

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων

Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας
της Λίμνης Πλαστήρα

Τεύχος 1: Συνοπτική έκθεση

Αθήνα, Μάρτιος 2002

Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα

Περίοδος εκτέλεσης: Μάιος 2001 - Ιανουάριος 2002

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

Ανάθεση: Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καρδίτσας και Δήμος Καρδίτσας

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

Επιστημονικός υπεύθυνος: Κ. Χατζημπίρος

Κύριος ερευνητής: Δ. Κουτσογιάννης

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

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

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	v
Abstract	v
Αναγνωρίσεις	vi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Η λίμνη και η ιστορία της.....	1
1.2 Τα προβλήματα.....	2
1.3 Σκοπός και δομή του έργου.....	3
2 Υδρολογική θεώρηση	4
2.1 Η υδρολογία της περιοχής.....	4
2.2 Οι απολήψεις από τη λίμνη.....	5
3 Ποιοτική θεώρηση	8
4 Το τοπίο της λίμνης	13
4.1 Η μεταβολή της στάθμης.....	13
4.2 Η επίδραση της αλόγιστης ανάπτυξης.....	15
5 Πολυκριτηριακή ανάλυση	16
5.1 Γενικά.....	16
5.2 Εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης στη διαχείριση του ταμιευτήρα Πλαστήρα.....	16
6 Συμπεράσματα	22

Περίληψη

Ο ταμιευτήρας Πλαστήρα χρησιμοποιείται για άρδευση, ύδρευση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και αναψυχή. Ταυτόχρονα διαμορφώνει ένα περιβάλλον με οικολογική και αισθητική αξία, το οποίο πρέπει να προστατευτεί. Οι ανάγκες αυτές είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους και καθιστούν το πρόβλημα της διαχείρισης του νερού ιδιαίτερα πολύπλοκο. Σ' αυτή τη συνοπτική έκθεση παρουσιάζεται συνολικά το πρόβλημα, συνοψίζονται τα κύρια σημεία των τριών συνιστωσών του ερευνητικού έργου, δηλαδή της υδρολογικής μελέτης, της μελέτης ποιότητας νερού, και της μελέτης του τοπίου, επιχειρείται συγκερασμός των αλληλοσυγκρουόμενων απαιτήσεων, και προτείνονται σχετικά σενάρια απόληξης νερού.

Abstract

The Plastiras reservoir is used for irrigation, water supply, hydropower, and tourism. In addition, it forms an environment with high ecological and aesthetic value, which must be protected. These needs are competitive and result in an especially complex problem of water management. In this report the problem is presented and the main points of the three parts of the project are summarised; these three parts are the hydrological study, the water quality study, and the landscape study. The conflicting demands are arranged, and water release scenarios are suggested.

Αναγνωρίσεις

Το έργο ανατέθηκε από τη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καρδίτσας και το Δήμο Καρδίτσας. Ευχαριστούμε για τη συμβολή και το ενδιαφέρον τους το Νομάρχη Καρδίτσας κ. Β. Αναγνωστόπουλο και το Δήμαρχο Καρδίτσας κ. Χ. Τέγο. Ευχαριστούμε επίσης τον κ. Χ. Καρελά, προϊστάμενο ΔΕΥΑ Καρδίτσας, και το Πρυτανικό Συμβούλιο του ΕΜΠ, για την πρόσθετη στήριξη του έργου.

Το τοπογραφικό της περιοχής όπως ήταν πριν την κατάκλυση καταρτίστηκε με βάση παλιές αεροφωτογραφίες με φωτογραμμετρία από τη NAMA Consulting Engineers and Planners S.A. Ευχαριστούμε ιδιαίτερα το διευθύνοντα σύμβουλο κ. Ι. Τσελέντη, και τον κ. Γ. Παπαγεωργίου, για την ευγενική και αφιλοκερδή προσφορά τους.

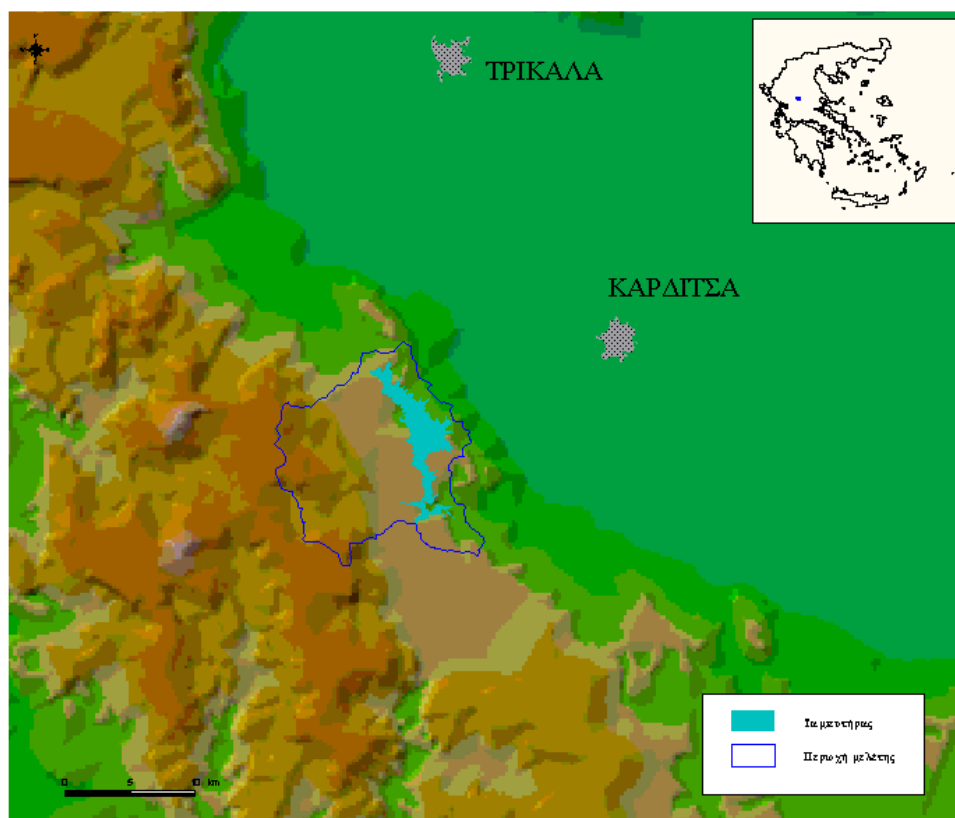
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην υδρολογική μελέτη χορηγήθηκαν από τη ΔΕΗ. Ευχαριστούμε ιδιαίτερα τον κ. Ι. Λέρη, Διευθυντή Εκμετάλλευσης.

Ευχαριστούμε επίσης τους κ. Τ. Τσιώνα & Π. Τσιώνα, για τις χρήσιμες απόψεις και τη συνολική συνδρομή τους· τον κ. Θ. Ζησόπουλο για τη βοήθειά του στο GPS· τον κ. Σ. Κρομούδα, Δήμαρχο Νεβρόπολης, για το χρόνο που μας διέθεσε· τον κ. Α. Σαμουρή, της Trekking Hellas Δυτικής Θεσσαλίας, για την παραχώρηση των καγιάκ και τη φιλοξενία στην κατασκήνωση· τον κ. Γ. Βασιλάκο, πρόεδρο της ένωσης ξενοδόχων της περιοχής, και τον κ. Α. Κρομούδα, για τις πληροφορίες που μας έδωσαν για τον τουρισμό· τον κ. Α. Θεό, ιδιοκτήτη εστιατορίου στην παραλία Πεζούλας, για τη φιλοξενία και για τις φωτογραφίες που μας έδωσε· τον κ. Κ. Πούλιο, αρχηγό της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας Καρδίτσας, για την περιήγηση με βάρκα στη λίμνη και τις βυθομετρήσεις· τον κ. Παπαθανασίου, υπεύθυνο Βιολογικού Καθαρισμού ΔΕΥΑΚ, για τις επιπλέον πληροφορίες· και το εργαστήριο GIS του Τμήματος Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου για τη δορυφορική φωτογραφία της λίμνης (η οποία φαίνεται στα άλλα τεύχη του έργου).

Τέλος, ευχαριστούμε τους A. Briccola, M. Ascoli, και S. Briccola, που μας ξενάγησαν στην ACSM Como (εταιρία ύδρευσης, αποχέτευσης και ενέργειας του Como)· τον κ. G. Bucher, πρόεδρο της Azienda di Promozione Turistica del Comasco, για τη γνώμη του στα θέματα τουριστικού σχεδιασμού· τον Dott. G. Villani και την κ. V. Vittani, Comune di Como, για τις πληροφορίες στα θέματα διοίκησης στη λίμνη του Como· και τον Dott. G. Molisani, διευθυντή του Istituto Italiano di Cultura στην Αθήνα, που βοήθησε στην επίσκεψή μας στο Como.

1 Εισαγωγή

Ο ταμιευτήρας του Ταυρωπού (ή Μέγδοβα) βρίσκεται στα Άγραφα, στην κεντρική και ανατολική Πίνδο. Είναι πιο γνωστός ως λίμνη Πλαστήρα. Το νερό του χρησιμοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος του για άρδευση του Θεσσαλικού Κάμπου, κυρίως στο Νομό Καρδίτσας. Χρησιμοποιείται επίσης για ύδρευση της Καρδίτσας και άλλων οικισμών, καθώς και για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Σ' αυτή την εισαγωγή επισκοπείται η ιστορία και η χρήση της λίμνης, συζητούνται τα σχετικά προβλήματα, και εξηγείται ο σκοπός του ερευνητικού έργου.



Εικόνα 1.1: Η θέση της περιοχής μελέτης

1.1 Η λίμνη και η ιστορία της

Η λίμνη δημιουργήθηκε με την κατασκευή του φράγματος Πλαστήρα στα τέλη της δεκαετίας του 1950. Η πλήρωση του ταμιευτήρα ξεκίνησε το 1959. Ο ποταμός στον οποίο κατασκευάστηκε το φράγμα είναι παραπόταμος του Αχελώου. Η επικρατούσα ονομασία του μεταξύ των κατοίκων της περιοχής είναι Μέγδοβας, αλλά στα επίσημα κείμενα προτιμάται συνήθως η ονομασία Ταυρωπός. Το φράγμα ονομάστηκε προς τιμήν του στρατιωτικού και πολιτικού Νικολάου Πλαστήρα (1883–1952), που καταγόταν από το Μορφοβούνι Καρδίτσας. Η λίμνη ονομάστηκε επίσημως τεχνητή λίμνη Ταυρωπού, ενώ αναφέρεται κατά τόπους και ως λίμνη Μέγδοβα, αλλά επικράτησε σιγά-σιγά η ονομασία «λίμνη Πλαστήρα», που τελικά πέρασε και στα κρατικά έγγραφα, π.χ. στο ΦΕΚ 885Δ/1998.

Ο ταμιευτήρας κατασκευάστηκε με κύριο στόχο την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό του είναι ότι ο σταθμός παραγωγής ενέργειας δεν βρίσκεται κατάντη του φράγματος, αλλά στους πρόποδες του βουνού ανατολικά, στη λεκάνη του ποταμού Πηγειού. Το αποτέλεσμα είναι

αφενός ένα ασυνήθιστα μεγάλο ύψος πτώσης 577 m, που κάνει το σταθμό να παράγει πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας συγκριτικά με τη διαθέσιμη ποσότητα νερού, και αφετέρου η εκτροπή του νερού του Μέγδοβα προς τη Θεσσαλική Πεδιάδα.

Στη δεκαετία του 1990 η λίμνη, λόγω της φυσικής ομορφιάς του τοπίου της, άρχισε να αναπτύσσεται τουριστικά. Έτσι, στις δύο βασικές χρήσεις νερού, την ενέργεια και την άρδευση, που όπως εξηγείται στο επόμενο υποκεφάλαιο, είναι ανταγωνιστικές, προστέθηκε και η χρήση αναψυχής, με αποτέλεσμα να απαιτείται άλλη διαχείριση του ταμιευτήρα. Επιπλέον, η ύδρευση της Καρδίτσας από τη λίμνη καταναλώνει μικρή ποσότητα νερού αλλά έχει μεγάλη σημασία και υψηλές απαιτήσεις σε ποιότητα.

1.2 Τα προβλήματα

1.2.1 Ο ανταγωνισμός ενέργειας-άρδευσης

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός της λίμνης, στη Μητρόπολη Καρδίτσας, συμβάλλει στο ενεργειακό δίκτυο της ΔΕΗ με ισχύ 130 MW. Λόγω της σημασίας του νερού της λίμνης για τη γεωργία, οι αποφάσεις για το πρόγραμμα λειτουργίας του σταθμού πέρασαν, γύρω στα μέσα της δεκαετίας του 1980, από τη ΔΕΗ στις αρμόδιες για τη γεωργία υπηρεσίες, και πιο συγκεκριμένα στην Περιφέρεια Θεσσαλίας. Αφού η ΔΕΗ δεν μπορούσε πια να εντάξει το έργο στο πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας όπως άρμοζε στις ανάγκες του δικτύου, αλλά έπρεπε να λειτουργεί το σταθμό έτσι ώστε να κατεβαίνει από τη λίμνη κάθε μέρα ο όγκος νερού που όριζε η Περιφέρεια Θεσσαλίας, το έργο έπαψε να έχει κύριο στόχο την παραγωγή ενέργειας και έγινε πρωτίστως αρδευτικό. Κατά μέσο όρο το έργο αποδίδει κάθε χρόνο περίπου 160 GWh, αλλά η οικονομική αξία αυτής της ενέργειας, λόγω της αδυναμίας ενεργειακού προγραμματισμού, υποβαθμίζεται μέχρι υποδιπλασιασμού.

1.2.2 Η έλλειψη νερού και η κακή διαχείριση

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας είναι ελλειμματικό σε νερό (Υπουργείο Ανάπτυξης, Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, *Ταξινόμηση ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων με βάση τις αποδελτιωμένες μελέτες του YBET, με χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας*, Αθήνα, 1996, σελ. 164–189). Η Θεσσαλική Πεδιάδα, με έκταση πάνω από 2 εκατομμύρια στρέμματα, έχει μεγάλες ανάγκες σε αρδευτικό νερό και οι υδατικοί πόροι της περιοχής δεν επαρκούν για να τις καλύψουν. Στην έλλειψη νερού προστίθεται η κακή διαχείριση· η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων έχει οδηγήσει σε πτώση στάθμης των γεωτρήσεων, υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων, και καθιζήσεις του εδάφους. Στη λίμνη Πλαστήρα, σε πολλές περιπτώσεις οι απολήψεις ξεπέρασαν τη μέση ετήσια εισροή των 153 hm³. το 1996-97 λήφθηκαν 185 hm³, ενώ το 1999-2000, που ήταν υδρολογικά φτωχό έτος, λήφθηκαν 163 hm³. Το αποτέλεσμα είναι η στάθμη της λίμνης να έχει πέσει πολύ.

1.2.3 Η ποιότητα του νερού

Το νερό χρησιμοποιείται για ύδρευση της Καρδίτσας και άλλων οικισμών, και η ποιότητά του πρέπει να είναι υψηλή. Εξάλλου, σύμφωνα με τις τρέχουσες αντιλήψεις, τα υδάτινα σώματα πρέπει να έχουν υψηλή ποιότητα νερού ανεξάρτητα από τη χρήση τους. Η ταπείνωση της στάθμης και η συνεπαγόμενη μείωση του υδάτινου όγκου επηρεάζει την τροφική κατάσταση της λίμνης αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης, με συνέπεια την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού.

1.2.4 Η αισθητική του τοπίου

Με την ταπείνωση της στάθμης αποκαλύπτεται μια γυμνή έκταση ανάμεσα στο νερό και στα δέντρα, που διαταράσσει την ενότητα του τοπίου. Στο βόρειο τμήμα της λίμνης, όπου το ανάγλυφο είναι ήπιο, αποκαλύπτονται μεγάλες ερημικές εκτάσεις, ενώ στο νότιο, όπου το ανάγλυφο είναι αδρό, αποκαλύπτεται μια υποκίτρινη λωρίδα. Αυτή η νεκρή ζώνη βλάπτει αισθητικά το τοπίο, και η αισθητική υποβάθμιση έχει μεγάλη σημασία για την τουριστικά αναπτυσσόμενη περιοχή της λίμνης.

1.3 Σκοπός και δομή του έργου

Ο σκοπός του ερευνητικού έργου είναι να μελετηθούν τα παραπάνω προβλήματα και να βρεθεί η καλύτερη δυνατή διαχείριση νερού που να συμβιβάζει τις διάφορες χρήσεις, και να προσδιοριστεί μια κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη στη λίμνη. Για το σκοπό αυτό το έργο διαιρείται σε τρία μέρη:

Υδρολογική μελέτη Αποτελεί του Τεύχος 2 του έργου, και τα κυριότερα σημεία της συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 2 του παρόντος.

Μελέτη ποιότητας νερού Αποτελεί το Τεύχος 3 του έργου, και τα κυριότερα σημεία της συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 3 του παρόντος.

Μελέτη του τοπίου Αποτελεί το Τεύχος 4 του έργου, και τα κυριότερα σημεία της συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 4 του παρόντος.

Στο Κεφάλαιο 5 αυτής της έκθεσης γίνεται πολυκριτηριακή ανάλυση και στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συνολικά συμπεράσματα του έργου και προτείνονται σχετικά σενάρια διαχείρισης.

2 Υδρολογική θεώρηση

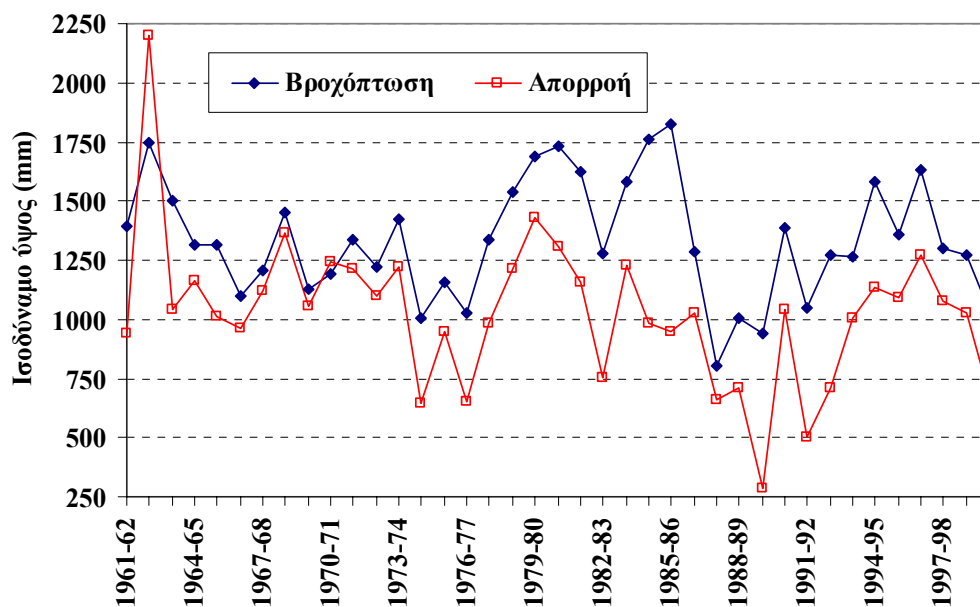
2.1 Η υδρολογία της περιοχής

Διάφορα χαρακτηριστικά για τη λίμνη και τη λεκάνη απορροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Όπως φαίνεται από το μέσο ετήσιο ύψος απορροής των 1029 mm, που είναι συγκρίσιμο με τα ύψη απορροής που παρατηρούνται στη λεκάνη του Αχελώου, η περιοχή είναι ιδιαίτερα πλούσια σε νερό. Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης στη λεκάνη, αλλά εκτιμάται ότι ξεπερνά τα 1500 mm ετησίως.

Πίνακας 2.1: Διάφορα χαρακτηριστικά της λίμνης και της λεκάνης απορροής

Έκταση λεκάνης απορροής	161.3 km ²
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης	2140 m
Ανώτατη στάθμη λίμνης	794 m
Στάθμη υπερχείλισης	792 m
Κατώτατη στάθμη υδροληψίας	776 m
Έκταση λίμνης στη στάθμη υπερχείλισης	25 km ²
Έκταση λίμνης στην κατώτατη στάθμη υδροληψίας	15 km ²
Μέση ετήσια καθαρή εισροή	153 hm ³
Μέση ετήσια απορροή	147 hm ³
Μέσο ετήσιο ύψος απορροής στη λίμνη	1029 mm

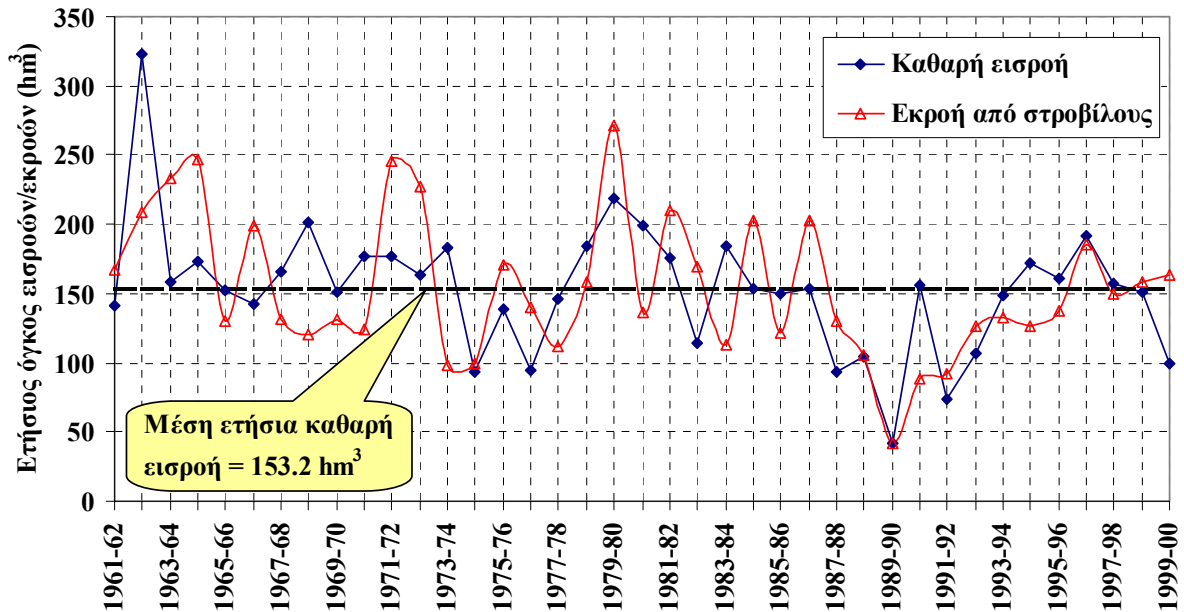
Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το ιστορικό της ετήσιας βροχόπτωσης και της απορροής από το 1961–62.



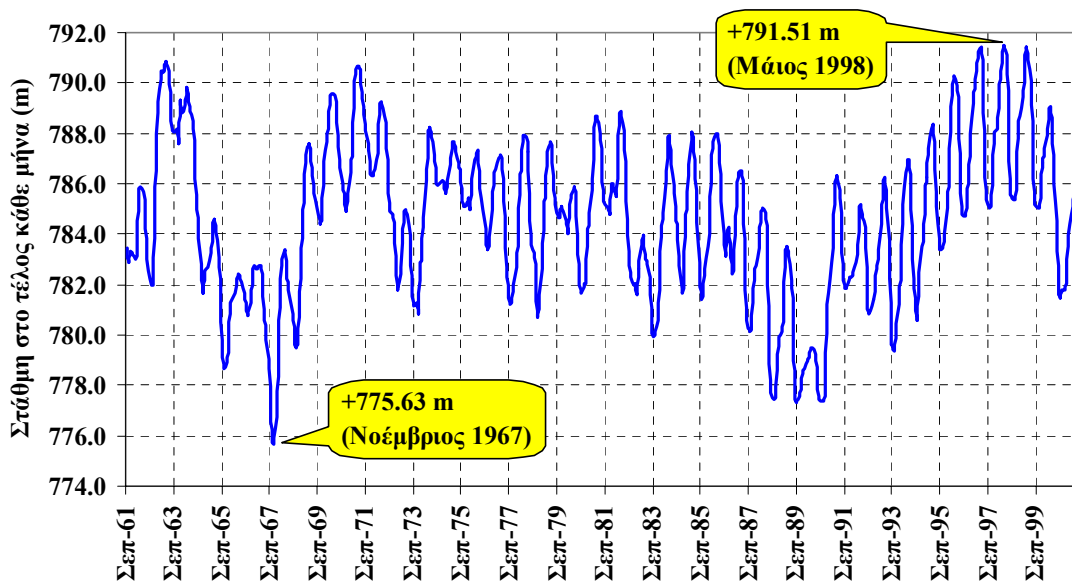
Εικόνα 2.1: Ετήσια ύψη βροχόπτωσης και απορροής ταμειυτήρα Πλαστήρα
Το παράδοξο του 1962–63, να είναι μεγαλύτερη η απορροή από τη βροχόπτωση, οφείλεται σε σφάλματα μέτρησης (κατά πάσα πιθανότητα δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι χιονοπτώσεις).

2.2 Οι απολήψεις από τη λίμνη

Το ιστορικό καθεστώς της διαχείρισης του ταμιευτήρα χαρακτηρίζεται από εντατική και εν μέρει ανεξέλεγκτη χρήση των διαθέσιμου υδατικού δυναμικού του, είτε για ενεργειακούς είτε για αρδευτικούς σκοπούς. Καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έργου (40 έτη), η ετήσια απόληψη ήταν άμεσα εξαρτώμενη από τις υδρολογικές εισροές, με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις από έτος σε έτος (Εικόνα 2.2). Αντίστοιχα έντονες ήταν και οι διακυμάνσεις της στάθμης, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα της Εικόνας 2.3.



Εικόνα 2.2: Ιστορική χρονοσειρά ετήσιων εισροών και εκροών ταμιευτήρα (Πηγή: ΔΕΗ - Διεύθυνση Εκμετάλλευσης)



Εικόνα 2.3: Ιστορική χρονοσειρά διακύμανσης στάθμης ταμιευτήρα (Πηγή: ΔΕΗ - Διεύθυνση Εκμετάλλευσης)

Όμως, με τέτοια πολιτική απολήψεων, υποβαθμίζεται ο ρόλος του ταμιευτήρα ως έργου υπερετήσιας ρύθμισης της παροχής, που έχει ως στόχο να αποθηκεύει νερό κατά τις περιόδους υψηλής υδροφορίας

και να το αποδίδει κατά τις περιόδους χαμηλής υδροφορίας. Ο σκοπός της ύπαρξης ενός ταμιευτήρα είναι να μειώνει την αβεβαιότητα που διέπει την προσφορά του φυσικού συστήματος (υδρολογικές εισροές), και να προσδίδει αξιοπιστία στη δυνατότητα ικανοποίησης της ζήτησης του νερού. Στην περίπτωση που η τιμή της ζήτησης διαμορφώνεται ανάλογα με το εκάστοτε καθεστώς των εισροών (όπως συμβαίνει στην ως τώρα διαχείριση του ταμιευτήρα Πλαστήρα), αίρεται πλήρως η έννοια της αξιοπιστίας.

Κατά συνέπεια, η ορθολογική διαχείριση του ταμιευτήρα Πλαστήρα προϋποθέτει καταρχήν τη σταθεροποίηση της τιμής της ετήσιας απόληψης. Αυτή η πολιτική παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το υφιστάμενο, ανεξέλεγκτο καθεστώς των απολήψεων. Σταθερή απόληψη συνεπάγεται δεδομένη προσφορά νερού, ανεξαρτήτως των υδρολογικών συνθηκών και με συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας. Αυτό συνεπάγεται πολύ καλύτερο προγραμματισμό όλων των παραγωγικών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τη λειτουργία του ταμιευτήρα (π.χ. γεωργικές καλλιέργειες).

Το ερώτημα στο οποίο καλείται να δώσει απάντηση η υδρολογική ανάλυση είναι η τιμή της εγγυημένης απόληψης που θα μπορεί να εξασφαλιστεί μετά τη θέσπιση του κατώτατου ορίου στάθμης λειτουργίας. Η υδρολογική μελέτη παρατίθεται πλήρως στο Τεύχος 2. Τα κυριότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3 και στην Εικόνα 2.4 (στα οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη η εκτροπή του Κερασιώτη).

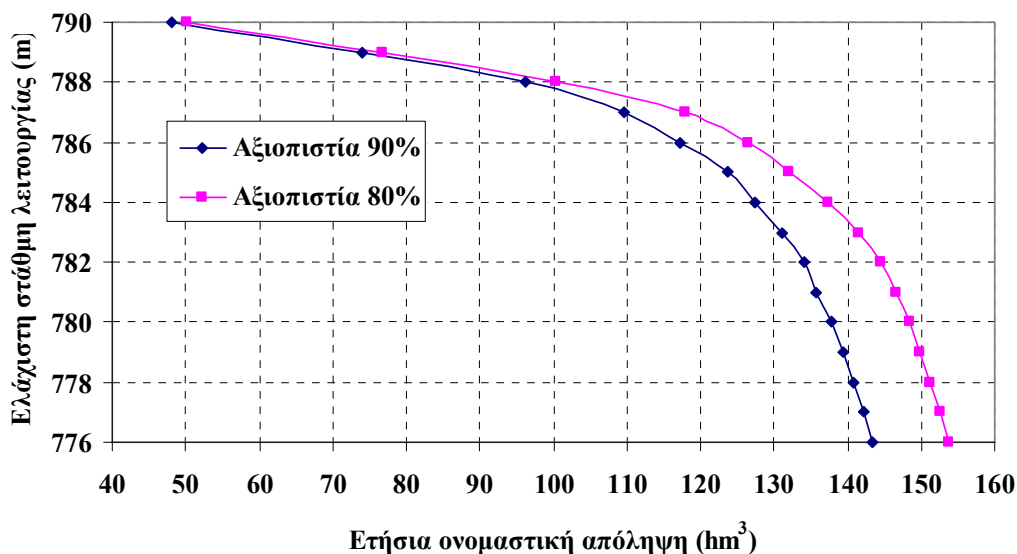
Πίνακας 2.2: Δυνατότητα απόληψης συναρτήσει ελάχιστης στάθμης λειτουργίας

Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας (m)	Χωρίς εκτροπή Κερασιώτη		Με εκτροπή Κερασιώτη	
	Ετήσια ονομαστική απόληψη (hm ³)	Μέσο έλλειμμα σε περίπτωση αστοχίας (hm ³)	Ετήσια ονομαστική απόληψη (hm ³)	Μέσο έλλειμμα σε περίπτωση αστοχίας (hm ³)
776	143.4	32	149.4	32
777	142.1	30	148.3	31
778	140.9	30	146.8	30
779	139.5	29	145.4	30
780	137.9	28	143.7	29
781	135.8	27	142.0	29
782	134.0	27	139.4	27
783	131.0	25	136.1	25
784	127.5	23	132.6	24
785	123.8	23	128.4	23
786	117.3	19	121.2	19
787	109.6	16	113.1	16
788	96.3	10	97.7	9
789	74.0	3	74.7	3
790	48.0	1	48.3	1

Ο πίνακας έχει υπολογιστεί για αξιοπιστία 90%.

Για να εξηγήσουμε τον Πίνακα 2.3, θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα την εκδοχή ορισμού των 780 m ως ελάχιστης στάθμης. Η ετήσια ονομαστική απόληψη, δηλαδή ο όγκος νερού που μπορούμε να πάρουμε κάθε χρόνο από τον ταμιευτήρα, είναι 137.9 hm³. Ο πίνακας έχει υπολογιστεί για αξιοπιστία 90%, που σημαίνει ότι θα μπορεί να ληφθεί η ονομαστική απόληψη στο 90% των περιπτώσεων. Σε περιπτώσεις ξηρασίας, κατά μέσο όρο μία φορά στα δέκα χρόνια, δεν θα μπορεί να ληφθεί η ονομαστική απόληψη, και προκειμένου να τηρηθεί η ελάχιστη στάθμη των 780 m θα πρέπει να ληφθεί λιγότερο. Σ' αυτές τις περιπτώσεις αστοχίας το έλλειμμα θα είναι κατά μέσο όρο 28 hm³.

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζονται σχηματικά οι δύο πρώτες στήλες του Πίνακα 2.3 (γραμμή που αντιστοιχεί σε αξιοπιστία 90%), καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη μικρότερης αξιοπιστίας, 80%.



Εικόνα 2.4: Δυνατότητα απόληξης συναρτήσει της ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης

Ο Πίνακας 2.3 δείχνει, για κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη 780, 782, 784, ή 786 m, το ποσοστό χρόνου υπέρβασης της κάθε στάθμης. Για παράδειγμα, αν οριστούν ως ελάχιστη στάθμη τα 780 m, τότε η λίμνη θα έχει στάθμη ψηλότερη από 784 m στο 85.4% του χρόνου, μεγαλύτερη από 785 m στο 79.9% του χρόνου κ.ο.κ.

Πίνακας 2.3: Σχέση στάθμης - συχνότητας υπέρβασης για διάφορα σενάρια λειτουργίας.

Στάθμη (m)	Ετήσια απόληψη 137.9 hm ³ - Ελάχιστη στάθμη +780 m	Ετήσια απόληψη 134.0 hm ³ - Ελάχιστη στάθμη +782 m	Ετήσια απόληψη 127.5 hm ³ - Ελάχιστη στάθμη +784 m	Ετήσια απόληψη 117.3 hm ³ - Ελάχιστη στάθμη +786 m
780	98.0% *	100%	100%	100%
781	95.7%	100%	100%	100%
782	93.0%	98.0% *	100%	100%
783	89.7%	95.2%	100%	100%
784	85.4%	91.8%	98.0% *	100%
785	79.9%	87.0%	94.7%	100%
786	73.4%	80.9%	89.7%	98.2% *
787	59.7%	68.7%	81.2%	93.5%
788	46.7%	52.6%	61.3%	74.1%
789	35.7%	41.2%	49.6%	60.1%
790	26.6%	30.4%	36.1%	44.3%
791	17.6%	20.8%	25.7%	33.0%

* Η πιθανότητα περίπου 2% να παραβιαστεί η κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη οφείλεται στην παραδοχή που έχει γίνει στο μοντέλο ότι μόλις η στάθμη φτάσει την κατώτατη επιτρεπόμενη, σταματά η απόληψη· η στάθμη όμως μπορεί να πέσει κι άλλο (μέχρι 40 cm) λόγω της εξάτμισης.

3 Ποιοτική θεώρηση

Η ποιοτική θεώρηση της λειτουργίας του ταμιευτήρα Πλαστήρα είχε ως κύριο στόχο τη διερεύνηση της τροφικής κατάστασης των υδάτων της λίμνης για διάφορα σενάρια ελάχιστης στάθμης. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν δύο ανεξάρτητα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής των βασικών ποιοτικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την ποιοτική κατάσταση του ταμιευτήρα, με έμφαση στη χλωροφύλλη και το διαλυμένο οξυγόνο.

Το πρώτο μοντέλο, το οποίο έχει την ονομασία MERES (Modeling Eutrophication in REServoirs), αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ. Το MERES προσομοιώνει τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε έναν ταμιευτήρα, και κυρίως αυτές που περιγράφουν τον ευτροφισμό και τη δίαιτα του διαλυμένου οξυγόνου. Συγκεκριμένα, οι ποιοτικές παράμετροι που εξετάζει το μοντέλο είναι η χλωροφύλλη, το αμμωνιακό άζωτο, ο οργανικός και ανόργανος φώσφορος, το BOD και το διαλυμένο οξυγόνο. Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας των ποιοτικών χαρακτηριστικών διακριτοποιούνται στο ένα ή τα δύο στρώματα του ταμιευτήρα (επιλίμνιο και υπολίμνιο), ενώ θεωρείται ότι πραγματοποιείται μεταφορά μάζας μεταξύ των δύο στρωμάτων μέσω της διαδικασίας τυρβώδους διάχυσης. Το MERES παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης μετάβασης από ένα στα δύο στρώματα και αντίστροφα, ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο στρωμάτων.

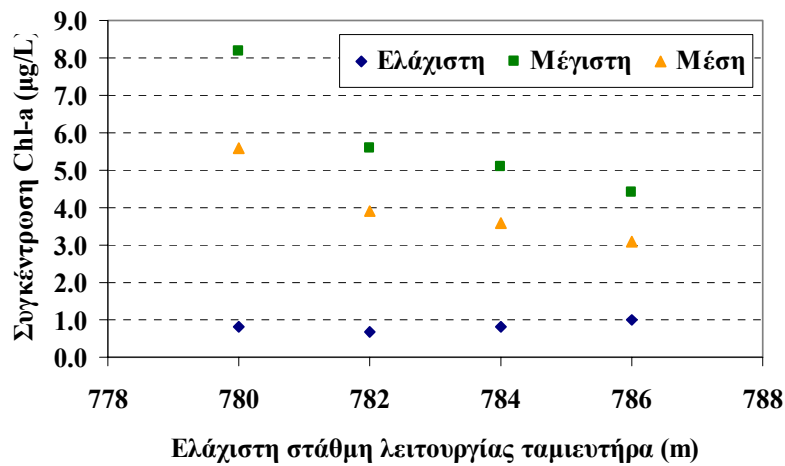
Το δεύτερο είναι ένα μοντέλο ευτροφισμού-διαλυμένου οξυγόνου (EUTRO-SEL), το οποίο αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Το μοντέλο προσομοιώνει διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που επιτελούνται, οι οποίες περιγράφονται μέσω εξισώσεων κινητικής καθώς και διατήρησης της μάζας. Οι ρύποι και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν είναι το φυτοπλαγκτόν (με όρους χλωροφύλλης), το αμμωνιακό και οξειδωμένο άζωτο, ο οργανικός και ανόργανος φώσφορος, το BOD και το διαλυμένο οξυγόνο.

Στα δύο μοντέλα έγιναν οι ίδιες παραδοχές και χρησιμοποιήθηκαν κοινά στοιχεία εισόδου, τα οποία αναφέρονται στα σενάρια διακύμανσης της στάθμης, καθώς και στα ρυπαντικά φορτία. Τα σενάρια διακύμανσης της στάθμης, τα οποία ελήφθησαν από την υδρολογική μελέτη, είχαν ως βάση τις ιστορικές χρονοσειρές εισροών, ενώ οι χρονοσειρές εκροών προέκυψαν μέσω προσομοίωσης, θεωρώντας σταθερή ονομαστική απόληψη, υπό τον περιορισμό της εκάστοτε ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης. Στο EUTRO-SEL εξετάστηκαν τρία σενάρια ελάχιστης στάθμης (+782, +784 και +786 m), ενώ στο MERES εξετάστηκε επιπλέον το σενάριο των +780 m. Η περίοδος προσομοίωσης του μοντέλου EUTRO-SEL είχε διάρκεια 8 υδρολογικών ετών (1988-89 έως 1995-96), ενώ η περίοδος προσομοίωσης του MERES, λόγω μεγαλύτερων απαιτήσεων σε υπολογιστικό φόρτο, είχε πενταετή διάρκεια. Και στις δύο περιπτώσεις, στην περίοδο προσομοίωσης συμπεριλήφθηκε η πρόσφατη έμμονη ξηρασία, η οποία επιλέχθηκε ως η δυσμενέστερη από πλευράς διακύμανσης της στάθμης.

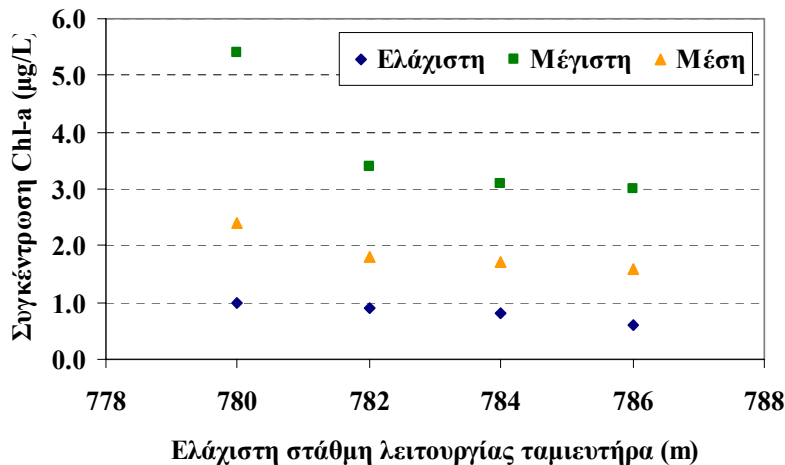
Τα ρυπαντικά φορτία της λίμνης εκτιμήθηκαν βάσει των χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Τα φορτία αυτά προέρχονται από σημειακές καθώς και μη σημειακές πηγές. Οι σημειακές πηγές αναφέρονται στις εκροές των αποχετευτικών δικτύων των παραλίμνιων οικισμών, ενώ οι μη σημειακές είναι αυτές που μεταφέρονται στον ταμιευτήρα μέσω της επιφανειακής απορροής και σχετίζονται με τις χρήσεις γης. Οι κύριες πηγές προέλευσης της μη σημειακής ρύπανσης είναι η γεωργία (εξαιτίας της χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων) και η κτηνοτροφία. Στην ανάλυση που έγινε ελήφθη υπόψη ότι τα

ρυπαντικά φορτία διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου, η οποία θεωρήθηκε ότι περιλαμβάνει τους μήνες Δεκέμβριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Αύγουστο.

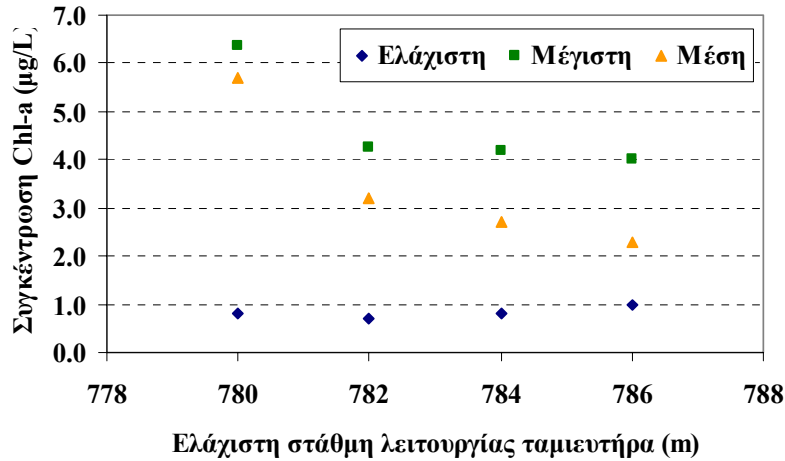
Το MERES εφαρμόστηκε μετά από βαθμονόμησή του με στοιχεία πεδίου. Στις Εικόνες 3.1 έως 3.3 παρουσιάζονται οι μέγιστες (θερινές), μέσες και ελάχιστες τιμές της συγκέντρωσης χλωροφύλλης (Chl-a) στο επιλίμνιο και το υπολίμνιο, καθώς και κατά την περίοδο της ανάμιξης, για τα σενάρια ελάχιστης στάθμης +780, +782, +784 και +786 m. Ακόμη, στην Εικόνα 3.4 απεικονίζεται η χρονική διακύμανση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στο επιλίμνιο και υπολίμνιο, για όλη την περίοδο προσομοίωσης και για το σενάριο ελάχιστης στάθμης +786 m.



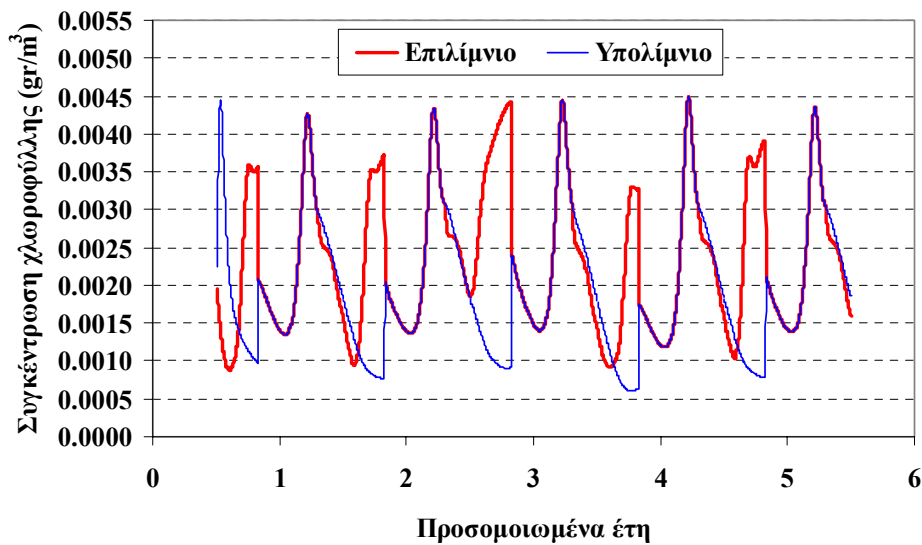
Εικόνα 3.1: Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης στο επιλίμνιο σύμφωνα με το μοντέλο MERES



Εικόνα 3.2: Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης στο υπολίμνιο σύμφωνα με το μοντέλο MERES.



Εικόνα 3.3: Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης κατά την ανάμιξη σύμφωνα με το μοντέλο MERES

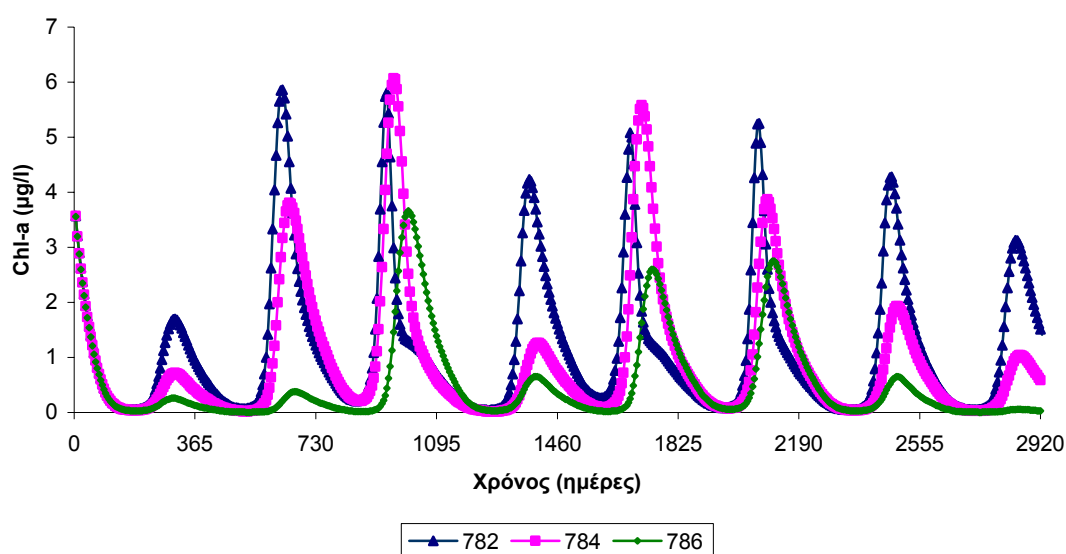


Εικόνα 3.4: Διακύμανση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης για ελάχιστη στάθμη +786 m

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου ευτροφισμού-διαλυμένου οξυγόνου (EUTROSEL), τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1, είναι σύμφωνα, σε γενικές γραμμές, με αυτά του μοντέλου MERES. Μάλιστα, το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης που προέκυψαν κυμαίνονται εντός του εύρους τιμών που έχουν μετρηθεί (0.7-3.7 µg/L) αποτελεί ένδειξη καλής προγνωστικής ικανότητας του εν λόγω μοντέλου. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι η διατήρηση ελάχιστης στάθμης χαμηλότερης των +786 m οδηγεί σε μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης που υπερβαίνουν τα 5.0 µg/L. Αντίθετα, η θέσπιση ελάχιστης στάθμης μεγαλύτερης ή ίσης των +786 m οδηγεί σε μέγιστη συγκέντρωση χλωροφύλλης που είναι χαμηλότερη των 3.5 µg/L και σε μέση συγκέντρωση που δεν ξεπερνά το 1.0 µg/L, τιμές οι οποίες χαρακτηρίζουν την ποιότητα του νερού ως πολύ καλή. Η χρονική διακύμανση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης για τα τρία σενάρια ελάχιστης στάθμης που εξετάστηκαν απεικονίζεται στην Εικόνα 3.5.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικές τιμές συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (μοντέλο EUTRO-SEL)

Έτος	Ελάχιστη στάθμη +782 m			Ελάχιστη στάθμη +784 m			Ελάχιστη στάθμη +786 m		
	Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη
1	0.67	0.05	1.70	0.36	0.04	1.22	0.22	0.03	1.21
2	1.52	0.07	5.86	1.09	0.02	3.81	0.12	0.00	0.38
3	1.36	0.21	5.81	1.70	0.21	6.07	1.06	0.02	3.66
4	1.18	0.04	4.23	0.41	0.02	1.26	0.37	0.03	1.29
5	1.32	0.26	5.08	1.55	0.09	5.58	0.76	0.02	2.60
6	1.15	0.09	5.25	1.17	0.07	3.87	0.93	0.06	2.75
7	1.13	0.05	4.28	0.65	0.04	1.93	0.33	0.03	1.10
8	1.01	0.05	3.13	0.40	0.03	1.04	0.06	0.00	0.28



Εικόνα 3.5: Μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης κατά το μοντέλο EUTRO-SEL

Λαμβάνοντας υπόψη τις εγγενείς ασάφειες των μαθηματικών προσομοιώσεων και θεωρώντας ότι είναι ενδεχόμενο να παρατηρούνται και χωρικές διακυμάνσεις των προσομοιωμένων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης, το ασφαλές συμπέρασμα που προκύπτει και από τα δύο μοντέλα μπορεί να συνοψισθεί ως ακολούθως:

Για ελάχιστη επιτρεπόμενη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα ίση με +786 m και υπό την προϋπόθεση μη αύξησης των ρυπαντικών φορτίων, πρέπει να θεωρείται βέβαιο ότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης δεν θα υπερβαίνουν τα 5 µg/L. Για στάθμες από +782 έως +784 m, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις δεν θα υπερβαίνουν τα 10 µg/L, ενώ για ελάχιστη στάθμη +780 m είναι πολύ πιθανόν να υπάρχει υπέρβαση της συγκέντρωσης των 10 µg/L.

Ο χαρακτηρισμός της ποιοτικής κατάστασης των νερών της λίμνης προϋποθέτει κατάλληλη κατηγοριοποίηση με βάση τις μέγιστες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης. Λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες τάσεις σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, προκύπτει ότι μπορεί να υιοθετηθεί η κατηγοριοποίηση του Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηρισμός ποιότητας νερού και κατάταξη λιμνών

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

Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση ελάχιστης στάθμης +786 m εξασφαλίζει πολύ καλή ποιότητα νερού και κατατάσσει τη λίμνη στην κατηγορία I, ενώ για τις στάθμες +782 και +784 m, η ποιότητα διατηρείται καλή, με κατάταξη όμως της λίμνης στην αμέσως επόμενη κατηγορία (κατηγορία II).

4 Το τοπίο της λίμνης

Το βασικό αισθητικό πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει η διαχείριση του νερού της λίμνης είναι ότι η ποιότητα του τοπίου της λίμνης αλλοιώνεται με τη μεταβολή της στάθμης. Αυτό το πρόβλημα συζητείται στο υποκεφάλαιο 4.1. Αν και το αντικείμενο του ερευνητικού έργου περιορίζεται στο θέμα της διαχείρισης του νερού, δεν μπορούμε να μην επισημάνουμε τις επιπτώσεις της ανάπτυξης στο τοπίο, πράγμα που κάνουμε στο υποκεφάλαιο 4.2. Η πλήρης ανάλυση της αισθητικής του τοπίου παρατίθεται στο Τεύχος 4 του έργου.

4.1 Η μεταβολή της στάθμης

Όταν η λίμνη είναι γεμάτη, δηλαδή βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη των 792 m, τα δέντρα στις όχθες εφάπτονται στο νερό. Το τοπίο, παρά την έντονη αντίθεση της γης που αναδύεται μέσα από το νερό, δίνει στον παρατηρητή την εντύπωση ότι είναι ενιαίο. Όταν η στάθμη πέφτει, αποκαλύπτεται μια έκταση ανάμεσα στο νερό και στα δέντρα, που διαταράσσει την ενότητα του τοπίου. Στο βόρειο τμήμα της λίμνης, όπου το ανάγλυφο είναι ήπιο, αποκαλύπτονται μεγάλες ερημικές εκτάσεις, ενώ στο νότιο, όπου το ανάγλυφο είναι αδρό, αποκαλύπτεται μια υποκίτρινη λωρίδα. Το φαινόμενο αυτό, που ονομάζουμε νεκρή ζώνη, φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Σε στάθμες ψηλότερες από περίπου 787 m πολύ λίγο εμφανίζεται η νεκρή ζώνη, γιατί πολλά δέντρα φυτρώνουν από στάθμες 790-791 m ενώ ρίχνουν τη σκιά τους ακόμα χαμηλότερα.



Εικόνα 4.1: Η νεκρή ζώνη

Οι φωτογραφίες αριστερά δείχνουν τη νεκρή ζώνη στο βόρειο και στο νότιο τμήμα της λίμνης (η λίμνη είναι σε στάθμη 781.3 m). Οι φωτογραφίες δεξιά έχουν προέλθει από ψηφιακή επεξεργασία των αριστερών, και δείχνουν πώς περίπου φαίνεται το τοπίο όταν η λίμνη είναι γεμάτη.

Η νεκρή ζώνη, εκτός του ότι αλλοιώνει άμεσα το τοπίο, έχει και το έμμεσο αποτέλεσμα να κάνει τη λίμνη να φαίνεται άδεια, γιατί αποκαλύπτει την έκταση που θα μπορούσε να έχει η λίμνη και παρέχει το μέτρο σύγκρισης.

Όσο χαμηλότερη η στάθμη, τόσο πιο έντονη είναι η αλλοίωση του τοπίου. Όπως είναι φυσικό, άνθρωποι που έχουν ξαναδεί το τοπίο σε ψηλότερη στάθμη αισθάνονται πιο έντονα την αλλοίωσή του. Οι καινούργιοι επισκέπτες είναι λιγότερο αυστηροί, αλλά παρόλα αυτά σε στάθμες κάτω από περίπου 782 m διαπιστώνουν, παρόλο που δεν έχουν μέτρο σύγκρισης, ότι το τοπίο είναι προβληματικό. Στον Πίνακα 4.1 επιχειρείται διαίρεση σε τρεις κατηγορίες στάθμης.

Πίνακας 4.1: Μεταβολή της ποιότητας του τοπίου με τη στάθμη της λίμνης

Στάθμη	Περιγραφή
Ψηλή (786 ως 792 m)	Το τοπίο παρουσιάζει ελάχιστη ή καμιά αλλοίωση και όλοι οι παρατηρητές το αντιλαμβάνονται ως υπέροχο.
Μεσαία (782 ως 786 m)	Το τοπίο παρουσιάζει αυξανόμενη αλλοίωση. Οι περισσότεροι μη τακτικοί παρατηρητές το βρίσκουν όμορφο. Οι τακτικοί παρατηρητές εντοπίζουν προβλήματα αλλά γενικά το βρίσκουν ανεκτό.
Χαμηλή (776 ως 782 m)	Το τοπίο είναι σημαντικά αλλοιωμένο. Μόνο οι μη τακτικοί παρατηρητές μπορεί να το βρουν ικανοποιητικό, και μόνο σε μερικές θέσεις παρατήρησης.

Επειδή οι τρεις αυτές κατηγορίες στάθμης είναι αρκετά ευρείες, στον Πίνακα 4.2 γίνεται διαχωρισμός σε περισσότερες κατηγορίες και δίνεται σχετικός χαρακτηρισμός σε κάθε κατηγορία. Φυσικά αυτός ο διαχωρισμός είναι ενδεικτικός και έχει και κάποιο βαθμό αυθαιρεσίας, αφού στην αισθητική η ποιότητα δεν είναι σαφής, ούτε αντικειμενική, ούτε μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Εντούτοις, ο Πίνακας 4.2 παρέχει ένα γνώμονα που είναι αναγκαίος για να μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα συγκερασμού των διαφόρων αλληλοσυγκρουόμενων απαιτήσεων.

Πίνακας 4.2: Ποιοτικός χαρακτηρισμός τοπίου ανάλογα με τη στάθμη

Στάθμη (m)	Ποιότητα τοπίου	Παρατηρήσεις
788–792	Εξαιρετική	Η νεκρή ζώνη γίνεται ελάχιστα αντιληπτή (788–790) ή δεν φαίνεται καθόλου (790–792).
786–788	Πολύ καλή	Η νεκρή ζώνη γίνεται λίγο αντιληπτή και το τοπίο είναι κάπως αλλοιωμένο.
784–786	Καλή	Η νεκρή ζώνη είναι σαφής, το τοπίο είναι αλλοιωμένο, αλλά εξακολουθεί να είναι όμορφο για τους μη τακτικούς παρατηρητές και ικανοποιητικό για τους τακτικούς.
782–784	Μέτρια	Η αλλοίωση του τοπίου είναι έντονη, αλλά το τοπίο ικανοποιεί τους μη τακτικούς παρατηρητές και γίνεται ανεκτό από τους τακτικούς.
776–782	Κακή	Η λίμνη φαίνεται άδεια, ακόμα και για τους μη τακτικούς παρατηρητές.

4.2 Η επίδραση της αλόγιστης ανάπτυξης

Η μεταβολή της στάθμης μπορεί να συνιστά πρόβλημα στο τοπίο, αλλά η περιήγηση στο περιβάλλον της λίμνης αποκαλύπτει εξίσου σημαντικά και μάλιστα μη αναστρέψιμα προβλήματα που προέρχονται από την κακή ανάπτυξη της περιοχής. Κατασκευάζονται μεγάλοι δρόμοι που δεν ταιριάζουν στο τοπίο, και μάλιστα με μεθόδους που το βλάπτουν ανεπανόρθωτα, δηλαδή με μεγάλα και εμφανή ορύγματα και επιχώματα. Οι πινακίδες των επιχειρήσεων συναγωνίζονται η μια την άλλη σε μέγεθος και χρώμα και διαταράσσουν τη φυσιογνωμία των ορεινών χωριών. Τα αλουμινένια κουφώματα των κτιρίων, οι τσίγκινες στέγες, κόκκινες για να θυμίζουν κακήν-κακώς κεραμίδια, και οι αρχιτεκτονικές ιδέες που έρχονται από χώρους με εντελώς διαφορετική αισθητική, συνιστούν ένα αντιαισθητικό σύνολο. Ο υπερβολικός φωτισμός τη νύχτα σε ορισμένα σημεία μοιάζει να έχει βγει από αστικό κέντρο. Εκτενέστερη αναφορά σ' αυτά τα θέματα γίνεται στο Κεφάλαιο 4 του Τεύχους 4. Είναι ανάγκη να ληφθούν αμέσως αυστηρά μέτρα τώρα που το πρόβλημα είναι στην αρχή του, για να αποφευχθεί περαιτέρω υποβάθμιση του τοπίου.

5 Πολυκριτηριακή ανάλυση

5.1 Γενικά

Η πολυκριτηριακή ανάλυση, η οποία είναι κλάδος της επιστήμης της επιχειρησιακής έρευνας, είναι μια ποσοτική μέθοδος αξιολόγησης πολλαπλών και, κατά κανόνα, αντικρουόμενων κριτηρίων κατά τη λήψη μιας απόφασης. Η πολυκριτηριακή ανάλυση έχει ευρέως εφαρμοστεί σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών συστημάτων, τα οποία εξυπηρετούν περισσότερες από μία χρήσεις νερού. Μάλιστα τα τελευταία χρόνια, με τη θεώρηση και της περιβαλλοντικής-οικολογικής συνιστώσας στη διαχείριση των υδατικών πόρων, η ανάγκη επιλογής της όσο το δυνατόν βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης έχει καταστήσει την πολυκριτηριακή ανάλυση βασικό εργαλείο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση προϋποθέτει αφενός τη διατύπωση όλων των κριτηρίων που σχετίζονται με τη λήψη της απόφασης με ποσοτικούς όρους και αφετέρου την ενσωμάτωσή τους σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση, η οποία είναι γνωστή ως συνάρτηση χρησιμότητας. Η πρώτη προϋπόθεση είναι δύσκολο να υλοποιηθεί όταν τα κριτήρια είναι υποκειμενικά ή δεν μπορούν παρά να βαθμονομηθούν με ποιοτικούς όρους (π.χ., η αισθητική του τοπίου). Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη προϋπόθεση ενέχει τον κίνδυνο υποτίμησης ή υπερτίμησης ορισμένων κριτηρίων σε σχέση με τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα τη διατύπωση μεροληπτικών συναρτήσεων χρησιμότητας. Παρόλο που στη βιβλιογραφία προτείνεται ένα μεγάλο πλήθος τεχνικών αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων, η εξάλειψη της μεροληψίας κατά την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης δεν μπορεί να επιτευχθεί ολοκληρωτικά.

5.2 Εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης στη διαχείριση του ταμιευτήρα Πλαστήρα

Ο ταμιευτήρας Πλαστήρα είναι ένα έργο πολυστοχικό, δεδομένου ότι εξυπηρετεί πολλαπλές χρήσεις νερού όπως ύδρευση, άρδευση παραγωγή ενέργειας και αναψυχή. Η διαχείριση του ταμιευτήρα, πέρα από την εξυπηρέτηση των παραπάνω χρήσεων, οφείλει να εξασφαλίζει ακόμη προστασία τόσο του τοπίου όσο και την ποιότητας του υδάτινου περιβάλλοντος.

Στη διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου εξετάστηκαν τρεις συνιστώσες της λειτουργίας του ταμιευτήρα, και συγκεκριμένα οι δυνατότητες ασφαλούς απόληψης, η ποιότητα του νερού και η αισθητική του τοπίου, συναρτήσει της ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης του. Στόχος της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η επιλογή του κατάλληλου ορίου ελάχιστης στάθμης για κάθε μία από τις ακόλουθες παραδοχές:

- α) τα τρία κριτήρια, δηλαδή η ασφαλής απόληψη, η ποιότητα του νερού και η αισθητική του τοπίου, θεωρούνται ισοδύναμα·
- β) ένα από τα τρία κριτήρια υπερτερεί σημαντικά σε σχέση με τα υπόλοιπα·
- γ) ένα από τα τρία κριτήρια υπερτερεί συντριπτικά σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Αρχικά απαιτήθηκε η εύρεση μιας ποσοτικής έκφρασης για κάθε ένα από τα παραπάνω κριτήρια. Για τον σκοπό αυτό, όλα τα κριτήρια εκφράστηκαν στην κλίμακα από 0 έως 1, όπου το 0 αντιστοιχεί σε απόλυτα απορριπτέα επιλογή ελάχιστης στάθμης ενώ το 1 αντιστοιχεί σε απόλυτα επιθυμητή επιλογή. Το εύρος τιμών ελάχιστης στάθμης που εξετάστηκε κυμαίνεται από τα +776 m (στάθμη υδροληψίας) μέχρι τα +790 m.

Ως προς την ασφαλή απόληψη, η αριθμητική διατύπωση του εν λόγω κριτηρίου ήταν προφανής, δεδομένου ότι προϊόν της υδρολογικής ανάλυσης ήταν η ετήσια ονομαστική απόληψη R για διάφορες τιμές της ελάχιστης στάθμης z . Από τα σενάρια που εξετάστηκαν, επιλέχθηκε εκείνο το οποίο αναφέρεται σε μεμονωμένη λειτουργία του ταμιευτήρα Πλαστήρα (χωρίς να ληφθεί υπόψη το έργο εκτροπής του Κερασιώτη) και σε αξιοπιστία 90%. Η κανονικοποίηση της συνάρτησης $R(z)$, βάσει της οποίας προέκυψαν οι τιμές του δείκτη ετήσιας ονομαστικής απόληξης του Πίνακα 5.1, έγινε με εφαρμογή του γραμμικού μετασχηματισμού:

$$r(z) = \frac{R_{\max}(z) - R(z)}{R_{\max}(z) - R_{\min}(z)}$$

Πίνακας 5.1: Σχέση κριτηρίου ασφαλούς απόληξης – ελάχιστης στάθμης λειτουργίας

Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας (m)	Ετήσια ονομαστική απόληξη (hm ³)	Δείκτης ετήσιας ονομαστικής απόληξης
776	143.4	1.000
777	142.1	0.986
778	140.9	0.974
779	139.5	0.959
780	137.9	0.942
781	135.8	0.920
782	134.0	0.901
783	131.0	0.870
784	127.5	0.833
785	123.8	0.795
786	117.3	0.726
787	109.6	0.646
788	96.3	0.506
789	74.0	0.273
790	48.0	0.000

Ο πίνακας ισχύει για μεμονωμένη λειτουργία ταμιευτήρα Πλαστήρα και επίπεδο αξιοπιστίας 90%.

Για την ποσοτική διατύπωση του κριτηρίου που αναφέρεται στην ποιότητα του νερού ελήφθησαν υπόψη οι μέσες τιμές συγκέντρωσης χλωροφύλλης, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου MERES. Οι εν λόγω τιμές αναφέρονται σε 4 σενάρια ελάχιστης στάθμης, και συγκεκριμένα τα +780, +782, +784 και +786 m. Θεωρώντας ότι η στάθμη των +776 m αντιστοιχεί σε απόλυτα μη αποδεκτή ποιότητα νερού, ενώ η στάθμη των +790 m αντιστοιχεί σε απόλυτα επιθυμητή ποιότητα, προέκυψαν οι τιμές του δείκτη ποιότητας νερού του Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Σχέση κριτηρίου ποιότητας νερού – ελάχιστης στάθμης λειτουργίας

Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας (m)	Μέση συγκέντρωση χλωροφύλλης (μg/L)	Δείκτης ποιότητας νερού
776		0.000
777		0.123
778		0.246
779		0.370
780	5.6	0.493
781		0.616
782	3.9	0.739
783		0.761
784	3.6	0.783
785		0.819
786	3.1	0.855
787		0.891
788		0.928
789		0.964
790		1.000

Ο πίνακας βασίζεται στην εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου. Με πλάγια γράμματα απεικονίζονται οι τιμές που προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή.

Τέλος, για την ποσοτική διατύπωση του κριτηρίου που αναφέρεται στην αισθητική του τοπίου, ελήφθη υπόψη η κατανομή του χρόνου σε διάφορες στάθμες συναρτήσεως του ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης λειτουργίας z . Η εν λόγω κατανομή προέκυψε από την υδρολογική μελέτη του ταμιευτήρα, μέσω στοχαστικής προσομοίωσης. Οι τιμές του δείκτη αισθητικής του τοπίου, οι οποίες απεικονίζονται στον Πίνακα 3, υπολογίστηκαν από τη σχέση:

$$I(z) = 0.25 \times p_1(z) + 0.50 \times p_2(z) + 0.75 \times p_3(z) + 1.00 \times p_4(z)$$

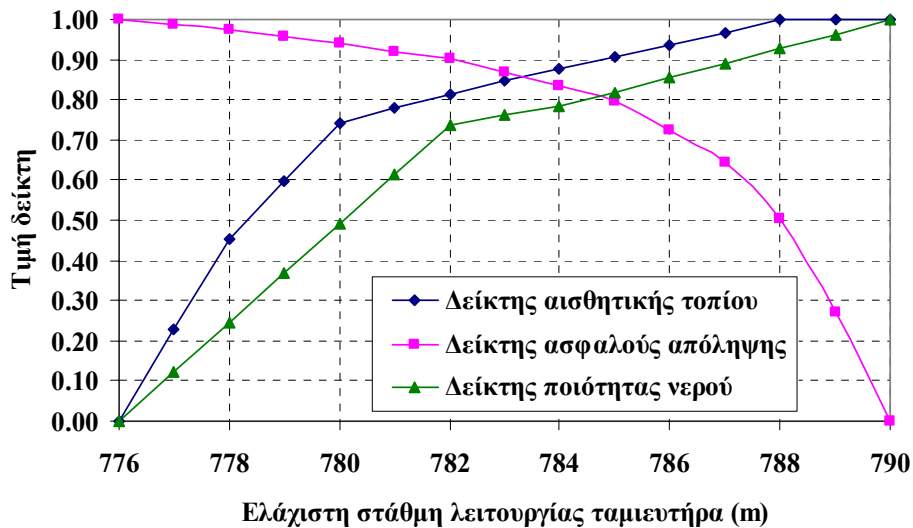
όπου p_1 η συχνότητα διακύμανσης της στάθμης μεταξύ +782 και +784 m, p_2 η συχνότητα διακύμανσης της στάθμης μεταξύ +784 και +786 m, p_3 η συχνότητα διακύμανσης της στάθμης μεταξύ +786 και +788 m, και p_4 η συχνότητα διακύμανσης της στάθμης πάνω από τα +788 m. Θεωρήθηκε μηδέν ο δείκτης ποιότητας τοπίου εφόσον η ελάχιστη στάθμη λειτουργίας τεθεί στα +776 m.

Πίνακας 5.3: Σχέση κριτηρίου αισθητικής τοπίου – ελάχιστης στάθμης λειτουργίας

Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας (m)	Κατανομή χρόνου σε διάφορες στάθμες	Δείκτης αισθητικής του τοπίου
776		0.000
777		0.228
778	780-782: 35% 782-784: 9% 784-786: 13% 786-788: 25% 788-792: 18%	0.455
779		0.599
780	780-782: 7% 782-784: 8% 784-786: 12% 786-788: 27% 788-792: 46%	0.743
781		0.779
782	782-784: 8% 784-786: 11% 786-788: 28% 788-792: 53%	0.815
783		0.846
784	784-786: 10% 786-788: 29% 788-792: 61%	0.878
785		0.906
786	786-788: 26% 788-792: 74%	0.935
787		0.968
788	788-792: 100%	1.000
789		1.000
790		1.000

Με πλάγια γράμματα απεικονίζονται οι τιμές που προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή.

Η μεταβολή των τριών δεικτών συναρτήσει της ελάχιστης στάθμης λειτουργίας του ταμιευτήρα Πλαστήρα απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 5.1.



Εικόνα 5.1: Δείκτες απόληψης, ποιότητας και αισθητικής συναρτήσει ελάχιστης στάθμης

Η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράστηκε ως σταθμισμένο άθροισμα των τριών παραπάνω δεικτών με χρήση κατάλληλων των συντελεστών βάρους w , δηλαδή:

$$F = w_1 I_1 + w_2 I_2 + w_3 I_3$$

Στην περίπτωση που τα τρία κριτήρια θεωρήθηκαν ισοδύναμα, όλοι οι συντελεστές βάρους τέθηκαν ίσοι με τη μονάδα. Στην περίπτωση σημαντικής υπεροχής ενός εκ των τριών κριτηρίων, ο αντίστοιχος συντελεστής τέθηκε ίσος με 2, ενώ στην περίπτωση συντριπτικής υπεροχής ενός εκ των τριών κριτηρίων, ο αντίστοιχος συντελεστής βάρους τέθηκε ίσος με 4. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται στον Πίνακα 5.4.

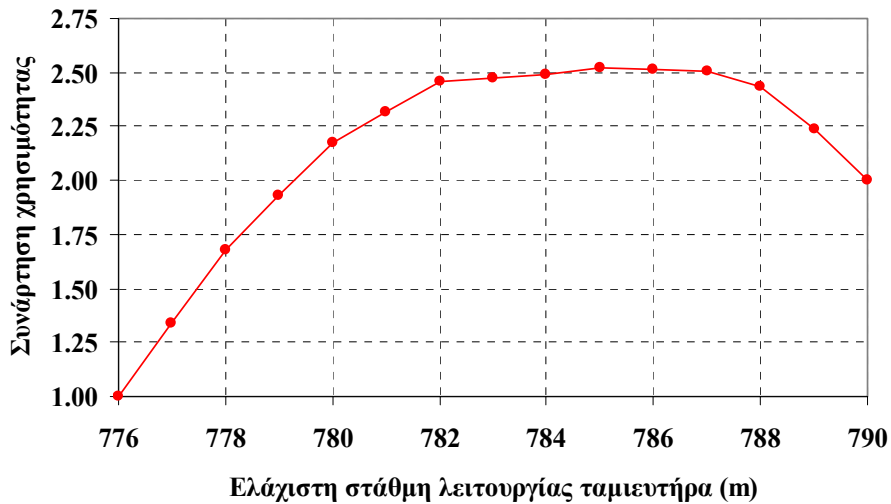
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης

Σενάριο	Συντελεστής βάρους δείκτη ασφαλούς απόληψης, w_1	Συντελεστής βάρους δείκτη ποιότητας νερού, w_2	Συντελεστής βάρους δείκτη αισθητικής του τοπίου, w_3	Βέλτιστη τιμή ελάχιστης στάθμης λειτουργίας (m)
1	1	1	1	785
2	2	1	1	782
3	1	2	1	787
4	1	1	2	787
5	4	1	1	782
6	1	4	1	788
7	1	1	4	788

Από την πολυκριτηριακή ανάλυση προκύπτει ότι η βέλτιστη επιλογή ελάχιστης στάθμης με ισοδύναμη αντιμετώπιση των τριών κριτηρίων λειτουργίας του ταμιευτήρα Πλαστήρα (ασφαλής απόληψη, ποιότητα νερού και αισθητική του τοπίου) είναι τα +785 m. Αν δοθεί μεγαλύτερο βάρος στην απόληψη, τότε η στάθμη θα πρέπει να τεθεί στα +782 m. Αντίθετα, αν ληφθούν περισσότερο υπόψη τα άλλα δύο άλλα κριτήρια (ποιότητα νερού και αισθητική), τότε η ελάχιστη επιτρεπόμενη στάθμη θα πρέπει να οριστεί στα 787-788 m.

Στην Εικόνα 5.2 απεικονίζονται οι τιμές της συνάρτησης χρησιμότητας συναρτήσει της ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης λειτουργίας του ταμιευτήρα, με θεώρηση ισοβαρών κριτηρίων. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι υπάρχει ένα εμφανές εύρος τιμών επιτρεπόμενης στάθμης, για τις οποίες η τιμή της συνάρτησης κυμαίνεται κοντά ή λίγο πάνω από το 2.50. Έτσι, αν και η συνάρτηση μεγιστοποιείται στα +785 m, οποιαδήποτε επιλογή μεταξύ των +782 και +787 m μπορεί να θεωρηθεί

αποδεκτή, καθώς απέχει ελάχιστα από τη μέγιστη τιμή. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι στην περιοχή αυτή ικανοποιούνται σε μεγάλο βαθμό και τα τρία κριτήρια που έχουν τεθεί. Αντίθετα, εφόσον η ελάχιστη επιτρεπόμενη στάθμη οριστεί εκτός του παραπάνω διαστήματος, η τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας μειώνεται απότομα, με αποτέλεσμα να παραβιάζεται τουλάχιστον ένα από τα κριτήρια διαχείρισης του ταμιευτήρα.



Εικόνα 5.2: Χρησιμότητα συναρτήσει της ελάχιστης στάθμης λειτουργίας
 Η συνάρτηση έχει προκύψει θέτοντας ίσους συντελεστές βάρους στα τρία κριτήρια διαχείρισης του ταμιευτήρα.

6 Συμπεράσματα

Η ετήσια απολήψιμη ποσότητα νερού από τη λίμνη εξαρτάται από την κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη που θα οριστεί. Τη συσχέτιση μεταξύ κατώτατης στάθμης και απολήψιμου αποθέματος έχει δείξει η Εικόνα 2.4. Στον Πίνακα 6.1 εξετάζονται πέντε πιθανές επιλογές για την κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη.

Ο Πίνακας 6.1 έχει γίνει με τις εξής παραδοχές:

Σταθερή απόληψη Κάθε χρόνο θα λαμβάνεται η ίδια ποσότητα νερού, ανεξάρτητα από τη στάθμη της λίμνης (εκτός από τις ιδιαίτερα ξηρές περιόδους, όπως εξηγείται παρακάτω).

Αξιοπιστία 90% Η ετήσια απόληψη που σημειώνεται στον πίνακα μπορεί να ληφθεί στο 90% των περιπτώσεων. Κατά μέσο όρο μία φορά στα δέκα χρόνια δεν θα μπορεί να ληφθεί αυτή η ποσότητα χωρίς να παραβιαστεί η κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη.

Αστοχία της απόληξης και όχι της στάθμης Όταν υπάρχει αστοχία λόγω ξηρασίας, δηλαδή στο 10% των περιπτώσεων, δεν θα παραβιάζεται η κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη αλλά θα ελαττώνεται η απόληψη.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση διάφορων υποψήφιων επιλογών για κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη

Κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη	Ονομαστική ετήσια απόληψη (hm ³)*	Κέρδος σε νερό σε σχέση με 782 m (hm ³)*	Κατανομή χρόνου σε διάφορες στάθμες και ποιότητες τοπίου	Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης (μg/L)		
				Μέση θερινή **	Μέση ετήσια ***	Μέση μέγιστη κρίσιμης οκταετίας ***
780 m	137.9 (143.7)	+3.9 (+4.3)	7% 780–782 Κακή 8% 782–784 Μέτρια 12% 784–786 Καλή 27% 786–788 Πολύ καλή 46% 788–792 Εξαιρετική	5.6		
782 m	134.0 (139.4)	0	8% 782–784 Μέτρια 11% 784–786 Καλή 28% 786–788 Πολύ καλή 53% 788–792 Εξαιρετική	3.9	0.67–1.52	4.41
784 m	127.5 (132.6)	-6.5 (-6.8)	10% 784–786 Καλή 29% 786–788 Πολύ καλή 61% 788–792 Εξαιρετική	3.6	0.36–1.70	3.09
786 m	117.3 (121.2)	-16.7 (-18.2)	26% 786–784 Πολύ καλή 74% 788–792 Εξαιρετική	3.1	0.06–1.06	1.65
788 m	96.3 (97.7)	-37.7 (-41.7)	100% 788–792 Εξαιρετική			

* Σε παρένθεση παρουσιάζεται η εκδοχή λειτουργίας του έργου εκτροπής του Κερασιώτη.

** Μοντέλο MERES.

*** Μοντέλο EUTRO-SEL.

Για να λειτουργεί το σύστημα με σταθερή απόληψη και να αντιμετωπίζονται και οι ξηρασίες, θα πρέπει κάθε χρόνο, όσο το δυνατόν πιο αργά μέσα στο υδρολογικό έτος, αλλά πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου, δηλαδή γύρω στα τέλη Μαρτίου, να επιβεβαιώνουν οι αρμόδιες αρχές, με βάση το υπάρχον απόθεμα στη λίμνη, εάν η ποσότητα που θα αποληφθεί μέσα στο έτος θα είναι η

ονομαστική (αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 6.1), πράγμα που θα συμβαίνει στο 90% των περιπτώσεων, ή αν θα πρέπει να μειωθεί (σε ξηρά έτη, στο 10% των περιπτώσεων) και πόσο, ώστε να μην παραβιαστεί το κατώτατο όριο στάθμης.

Τονίζεται ότι σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να γίνεται απόληψη μεγαλύτερη από την ονομαστική, ακόμα και αν ο ταμιευτήρας είναι γεμάτος. Αν ο παραπάνω τρόπος διαχείρισης είναι ευαίσθητος σε κοινωνικές ή πολιτικές πιέσεις, τότε υπάρχει φόβος όταν η λίμνη είναι γεμάτη να λαμβάνεται μεγαλύτερη ποσότητα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί (υποκεφάλαιο 2.2), αυτό είναι λάθος, γιατί σκοπός της ύπαρξης ενός ταμιευτήρα υπερετήσιας ρύθμισης είναι να αποθηκεύεται νερό τις υδρολογικά πλούσιες χρονιές, ώστε να είναι διαθέσιμο τις φτωχές χρονιές. Αν κάποιο έτος που η λίμνη είναι γεμάτη ληφθεί μεγαλύτερη ποσότητα από την προβλεπόμενη, αυτό αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα αστοχίας αλλά και τις συνέπειες της πιθανής αστοχίας κατά τα επόμενα χρόνια.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις και τα δεδομένα του Πίνακα 6.1, προκύπτει ότι η επιλογή των 780 m δεν είναι αποδεκτή ως κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη τόσο από πλευράς ποιότητας νερού όσο και από πλευράς αισθητικής. Η επιλογή των 788 m δεν είναι σκόπιμο να προταθεί γιατί έχει μικρό περιβαλλοντικό όφελος και μεγάλο κόστος σε νερό σε σχέση με την επιλογή των 786 m.

Αν οριστούν τα 782 m ως κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη, τότε η λίμνη παραμένει σε στάθμες μεγαλύτερες από 786 m για μεγάλο ποσοστό του χρόνου, ενώ πέφτει κάτω από τα 784 m σε ξηρά έτη στο τέλος της αρδευτικής περιόδου. Η προκαλούμενη υποβάθμιση του τοπίου είναι μικρή αλλά όχι αμελητέα, ενώ η ποιότητα του νερού μόνον οριακά μπορεί να γίνει αποδεκτή. Αν ο προγραμματισμός των απολήψεων δεν είναι καλός, ή αν είναι ευαίσθητος σε κοινωνικές ή πολιτικές πιέσεις, και παραβιάζεται η σταθερή απόληψη στις υδρολογικά καλές χρονιές, τότε η στάθμη μπορεί να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα για μεγαλύτερα διαστήματα από αυτά που προβλέπονται στον Πίνακα 6.1, με συνέπεια την επιπλέον υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Με κριτήριο λοιπόν την ελαχιστοποίηση των κινδύνων βλάβης του περιβάλλοντος, καθώς και της διακινδύνευσης, δεν προτείνεται η επιλογή των 782 m.

Οι επιλογές των 784, 785 και 786 m παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

784 m Με σωστή διαχείριση, εξασφαλίζει πολύ καλό τοπίο στο 90% των περιπτώσεων, καλό τοπίο στις υπόλοιπες περιπτώσεις, και ικανοποιητική ποιότητα νερού. Σε περίπτωση κακού προγραμματισμού των απολήψεων το τοπίο διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα. Το κόστος σε νερό είναι περίπου 7 hm³ το χρόνο σε σχέση με την επιλογή των 782 m.

785 m Πρόκειται για ενδιάμεση λύση, που έχει κόστος νερού 10–11 hm³ το χρόνο σε σχέση με την επιλογή των 782 m.

786 m Εξασφαλίζει πολύ καλό τοπίο και πολύ καλή ποιότητα νερού σε όλες τις περιπτώσεις και ανεξάρτητα από την ποιότητα της διαχείρισης, με κόστος σε νερό περίπου 17–18 hm³ το χρόνο σε σχέση με την επιλογή των 782 m.

Συνοψίζοντας όλες τις παραπάνω εκτιμήσεις και τα δεδομένα, καταλήγουμε στα εξής:

- Για τον καθορισμό της κατώτατης επιτρεπόμενης στάθμης της λίμνης προτείνεται ως επιθυμητή η στάθμη των 786 m και ως αποδεκτή η στάθμη των 784 m.
- Χρειάζεται να καταρτιστεί μόνιμο πρόγραμμα απολήψεων για όλο το χρόνο, με βάση τη σταθερή ετήσια απόληψη που αντιστοιχεί στην κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη που θα επιλεγεί, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.1.
- Οι αρμόδιες αρχές θα πρέπει κάθε χρόνο, πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου, να εξετάζουν το απόθεμα νερού στη λίμνη. Εφόσον το απόθεμα επαρκεί, πράγμα που αναμένεται να συμβαίνει στο 90% των ετών, θα εγκρίνεται η χρησιμοποίηση του μόνιμου προγράμματος απολήψεων. Στις περιπτώσεις μεγάλης ξηρασίας, δηλαδή στο 10% των ετών, όπου το απόθεμα δεν θα επαρκεί για τήρηση του μόνιμου προγράμματος, το πρόγραμμα απολήψεων θα τροποποιείται εκτάκτως με μείωση των απολήψεων, ώστε να μην παραβιαστεί η κατώτατη επιτρεπόμενη στάθμη.