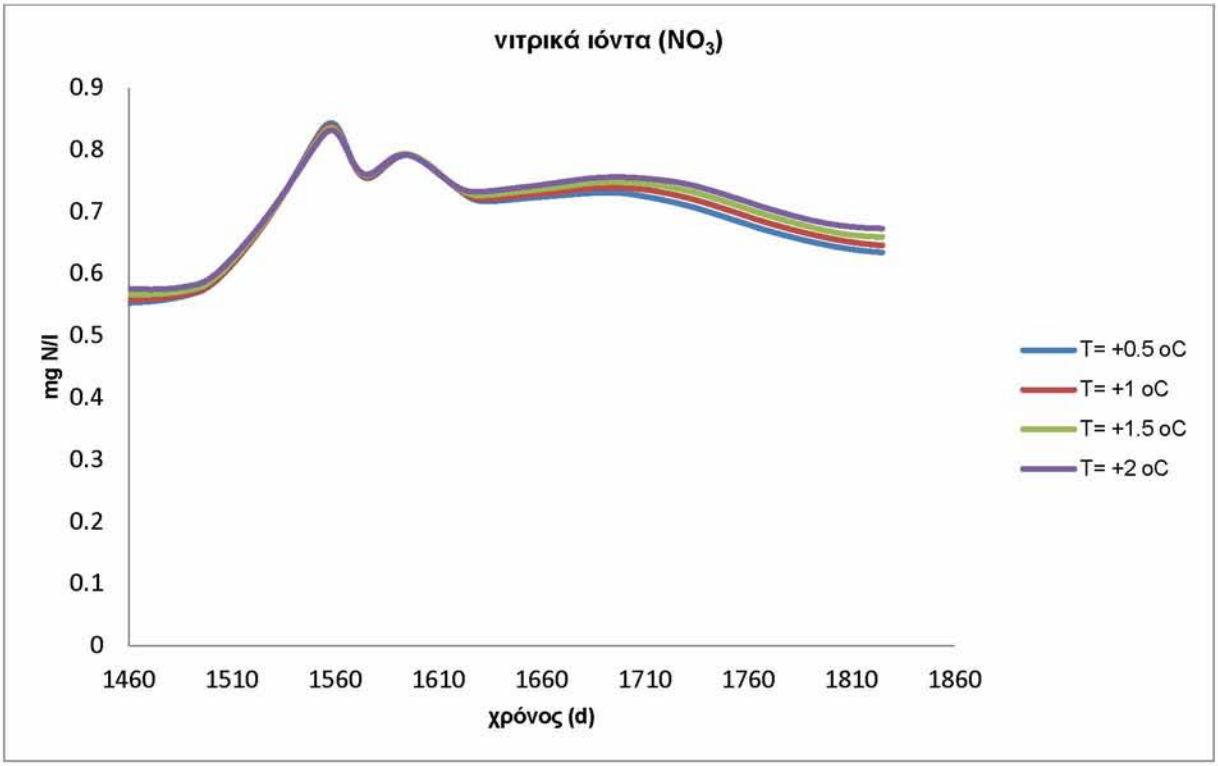


Διάγραμμα 8.11: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

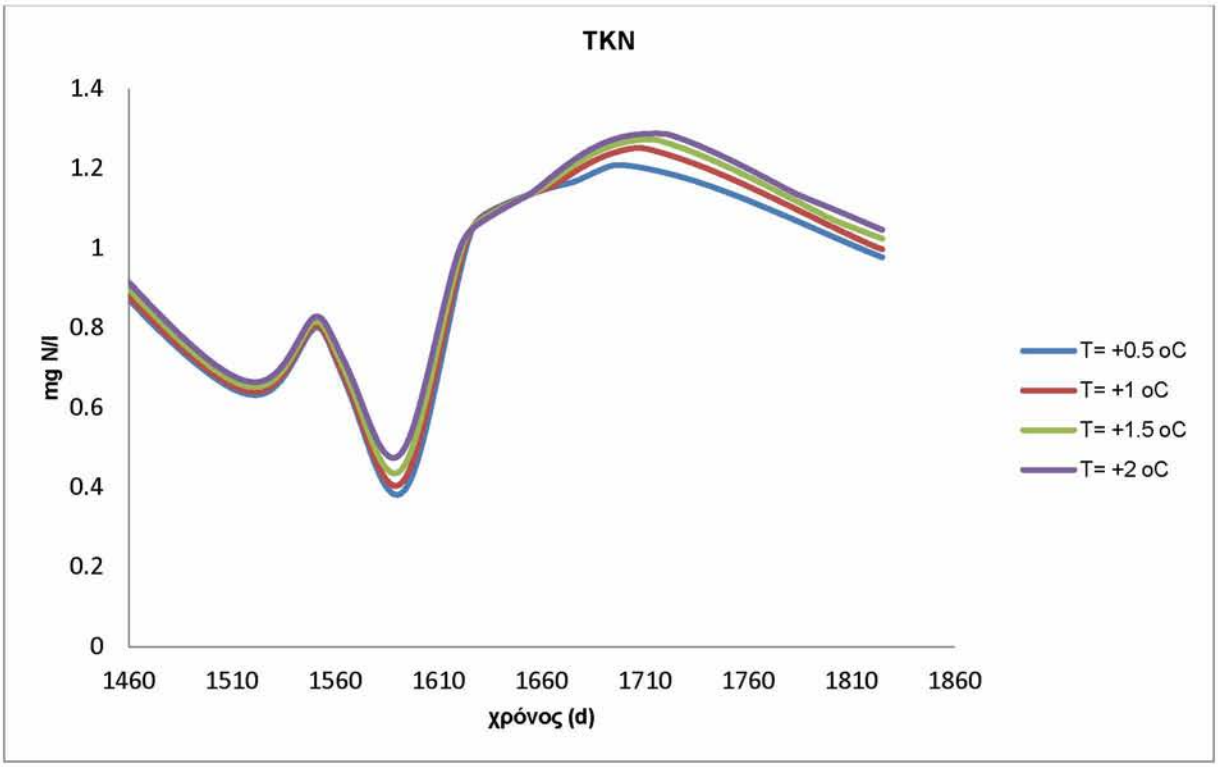


Διάγραμμα 8.12: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

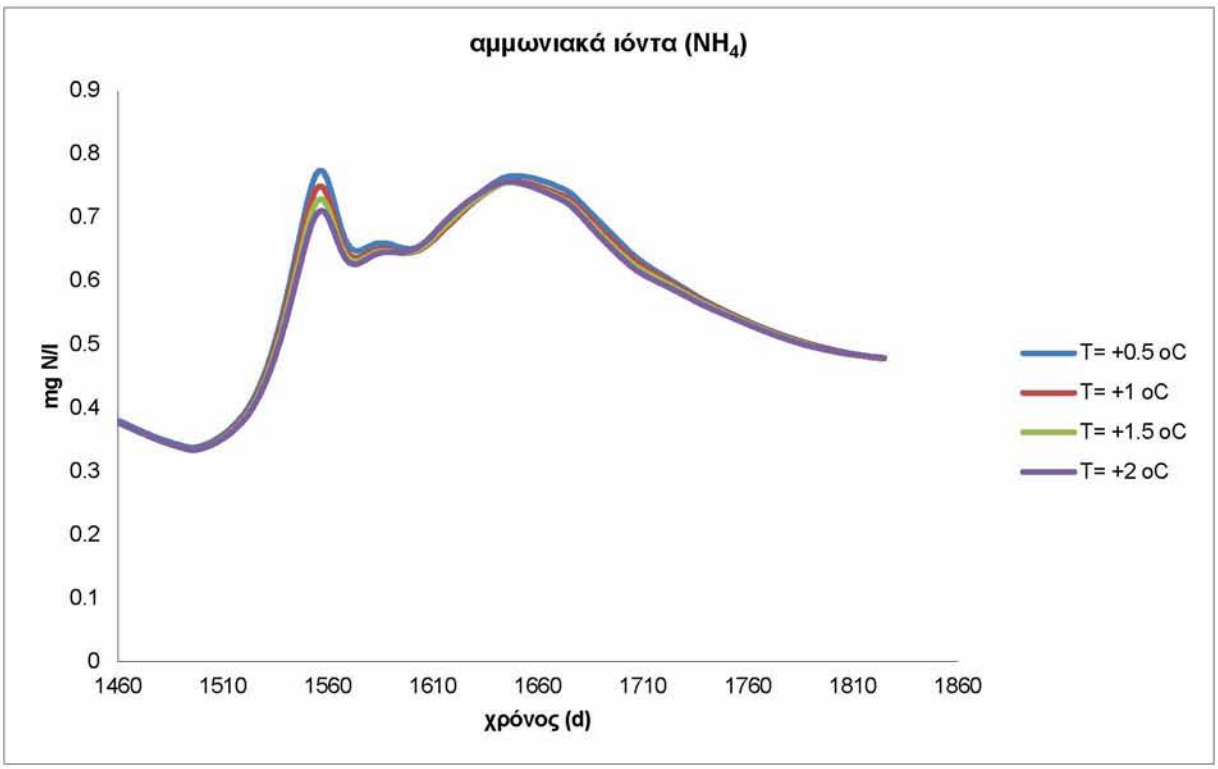


Διάγραμμα 8.13: νιτρικά ιόντα (NO_3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

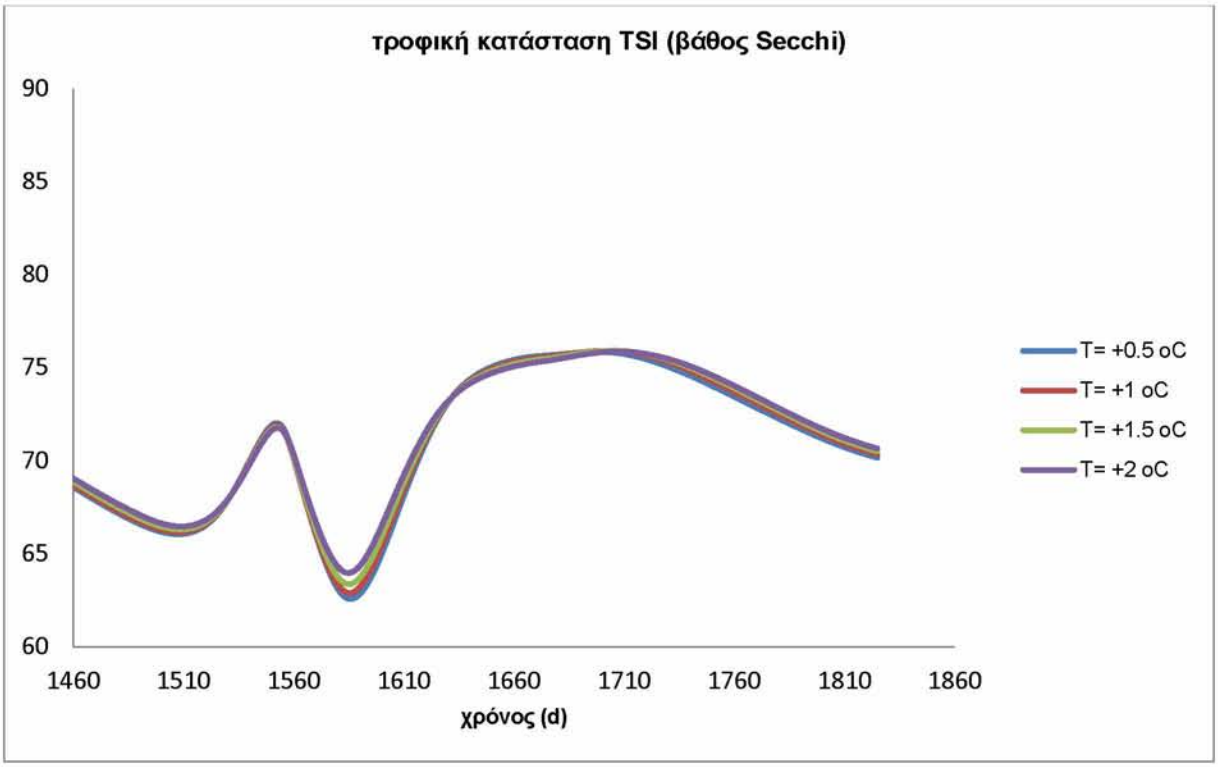


Διάγραμμα 8.14: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης: για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

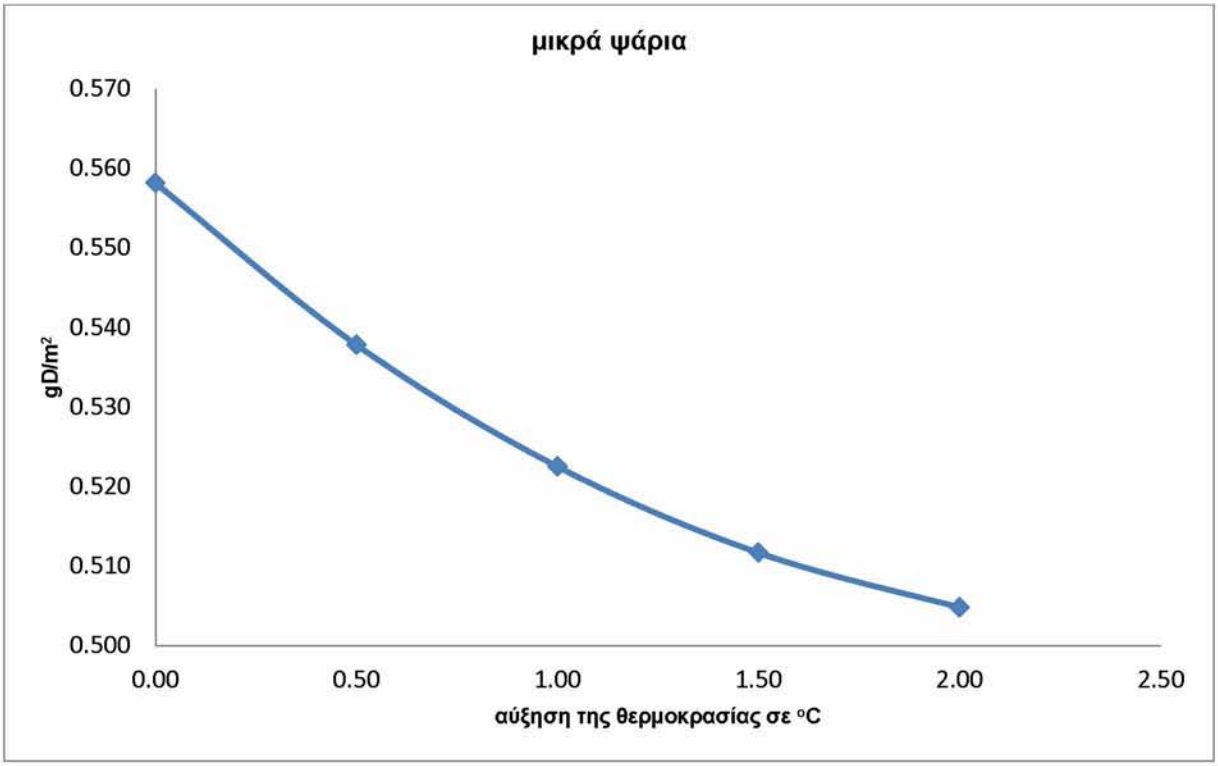


Διάγραμμα 8.15: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

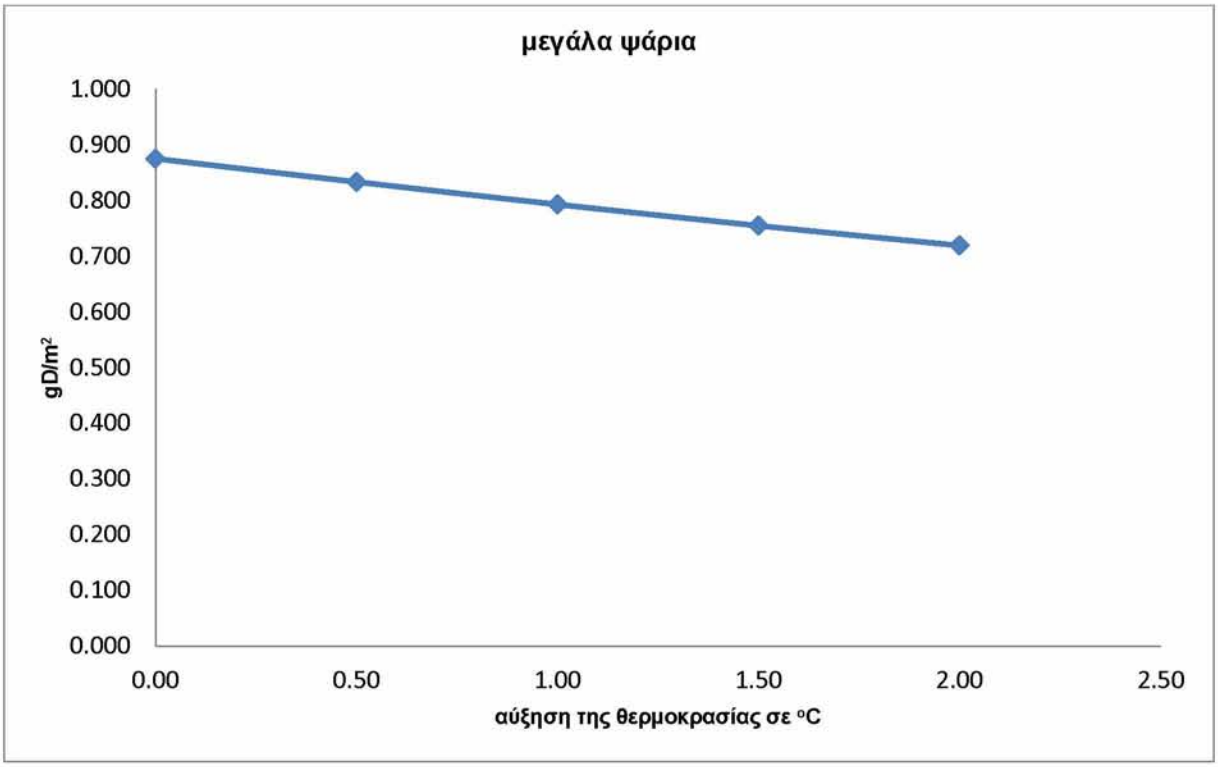


Διάγραμμα 8.16: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για 4 ενδεικτικές κλιματικές αλλαγές για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

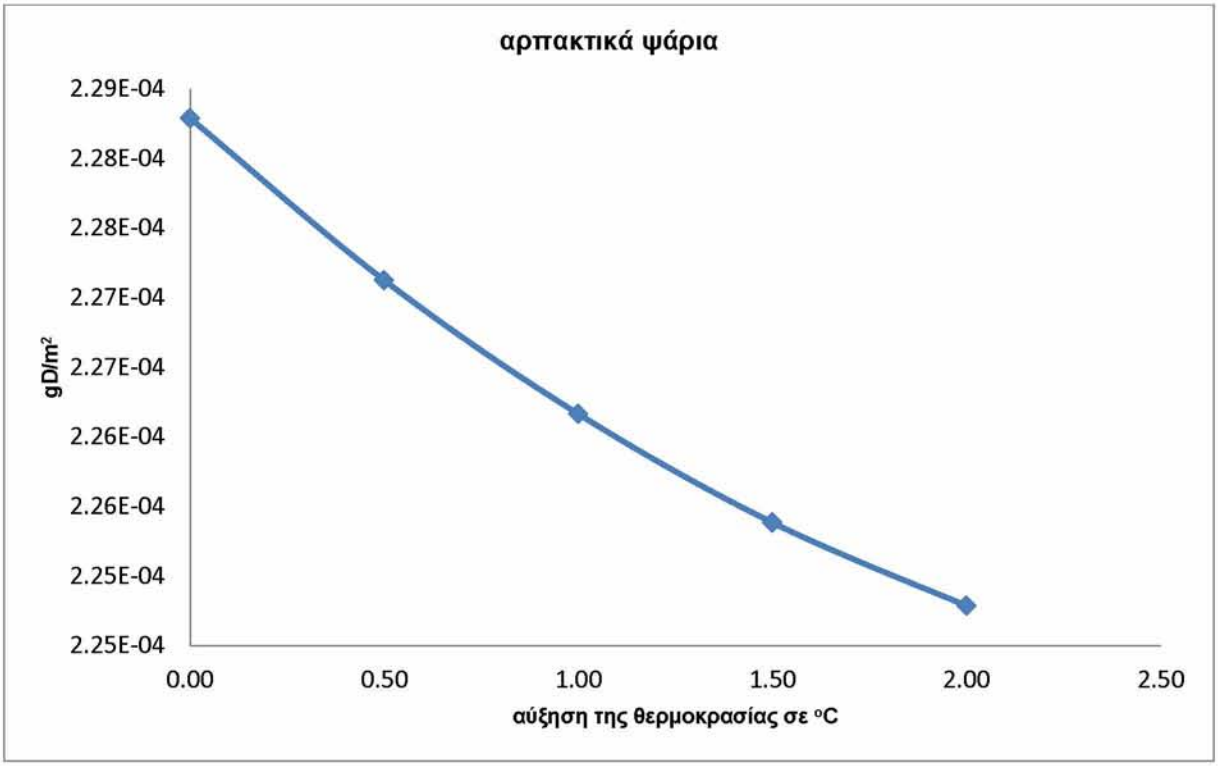


Διάγραμμα 8.17: μέσο θερινό επίπεδο μικρών ψαριών – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

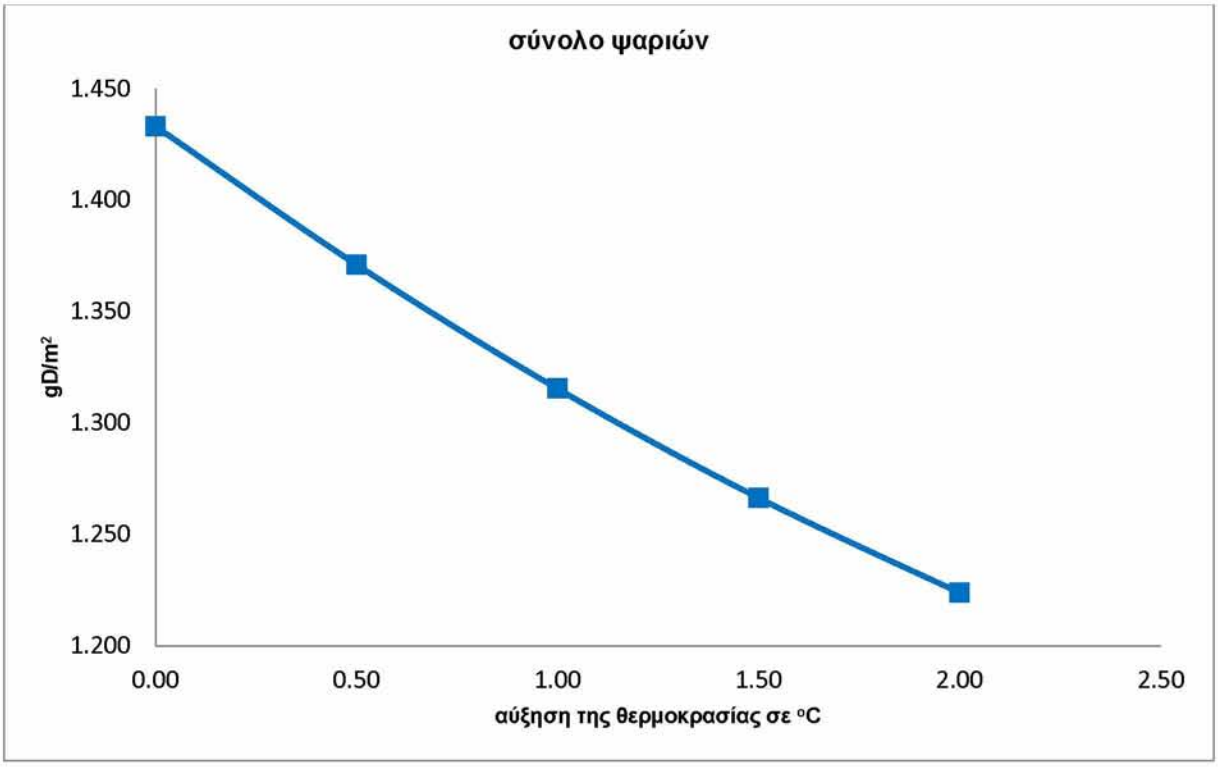


Διάγραμμα 8.18: μέσο θερινό επίπεδο μεγάλων ψαριών– κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

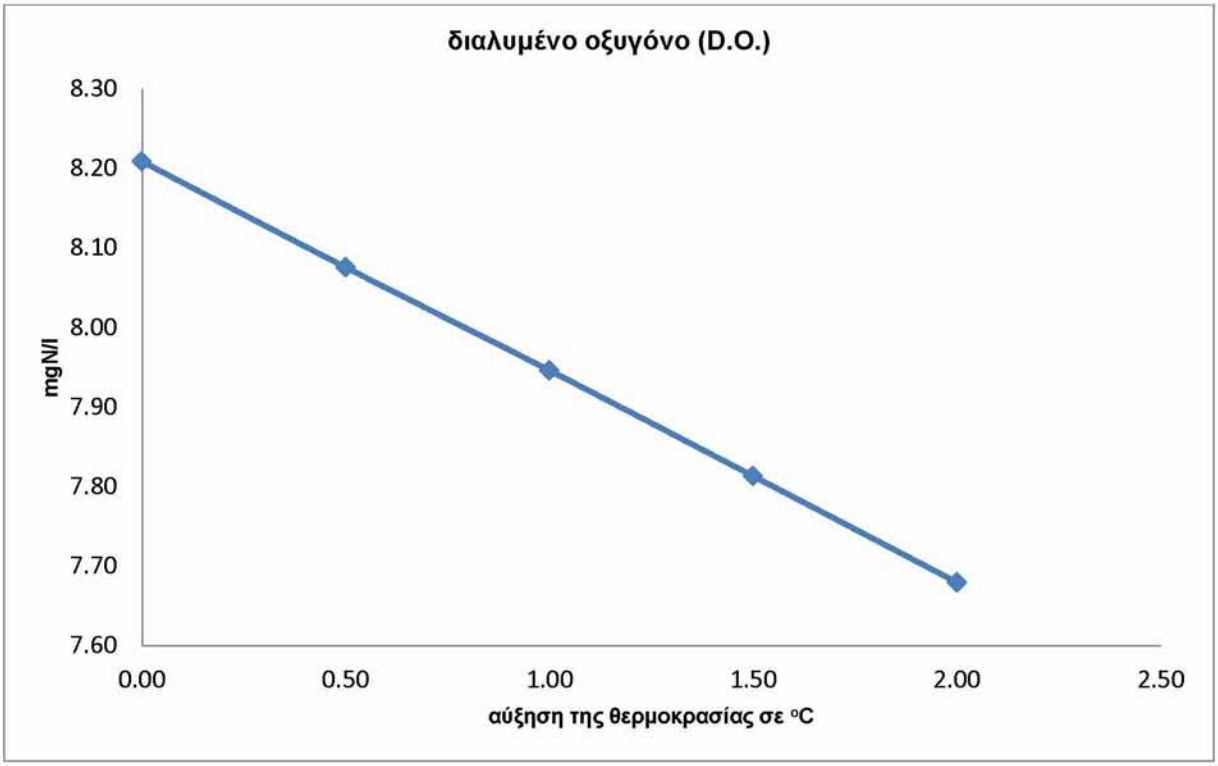


Διάγραμμα 8.19: μέσο θερινό επίπεδο αρπακτικών ψαριών– κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

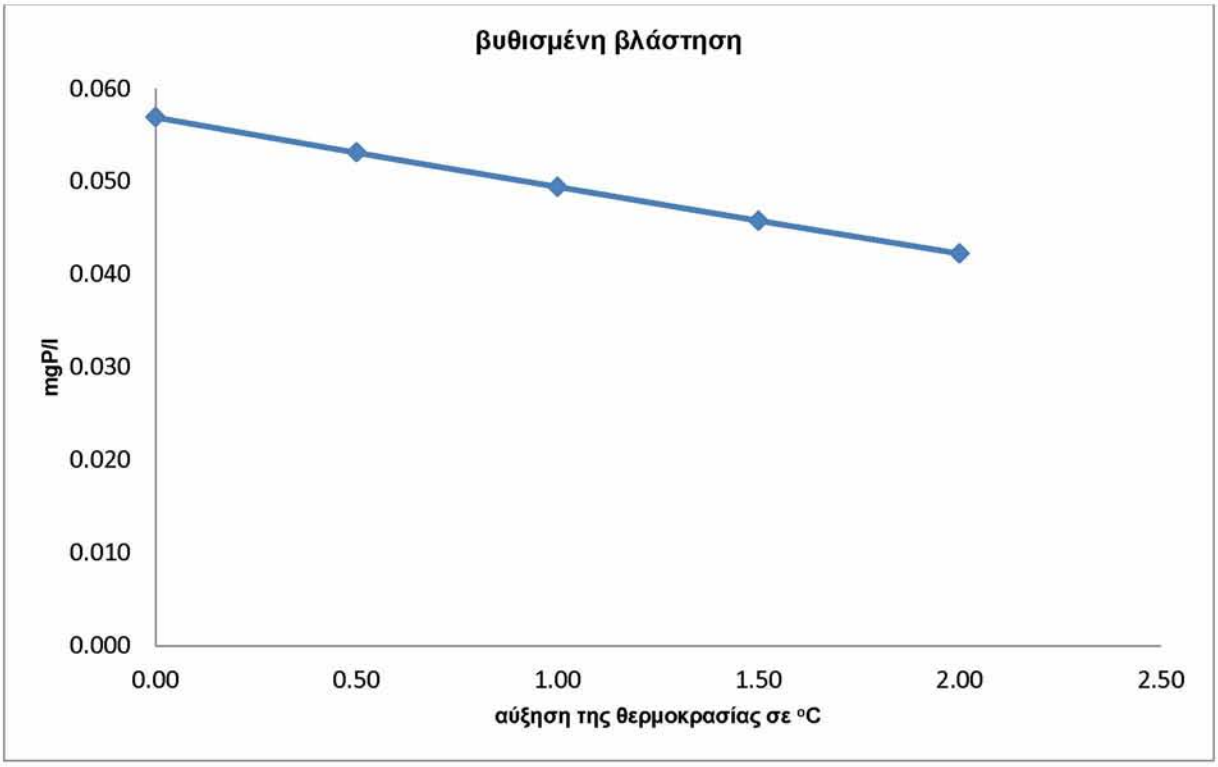


Διάγραμμα 8.20: μέσο θερινό επίπεδο συνόλου ψαριών – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

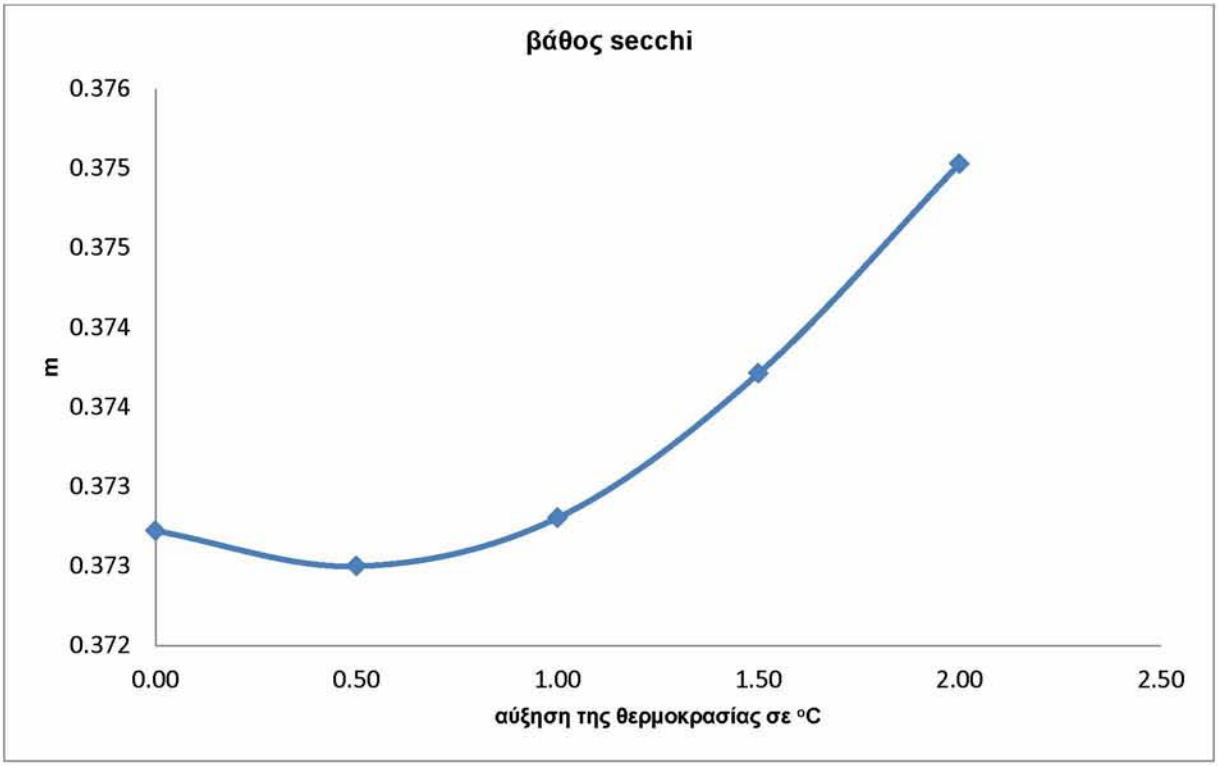


Διάγραμμα 8.21: μέσο θερινό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

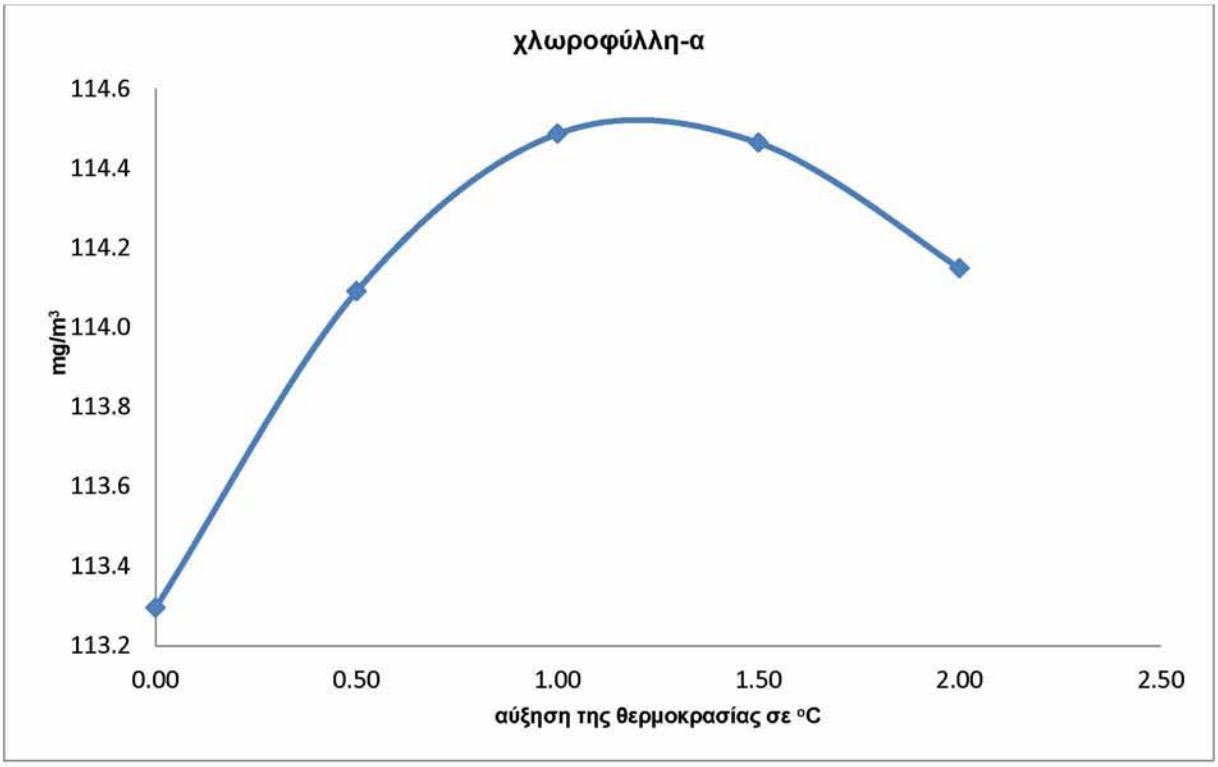


Διάγραμμα 8.22: μέσο θερινό επίπεδο βυθισμένης βλάστησης – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

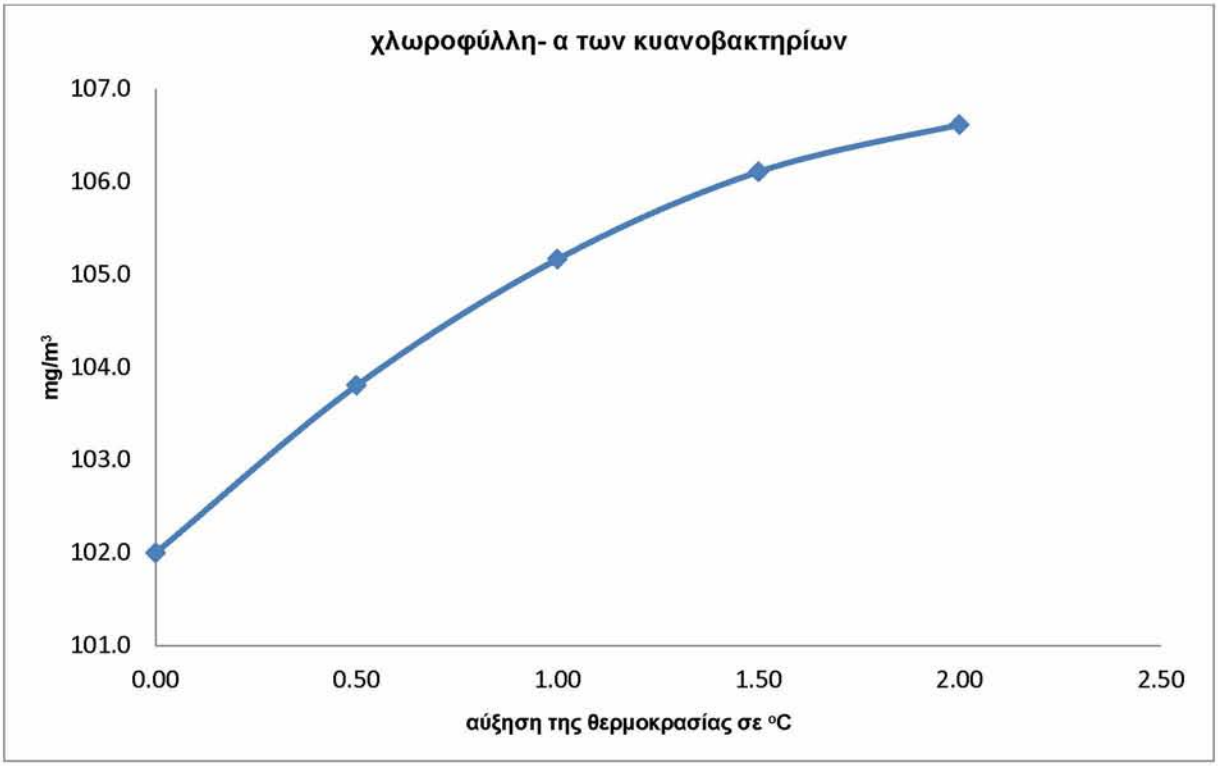


Διάγραμμα 8.23: μέσο θερινό επίπεδο βάθους Secchi – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

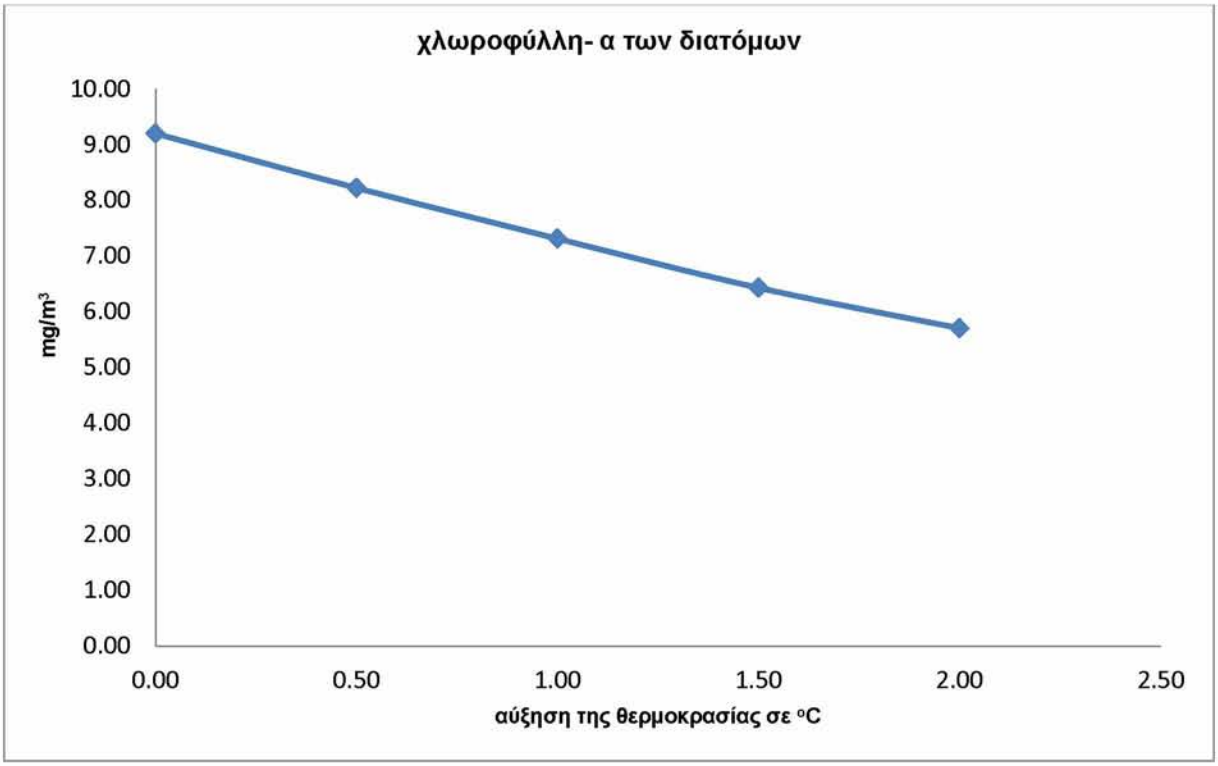


Διάγραμμα 8.24: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

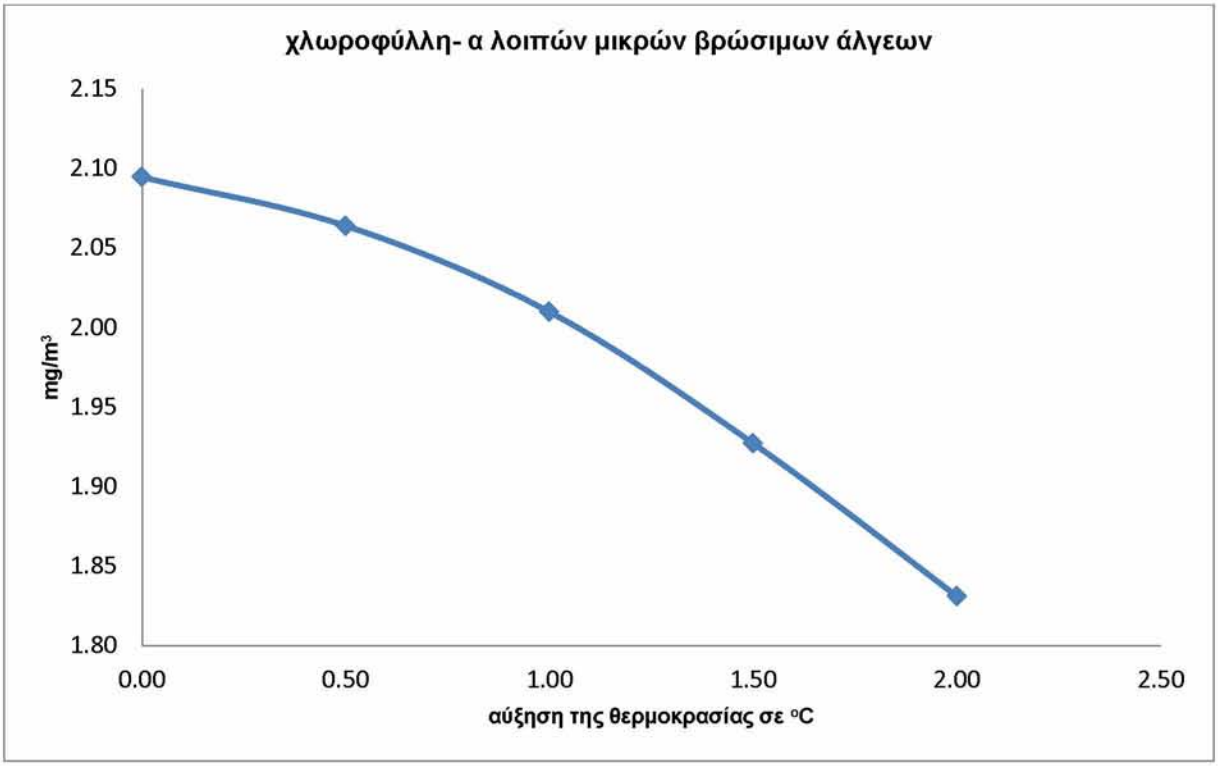


Διάγραμμα 8.25: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των κυανοβακτηρίων – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

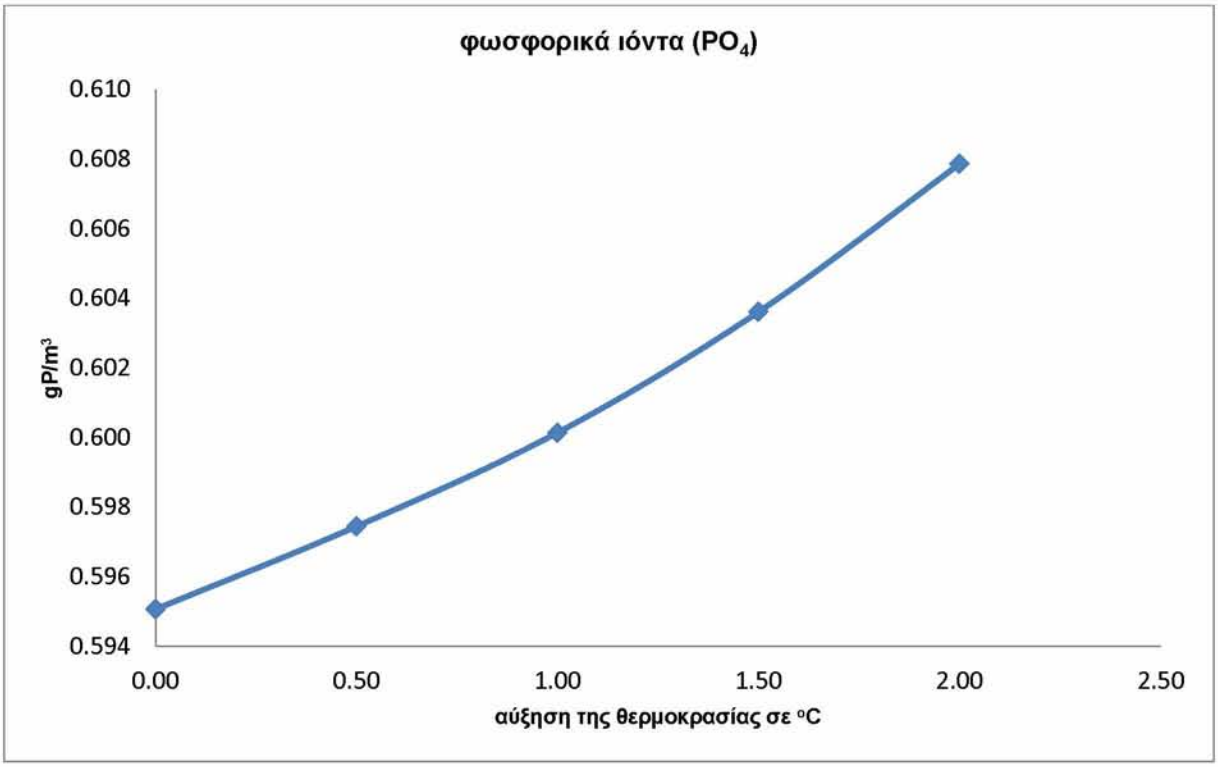


Διάγραμμα 8.26: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των διατόμων – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

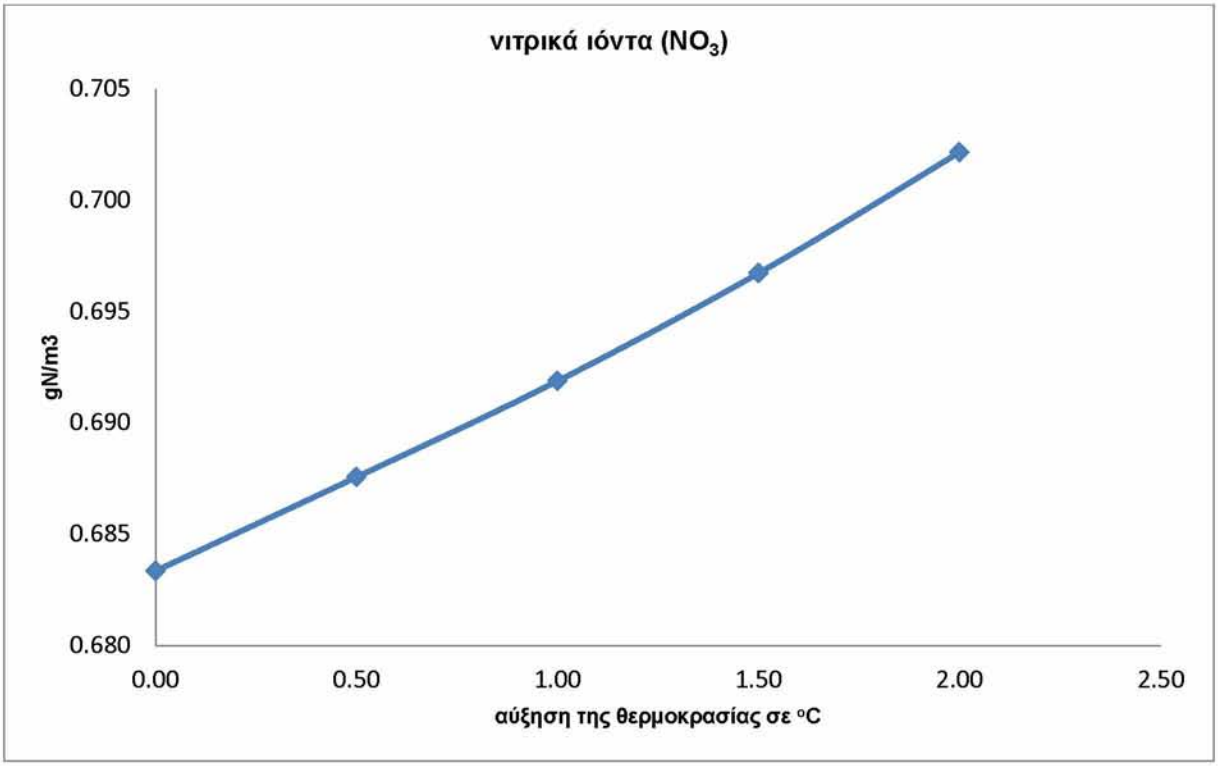


Διάγραμμα 8.27: μέσο θερινό επίπεδο χλωροφύλλης-α των υπόλοιπων μικρών βρώσιμων άλγεων των κυανοβακτηρίων – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

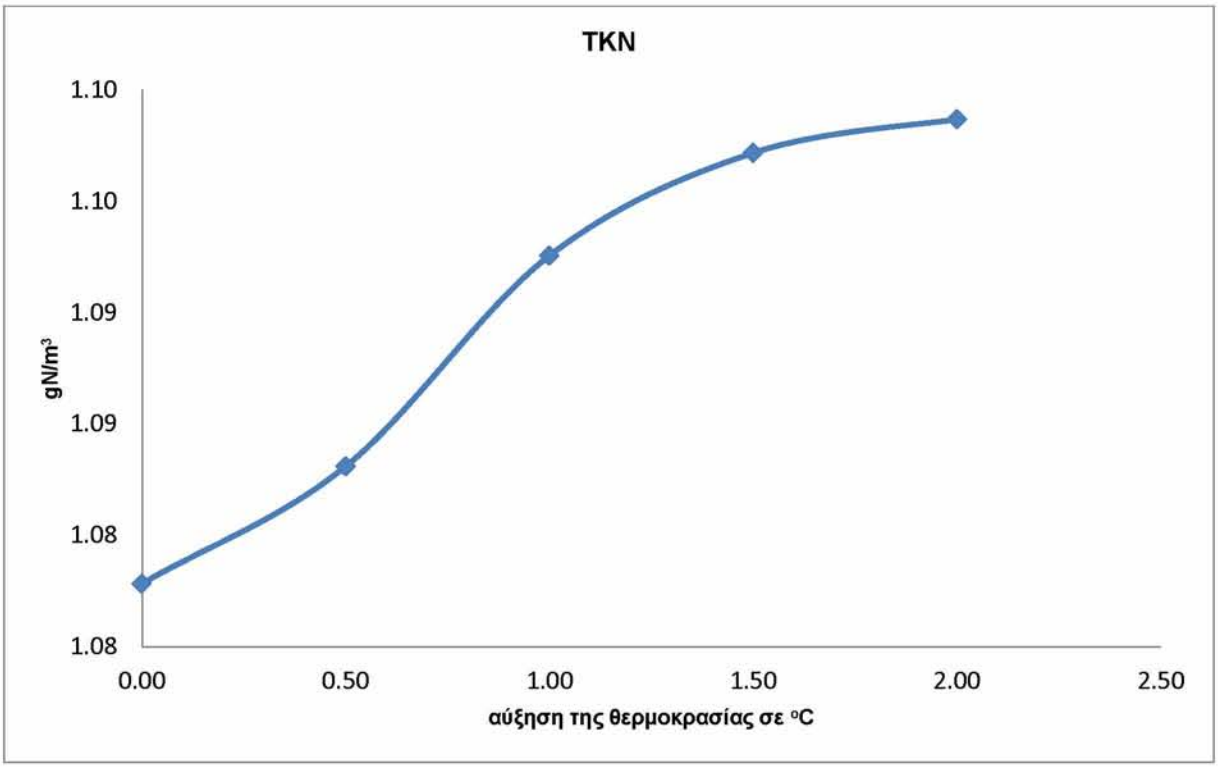


Διάγραμμα 8.28: μέσο θερινό επίπεδο φωσφορικών ιόντων (PO_4) – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

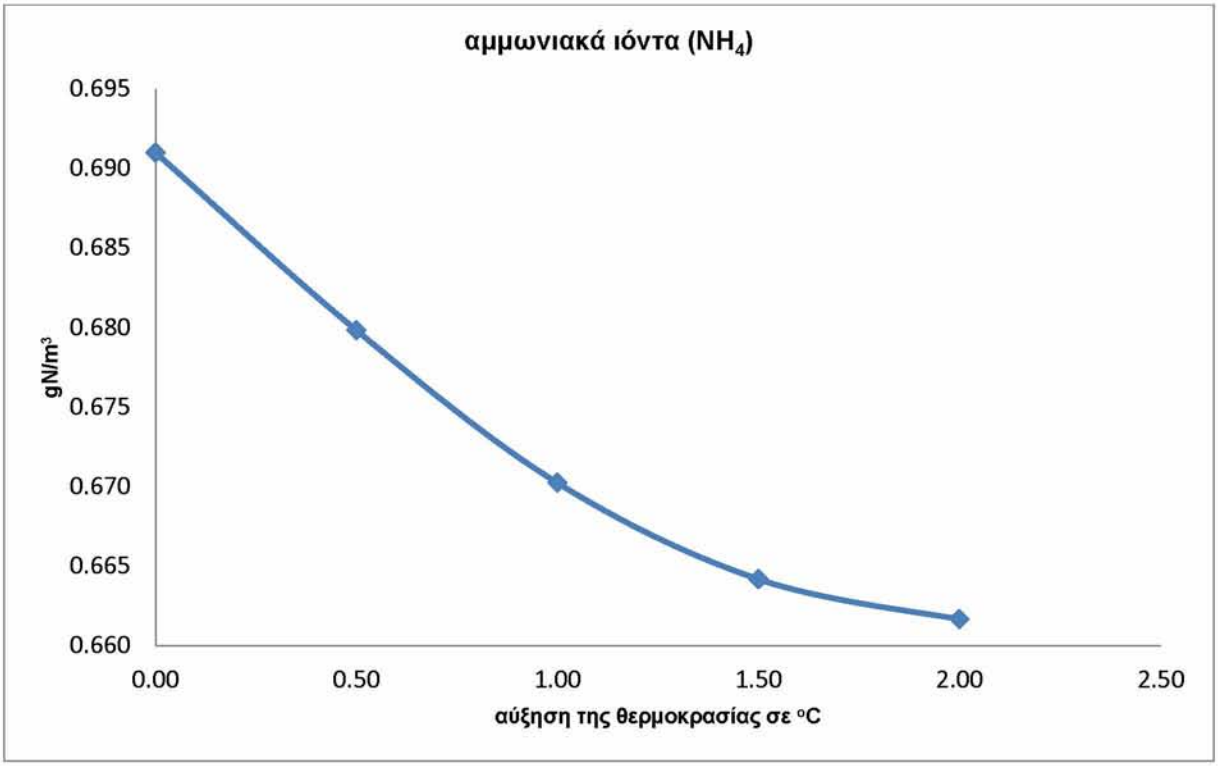


Διάγραμμα 8.29: μέσο θερινό επίπεδο νιτρικών ιόντων (NO_3) – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

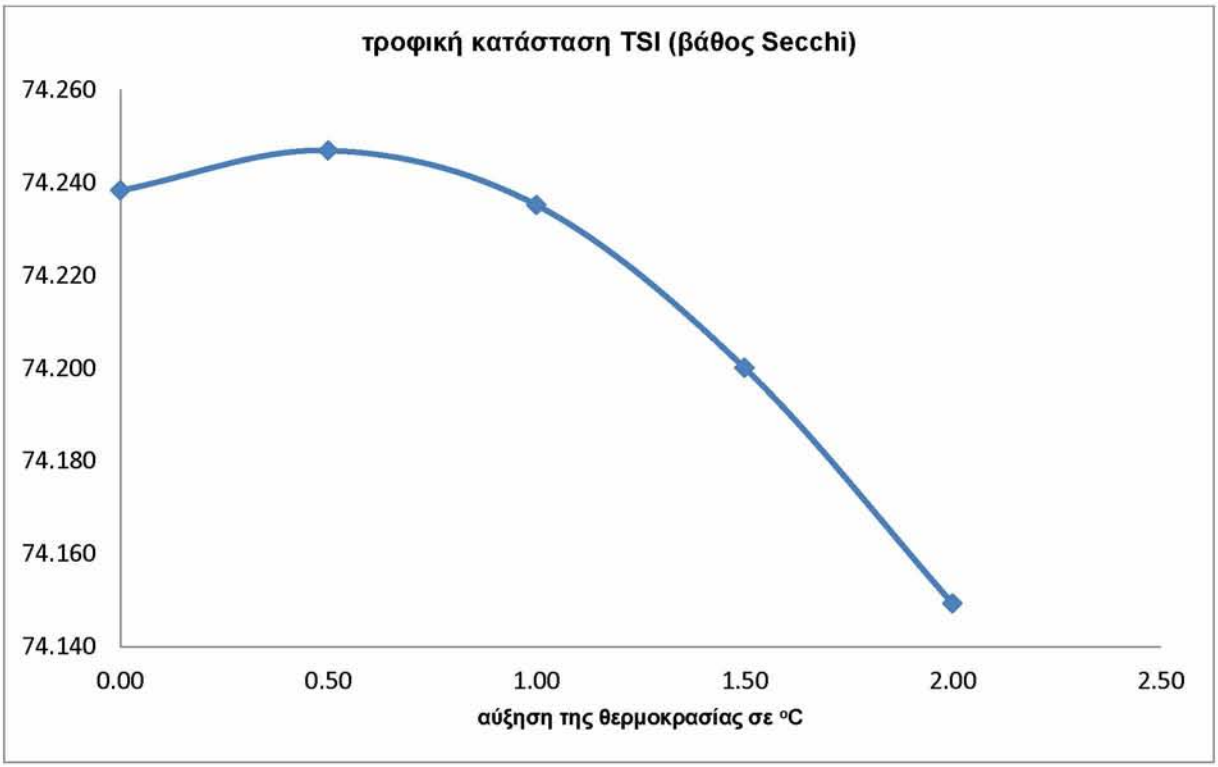


Διάγραμμα 8.30: μέσο θερινό επίπεδο TKN – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 8.31: μέσο θερινό επίπεδο αμμωνιακών ιόντων (NH_4) – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη



Διάγραμμα 8.32: μέσο θερινό επίπεδο τροφικής κατάστασης TSI(βάθος Secchi) – κλιματική αλλαγή, για μέση στάθμη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΧΕΔΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Στα κεφάλαια 5, 6 και 7 εξετάσθηκε η επίδραση του χρόνου παραμονής (μέσω της παροχής εισόδου- εξόδου), της φόρτισης αζώτου και φωσφόρου και της κάλυψης με περιοχές καλάμων. Αποδείχθηκε ότι κάθε παράγοντας ξεχωριστά αδυνατεί να βελτιώσει την μέση θερινή τροφική κατάσταση της λίμνης σε τέτοιο βαθμό ώστε η λίμνη να πέφτει κάτω από το όριο των 70 βαθμών TSI. Το παραπάνω όριο διακρίνει την κατηγορία της λίμνης από υπερευτροφική, που είναι, σε ευτροφική. Τους χειμερινούς μήνες η λίμνη για το μέσο βάθος των 3.5 m στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκεται σε ικανοποιητική ευτροφική κατάσταση τείνοντας ακόμη και προς την επιθυμητή κατηγορία της μεσοτροφικής.

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνώνται και προσομοιώνονται 24 σχέδια διαχείρισης που συνδυάζουν μέτρα που αφορούν σε όλους τους παράγοντες. Οι τιμές που επιλέχθηκαν ανταποκρίνονται σε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά επίπεδα, ώστε να αναδειχθεί ποιος είναι ο ελάχιστος απαραίτητος διαχειριστικός κόπος (όσον αφορά την οικονομία, την γεωργία και την εφαρμοσιμότητα). Στόχος είναι να επιτευχθεί καλή τροφική κατάσταση στη λίμνη, σύμφωνα με τις επιταγές της ευρωπαϊκής οδηγίας πλαίσιο 2000/60 για καλή κατάσταση των υδάτινων πόρων και φυσικά σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό της λίμνης Κάρλας ως οικοσύστημα Natura.

Τα σχέδια που διερευνώνται και προσομοιώνονται αφορούν σε μέση υδραυλική παροχή από 17 έως 20 mm/d (συμπεριλαμβανομένης της βροχόπτωσης), σε μέση φόρτιση Αζώτου (N) από 6 έως 8 g $N/m^2/d$ και περιοχή κάλυψης με καλάμους 20 και 30% (με επιφυλακτικά ακραία τιμή το 30% ως προς την εφαρμοσιμότητα) (Πίνακας 9.1). Οι εξεταζόμενες υδραυλικές παροχές συνάδουν με τις τιμές της αρχικής μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ για την κατασκευή του ταμιευτήρα της Κάρλας (ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημ. Έργων, Δ/νση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7), 1999). Οι εξεταζόμενες φορτίσεις θρεπτικών ανταποκρίνονται σε μείωση της τάξης του 20 με 40 % των σημερινών τιμών που εκτιμώνται (Κάγκαλου, κ.α., 2012). Οι εξεταζόμενες τιμές κάλυψης με περιοχές καλάμων, αποτελούν τιμές που συναντώνται, αρκετά σπάνια το 30 % σε ευρωπαϊκές λίμνες (Janse, 2004; Janse et al., 1993). Προτείνεται στη βιβλιογραφία ότι είναι δυνατόν να δημιουργηθούν υγροτοπικές εκτάσεις γύρω από μία λίμνη, επιθυμητής έκτασης, με ελεγχόμενη αυξομείωση της στάθμης της λίμνης. (Janse, et al., 2001).

Η λίμνη Κάρλα είναι μεγάλης έκτασης και άρα με μεγάλο ανάπτυγμα ανέμου. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3, αντίστοιχα μεγάλες λίμνες δεν έχουν μηχανισμούς υστέρησης, σε τόσο μεγάλο βαθμό, και οι όποιες αλλαγές στο υδάτινο σύστημα δημιουργούν άμεση ανταπόκριση στην τροφική κατάσταση, είτε βελτίωση είτε επιδείνωση (Janse, et al., 1997). Υπάρχει επιφύλαξη για την υστέρηση που μπορεί να προκαλέσει το «ιστορικό» του πυθμένα της λίμνης, ως προς την περιεκτικότητά του σε αποθηκευμένα θρεπτικά, αντικείμενο για το οποίο υπάρχει ελλιπής γνώση.

Τα διαχειριστικά σχέδια αφορούν όλα μέσο βάθος λίμνης 3.5 m, καθώς όπως αποδεικνύεται στα κεφάλαια 5, 6 και 7, χαμηλότερες στάθμες αποκλείουν την αναβάθμιση της λίμνης σε καλύτερη κατηγορία τροφικής κατάστασης. Οποιαδήποτε υψηλότερη στάθμη είναι εμφανές ότι θα επιφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα εξυγίανσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Πινακας 9.1: Διαχειριστικά σχέδια

σχέδιο διαχείρισης	υδραυλική παροχή (mm/d)	χρόνος παραμονής (d)	φόρτιση αζώτου (g $N/m^2/d$)	φόρτιση φωσφόρου (g $P/m^2/d$)	κάλυψη με περιοχές καλάμων (%)
A1	17	206	6	0.6	20
A2	18	194	6	0.6	20
A3	19	184	6	0.6	20
A4	20	175	6	0.6	20
B1	17	206	7	0.7	20
B2	18	194	7	0.7	20
B3	19	184	7	0.7	20
B4	20	175	7	0.7	20
C1	17	206	8	0.8	20
C2	18	194	8	0.8	20
C3	19	184	8	0.8	20
C4	20	175	8	0.8	20
D1	17	206	6	0.6	30
D2	18	194	6	0.6	30
D3	19	184	6	0.6	30
D4	20	175	6	0.6	30
E1	17	206	7	0.7	30
E2	18	194	7	0.7	30
E3	19	184	7	0.7	30
E4	20	175	7	0.7	30
F1	17	206	8	0.8	30
F2	18	194	8	0.8	30
F3	19	184	8	0.8	30
F4	20	175	8	0.8	30

Τα σχέδια διαχείρισης όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των παραγράφων που ακολουθούν εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Είναι εφικτή σχεδόν σε όλα η αναβάθμιση της τροφικής κατάστασης από υπερευτροφική σε ευτροφική και μάλιστα σε χαμηλά επίπεδα ευτροφικής για τους χειμερινούς μήνες. Για τους δυσμενείς θερινούς μήνες, μόνο 4 σενάρια διαχείρισης επιτυγχάνουν τον πρωταρχικό στόχο, τα σενάρια A3, A4, D3 και D4.

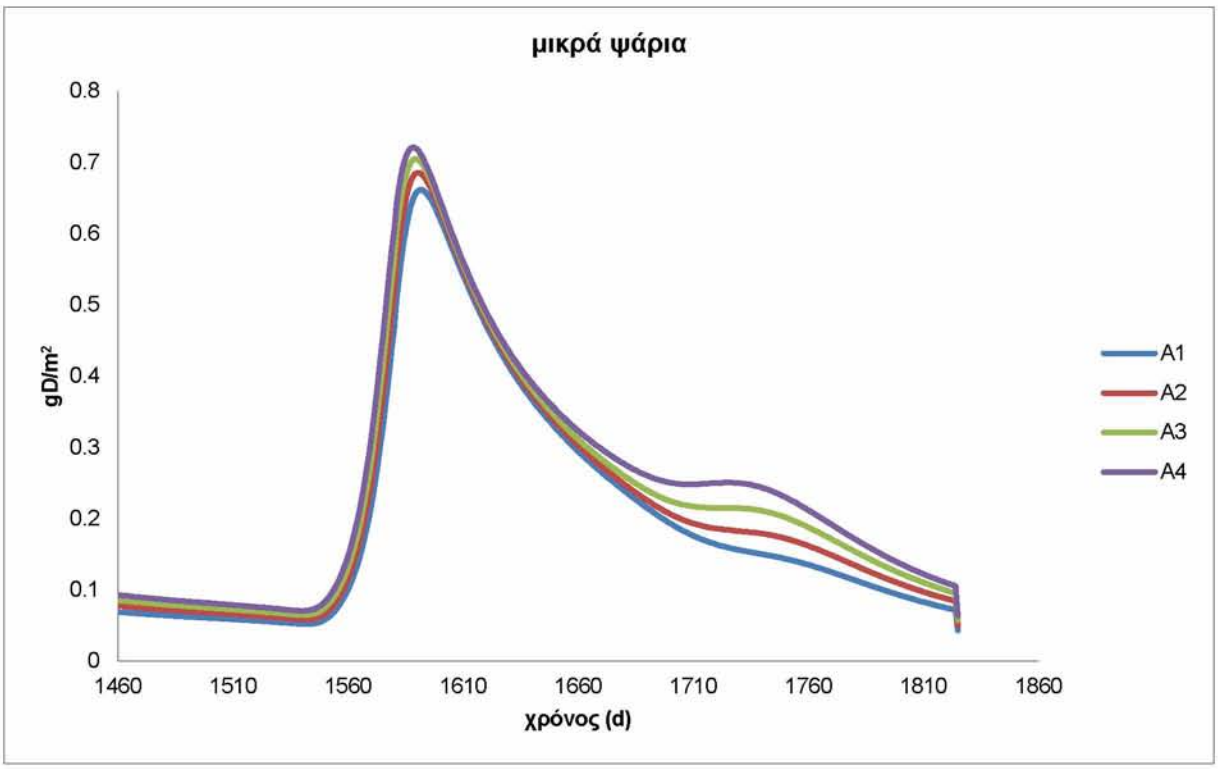
Τα συνολικά ψάρια κυμαίνονται για όλα τα σενάρια διαχείρισης από 0.6 έως 1.8 g D/m^2 με κύρια μάζα τους το καλοκαίρι να είναι τα μικρά ψάρια, ενώ το χειμώνα τα μεγάλα ψάρια. Τα αρπακτικά ψάρια αποτελούν πάντα μικρή ποσότητα.

Η βυθισμένη βλάστηση διατηρεί για όλα τα σχέδια διαχείρισης σχεδόν την ίδια καμπύλη με μέσο θερινό επίπεδο, τα 0.18 g D/ m^2 και μέσο χειμερινό τα 0.04 g D/ m^2. Το διαλυμένο οξυγόνο, επίσης ακολουθεί ταυτόσημη καμπύλη, με μέση θερινή τιμή 8 mg O_2/ l και μέση χειμερινή τιμή 14 mg O_2 /l. Το βάθος Secchi κυμαίνεται μεταξύ 0.4 m το καλοκαίρι και 1 m τον χειμώνα. Η χλωροφύλλη-α κυμαίνεται μεταξύ 90 mg/m^3 το καλοκαίρι και 10 mg/m^3 το ελάχιστο την άνοιξη. Αποτελείται, δε, η κύρια μάζα της από κυανοβακτήρια το καλοκαίρι και από διάτομα το χειμώνα με δύο τοπικά μέγιστα που δημιουργούν οι δύο ομάδες.

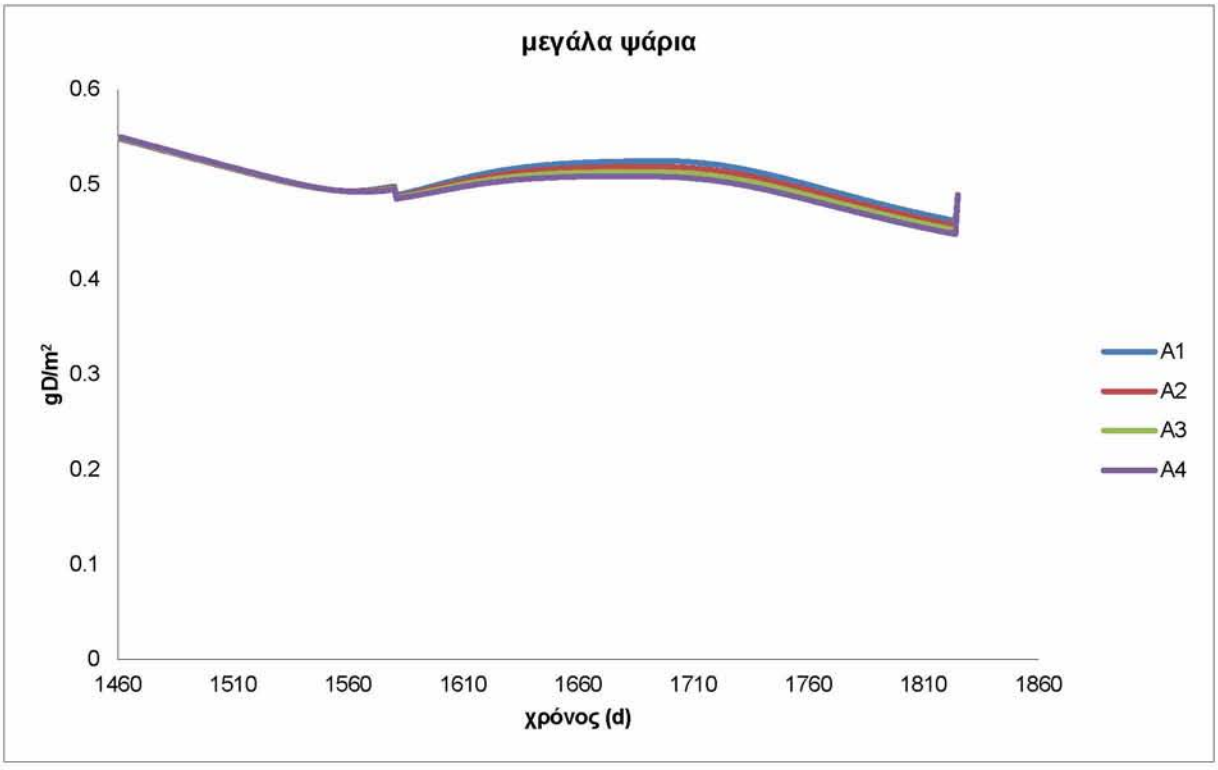
Τα φωσφορικά ιόντα κυμαίνονται από 0.2 g P/ m^3 έως 0.6 g P/ m^3, τα νιτρικά ιόντα από 0.3 g N/ m^3 έως 0.6 g N/ m^3, το οργανικό άζωτο από 0.2 g N/ m^3 έως 0.7 g N/ m^3 και τα αμμωνιακά ιόντα από 0,15 g N/ m^3 έως 0,45 g N/ m^3.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.1 Σχέδια διαχείρισης Α

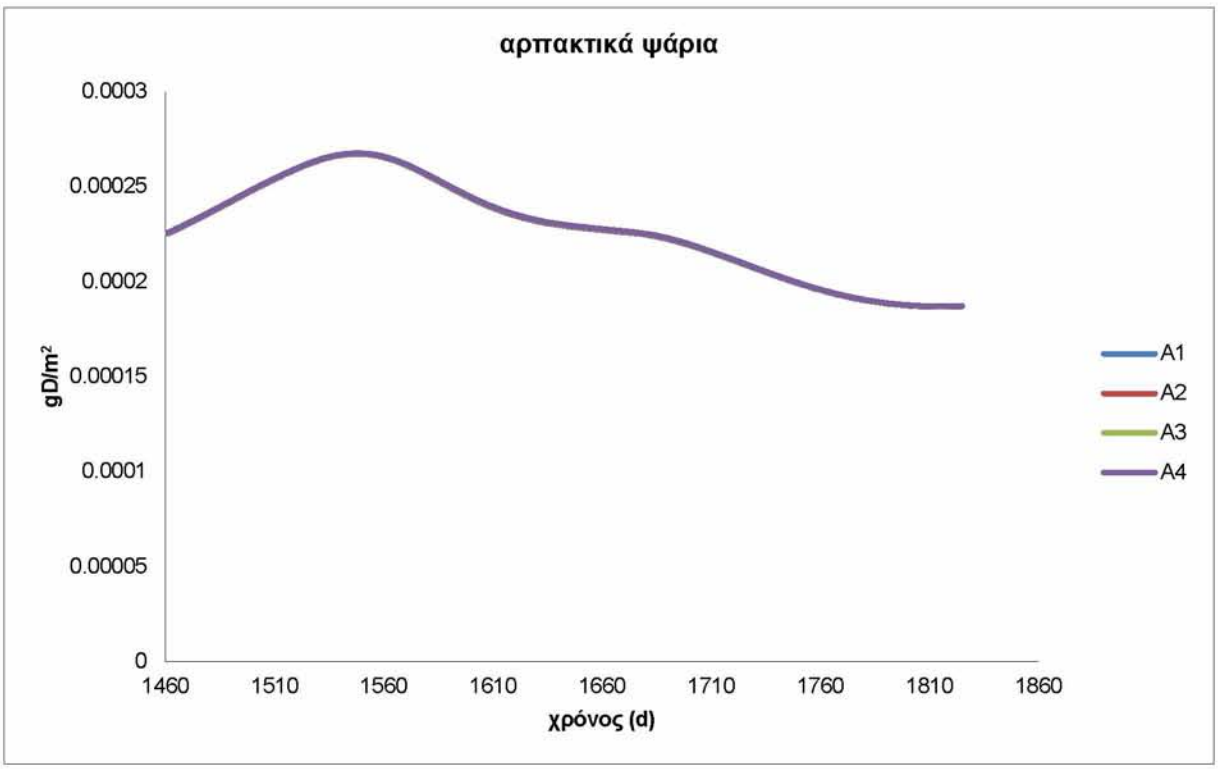


Διάγραμμα 9.96 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

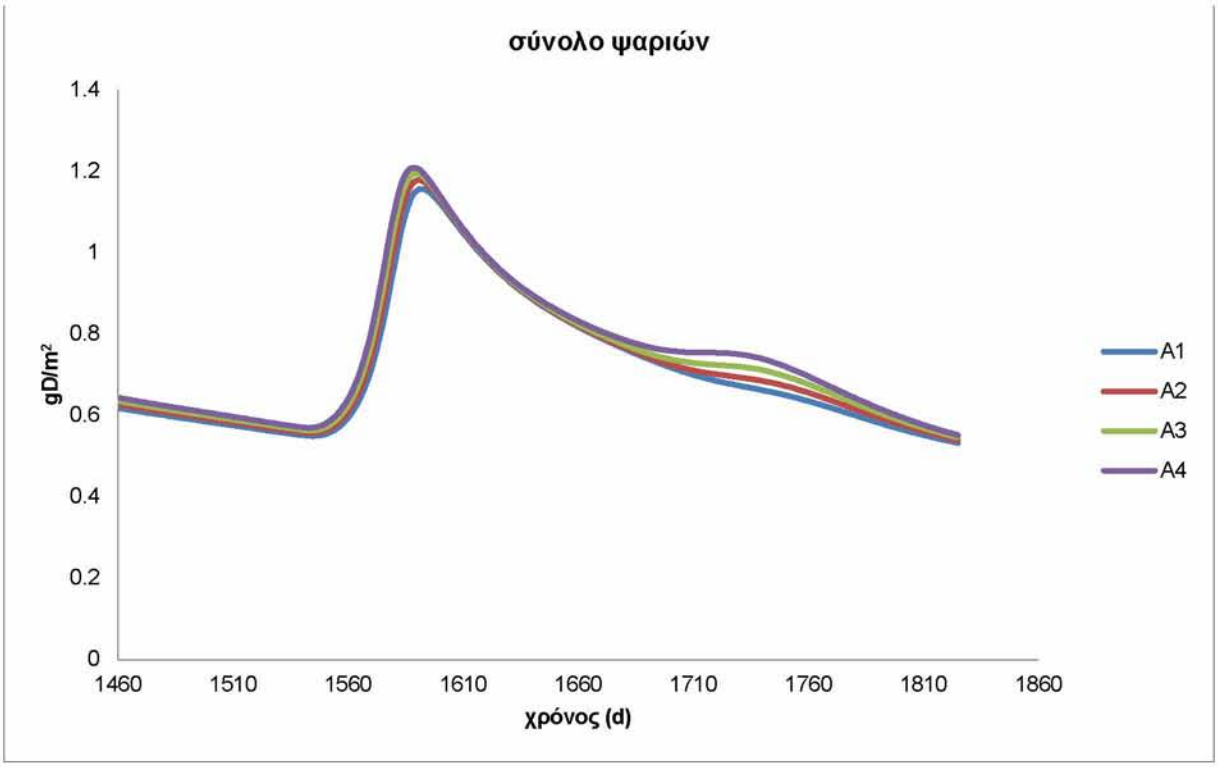


Διάγραμμα 9.2 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

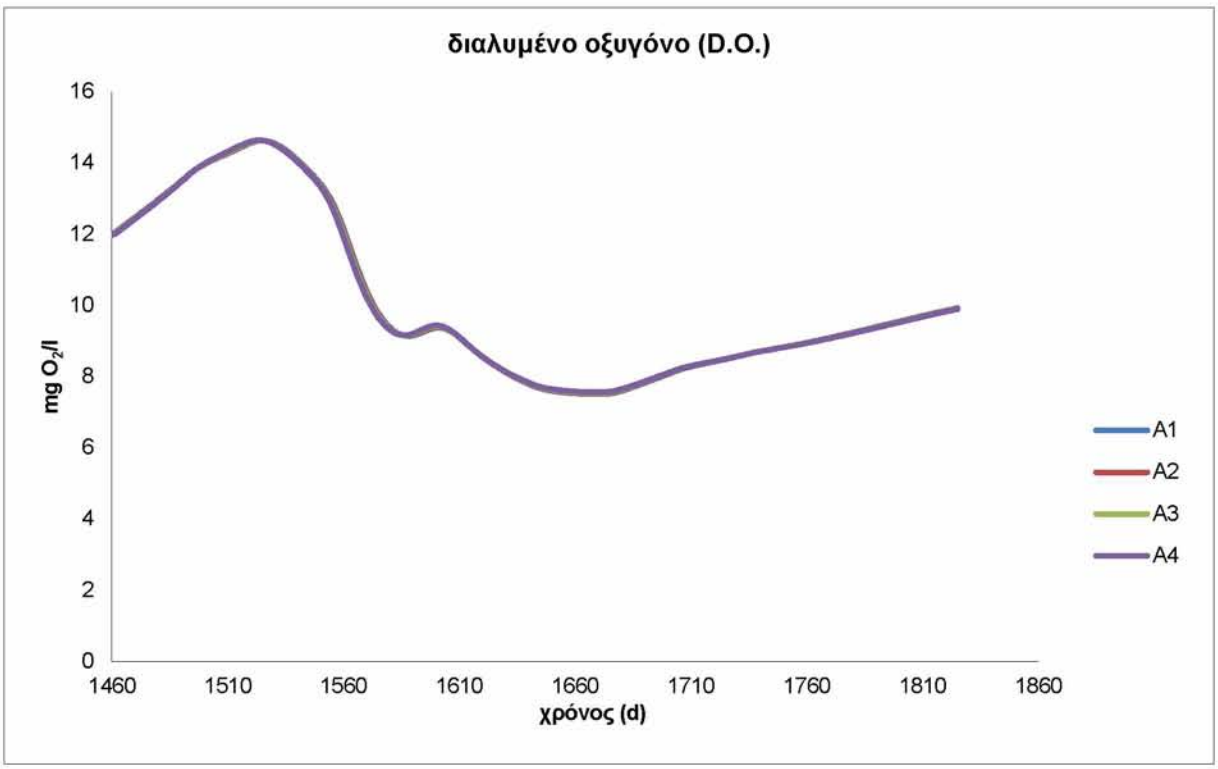


Διάγραμμα 9.97: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για για τα σχέδια διαχείρισης Α

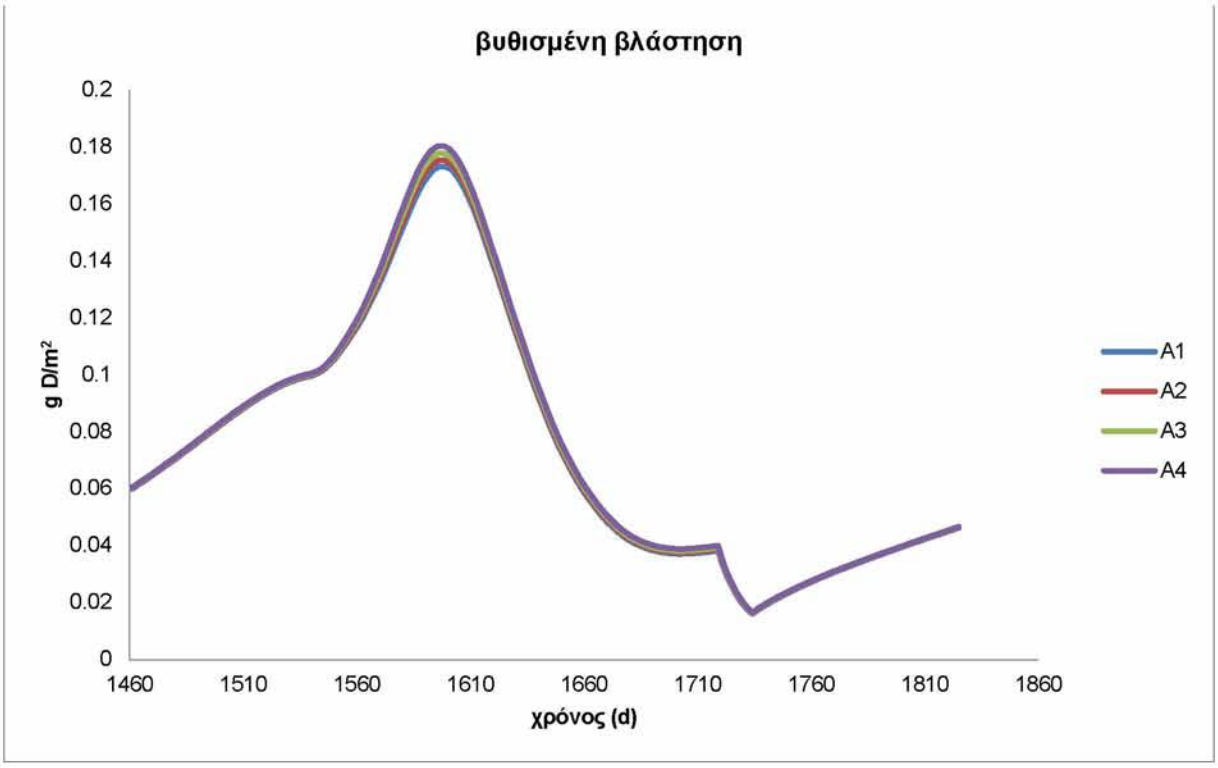


Διάγραμμα 9.98: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

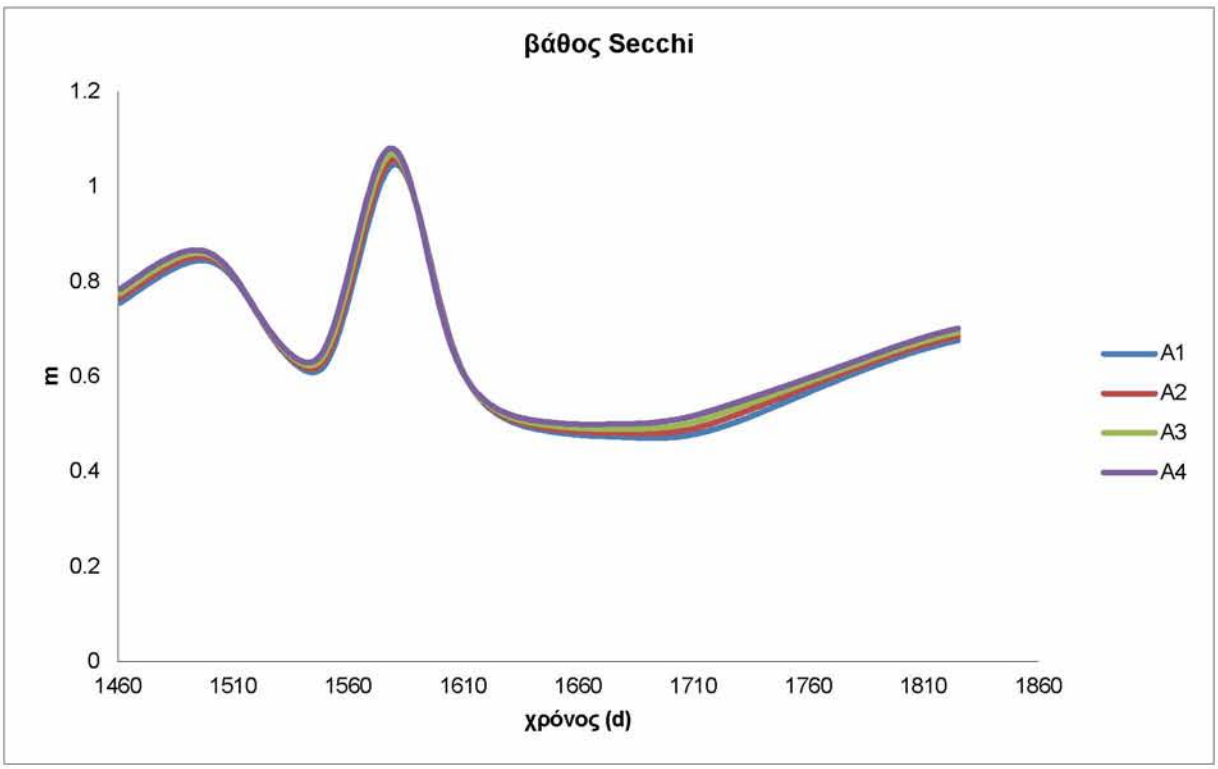


Διάγραμμα 9.99: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

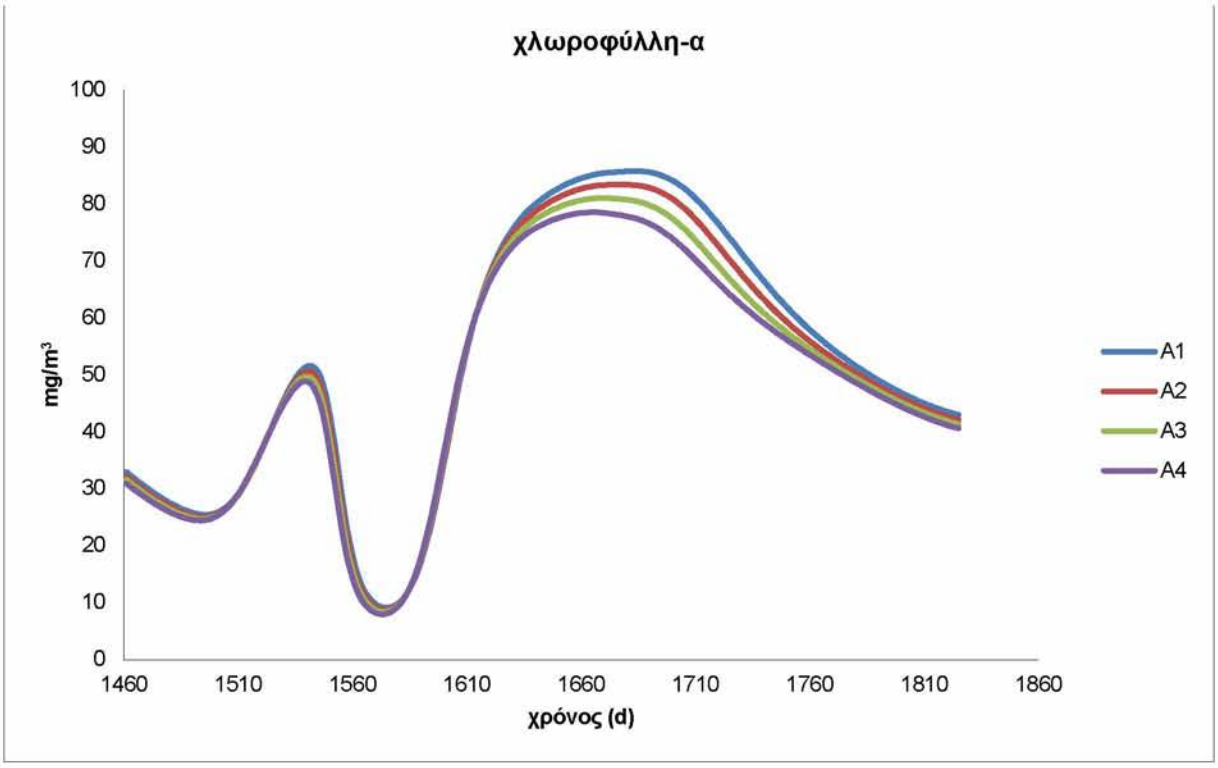


Διάγραμμα 9.100: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

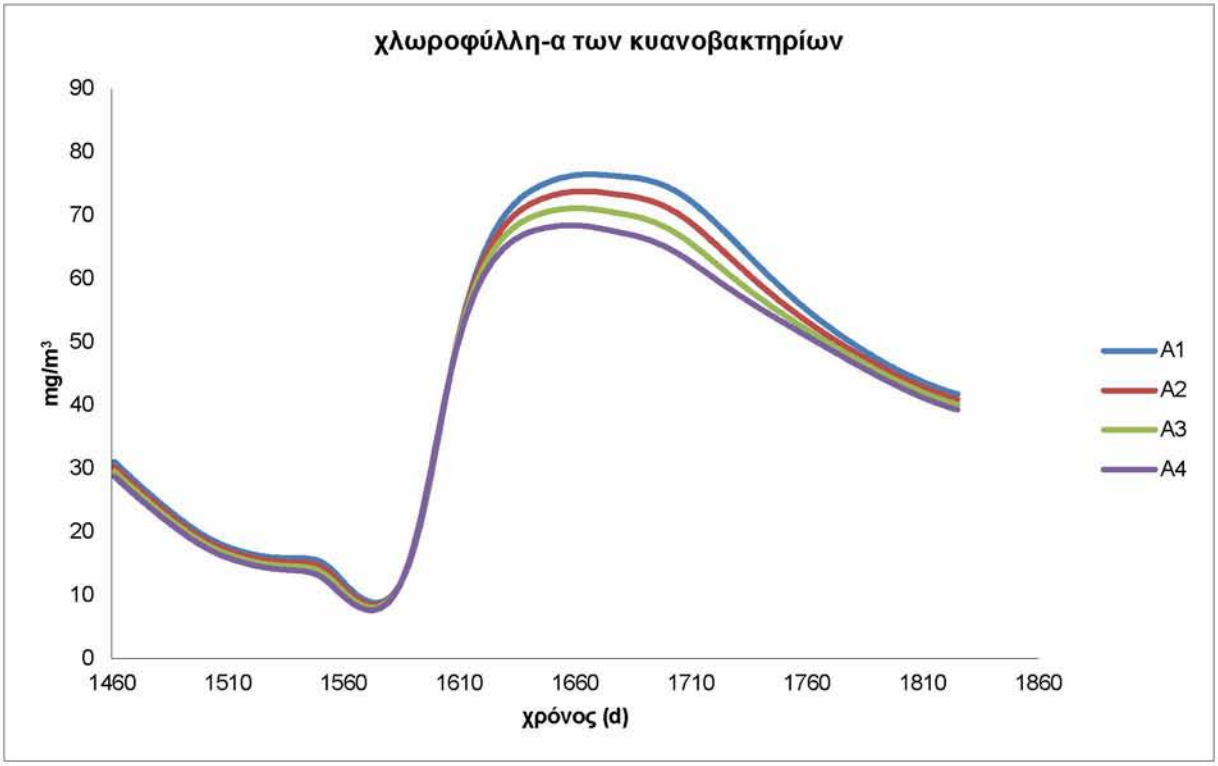


Διάγραμμα 9.101: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

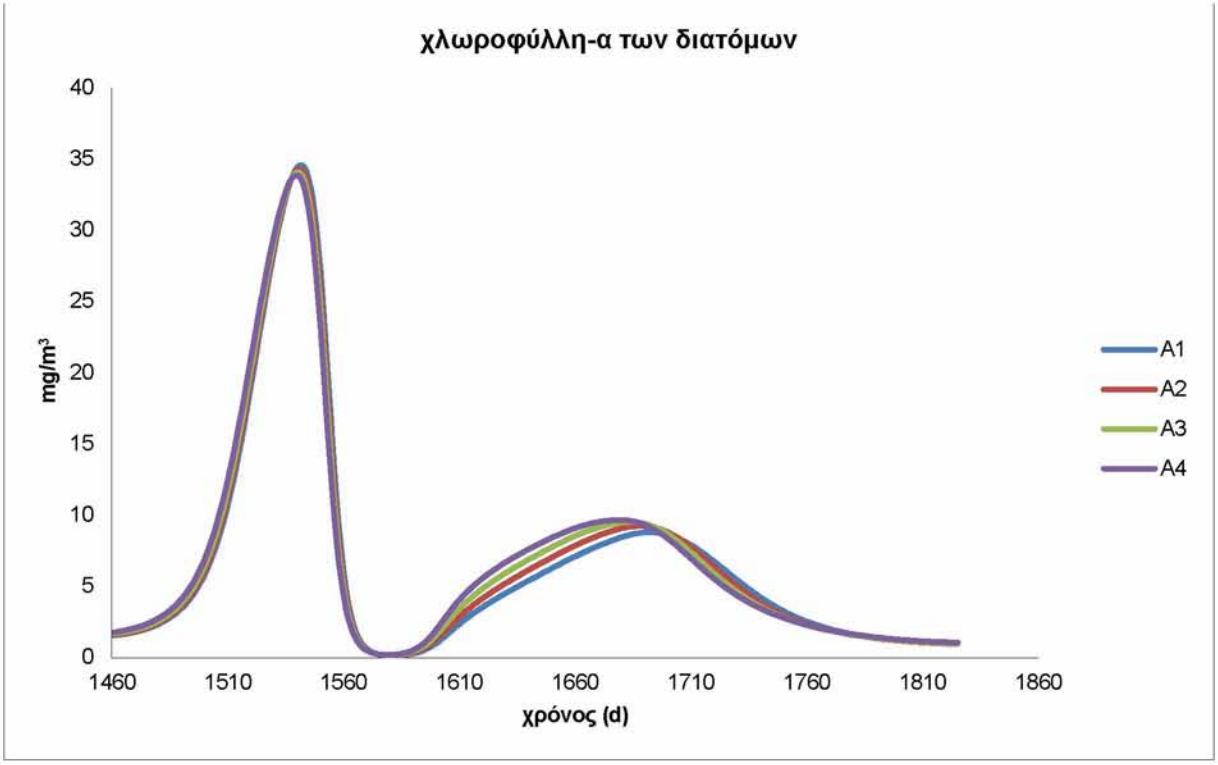


Διάγραμμα 9.102: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

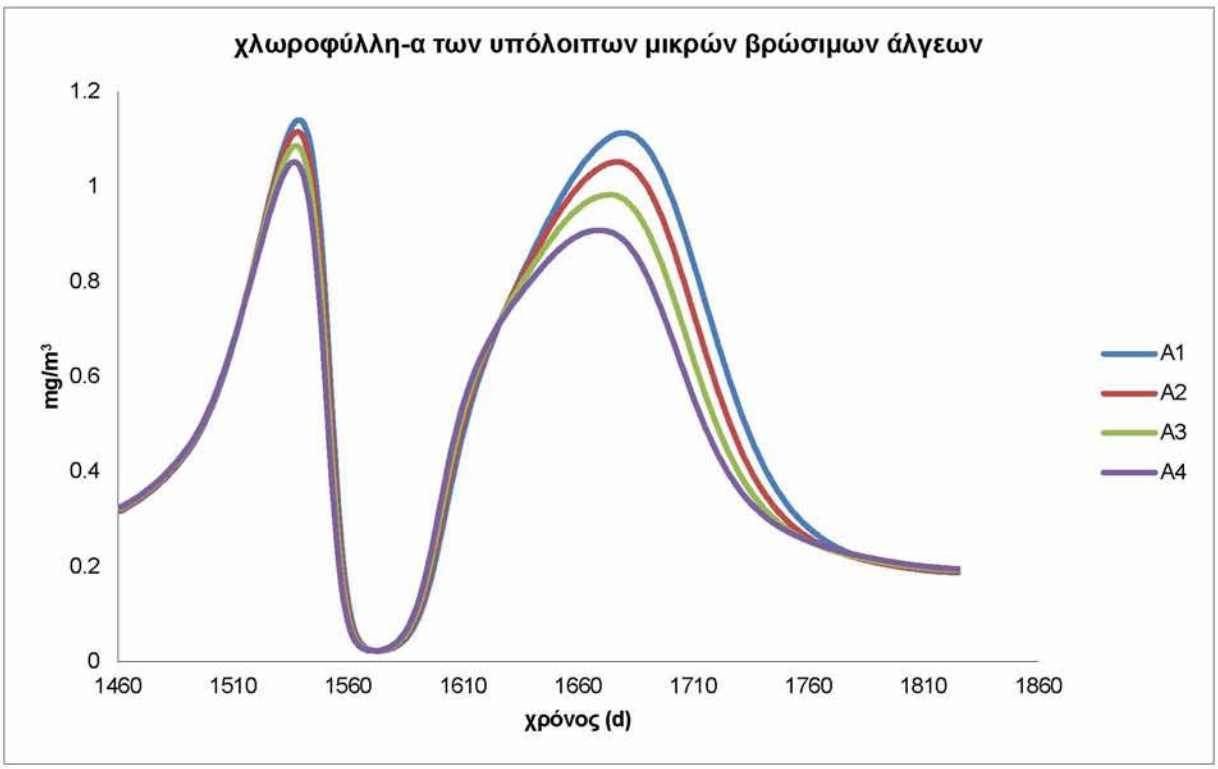


Διάγραμμα 9.103: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

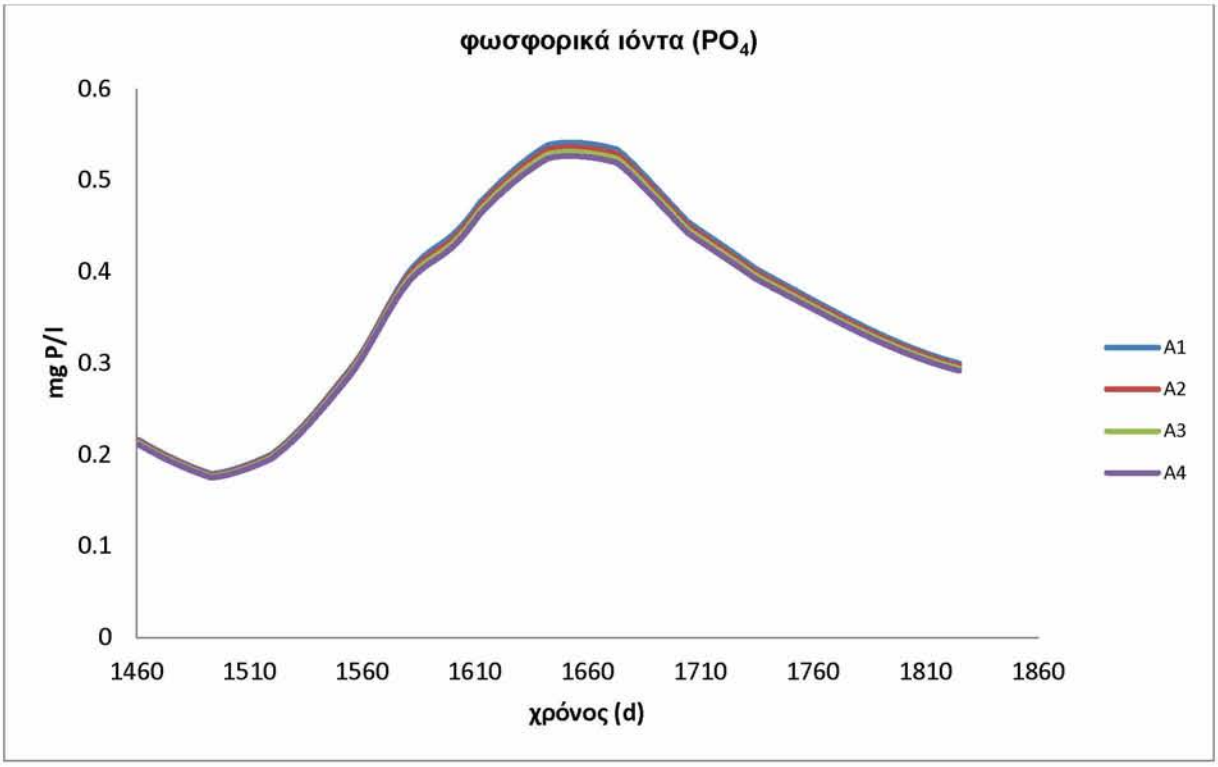


Διάγραμμα 9.104: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

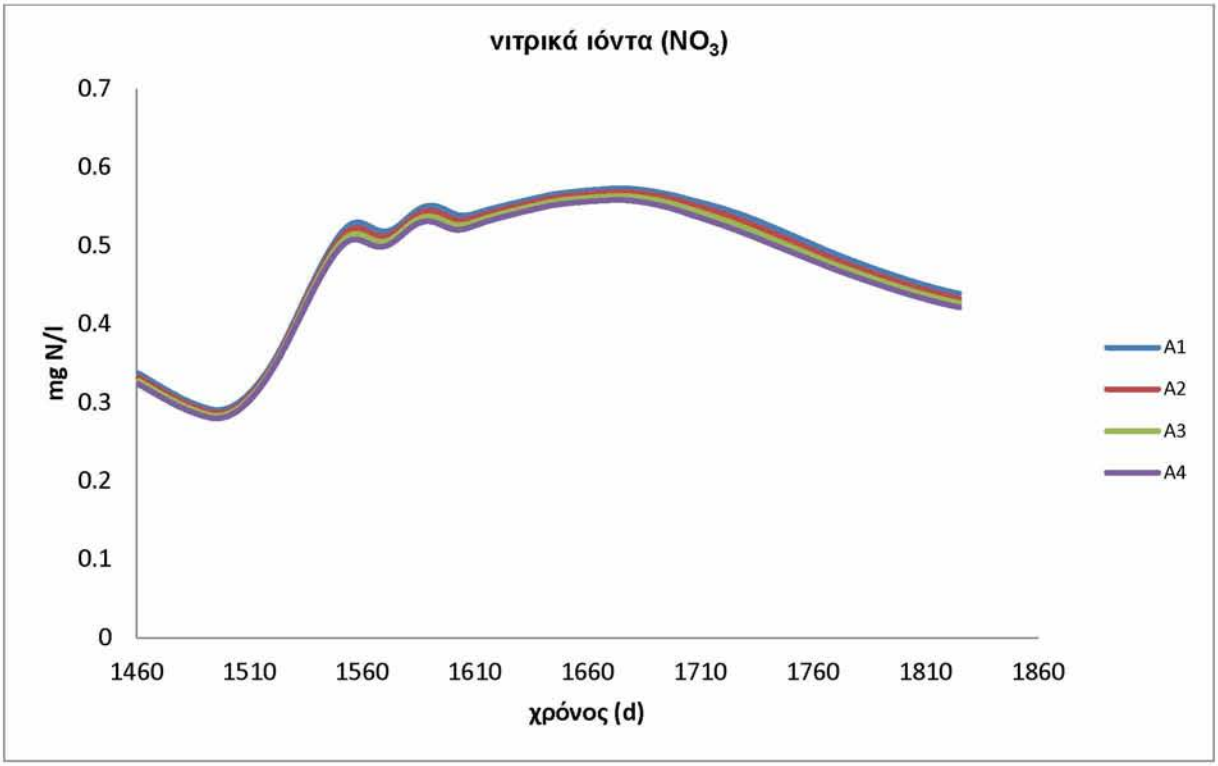


Διάγραμμα 9.105: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για τα σχέδια διαχείρισης Α

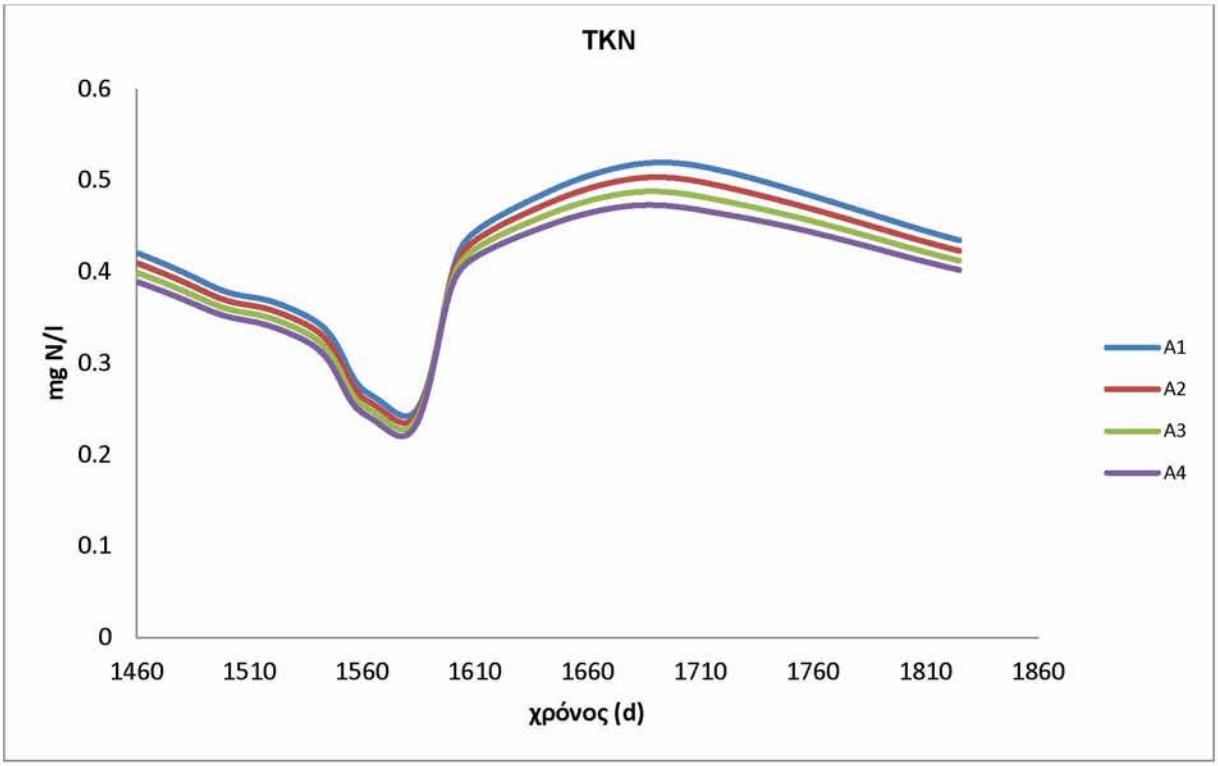


Διάγραμμα 9.106: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

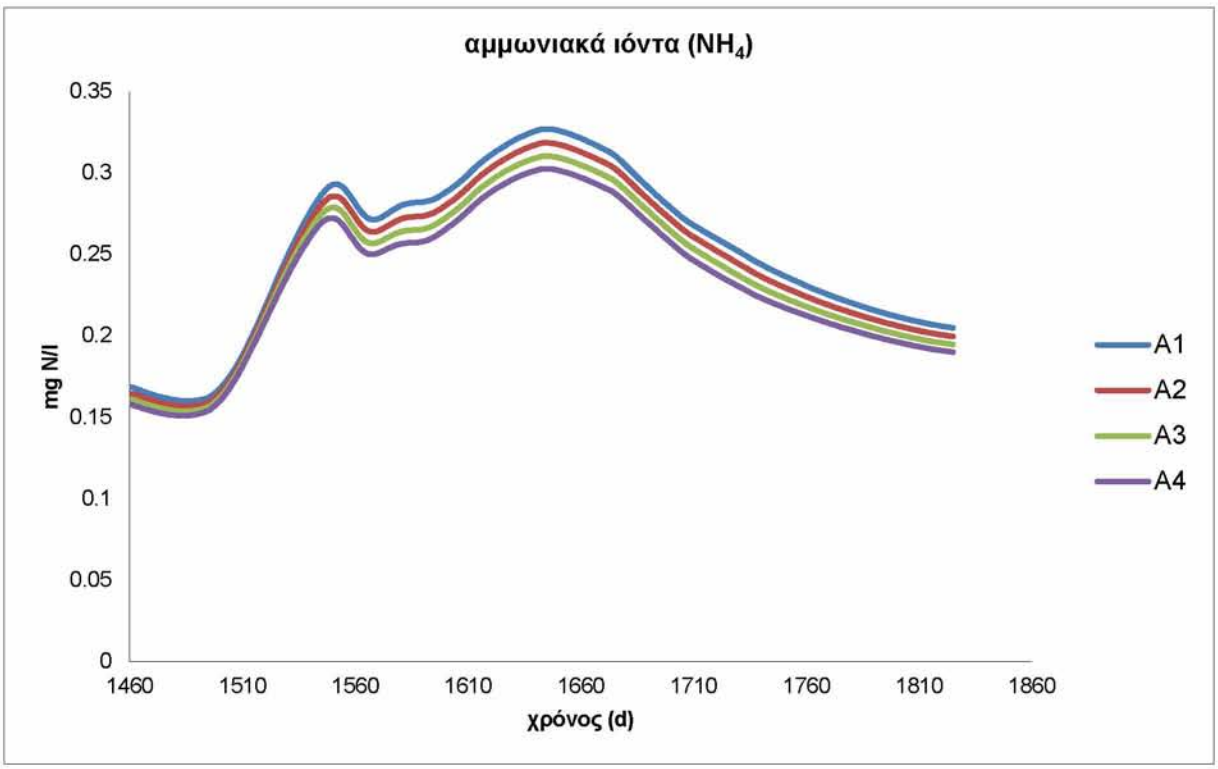


Διάγραμμα 9.107: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

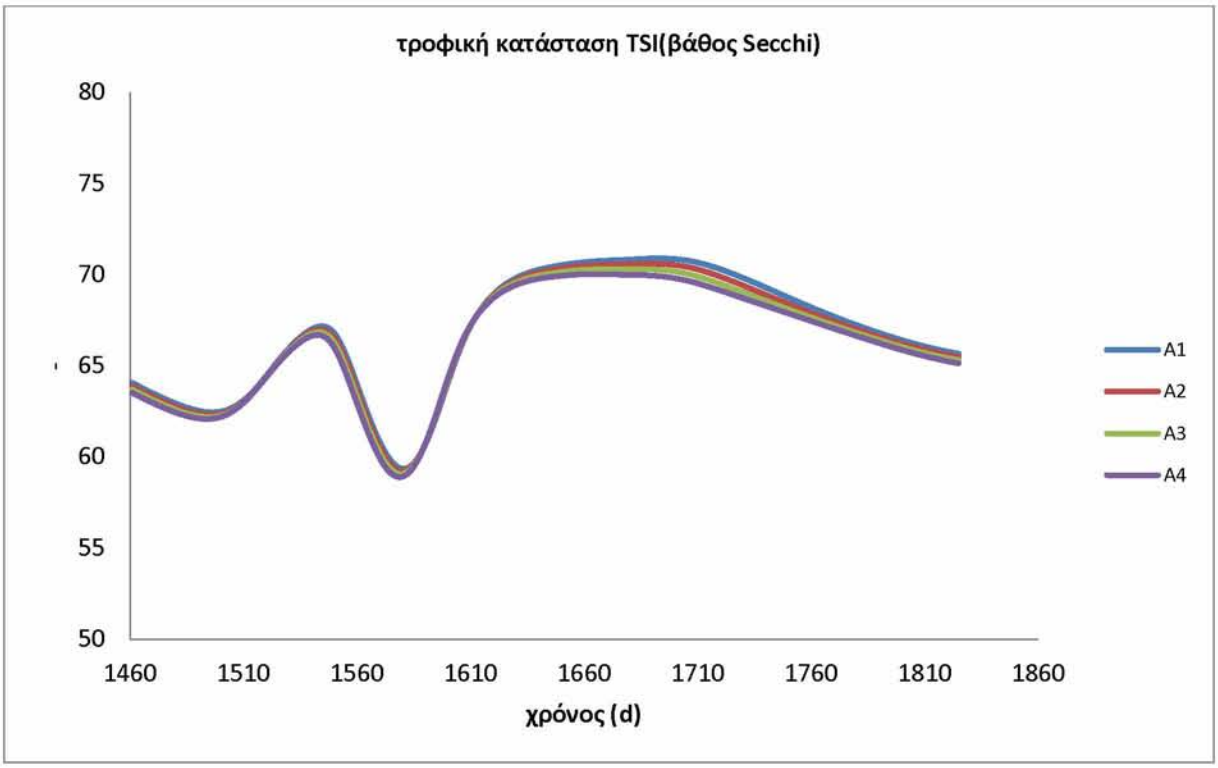


Διάγραμμα 9.108: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Α

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



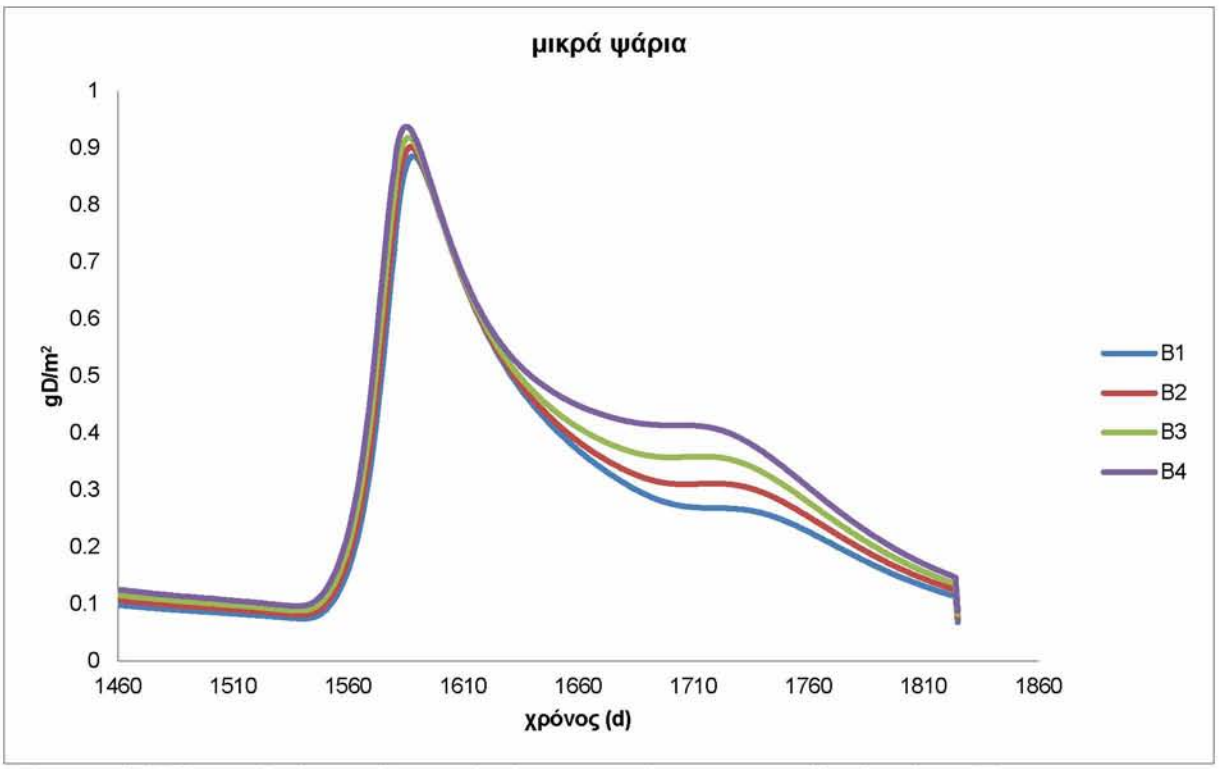
Διάγραμμα 9.109: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης A



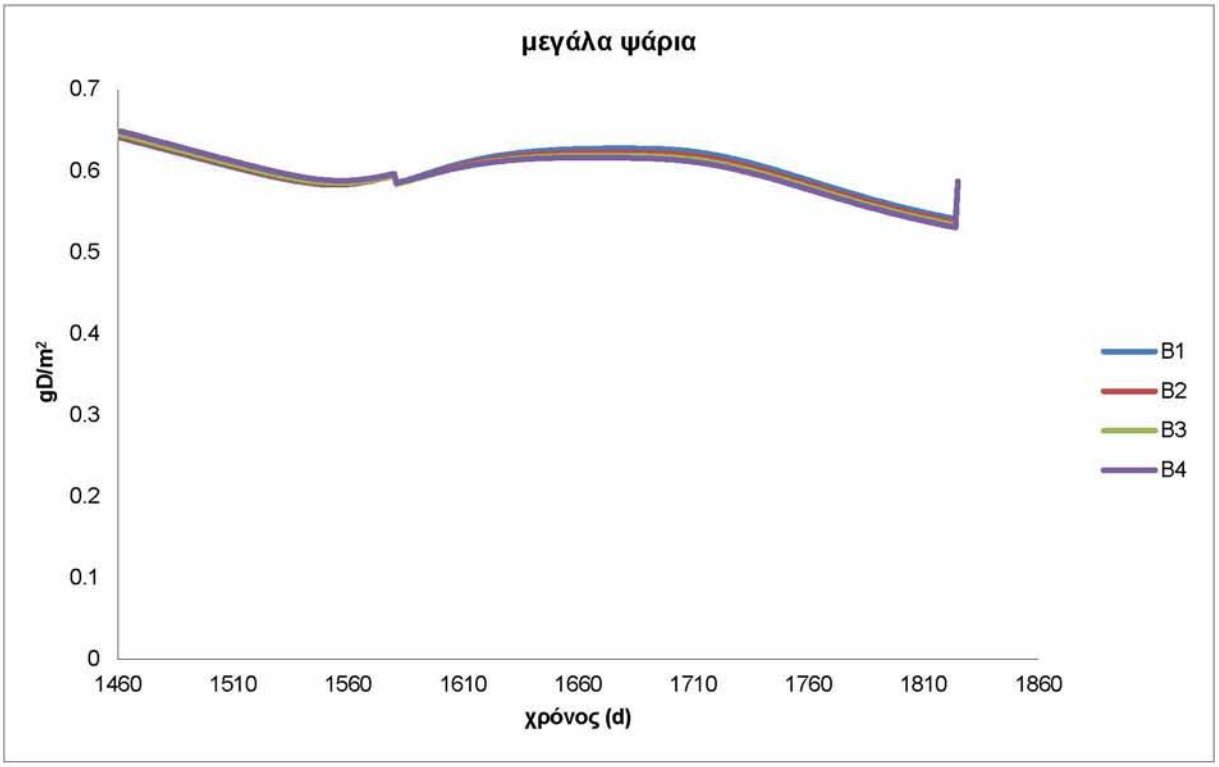
Διάγραμμα 9.110: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης A

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.2 Σχέδια διαχείρισης B

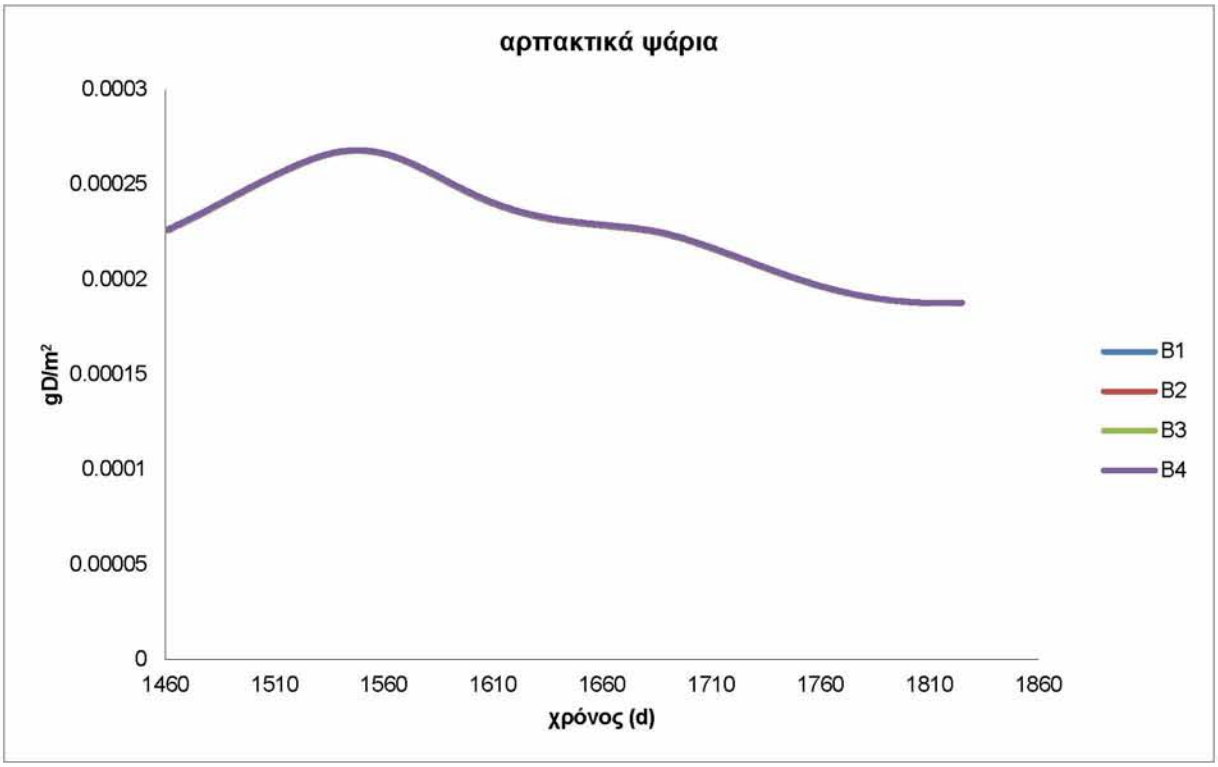


Διάγραμμα 9.1117 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

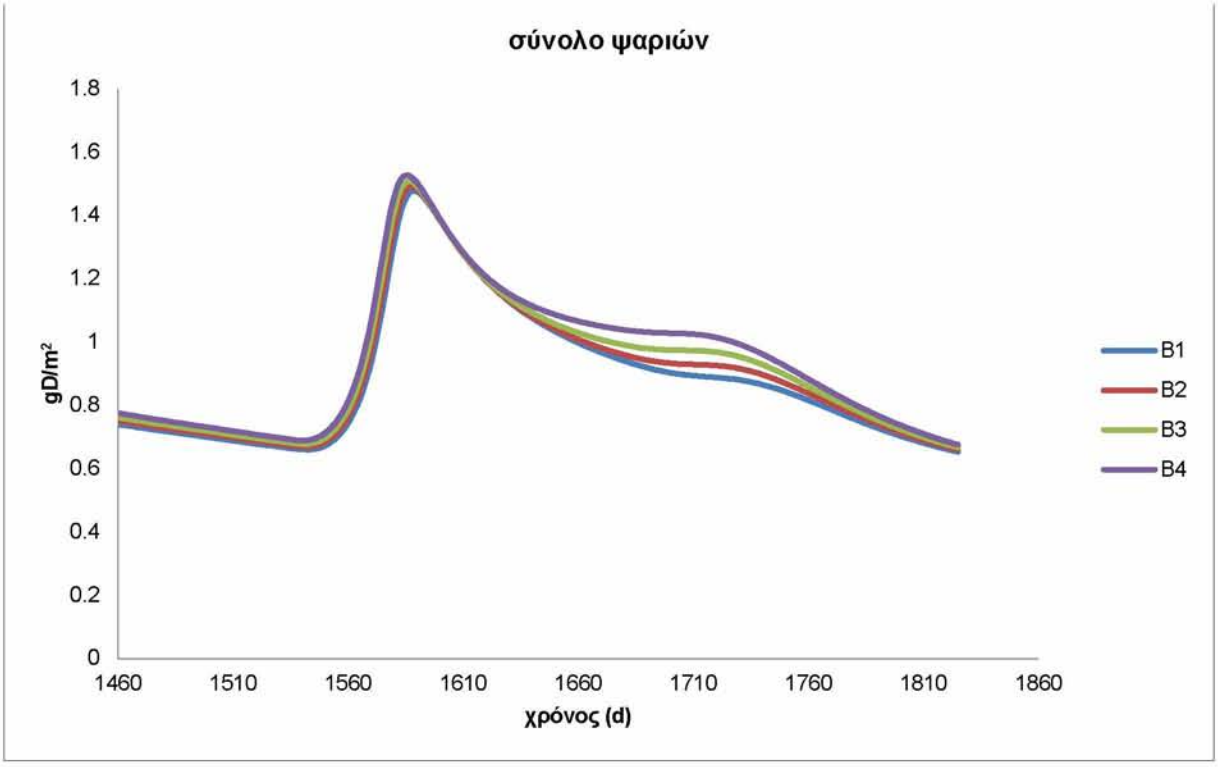


Διάγραμμα 9.18 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

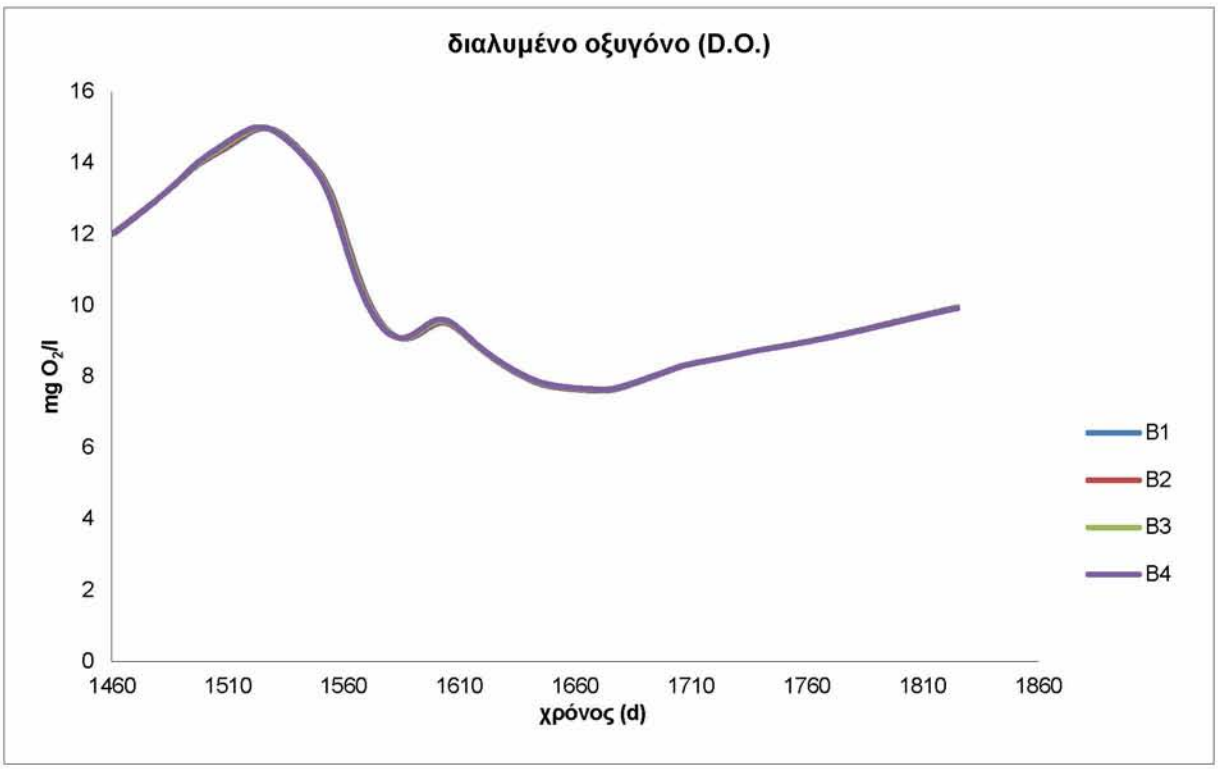


Διάγραμμα 9.19: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

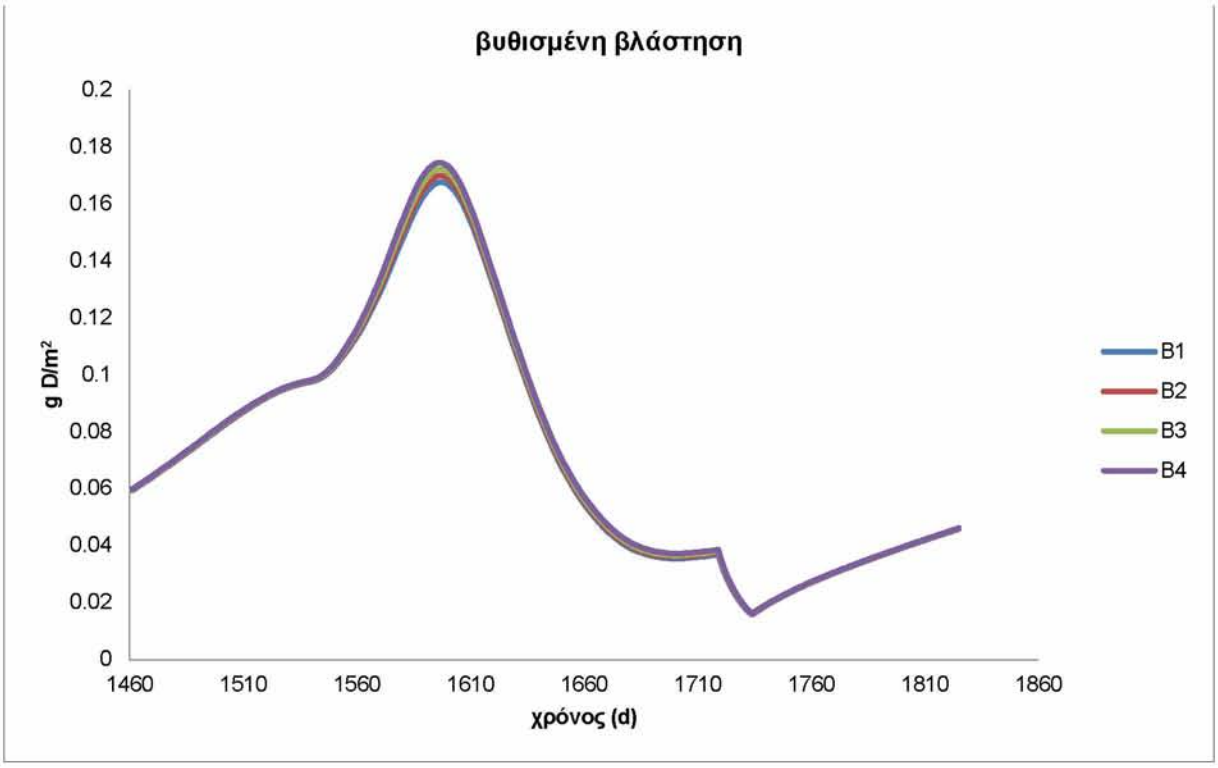


Διάγραμμα 9.20: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

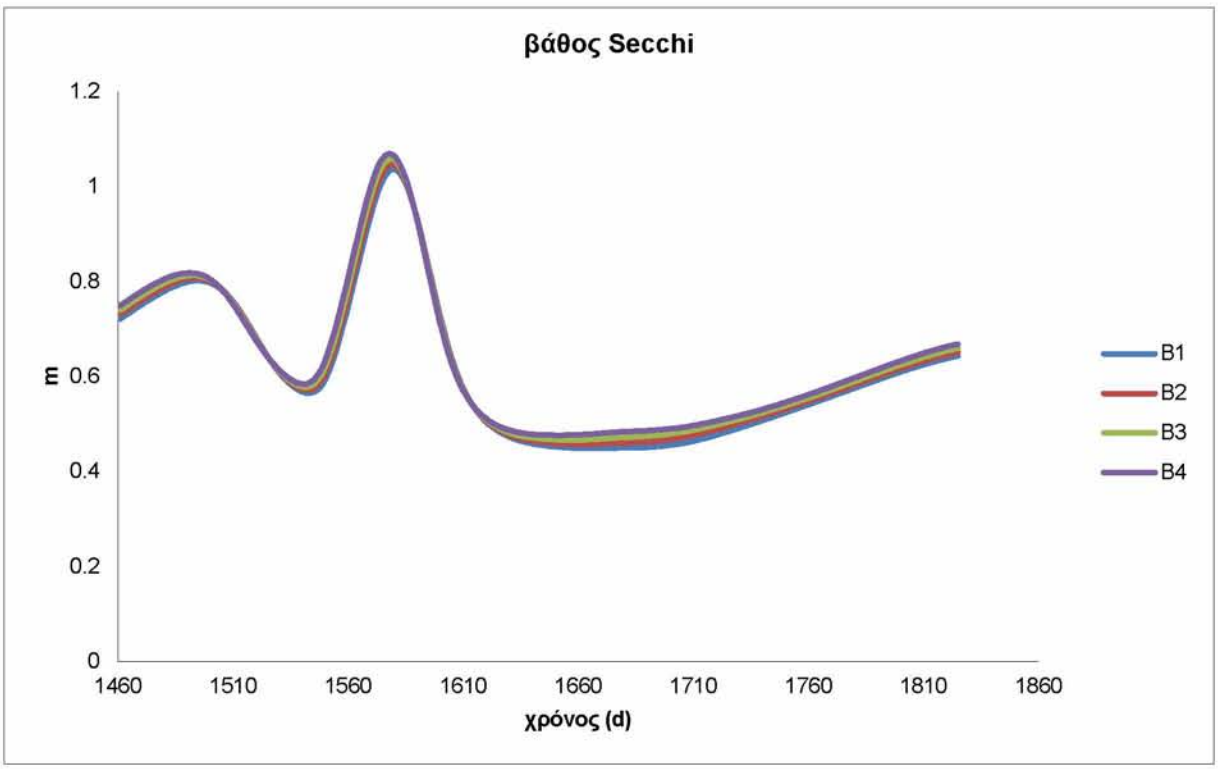


Διάγραμμα 9.21: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Β

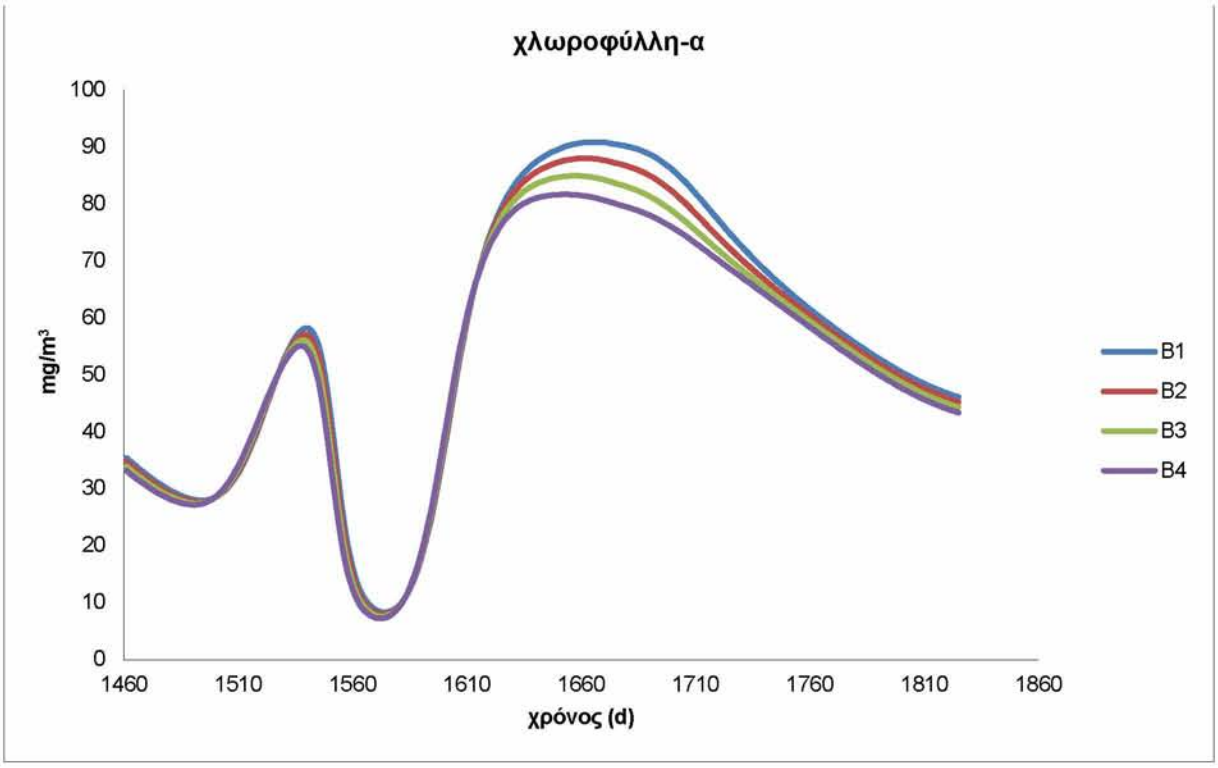


Διάγραμμα 9.22: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Β

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

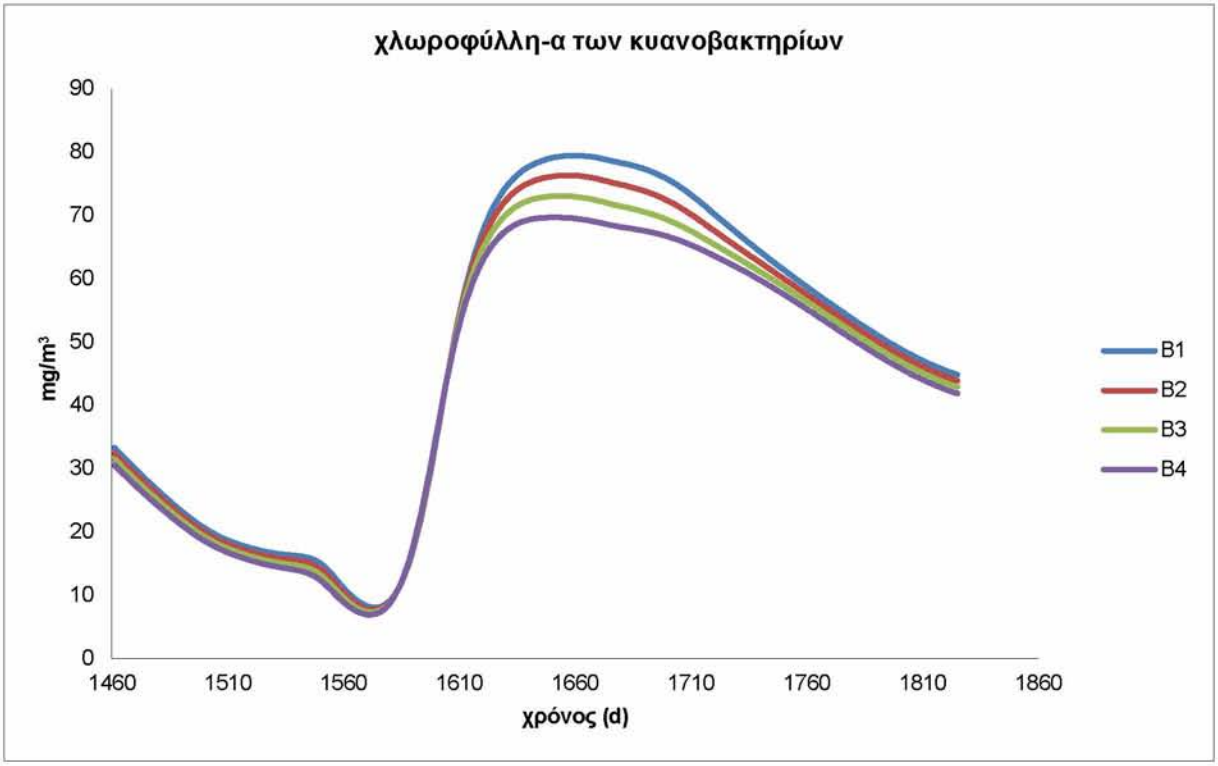


Διάγραμμα 9.23: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

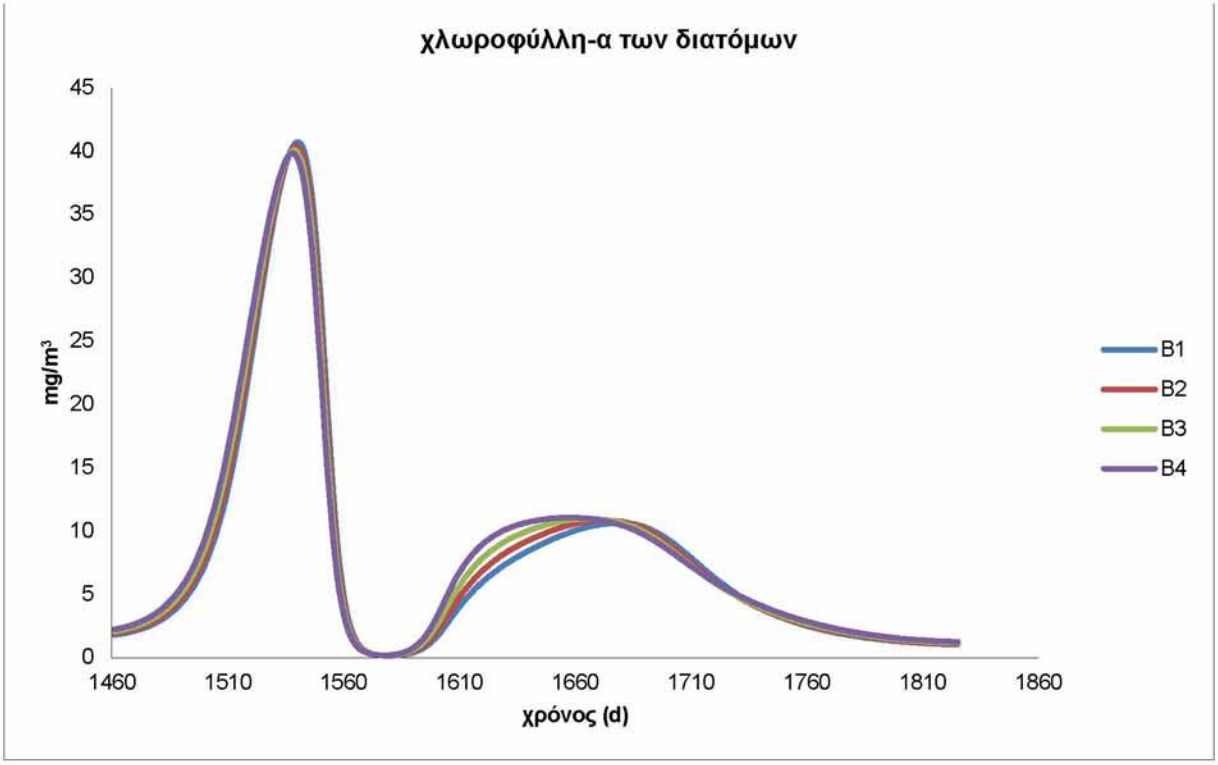


Διάγραμμα 9.24: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

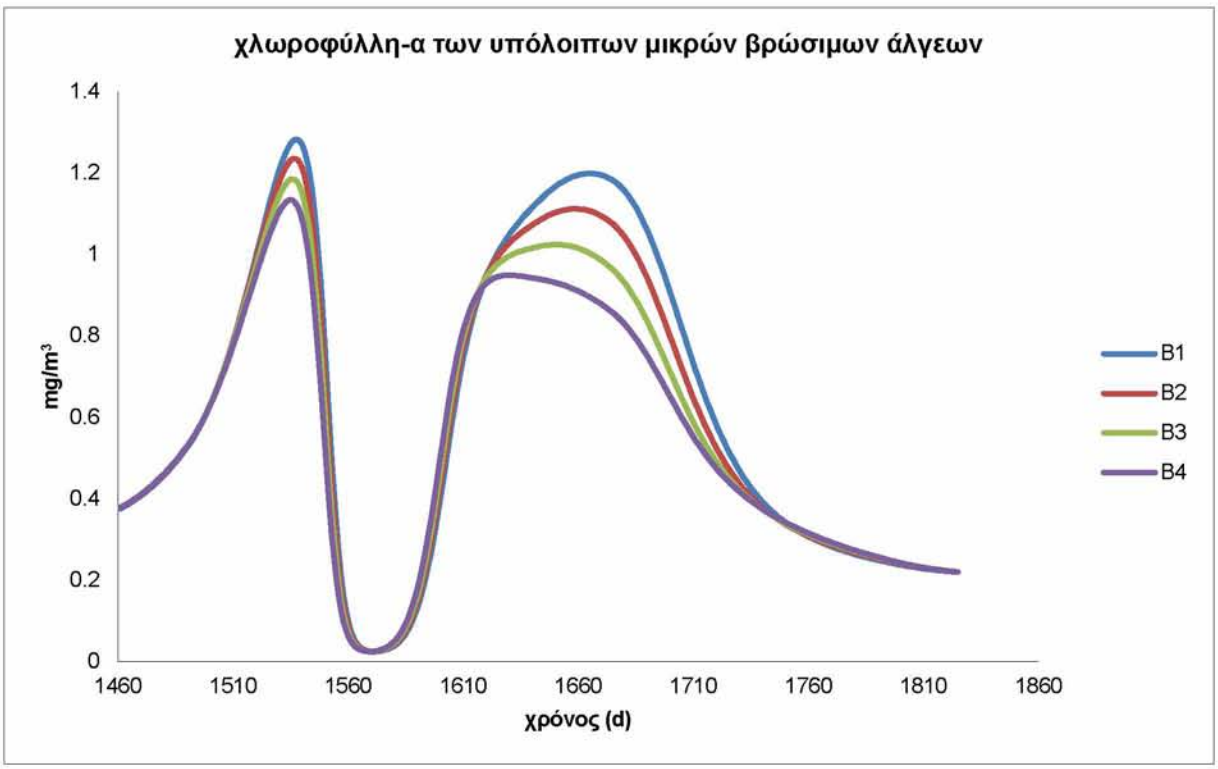


Διάγραμμα 9.25: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Β

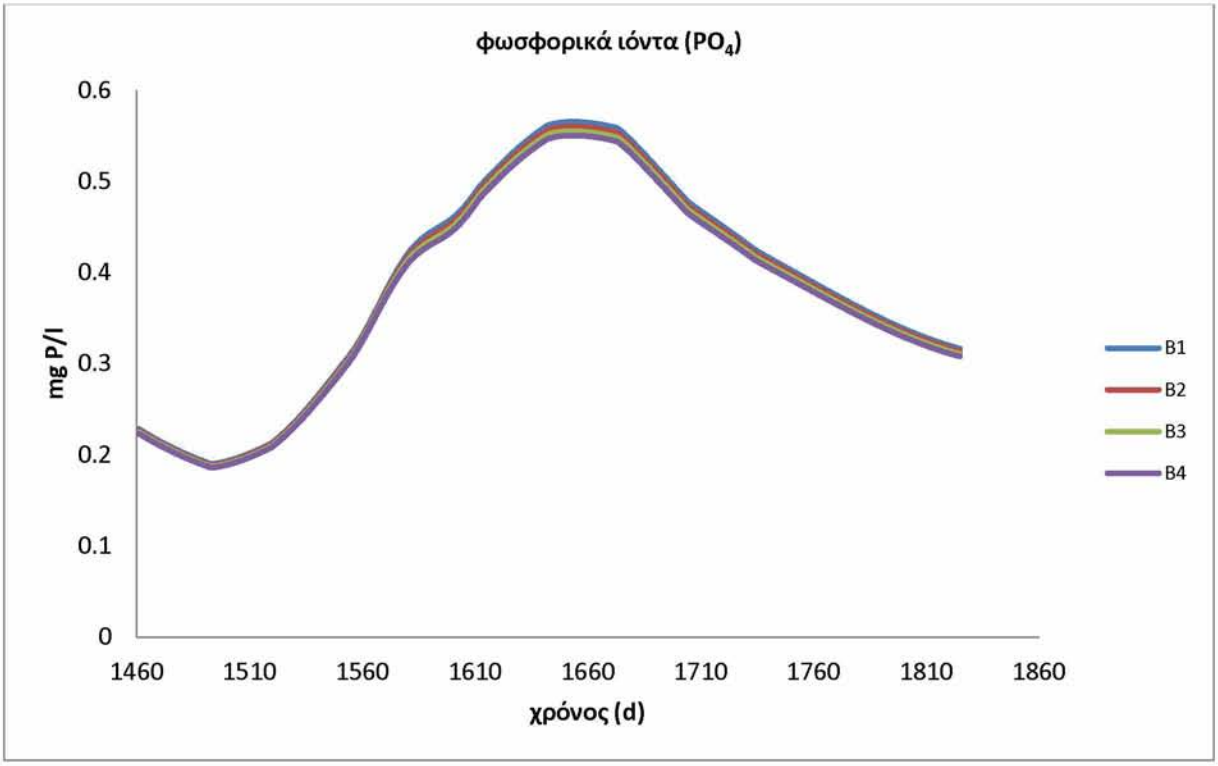


Διάγραμμα 9.26: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Β

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

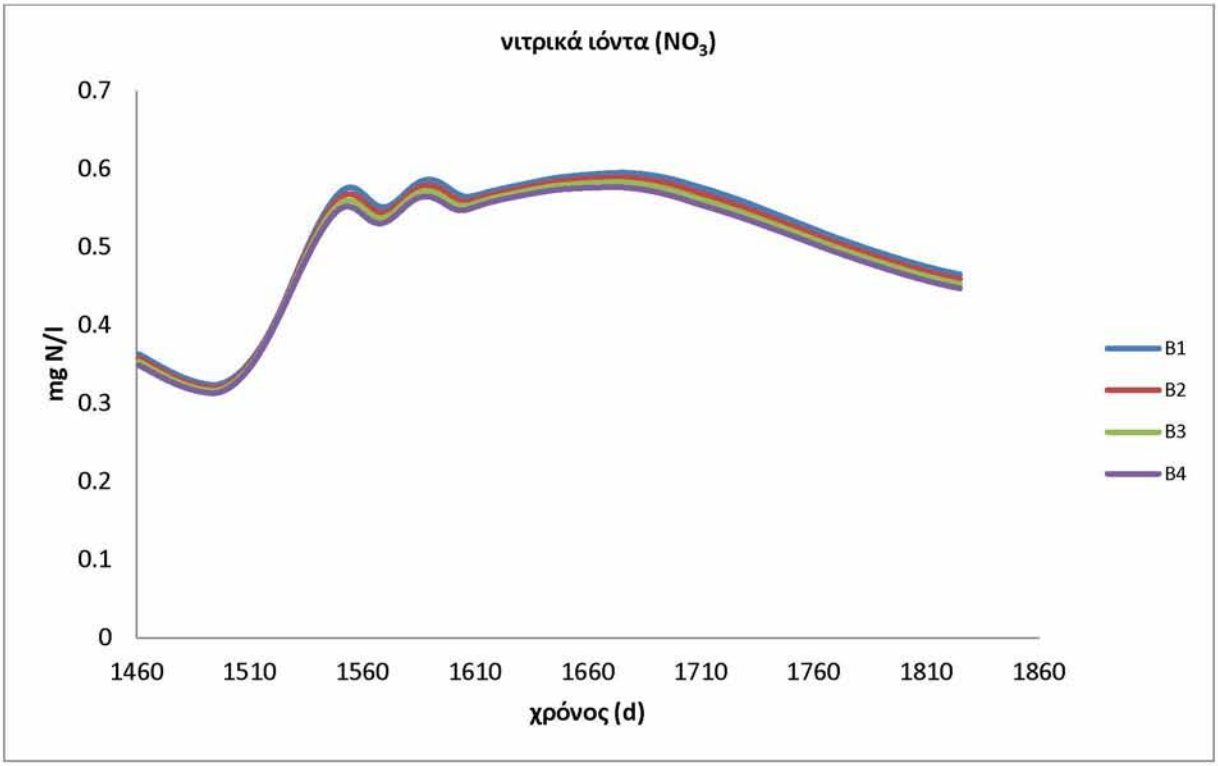


Διάγραμμα 9.27: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Β

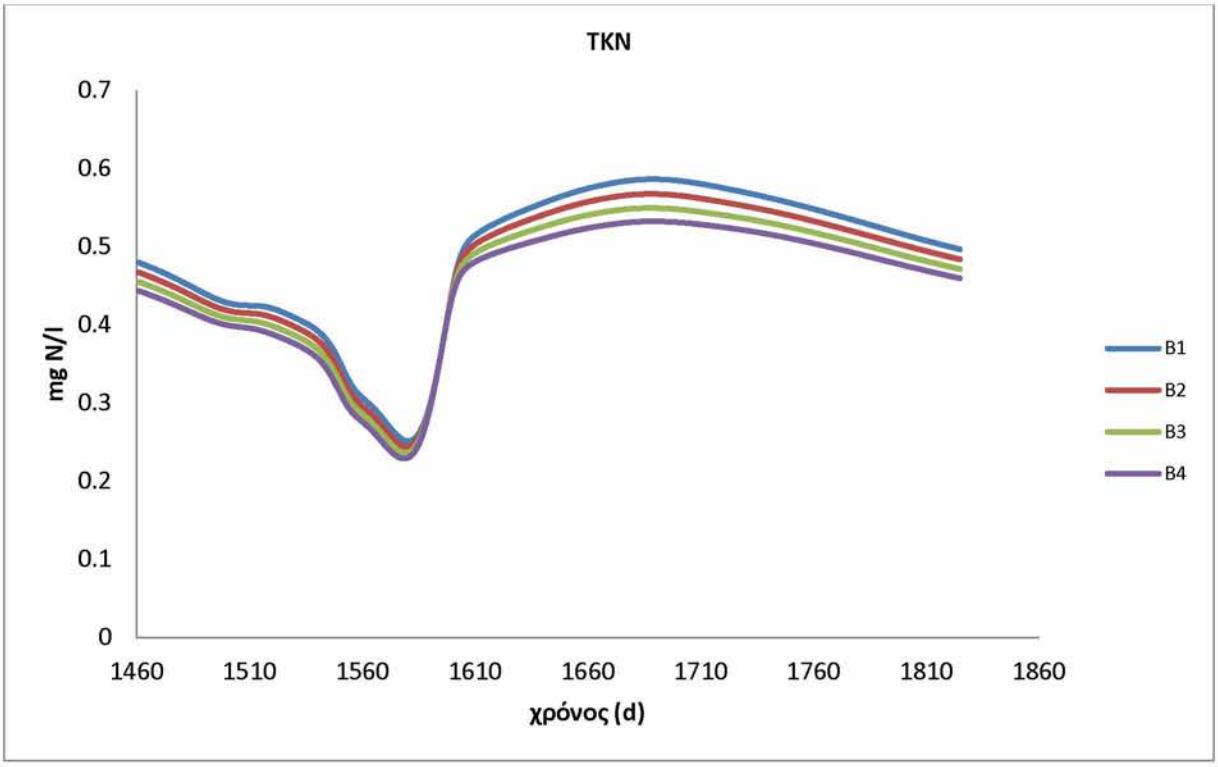


Διάγραμμα 9.28: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Β

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

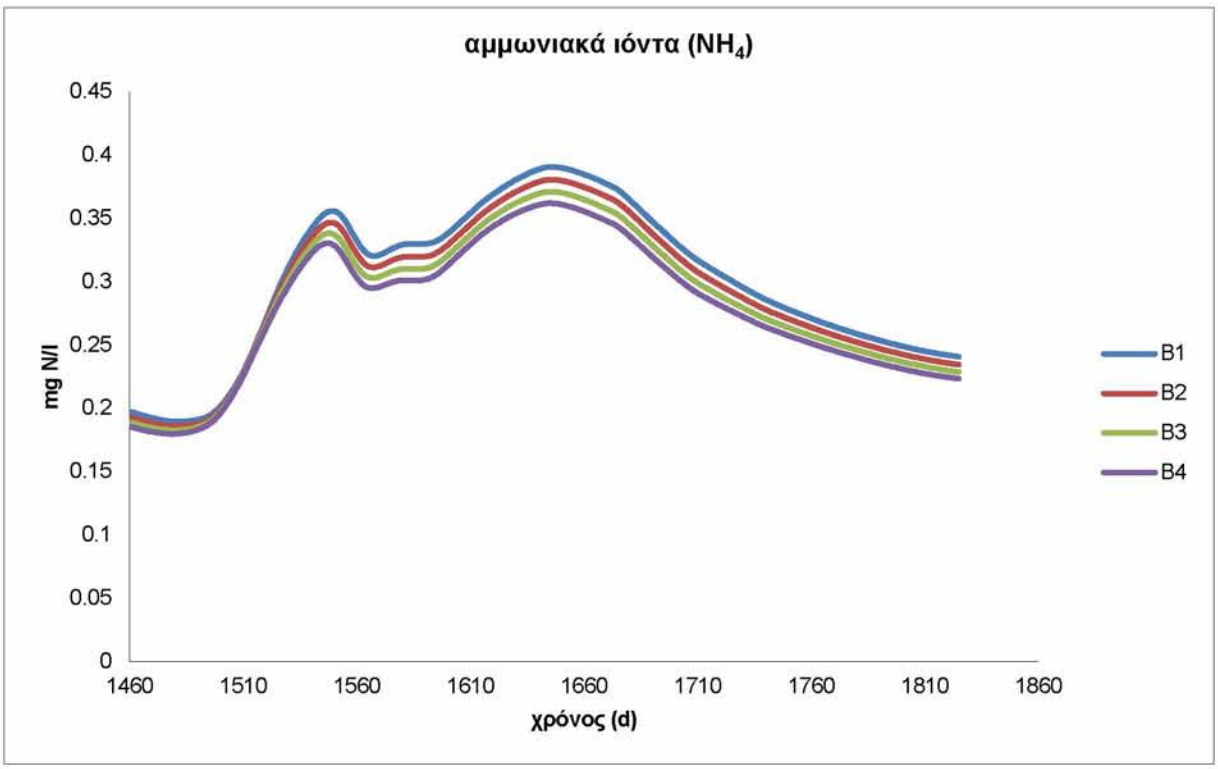


Διάγραμμα 9.29: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

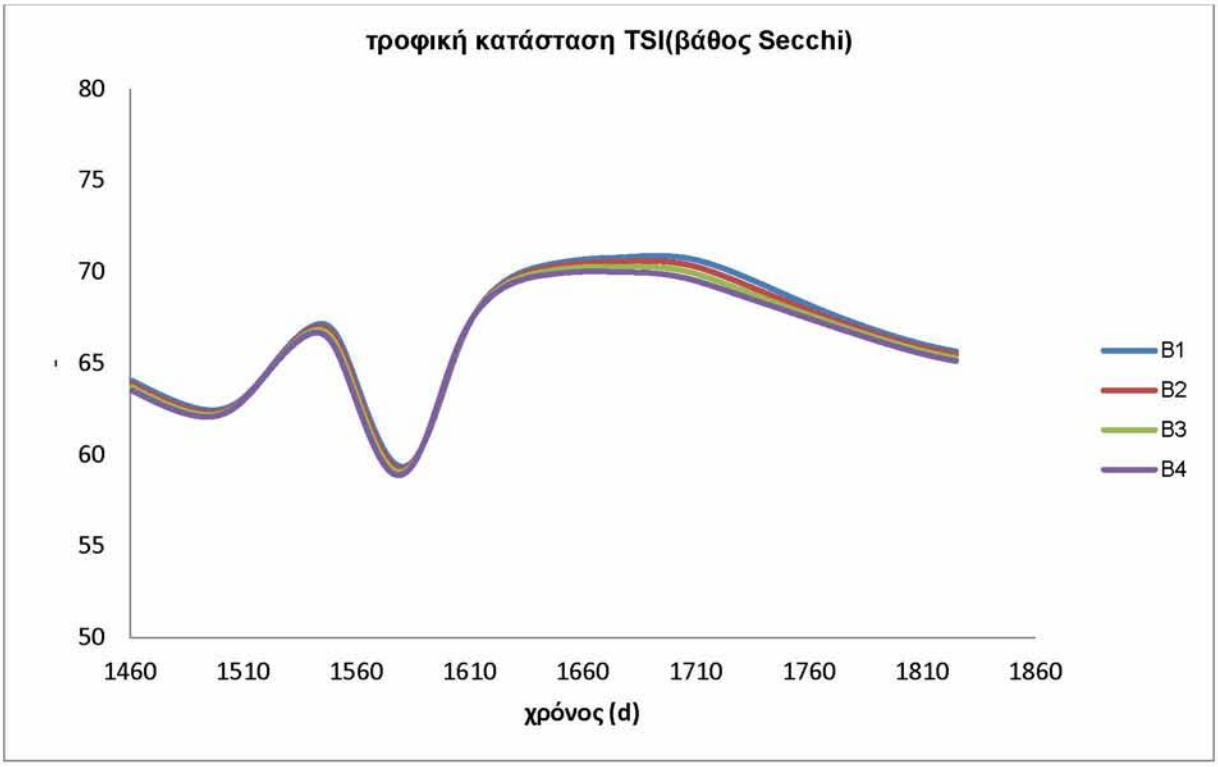


Διάγραμμα 9.30: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



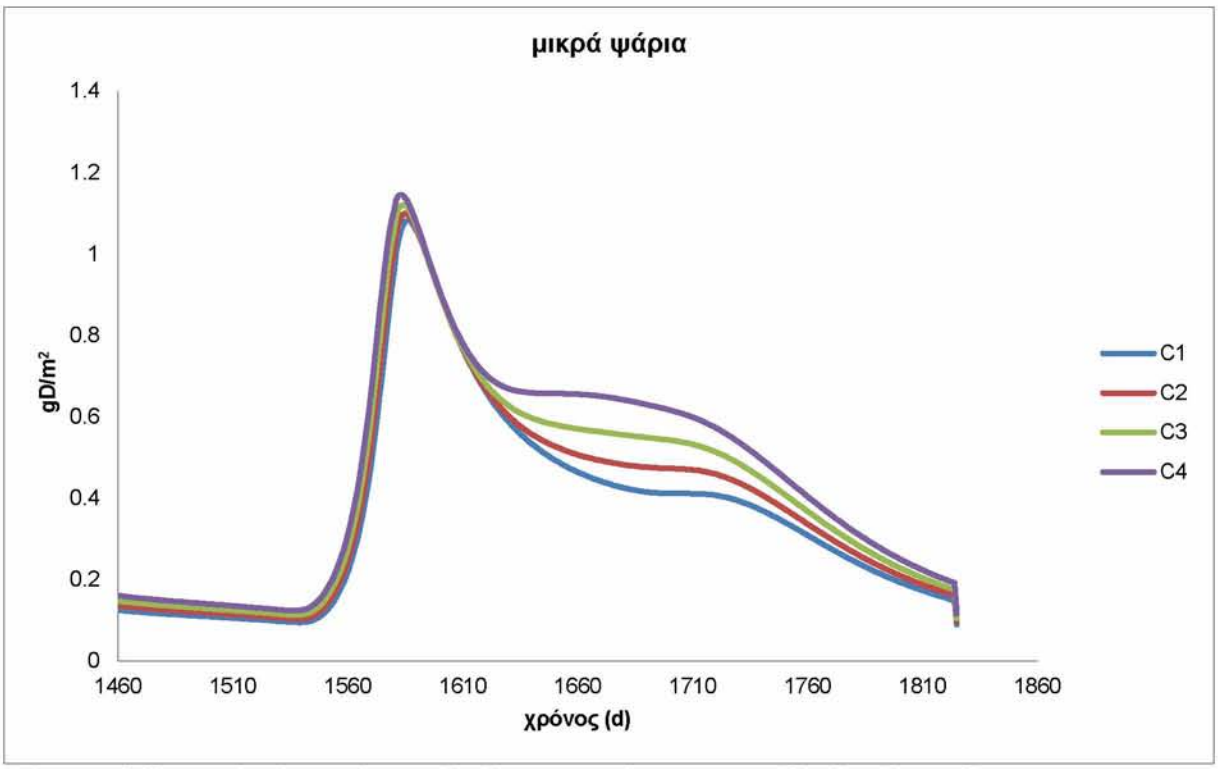
Διάγραμμα 9.31: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B



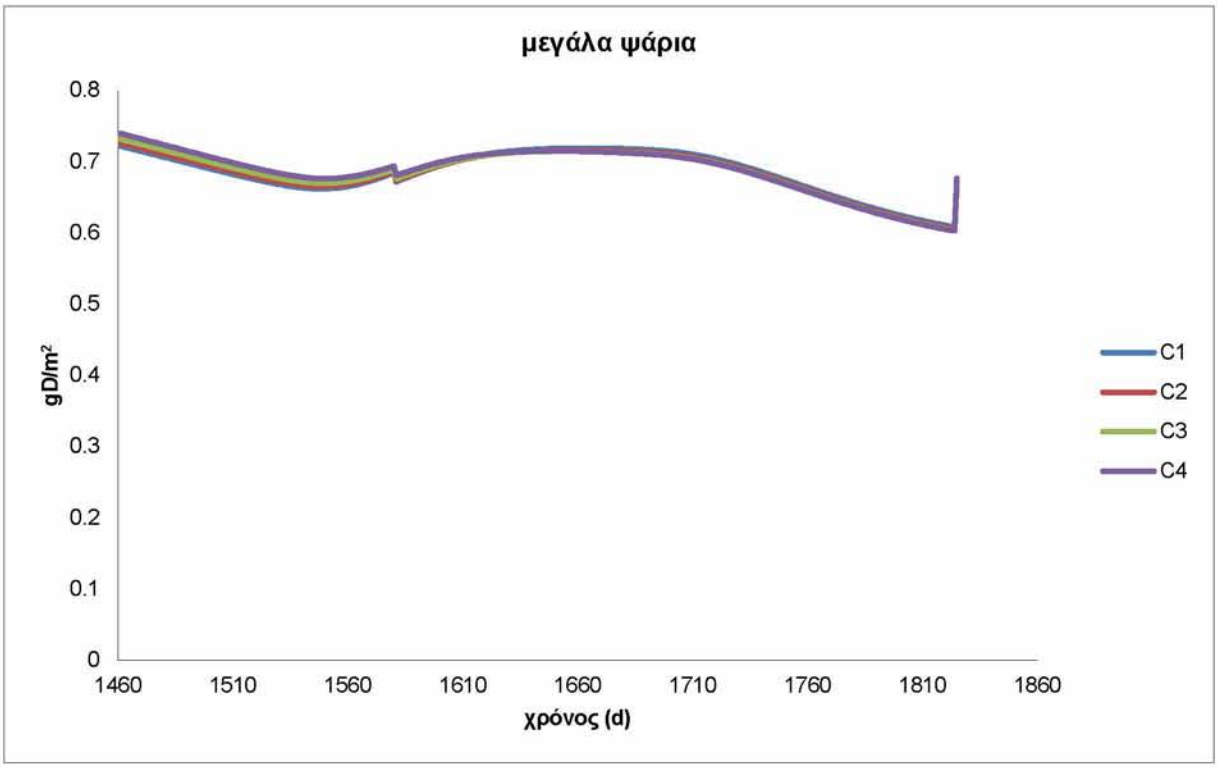
Διάγραμμα 9.32: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης B

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.3 Σχέδια διαχείρισης C

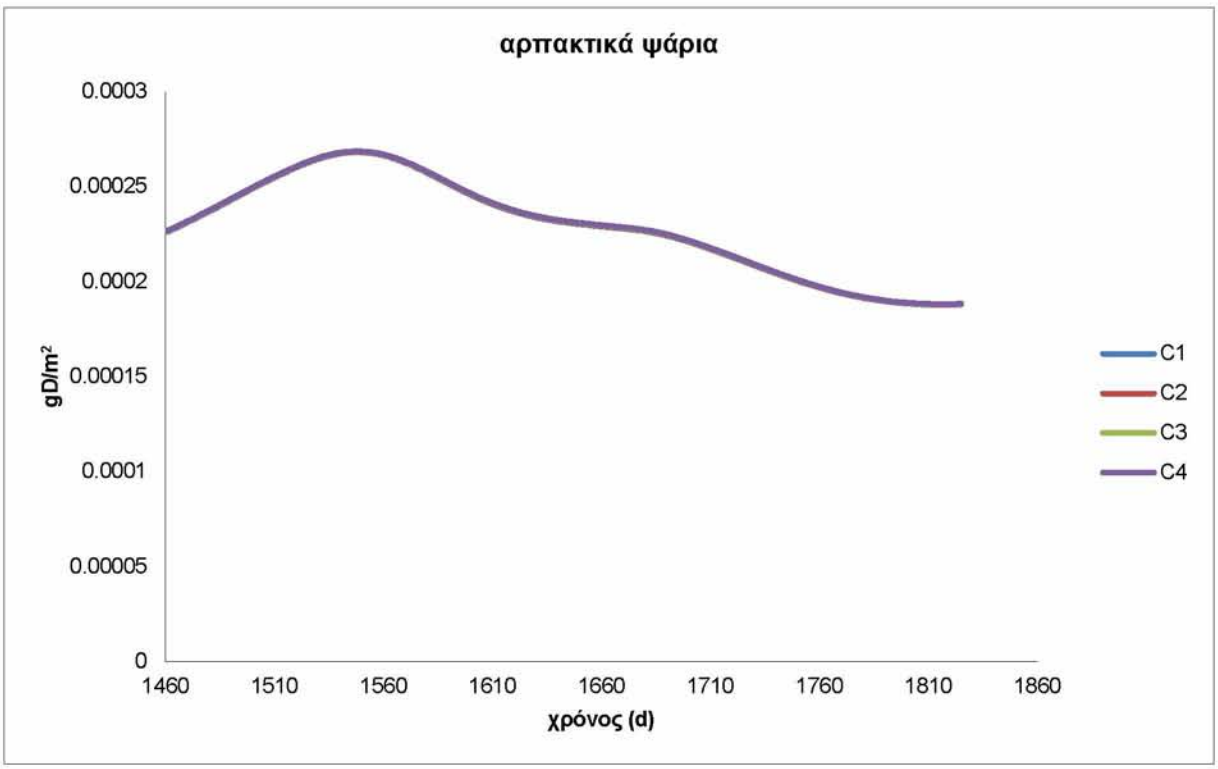


Διάγραμμα 9.33 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

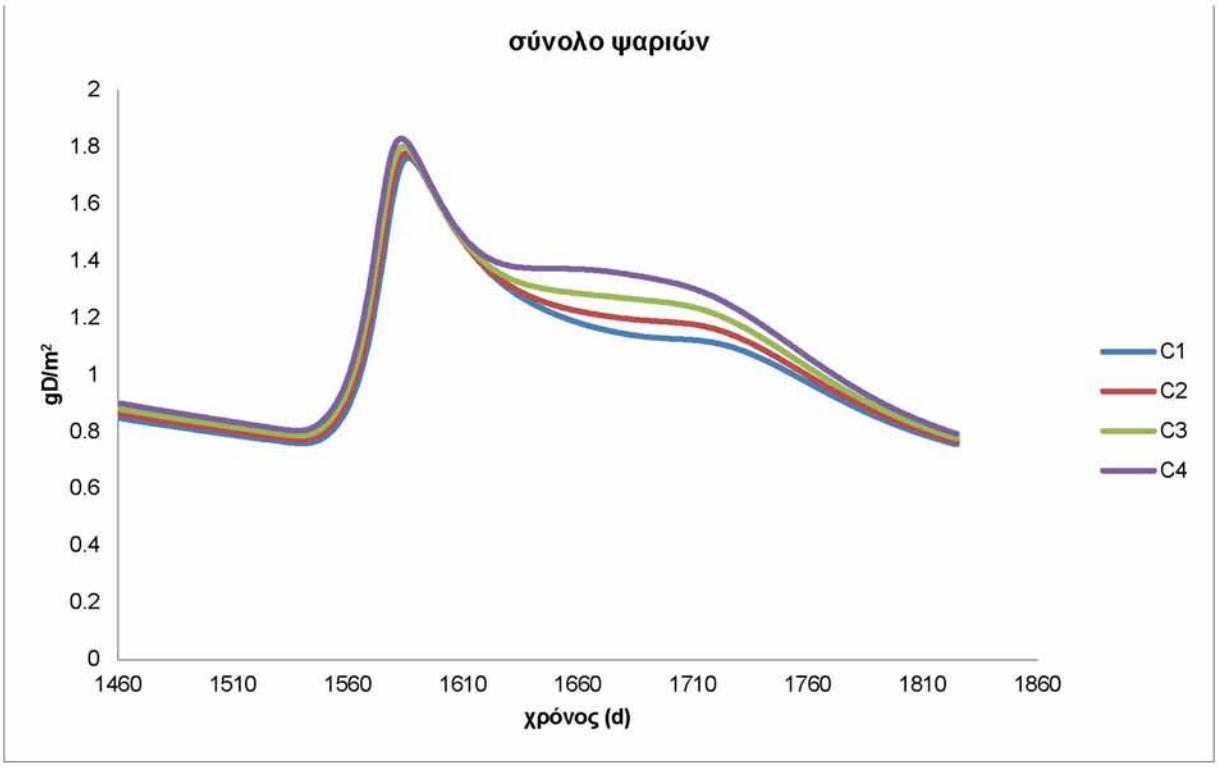


Διάγραμμα 9.34 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

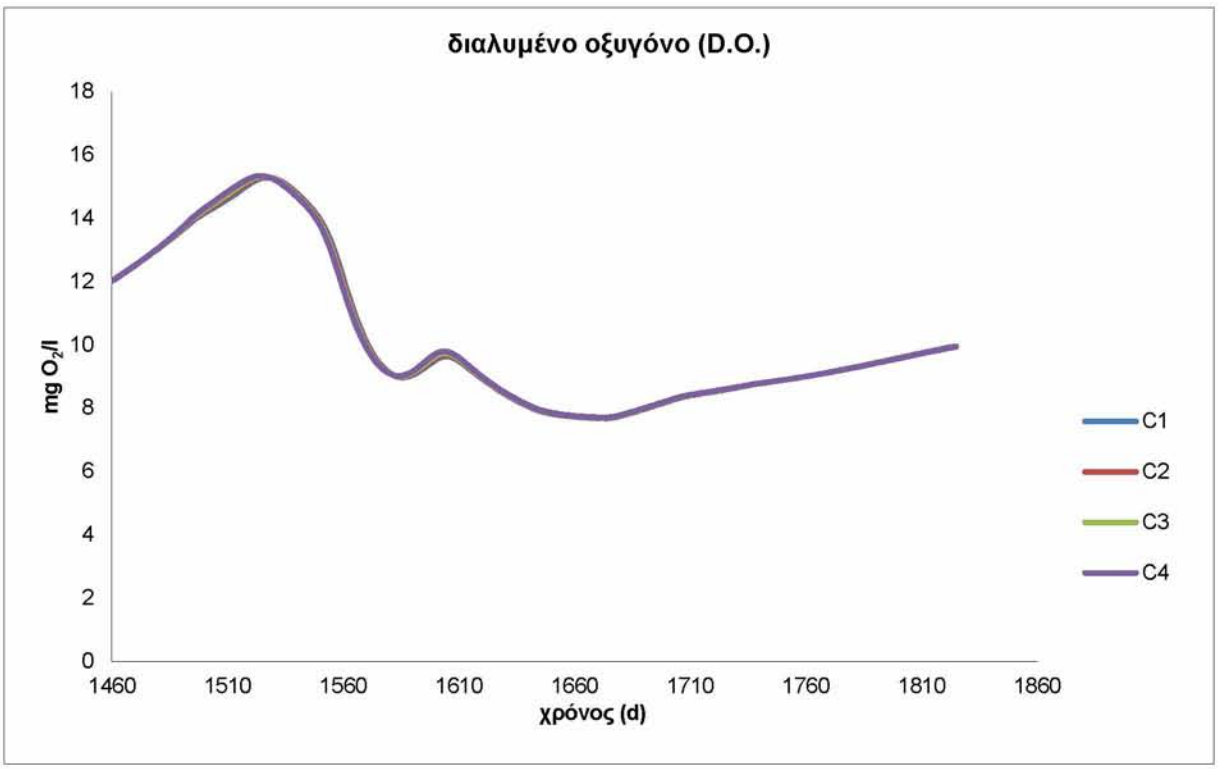


Διάγραμμα 9.35: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

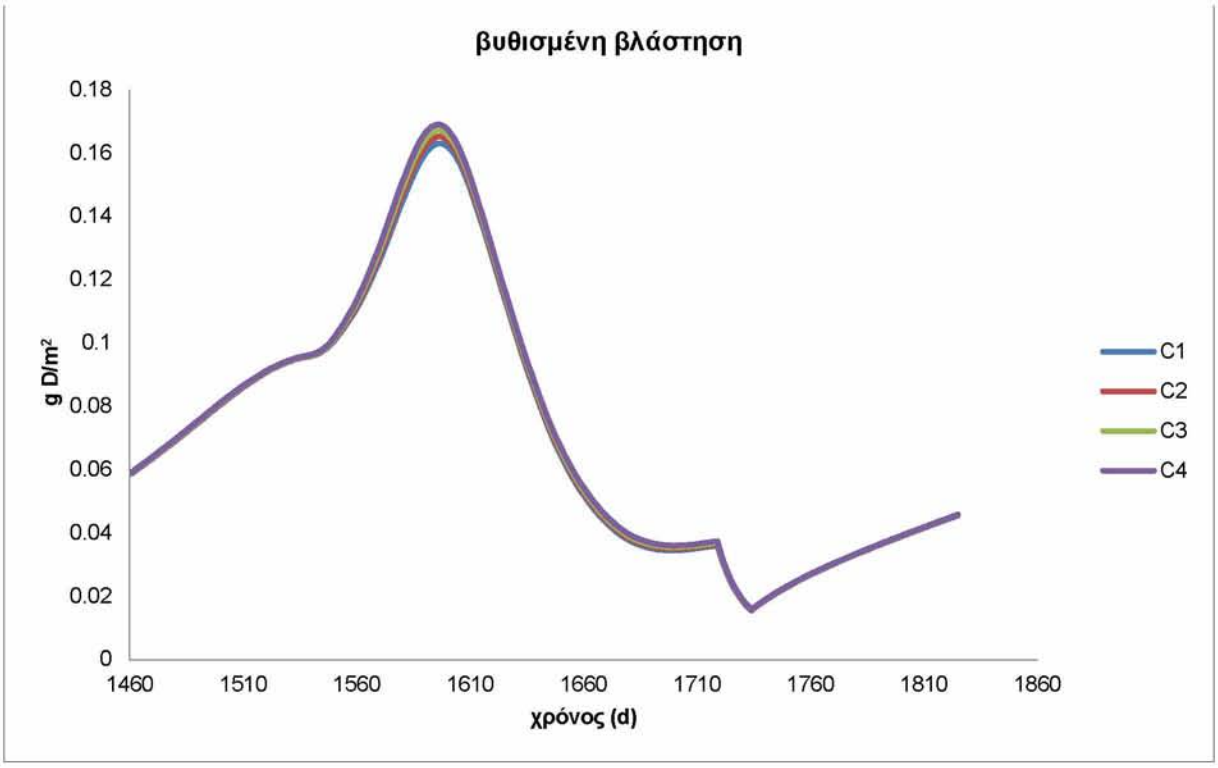


Διάγραμμα 9.36: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

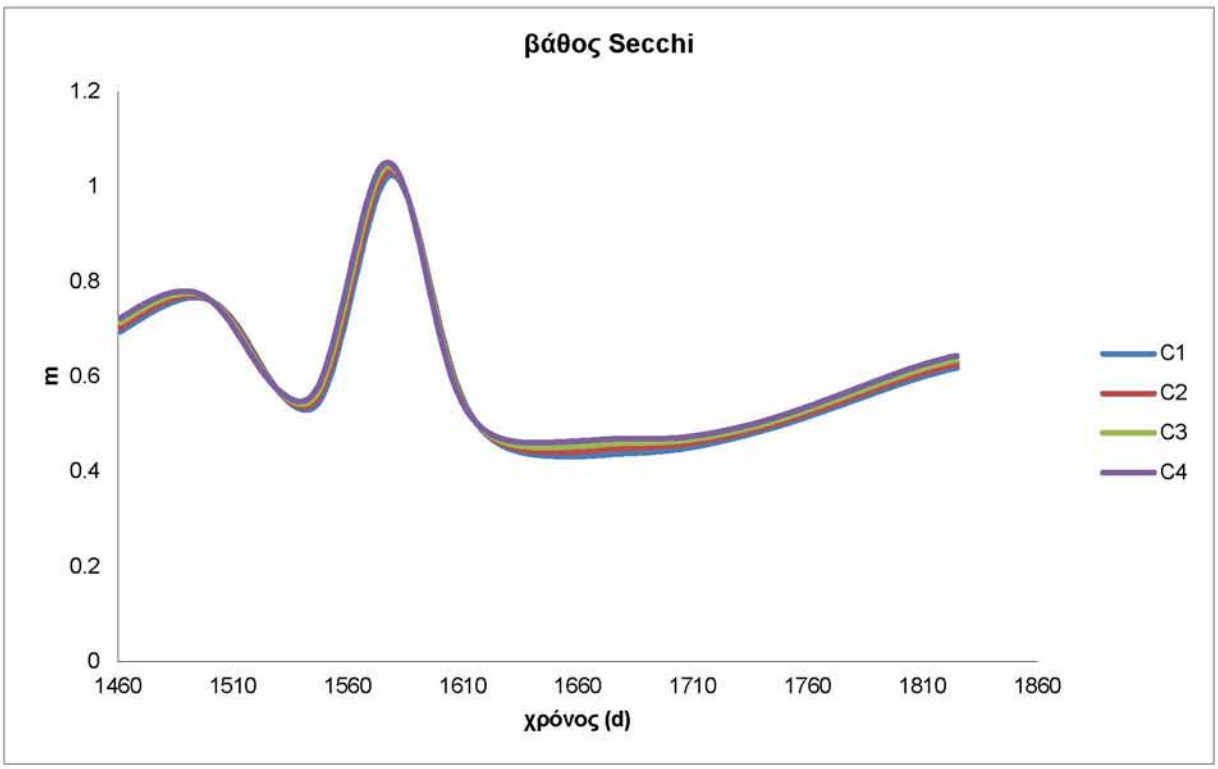


Διάγραμμα 9.37: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

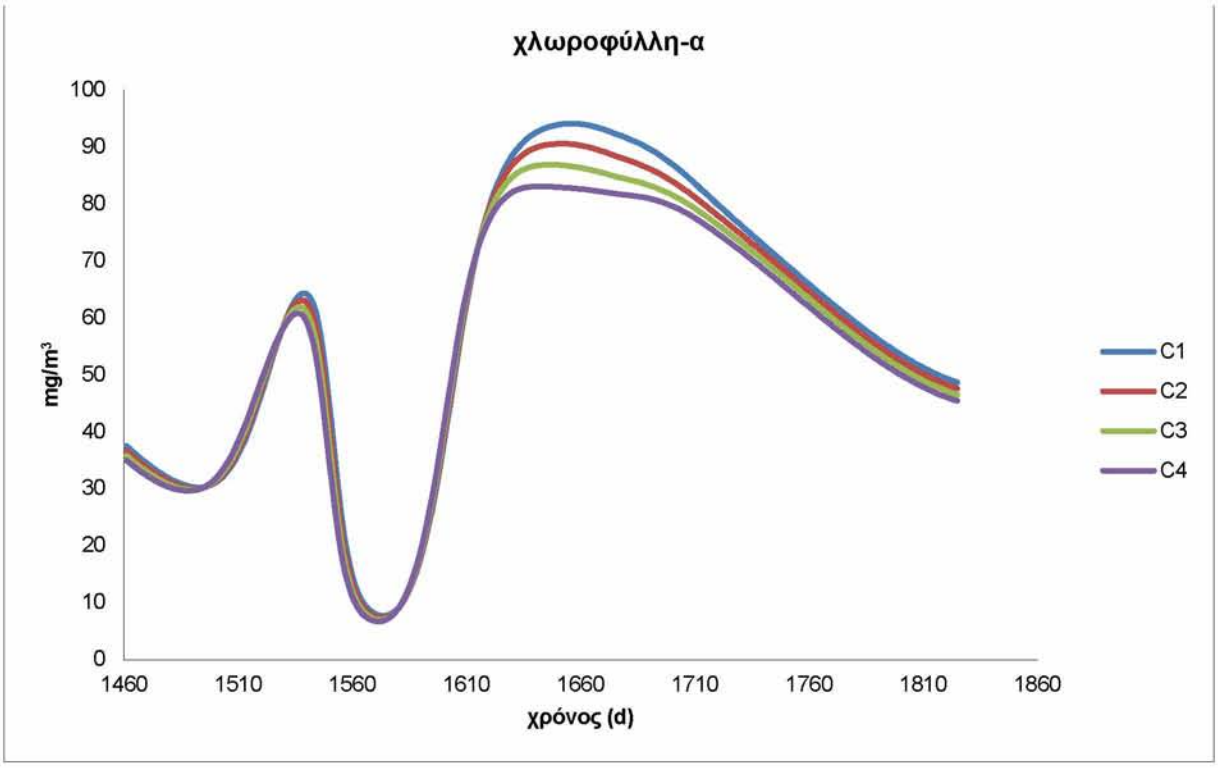


Διάγραμμα 9.38: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

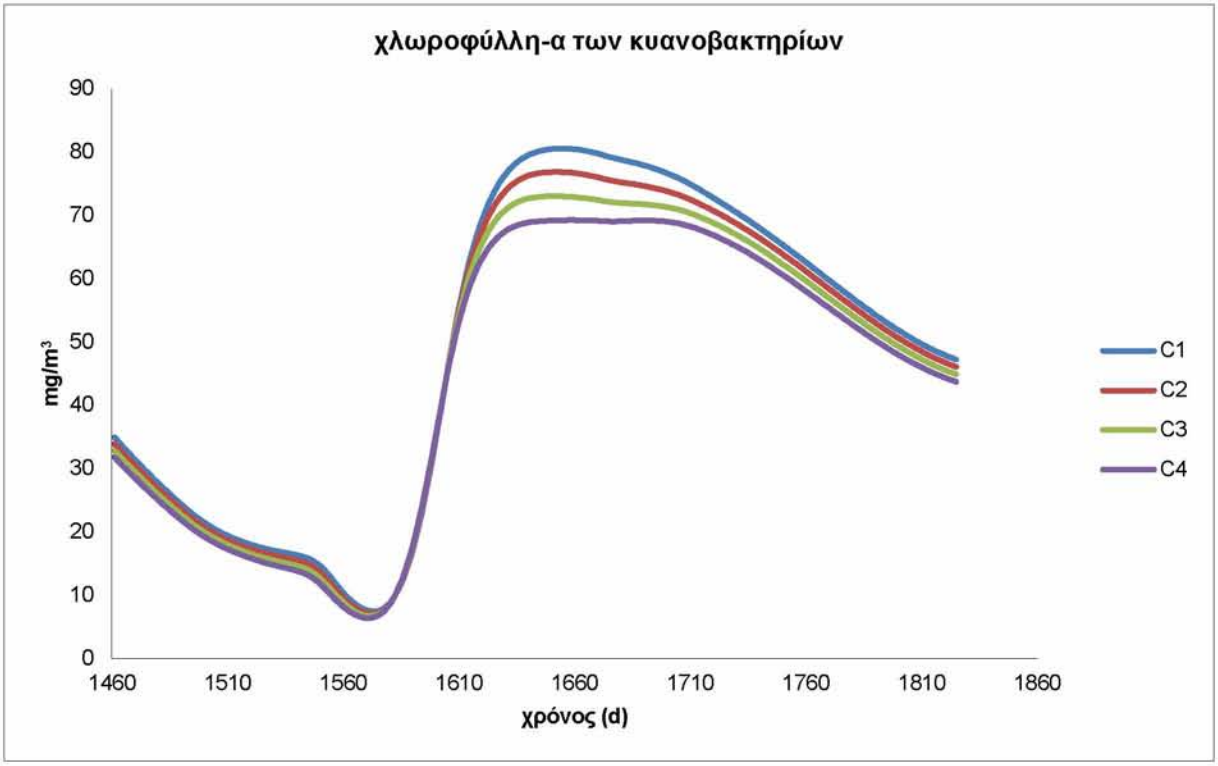


Διάγραμμα 9.39: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

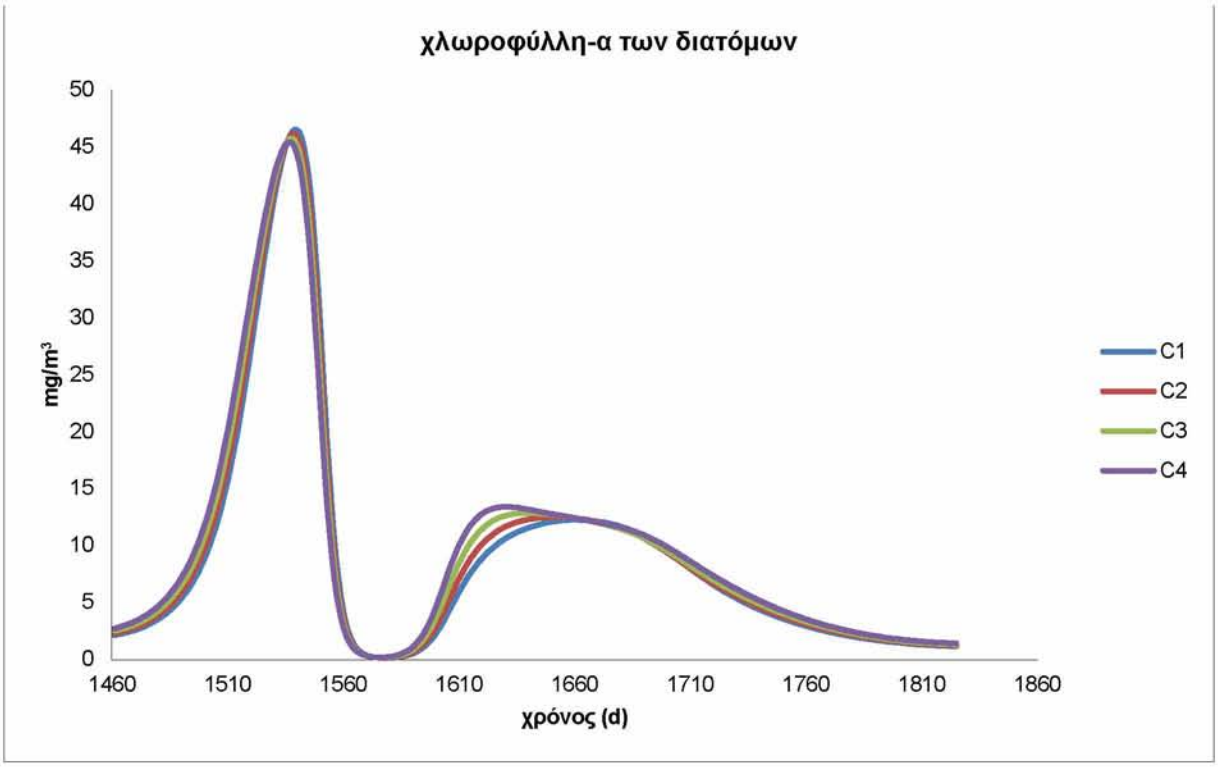


Διάγραμμα 9.40: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

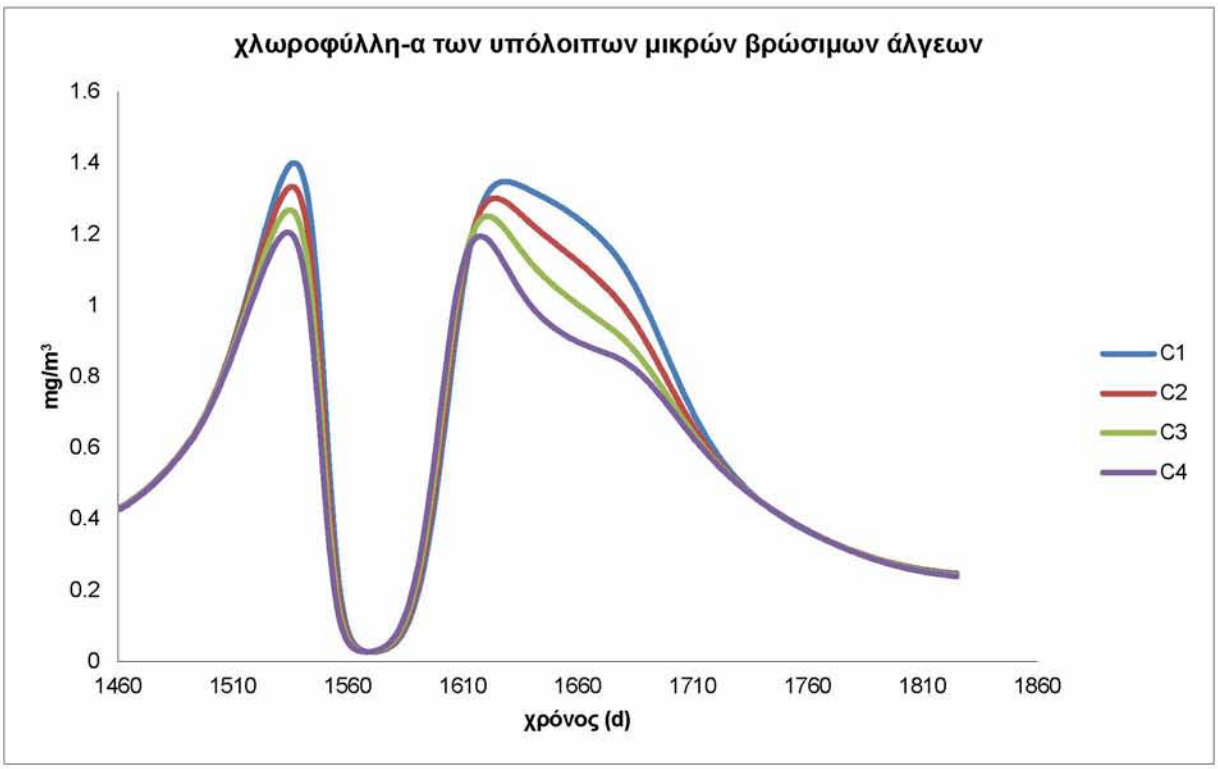


Διάγραμμα 9.41: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

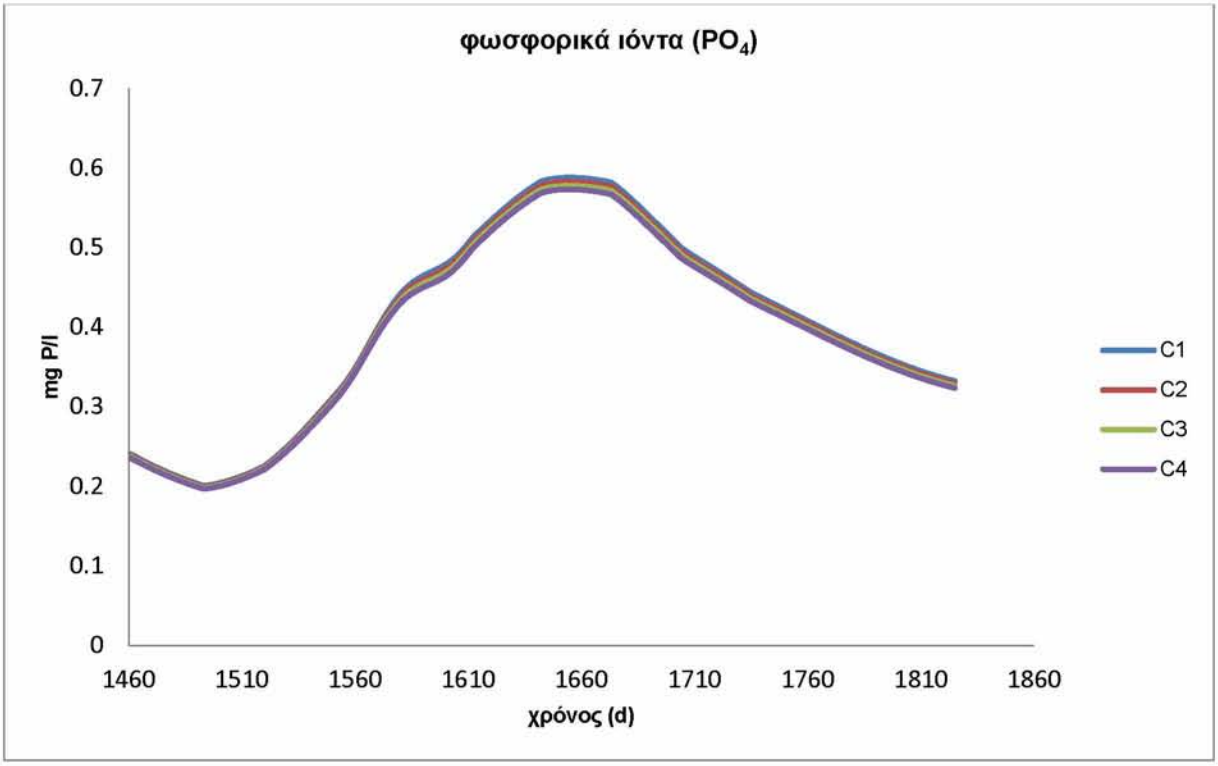


Διάγραμμα 9.42: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

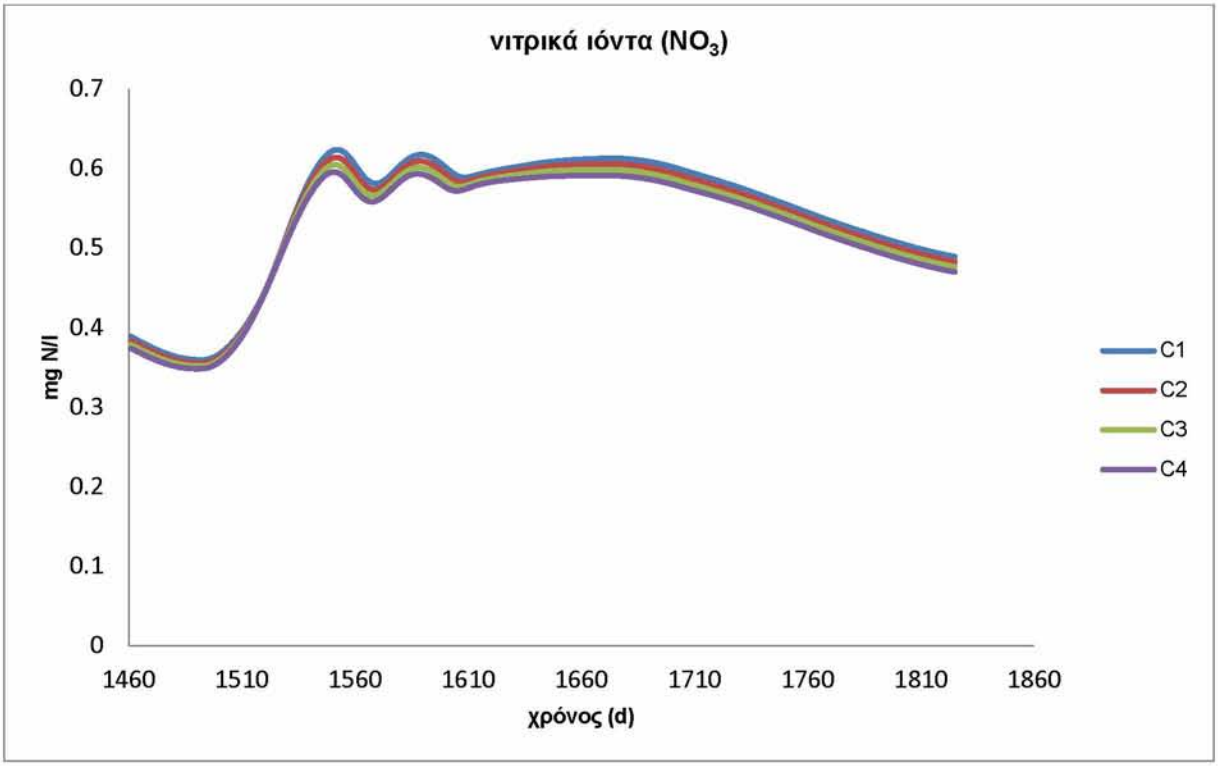


Διάγραμμα 9.43: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

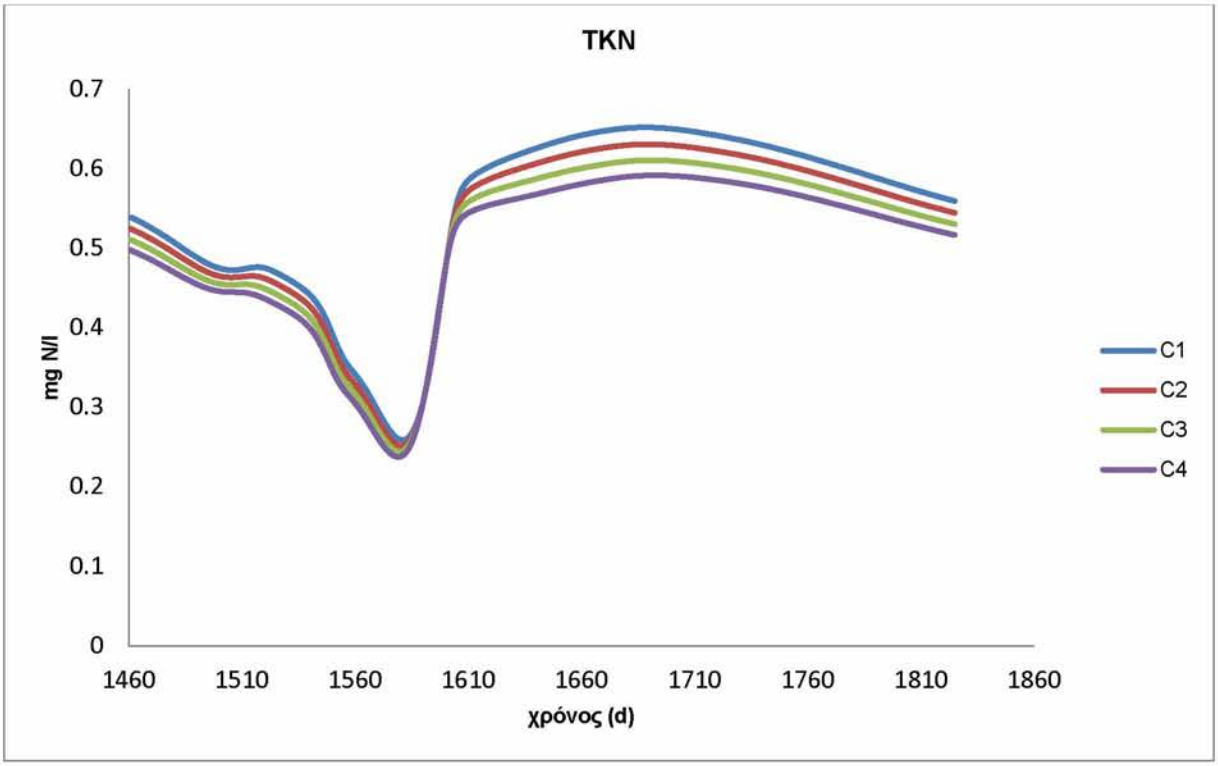


Διάγραμμα 9.44: φωσφορικά ιόντα (PO_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

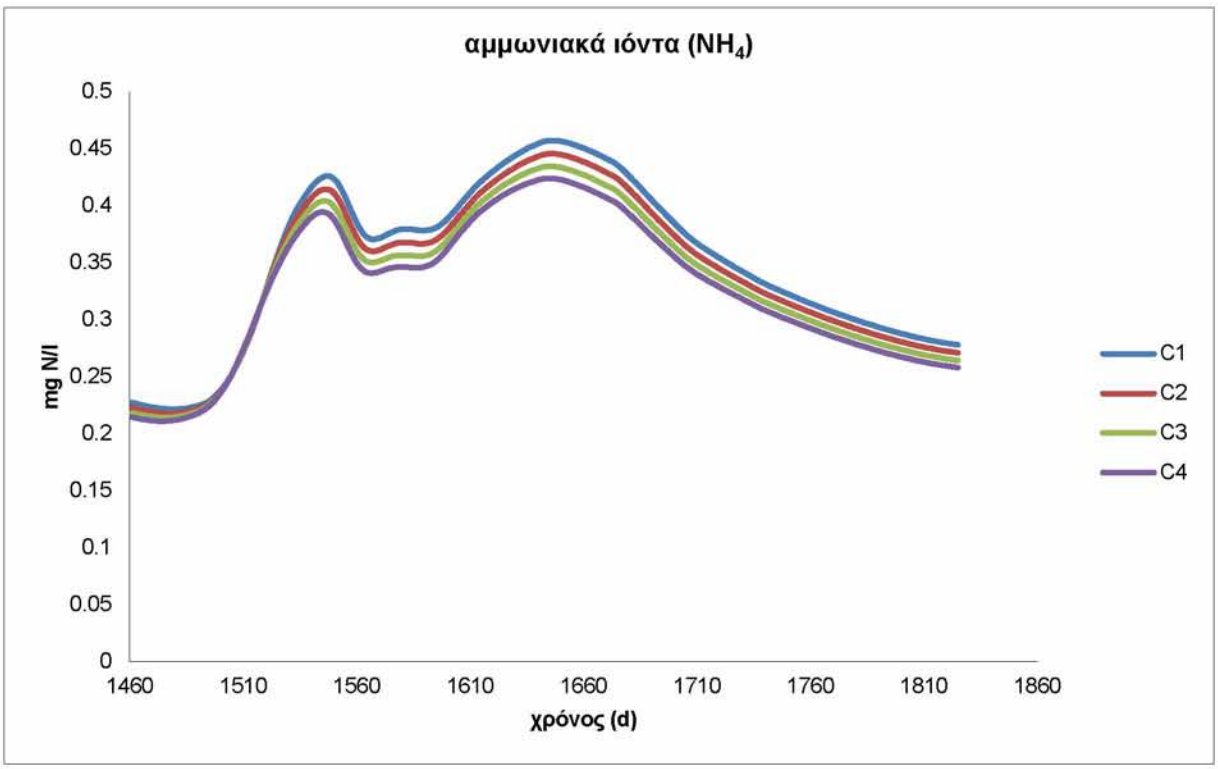


Διάγραμμα 9.45: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

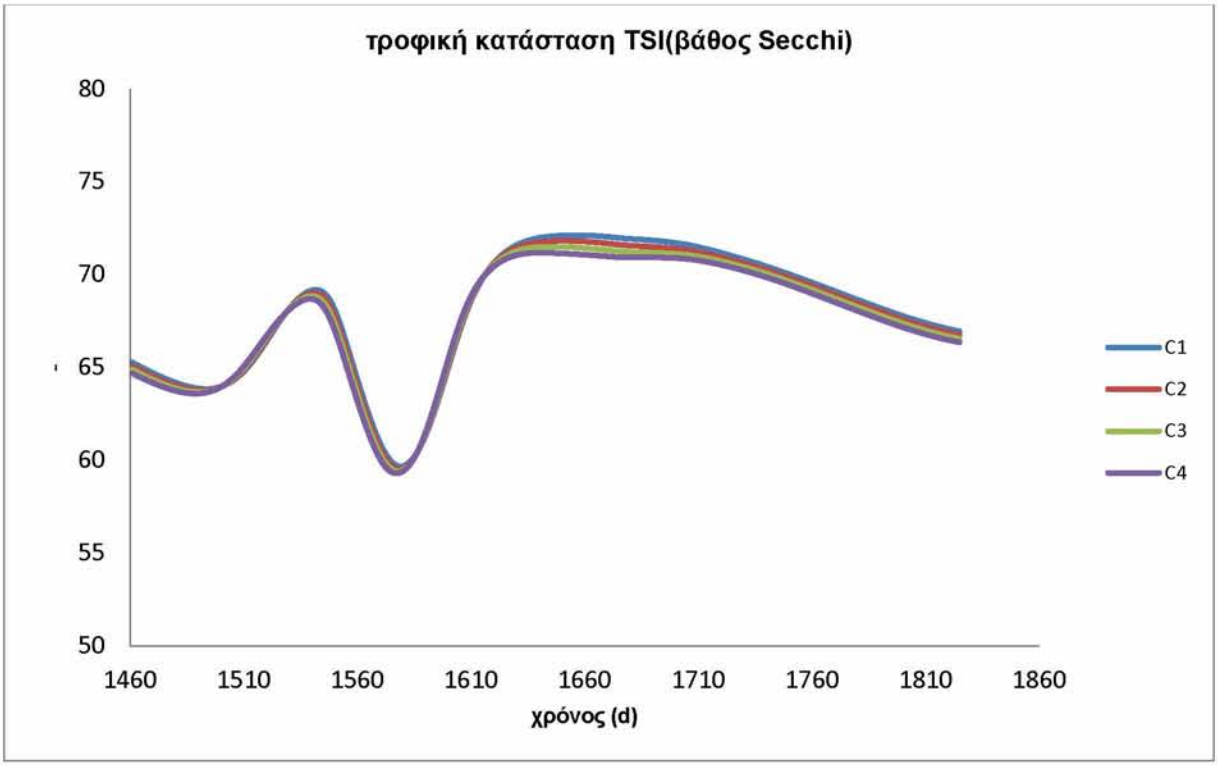


Διάγραμμα 9.46: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



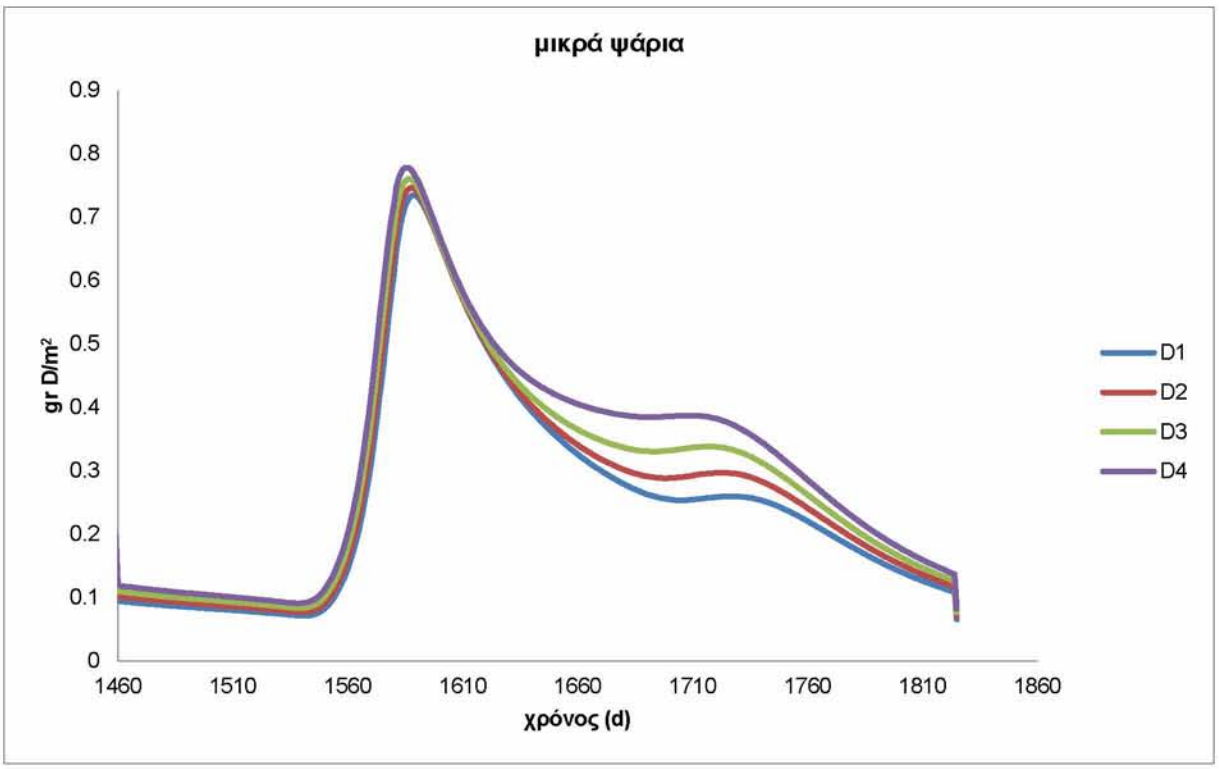
Διάγραμμα 9.47: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C



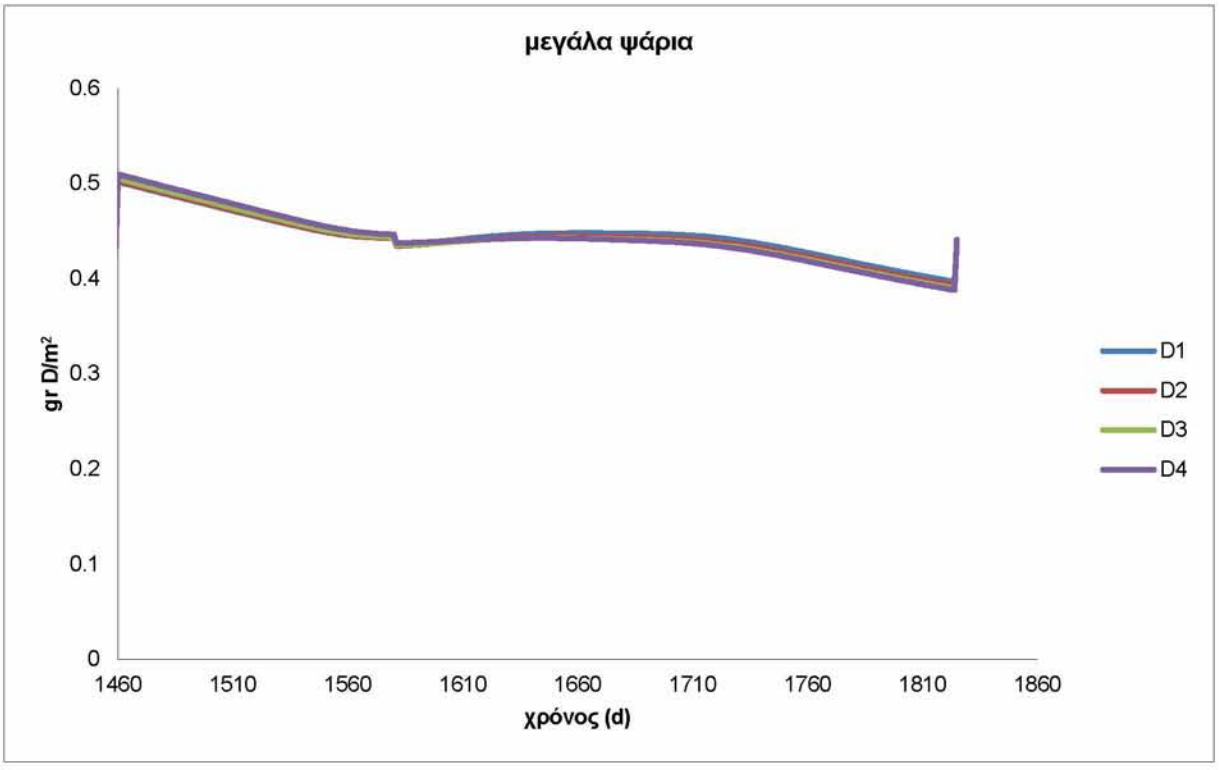
Διάγραμμα 9.48: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης C

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.4 Σχέδια διαχείρισης D

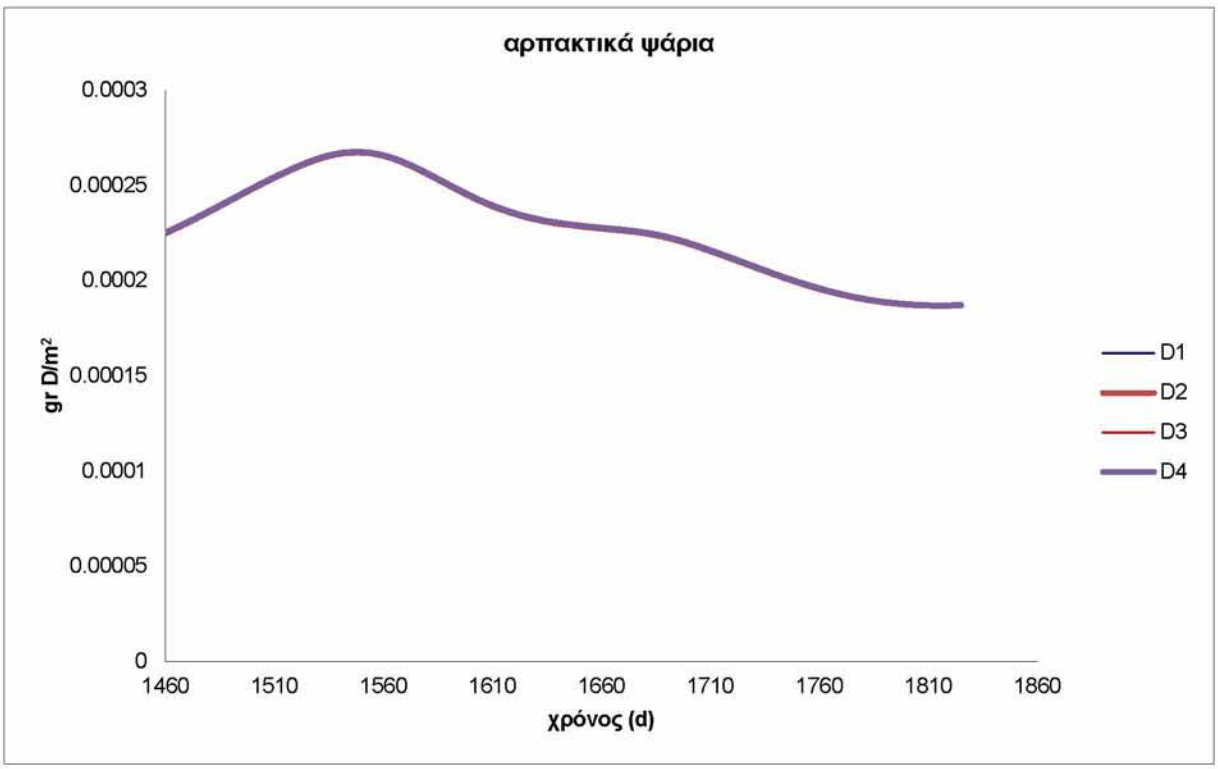


Διάγραμμα 9.49 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

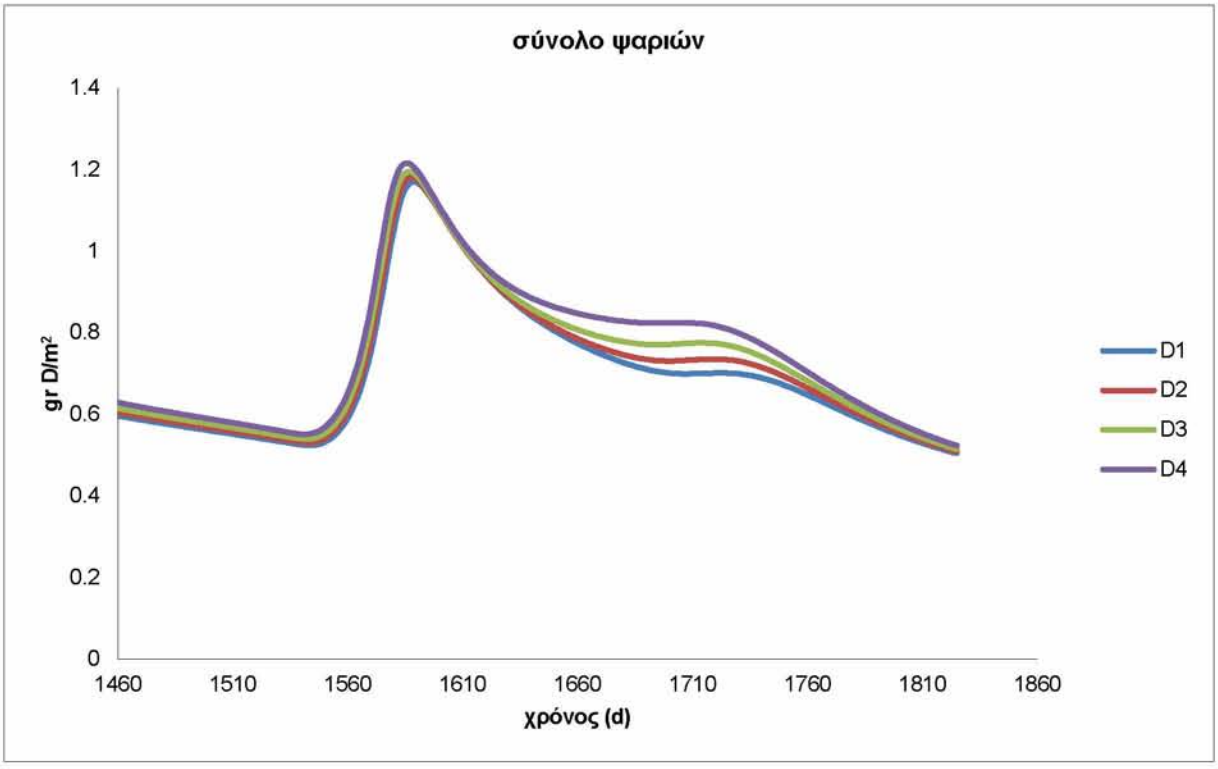


Διάγραμμα 9.50 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

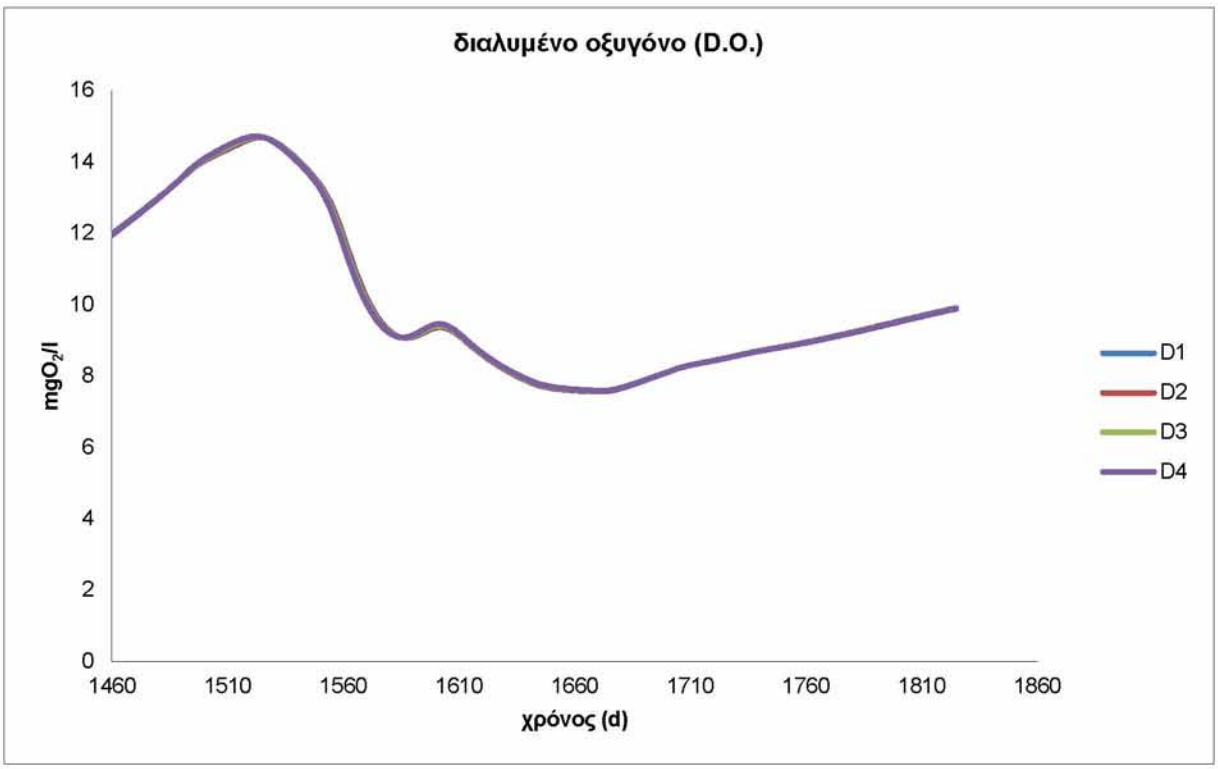


Διάγραμμα 9.51: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

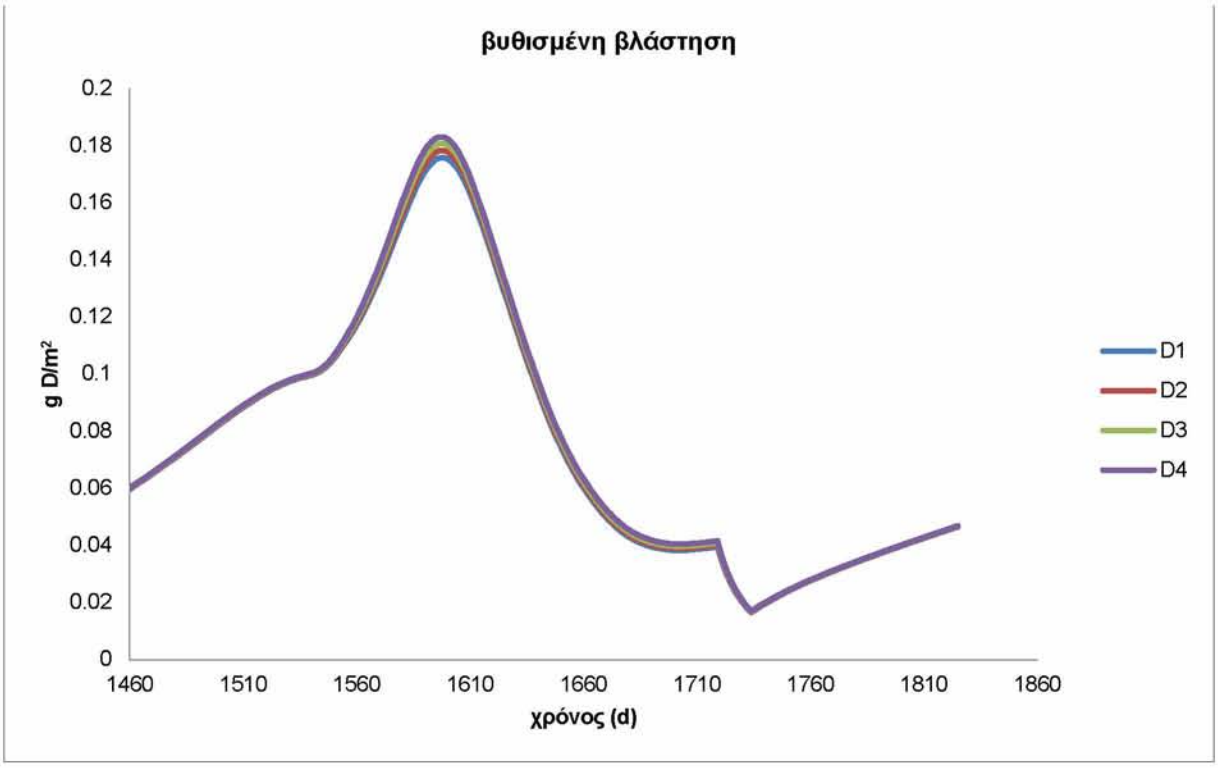


Διάγραμμα 9.52: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

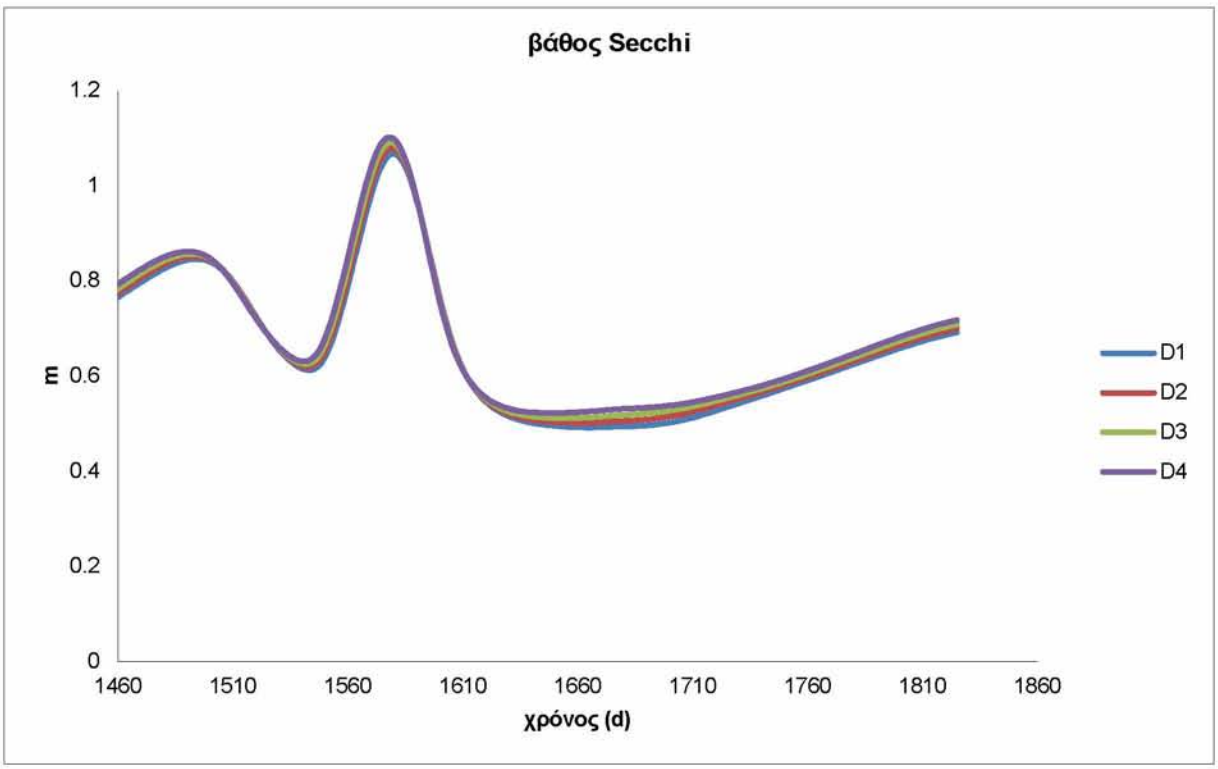


Διάγραμμα 9.53: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

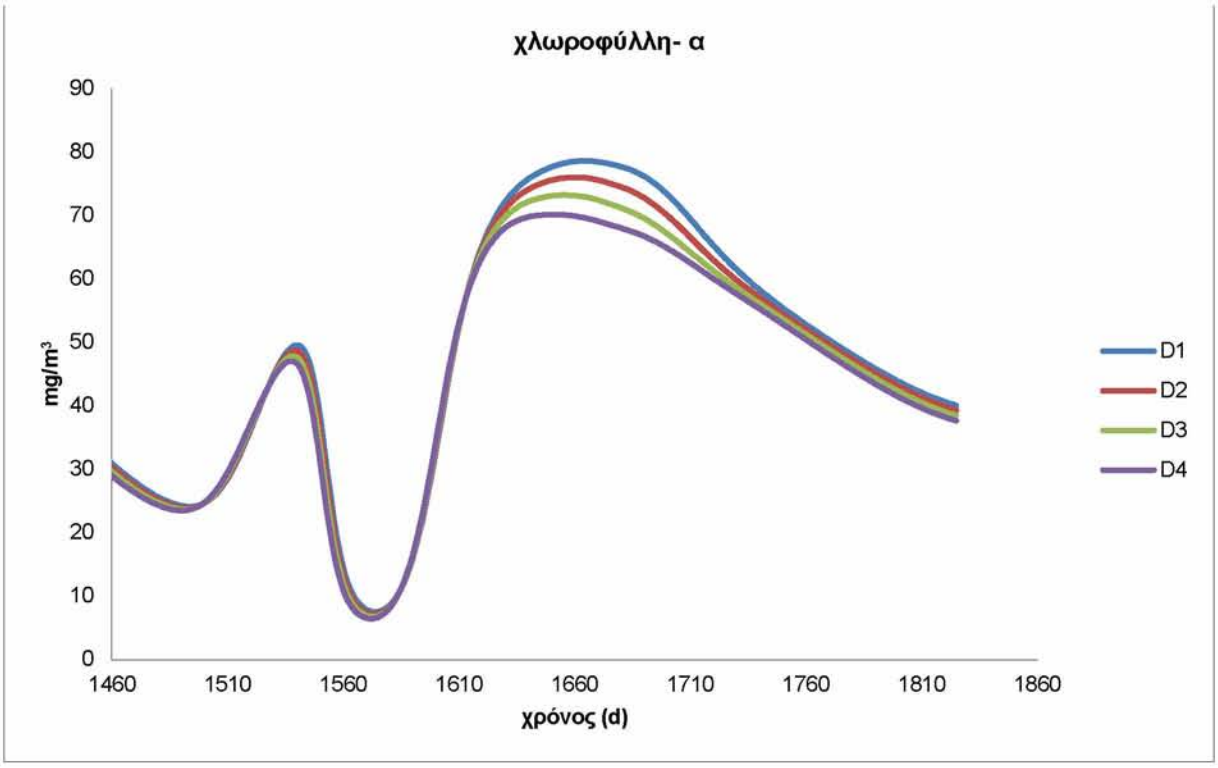


Διάγραμμα 9.54: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

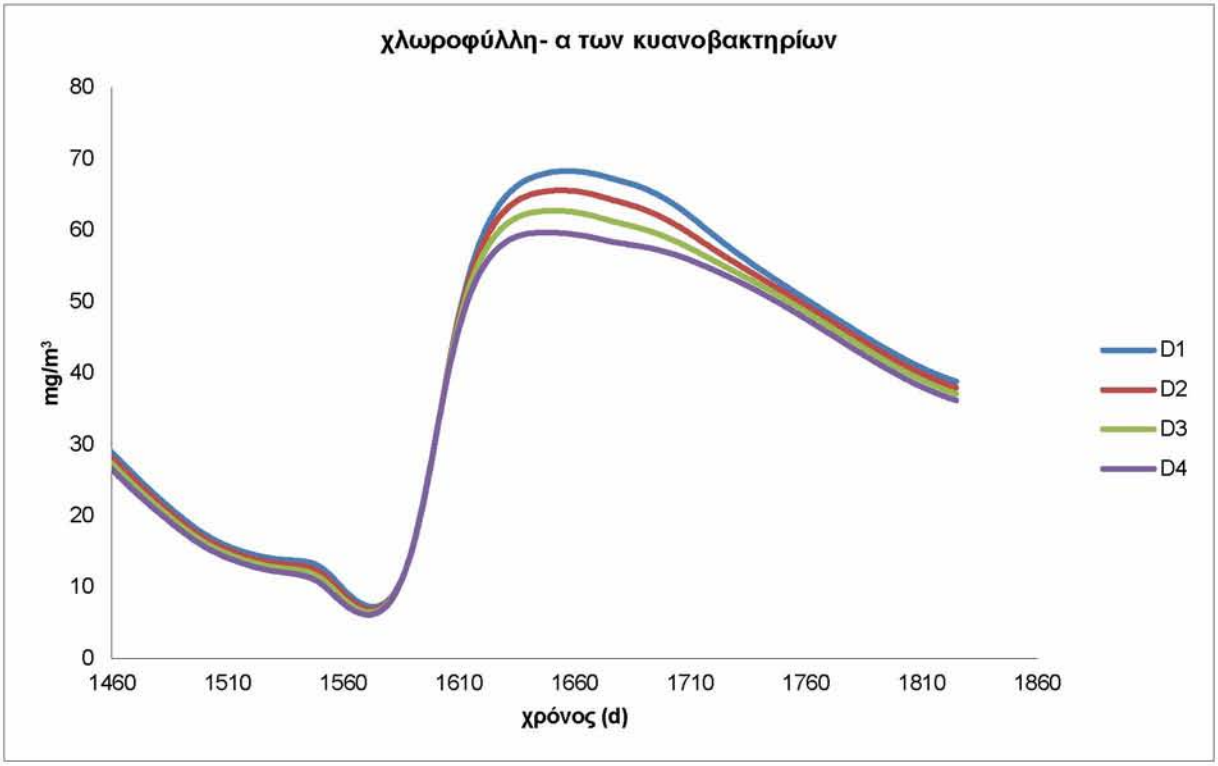


Διάγραμμα 9.55: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

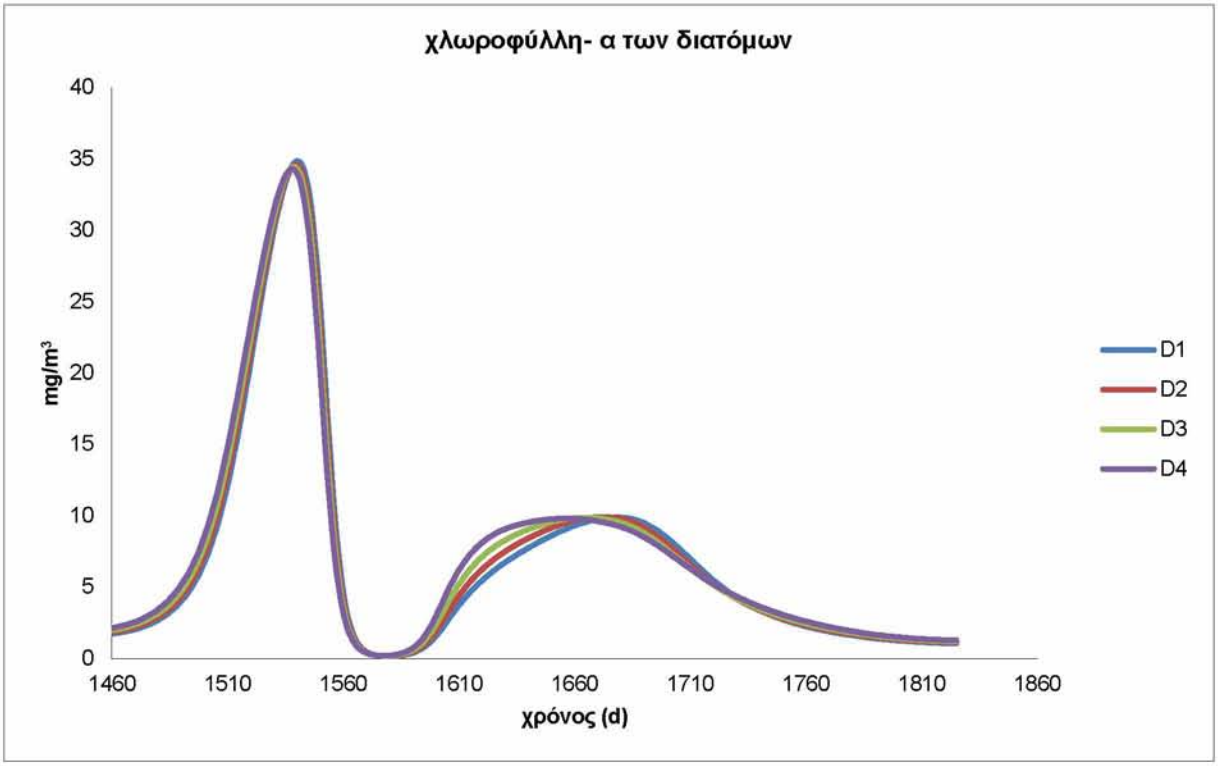


Διάγραμμα 9.56: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 9.57: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

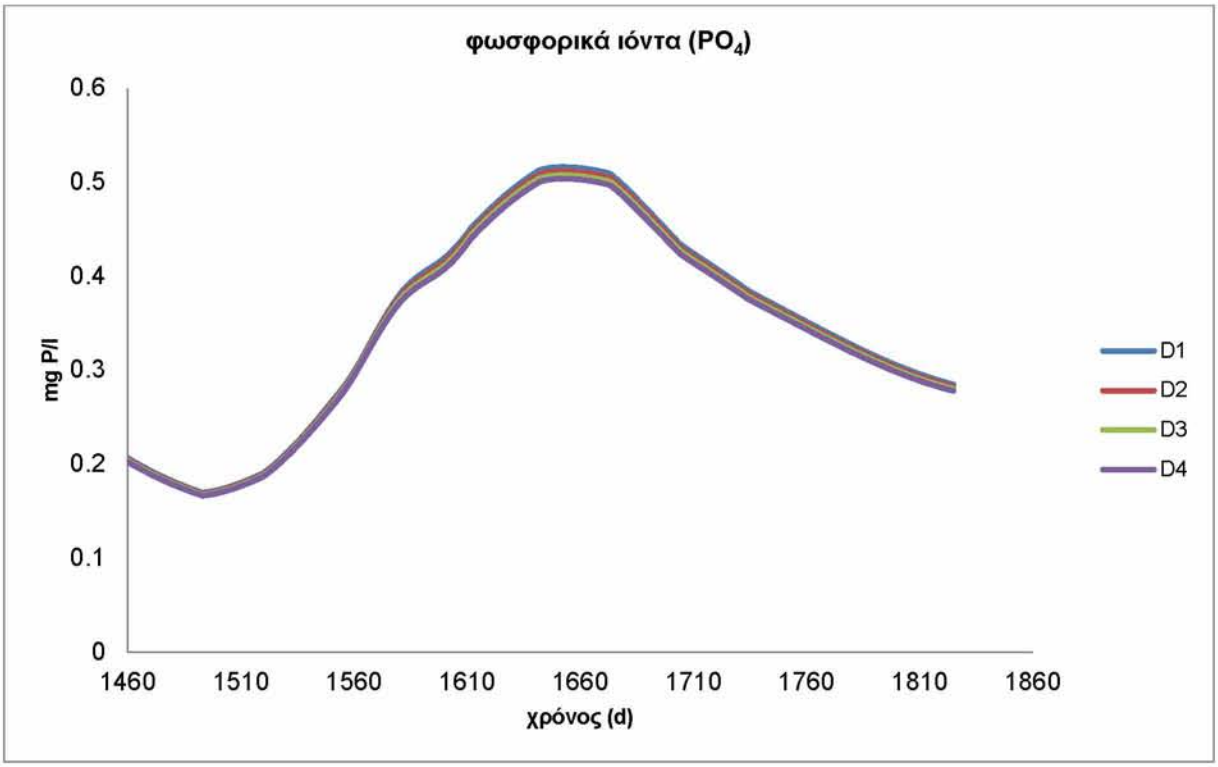


Διάγραμμα 9.58: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

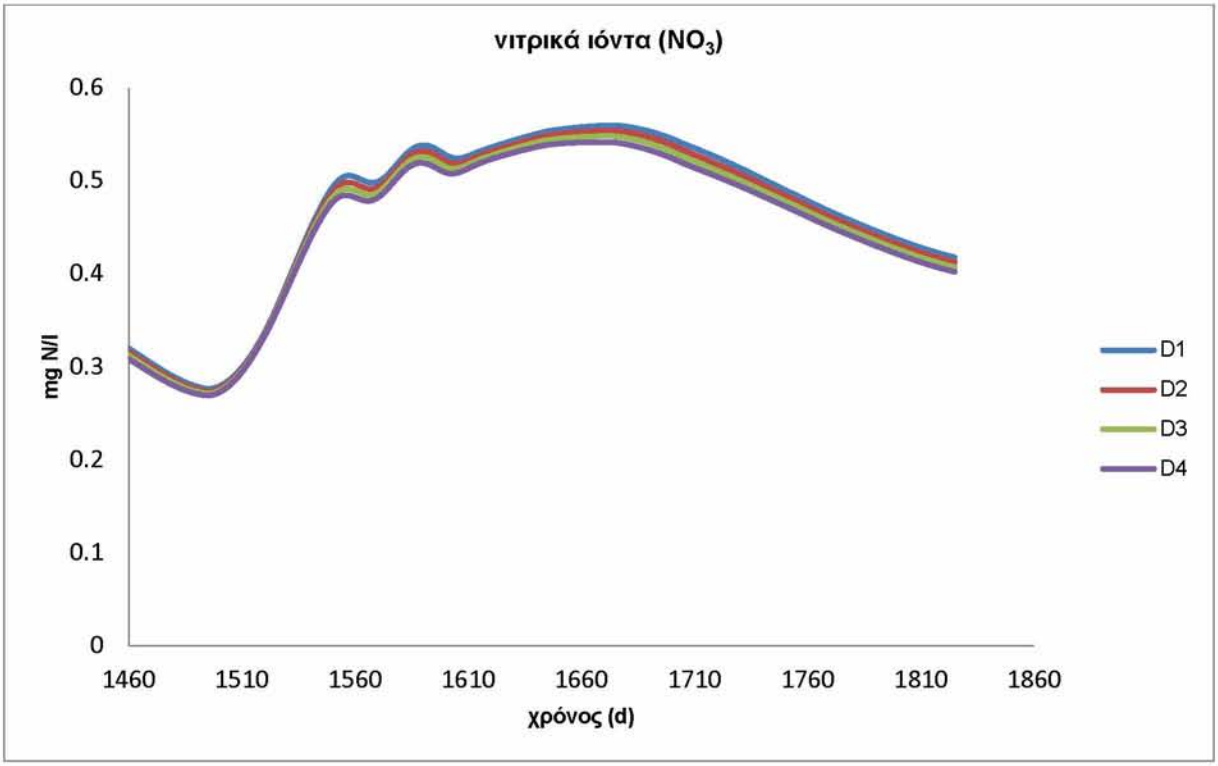


Διάγραμμα 9.59: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

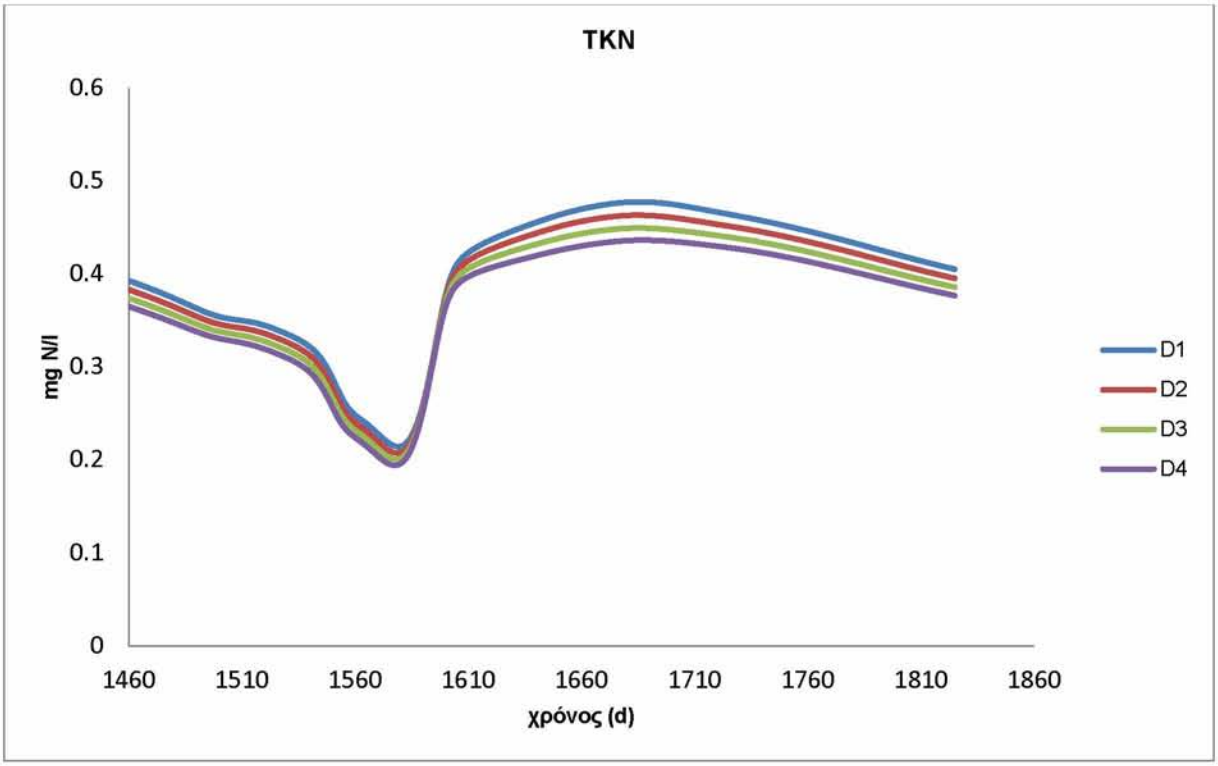


Διάγραμμα 9.60: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

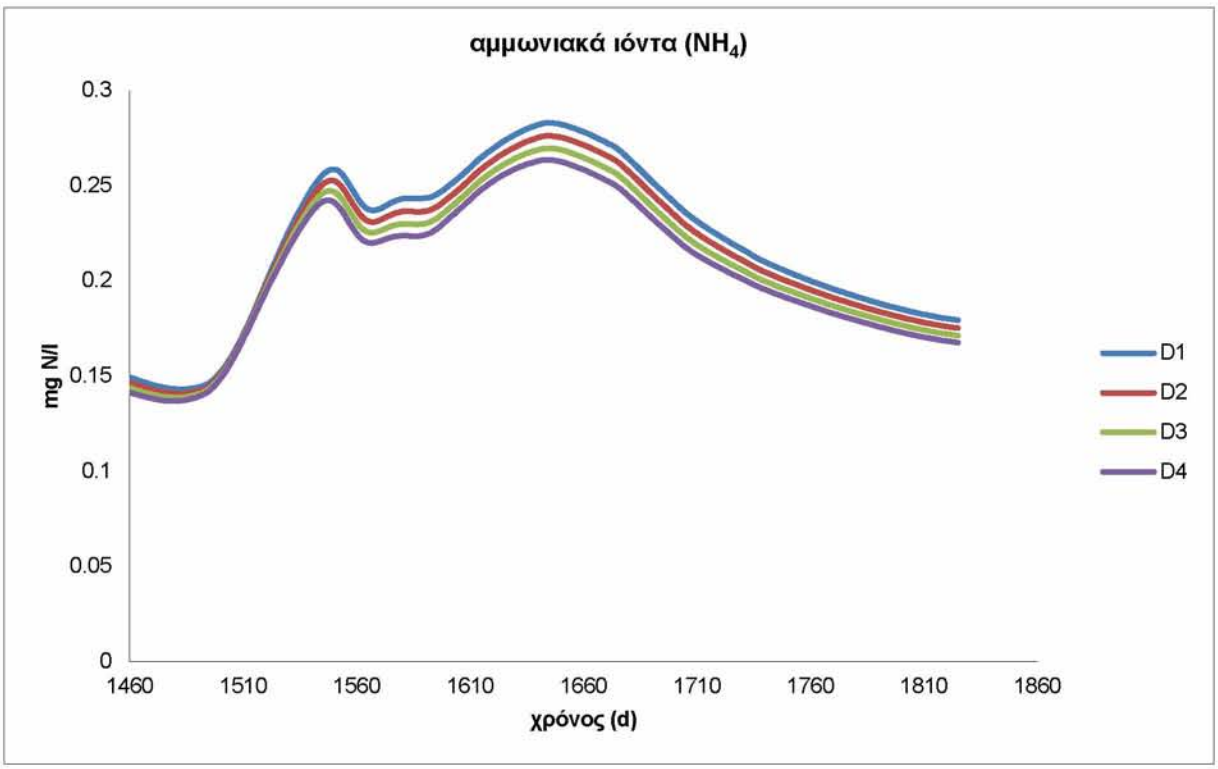


Διάγραμμα 9.61: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

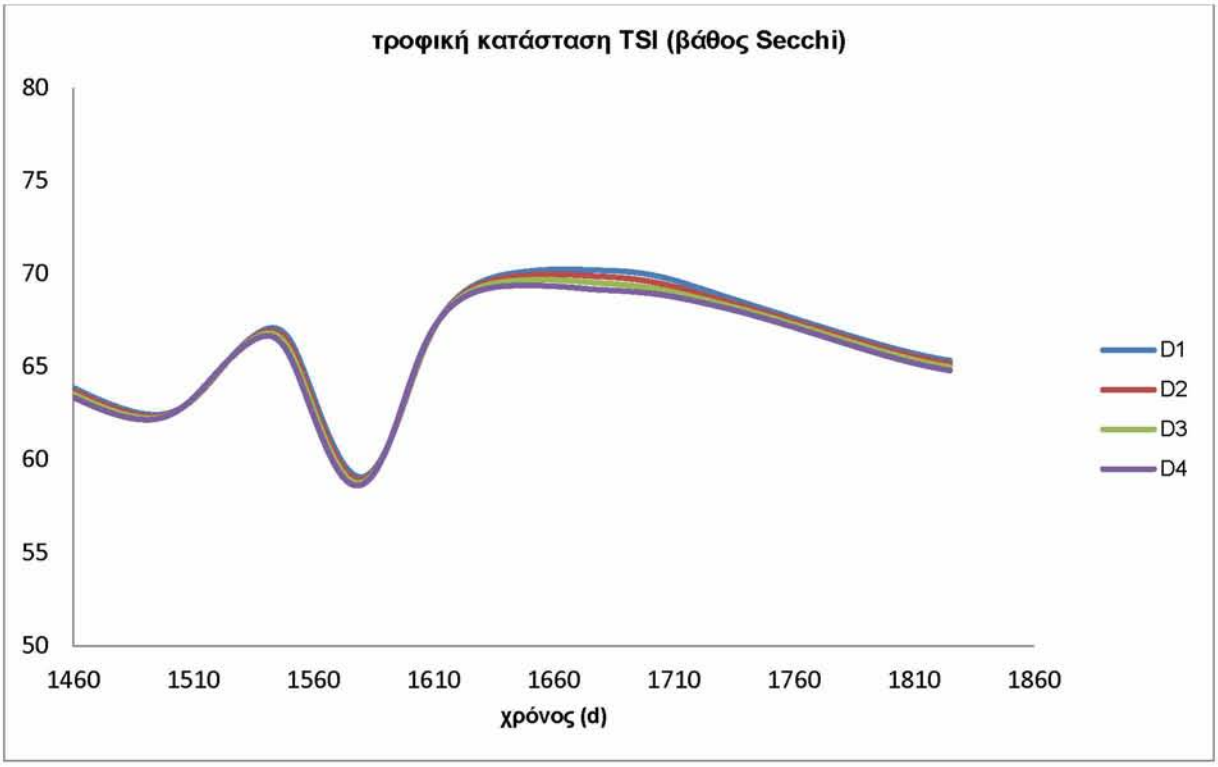


Διάγραμμα 9.62: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



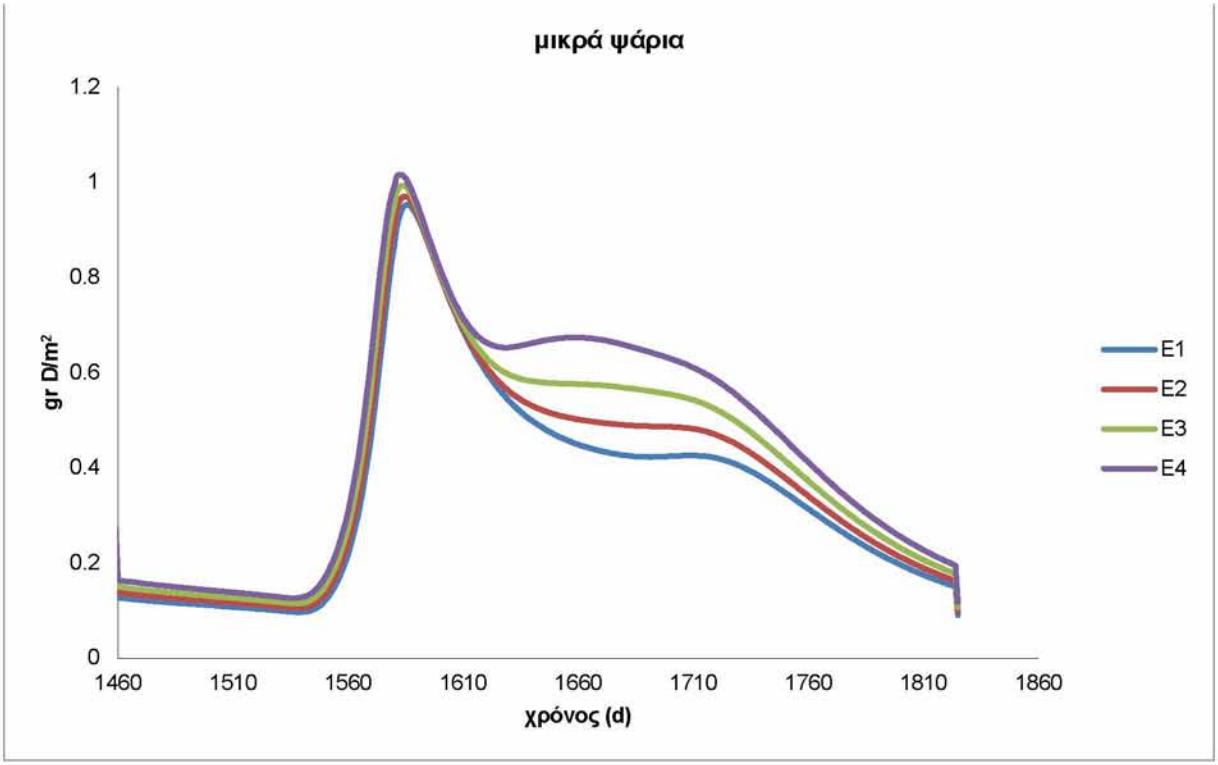
Διάγραμμα 9.63: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D



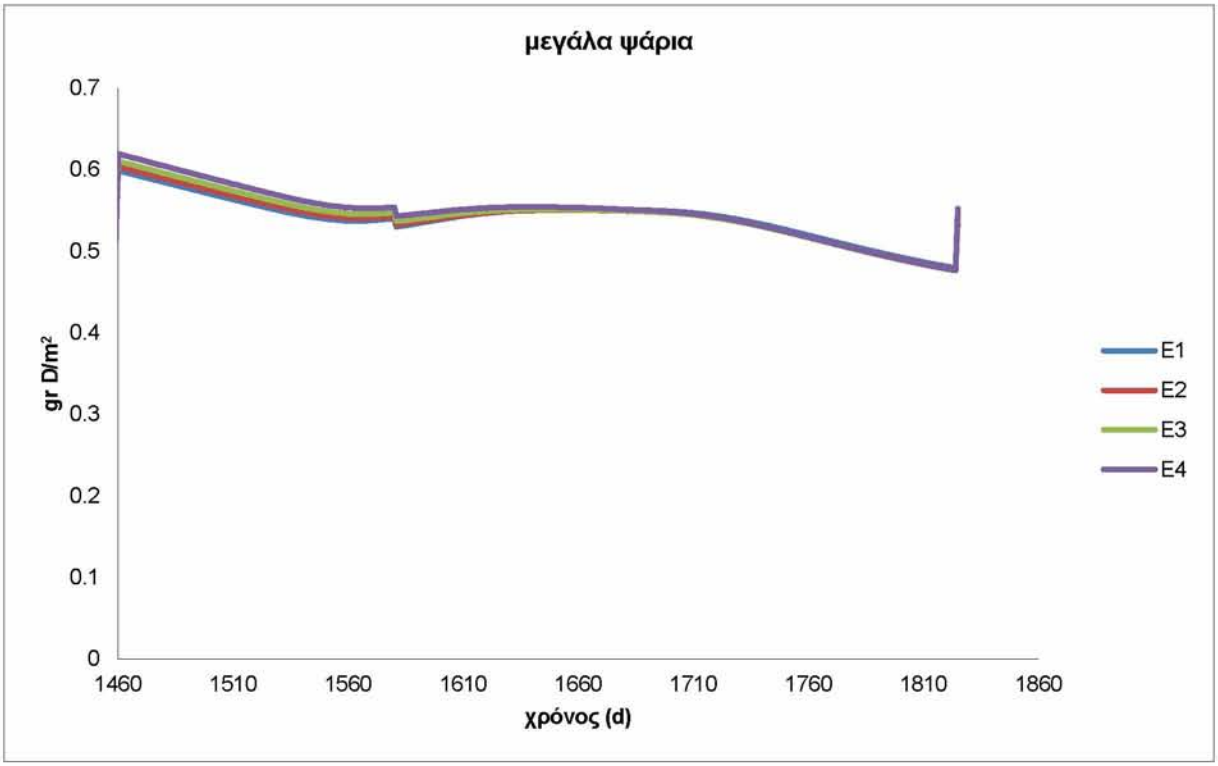
Διάγραμμα 9.64: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης D

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.5 Σχέδια διαχείρισης Ε

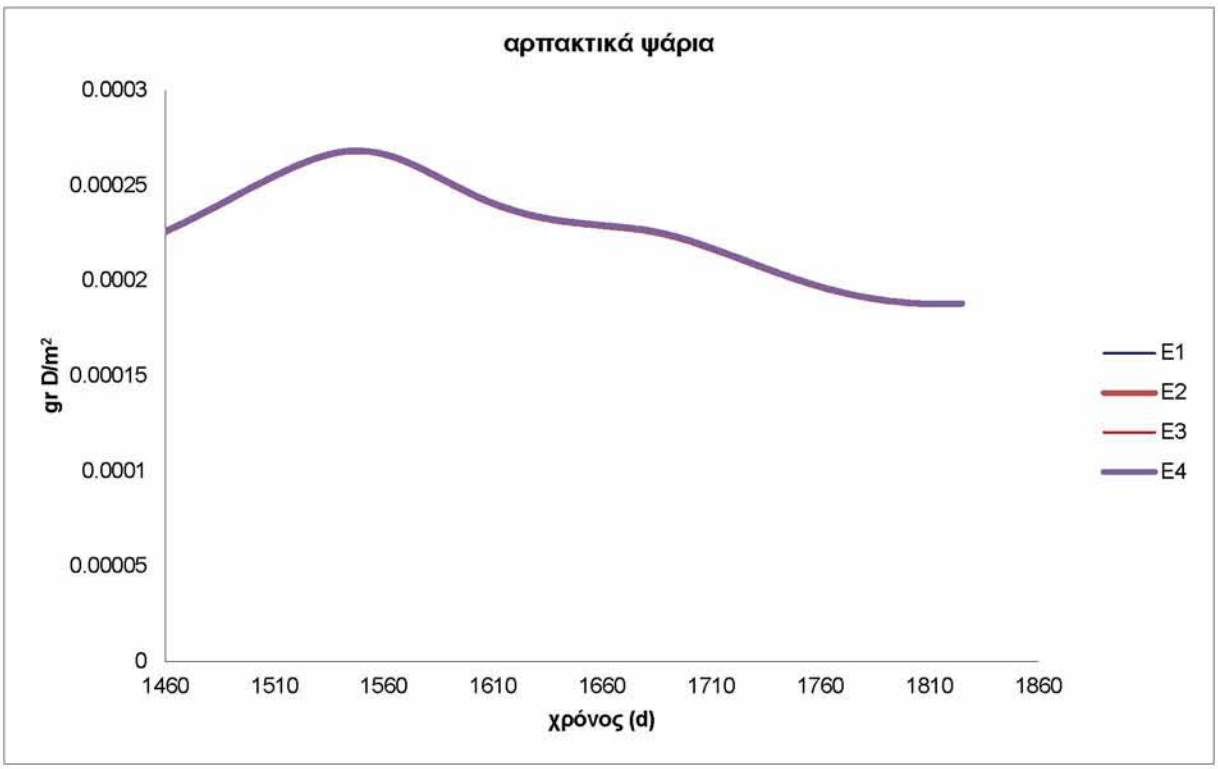


Διάγραμμα 9.65 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

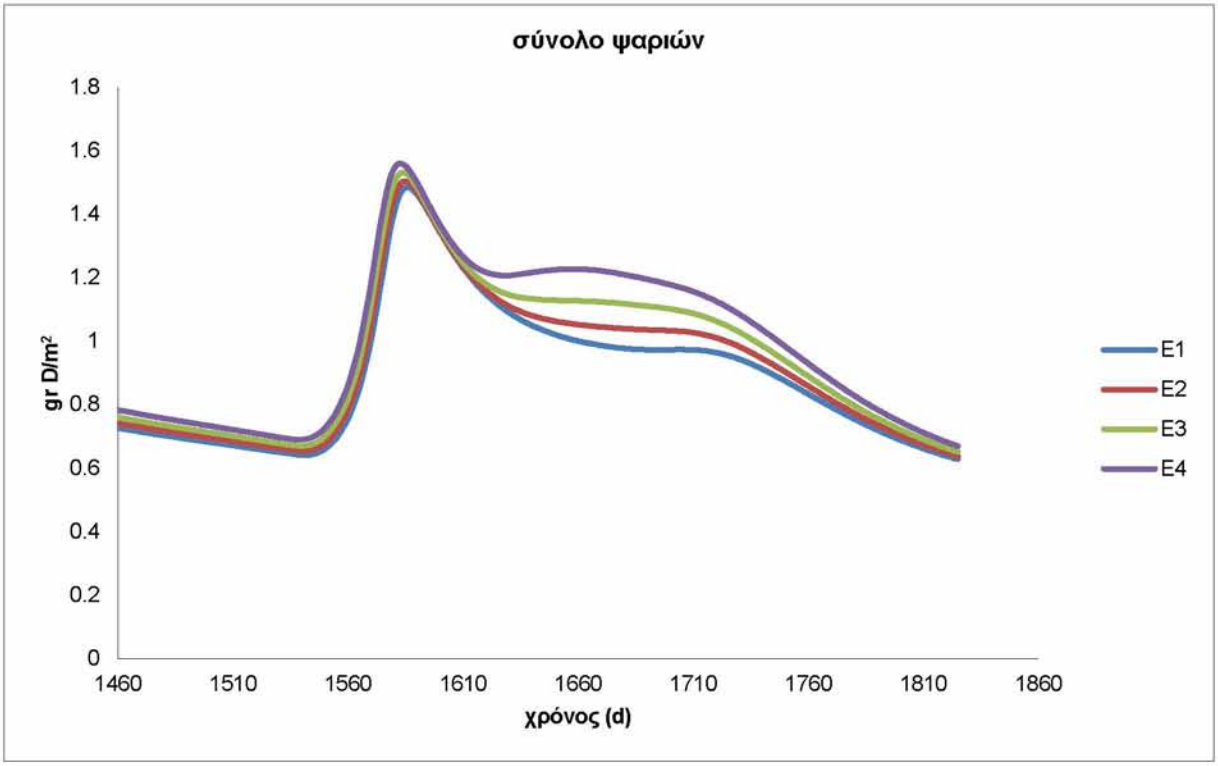


Διάγραμμα 9.66 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

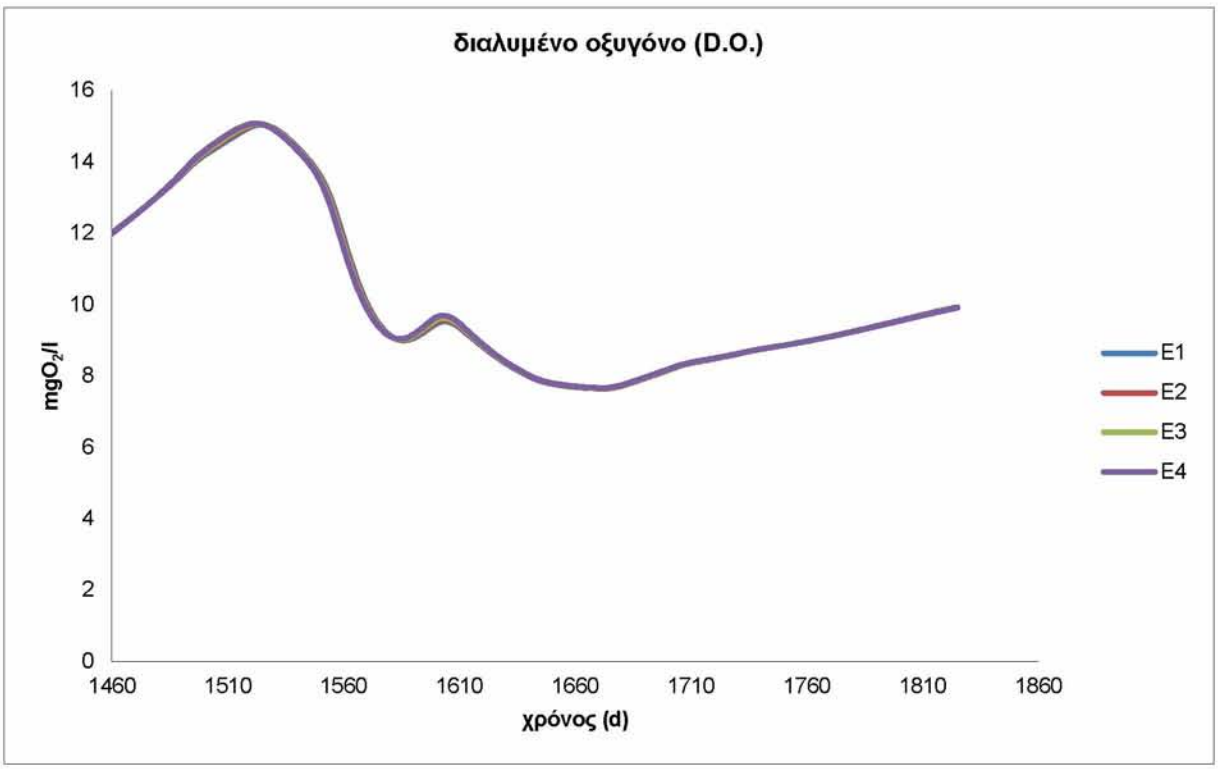


Διάγραμμα 9.67: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης E

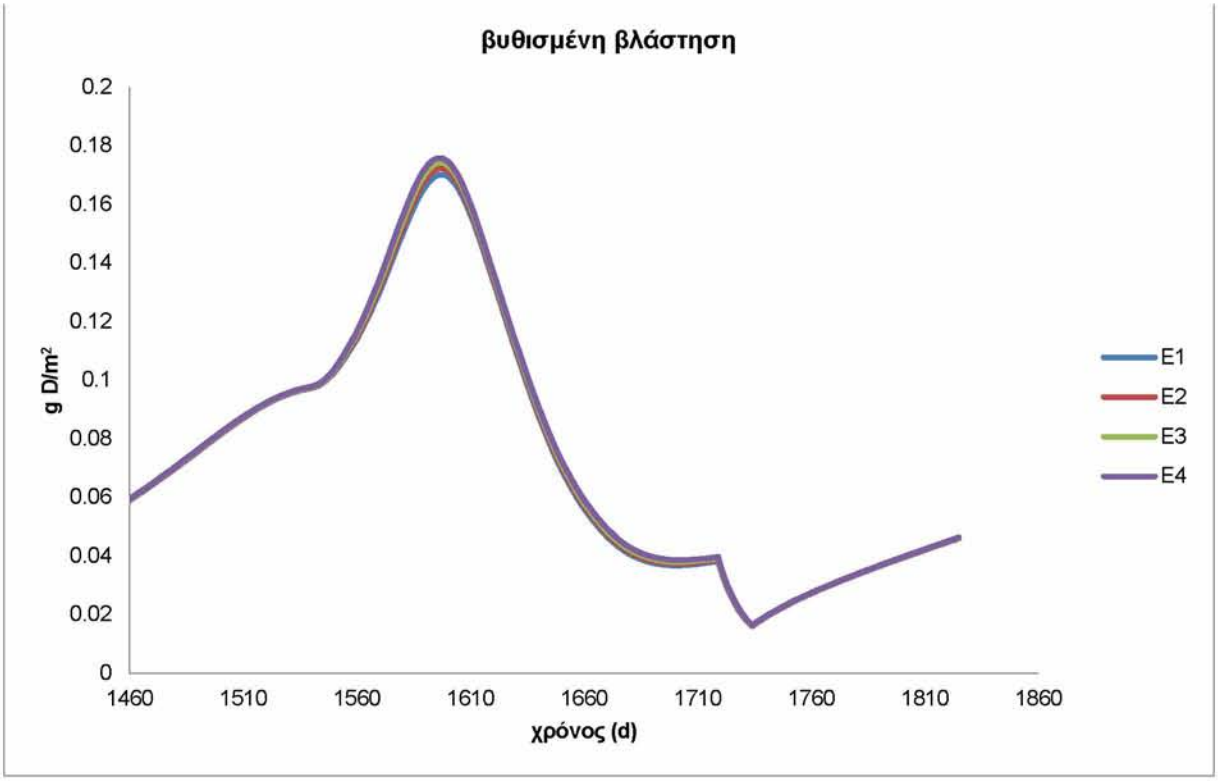


Διάγραμμα 9.68: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης E

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

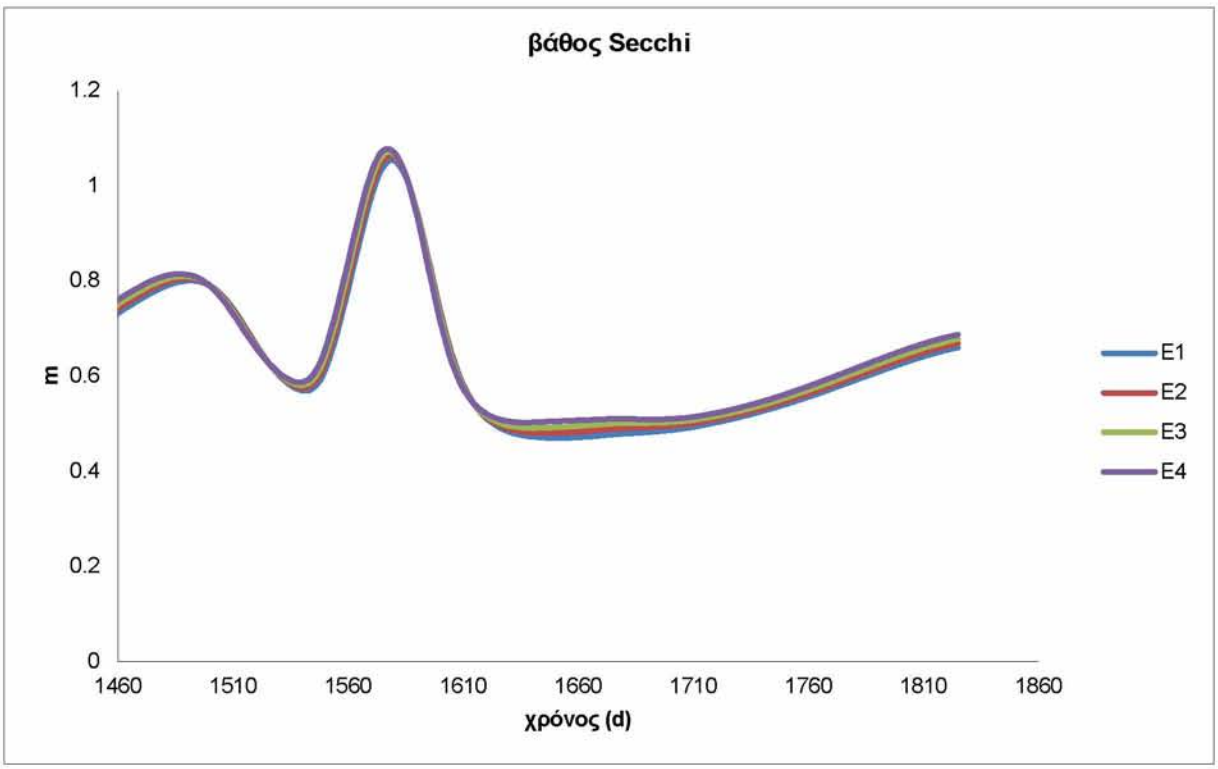


Διάγραμμα 9.69: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

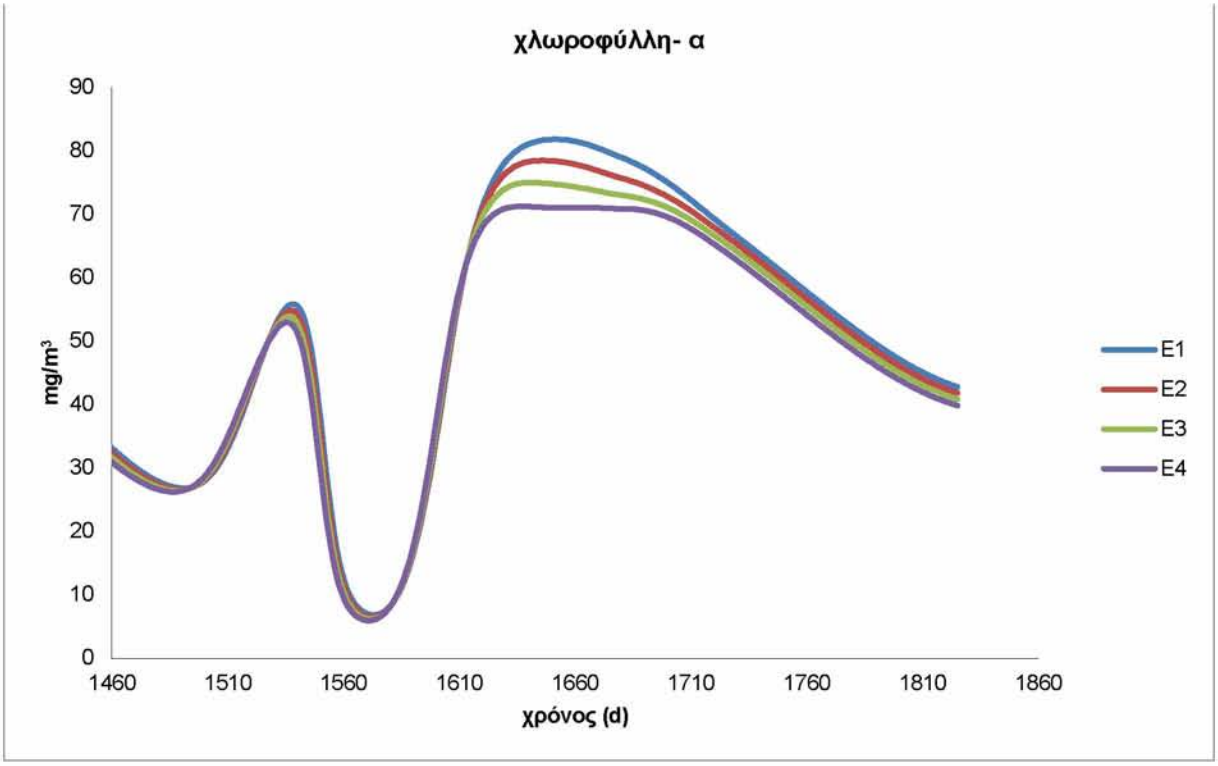


Διάγραμμα 9.70: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

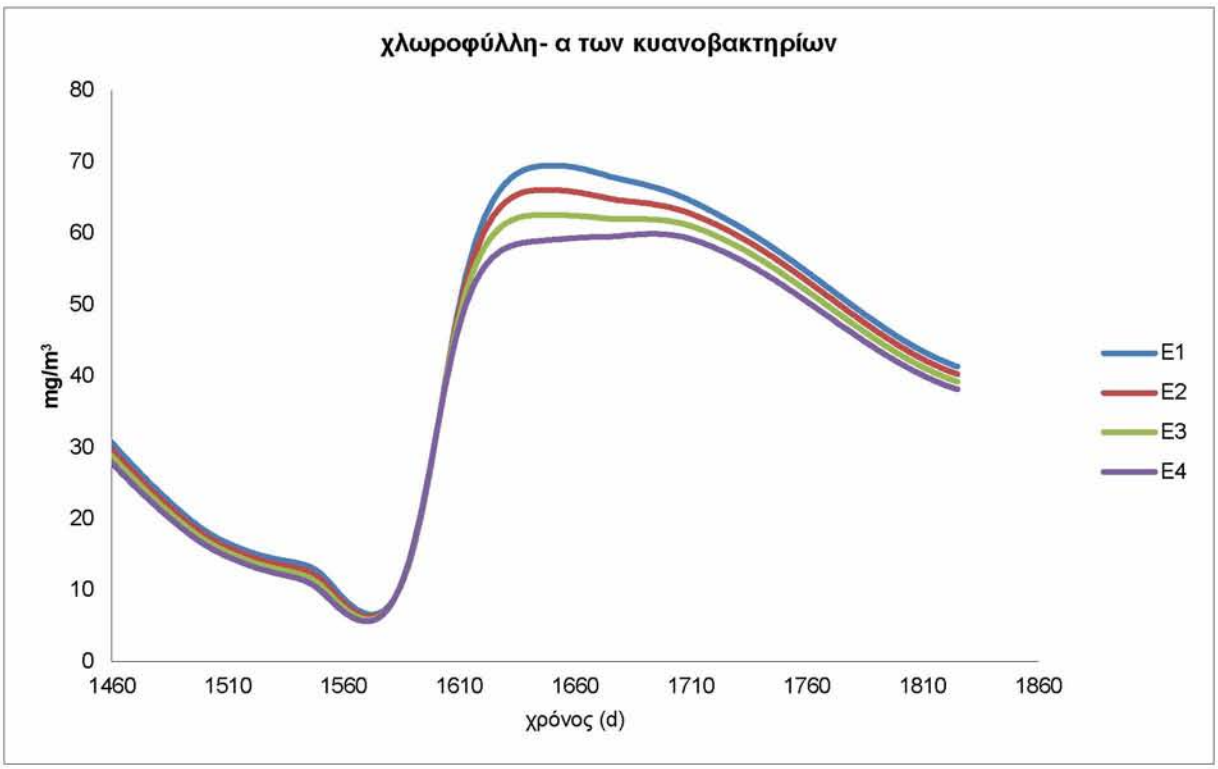


Διάγραμμα 9.71: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

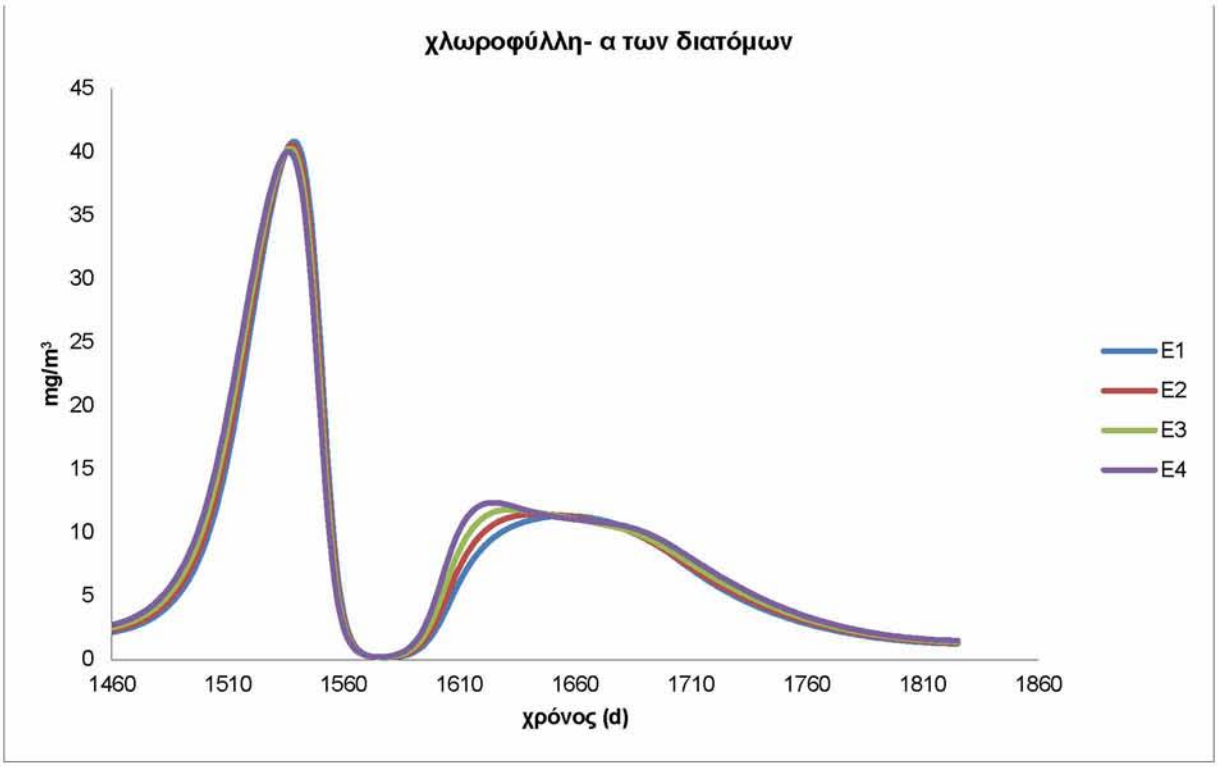


Διάγραμμα 9.72: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 9.73: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

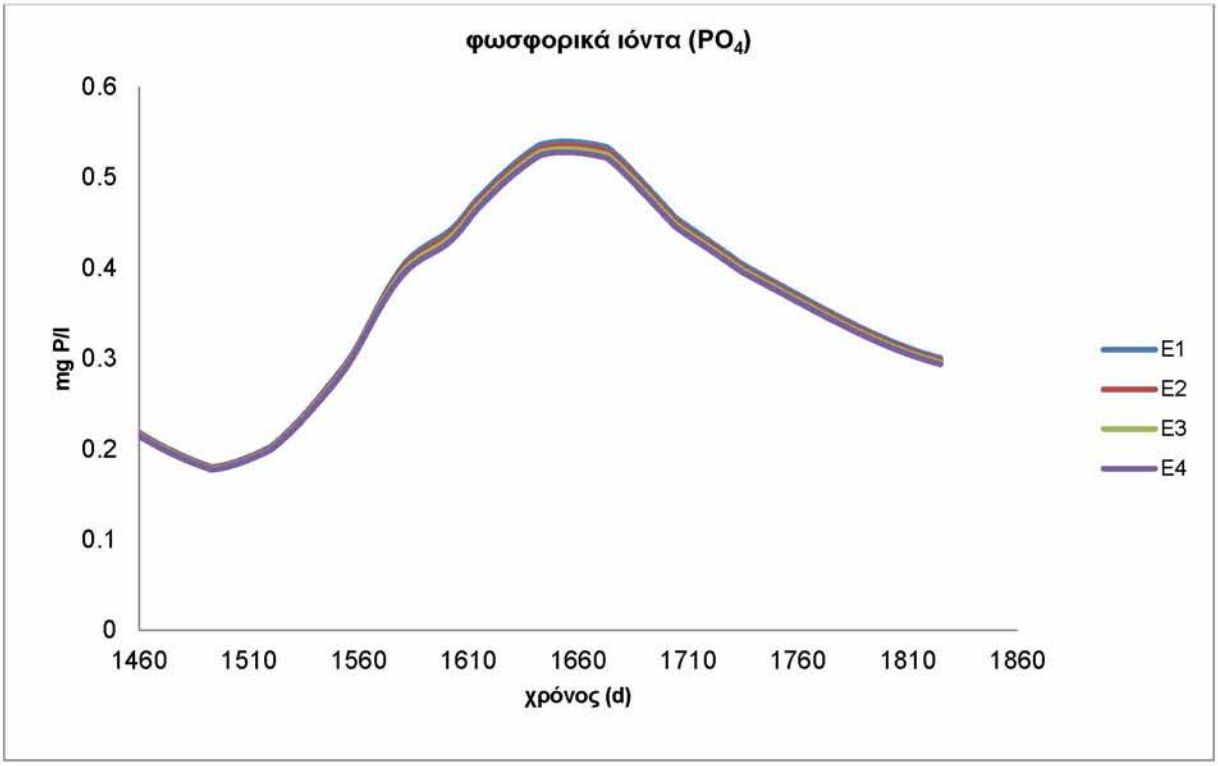


Διάγραμμα 9.74: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

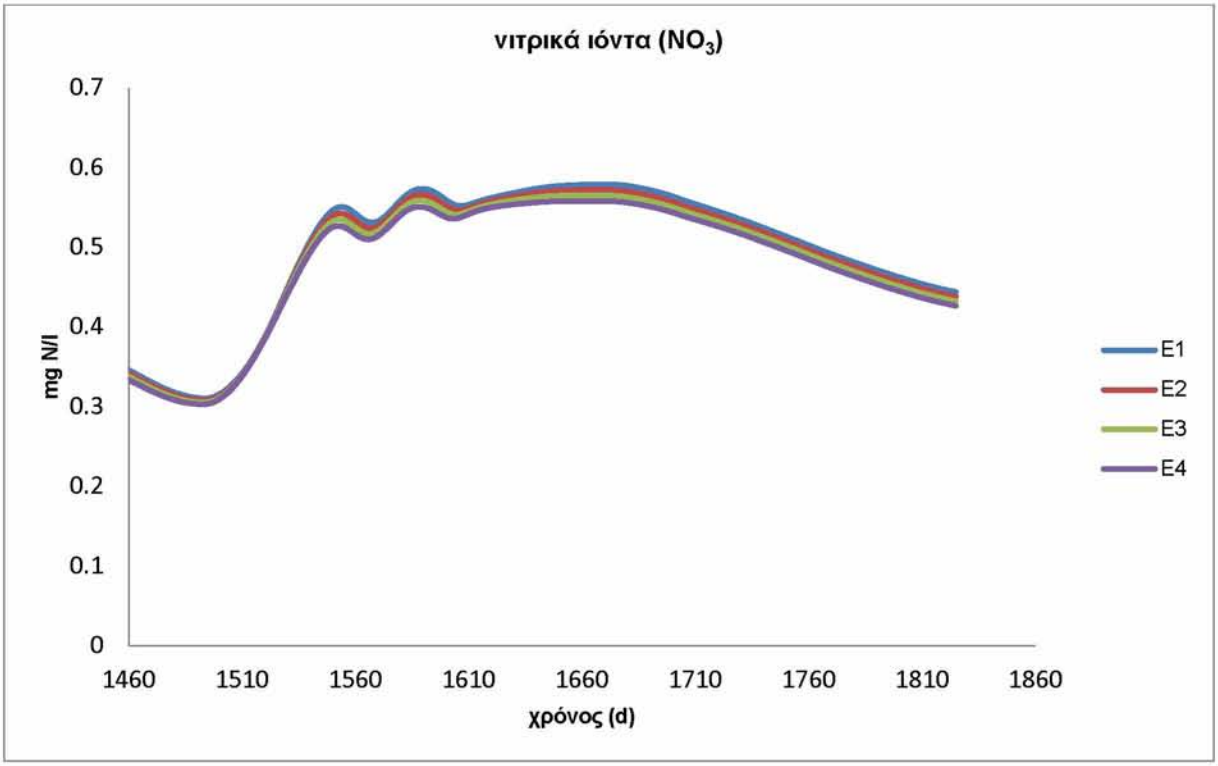


Διάγραμμα 9.75: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

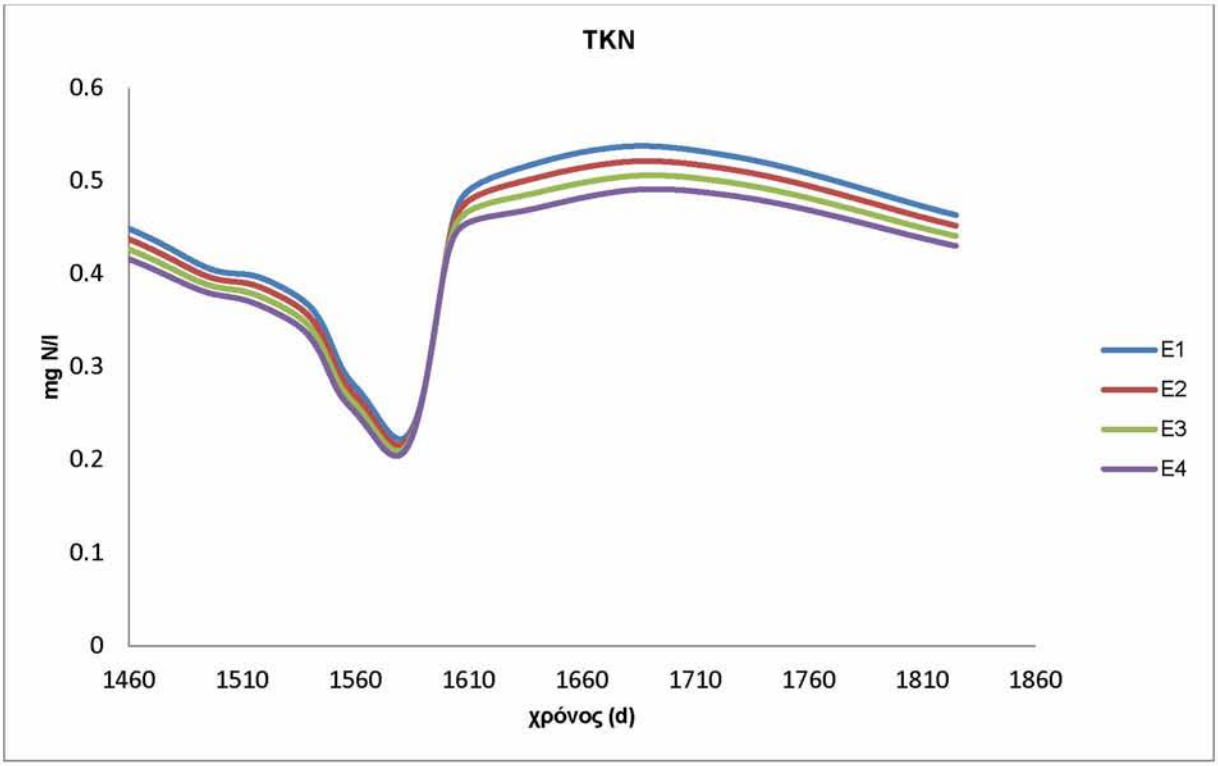


Διάγραμμα 9.76: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

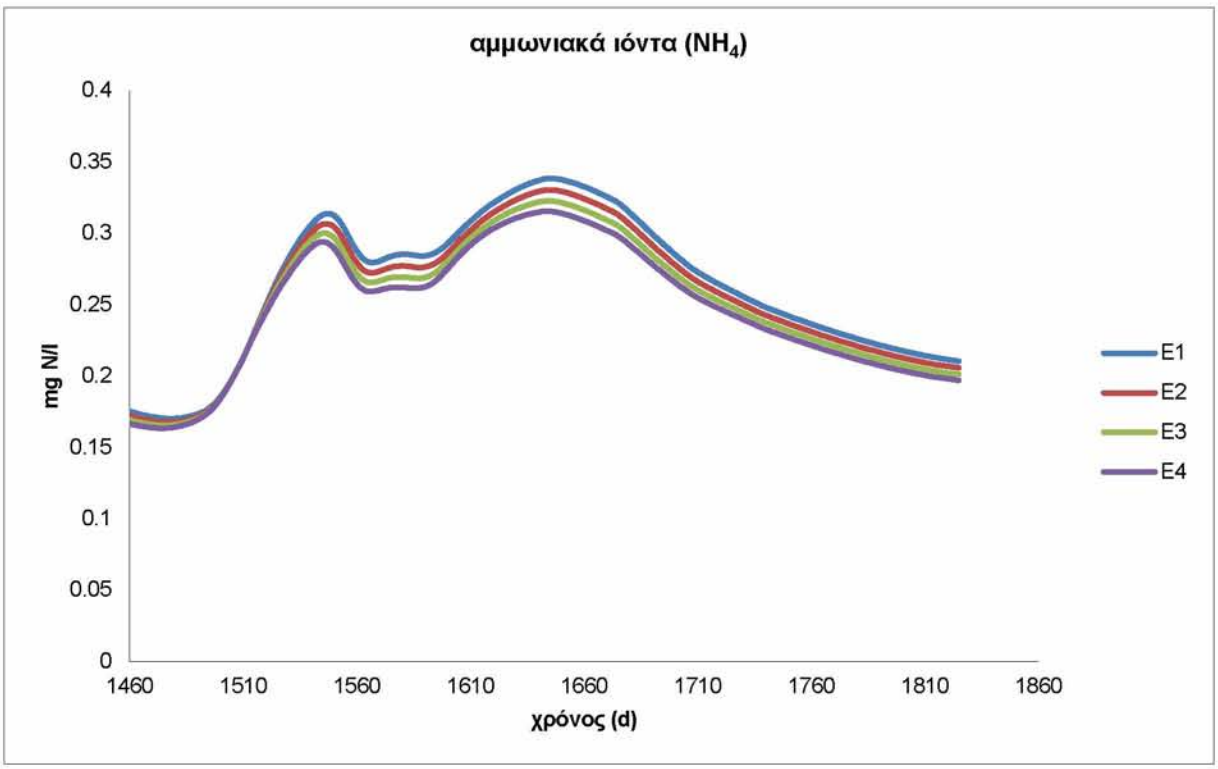


Διάγραμμα 9.77: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

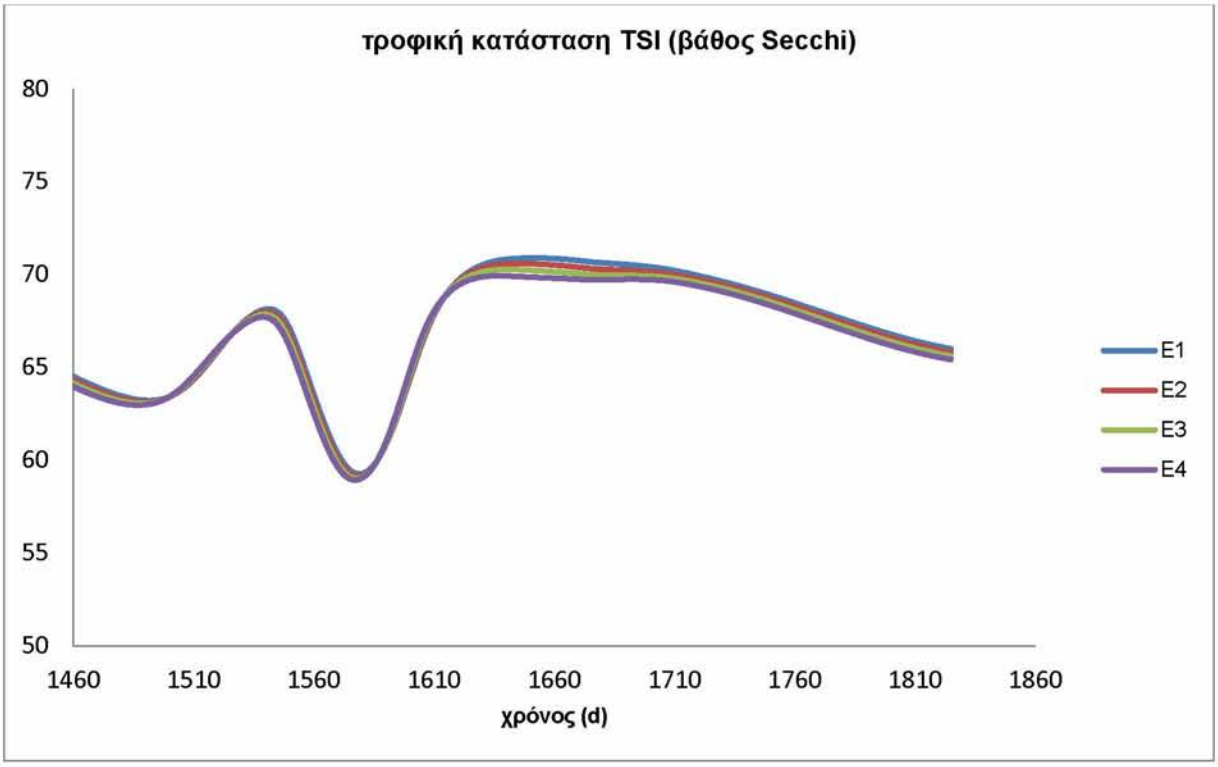


Διάγραμμα 9.78: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



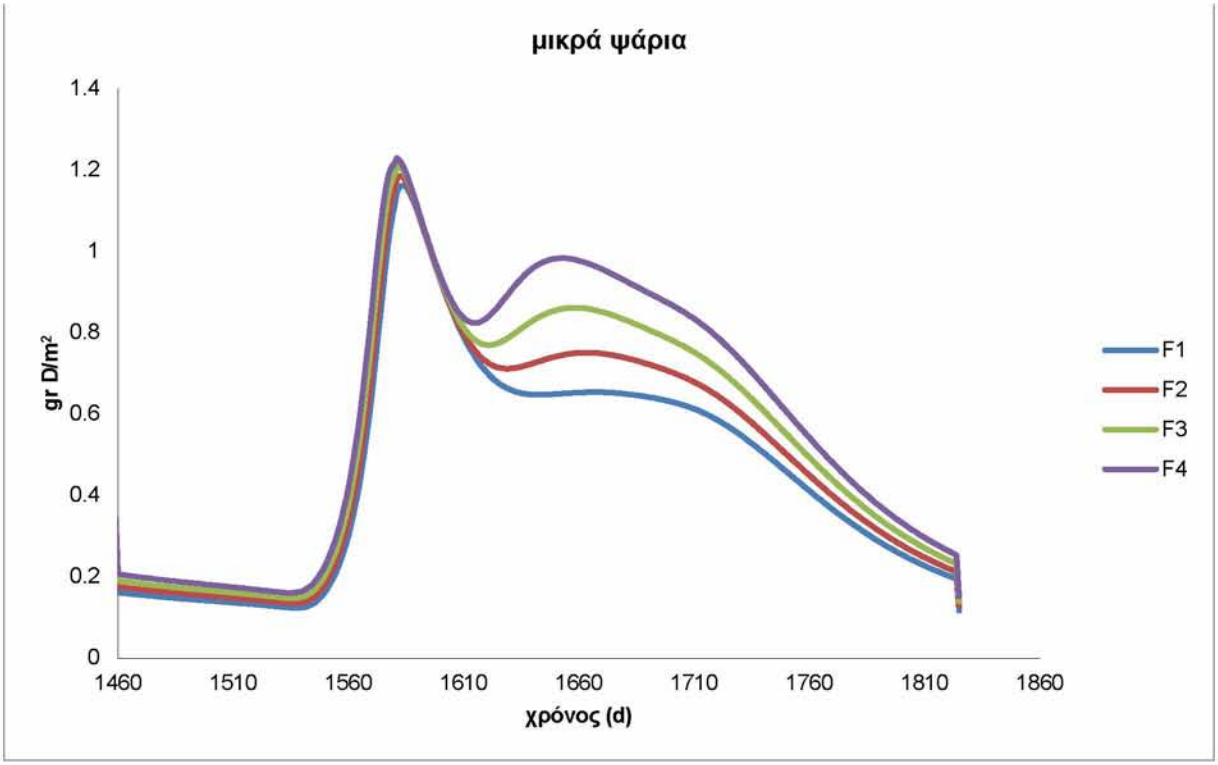
Διάγραμμα 9.79: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε



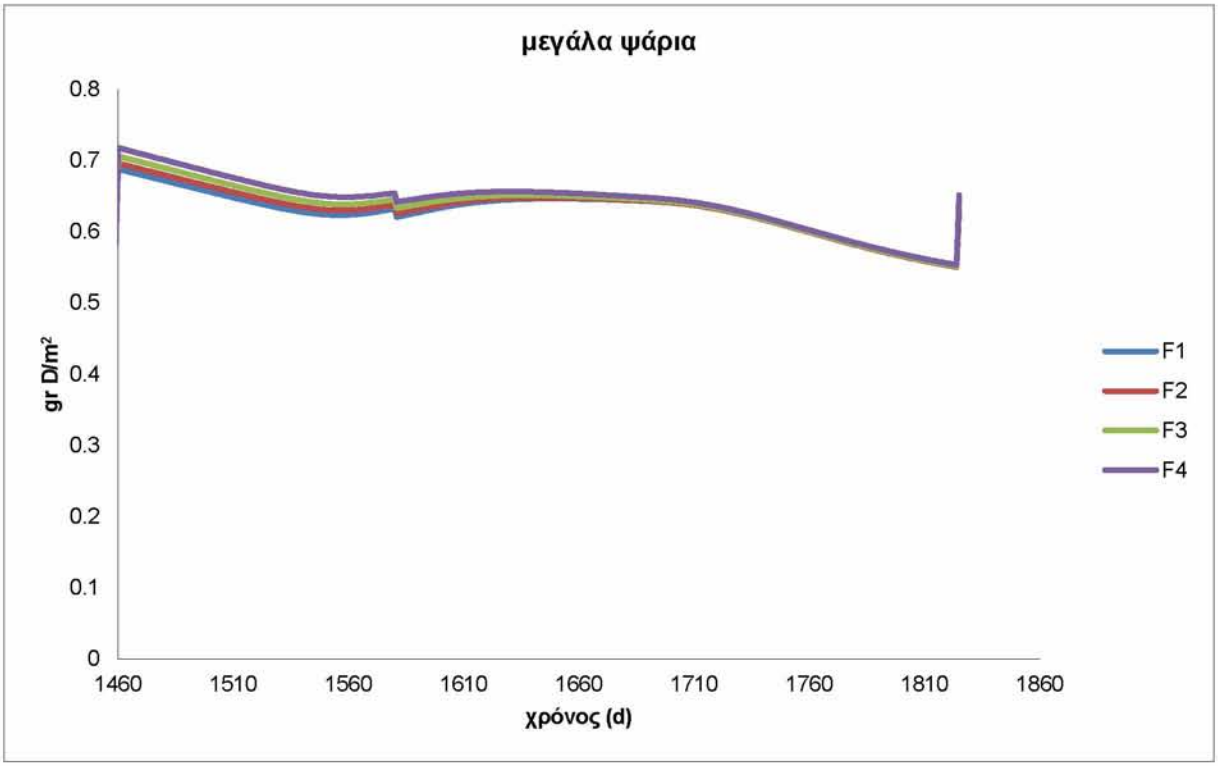
Διάγραμμα 9.80: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης Ε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.6 Σχέδια διαχείρισης F

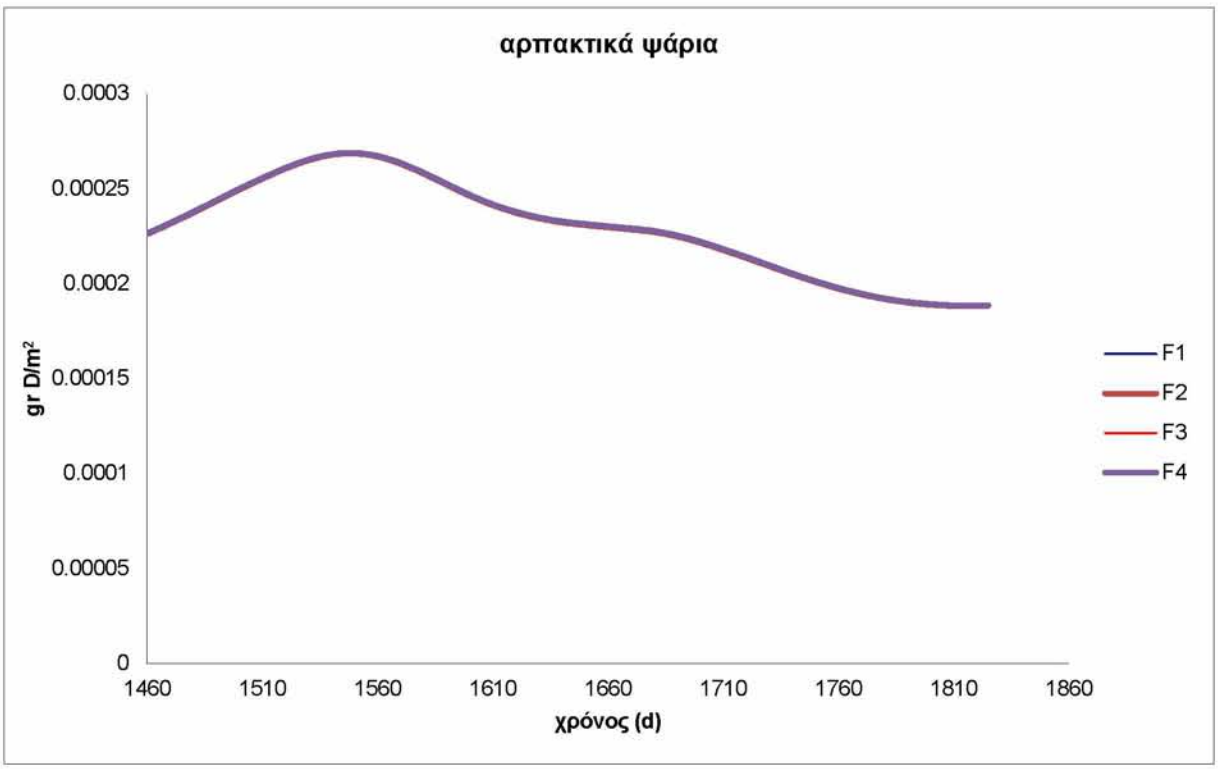


Διάγραμμα 9.81 : μικρά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

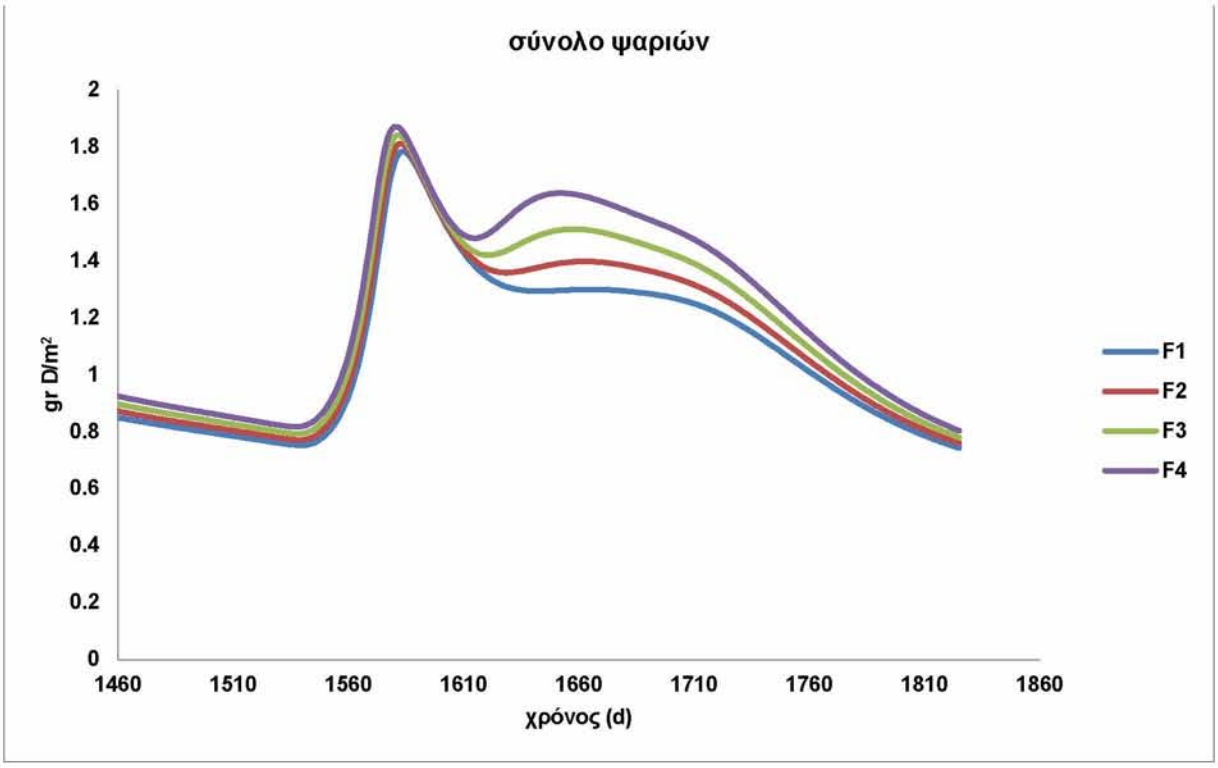


Διάγραμμα 9.82 : μεγάλα ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

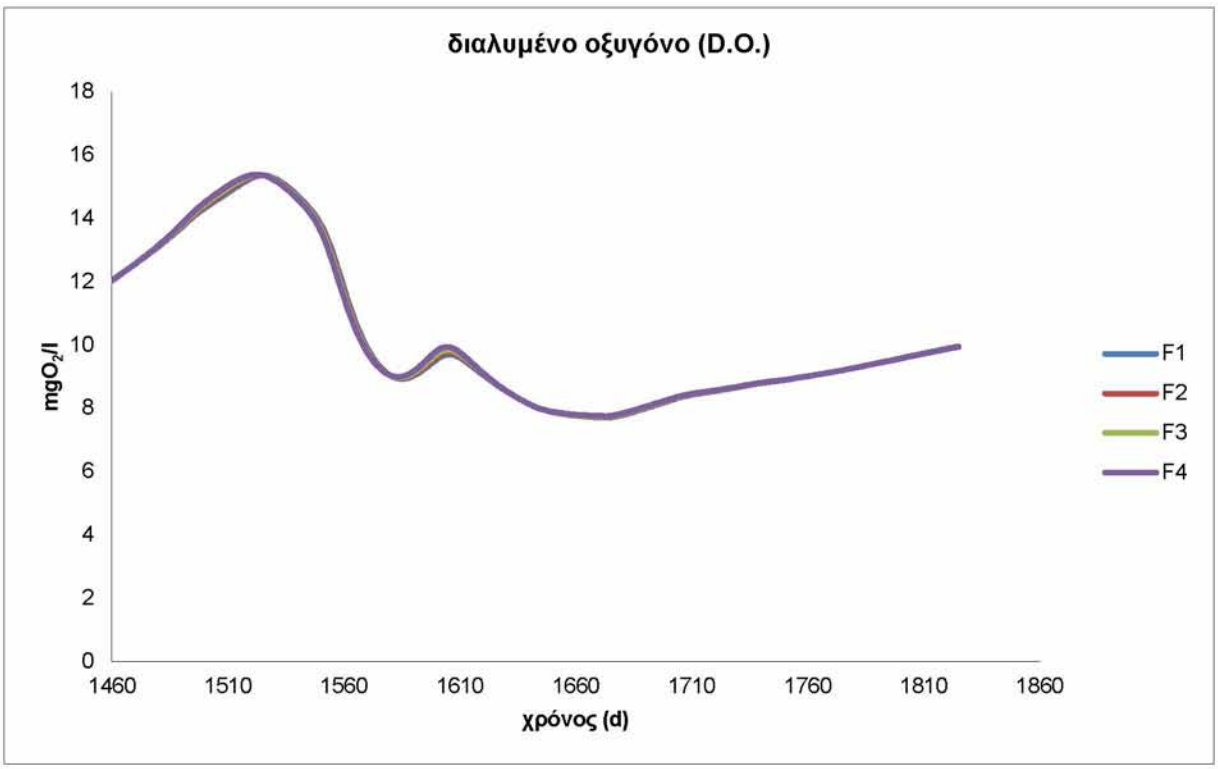


Διάγραμμα 9.83: αρπακτικά ψάρια- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

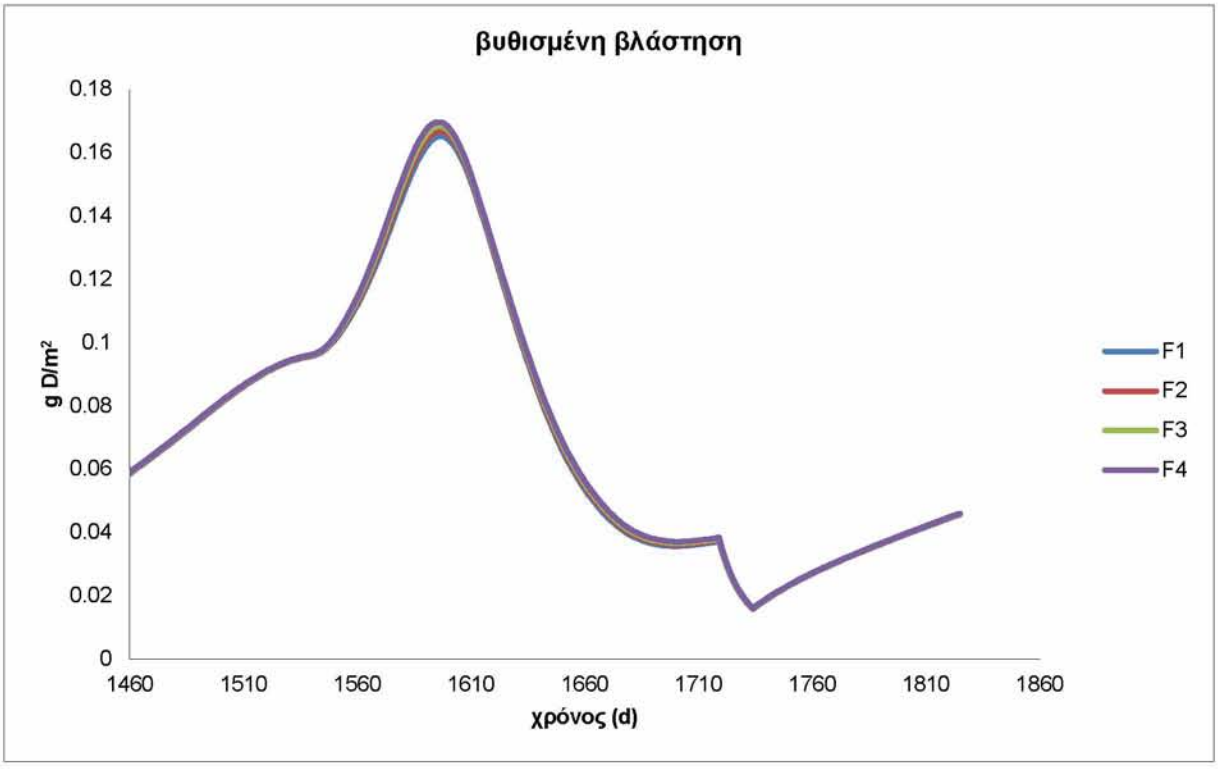


Διάγραμμα 9.84: σύνολο ψαριών- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

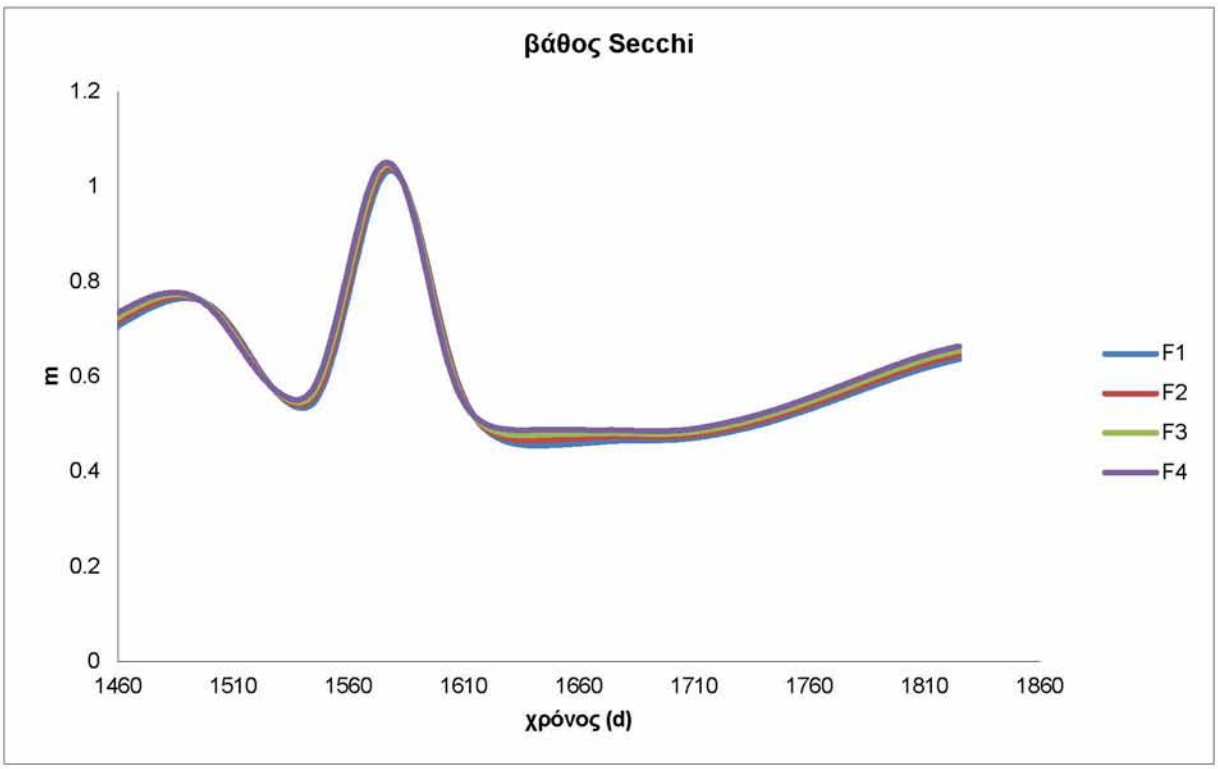


Διάγραμμα 9.85: διαλυμένο οξυγόνο- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

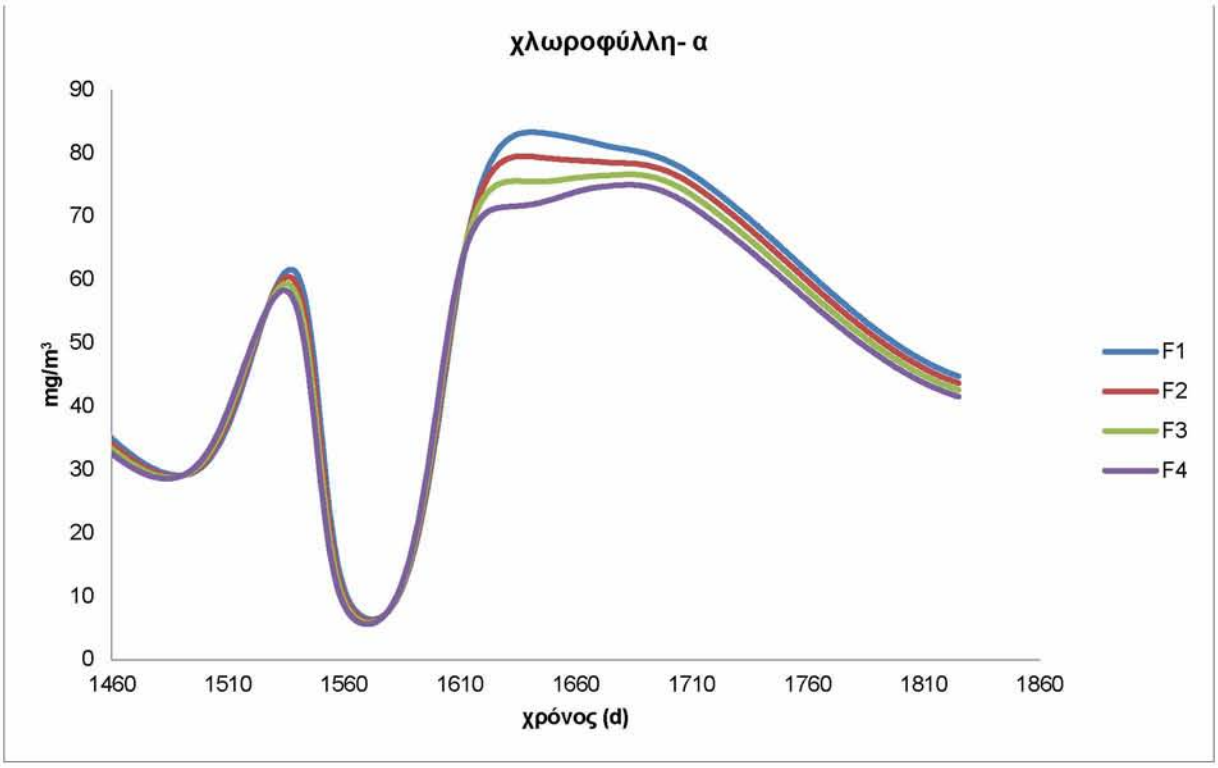


Διάγραμμα 9.86: βυθισμένη βλάστηση- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

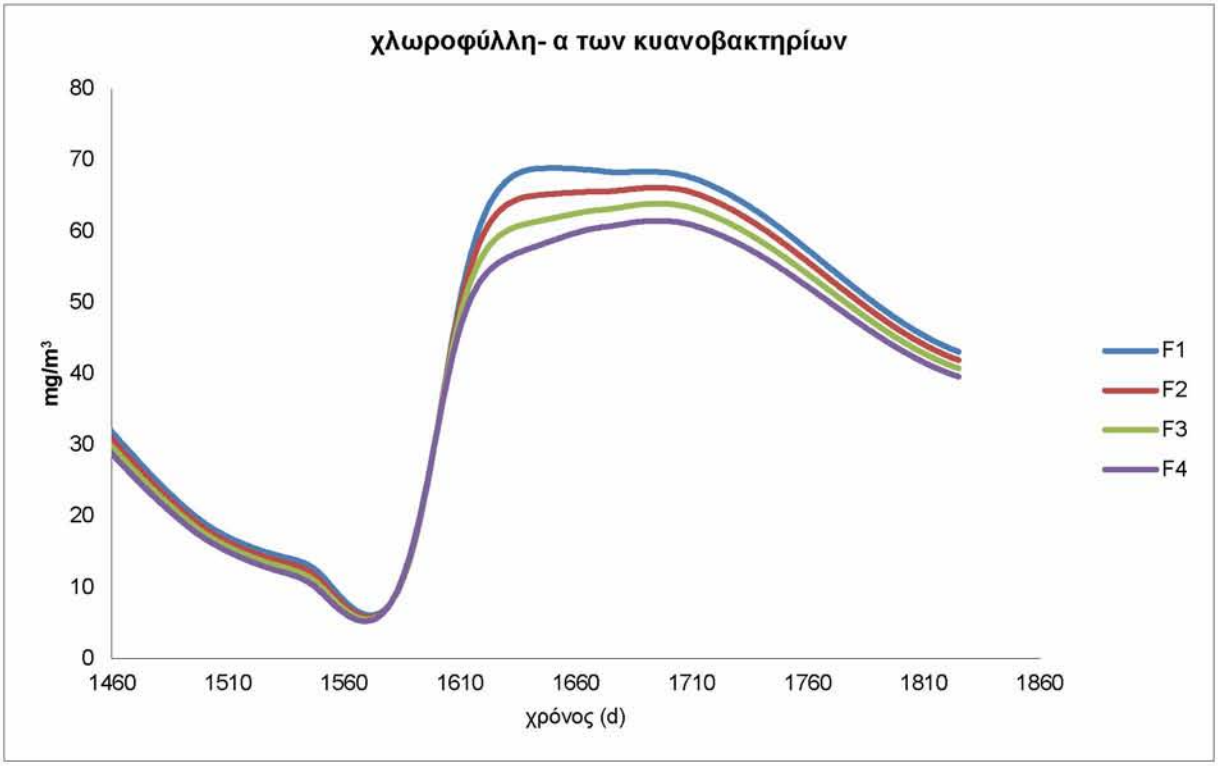


Διάγραμμα 9.87: βάθος Secchi- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

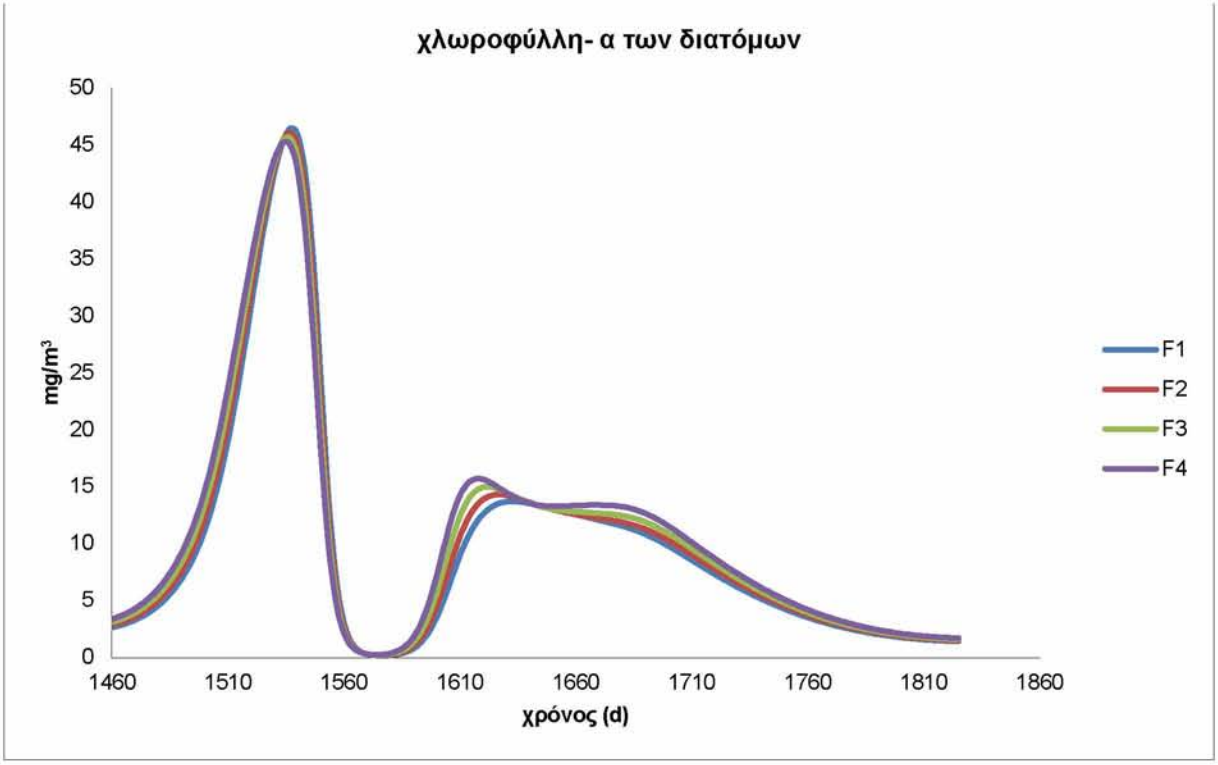


Διάγραμμα 9.88: συνολική χλωροφύλλη-α- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

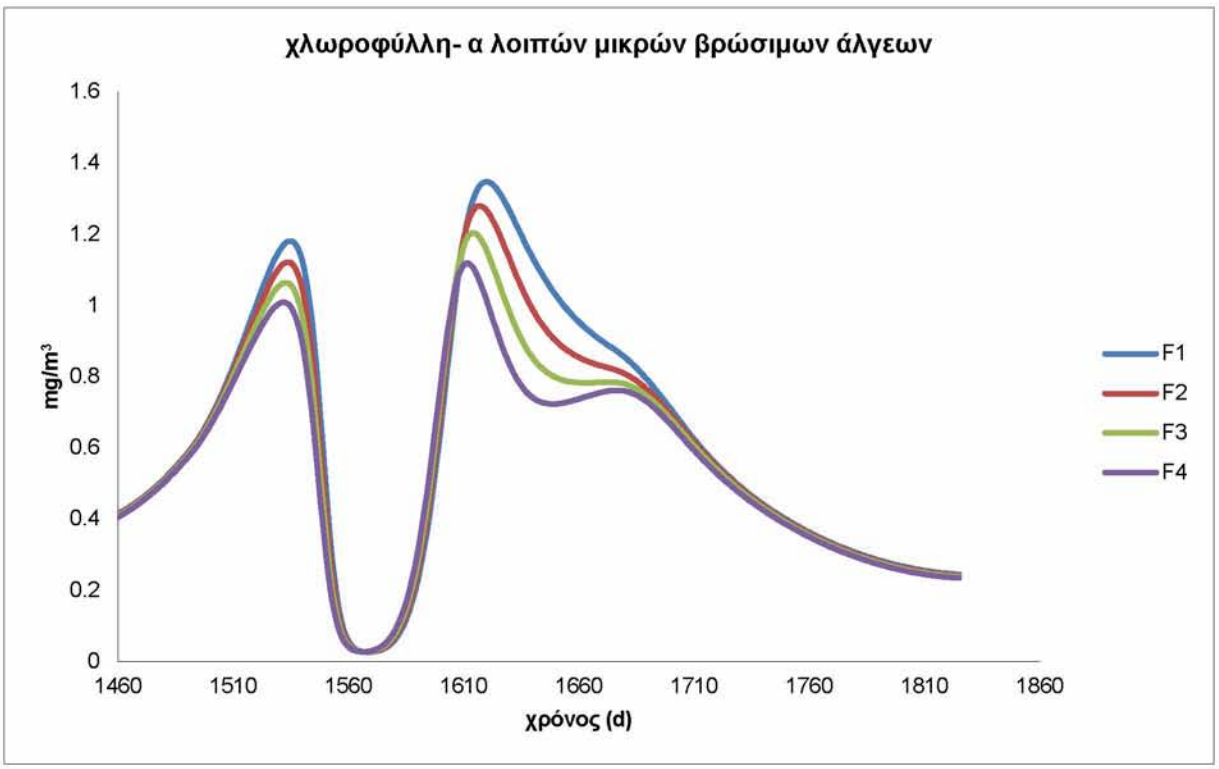


Διάγραμμα 9.89: χλωροφύλλη-α κυανοβακτηρίων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

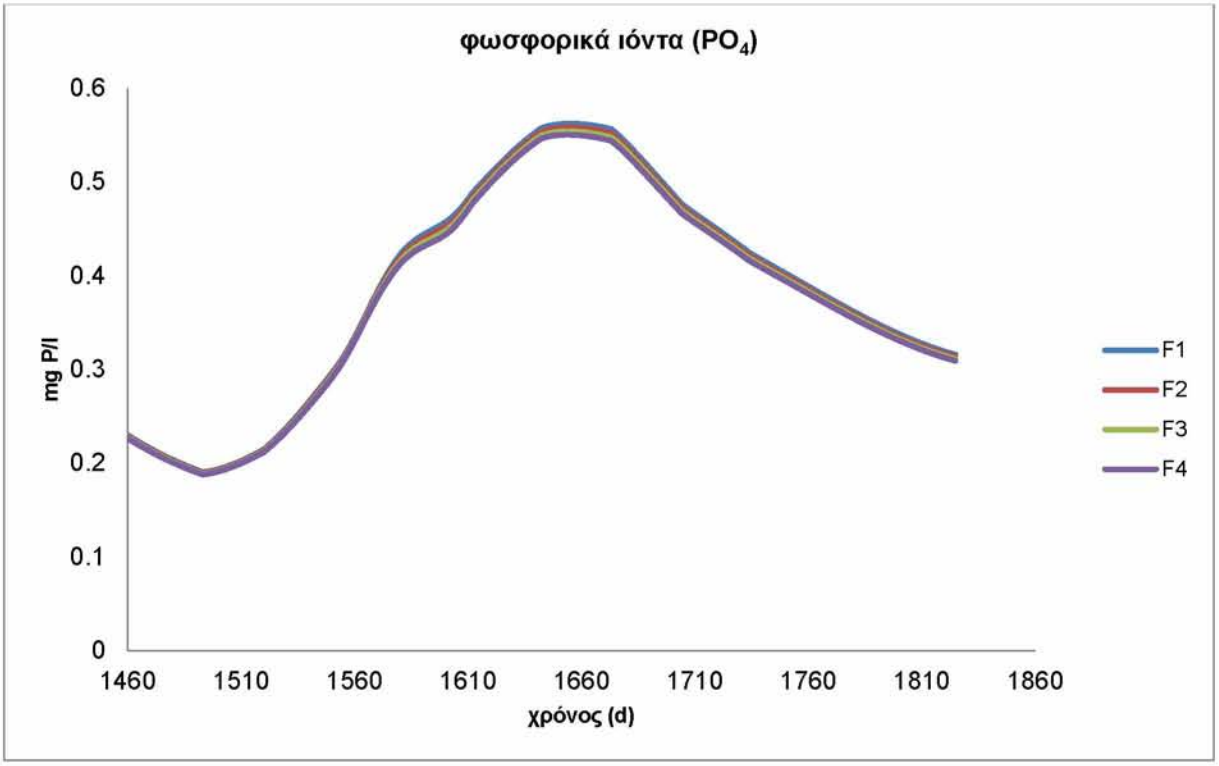


Διάγραμμα 9.90: χλωροφύλλη-α διατόμων- χρόνος για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

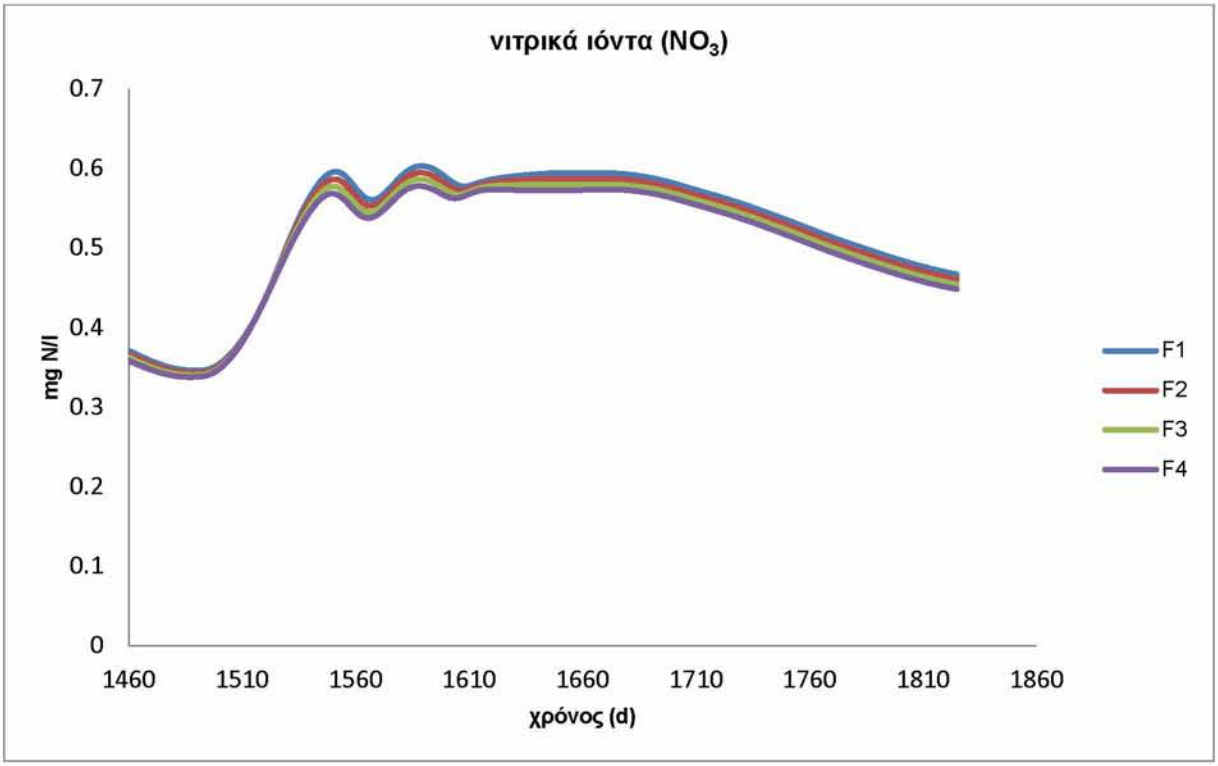


Διάγραμμα 9.91: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

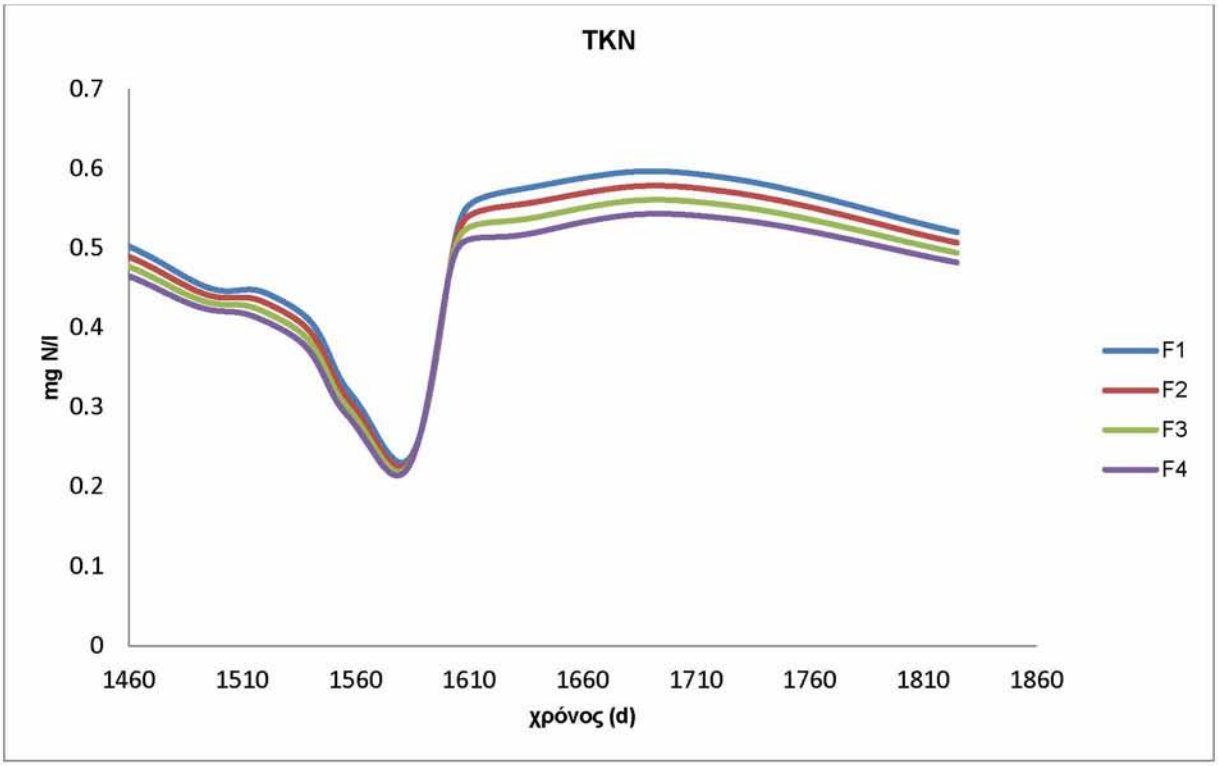


Διάγραμμα 9.92: χλωροφύλλη-α λοιπών μικρών βρώσιμων άλγεων- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

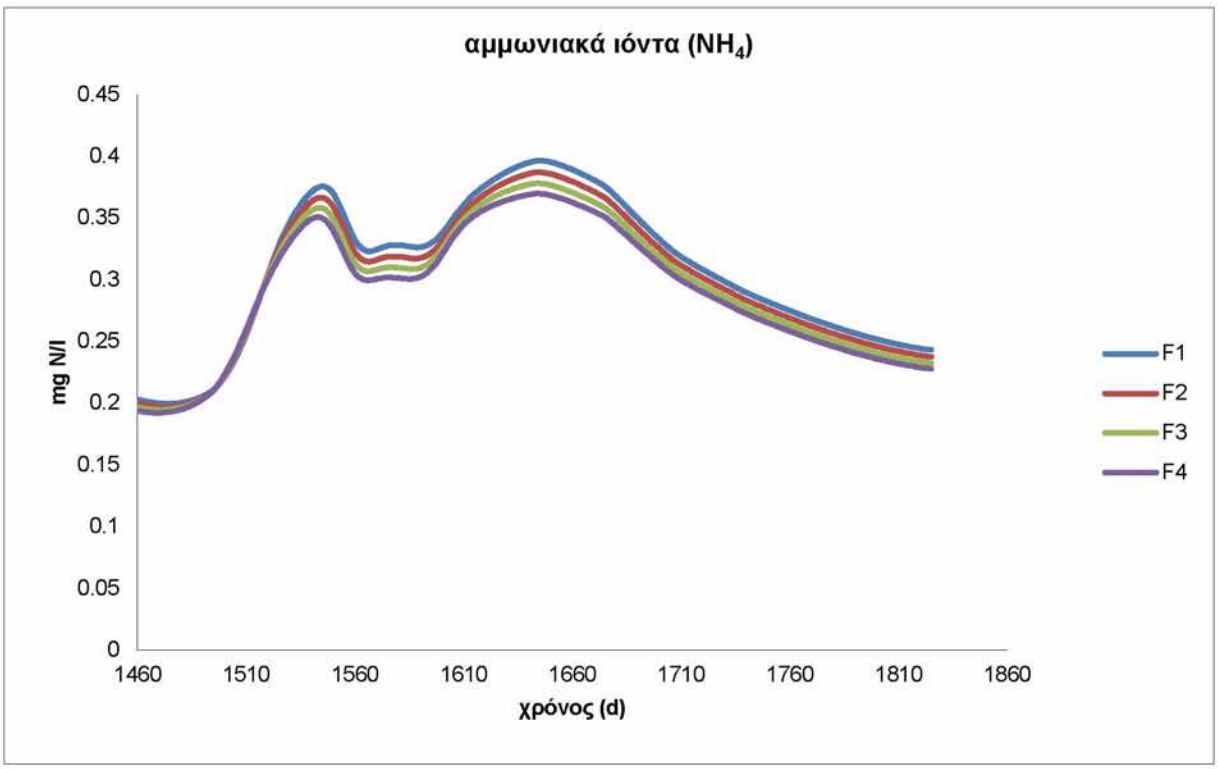


Διάγραμμα 9.93: νιτρικά ιόντα (NO3)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

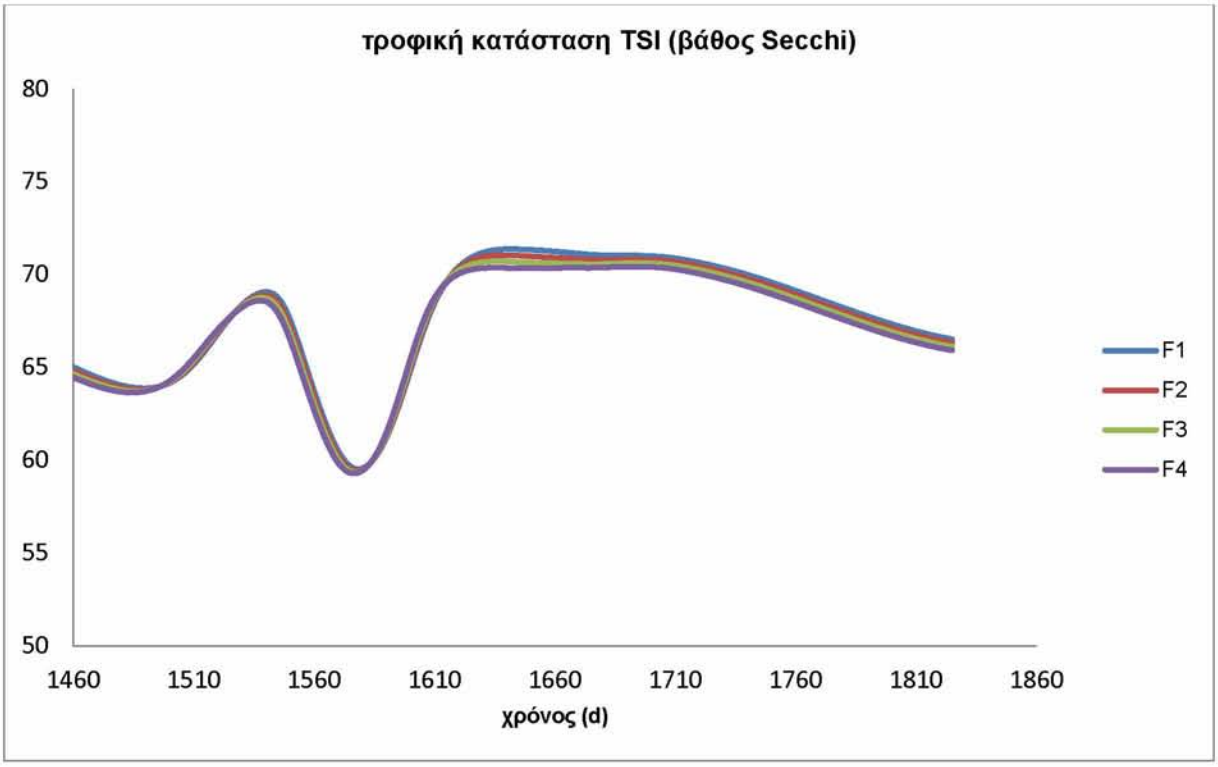


Διάγραμμα 9.94: TKN- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250



Διάγραμμα 9.95: αμμωνιακά ιόντα (NH_4)- χρόνος, για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

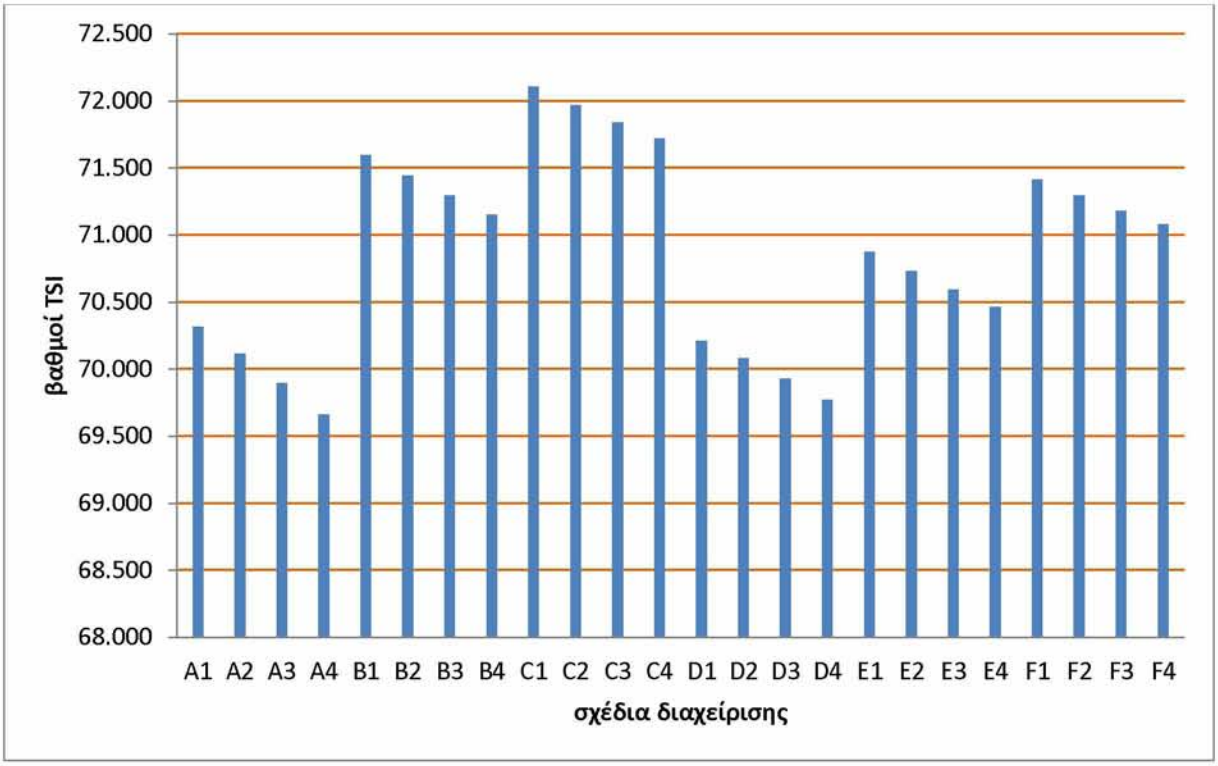


Διάγραμμα 9.96: τροφική κατάσταση TSI(βάθος Secchi) για ένα έτος προσομοίωσης για τα σχέδια διαχείρισης F

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

9.7 Μέση θερινή τροφική κατάσταση της λίμνης για τα διαχειριστικά σενάρια

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 9.97), παρουσιάζονται οι μέσες θερινές τιμές τροφικής κατάστασης σε βαθμούς TSI, για τα διαχειριστικά σενάρια της λίμνης. Όπως φαίνεται όλα τα σχέδια διαχείρισης διατηρούν μέσα θερινά επίπεδα κάτω των 72.1 βαθμών TSI. Γενικά όλα είναι κοντά στο όριο των 70, λειτουργώντας ευεργετικά για την κατάσταση της λίμνης. Ωστόσο, τέσσερα από τα σχέδια βρίσκονται, όντως, κάτω από το όριο. Το σχέδιο A3 έχει τιμή 69.9, το A4 69.7, το D3 69.9 και το D4 69.8. Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι μέσες θερινές, ωστόσο, όπως φαίνεται στα διαγράμματα τροφικής κατάστασης- χρόνου, για όλο το έτος, της προηγούμενης παραγράφου, τα τέσσερα διαχειριστικά σχέδια δεν ξεπερνούν το όριο των 70 για όλο το καλοκαίρι. Από την παρατήρηση του ραβδογράμματος προκύπτει ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα. Όταν αυξάνονται οι κάλαμοι επηρεάζουν δυσανάλογα περισσότερο την λίμνη όταν υπάρχει μεγάλη φόρτιση θρεπτικών, από όταν υπάρχει μικρή. Ενδεικτικά παρατηρούμε ότι ενώ τα σχέδια E και F είναι χαμηλότερα από τα B και C αντίστοιχα, τα D είναι σχεδόν στο ίδιο επίπεδο με τα A. Δηλαδή , στην περίπτωση που ένα σχέδιο διαχείρισης προσδοκεί μείωση των θρεπτικών στα επίπεδα του 6 g $N/m^2/d$, η αύξηση των καλάμων, δεν έχει να προσδώσει τίποτα παραπάνω.



Διάγραμμα 9.97: μέση θερινή τροφική κατάσταση για όλα τα σχέδια διαχείρισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται γενικά αντιληπτό ότι η μοντελοποίηση των συστημάτων, εν προκειμένω των υδατικών οικοσυστημάτων, αποτελεί το μόνο ακριβές και αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης, πρόβλεψης, διαχείρισης και λήψης αποφάσεων. Φυσικά αποτελεί την πιο επίπονη μέθοδο με μεγάλη απαίτηση υπολογιστικού χρόνου και κόπου, με προϋπόθεση την επάρκεια γνώσης των δεδομένων του συστήματος και την απαραίτητη τεχνογνωσία. Η μέθοδος της προσομοίωσης πλεονεκτεί ως προς την ανάδειξη τάσεων και επιδράσεων που δεν είναι εύκολο να προβλεφθούν χωρίς αυτή. Το μοντέλο προσομοίωσης PCLake αποδείχτηκε η πλέον ιδανική επιλογή για την προσομοίωση της λίμνης Κάρλας. Αρχικά, το PCLake παρέχει μεγάλη δυνατότητα παραμετροποίησης, συγχρόνως παρέχοντας την ελευθερία στον χρήστη να παρακάμψει τις άγνωστες παραμέτρους χωρίς να δημιουργηθεί κάποιο σφάλμα. Επιπλέον, το μοντέλο χωρίζεται σε υπορουτίνες που λειτουργούν ανεξάρτητα και επομένως δε μεταφέρονται τα σφάλματα από τη μία στην άλλη. Τέλος, το PCLake έχει την ικανότητα να παρακάμψει την ανακρίβεια των αρχικών συνθηκών σε σύντομο χρονικό διάστημα και μάλιστα μικρότερου της διετίας προσομοίωσης.

Από την προσομοίωση της λίμνης πρωτίστως προκύπτει ο άμεσος κίνδυνος υδρολογικού αφανισμού της λίμνης, ενώ υπολογίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη μέση υδραυλική παροχή ώστε να αποτραπεί η δυσάρεστη αυτή συνέπεια, ίση περίπου με 10 mm/d (χωρίς τη βροχόπτωση). Δευτερευόντως, αλλά εξίσου σημαντικά, αναδεικνύεται η μεγάλη ποιοτική υποβάθμιση της λίμνης, η οποία βρίσκεται σε υπερευτροφική κατάσταση. Από την προσομοίωση της λίμνης Κάρλας προκύπτει η αλληλένδετη σχέση της ποσότητας και της ποιότητάς της.

Αναδεικνύεται ως σημαντική παράμετρος επίδρασης στην τροφική κατάσταση της λίμνης ο χρόνος παραμονής του νερού. Η τροφική κατάσταση της λίμνης εκφρασμένη σε TSI ακολουθεί περίπου την τάση της χλωροφύλλης-α. Όπως είναι αναμενόμενο, για μεγαλύτερες παροχές εισόδου, μικρούς χρόνους παραμονής και άρα γρήγορο ξέπλυμα του νερού της λίμνης, η τροφική κατάστασή της βελτιώνεται αισθητά. Με την μέγιστη παροχή που ελέγχεται, ακραία και μη εφικτή περίπτωση, η τροφική κατάσταση βελτιώνεται στην τάξη της μείωσης βαθμών TSI κατά 10 % περίπου, πάντα παραμένοντας πάνω από το όριο των 70 βαθμών. Αυτό σημαίνει ότι στο δεδομένο χαμηλό βάθος της λίμνης και χωρίς άλλα μέτρα διαχείρισης, δεν είναι δυνατόν να αναβαθμιστεί η κατηγορία της λίμνης από υπερευτροφική σε ευτροφική, ωστόσο μπορεί να βελτιωθεί αισθητά.

Καθοριστική παράμετρος είναι η φόρτιση θρεπτικών. Η τροφική κατάσταση κυμαίνεται από 70 έως 90 βαθμούς TSI για φόρτιση από 0 έως 30 $g/m^2/d$. Ακόμα και στην καλύτερη των περιπτώσεων, για χαμηλή και μέση στάθμη λίμνης, η λίμνη δεν είναι δυνατόν να αναβαθμιστεί σε ευτροφική από υπερευτροφική με μόνο σχέδιο διαχείρισης τη μείωση των θρεπτικών.

Η επικάλυψη με περιοχές καλάμων, αποτελεί ένα μέτρο διαχείρισης που προτείνεται στη βιβλιογραφία. Από μόνο του, επίσης, προκύπτει από την προσομοίωση ότι δεν δύναται να αναβαθμίσει τη λίμνη. Ωστόσο μία αύξηση των περιοχών αυτών θα λειτουργούσε ευεργετικά.

Η κλιματική αλλαγή, θερμοκρασιακή αύξηση στην ουσία, επηρεάζει με πολλούς τρόπους, άμεσους και έμμεσους την τροφική κατάσταση της λίμνης. Στην ουσία επιφέρει επιδείνωση, αν και αυτή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως εντυπωσιακή. (Loukas et al 2007)

Τα σχέδια που διερευνώνται και προσομοιώνονται αφορούν σε μέση υδραυλική παροχή από 17 έως 20 mm/d (συμπεριλαμβανομένης της βροχόπτωσης), σε μέση φόρτιση Αζώτου (N) από 6 έως 8 $g\ N/m^2/d$ και περιοχή κάλυψης με καλάμους 20 και 30% (με επιφυλακτικά ακραία τιμή το 30% ως προς την εφαρμοσιμότητα). Οι εξεταζόμενες υδραυλικές παροχές συνάδουν με τις τιμές της αρχικής μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ για την κατασκευή του ταμιευτήρα της Κάρλας (ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημ. Έργων, Δ/νση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7), 1999). Οι εξεταζόμενες φορτίσεις θρεπτικών ανταποκρίνονται σε μείωση της τάξης του 20 με 40 % των σημερινών τιμών. Οι εξεταζόμενες τιμές κάλυψης με περιοχές καλάμων, αποτελούν τιμές που συναντώνται, αρκετά σπάνια το 30 % σε ευρωπαϊκές λίμνες. Προτείνεται στη βιβλιογραφία ότι είναι δυνατόν να δημιουργηθούν υγροτοπικές εκτάσεις γύρω από μία λίμνη, επιθυμητής έκτασης, με ελεγχόμενη αυξομείωση της στάθμης της λίμνης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Η λίμνη Κάρλα είναι μεγάλης έκτασης και άρα με μεγάλο ανάπτυγμα ανέμου. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3, αντίστοιχα μεγάλες λίμνες δεν έχουν μηχανισμούς υστέρησης, σε τόσο μεγάλο βαθμό, και οι όποιες αλλαγές στο υδάτινο σύστημα δημιουργούν άμεση ανταπόκριση στην τροφική κατάσταση, είτε βελτίωση είτε επιδείνωση. Υπάρχει επιφύλαξη για την υστέρηση που μπορεί να προκαλέσει το «ιστορικό» του πυθμένα της λίμνης, ως προς την περιεκτικότητά του σε αποθηκευμένα θρεπτικά, αντικείμενο για το οποίο υπάρχει ελλιπής γνώση. (Laspidou et al., 2009)

Τα διαχειριστικά σχέδια αφορούν όλα μέσο βάθος λίμνης 3.5 m, καθώς όπως αποδεικνύεται, χαμηλότερες στάθμες αποκλείουν την αναβάθμιση της λίμνης σε καλύτερη κατηγορία τροφικής κατάστασης. Οποιαδήποτε υψηλότερη στάθμη είναι εμφανές ότι θα επιφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα εξυγίανσης.

Τα σχέδια διαχείρισης εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Είναι εφικτή σχεδόν σε όλα η αναβάθμιση της τροφικής κατάστασης από υπερευτροφική σε ευτροφική και μάλιστα σε χαμηλά επίπεδα ευτροφικής για τους χειμερινούς μήνες. Για τους δυσμενείς θερινούς μήνες, μόνο 4 σενάρια διαχείρισης επιτυγχάνουν τον πρωταρχικό στόχο, τα σενάρια A3, A4, D3 και D4 (Πίνακας 10.1).

Πίνακας 10.1: Προτεινόμενα σχέδια διαχείρισης

σχέδιο διαχείρισης	υδραυλική παροχή (mm/d)	χρόνος παραμονής (d)	φόρτιση αζώτου (g N/m2/d)	φόρτιση φωσφόρου (g P/m2/d)	κάλυψη με περιοχές καλάμων (%)
A3	19	184	6	0,6	20
A4	20	175	6	0,6	20
D3	19	184	6	0,6	30
D4	20	175	6	0,6	30

Το γενικότερο σχέδιο διαχείρισης, εξυγίανσης της λίμνης Κάρλας και της ευρύτερης περιοχής θα υποβοηθηθεί σημαντικά και τεκμηριωμένα, με γνώση των ακριβών αλληλεπιδράσεων της λίμνης με εξωγενείς παράγοντες, από διερεύνηση και εφαρμογή στους παρακάτω τομείς.

- Διασύνδεση του μοντέλου PCLake σε ένα συνολικότερο σύστημα προσομοίωσης (μοντέλων επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας, ποιότητας νερού, λειτουργίας ταμιευτήρα/λίμνης).
- Ανάπτυξη συνολικών σεναρίων διαχείρισης υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής και προσομοίωση τους με το ενιαίο σύστημα προσομοίωσης (στοιχείο α)) με αναφορά στην ποιότητα και οικολογική κατάσταση της λίμνης/ταμιευτήρα.
- Ανάπτυξη ενιαίων σεναρίων κλιματικής αλλαγής και προσομοίωση των επιπτώσεων τους στη λίμνη/ταμιευτήρα
- Προσομοίωση της λίμνης/ταμιευτήρα για μεγαλύτερες χρονοσειρές (και όχι μόνο ένα έτος)
- Προσαρμογή του PCLake στον μεσογειακό τύπο λίμνης, που διαφέρει στην υπορουτίνα του τροφικού πλέγματος, ανάλογα με την βιοποικιλότητα που απαντάται σε κάθε περιοχή, όπως για παράδειγμα η προσαρμογή στον κύκλο γεννήσεων των ψαριών της Μεσογείου που διαφέρει από αυτών της βόρειας Ευρώπης.
- Καλύτερη προσαρμογή στην ίδια την λίμνη Κάρλα, με λεπτομερέστερη γνώση της φυσιολογίας, όπως οι ιδιαίτερες συνθήκες μη ανάπτυξης της βλάστησης λόγω χαλαρού πυθμένα.

Είναι ευνόητο ότι με ακριβέστερη μελλοντική εκτίμηση δεδομένων εισόδου, καθώς και σταδιακής συλλογής χρονοσειρών, η πρόβλεψη, η εκτίμηση των επιδράσεων και η πρόταση διαχείρισης, μόνο να βελτιωθεί θα μπορούσε. Ωστόσο, ήδη αναδεικνύονται οι σημαντικές τάσεις, επιδράσεις και διαχειριστικοί προσανατολισμοί.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αμπράζη, Ι., (2009). " Αξιολόγηση Περιβαλλοντικών Δεικτών της ευρύτερης περιοχής της λίμνης Κάρλας", μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Βόλος.

Ζαλίδης Χ., Μαντζαβέλας Α. (1994). Απογραφή ελληνικών υγροτόπων ως φυσικών πόρων. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας. Ελληνικό Κέντρο Υγροτόπων-Βιοτόπων. Αθήνα, σελ. 587 + xviii.

Ζανάκη, Κ., (1996). "Έλεγχος Ποιότητας Νερού" Εκδ. "ΙΩΝ" Αθήνα, ISBN 960-405-501-1

Κάγκαλου, Ι., (1997). "Σημειώσεις Λιμνολογίας" ΤΕΙ Ηπείρου, Ηγουμενίτσα Καράταγλης Στ., 1992: "Φυσιολογία Φυτών" Εκδ. ART of TEXT, Θεσσαλονίκη, ISBN 960-312-009-Χ

Κουσουρής, Θ., (1998). "Μονογραφίες Θαλάσσιων Επιστημών - Το Νερό στη Φύση, στην Ανάπτυξη, στην Προστασία του Περιβάλλοντος" Εκδ. Εθνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, Αθήνα

ΚΠΕ Καστοριάς (Μαρδίρης Θ. Α., Αντωνίου Ν., Καζταρίδου Α., Μηντζιαρίδης Κ., Γρηγορίου Μ., Μιχαήλ Χ., Ατζέμη Α.), 2000. "Οι Δρόμοι του Νερού - Η Λίμνη της Καστοριάς" Εκδ. ΚΠΕ Καστοριάς

Μουστάκα – Γούνη, Μ., (2000). "Διερεύνηση Υδροβιολογικών Παραμέτρων στη Λίμνη Καστοριάς - Επιλογή βέλτιστης μεθόδου αποκατάστασης της οικολογικής ισορροπίας" Ερευνητικό Πρόγραμμα 7468 της επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Νεβεσκιώτης, Θ. Χαρίσιος, (2010). " Μελέτη της υπό ανασύσταση λίμνης Κάρλας με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Παραμετρική διερεύνηση και περιβαλλοντική αποτίμηση. ", Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος.

Πολυεταιρική Σχολική Σύμπραξη (Καστοριά - Αθήνα - Ιεράπετρα: 1997-1999) / Δράση ΙΙΙ (0280), 1999: "Το νερό ως παράγοντας ύπαρξης" Εθνικό Ίδρυμα Νεότητας - ΥΠ.Ε.Π.Θ. - Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Κατάρτισης (Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ.)

Σταυροθεοδώρου, Ελένη, (2010). " Στάσεις και απόψεις των κατοίκων απέναντι στη διαχείριση κι ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής της λίμνης Κάρλας", μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Βόλος.

Χαμόγλου, Μ., (2013). Επιδράσεις υδρολογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων στη συγκέντρωση των μικροκυστινών: Μια μαθηματική προσομοίωση στη λίμνη Κάρλα.

Ambrose, R.B., T.A. Wool, J.P. Connolly & R.W. Schwanz (1988). WASP4, a hydrodynamic and water quality model: model theory, user's manual and programmer's guide. US EPA, report no EPA/600/3- 87/039.

Beaver J.R., Crisman T.L., Bays J.S. (1981). Thermal regimes of Florida lakes. Hydrobiologia, 83:267–273

Björndahl, G. (1983). Structure and biomass of Phragmites stands. Ph.D. Thesis, Göteborgs Universitet, Göteborg, Sweden.

Breukelaar, A.W., Lammens, E.H.R.R., Klein Breteler, J.G.P., Tatrai, I. (1994). Effects of benthivorous bream (Abramis brama) and carp (Cyprinus carpio) on sediment resuspension and concentrations of nutrients and chlorophyll-a. Freshw. Biol. 32: 113-121.

Di Toro, D.M. & W.F. Matystik (1980). Mathematical models of water quality in large lakes. Part 1: Lake Huron and Saginaw Bay. EPA 600/3-80-56, Duluth, MI, USA.

Droop, M.R., (1974). The nutrient status of algal cells in continuous culture. J. Mar. Biol. Ass. UK 54: 825- 855.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Dykyjová, D. & J. Kveˇt, (1978). Pond littoral ecosystems, structure and functioning. Ecological Studies vol. 28. Springer-Verlag, Berlin.

Efstratiadis A., Koutsogiannis, D., and Koukouvinos, A., 2002, Evaluation of the Possibilities of Water Quality Management and Protection of Lake N. Plastiras – Hydrological Study,_National Technical University of Athens, Athens (in Greek)

Gliwicz, Z.M., (1980). Filtering rates, food size selection and feeding rates in cladocerans – another aspect of interspecific competition in filter-feeding zooplankton. In: W.C. Kerfoot (ed.), Evolution and ecology of zooplankton communities. Am. Soc. Limnol. Oceanogr., Spec. Symp. Vol. 3: 282- 291.

Grimm, M.P. (1989). Northern pike (Esox lucius) and aquatic vegetation, tools in the management of fisheries and water quality in shallow waters. Hydrobiol. Bull. 23: 59-65.

Gulati, R.D., (1990a). Zooplankton structure in the Loosdrecht lakes in relation to trophic status and recent restoration measures. Hydrobiologia 191: 173-188.

Gulati, R,D., (1990b). Structural and grazing responses of zooplankton community to biomanipulation of some Dutch water bodies. Hydrobiologia 200/201: 99-118.

Gulati, R.D., E.H.R.R. Lammens, M.-L. Meijer & E. Van Donk, eds., (1990a). Biomanipulation - tool for water management. Kluwer Acad. Publ.

Gulati, R.D., L. van Liere & K. Siewertsen, (1990b). The Loosdrecht lake system: Man's role in its creation, perturbation and rehabilitation. In: O. Ravera (ed.), Terrestrial and aquatic ecosystems, perturbation and recovery, pp. 593-606. Ellis Harwood Ltd., Chichester, U.K.

Gulati, R.D., K. Siewertsen & G. Postema, (1985). Zooplankton structure and grazing activities in relation to food quality and concentrations in Dutch lakes. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 21: 91-102.

Gulati, R.D. and Van Donk., E., (2002). Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review. Hydrobiologia 478: 73-106.

Hakanson,L. & V.V. Boulion (2002). The lake foodweb. Backhuys Publishers, Leiden.

Hallam, T.G., C.E. Clark & R.R. Lassiter (1983). Effects of toxicants on populations: a qualitative approach. I: Equilibrium environmental exposure. Ecol. Mod. 18: 291-304.

Hanson, J.M. & W.C. Leggett (1982). Empirical prediction of fish biomass and yield. Can. J. of Fish. And Aquat. Sci. 39: 257-263.

Haslam, S.M., (1973): Some aspects of the life history and autecology of Phragmites communis Trin. A review. Pol. Arch. Hydrobiol. 20 (1), 79 - 100.

Holling, C.S. (1965). The functional response of predators to prey density and its role in mimicry and population regulation. Mem. Entomol. Soc. Can. 45: 1-60.

Horne, A.J., C.R. Goldman, (1994): "Understanding Lake Ecology" - Lake Ecology Overview - Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA, http://wow.nrri.umn.edu/wow/under/primer/

Hosper, S.H. (1989). Biomanipulation, new perspective for restoring shallow, eutrophic lakes in The Netherlands. Hydrob. Bull. 23: 5-11.

Hosper, S.H. (1997). Clearing lakes; an ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in the Netherlands. Ph.D. Thesis, Wageningen University.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Ishikawa T., Tanaka M. (1993) Diurnal stratification and its effects on wind-induced currents and water qualities in Lake Kasumigaura, Japan. Journal of Hydraulic Research, 31:307–322

Janse, J.H., T. Aldenberg & P.R.G. Kramer (1992). A mathematical model of the phosphorus cycle in Lake Loosdrecht and simulation of additional measures. Hydrobiologia 233: 119-136.

Janse J.H., (2005). Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. PhD thesis. Wageningen University

Janse, J.H., R.D. Gulati & E. Van Donk (1995). Modelling nutrient cycles in relation to food-web structure in a biomanipulated shallow lake. Neth. J. Aquat. Ecol. 29: 67-79.

Janse, J.H., J. Van der Does & J.C. van der Vlugt (1993). PCLAKE; Modelling eutrophication and its control measures in Reeuwijk Lakes. In: G. Giussani & C. Callieri (eds.), Proc. 5th Int. Conf. on the Conserv. and Managem. of Lakes, Stresa (Italy): 117-120.

Jeppesen, E. et al (1990a). Fish manipulation as a lake restoration tool in shallow, eutrophic, temperate lakes 1: cross-analysis of three Danish case-studies. Hydrobiologia 200/201: 205-218.

Jeppesen, E., Jensen, J.P. , Kristensen, P., Sondergaard, M., Mortensen, E. Sortkjaer, O., Olrik, K. (1990b). Fish manipulation as a lake restoration tool in shallow, eutrophic, temperate lakes 2: threshold levels, long-term stability and conclusions. Hydrobiologia 200/201: 219-227.

Jeppesen (1997) Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. Hydrobiologia 342/343: 151-164.

Jeppesen, E., Søndergaard, M., Søndergaard, M. & Christoffersen, K., eds. (1998). The structuring role of submerged macropytes in lakes. Springer, Ecological Studies 131.janse

Jeppesen, M. Søndergaard, M. Søndergaard & K. Kristoffersen, eds. Structuring role of submerged macrophytes in lakes, Springer Verlag, pp. 339-352.

Jeppesen E., Kronvang B., Olesen J.E., Audet J., Søndergaard M., Hoffmann C.C., Andersen H.E., Lauridsen T.L., Liboriussen L., Larsen S.E., Beklioglu M., Meerhoff M., Ozen A. & Ozkan K. (2011) Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. Hydrobiologia, 663: 1-21

Johnston, C.A., (1991). Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality. Critical Reviews in Environmental Control 21(5,6): 491-565.

Jorgensen S.E., Tundisi J.G., Tundisi T.M. (2012) Handbook of Inland Aquatic Ecosystem Management, CRC Press, New York, pp 11–42

Kagalou I., G. Tsimarakis and A. Patsias, (2001). Phytoplankton dynamics and physical-chemical features of a shallow lake (Lake Pamvotis, Greece), Fres. Environ. Bull., 10 845–849.

Kagalou, I. (2010). Classification and management I ssues of greek lakes under the european water framework directive: A DPSIR approach. Journal of Environmental Monitoring, 12 (12), 2207-2215

Kagalou, I., Papastergiadou, E., & Leonardos, I. (2008). Long term changes in the eutrophication process in a shallow mediterranean lake ecosystem of W. Greece: Response after the reduction of external load. Journal of Environmental Management, 87 (3), 497-506.

Kimmel B.L., Lind O.T., Paulson L.J. (1990) Reservoir primary production. *In*: Thornton, K. W., Kimmel B. L. and Payne F. E. (eds), Reservoir limnology: Ecological perspectives. – John Wiley and Sons, Inc., New York.

Kitchell, J.F., Koonce, J.F. & Tennis, P.S. (1975). Phosphorus fluxes through fishes. Verh. Internat. Verein. Limnol. 19: 2478-2484.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Klinge, M., M.P. Grimm & S.H. Hosper (1995). Eutrophication and ecogical rehabilitation of Dutch lakes: explanation and prediction by a new conceptual framework. Wat. Sci. Tech. 31: 207-218.

Laspidou, C., I. Kakoulidis & A. Loukas (2011): Ecosystem simulation modeling of nitrogen dynamics in the restored lake Karla in Greece, Desalination and Water Treatment, 33:1-3, 61-67

Laspidou, C., Constructed wetlands technology and water quality improvement: Recent advances, Proc. 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes Island, Greece, 1–3 September 2005.

Laspidou, C. S., A. Liakopoulos and V. Vaina, Mathematical modeling and simulation of primary productivity in the constructed wetland of Karla, Greece, Proc. Protection and Restoration of the Environment VIII, Chania, Greece, 3–7 July 2006 (available at http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=8332).

Laspidou C. S. and V. Vaina, Ecosystem modeling of sediment dynamics in the constructed wetland Karla in Central Greece. Int. J. Design Nature Ecodynamics, 3(4) (2009) 273–280.

Le Cren, E.D. & Lowe-McConnell, eds. (1980). The functioning of freshwater ecosystems. I.B.P. 22. Cambridge Univ. Press.

Ligtvoet, W. & Grimm, M.P. (1992). Fish in clear water – fish stock development and management in Lake Volkerak-Zoom. In: Hooghart, J.C. & Posthumus, C.W.S. (eds.), How an estuary changed into a freshwater lake. Proc. and Inf., CHO/TNO, no 46: 69-84.

Loukas, A., Vasiliades, L., Domenikiotis, C., and Dalezios, N.R., 2005, Basin-wide actual evapotranspiration estimation using NOAA/AVHRR satellite data, *Phys. Chem. Earth*, **30**, 69-79.

Loukas, A., L. Vasiliades and J. Tzabiras (2007). " Evaluation of Climate Change on Drought Impulses in Thessaly, Greece" European Water, 17/18 (1), 17-28.

Loukas, A. (2010). "Surface water quantity and quality assessment in Pinios River, Thessaly, Greece", Desalination, 250, 266-273.

Meijer, M-L., R. Portielje, M. van den Berg, E. Lammens, B. Ibelings, R. Noordhuis, W. Joosse, H. Coops & D. van der Molen (1999). Stabiliteit van de Veluwerandmeren. RIZA report 99.054. (in Dutch)

Mitsch, W.J., (1995). Restoration of our lakes and rivers with wetlands – an important application of ecological engineering. Wat. Sci. Tech. 31(8): 167-177.

Moss, B., (1990). Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. Hydrobiologia, 200/201: 367- 377.

Moustaka E., (2002) Water resources management of the watershed of the under construction lake Karla by use of a Geographic Information System, Diploma thesis, University of Thessaly, Volos.

Muhammetoglu, A. & Soyupak, S. (2000). A three-dimensional water quality–macrophyte interaction model for shallow lakes. Ecol. Mod. 133: 161-180.

Muraoka, K., Fukushima, T. (1981) Lake Current of Lake Kasumigaura (Research Report No. 54). National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan.

Mylopoulos, N., E. Kolokytha, A. Loukas and Y. Mylopoulos (2009). "Agricultural and Water Resources Development in Thessaly, Greece in the framework of new European Union Policies." International Journal of River Basin Management, 7(1), 73-89.

Portielje, R. and Van der Molen, D.T., (1998). Relaties tussen eutrofiëringsvariabelen en systeemkenmerken van de Nederlandse meren en plassen. Deelrapport II voor de Vierde Eutrofiëringsenquête. Report 98.00, RIZA, Lelystad. (In Dutch.)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Reckhow, K.H. & S.C. Chapra, (1983). Engineering approaches for lake management. Vol. 1, Data analysis and empirical modeling. Butterworth Publishers.

Richardson, C.J., S. Qian, C.B. Craft & R.G. Qalls (1997). Predictive models for phosphorus retention in wetlands. Wetlands Ecology and Management 4: 159-175.

Riegman, R. &. L.R. Mur (1984). Regulation of phosphate uptake kinetics in Oscillatoria agardhii. Arch. Microbiol. 139: 28-32.

Riegman, R. &. L.R. Mur (1984). Theoretical considerations on growth kinetics and physiological adaptation of nutrient-limited phytoplankton. Arch. Microbiol. 140: 96-100.

Riegman, R., (1985), Phosphate - phytoplankton interactions. Ph.D. Thesis, University of Amsterdam.

Ryding, S.O. & C. Forsberg (1977). Sediments as a nutrient source in shallow polluted lakes. In: H. Golterman (ed.), Interaction between sediments and fresh water. Dr. W. Junk, Den Haag: 227-235.

Sas H. (1989). Lake Restoration by Reduction of Nutrient Loading: Expectation, Experiences, Extrapolations. Academia Verlag Richarz, Germany

Scheffer, M., (1990). Multiplicity of stable states in freshwater systems. Hydrobiologia 200/201: 475-486.

Scheffer, M. (1998). Ecology of shallow lakes. Chapman & Hall.

Scheffer, M., S. H. Hosper, M. L. Meijer, B. Moss, and E. Jeppesen (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. Trends in Ecology and Evolution 8: 275-279.

Scheffer M., Van Nes E.H. (2007). Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. Hydrobiologia, 584:455-466

Sidiropoulos, P., Papadiniitriou, T., Stabouli, Z., Loukas, A., Mylopoulos, N., & Kagalou, I. (2012). Past, present and future concepts for conservation of there-constructed lake karla (Thessaly-Greece). Fresenius Environmental Bulletin, 21(10 A), 3027-3034.

Søballe D.M., Kimmel B.L., Kennedy R.H., Gaugush. R.F. (1992). Reservoirs. Pages 421–474 in. Hackney C.T, Adams S.M., Marin W.H. (editors). Biodiversity of the Southeastern United States: Aquatic Communities. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp 779

Somlyódy, L. (1998). Eutrophicaton modeling, management and decision making: the Kis-Balaton case. Wat. Sci. Tech. 37: 165-175.

Sondergaard M., Kristensen P., Jeppesen E. (1992). Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arreso, Denmark. Hydrobiologia, 228:91–99

STOWA (1999). Procesbeschrijvingen DUFLOW, versie 3. STOWA, Utrecht, rapport nr. 99-21.

Talling, J.F. (2001). Environmental controls on the functioning of shallow tropical lakes. Hydrobiologia, 458:1–8

Talling, J.F., Lemoalle, J.L. (1998). Ecological Dynamics of Tropical Inland Waters. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. pp7-8, 10

Timms, R.M. & Moss, B. (1984). Prevention of growth of potentially dense phytoplankton populations by zooplankton grazing, in the presence of zooplanktivorous fish, in a shallow wetland ecosystem. Limnol. Oceanogr. 29: 472-486.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250

Traas, T.P., Janse, J.H., Van den Brink, P.J., Brock, T.C.M. & Aldenberg, T. (2004). A freshwater food web model for the combined effects of nutrients and insecticide stress and subsequent recovery. Env. Toxicol. and Chem. 23 (2): 521-529. SETAC Press.

Traas, T.P. (2004). Food web models in ecotoxicological risk assessment. Ch. 6: A mass-balance for the logistic population growth equation and implications for biomass turnover. Ph.D. Thesis, Utrecht University.

Van den Berg, M. S., H. Coops, M. L. Meijer, M. Scheffer, and J. Simons. (1998). Clear water associated with a dense Chara vegetation in the shallow and turbid Lake Veluwemeer, the Netherlands. In: E.

Van der Molen, D.T. (1999). The role of eutrophication models in water management. Ph.D. thesis, Wageningen University.

Van der Molen, D.T., F.J. Los, L. Van Ballegooijen and M.P. Van der Vat (1993). Mathematical modeling as a tool for management in eutrophication control of shallow lakes. Hydrobiologia 275/276: 479-492.

Van Donk, E., H. Prins, H.M. Voogd, S.J.H. Crum & T.C.M. Brock (1995). Effects of nutrient loading and insecticide application on the ecology of Elodea-dominated freshwater microcosms I. Responses of plankton and zooplanktivorous insects. Arch. Hydrobiol. 133: 417-439.

Van Donk, E., Gulati, R.D. (1995). Transition of a lake to turbid state six years after biomanipulation: mechanisms and pathways. Wat. Sci. Tech. 32: 197-206.

Van Liere, L. (1979). On Oscillatoria agardhii Gomont, experimental ecology and physiology of a nuisance bloom-forming cyanobacterium. Ph.D. Thesis, University of Amsterdam.

Van Nes, E. H. (2002). Controlling complexity in individual-based models of aquatic vegetation and fish communities. Ph.D. Thesis, Wageningen University.

Van Nes, E. H., M. Scheffer, M. S. Van den Berg & H. Coops (2002). Dominance of charophytes in eutrophic shallow lakes - when should we expect it to be an alternative stable state? Aquat. Bot. 72: 275-296.

Van Nes, E. H., E.H.R.R. Lammens & M. Scheffer (2002). PISCATOR, an individual-based model to analyze the dynamics of lake fish communities. Ecol. Mod.

Verhoeven, J.T.A. & A.F.M. Meuleman, (1999). Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations. Ecol. Engin. 12(1-2): 5-12.

Waterschap Friesland (1993). Waterkwantiteitsbeheersplan Friese Boezem 1993-1996. Leeuwarden.

Wetzel R.G. (1983). Limnology (2ndedition). Saunders College Publishing, Philadelphia. pp 767

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
06/09/2026 07:30:32 EEST - 216.73.216.250