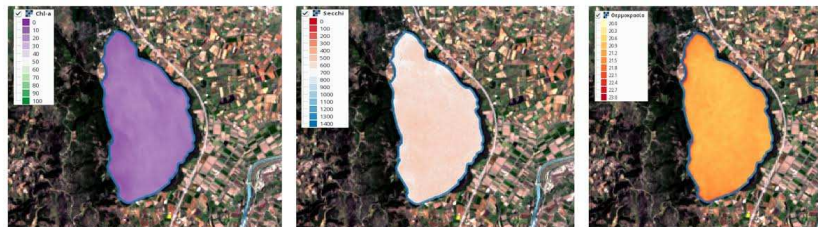




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΛΙΜΝΑΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ  
ΕΛΛΑΔΑΣ ΜΕ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ



**Ευαγγελία Κοντοπούλου**

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Μεταπτυχιακή Εργασία για μερική εκπλήρωση των  
απαιτήσεων για το Διεπιστημονικό-Διατμηματικό  
Δίπλωμα Ειδίκευσης του Δ.Π.Μ.Σ του  
Ε.Μ.Πολυτεχνείου «Περιβάλλον και Ανάπτυξη»

**Περιβάλλον**

**και**

**Ανάπτυξη**

**Αθήνα, Απρίλιος 2016**



**Διπλωματική Εργασία**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1/4/2016.**

.....  
**Κωνσταντίνος Καράντζαλος**  
**Επ. Καθηγητής**

.....  
**Δανιήλ Μαμάης**  
**Αν. Καθηγητής**

.....  
**Δημήτριος Αργιαλάς**  
**Καθηγητής**

.....  
**Ευαγγελία Κοντοπούλου**  
**Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών**

© Αθήνα, 2016 Κοντοπούλου Ευαγγελία

Με επιφύλαξη εντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

## Περίληψη

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι αυτές που συμβάλλουν καθοριστικά στο φαινόμενο του ευτροφισμού των λιμναίων συστημάτων. Η Ευρωπαϊκή Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/EK) και η εθνική νομοθεσία με την οποία εναρμονίστηκε απαιτούν την παρακολούθηση της κατάστασης και την επίτευξη «Καλής Περιβαλλοντικής Κατάστασης» (*Good Environmental Status*) σε όλα τα ύδατα με συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους.

Προς την κατεύθυνση αυτή, στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε και αξιολογήθηκε η δυνατότητα εκτίμησης της ποιότητας των υδάτων από διαχρονικά τηλεπισκοπικά δεδομένα σε λίμνες της Ελλάδας. Μελετήθηκαν σημαντικοί δείκτες ποιότητας, όπως η χλωροφύλλη-α, το βάθος του δίσκου Secchi και η θερμοκρασία σε σχέση με διαχρονικές δορυφορικές παρατηρήσεις και μετρήσεις πεδίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα των συσχετίσεων αξιολογήθηκαν για τους σταθμούς παρακολούθησης 11 λιμναίων συστημάτων της Ελλάδας. Τα δορυφορικά δεδομένα και οι μετρήσεις πεδίου (*in situ*) που αξιολογήθηκαν ήταν ταυτόχρονα ή επιλεγμένα να απέχουν χρονικά έως το πολύ 15 ημέρες. Τα δεδομένα συσχετίστηκαν με τεχνικές απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Τα πολλαπλά πειραματικά αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα και συμφωνούν σε γενικές γραμμές με την σχετική βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, για την χλωροφύλλη-α επιτεύχθηκαν συσχετίσεις της τάξης του 75% για  $n=168$  παρατηρήσεις, με μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων (0,45-118,88  $\mu\text{g/l}$ ) και μεγάλη χρονική απόκλιση των δορυφορικών και *in-situ* δεδομένων. Το βάθος του δίσκου Secchi έδωσε συσχετίσεις για αριθμό παρατηρήσεων  $n=193$  της τάξης του 70%, για μεγάλο εύρος τιμών (0,01-14m) και για χρονική διαφορά έως 15 ημερών. Τις μικρότερες συσχετίσεις έδωσε η επιφανειακή θερμοκρασία, όπου ο δείκτης  $R^2$  δεν ξεπέρασε το 64% για χρονική διαφορά έως 5 ημέρες και αριθμό παρατηρήσεων  $n=51$ .

Συμπερασματικά, με πολλαπλές διαχρονικές, πολυφασματικές, τηλεπισκοπικές παρατηρήσεις και αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου είναι εφικτό να εκτιμηθούν έγκαιρα και για εκτεταμένες χωρικές περιοχές βασικοί δείκτες ποιότητας σε εσωτερικά ύδατα. Με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και την περαιτέρω αξιολόγησή τους στο μέλλον μπορεί να συστηματοποιηθεί η αξιοποίηση των τηλεπισκοπικών δεδομένων για την ακριβή εκτίμηση της περιβαλλοντικής κατάστασης των λιμναίων υδάτων.

## Abstract

Human activities are those that decisively contribute to eutrophication of Lakes. The European Water Framework Directive (2000/60/EC) and the national framework require environmental state monitoring and "Good Environmental Status" achievement with specific quantitative targets in all water bodies.

Towards this end, in this thesis was studied and evaluated the estimation of water quality from multi-temporal remotely sensed data in Greek lakes. Important quality indicators such as chlorophyll-a, Secchi disk depth and Temperature were studied along with multitemporal satellite observations and field measurements. The experimental results were focused on the permanent lake monitoring stations of 11 lakes in Greece. The employed satellite data and field measurements (in-situ) were simultaneous or were selected to have a temporal offset of maximum 15 days. The established relations were based on simple linear regression.

The multiple experimental results were promising and in most cases in accordance with the literature. In particular, chlorophyll-a correlations for  $N=168$ , a wide range of concentrations (0,45-118.88  $\mu\text{g/l}$ ) and temporal offset of 15 days reached at 75% ( $R^2$ ). The Secchi disk depth resulted to correlations  $R^2 = 70\%$  for  $N=193$ , a wide range of values (0,01-14m) and temporal offset of 15 days. Temperature, resulted to relative low  $R^2$  i.e., 64% for a time window of 5 days ( $N=51$ ).

To sum up, based on high resolution, multitemporal, multispectral satellite data along with concurrent in-situ field campaigns, it is possible to assess remotely certain key water quality indicators in regional and national scales. The derived and evaluated models along with a further evaluation including all available datasets can set the basis for the development of a validated, operational, remote sensing, monitoring system for the accurate and timely lake water quality estimation.

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι συνέβαλαν λιγότερο ή περισσότερο στην περάτωσή της. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Νίκο και Φούλα, για την αδιάκοπη στήριξη τους σε κάθε μου βήμα με όλα τα μέσα και τους τρόπους.

Έμπνευση για τη διερεύνηση της ποιότητας των υδάτων με χρήση τηλεπισκόπησης αποτέλεσαν οι καθηγητές μου κ. Κωνσταντίνος Καράντζαλος και κ. Δανιήλ Μαμάης, οι οποίοι με κατεύθυναν επιστημονικά και με ενθάρρυναν ουσιαστικά μέχρι την περάτωση της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερώς τον κ. Αργιαλά για τις επιπλέον κατευθύνσεις που μου έδωσε.

Από το εργαστήριο Τηλεπισκόπησης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ζαχαρία Κανδυλάκη και τον Άρη Βαϊόπουλο για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στο προγραμματιστικό κομμάτι. Από τους δημόσιους φορείς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τασόγλου από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων και την κα Βάσω Τσιαούση από το ΕΚΒΥ που με βοήθησε να συγκεντρώσω τις in situ μετρήσεις για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Η εργασία αυτή δεν θα είχε περατωθεί χωρίς την ουσιαστική βοήθεια και την υποστήριξη του κ. Πολ (Πολυχρόνη Κολοκούση) και της αδερφής μου Άννυς, που αποτελεί χρόνια τώρα το μεγαλύτερό μου στήριγμα. Τους ευχαριστώ για όλα και κυρίως για την υπομονή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Νίκο (Νικόλαο Ανατολίτη) για τη βοήθεια και την αρχιτεκτονική ματιά στην παρουσίαση της παρούσας εργασίας, την Όλγα για τη νομική ματιά στο θεσμικό πλαίσιο των υδατικών πόρων, τη Μαρία και το Δημήτρη, αλλά και πολλούς ακόμα που δεν θα αναφέρω ονομαστικά. Τέλος, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου από το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβάλλον και Ανάπτυξη» για τα δύο υπέροχα χρόνια που περάσαμε και τα χρόνια που θα περάσουμε στο εξής.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα .....	8
Εισαγωγή .....	11
Σκοπός-Κίνητρο-Συνεισφορά.....	13
ΜΕΡΟΣ Α - Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	15
A.1 Το Θεσμικό πλαίσιο των υδατικών πόρων.....	15
1.1 Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των Υδατικών Πόρων .....	16
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	16
1.1.2 Η Οδηγία Πλαίσιο Υδάτων 2000/60/ΕΚ.....	18
1.1.2.1 Σκοπός.....	18
1.1.2.2 Αρχές - Δομικά Στοιχεία της ΟΠΥ .....	19
1.1.2.3 Σημαντικά Άρθρα.....	20
1.1.2.4 Χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της ΟΠΥ .....	22
1.1.2.5 Ανακεφαλαίωση.....	23
1.1.3 Τροποποιήσεις της ΟΠΥ - Ουσίες Προτεραιότητας .....	24
1.2 Εθνικό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των Υδατικών Πόρων.....	26
1.2.1 Ιστορική αναδρομή .....	26
1.2.2 Ο Νόμος 3199/2003 .....	28
1.2.3 Το Π.Δ. 51/2007 .....	30
1.2.4 Ελλείψεις – Καθυστερήσεις.....	32
1.3 Συμπεράσματα - Προεκτάσεις.....	34
A.2 Εφαρμογή της ΟΠΥ για την αξιολόγηση της ποιοτικής κατάστασης λιμναίων Υδατικών Συστημάτων στον ελλαδικό χώρο .....	35
2.1 Καθορισμός Υδατικών Συστημάτων .....	36



2.1.1	Επιφανειακά Υδάτινα Σώματα.....	36
2.2	Τυποχαρακτηριστικές Συνθήκες αναφοράς.....	41
2.2.1	Συνθήκες αναφοράς για τη βιολογική κατάσταση .....	42
2.2.2	Συνθήκες αναφοράς για τη χημική κατάσταση .....	42
2.2.3	Συνθήκες αναφοράς για τη φυσικοχημική κατάσταση .....	43
2.2.4	Αξιολόγηση της υδρομορφολογικής κατάστασης .....	43
2.3	Ταξινόμηση Υδατικών συστημάτων βάσει της κατάστασης τους.....	44
2.4	Δείκτες Ποιότητας Νερού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη .....	51
A.3	Λίμνες της Ελλάδας .....	54
3.1	Τεχνητές Λίμνες (Ταμιευτήρες) .....	55
3.2	Φυσικές Λίμνες.....	59
A.4	Μέθοδοι Παρατήρησης Γης και Τηλεπισκόπηση.....	65
A.4.1	Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση .....	65
A.4.2	Διάδοση Ακτινοβολίας στο Νερό .....	66
A.4.3	Πρόγραμμα Landsat .....	68
A.4.3.1	Δορυφόρος Landsat 8 .....	68
A.4.3.2	Προϊόν SurfaceReflectance .....	71
A.5	Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες .....	74
A.5.1	Εργασίες της Βιβλιογραφίας στο Γενικότερο Θέμα .....	74
A.5.2	Πρόσφατες Σχετικές Εργασίες και Αποτελέσματα.....	77
Μέρος Β	.....	85
B.1	Μεθοδολογία.....	85
B.1.1	Η περιοχή μελέτης.....	86
B.1.2	Συλλογή Δεδομένων δειγματοληψιών (in situ δεδομένα) .....	89
B.1.3	Συλλογή Δορυφορικών Δεδομένων .....	93

B.1.4 Διερεύνηση Συσχέτισης των ψηφιακών πολυφασματικών δεδομένων με τα in-situ δεδομένα με χρήση μοντέλων παλινδρόμησης.....	99
B.1.4.1 Δείκτες συσχετίσεων.....	99
B.1.4.2 Θεωρία Παλινδρομήσεων .....	103
B.2. Αποτελέσματα.....	105
B.2.1 Χλωροφύλλη - α.....	105
B.2.2 Θερμοκρασία.....	113
B.2.3 Βάθος Secchi .....	116
B.3. Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	119
Μέρος Γ - Συμπεράσματα.....	123
Βιβλιογραφία .....	125
Περιεχόμενα Πινάκων .....	130
Περιεχόμενα Εικόνων.....	132
Περιεχόμενα Χαρτών .....	132
Περιεχόμενα Σχημάτων.....	133
Παράρτημα .....	134

## Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί αγαθό υψίστης σημασίας και έναν από τους κυριότερους λόγους για τους οποίους εμφανίστηκε η ζωή στη γη. Αποτελεί βασικό συστατικό όλων των οργανισμών καθώς και απαραίτητο στοιχείο για την επιβίωσή τους και για το λόγο αυτό οφείλουμε να το αντιμετωπίζουμε ως κληρονομιά και όχι ως εμπορεύσιμο αγαθό.

Η καταλυτική του σημασία οφείλεται εκτός των άλλων και στις «παράξενες» ιδιότητες που έχει.

- Βρίσκεται σε αφθονία στην επιφάνεια επιφάνεια του πλανήτη ( $1340 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ ) και καταλαμβάνει το 70% της επιφάνειας της γης ενώ είναι αλμυρό σε ποσοστό 96,5%.
- Υπάρχει δυνατότητα παρουσίας του και στις τρεις καταστάσεις της ύλης (στερεό, υγρό, αέριο). Λόγω της μεγάλης διαφοράς μεταξύ του σημείου ζέσεως  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  και τήξεως  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  το μεγαλύτερο μέρος του νερού στον πλανήτη μας βρίσκεται σε υγρή κατάσταση.
- Η πυκνότητα του πάγου είναι το 91,7% της πυκνότητας του νερού με συνέπεια ο πάγος να μη βυθίζεται.
- Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα που παρουσιάζει, εμποδίζει μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας στη μάζα του. Αυτό το καθιστά κλιματικό θερμοστάτη της γης (ωκεανοί) και άρα σταθεροποιητικό παράγοντα της θερμοκρασίας των βιολογικών οργανισμών. Επίσης κοντά σε μεγάλες μάζες νερού (λίμνες, θάλασσες, ποτάμια) επικρατούν ήπιες κλιματολογικές συνθήκες
- Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού είναι μεγαλύτερη από κάθε άλλης ένωσης, ιδιότητα που έχει σημαντική επίδραση στις κλιματολογικές συνθήκες του πλανήτη μας.
- Αποτελεί αποτελεσματικό διαλύτη και γι' αυτό ρυθμίζει την κυκλοφορία πολλών ουσιών στην υδρόγειο (π.χ.  $\text{CO}_2$ ) και τη γεωμορφολογία (π.χ. διάβρωση ασβεστόλιθων).

Ο άνθρωπος από την εποχή που άρχισε να καλλιεργεί την γη, αλλά εντονότερα από την βιομηχανική επανάσταση μέχρι και την εποχή μας άρχισε να πραγματοποιεί συστηματικές μεταβολές στη φύση με δυσμενείς πολλές φορές συνέπειες για τον ίδιο και το περιβάλλον του. Οι μεταβολές αυτές επηρέασαν σε πολλές περιπτώσεις τόσο την ποσότητα, όσο και την ποιότητα των υδάτινων πόρων και ανάδειξαν την ανάγκη για τη σωστή διαχείριση τους (Μαμάης, 2014).

Μέσω της διαχείρισης των υδατικών πόρων επιδιώκεται η πληρέστερη δυνατή κάλυψη των σημερινών και μελλοντικών αναγκών σε νερό για κάθε χρήση ή στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό να εξασφαλίζεται η ισότιμη ικανοποίηση όλων των ενδιαφερομένων, σε σχέση με την κοινωνική σημασία της κάθε χρήσης, ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο αναπτυξιακό, οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (Μαμάσης, 2014).

Για την αντιμετώπιση και τον περιορισμό των δυσμενών αυτών ανθρωπογενών επεμβάσεων στο περιβάλλον και την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, οι σύγχρονες κοινωνίες έχουν θεσπίσει διάφορους περιβαλλοντικούς νόμους.

Από την άλλη μεριά, η τεχνολογική πρόοδος προσφέρει δυνατότητες αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προβλημάτων τόσο σε επίπεδο πρόληψης μέσω της παρατήρησης του περιβάλλοντος και της γνώσης των περιβαλλοντικών προβλημάτων, όσο και σε επίπεδο αντιμετώπισης, αφού βελτιώνονται οι τεχνολογίες απορρύπανσής του.

Η παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων στους επίγειους αποδέκτες είναι υψίστης σημασίας. Η συνηθέστερη μέθοδος πραγματοποίησής της είναι η δειγματοληψία και η διενέργεια χημικών αναλύσεων. Αυτή η μέθοδος κρίνεται απολύτως ικανοποιητική από άποψη ακρίβειας ωστόσο υστερεί σε κάποιους τομείς.

Αναλυτικότερα:

- Υστερεί όσον αφορά την απεικόνιση της χωρικής διάστασης ενός φαινομένου, μιας και τα αποτελέσματα δεν δίνουν τη συνολική εικόνα της κατάστασης που επικρατεί σε όλη την έκταση του υδάτινου αποδέκτη, αφού αντιστοιχούν στο σημείο από το οποίο λήφθηκε το δείγμα.
- Σαν διαδικασία είναι αρκετά δαπανηρή αφού απαιτεί ειδικό εξοπλισμό.
- Για τη σωστή μελέτη των φαινομένων και των ενδεχόμενων διακυμάνσεων, είναι απαραίτητες οι συχνές δειγματοληψίες πράγμα που την καθιστά χρονοβόρα ως διαδικασία.
- Η πρόσβαση στους υδάτινους αποδέκτες δεν είναι πάντα εφικτή.

Η τηλεπισκόπηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη των παραπάνω προβλημάτων αφού δίνει τη δυνατότητα της άντλησης πληροφοριών από δορυφορικές εικόνες σε τακτά χρονικά διαστήματα, αλλά και τη δυνατότητα εξαγωγής πληροφοριών για παλαιότερα έτη στα οποία πιθανόν να μην είχαν γίνει δειγματοληψίες.

Σαν μέθοδος ήδη από το 1974 (Wrigley and Horne) είχε αρχίσει να εφαρμόζεται στη παρακολούθηση των υδάτων και αποτέλεσε ένα αναγνωρισμένο τομέα έρευνας, παρά τους περιορισμούς που υπήρχαν λόγω της εποχής.

Σύμφωνα με τον Δ. Π. Αργιαλά, (1999) : «Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη και η τέχνη της απόκτησης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή ένα φαινόμενο δια μέσου της ανάλυσης δεδομένων, τα οποία έχουν αποκτηθεί από μία συσκευή, η οποία δεν είναι σε επαφή με το υπό έρευνα αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο».

Τα συστήματα τηλεπισκόπησης διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας: τα παθητικά συστήματα, τα οποία ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προερχόμενη από μία φυσική πηγή και τα ενεργητικά συστήματα τα οποία προσλαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία την οποία τα ίδια έχουν εκπέμψει (πχ. Radar).

Σαν επιστήμη, η λειτουργία της βασίζεται στο γεγονός ότι διαφορετικά αντικείμενα και στοιχεία εκπέμπουν διαφορετικά στο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή έχουν «χαρακτηριστικές φασματικές υπογραφές», γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη τους. Η Τηλεπισκόπηση βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπως είναι η μετεωρολογία, η χωροταξία, η βιολογία, η γεωλογία κτλ.

## **Σκοπός-Κίνητρο-Συνεισφορά**

Ένας από τους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αποσαφήνιση και η κριτική προσέγγιση του θεσμικού πλαισίου που αφορά την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων και τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων διαχρονικά. Συγκεκριμένα, έγινε διερεύνηση του θεσμικού πλαισίου που άπτεται της διαχείρισης των Υδατικών Πόρων, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην Οδηγία 2000/60/EK η οποία, χωρίς να καταργεί, την αξιολόγηση της ποιότητας των υδάτων σε συνάρτηση με τη χρήση τους, δίνει έμφαση στην προστασία των οικοσυστημάτων (Μαμάης, 2014)

Με βάση τα εγκεκριμένα από την Εθνική Επιτροπή Υδάτων Σχέδια Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής των Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας, επιχειρήθηκε η κατανόηση της εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα για την επίτευξη της «καλής κατάστασης» στα Υδατικά Συστήματα της χώρας, με έμφαση στα λιμναία υδατικά συστήματα.

Έχοντας ως απώτερο στόχο την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων επιχειρήθηκε η **εκτίμηση ποιοτικών παραμέτρων** του νερού με τη χρήση της Τηλεπισκόπησης και δορυφορικών δεδομένων μέσα από την εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας φαίνεται να έχει τεράστιες δυνατότητες και αποτελεί μία εναλλακτική και οικονομική μέθοδο στην παρατήρηση του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα των υδάτων. Ενώ φαντάζει ιδιαίτερα ελκυστικός και ελπιδοφόρος στην εποχή που διανύουμε λόγω της οικονομικής κατάστασης που επικρατεί στη χώρα, ο τομέας αυτός ακόμα υστερεί στην Ελλάδα, σε αντίθεση με το εξωτερικό που αναπτύσσεται συνεχώς.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί εκτός των άλλων να **συνεισφέρει** στα εξής:

α) στον εμπλουτισμό της βιβλιογραφίας μέσω της χρήσης των προτεινόμενων δεικτών αναφορικά με τα πολυφασματικά δεδομένα για 3 ποιοτικές παραμέτρους νερού με μεγάλη σημασία για τη βιωσιμότητα των οργανισμών στο νερό και τη δοκιμή και διερεύνηση της αποτελεσματικότητας περισσότερων δεικτών που θα επιτυγχάνουν ικανοποιητικές συσχετίσεις με τα επίγεια δεδομένα.

β) στην έρευνα αναφορικά με τις δυνατότητες του δορυφόρου Landsat 8 και τα περιθώρια αξιοποίησής του σε βαθιές λίμνες.

Μία από τις δυνατότητες που δύναται να προσφέρει η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών αποτελεί η δημιουργία και ενημέρωση μιας ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων για τους υδάτινους αποδέκτες της χώρας, με λήψεις δορυφορικών εικόνων που μπορούν να πραγματοποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τέλος, είναι εφικτή και η δημιουργία μοντέλων για μελλοντική ανάκτηση τιμών των παραμέτρων χωρίς ανάγκη πραγματοποίησης χημικών αναλύσεων αλλά απευθείας από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων.

## **ΜΕΡΟΣ Α - Θεωρητικό Υπόβαθρο**

### **A.1 Το Θεσμικό πλαίσιο των υδατικών πόρων**

Το ζήτημα της διαχείρισης των υδατικών πόρων και της ποιότητας των υδάτων προβληματίσε, και ακόμα προβληματίζει, τόσο την Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και τη χώρα μας, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες. Πολλά νομοσχέδια που ευαγγελίζονταν την επίτευξη ενός στρατηγικού και βιώσιμου σχεδιασμού καταστρώθηκαν και, είτε εναλλάσσονταν, χωρίς να πετυχαίνουν τον καθολικό τους στόχο, είτε δεν θέτονταν καν σε εφαρμογή. Τα τελευταία χρόνια φαίνεται να υπάρχει μία «αλλαγή πλεύσης» και η διαχείριση των υδάτων προσεγγίζει σε ένα βαθμό το στοίχημα της ολοκληρωμένης διαχείρισης.

Στο παρόν κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται διερεύνηση του θεσμικού πλαισίου που άπτεται της διαχείρισης των Υδατικών Πόρων, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην Οδηγία 2000/60/EK - ορόσημο για τη διαχείριση των υδάτων στην Ευρώπη, γνωστή και ως Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα. Επιπλέον, δίνεται έμφαση και στην εθνική νομοθεσία, με την οποία η Οδηγία 2000/60/EK εναρμονίστηκε στο εθνικό δίκαιο και συγκεκριμένα στο Νόμο 3199/2003 και το Π.Δ. 51/2007.

## 1.1 Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των Υδατικών Πόρων

### 1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ευρωπαϊκή πολιτική για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, όπως και για τα περισσότερα περιβαλλοντικά θέματα, έχει ως αφετηρία τη δεκαετία του 1970. Στην αρχή, το νομοθετικό πλαίσιο θεωρήθηκε αποσπασματικό και αποτελούσε αντίδραση σε συγκεκριμένα προβλήματα και όχι μία συγκροτημένη πολιτική (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Γενικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι υπήρξαν δύο κύρια νομοθετικά ρεύματα. Το πρώτο κύμα περιελάμβανε ένα πλέγμα ποιοτικών στόχων (Κούγκολος, 2004) και εκφράστηκε κυρίως μέσα από τις ακόλουθες Οδηγίες: Οδηγία για τα απορρυπαντικά (73/404/ΕΟΚ), Οδηγία για τις επικίνδυνες ουσίες που εκχέονται στο υδάτινο περιβάλλον (76/464/ΕΟΚ), Οδηγία για την ποιότητα των υδάτων κολύμβησης (76/160/ΕΟΚ), Οδηγία για την προστασία των υπόγειων υδάτων από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες (80/68/ΕΟΚ), Οδηγία για την ποιότητα των νερών που προορίζονται για την ανθρώπινη κατανάλωση (80/778/ΕΟΚ) (Κάλλια-Αντωνίου, 2006 και Τσεβρένης, 2008). Γενικά, στο διάστημα από το 1975 και μέχρι το 1988 η Ευρωπαϊκή Ένωση προχώρησε στην έκδοση πλήθους Οδηγιών, Κανονισμών και Αποφάσεων σχετικά με την προστασία των εσωτερικών, επιφανειακών, μεταβατικών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων (Τσεβρένης, 2008).

Ωστόσο, το 1988 στην υπουργική σύνοδο σχετικά με τα νερά που έλαβε χώρα στη Φρανκφούρτη, εντοπίστηκαν βελτιώσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στην κείμενη νομοθεσία και να καλύψουν τα υπάρχοντα κενά (Κούγκολος, 2004). Έτσι, προέκυψε το δεύτερο νομοθετικό ρεύμα για την προστασία των υδατινών πόρων, που είχε ως πρώιμο αποτέλεσμα την ψήφιση Οδηγιών, όπως η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για τη συλλογή, επεξεργασία και απόρριψη αστικών λυμάτων, η Οδηγία 91/676/ΕΟΚ για τη μείωση της ρύπανσης των υδατικών πόρων από τα νιτρικά ιόντα γεωργικής προέλευσης, η Οδηγία 91/692/ΕΟΚ για την τυποποίηση και τον εξορθολογισμό των εκθέσεων που αφορούν την εφαρμογή ορισμένων Οδηγιών για το περιβάλλον (Κάλλια-Αντωνίου, 2006), καθώς και η Οδηγία 98/83/ΕΚ για το πόσιμο νερό (Τσεβρένης, 2008).

Στη συνέχεια, στο πλαίσιο του 5ου Προγράμματος Δράσης για το Περιβάλλον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε τη διαχείριση των υδάτων στο ευρύτερο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης (Κάλλια-Αντωνίου, 2006) ως βασική αρχή για την κοινοτική έννομη τάξη (Τσεβρένης, 2008).



Έτσι, κρίθηκε αναγκαίο να υπάρξει μία διαφορετική ανάγνωση της πραγματικότητας, όχι τομεακή, αλλά συνθετική και σφαιρική, για την ολοκληρωμένη προσέγγιση της διαχείρισης των υδάτων (Χαϊνταρλής, 2003), ώστε να συμπεριλαμβάνει όλα τα είδη των υδατικών πόρων, όλες τις πηγές ρύπανσης, καθώς και τη λήψη μέτρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, τόσο προληπτικών όσο και αντιμετώπισης (Τσεβρένης, 2008).

Κατόπιν αυτών καθίσταται αναγκαία η διατύπωση μιας νέας Οδηγίας για τη διαχείριση των Υδατικών Πόρων, η οποία γίνεται πραγματικότητα το 2000 με την Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα, που θα αναφέρεται στη συνέχεια ως ΟΠΥ (Οδηγία 2000/60/ΕΚ). Σ' αυτήν τίθενται για πρώτη φορά συγκεκριμένοι και μετρήσιμοι περιβαλλοντικοί στόχοι για την κατάσταση όλων των υδάτων. Επιπλέον, εισάγεται νομικά η έννοια της διαχείρισης του νερού με βάση τη Λεκάνη Απορροής Ποταμού και όχι τα διοικητικά όρια και η Αρχή της συνδυασμένης προσέγγισης και ανάκτησης του κόστους. Ακόμα, η ΟΠΥ προβλέπει για πρώτη φορά την ουσιαστική συμμετοχή του κοινού (Τσεβρένης, 2008).

Όπως είναι προφανές και από τα παραπάνω, η ΟΠΥ αποτέλεσε σταθμό για ευρωπαϊκή περιβαλλοντική νομοθεσία γιατί εισήγαγε την οικοσυστημική προσέγγιση με βάση την οποία η εξυπηρέτηση των χρηστών γίνεται υπό την προϋπόθεση ότι δεν διακυβεύεται η προστασία των οικοσυστημάτων και για το λόγο αυτό θα αναλυθεί εκτενώς στη συνέχεια (Μαμάης, 2014).

Οι σημαντικότερες Οδηγίες που έπονται της ΟΠΥ και συμπληρώνουν ή τροποποιούν το περιεχόμενό της, είναι οι εξής:

- Οδηγία 2006/118 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και υποβάθμιση
- Οδηγία 2006/7/ΕΚ σχετικά με τη διαχείριση της ποιότητας των υδάτων κολύμβησης και την κατάργηση της Οδηγίας 76/160/ΕΚ
- Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας
- Οδηγία 2008/105/ΕΚ για τον καθορισμό Προτύπων Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ) για τις ουσίες προτεραιότητας και ορισμένους άλλους ρύπους, όπως προβλέπεται στο Άρθρο 16 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ
- Οδηγία 2008/56/ΕΚ σχετικά με την Οδηγία πλαίσιο για τη θαλάσσια στρατηγική
- Ψήφισμα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου σχετικά με την πρόταση Οδηγίας για την τροποποίηση των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ όσον αφορά τις ουσίες προτεραιότητας στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, στις 2 Ιουλίου του 2013.

- Η Οδηγία 2013/39/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 12ης Αυγούστου 2013 της Ευρωπαϊκής Ένωσης «για την τροποποίηση των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ όσον αφορά τις ουσίες προτεραιότητας στον τομέα της πολιτικής των υδάτων» που αποτελεί τροποποίηση της ΟΠΥ (ΕΕL 226/1/24–8–2013).

### 1.1.2 Η Οδηγία Πλαίσιο Υδάτων 2000/60/ΕΚ

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά είναι μια φιλόδοξη Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία έρχεται για πρώτη φορά, να θεσπίσει ένα πλαίσιο για την ορθή διαχείριση των υδάτων συνδυάζοντας τη γεωμορφολογία των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Γιωτάκης, 2000)

#### 1.1.2.1 Σκοπός

Πρωταρχικός σκοπός της Οδηγίας είναι η ολοκληρωμένη και ορθολογική Διαχείριση των Υδάτων ώστε να εξασφαλιστεί η ικανοποίηση των σημερινών αναγκών αλλά και των μελλοντικών κατά τα πρότυπα της βιώσιμης ανάπτυξης (Διαμαντής, 2004) και η επίτευξη μέχρι το 2015 της «καλής κατάστασης» για όλα τα επιφανειακά και υπόγεια νερά της Ευρώπης (Μίχας, Ν. & Μαμάσης, Ν., 2010).

Γι' αυτόν τον πολύπλοκο σκοπό απαιτείται η ικανοποίηση των επιμέρους στόχων που ακολουθούν<sup>1</sup>:

- Θέσπιση ενός πλαισίου για την προστασία όλων των υδάτων (συμπεριλαμβανομένων των επιφανειακών δηλαδή, των ποτάμιων, λιμναίων, μεταβατικών και παράκτιων και των υπόγειων υδάτων), αποτρέποντας την περαιτέρω επιδείνωση των υδάτινων οικοσυστημάτων, με παράλληλη προστασία και βελτίωση της κατάστασης των υδατικών πόρων.
- Προώθηση της βιώσιμης χρήσης του ύδατος που βασίζεται στη μακροπρόθεσμη προστασία των διαθέσιμων υδατικών πόρων.
- Ενίσχυση της προστασίας και της βελτίωσης του υδάτινου περιβάλλοντος μέσω συγκεκριμένων μέτρων για την προοδευτική μείωση και μακροπρόθεσμα την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη εκπομπών, απορρίψεων και διαρροών «ουσιών προτεραιότητας» ανάλογα με την επικινδυνότητά τους.

---

<sup>1</sup>ΟΠΥ

- Διασφάλιση της προοδευτικής μείωσης της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, αποτροπή της περαιτέρω ρύπανσής τους και συμβολή στην αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων των πλημμυρών και των ξηρασιών.
- Κινητροδότηση των καταναλωτών για αποτελεσματική χρήση των υδάτινων πόρων (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Έτσι, τα κράτη μέλη καλούνται να προστατεύουν ποταμούς και λίμνες, παράκτια και υπόγεια νερά εξασφαλίζοντας έλεγχο και μείωση της ρύπανσης χρησιμοποιώντας νέες και αποτελεσματικότερες τεχνικές προστασίας του υδατικού περιβάλλοντος μέσα από τα ολοκληρωμένα σχέδια διαχείρισης που καλούνται να καταρτίσουν.

#### **1.1.2.2 Αρχές - Δομικά Στοιχεία της ΟΠΥ**

Οι αρχές οι οποίες αντιπροσωπεύουν το βασικό δομικό ιστό της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ και πάνω στις οποίες στηρίζεται η φιλοσοφία της είναι οι εξής:

*1η: «Το νερό δεν είναι εμπορικό προϊόν».*

Αποτελεί κληρονομιά όλων και πρέπει να προστατεύεται. Γι' αυτό κρίνεται αναγκαίο να υπάρξει σφαιρική σύνθετη και ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος του νερού (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

*2η: «Ενοποιημένη Διαχείριση των υδάτων στην Ε.Ε. »*

Αυτό επιτυγχάνεται με ενιαίο πλαίσιο προστασίας των επιφανειακών, υπογείων, μεταβατικών και παράκτιων υδάτων (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

*3η: «Ο ρυπαίνων πληρώνει».*

Αυτό επιτυγχάνεται με την κοστολόγηση όλων των δραστηριοτήτων που περιλαμβάνουν τη χρήση του νερού. Η αρχή αυτή τίθεται σε εφαρμογή όταν έχει ήδη συντελεσθεί η προσβολή του περιβάλλοντος και σημαίνει ότι εκείνος που επιβαρύνει το περιβάλλον, υποχρεώνεται να αναλάβει το κόστος για την εξουδετέρωση της προσβολής ή για τη μελλοντική αποφυγή της επιβάρυνσης ή να καταβάλει αντισταθμιστικό ποσό για την βλάβη την οποία προξένησε.

*4η: «Αρχή της προφύλαξης και προληπτικής δράσης».*

Οι φορείς πολιτικής υποχρεώνονται να αναλαμβάνουν προληπτικά μέτρα όταν υπάρχει επιστημονική αβεβαιότητα ως προς τον κίνδυνο πρόκλησης μη αναστρέψιμων ή σοβαρών επιπτώσεων στο περιβάλλον από οιαδήποτε δραστηριότητα ή έργο. Έτσι δίνεται έμφαση στην διατήρηση της ποιότητας, ως προϋπόθεση για την ορθή χρήση. Κύρια επιδίωξη της αρχής αυτής

είναι η αποφυγή ή η πρόληψη δυσμενών επιπτώσεων και όχι η εξουδετέρωση προσβολών του περιβάλλοντος.

5η: «*Διαχειριστικό μοντέλο οι λεκάνες απορροής ποταμού*».

Βασική μονάδα σχεδιασμού και διαχείρισης των υδάτινων πόρων αποτελούν οι λεκάνες απορροής ποταμού. Έτσι, η Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΠΛΑΠ), ορίζεται ως η «θαλάσσια και χερσαία έκταση που αποτελείται από μια ή περισσότερες λεκάνες απορροής ποταμού μαζί με τα συναφή υπόγεια και παράκτια ύδατα» (Οδηγία 2000/60/ΕΚ – Άρθρο 2 – Ορισμός 13: Λεκάνη Απορροής Ποταμού).

6η: «*Αποκέντρωση των αρμοδιοτήτων και ενίσχυση των περιφερειακών δομών*»

Αυτή η αποκέντρωση απαιτεί το συντονισμό όλων των εμπλεκόμενων στη διαχείριση των υδάτων καθώς και τη συνεργασία των φορέων με τους πολίτες (Κάλλια-Αντωνίου, 2006)

7η: «*Συμμετοχή του κοινού στη λήψη αποφάσεων για το σχεδιασμό της διαχείρισης των υδατικών πόρων*»

Θεσπίζεται η παρακολούθηση της εφαρμογής του σχεδιασμού της διαχείρισης και η λήψη σχετικών αποφάσεων από τους πολίτες (Τασσιόπουλος, 2014), οι οποίοι κρίνεται ότι συμμετέχουν ουσιαστικά (Τσεβρένης, 2008).

8η: «*Η διαχείριση των υδάτινων μονάδων γίνεται σε εθνικό επίπεδο και όπου χρειάζεται σε διασυνοριακό*» (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

9η: «*Ανάπτυξη μακροπρόθεσμου σχεδιασμού με εφαρμογή σε στάδια*» (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Η Οδηγία με τις παραπάνω αρχές φαίνεται ότι έχει σαν προτεραιότητα τόσο την αποφυγή της επιδείνωσης όσο και τη βελτίωση και την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων για μια βιώσιμη χρήση του νερού (Γιωτάκης, 2000).

### **1.1.2.3 Σημαντικά Άρθρα**

Η ΟΠΥ περιλαμβάνει συνολικά 26 άρθρα, οι σημαντικότερες πληροφορίες των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

Το Άρθρο 1 επικεντρώνεται στην ανάλυση του σκοπού της Οδηγίας, δηλαδή τη θέσπιση πλαισίου για την προστασία του υδατικού περιβάλλοντος, όπως αναλύθηκε εκτενώς παραπάνω. Με αυτό το πλαίσιο επιδιώκεται η αποτροπή περαιτέρω υποβάθμισης αλλά και η συνεχή βελτίωση της ποιότητας των υδάτων, η προώθηση της βιώσιμης χρήσης, ο περιορισμός της ρύπανσης από επικίνδυνες ουσίες, η αντιμετώπιση ακραίων φαινομένων κ.α.

Το Άρθρο 2 περιέχει ορισμούς που βοηθούν στην κατανόηση των σκοπών της ΟΠΥ, ενώ ορίζονται σημαντικές έννοιες, όπως τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα που θα περιγραφούν στο δεύτερο κεφάλαιο. Επιπλέον, διατυπώνεται ο ορισμός της «Λεκάνης Απορροής Ποταμού» με βάση τον οποίο τα κράτη-μέλη ορίζουν τα υδατικά τους διαμερίσματα. Έτσι, ως ΛΑΠ ορίζεται η «εδαφική έκταση, από την οποία συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής μέσω διαδοχικών ρευμάτων, ποταμών και πιθανώς λιμνών και παροχετεύεται στη θάλασσα με ενιαίο στόμιο ποταμού, εκβολές ή δέλτα.»

Άλλοι χρήσιμοι ορισμοί που περιγράφονται στο άρθρο 2 είναι η Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΠΛΑΠ), τα Ποιοτικά Περιβαλλοντικά Πρότυπα (ΠΠΠ), η οικολογική κατάσταση, η χημική κατάσταση, το οικολογικό δυναμικό κ.α. Στο δεύτερο κεφάλαιο που αφορά την εφαρμογή της ΟΠΥ παρατίθενται επίσης και πολλοί άλλοι χρήσιμοι ορισμοί.

Το Άρθρο 3 αναφέρεται στο συντονισμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων με βασική μονάδα σχεδιασμού τη ΛΑΠ, ενώ όταν μια Περιοχή ΛΑΠ εκτείνεται εκτός των ορίων ενός Κράτους-Μέλους τότε ο συντονισμός επιτυγχάνεται μέσω διεθνών συμφωνιών.

Στο Άρθρο 4 ορίζονται αναλυτικά οι περιβαλλοντικοί στόχοι για τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα καθώς και τις προστατευόμενες περιοχές. Για τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα οι περιβαλλοντικοί στόχοι ικανοποιούνται με την επίτευξη καλής χημικής και οικολογικής κατάστασης, αλλά και την εξισορρόπηση μεταξύ άντλησης και επαναφόρτισης για τα υπόγεια. Για τις προστατευόμενες περιοχές οι περιβαλλοντικοί στόχοι συνοψίζονται στη διατήρηση των ιδιαίτερων συνθηκών της περιοχής. Επιπλέον, ορίζονται τα τεχνητά ή ιδιαίτερα τροποποιημένα υδατικά συστήματα για τα οποία καθορίζονται εναλλακτικοί περιβαλλοντικοί στόχοι. Οι περιβαλλοντικοί στόχοι για τα υδατικά συστήματα περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Στα Άρθρα 5 - 10 γίνεται ανάλυση των τεχνικών ζητημάτων αλλά και των βασικών αξόνων στους οποίους στηρίζεται η ΟΠΥ. Συγκεκριμένα, προβλέπεται η οικονομική ανάλυση της χρήσης του ύδατος, η θέσπιση από τα κράτη-μέλη μητρώου για όσες περιοχές έχουν χαρακτηριστεί προστατευόμενες, ο προσδιορισμός των τύπων των υδατικών συστημάτων για άντληση πόσιμου ύδατος, η διασφάλιση της κατάρτισης προγραμμάτων παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων, «η ανάκτηση κόστους για υπηρεσίες ύδατος» μέσω της βασικής αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Το Άρθρο 11 περιλαμβάνει γενικές και ειδικότερες κατηγορίες μέτρων που πρέπει να θεσπιστούν από τα Κράτη-Μέλη. Σε περίπτωση που καταστεί αδύνατη η επίτευξη των στόχων

και των ορίων της Οδηγίας, επαφίεται στο κράτος-μέλος η λήψη μέτρων για την διασφάλιση των περιβαλλοντικών στόχων και την αναθεώρηση των προγραμμάτων μέτρων.

Το Άρθρο 13 επισημαίνει την αναγκαιότητα κατάρτισης Σχεδίων Διαχείρισης για κάθε Περιοχή ΛΑΠ.

Στο Άρθρο 14 ορίζεται η συγκεκριμένη μέθοδος με την οποία θα γίνεται η πληροφόρηση του κοινού αλλά και η διαδικασία διαβούλευσης, ώστε να αναπτυχθεί η ενεργός συμμετοχή των πολιτών. Τα κράτη-μέλη για κάθε ΠΛΑΠ υποχρεούνται να δημοσιεύσουν το χρονοδιάγραμμα των εργασιών και να παραχωρούν πρόσβαση σε βοηθητικά έγγραφα για την εκπόνηση των Σχεδίων Διαχείρισης. Μείζον ως προς την ενεργό συμμετοχή των πολιτών κρίνεται το σημείο του χρονικού περιθωρίου έξι μηνών προς υποβολή γραπτών παρατηρήσεων και ενστάσεων από τους ενδιαφερόμενους φορείς.

Το Άρθρο 15 αφορά στην υποχρέωση υποβολής των εκθέσεων και των Σχεδίων Διαχείρισης στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Τα Άρθρα 16-17 αφορούν σε στρατηγικές για τον έλεγχο και την πρόληψη της ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Καταρτίζεται κατάλογος ουσιών προτεραιότητας από την Επιτροπή, ο οποίος αναθεωρείται ανά διαστήματα. Επιπλέον, υποβάλλονται προτάσεις για δημιουργία ποιοτικών προτύπων. Θεσπίζονται τα κριτήρια που καθορίζουν τα μέτρα με στόχο την επίτευξη της καλής κατάστασης των υδάτων.

Στα Άρθρα 18-25 ορίζονται οι δράσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σχετικά με τη σύνταξη εκθέσεων, το κανονιστικό πλαίσιο εφαρμογής αλλά και την πιθανή Αναθεώρηση.

#### ***1.1.2.4 Χρονοδιάγραμμα εφαρμογής της ΟΠΥ***

Βασική δυσκολία στην εφαρμογή της ΟΠΥ αποτελεί η ιδιαιτερότητα των νομικών και διοικητικών δομών κάθε κράτους-μέλους, το οποίο πρέπει να τροποποιήσει και να εφαρμόσει την ΟΠΥ σύμφωνα με τα δικά του δεδομένα, αλλά με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή η τροποποίηση να είναι συμβατή με το αρχικό κείμενο (Κούγκολος, 2014).

Για την εφαρμογή της ΟΠΥ προβλέφθηκαν τρεις φάσεις:

Φάση 1η:

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει αρχικά την αναγνώριση των λεκανών απορροής των ποταμών από εξειδικευμένους και κατάλληλους φορείς. Αυτή η δράση αποτελεί το ουσιαστικότερο βήμα χωρίς το οποίο δεν νοείται εφαρμογή της ΟΠΥ. Επόμενο βήμα αποτελεί η ανάθεση του

συστηματικού ελέγχου της κάθε ΛΑΠ σε αρμόδιο φορέα και στη συνέχεια γίνεται η αναγνώριση των στόχων για κάθε ΛΑΠ (Chave, 2001).

Φάση 2η:

Σε αυτή τη φάση, το κάθε κράτος-μέλος ορίζει τους στόχους (ποιοτικούς και ποσοτικούς) για τα επιφανειακά ύδατα, με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν στην προηγούμενη φάση και καλείται να τους υλοποιήσει μέσα σε διάστημα 15 ετών. Επιπλέον, ορίζονται ποσοτικοί στόχοι για τα υπόγεια ύδατα και τις προστατευόμενες περιοχές. Τέλος, ορίζεται μια σειρά μέτρων που θα λαμβάνει υπόψη το σύνολο της ισχύουσας περιβαλλοντικής νομοθεσίας και θα γνωστοποιείται έγκαιρα στο κοινό, με στόχο τη συνολική αναβάθμιση των υδάτινων οικοσυστημάτων. Μετά το σχολιασμό και τη διατύπωση γνώμης του κοινού, καθορίζεται το τελικό σχέδιο δράσης, το οποίο θα αναθεωρείται ανά χρονικά διαστήματα που ορίζονται από την ΟΠΥ (Chave, 2001).

Φάση 3η:

Στην τελευταία φάση, οι αρμόδιοι φορείς ενεργοποιούν τα σχέδια και παράλληλα είναι σε θέση να ελέγχουν και να αξιολογούν την κατάσταση και την εφαρμογή του εκάστοτε σχεδίου, διασφαλίζοντας την τήρηση της ισχύουσας νομοθεσίας. Ως αποτέλεσμα πρέπει οπωσδήποτε να επιτυγχάνονται οι αρχικοί στόχοι και να διασφαλίζεται η χημική και βιολογική ποιότητα. Οι αρμόδιοι φορείς αναλαμβάνουν τη δέσμευση να ενημερώνουν με αναφορές την Ευρωπαϊκή Ένωση και το κοινό (Chave, 2001).

#### **1.1.2.5 Ανακεφαλαίωση**

Ανακεφαλαιώνοντας, η ΟΠΥ εισάγει νέα θεώρηση στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Οι νεωτερισμοί αυτοί μπορούν να συνοψιστούν στα κάτωθι (Μίχας, Ν. & Μαμάσης, Ν., 2010):

- Ο χώρος εφαρμογής είναι πλέον η επικράτεια των κρατών-μελών, αφού η Οδηγία αναγνωρίζει το χώρο ως αρκετά ελαστικό και ανεξάρτητο των ορίων των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Γιωτάκης, 2000)
- Η διαχείριση γίνεται ανά λεκάνη ή ομάδα λεκανών απορροής
- Προβλέπεται ενιαία θεώρηση όλων των τύπων υδατικών σωμάτων
- Προβλέπεται διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών

- Γίνεται πλήρης καταμερισμός του συνολικού κόστους χρήσης του ύδατος κατά τομείς δραστηριότητας και ανάκτησής του, με βάση την αρχή ο ρυπαίνων και ο χρήστης πληρώνουν
- Εξασφαλίζεται η ενεργός συμμετοχή όλων των φορέων, συμπεριλαμβανομένων των μη κυβερνητικών οργανώσεων και των τοπικών κοινοτήτων, στις δραστηριότητες διαχείρισης των υδάτων
- Διασφαλίζεται και ενισχύεται η συμμετοχή του κοινού στη λήψη αποφάσεων

### 1.1.3 Τροποποιήσεις της ΟΠΥ - Ουσίες Προτεραιότητας

Η πλειοψηφία των Οδηγιών και ψηφισμάτων που έπονται της ΟΠΥ και την τροποποιούν, στοχεύουν κυρίως στον ακριβέστερο προσδιορισμό και την ανανέωση των καταλόγων των ουσιών προτεραιότητας. Οι ουσίες προτεραιότητας προσδιορίζονται στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής στρατηγικής για τη διαχείριση των υδάτων και περιλαμβάνουν ουσίες που μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό κίνδυνο για το υδάτινο περιβάλλον σε επίπεδο Ένωσης.

Η απόφαση υπ' αριθμ. 2455/2001/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 20ης Νοεμβρίου 2001 για την αντιμετώπιση της χημικής ρύπανσης αφορά στη θέσπιση καταλόγου ουσιών προτεραιότητας. Έτσι, καταρτίστηκε ο πρώτος κατάλογος με τις 33 ουσίες ή ομάδες ουσιών που χαρακτηρίστηκαν ως ουσίες προτεραιότητας προκειμένου να συμπεριληφθούν στο παράρτημα Χ της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ<sup>2</sup>. Η απόφαση αυτή είναι σημαντική γιατί αναπτύσσει ένα σχέδιο ρύθμισης προτεραιοτήτων που βασίζεται σε συνδυασμένη παρακολούθηση και προσομοίωση (combined monitoring-based and modelling-based priority setting - COMMPS) σε συνεργασία των ενδιαφερόμενων μερών με εμπειρογνώμονες. Αυτή η διαδικασία αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο που επιδέχεται συνεχείς βελτιώσεις.

Μετά τον καθορισμό των ΠΠΠ για τις 33 ουσίες προτεραιότητας, διεξήχθησαν ορισμένες αξιολογήσεις των κινδύνων, κατ' εφαρμογή του κανονισμού (ΕΟΚ) αριθ. 793/93 του Συμβουλίου της 23ης Μαρτίου 1993 για την αξιολόγηση και τον έλεγχο των κινδύνων από τις υπάρχουσες ουσίες, που αργότερα αντικαταστάθηκε από τον κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 1907/2006.

Η Οδηγία 2008/105/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2008, σχετικά με πρότυπα ποιότητας περιβάλλοντος στον τομέα της πολιτικής των υδάτων ορίζει Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ), σύμφωνα με την Οδηγία

<sup>2</sup>Απόφαση 2455/2001/ΕΚ, παρ.7 (ΕΕL 331/15.12.2001)



2000/60/ΕΚ για τις 33 ουσίες προτεραιότητας που καθορίζονται στην απόφαση υπ' αριθμ. 2455/2001/ΕΚ και για οκτώ επιπλέον ρυπογόνους ουσίες που είχαν ήδη υπαχθεί σε ρύθμιση σε επίπεδο Ένωσης.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με νέα Οδηγία, την Οδηγία 2013/39/ΕΕ, τροποποιεί τις Οδηγίες 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ όσον αφορά τις ουσίες προτεραιότητας στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, προκειμένου να διασφαλιστεί κατάλληλο επίπεδο προστασίας και να επικαιροποιηθούν τα ΠΠΠ σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες επιστημονικές και τεχνικές γνώσεις σε ότι αφορά τους κινδύνους για το υδάτινο περιβάλλον και να αναθεωρηθούν τα ΠΠΠ για ορισμένες υφιστάμενες ουσίες.

## 1.2 Εθνικό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των Υδατικών Πόρων

Η πολιτική διαχείρισης του νερού στην Ελλάδα μέχρι τις αρχές του 2000 χαρακτηρίζεται ως αποσπασματική και στερείται συντονισμού, όπως είδαμε άλλωστε ότι συνέβαινε και στην Ευρώπη μέχρι την ΟΠΥ (Αδαμαντίδου, 2000). Ο νομοθέτης εμφανίζεται αρκετά αμήχανος και αδύναμος να επέμβει και να επιφέρει αλλαγές προκειμένου να πετύχει ένα συνεκτικό και ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο. Αντίθετα, παρατηρείται πλήθος διάσπαρτων και αποσπασματικών νομοθετικών διατάξεων που στερούνται συνοχής και εφαρμόζονται από συναρμόδιους φορείς με αλληλεπικαλυπτόμενες αρμοδιότητες (Κάλλια-Αντωνίου, 2006 και Τσεβρένης, 2008). Ωστόσο, θεωρητικά από το 2003 και ουσιαστικά από το 2007 και έπειτα, η ελληνική νομοθεσία, αλλά και οι θεσμοί, με μεγαλύτερη καθυστέρηση και με χαρακτηριστική έλλειψη ετοιμότητας, φαίνεται να πετυχαίνουν στην εφαρμογή του ευρωπαϊκού μέχρι τότε κεκτημένου.

### 1.2.1 Ιστορική αναδρομή

Στην Ελλάδα το νερό προσεγγίζεται αρχικά από το νομοθέτη στο επίπεδο της δημόσιας υγείας. Έτσι, οι πρώτες διατάξεις είναι υγειονομικές, αφορούν το πόσιμο νερό και ρυθμίζουν την υποχρέωση απολύμανσης, τις μεθόδους χλωρίωσης και φθορίωσης, ενώ στερούνται οποιασδήποτε οικολογικής ή οικονομικής προσέγγισης (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Σ' αυτό το πλαίσιο και για την εναρμόνιση με την κοινοτική Οδηγία 80/778/ΕΟΚ εκδίδεται το 1986 από το Υπουργείο Υγείας η Υγειονομική Διάταξη Α5/288/23.1.1986 για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Στη συνέχεια η Διάταξη αυτή αντικαταστάθηκε από άλλη το 2003, για να ενσωματώσει στο ελληνικό δίκαιο την Οδηγία 98/83/ΕΚ που κατήργησε και αντικατέστησε την 80/778/ΕΟΚ (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Το έτος 1986 εκδίδεται, από το Υπουργείο Περιβάλλοντος αυτή τη φορά, ο Νόμος-Πλαίσιο για το περιβάλλον στον οποίο περιλαμβάνονται διατάξεις διακηρυκτικού χαρακτήρα που αφορούν το νερό. Ωστόσο, οι διατάξεις έμειναν στα χαρτιά διότι ποτέ δεν εκδόθηκαν οι αντίστοιχες κανονιστικές αποφάσεις (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Άλλος ένας νόμος που πρακτικά δεν ενεργοποιήθηκε ποτέ είναι ο Νόμος 1739 «Για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων» που εκδόθηκε το 1987 από το Υπουργείο Ανάπτυξης και αποτελεί την πρώτη επίσημη κρατική παρέμβαση με στόχο την προστασία και την ορθολογική αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού της χώρας (Κούγκολος, 2004). Ο νόμος αυτός προσπάθησε να συστηματοποιήσει το νομικό πλαίσιο για τους υδάτινους πόρους, χωρίζοντας τη χώρα σε 14

υδατικά διαμερίσματα που περιγράφονται αναλυτικά στο ΠΔ 60/1998 και θεσμοθετώντας τη Διυπουργική και τις Περιφερειακές Επιτροπές Υδάτων.

Μετά το 2000, καθώς η ευρωπαϊκή νομοθεσία έχει εκδώσει την πιο σημαντική και ολοκληρωμένη Οδηγία για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, την ΟΠΥ, η ελληνική νομοθεσία καλείται να την εναρμονίσει και αντικαθιστά το Νόμο 1739/1987 με το Νόμο 3199/2003. Άλλη μία ένδειξη για τη βαρύτητα της ΟΠΥ αποτελεί το γεγονός ότι η εναρμόνισή της στο ελληνικό δίκαιο γίνεται με νόμο και όχι με μορφή Προεδρικού Διατάγματος ή Κοινής Υπουργικής Απόφασης όπως συνέβαινε και συμβαίνει συνήθως (Χαϊνταρλής, 2003).

Συμπληρωματικά με το Νόμο 3199/2003 ακολουθεί το ΠΔ 51/2007 που αποτελεί την ουσιαστική και πλήρη εναρμόνιση με την ΟΠΥ, θεσπίζοντας το αναγκαίο πλαίσιο μέτρων και διαδικασιών για την επίτευξη ολοκληρωμένης προστασίας και ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας (Τασιόπουλος, 2014).

Λόγω της σημαντικότητας τους, το περιεχόμενο του Νόμου 3199/2003 και του ΠΔ51/2007 αναλύεται ξεχωριστά στη συνέχεια.

Στη συνέχεια εκδίδονται μια σειρά από Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις αλλά και ένας Νόμος για την εναρμόνιση των Οδηγιών που έπονται της ΟΠΥ. Πιο συγκεκριμένα, το 2010 εκδίδεται η ΚΥΑ 51354/2641/Ε103/2010 «Καθορισμός Προτύπων Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ) για τις συγκεντρώσεις ορισμένων ρύπων και ουσιών προτεραιότητας στα επιφανειακά ύδατα, σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 2008/105/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2008, καθώς και για τις συγκεντρώσεις ειδικών ρύπων στα εσωτερικά επιφανειακά ύδατα και άλλες διατάξεις» (Β' 1909), ενώ η ενσωμάτωση της Οδηγίας 2008/99/ΕΚ στην εθνική νομοθεσία ολοκληρώνεται το 2012 με το Νόμο 4042/2012 «Ποινική προστασία του περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ».

Εν τω μεταξύ το 2011 εκδίδεται η υπ' αριθ. 38317/1621/2011 ΚΥΑ (Β' 1977), που ορίζει τις τεχνικές προδιαγραφές και ελάχιστα κριτήρια επιδόσεων των αναλυτικών μεθόδων για τη χημική ανάλυση και παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτων, σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της Οδηγίας 2009/90/ΕΚ, καθώς και η υπ' αριθ. 140384/2011 ΚΥΑ (Β' 2017), η οποία συμπληρώνει το Νόμο 3199/2003 σχετικά με το δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων, καθορίζοντας τις θέσεις (σταθμούς) μετρήσεων και τους υπεύθυνους φορείς που θα λειτουργούν όπως ορίζεται στο άρθρο 4, παράγραφος 4 του Ν. 3199/2003.

Το 2013 εκδίδεται η ΚΥΑ υπ' αριθ. 322/2013 για την Οργάνωση της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Β' 679) και τέλος

το 2016 εκδίδεται η ΚΥΑ. 170766/16 «Τροποποίηση της υπ' αριθ. 51354/2641/Ε103/2010 κοινής υπουργικής απόφασης (Β' 1909)», σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2013/39/ΕΕ «για την τροποποίηση των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ όσον αφορά τις ουσίες προτεραιότητας στον τομέα της πολιτικής των υδάτων» με σκοπό να προστεθούν στον κατάλογο των ουσιών προτεραιότητας και άλλες ουσίες που δημιουργούν σημαντικό κίνδυνο για το υδάτινο περιβάλλον και να επιτυγχάνεται πληρέστερα η καλή χημική και οικολογική κατάσταση των επιφανειακών υδάτων, σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς στόχους του άρθρου 4 του ΠΔ 51/2007.

### **1.2.2 Ο Νόμος 3199/2003**

Όπως ειπώθηκε νωρίτερα, ο Νόμος 3199/2003 δημιουργήθηκε για να ενσωματώσει την ΟΠΥ στο ελληνικό δίκαιο. Ο νέος Νόμος θεσμοθετεί με σαφή και ξεκάθαρο τρόπο τους θεσμικούς φορείς υλοποίησης της εθνικής πολιτικής για τα ύδατα και ορίζει με σαφήνεια τις αρμοδιότητές τους. Έτσι, η διαχείριση των Υδατικών Πόρων τίθεται πλέον στις αρμοδιότητες του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) και όχι του Υπουργείου Ανάπτυξης όπως συνέβαινε μέχρι το 2003 (Τασιόπουλος, 2014).

Μία από τις κυριότερες προβλέψεις του Νόμου αποτελεί η σύσταση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων ως το υψηλού επιπέδου διοικητικό όργανο και η οποία αποτελείται από τους Υπουργούς α) Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Πρόεδρος), β) Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, γ) Οικονομίας, Ανάπτυξης και Τουρισμού, δ) Εσωτερικών και Διοικητικής Ανασυγκρότησης, ε) Διοικητικής Μεταρρύθμισης και Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης, στ) Υγείας και ζ) Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, ενώ μετά από πρόσκληση, μπορούν να συμμετέχουν και άλλοι υπουργοί. Οι αρμοδιότητες της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων είναι η χάραξη της πολιτικής για τη διαχείριση και την προστασία των υδατικών πόρων της χώρας. Επιπλέον, η επιτροπή παρακολουθεί και ελέγχει την εφαρμογή της πολιτικής που χαράσσει και εγκρίνει τα εθνικά προγράμματα προστασίας και διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της χώρας μετά από εισήγηση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας και τη γνωμοδότηση του Εθνικού Συμβουλίου Υδάτων (Τασιόπουλος, 2014).

Σχετικά με το Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων, ο Νόμος ορίζει ότι αποτελείται από 26 μέλη, εκπροσώπους κομμάτων και φορέων, και είναι υπεύθυνο να γνωμοδοτεί για τα εθνικά προγράμματα προστασίας και διαχείρισης του υδατικού δυναμικού της χώρας. Το Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων επιπλέον λαμβάνει γνώση της Ετήσιας Έκθεσης σχετικά με την κατάσταση

του υδάτινου περιβάλλοντος της χώρας, το βαθμό εφαρμογής της νομοθεσίας για την προστασία και διαχείριση των υδάτων καθώς και τη συμβατότητα με το κοινοτικό κεκτημένο, και αποτελεί τον αρμόδιο φορέα για την υποβολή της έκθεσης στη Βουλή (Τασιόπουλος, 2014).

Αυτή η έκθεση συντάσσεται από την Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων (ΚΥΥ), ένα ενιαίο διοικητικό τομέα του ΥΠΕΚΑ, σε συνεργασία με τη Γνωμοδοτική Επιτροπή Υδάτων που συγκροτείται με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας και γνωμοδοτεί προς την Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων (Διαμαντής, 2004).

Οι αρμοδιότητες της ΚΥΥ, όπως καθορίζονται από το Νόμο, αφορούν τα εξής (Κάλλια-Αντωνίου, 2006):

- τη σύνταξη, το συντονισμό και την παρακολούθηση της εφαρμογής των Εθνικών Προγραμμάτων προστασίας και διαχείρισης του υδάτινου δυναμικού της χώρας
- τον έλεγχο της ποιότητας και ποσότητας των υδατικών αποθεμάτων
- την κατάρτιση των υδατικών ισοζυγίων και το στρατηγικό σχεδιασμό των αναπτυξιακών έργων των υδατικών πόρων ανά λεκάνη απορροής
- την κατάρτιση του Εθνικού Μητρώου Προστατευόμενων Περιοχών
- την επεξεργασία των γενικών κανόνων κοστολόγησης και τιμολόγησης των υδάτων

Πέρα από τη σύσταση Επιτροπής, Συμβουλίου και Υπηρεσίας σχετικά με τα ύδατα, ο Νόμος προβλέπει επιπλέον και τη διάρθρωση των Περιφερειακών Διευθύνσεων Υδάτων που προφανώς συστήνονται σε επίπεδο Περιφέρειας.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι για πρώτη φορά η βασική χωρική μονάδα διαχείρισης των υδάτων γίνεται η λεκάνη απορροής ποταμού (ΛΑΠ) και η προστασία και η διαχείρισή της βαρύνει την κάθε νεο-συγκροτούμενη Διεύθυνση Υδάτων σε κάθε Περιφέρεια. Στην περίπτωση που η Λεκάνη απορροής εκτείνεται στα διοικητικά όρια περισσότερων Περιφερειών, τότε προβλέπεται από κοινού άσκηση των ανάλογων αρμοδιοτήτων (Κούγκολος, 2004).

Έτσι, οι Περιφερειακές Διευθύνσεις Υδάτων είναι υπεύθυνες για την παρακολούθηση των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων, την εφαρμογή μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προγραμμάτων διαχείρισης του υδατικού δυναμικού καθώς και την εφαρμογή μέτρων κατά της ρύπανσης των υδάτων από μεμονωμένους ρύπους ή ομάδες ρύπων που αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για το υδάτινο περιβάλλον, σε περιφερειακό πάντα επίπεδο. Επιπλέον, οι Περιφερειακές Διευθύνσεις επιφορτίζονται με την κατάρτιση και την εφαρμογή των Σχεδίων Διαχείρισης και των Προγραμμάτων Μέτρων για τις υδρολογικές λεκάνες που ανήκουν στην οικεία Περιφέρεια (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

Τα Σχέδια Διαχείρισης που εκπονούνται από τις αρμόδιες Διευθύνσεις περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία, τις πληροφορίες και τις εκτιμήσεις που είναι απαραίτητα για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτων. Η κατάρτιση των σχεδίων οφείλει να λάβει υπόψη τις κατευθύνσεις του αντίστοιχου Περιφερειακού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης, καθώς και την επιβολή των αναγκαίων περιορισμών σε υπάρχοντα ή μελλοντικά έργα που υπάρχει πιθανότητα να υποβαθμίζουν την ποιότητα των υδάτων (Κούγκολος, 2004).

Σύμφωνα με τον Χαϊνταρλή, τόσο η μη ουσιαστική αποδέσμευση της διαχείριση των υδατικών πόρων από τα διοικητικά σύνορα, όσο και η συνδιαχείριση που προβλέπεται στην περίπτωση Περιφερειών που γειτνιάζουν, έρχονται σε αντίθεση με όσα προβλέπει η ΟΠΥ και δυσχεραίνουν την επιτυχή έκβαση της προσπάθειας που επιχειρείται, ειδικά αν συνυπολογιστεί η έλλειψη συνεργασίας που πολλές φορές παρατηρείται μεταξύ των δημόσιων φορέων.

Από το νόμο επίσης απουσιάζουν σημαντικοί ορισμοί για την εφαρμογή της ΟΠΥ, όπως η έννοια της καλής οικολογικής κατάστασης, που είναι στόχος στρατηγικής σημασίας για την ΟΠΥ και αποτελεί τον πυρήνα της περιβαλλοντικής πλευράς της. Επιπλέον, παραλείπεται η μεταφορά των προβλεπόμενων από την ΟΠΥ περιβαλλοντικών στόχων. Τέλος δεν περιέχονται οι αναγκαίες εκτελεστικές διατάξεις για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της Περιοχής ΛΑΠ, την ανάκληση κόστους για Υπηρεσίες ύδατος και τον σαφή και αναλυτικό καθορισμό του περιεχομένου των Προγραμμάτων Μέτρων και των Σχεδίων Διαχείρισης. Για όλους τους παραπάνω λόγους η Ελλάδα παραπέμφθηκε στο Δικαστήριο των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων με την κατηγορία της πλημμελούς ενσωμάτωσης της ΟΠΥ στο ελληνικό δίκαιο.

Όμως, παρά τις στρεβλώσεις και τις παραλείψεις που παρατηρούνται, κρίνεται ιδιαίτερα θετικό ότι ο νέος Νόμος εισάγει ένα σύστημα διαβούλευσης και συμμετοχής των ενδιαφερομένων σε περιφερειακό επίπεδο, όπως απαιτεί και η ΟΠΥ (Χαϊνταρλής, 2003), έστω και αν η διαδικασία που προβλέπει δεν κρίνεται ολοκληρωμένη (Κάλλια-Αντωνίου, 2006).

### **1.2.3 Το Π.Δ. 51/2007**

Οι ελλείψεις του Νόμου 3199/2003 όσον αφορά στη θέσπιση και εφαρμογή επαρκών προγραμμάτων παρακολούθησης των υδάτων και προστασίας και διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών με βάση την Οδηγία-Πλαίσιο για το νερό 2000/60/ΕΚ είναι εμφανείς. Η Ελλάδα χρειάστηκε πρώτα να παραπεμφθεί στο ΔΕΚ από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή λόγω μη έγκαιρης ενσωμάτωσης της ανωτέρω Οδηγίας, για να προχωρήσει τέσσερα χρόνια αργότερα

στην έκδοση Προεδρικού Διατάγματος για την ενσωμάτωση των διατάξεων και των ρυθμίσεων των Παραρτημάτων της ΟΠΥ (ΙΣΤΑΜΕ, 2007).

Έτσι, το Μάρτιο του 2007 εκδίδεται το ΠΔ 51/2007 (ΦΕΚ 54Α/8-3-2007) για τον καθορισμό του αναγκαίου πλαισίου μέτρων και διαδικασιών προκειμένου να εφαρμοστούν οι διατάξεις του Ν. 3199/2003 και συγχρόνως να ολοκληρωθεί η εναρμόνιση με την ΟΠΥ και η συμμόρφωση με τις διατάξεις «για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων».

Το νέο διάταγμα θέτει τις βάσεις για ολοκληρωμένη προστασία και ορθολογική διαχείριση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, ενώ καταργεί αυτόματα τα προεδρικά διατάγματα που νομιμοποιούν τη ρίψη αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες και έχει ως πρωταρχικούς στόχους τους κάτωθι:

- την αποτροπή περαιτέρω επιδείνωσης της κατάστασης των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και την προστασία και βελτίωσή τους
- την προώθηση της βιώσιμης χρήσης του νερού
- την ενίσχυση της προστασίας και τη βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος με ειδικά μέτρα για την προοδευτική μείωση των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών ουσιών προτεραιότητας
- τη διασφάλιση της προοδευτικής μείωσης της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων
- το μετριασμό των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες ,

Επιπλέον με το νέο Διάταγμα επιδιώκεται:

- ✓ η εξασφάλιση επαρκούς παροχής επιφανειακού και υπόγειου νερού καλής ποιότητας για τη βιώσιμη, ισόρροπη και δίκαιη χρήση του,
- ✓ η προστασία των χωρικών και θαλάσσιων υδάτων και
- ✓ η επίτευξη των στόχων των σχετικών διεθνών συμφωνιών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αποσκοπούν στην πρόληψη και την εξάλειψη της ρύπανσης του θαλασσιού περιβάλλοντος.

Το ΠΔ εμφανίζεται βελτιωμένο σε σχέση με το Νόμο 3199 καθώς ορίζει με σαφήνεια τη διαδικασία προσδιορισμού για τις Περιοχές Λεκάνης Απορροής Ποταμού – Υδατικά Διαμερίσματα. Επιπλέον, ορίζει τους Περιβαλλοντικούς Στόχους όπως διατυπώθηκαν παραπάνω και επιτρέπει μόνο σε ειδικές περιπτώσεις παρέκκλιση από αυτούς χωρίς ωστόσο να σημειώνεται περαιτέρω υποβάθμιση της κατάστασης του αντίστοιχου υδατικού συστήματος.

Τελικώς τον Ιούνιο του 2007, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δέχτηκε το ΠΔ και έκλεισε την υπόθεση στο ΔΕΚ (Δανιλάκης, 2011).

#### 1.2.4 Ελλείψεις - Καθυστερήσεις

Η Ελλάδα όπως έγινε σαφές νωρίτερα, έχει ήδη καθυστερήσει στην εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ με το Ν. 3199/2003, ο οποίος είχε πολλά κενά. Το 2007 ως μια προσπάθεια εναρμόνισης με την 2000/60/ΕΚ εκδόθηκε το Προεδρικό Διάταγμα 51/8.3.2007(54 Α). Όμως η καθυστέρηση θεσμικής εναρμόνισης της Οδηγίας στην Ελλάδα είχε ως συνέπεια και τη σημαντική καθυστέρηση στην εφαρμογή των διατάξεών της με βάση το χρονοδιάγραμμα (Δανιλάκης, 2011).

Το Μάρτιο του 2007 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε έκθεση για την καθυστέρηση της Ελλάδας να εφαρμόσει το άρθρο 5 της ΟΠΥ και την παρέπεμψε στο ΔΕΚ για παραλείψεις που αφορούσαν την ανάλυση, για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού, των χαρακτηριστικών της, την επισκόπηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην κατάσταση των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων και την οικονομική ανάλυση της χρήσης ύδατος, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές των παραρτημάτων II και III της Οδηγίας (Δανιλάκης, 2011).

Στις 31 Ιανουαρίου 2008 ανακοινώθηκε η καταδίκη της Ελλάδας από το ΔΕΚ για παράβαση των διατάξεων της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, και ειδικότερα των υποχρεώσεων της χώρας που απορρέουν από τα άρθρα 5 και 15. Θετική εξέλιξη στην υπόθεση αυτή αποτέλεσε η αποστολή στην ΕΕ των μελετών για τις λεκάνες απορροής ποταμών, οι οποίες κρίθηκαν επαρκείς (Δανιλάκης, 2011).

Επίσης, ενώ μέχρι το Δεκέμβριο του 2006 έπρεπε όλα τα κράτη-μέλη να έχουν ολοκληρώσει και να έχουν θέσει σε εφαρμογή τα Προγράμματα Παρακολούθησης των Υδάτων<sup>3</sup>, στην Ελλάδα παρατηρήθηκε μεγάλη κωλυσιεργία στην θεσμική εφαρμογή του άρθρου 8, για την κατάστρωση των προγραμμάτων εποπτικής, λειτουργικής και διερευνητικής παρακολούθησης (monitoring) των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδάτινων σωμάτων. Το έργο έπρεπε να έχει ολοκληρωθεί το 2006, ώστε από το 2007 να είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία τα προγράμματα παρακολούθησης, ενώ η Ελλάδα μόλις το 2007 προκήρυξε το αντίστοιχο έργο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να ξεκινήσει εκ νέου προδικαστική διαδικασία από την ΕΕ λόγω της

---

<sup>3</sup>π.δ. 51/2007 άρθρο 11, §2



αδυναμίας της Ελλάδας να τηρήσει τις υποχρεώσεις της και να θεσπίσει προγράμματα παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων και διατήρησης της οικολογικής σύστασης των νερών και να ενημερώσει έως τις αρχές του 2007 την Ε.Ε. για την αποτελεσματικότητα των μέτρων που έλαβε (Δανιλάκης, 2011).

Σημαντικές καθυστερήσεις παρουσιάζονται και στην ολοκλήρωση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής (Γιαννακούρου, 2007), των οποίων η προθεσμία ολοκλήρωσης ήταν ο Δεκέμβριος 2009. Η Ελλάδα, όχι μόνο δεν ολοκλήρωσε έγκαιρα τα σχέδια διαχείρισης, αλλά μόλις το 2010 προκήρυξε τις πρώτες μελέτες εκπόνησης των σχεδίων, για τις περιοχές λεκανών απορροής Θεσσαλίας, Ηπείρου και Δυτικής Ελλάδας με αποτέλεσμα να κινηθεί για άλλη μία φορά προδικαστική διαδικασία από την ΕΕ τον Ιούνιο 2010 (Δανιλάκης, 2011).

Το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο θέτει μια σειρά οργανωτικών προϋποθέσεων για την καλύτερη διαχείριση των νερών, όμως οι σημαντικές ελλείψεις και καθυστερήσεις που παρατηρούνται στο πεδίο της υλοποίησής του από τις εκάστοτε ελληνικές κυβερνήσεις καθυστέρησαν πολύ τη χρησιμοποίηση του σημαντικότερου διαχειριστικού εργαλείου της ΟΠΥ, δηλαδή την παρακολούθηση (ΕΚΒΥ, 2007 και ΕΚΒΥ, 2008). Χωρίς την παρακολούθηση (προσωπικό, εργαστήρια, εξοπλισμός, θεσμικά μέτρα) δεν υπάρχει αξιόπιστη εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης, δεν υπάρχουν περιβαλλοντικοί στόχοι αποκατάστασης και συνεπώς καθιστούν τα όποια Σχέδια Διαχείρισης κενά περιεχομένου (Δανιλάκης, 2011).

Ένα ακόμα σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η μεγάλη χρονική καθυστέρηση σύστασης και λειτουργίας της υπάρχουσας διοικητικής οργάνωσης για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτων, με προφανή αντίκτυπο στην υλοποίηση της 2000/60/ΕΚ. Η Εθνική Επιτροπή Υδάτων και το Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων συστάθηκαν μόλις τον Ιούλιο του 2010, ενώ μεγάλη πρόκληση αποτελούν οι Διευθύνσεις Υδάτων Περιφερειών (ΔΥΠ), μιας και μέχρι πρόσφατα υπολειπορούσαν αφού αντιμετώπιζαν σοβαρές ελλείψεις σε πόρους και σε ειδικευμένο προσωπικό, παρά τον πολύ σημαντικό τους ρόλο για την υλοποίηση των επιταγών της 2000/60/ΕΚ, επιφέροντας αρνητικά αποτελέσματα στην φάση της υλοποίησης (Δανιλάκης, 2011).

Τις αδυναμίες αυτές όσον αφορά τις αρμοδιότητες των ΔΥΠ, ενδέχεται να αντιμετωπίσει σε κάποιο βαθμό ο Καλλικράτης, αλλά η επιτυχία θα κριθεί από το χρόνο και από την αποτελεσματικότητα του νέου καταμερισμού (Δανιλάκης, 2011).

### 1.3 Συμπεράσματα - Προεκτάσεις

Η Ελληνική νομοθεσία για τη διαχείριση και προστασία των υδάτων αποτελείται σχεδόν στο σύνολο της από την αντίστοιχη νομοθεσία της ΕΕ, την κοινοτική νομοθεσία. Μέχρι το 2000 δεν μπορεί να γίνει λόγος για πολιτική ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδάτων. Μόνο μετά την Οδηγία 2000/60/ΕΚ (Αδαμαντίδου, 2003) θεσπίστηκε το κατάλληλο πλαίσιο για την προστασία των εσωτερικών, των επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων της ΕΕ. Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ αποβλέπει στην ενοποιημένη μακροπρόθεσμη διαχείριση των υδάτων στην ΕΕ και καθιερώνει την αρχή της αειφορίας (Καραγεώργου, 2003) στη διαχείριση των υδάτων συνδέοντας το στόχο της καλής ποιότητας του νερού με την διαθεσιμότητα του (Καριγιιάδης, 2008). Το πόσο καλά ή πόσο αποτελεσματικά εφαρμόζεται αυτή η πολιτική σε επίπεδο κράτους αφορά αποκλειστικά το κάθε κράτος – μέλος ξεχωριστά (Δανιλάκης, 2011).

Τόσο το δίκαιο όσο και η πολιτική δεν μπορούν να προσφέρουν από μόνα τους λύσεις για την αντιμετώπιση των κινδύνων για τα ύδατα. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να συμπράξουν φορείς της επιστήμης, της τεχνολογίας, της πολιτικής και της Κοινωνίας των Πολιτών και να διαμορφώσουν ένα νέο πεδίο κοινωνικού ελέγχου για διάφορα ζητήματα καθημερινής επικινδυνότητας, αφού πλέον θα αντιλαμβάνονται την επιρροή τους στο ευρύτερο κοινωνικό συμφέρον. Αυτό είναι πιθανό να οδηγήσει σε διάφορες οργανωμένες ή όχι πρωτοβουλίες πολιτών που θα αξιώνουν από το κράτος να αποκτήσουν θεσμική υπόσταση οι δράσεις ή οι καινοτομίες τους (Τσεβρένης, 2008).

Στο επίπεδο αυτό είναι πιθανό η τηλεπισκόπηση, η οποία ως επιστημονικός κλάδος μπορεί και ήδη δρα προληπτικά σχετικά με την ποιότητα υδάτων των διάφορων υδατικών συστημάτων, να συμπεριλαμβάνεται στις θεσμικές δράσεις της Ελλάδας και των άλλων κρατών-μελών για την πρόληψη των κινδύνων ή για την άμεση αντιμετώπισή τους, σε συνεργασία με εξειδικευμένα πανεπιστημιακά εργαστήρια.

## **A.2 Εφαρμογή της ΟΠΥ για την αξιολόγηση της ποιοτικής κατάστασης λιμναίων Υδατικών Συστημάτων στον ελλαδικό χώρο**

Όπως έγινε φανερό στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εφαρμογή της Οδηγίας Πλαίσιο περί Υδάτων (ΟΠΥ) έχει ως τελική επιδίωξη την επίτευξη «καλής κατάστασης» σε όλα τα επιφανειακά υδάτινα σώματα και υπόγεια υδατικά συστήματα.

Τα Σχέδια Διαχείρισης περιέχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, καθώς και όλες τις πληροφορίες και εκτιμήσεις που απαιτούνται για το σκοπό αυτό. Έτσι, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας εργασίας στη συντριπτική τους πλειοψηφία απαντώνται στα Σχέδια Διαχείρισης Υδάτων των Υδατικών Διαμερισμάτων, όπως έχουν εκδοθεί από τις αντίστοιχες Περιφερειακές Διευθύνσεις της χώρας. Τα Διαχειριστικά Σχέδια έχουν εγκριθεί στο σύνολό τους από την Εθνική Επιτροπή Υδάτων και αναρτηθεί στην ειδική διαδικτυακή διεύθυνση της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του ΥΠΕΚΑ.

## 2.1 Καθορισμός Υδατικών Συστημάτων

Η αναγνώριση και η οριοθέτηση των υδατικών συστημάτων (ή σωμάτων) αποτελεί βασικό υπόβαθρο στο οποίο δομείται η εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Για να επιτευχθεί λοιπόν ο βασικός σκοπός της ΟΠΥ, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των υδατικών συστημάτων, προκειμένου η κατάστασή τους να μπορεί να προσδιοριστεί με ενιαίο τρόπο και να μπορούν να εφαρμοστούν τα ανάλογα διαχειριστικά μέτρα (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04) .

Η αρχική και στοιχειώδης διάκριση των νερών αφορά στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Τα επιφανειακά αποτελούν αυτά που εντοπίζονται στην επιφάνεια του εδάφους και σχετίζονται με την επιφανειακή απορροή. Αντίθετα, τα υπόγεια νερά σχετίζονται με την κατείδυση και συνήθως καταλαμβάνουν μεγάλες σε έκταση επιφάνειες κάτω από το έδαφος. Αν και δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ τους, καθώς συχνά υπάρχει υδραυλική επικοινωνία και ποιοτική και ποσοτική αλληλεπίδραση, η διάκρισή τους εξυπηρετεί τόσο την επεξεργασία και την αξιολόγηση των στοιχείων που συλλέγονται, όσο και τη στοχευμένη και αποτελεσματικότερη διαχείρισή τους (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04) .

Σύμφωνα με την Οδηγία, η επίτευξη της καλής κατάστασης μεταφράζεται για τα επιφανειακά ύδατα ως η επίδιωξη της καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης, ενώ για τα υπόγεια η επίτευξη καλής ποσοτικής και χημικής κατάστασης. Έτσι, τα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά διαιρούνται σε υπόγεια υδατικά συστήματα και επιφανειακά υδάτινα σώματα (ΥΣ) αντίστοιχα, δηλαδή ενότητες υδάτων με κοινά υδρολογικά και οικολογικά χαρακτηριστικά, με στόχο την εξειδίκευση των απαιτούμενων δράσεων της Οδηγίας (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04) .

Επειδή η παρούσα εργασία εστιάζει στην ποιότητα των λιμναίων υδάτων, στο εξής παρουσιάζονται εκτενέστερα όσα αφορούν τα επιφανειακά υδάτινα σώματα με έμφαση στις λίμνες.

### 2.1.1 Επιφανειακά Υδάτινα Σώματα

Σύμφωνα με την ΟΠΥ, τα επιφανειακά υδάτινα σώματα αρχικά κατατάσσονται σε 4 κατηγορίες που καθορίζονται ως εξής (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04, Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου GR03):

- **Ποτάμια ΥΣ:**

Οι φυσικές μισγάγγειες που συγκεντρώνουν και διοδεύουν επιφανειακά νερά (όμβρια/βρόχινα ή εκφορτίσεις πηγών) από τις παρυφές των λεκανών τους μέχρι την εκβολή τους στη θάλασσα ή σε κάποια λίμνη. Τα ποτάμια παρουσιάζουν έντονη ανομοιογένεια ως προς την υδρολογική τους διαίτα. Από το συνολικό όγκο ομβρίων που δέχονται εντός της λεκάνης απορροής τους ένα μέρος μόνο απορρέει επιφανειακά ή υπεδαφικά προς τον τελικό αποδέκτη, ένα άλλο μέρος εξατμίζεται προς την ατμόσφαιρα, ενώ ένα τρίτο μέρος κατεισδύει στους υποκείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για τα ποτάμια, καίριας σημασίας για τη διαμόρφωση της περιβαλλοντικής τους εικόνας είναι το μέρος εκείνο των ομβρίων υδάτων που απορρέει επιφανειακά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ποτάμια που παρουσιάζουν επιφανειακή απορροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με μικρότερες ή μεγαλύτερες εποχιακές διακυμάνσεις, διότι σε αυτά αναπτύσσεται σημαντική ποικιλία χλωρίδας και πανίδας με άμεση εξάρτηση από την παρουσία και την ποιότητα του νερού.

Για τις ανάγκες εφαρμογής της Οδηγίας στα Διαχειριστικά Σχέδια των Υδατικών διαμερισμάτων της Ελλάδας καθορίστηκαν ως ποτάμια ΥΣ οι ποταμοί με καθεστώς μόνιμης ροής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και κατά περίπτωση οι ποταμοί με καθεστώς περιοδικής ροής.

- **Λιμναία ΥΣ:**

Οι περιοχές που συγκεντρώνουν ύδατα από επιφανειακή απορροή ή από εκφορτίσεις υπογείων υδάτων σε μια κλειστή λεκάνη, από την οποία δεν υπάρχει δυνατότητα εκβολής σε άλλο αποδέκτη ή στη θάλασσα. Οι λίμνες ορίζουν σημαντικότερα οικοσυστήματα, είναι δε γενικά ευαίσθητες στις ανθρώπινες δραστηριότητες και για το λόγο αυτό τυγχάνουν συχνά ειδικών μέτρων προστασίας. Για τις ανάγκες εφαρμογής της Οδηγίας στα Διαχειριστικά Σχέδια των Υδατικών διαμερισμάτων της Ελλάδας καθορίστηκαν ως λιμναία ΥΣ όλες οι φυσικές και τεχνητές λίμνες με έκταση πάνω από 0,5 km<sup>2</sup>.

- **Παράκτια ύδατα:**

Τα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς μιας γραμμής, κάθε σημείο της οποίας βρίσκεται σε απόσταση ενός ναυτικού μιλίου προς τη θάλασσα από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών

υδάτων και τα οποία, κατά περίπτωση, εκτείνονται μέχρι του απώτερου ορίου των μεταβατικών υδάτων.

- **Μεταβατικά ΥΣ:**

Τα συστήματα επιφανειακών υδάτων πλησίον του στομίου ποταμών τα οποία είναι εν μέρει αλμυρά λόγω της γειτνίασής τους με παράκτια ύδατα αλλά τα οποία επηρεάζονται ουσιαστικά από ρεύματα γλυκού νερού. Επιπλέον, στα μεταβατικά ύδατα ανήκουν και παράκτιοι υγρότοποι (λιμνοθάλασσες) σημαντικής οικολογικής αξίας οι οποίοι δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται πλησίον του στομίου ποταμών. Για τις ανάγκες εφαρμογής της ΟΠΥ στα Διαχειριστικά Σχέδια των Υδατικών Διαμερισμάτων της Ελλάδας, ως μεταβατικά ΥΣ διακρίθηκαν τα πλέον σημαντικά από πλευράς έκτασης και οικολογικών χαρακτηριστικών συστήματα μεταβατικών νερών.

Έτσι, τα ύδατα διακρίνονται σε «υδάτινα σώματα» με στόχο τον καθορισμό «διακεκριμένων και σημαντικών στοιχείων υδάτων», στοιχεία δηλαδή τα οποία μπορεί να ταξινομηθούν ενιαία σε κάποια κλάση οικολογικής κατάστασης (υψηλή, καλή, μέτρια, ελλιπής ή κακή) και χημικής κατάστασης (καλή ή κατώτερη της καλής) και να αποτελέσουν υποκείμενο στη λήψη διαχειριστικών μέτρων (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04).

Η οικολογική και η χημική κατάσταση των επιφανειακών ΥΣ, καθώς και οι κλάσεις τους αναλύονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

Ωστόσο, τόσο οι περιβαλλοντικοί στόχοι όσο και η διαχείριση των ΥΣ διαφοροποιούνται, σύμφωνα με την ΟΠΥ, για υδάτινα σώματα με σημαντικές υδρομορφολογικές αλλοιώσεις, τα οποία στο πλαίσιο της Οδηγίας χαρακτηρίζονται ως Ιδιαίτερος Τροποποιημένα Υδάτινα Σώματα - ΙΤΥΣ (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04) .

Η ΟΠΥ επιπλέον χαρακτηρίζει ως Τεχνητά Υδάτινα Σώματα - ΤΥΣ, τα υδάτινα σώματα τα οποία προέκυψαν μετά από ανθρωπογενή παρέμβαση, σε τόπο όπου δεν υπήρχε πριν παρουσία νερού.

Τα ΤΥΣ και ΙΤΥΣ πρέπει σε κάθε περίπτωση να καθορίζονται με σαφήνεια, καθώς οι περιβαλλοντικοί στόχοι για αυτά διαφέρουν από εκείνους για τα φυσικά υδάτινα σώματα, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Γι' αυτά τα υδάτινα σώματα ο περιβαλλοντικός στόχος είναι η επίτευξη «καλού οικολογικού δυναμικού», όπως αναλύεται

περαιτέρω στη συνέχεια (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας-GR04).

Για να γίνουν πιο κατανοητές οι κατηγορίες ΙΤΥΣ και ΤΥΣ, αξίζει να αναφέρουμε ότι αυτά τα ΥΣ εξυπηρετούν διάφορες ανθρωπογενείς ανάγκες και δραστηριότητες, όπως είναι η προστασία από τις πλημμύρες, η ταμίευση νερού για άρδευση και υδροδότηση, η ναυσιπλοΐα κλπ. Παραδείγματα τέτοιων έργων αποτελούν οι ταμιευτήρες φραγμάτων για διευθετήσεις ποταμών ή για αντιπλημμυρική προστασία, οι αποστραγγιστικές τάφροι για την αποξήρανση περιοχών κλπ. Μια περίπτωση ΙΤΥΣ, θα μπορούσε να αποτελεί ένα υδάτινο σώμα το οποίο βρίσκεται σε τόπο όπου προηγουμένως υφίστατο ένα άλλο υδάτινο σώμα. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός φράγματος κάθετα στη ροή ενός ποταμού και η μετατροπή με τον τρόπο αυτό του ποτάμιου ΥΣ σε λιμναίο ΥΣ αποτελεί την αιτία για τον χαρακτηρισμό του ως Ιδιαίτερα Τροποποιημένου ΥΣ (ΙΤΥΣ) (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής - GR 06).

Επίσης, ως Τεχνητά λιμναία ΥΣ (ΤΥΣ) ορίζονται οι εξωποτάμιοι ταμιευτήρες οι οποίοι αποτελούν μόνιμες υδατοσυλλογές που έχουν δημιουργηθεί σε τόπο όπου δεν υπήρχε πριν υδάτινο σώμα (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής - GR 06).

Όσον αφορά τα λιμναία ΥΣ, πολλές από τις φυσικές λίμνες έχουν σε παρελθόντα χρόνο υποστεί τεχνικές παρεμβάσεις που έχουν αλλοιώσει τα υδρομορφολογικά τους χαρακτηριστικά ή/ και επιτρέπουν την ρύθμιση του υδατικού τους ισοζυγίου, μέσω της ρύθμισης των εκροών τους και της στάθμης τους. Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που εξετάζονται αφορούν κυρίως υδραυλικά έργα (αναχώματα, έργα ρύθμισης εκροής και στάθμης μέσω θυροφραγμάτων, κλπ.). Εξ αιτίας τέτοιων παρεμβάσεων, το καθεστώς ορισμένων λιμνών θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι μεταπίπτει σε αυτό του ΙΤΥΣ. Κατά την εκπόνηση των διαχειριστικών σχεδίων, οι περιπτώσεις αυτές εξετάστηκαν κατά περίπτωση, ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο θεωρείται ότι οι παρεμβάσεις στην υδρομορφολογία αλλοιώνουν ουσιωδώς τον χαρακτήρα τους ως φυσικές λίμνες (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής - GR06).

Συνοψίζοντας, μπορούμε να αναφέρουμε ότι, τα κριτήρια με βάση τα οποία αναγνωρίζονται και οριοθετούνται τα επιφανειακά ΥΣ σύμφωνα με την Οδηγία είναι τα εξής (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03):

- η διακριτότητα
- τα γεωμορφολογικά και υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά
- το αν αποτελούν ΤΥΣ ή ΙΤΥΣ όπως αυτά ορίστηκαν παραπάνω

- την οικολογική τους κατάσταση ως αποτέλεσμα ανάλυσης πιέσεων και επιπτώσεων
- το αν αποτελούν υγρότοπο που μπορεί να χαρακτηριστεί ως αυτόνομο υδατικό σύστημα



## 2.2 Τυποχαρακτηριστικές Συνθήκες αναφοράς

Κάθε ΥΣ πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την κατάστασή του, σε σχέση με τους περιβαλλοντικούς στόχους της ΟΠΥ, με αξιολόγηση στοιχείων και παρατηρήσεων και μέσα από κατάλληλες διαδικασίες παρακολούθησης. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, τα επιφανειακά ΥΣ παρακολουθούνται και αξιολογούνται ως προς την οικολογική και χημική τους κατάσταση, ενώ τα υπόγεια εξετάζονται ως προς το επίπεδο της ποσοτικής τους εκμετάλλευσης και τη χημική τους κατάσταση (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

Τα επιφανειακά υδατικά συστήματα αφού ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος τους (ποτάμια, λίμνες, παράκτια, μεταβατικά) ταξινομούνται και με βάση τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους, με συγκεκριμένους κανόνες που ορίζονται ως τυπολογία. Αντίθετα τα υπόγεια συστήματα εξετάζονται με βάση τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

Επιπλέον, αφού κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα επηρεάζει τα υδατικά συστήματα σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, ο καθορισμός των συστημάτων και η πιθανότητα χαρακτηρισμού τους σαν ΠΤΥΣ/ΤΥΣ είναι κρίσιμος, τόσο γιατί αποτελεί στοιχείο αξιολόγησής τους, όσο γιατί αποτελεί τη βάση για την επιλογή των μέτρων προστασίας ή βελτίωσης της κατάστασής τους.

Προκειμένου να γίνει η αξιολόγησή αυτή, καθορίζονται μια σειρά από δείκτες που μπορούν με ασφάλεια να αποδώσουν την κατάσταση του συστήματος. Οι δείκτες αυτοί είναι βιολογικοί (υδρόβια χλωρίδα, πανίδα και μικροοργανισμοί), φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και χημικές ουσίες (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

Η κατάσταση κάθε ΥΣ αποδίδεται με βάση την ταξινόμηση που προκύπτει από την εικόνα των δεικτών του και σε σύγκριση με τις τιμές των δεικτών που αντιστοιχούν σε αδιατάρακτες (φυσικές) συνθήκες που ονομάζονται «συνθήκες αναφοράς» για ΥΣ που έχουν ταξινομηθεί στην ίδια κατηγορία. Η σύγκριση αυτή καθορίζει τελικά την αξιολόγηση της κατάστασης του συστήματος (από κακή έως υψηλή) και καταδεικνύει την ανάγκη δράσης για τη βελτίωση ή την προστασία του συστήματος (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03)

### **2.2.1 Συνθήκες αναφοράς για τη βιολογική κατάσταση**

Οι συνθήκες αναφοράς για την οικολογική κατάσταση δίνονται με βάση τους απαντώμενους πληθυσμούς και την κατάσταση συγκεκριμένων ειδών της χλωρίδας και της πανίδας. Στην προσπάθεια των ευρωπαϊκών χωρών να γίνει μια γενίκευση και τυποποίηση των κριτηρίων γίνονται ασκήσεις διαβαθμονόμησης σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να καθοριστούν συνθήκες αναφοράς για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης στα υδατικά συστήματα της περιοχής της Μεσογείου. Για τις λίμνες τέτοια χαρακτηριστικά αποτελούν το φυτοπλαγκτόν, τα μακρόφυτα, το φυτοβένθος, η πανίδα βενθικών ασπόνδυλων και η ιχθυοπανίδα (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

Σε αντιστοιχία με την οικολογική κατάσταση, το οικολογικό δυναμικό για ένα ΙΤΥΣ ή ένα ΤΥΣ διαφοροποιείται όπως έγινε σαφές νωρίτερα και αντιστοιχεί στην απόκλιση της οικολογικής κατάστασης από το «μέγιστο οικολογικό δυναμικό» (ΜΕΔ). Το ΜΕΔ για τα ΙΤΥΣ και τα ΤΥΣ αντιστοιχεί στην οικολογική κατάσταση του πλέον συγκρίσιμου τύπου ΥΣ, λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές συνθήκες που απορρέουν από τα τεχνητά ή τα ιδιαίτερα τροποποιημένα χαρακτηριστικά του υδάτινου σώματος. Έτσι το μέγιστο οικολογικό δυναμικό αποτελεί τις συνθήκες αναφοράς για τα ΙΤΥΣ και τα ΤΥΣ (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας GR04).

### **2.2.2 Συνθήκες αναφοράς για τη χημική κατάσταση**

Οι συνθήκες αναφοράς για τη χημική κατάσταση ενός επιφανειακού ΥΣ δεν έχουν καθοριστεί ακόμα σε επίπεδο χώρας και ως εκ τούτου ορίζονται από τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές που καθορίζει η χώρα ως πρότυπα ποιότητας περιβάλλοντος (ΠΠΠ) για τις ουσίες προτεραιότητας και ορισμένους άλλους ρύπους. Η Οδηγία 2013/39/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 12ης Αυγούστου 2013 «για την τροποποίηση των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ καθορίζει πλέον τις ουσίες προτεραιότητας, με στόχο την επίτευξη της καλής χημικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων και σύμφωνα με τις διατάξεις και τους στόχους όπως ορίζονται στο άρθρο 4 της ΟΠΥ.

Πρόκειται για ρυπογόνους ουσίες, κυρίως παρασιτοκτόνα και βαρέα μέταλλα. Οι εν λόγω ουσίες παρουσιάζουν κινδύνους για την επιβίωση των οικοσυστημάτων αλλά και για την ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

### **2.2.3 Συνθήκες αναφοράς για τη φυσικοχημική κατάσταση**

Για τη φυσικοχημική κατάσταση δεν έχουν καθοριστεί ακόμα σε επίπεδο χώρας οι συνθήκες αναφοράς, οι οποίες αφορούν χαρακτηριστικά των συστημάτων όπως η οξύτητα των υδάτων, η θερμοκρασία τους, η θολότητα, η αγωγιμότητα κλπ. αλλά και θρεπτικά συστατικά όπως νιτρικά, αμμωνιακά, φωσφορικά κλπ.(Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου - GR01). Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας γίνεται προσπάθεια εκτίμησης τέτοιων χαρακτηριστικών για 11 λίμνες της Ελλάδας με χρήση τηλεπισκόπησης.

### **2.2.4 Αξιολόγηση της υδρομορφολογικής κατάστασης**

Για την πλήρη και σφαιρική αξιολόγηση της κατάστασης των υδάτων, εξετάζεται σε κάθε περίπτωση και ο βαθμός υδρομορφολογικών αλλοιώσεων, που έχουν προκύψει από ανθρώπινες δραστηριότητες. Τέτοιες αλλοιώσεις αφορούν τόσο τη γεωμετρία και τη μορφή του ΥΣ, όσο και την ίδια την υδρολογική δίαιτα. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις υδρομορφολογικών αλλοιώσεων που μπορούν να επηρεάσουν την αξιολόγηση της κατάστασης ενός ΥΣ είναι οι σημαντικές απολήψεις νερού, οι επιχωματώσεις, οι αμμοληψίες κλπ.

Σημειώνεται ότι η υδρομορφολογική κατάσταση ενός συστήματος εξετάζεται πάντα σε συνδυασμό με τα βιολογικά, χημικά και φυσικοχημικά στοιχεία που είναι διαθέσιμα. Υπενθυμίζεται ότι στις περιπτώσεις που οι αλλοιώσεις αυτές είναι σοβαρές τα συστήματα χαρακτηρίζονται ως Ιδιαίτερος Τροποποιημένα, οπότε τίθενται γι' αυτά εναλλακτικοί περιβαλλοντικοί στόχοι (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

## 2.3 Ταξινόμηση Υδατικών συστημάτων βάσει της κατάστασης τους

Η Οδηγία απαιτεί η ταξινόμηση των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων να απεικονίζει την οικολογική τους κατάσταση, όπως καθορίζεται μέσα από βιολογικές, υδρομορφολογικές, χημικές και φυσικοχημικές παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του επιφανειακού σώματος.

Σύμφωνα με το άρθρο 2 της ΟΠΥ

- κατάσταση των επιφανειακών υδάτων είναι η συνολική έκφραση της κατάστασης ενός επιφανειακού σώματος που καθορίζεται από τις χαμηλότερες τιμές της οικολογικής και της χημικής του κατάσταση
- οικολογική κατάσταση είναι η ποιοτική έκφραση της διάρθρωσης και της λειτουργίας υδατικών οικοσυστημάτων που συνδέονται με επιφανειακά ύδατα σύμφωνα με το παράρτημα V της ΟΠΥ

Η ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης και του οικολογικού δυναμικού στηρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες μετρούμενων παραμέτρων. Αυτές είναι οι βιολογικές, οι φυσικοχημικές, οι υδρομορφολογικές και οι συγκεκριμένοι ή συνθετικοί ρύποι ή ειδικοί ρύποι ή εθνικοί ρύποι όπως καθορίστηκαν στη συνέχεια με την ΚΥΑ Η.Π 51354/2641/Ε103 (Β 1909/8-12-2010) και επικαιροποιήθηκαν με την ΚΥΑ. 170766/16 σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2013/39/ΕΕ για την τροποποίηση των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ και για την υποβοήθηση του προσδιορισμού της οικολογικής κατάστασης των συστημάτων των εσωτερικών επιφανειακών υδάτων.

Οι τυποχαρακτηριστικές συνθήκες αναφοράς εκφράζουν τις υδρομορφολογικές, φυσικοχημικές και βιολογικές συνθήκες που έχει ένα ΥΣ με υψηλή οικολογική κατάσταση, σύμφωνα με την κατάταξη του παραρτήματος V της ΟΠΥ. Για τα ιδιαίτερος τροποποιημένα και τεχνητά υδάτινα συστήματα οι περιβαλλοντικοί στόχοι περιγράφονται από το οικολογικό δυναμικό (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).



**Σχήμα 1: Κατηγορίες ποιοτικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατάταξη επιφανειακών υδατικών σωμάτων**

### Οικολογική Κατάσταση

Η οικολογική κατάσταση για τα φυσικά υδάτινα συστήματα με βάση την ΟΠΥ ορίζεται ως εξής:

- Υψηλή κατάσταση (High): Απουσία ή ήσσονος σημασίας ανθρωπογενείς μεταβολές των τιμών των φυσικοχημικών και των υδρομορφολογικών ποιοτικών στοιχείων. Οι τιμές των βιολογικών ποιοτικών στοιχείων του συστήματος επιφανειακών υδάτων αντικατοπτρίζουν εκείνες των συνθηκών αναφοράς.
- Καλή κατάσταση (Good): Οι τιμές των βιολογικών ποιοτικών στοιχείων του συστήματος επιφανειακών υδάτων εμφανίζουν χαμηλού επιπέδου αλλοιώσεις λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας αλλά διαφοροποιούνται σε μικρό βαθμό από τις τιμές που χαρακτηρίζουν το τυπικό σύστημα επιφανειακών υδάτων υπό μη διαταραγμένες συνθήκες.
- Μέτρια κατάσταση (Moderate): Οι τιμές των βιολογικών ποιοτικών στοιχείων του συστήματος επιφανειακών υδάτων παραλλάσσουν μετρίως τις τιμές που χαρακτηρίζουν το τυπικό σύστημα επιφανειακών υδάτων υπό μη διαταραγμένες συνθήκες.
- Τα ύδατα με κατάσταση χαμηλότερη της μέτριας κατατάσσονται ως Ελλιπούς (Poor) ή Κακής κατάστασης (Bad).

Η αξιολόγηση της κατάστασης βασίζεται σε στοιχεία που προέρχονται από το πρόγραμμα παρακολούθησης ποιοτικών στοιχείων. Πολλές φορές η ορθή αξιολόγηση ενός στοιχείου προϋποθέτει τον επανασχεδιασμό των στοιχείων που εντάσσονται στο πρόγραμμα

παρακολούθησης, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της αξιολόγησης να είναι αξιόπιστα (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

Για τις κατηγορίες επιφανειακών υδάτων, η ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης του υδατικού συστήματος εκφράζεται με τη χαμηλότερη τιμή των αποτελεσμάτων της βιολογικής και φυσικοχημικής παρακολούθησης των σχετικών ποιοτικών στοιχείων. Τα κράτη μέλη παρέχουν χάρτη για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού, με την ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης κάθε υδατικού συστήματος, χρησιμοποιώντας ένα χρωματικό κώδικα, για να φαίνεται η ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης του υδατικού συστήματος.

H	Υψηλή Οικολογική Κατάσταση, (High)
G	Καλή Οικολογική Κατάσταση, (Good)
M	Μέτρια Οικολογική Κατάσταση, (Moderate)
P	Ελλιπής Οικολογική Κατάσταση, (Poor)
B	Κακή Οικολογική Κατάσταση, (Bad)

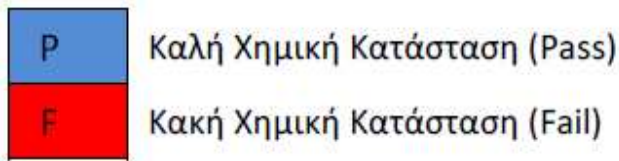
#### **Σχήμα 2: Κατηγορίες αξιολόγησης οικολογικής κατάστασης επιφανειακών συστημάτων**

Αφού ληφθούν υπόψη όλες οι βιολογικές, φυσικοχημικές, υδρομορφολογικές παράμετροι καθώς και οι ειδικοί ρύποι όπως ορίστηκαν παραπάνω, για την τελική κατάταξη ισχύει η αρχή του ένα εκτός - όλα εκτός. Τα ποιοτικά στοιχεία που προσδίδουν την τελική κατάταξη ελέγχονται και αποφασίζεται με βάση ποιο θα γίνει η τελική αξιολόγηση της οικολογικής κατάταξης. Εν γένει, η χαμηλότερη τιμή μιας παραμέτρου σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρακολούθησης δίνει την τελική κατάταξη(Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

#### **Χημική κατάσταση**

Σε σχέση με τη χημική κατάσταση, η ΟΠΥ στο άρθρο 2 ορίζει ως καλή χημική επιφανειακών υδάτων τη χημική κατάσταση που απαιτείται για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων για τα επιφανειακά ύδατα, δηλαδή τη χημική κατάσταση επιφανειακού ΥΣ στο οποίο οι συγκεντρώσεις ρύπων δεν υπερβαίνουν τα πρότυπα περιβαλλοντικής ποιότητας όπως ορίζονται στο άρθρο 16 της ΟΠΥ καθώς και σε άλλα συναφή κοινοτικά νομοθετήματα που θεσπίζουν ποιοτικά περιβαλλοντικά πρότυπα και έχουν μεταφερθεί στην ελληνική νομοθεσία με την ΚΥΑ

Η.Π 51354/2641/E103 (B1909/8-12-2010) και επικαιροποιήθηκαν με την ΚΥΑ 170766/16 σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2013/39/ΕΕ για την τροποποίηση των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ και για την υποβοήθηση του προσδιορισμού της χημικής κατάστασης των συστημάτων επιφανειακών υδάτων. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο για την αξιολόγηση της χημικής κατάστασης και όχι της οικολογικής.



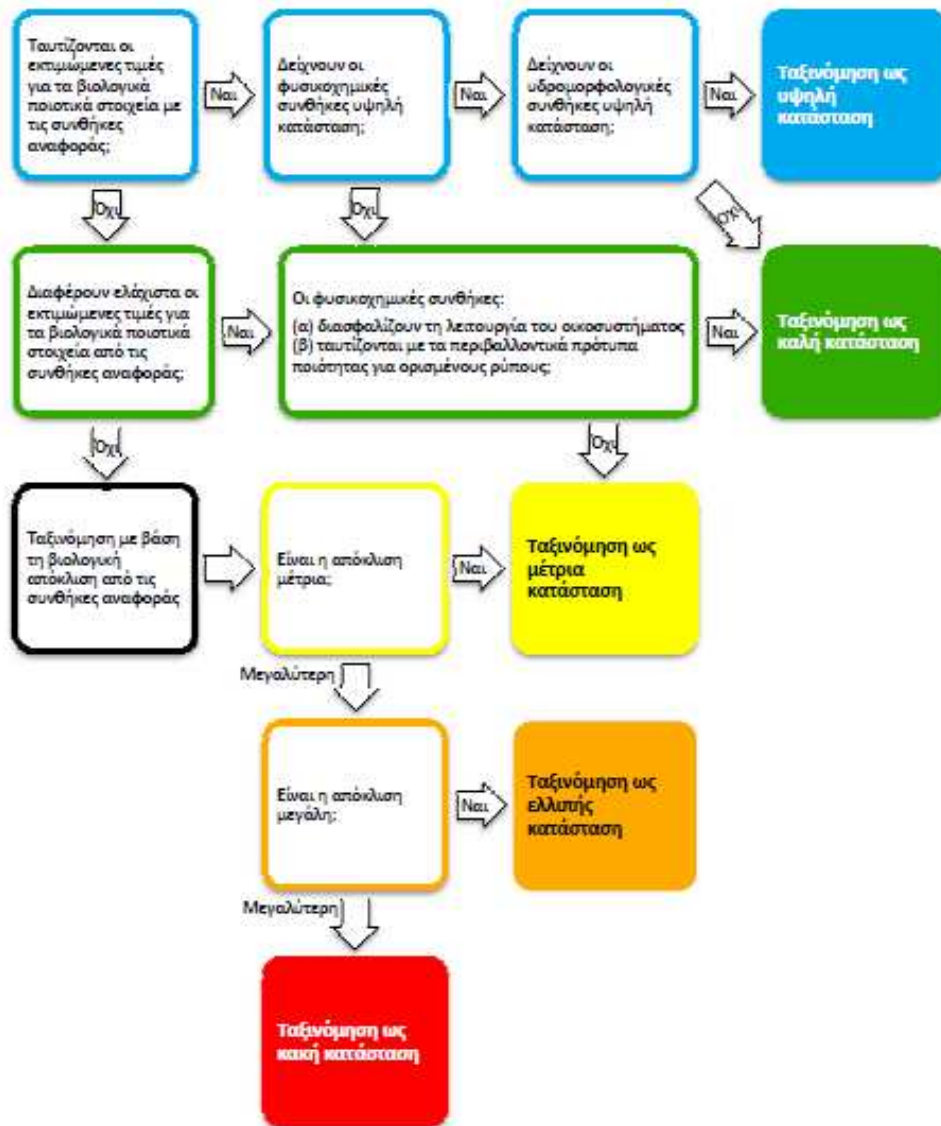
**Σχήμα 3: Κατηγορίες αξιολόγησης χημικής κατάσταση συστημάτων**

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στις χημικές ενώσεις για τις οποίες έχουν οριστεί Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος μέσα από τα ακόλουθα νομικά κείμενα:

- Την Οδηγία 2013/39/ΕΕ σχετικά με ΠΠΠ στον τομέα της πολιτικής των υδάτων και σε σχέση με την τροποποίηση και την κατάργηση των Οδηγιών του Συμβουλίου 82/513/ΕΟΚ, 83/513/ΕΟΚ, 84/156/ΕΟΚ, 84/491/ΕΟΚ και 86/280/ΕΟΚ και την τροποποίηση της ΟΠΥ και της 105/2008/ΕΚ.
- Την ΚΥΑ. 170766/16 σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2013/39/ΕΕ για την τροποποίηση των οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ που τροποποιεί την ΚΥΑ Η.Π 51354/2641/E103 (ΦΕΚ 1909 Β /8-12-2010) και καθορίζονται τα ΠΠΠ ειδικών ρύπων που δεν εμπίπτουν στον κατάλογο των ουσιών προτεραιότητας καθώς και ειδικών ρύπων εθνικού ενδιαφέροντος.

Στην παραπάνω ΚΥΑ καθορίζονται ΠΠΠ για χημικές ενώσεις ή ομάδες χημικών ενώσεων, εκ των οποίων κάποιες αφορούν σε ουσίες προτεραιότητας και άλλους ρύπους που έχουν θεσπιστεί στην ευρωπαϊκή Οδηγία 2013/39/ΕΕ και άλλες ουσίες που αφορούν ειδικούς ρύπους, οι οποίοι είτε έχουν ανιχνευτεί στα υδάτινα σώματα της χώρας είτε αναφέρονται σε παλαιότερες νομοθετικές ρυθμίσεις στο εθνικό δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ουσίες προτεραιότητας χαρακτηρίζουν τη χημική κατάσταση των υδάτων ενώ οι ειδικοί ρύποι χρησιμοποιούνται για την υποβοήθηση του προσδιορισμού της οικολογικής κατάστασης.

Η σχέση μεταξύ των βιολογικών, των υδρομορφολογικών και των φυσικοχημικών συνθηκών απεικονίζεται για όλες τις κατηγορίες υδατικών συστημάτων στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 4: Λογικό Διάγραμμα αξιολόγησης κατάστασης φυσικού υδατικού συστήματος**

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα οι υδρομορφολογικές συνθήκες εξετάζονται μόνο εάν το επιφανειακό ΥΣ πρόκειται να ταξινομηθεί στην υψηλή οικολογική κατάσταση ή στο μέγιστο οικολογικό δυναμικό αν πρόκειται για ΤΥΣ/ΠΤΥΣ. Η ταξινόμηση σε καλή, μέτρια ή ελλιπή/κακή κατάσταση προϋποθέτει την εξέταση μόνο βιολογικών παραμέτρων ή και φυσικοχημικών παραμέτρων. Όταν οι βιολογικές συνθήκες είναι σύμφωνες με εκείνες που απαιτούνται για την



ταξινόμηση σε καλή, μέτρια ή ελλιπή/κακή κατάσταση αντίστοιχα, τότε εξ ορισμού ικανοποιούνται οι υδρομορφολογικές συνθήκες και δεν επηρεάζουν την ταξινόμηση.

Ακόμα για την ταξινόμηση σε υψηλή ή καλή κατάσταση απαιτείται και η εξέταση των φυσικοχημικών παραμέτρων αξιολόγησης, ενώ η ταξινόμηση στη μέτρια ή κακή/ελλιπή κατάσταση μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στην εξέταση βιολογικών παραμέτρων αφού τότε εξ ορισμού και οι φυσικοχημικές παράμετροι θα είναι σύμφωνες με τις προβλεπόμενες τιμές για την κατάσταση αυτή. Οι χημικές συνθήκες θα πρέπει ακόμα να ταυτίζονται με τα ΠΠΠ για ουσίες προτεραιότητας και ορισμένους άλλους ρύπους (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

Αν τα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης τόσο για τις βιολογικές συνθήκες όσο και για τις γενικές φυσικοχημικές παραμέτρους δείχνουν καλή οικολογική κατάσταση, και ταυτόχρονα δεν υπάρχουν υπερβάσεις ορίων για συγκεκριμένους ή εθνικούς ρύπους, τότε η συνολική κατάσταση του ΥΣ αξιολογείται ως καλή. Στην περίπτωση που μια παράμετρος δεν είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, τότε η κατάσταση του ΥΣ αξιολογείται ως μέτρια ή παρακάτω (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

### **Ταξινόμηση των ΙΤΥΣ-ΤΥΣ με βάση την κατάστασή τους**

Η μέχρι σήμερα ανθρώπινη δραστηριότητα έχει μεταβάλει σε ορισμένα υδατικά συστήματα τα αρχικά τους χαρακτηριστικά. Οι αλλαγές αυτές ανεξάρτητα από το βάθος της αλλοίωσης που έχουν επιφέρει και από τους λόγους για τους οποίους έγιναν, καθιστούν τα συστήματα αυτά κατά μία έννοια ιδιαίτερα και εξετάζονται με διαφορετικό τρόπο από την ΟΠΥ. Το ίδιο ισχύει και για τα ΥΣ που κατασκευάστηκαν με ανθρώπινη πρωτοβουλία και ονομάζονται ΤΥΣ. Η διαδικασία χαρακτηρισμού των υδατικών συστημάτων ΙΤΥΣ/ΤΥΣ ακολουθεί τα στάδια του αρχικού και του οριστικού προσδιορισμού.

Ο αρχικός προσδιορισμός των ΙΤΥΣ ή ΤΥΣ υλοποιήθηκε για όλα τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας, βάσει απλών κριτηρίων προσδιορισμού σύμφωνα με το Άρθρο 5 και το Παράρτημα II της ΟΠΥ. Ο αρχικός προσδιορισμός των ΙΤΥΣ/ΤΥΣ πραγματοποιήθηκε από την Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων στο πλαίσιο της μελέτης «Εφαρμογή του άρθρου 5 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ» (2008) και υποβλήθηκε στην ΕΕ. Ο οριστικός προσδιορισμός και η οριοθέτηση των ΙΤΥΣ και των ΤΥΣ έγινε σύμφωνα με το Άρθρο 4 της ΟΠΥ (ΠΔ 51/2007) και το σχετικό κείμενο

κατευθυντήριων γραμμών (Guidance document N.4 on identification and Designation of Heavily Modified and artificial Water Bodies). Για τον οριστικό προσδιορισμό των Ιδιαίτερος τροποποιημένων και των τεχνητών υδατικών συστημάτων εξετάστηκαν οι δυνατότητες που υπάρχουν για την υλοποίηση των κατάλληλων επεμβάσεων στα χαρακτηριστικά των ΥΣ, όπως για παράδειγμα ενέργειες για την αποκατάσταση των αλλοιώσεων, ώστε να επιτευχθεί η καλή οικολογική κατάσταση. Για την αξιολόγηση της αναγκαιότητας, της δυνατότητας υλοποίησης αλλά και των επιπτώσεων από την εφαρμογή των προτεινόμενων επεμβάσεων, διαμορφώθηκαν κριτήρια με βάση τις κοινωνικές και οικονομικές ανάγκες που εξυπηρετούν τα ΙΤΥΣ και ΤΥΣ. Μετά την εξέταση των ΙΤΥΣ και ΤΥΣ βάσει των καθορισμένων κριτηρίων, εφόσον τεκμηριώνεται η δυνατότητα επίτευξης καλής οικολογικής κατάστασης γίνεται ο αποχαρακτηρισμός των ΙΤΥΣ και ΤΥΣ και περιγράφονται οι προτεινόμενες παρεμβάσεις (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

## 2.4 Δείκτες Ποιότητας Νερού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη

Ο έλεγχος της ποιότητας του νερού είναι ένα σημαντικό στοιχείο της παρακολούθησης του περιβάλλοντος. Όταν αυτή κρίνεται φτωγή, επηρεάζεται όχι μόνο η υδρόβια ζωή αλλά και όλο το οικοσύστημα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού αφορούν φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες. Οι φυσικές ιδιότητες της ποιότητας του νερού περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία και τη θολότητα. Τα χημικά χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνουν παραμέτρους όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το αμμωνιακά και φωσφορικά ιόντα κτλ. Οι βιολογικοί δείκτες περιλαμβάνουν την άλγη και το φυτοπλαγκτόν. Στη συνέχεια αναλύονται οι δείκτες που εξετάστηκαν σε αυτήν την εργασία.

### **Χλωροφύλλη-α (*chlorophyll-a* ή *chl-a*)**

Η χλωροφύλλη βρίσκεται στα φυτά, στην άλγη και το φυτοπλαγκτόν. Το πράσινο χρώμα των φυτών οφείλεται στο ότι η χλωροφύλλη ανακλά το πράσινο χρώμα, ενώ απορροφά όλα τα άλλα. Υπάρχουν έξι διαφορετικές μορφές χλωροφύλλης (A, B, C, D, E και F) και η κάθε μία ανακλά ελαφρώς διαφορετικά στα πράσινα μήκη κύματος. Η κύρια μορφή χλωροφύλλης η οποία είναι υπεύθυνη για τη φωτοσύνθεση είναι η χλωροφύλλη-α.

Η χλωροφύλλη-α αποτελεί έναν από της σημαντικότερους ποιοτικούς δείκτες και για αυτό το λόγο οι μετρήσεις της περιλαμβάνονται σχεδόν σε όλα τα προγράμματα παρακολούθησης της τροφικής κατάστασης των υδάτων. Η πρώτη επίδραση του ευτροφισμού των υδάτων είναι η αύξηση του φυτοπλαγκτού, το οποίο συνεπάγεται αύξηση της χλωροφύλλης-α. Οι άμεσες συνέπειες της υπερβολικής αύξησης του φυτοπλαγκτού είναι 1) αλλαγές στη σύνθεση των θαλάσσιων ειδών και της λειτουργίας της τροφικής αλυσίδας, 2) έντονη ιζηματογένεση της οργανικής ύλης, 3) αύξηση στην κατανάλωση του οξυγόνου, με αποτέλεσμα της συνακόλουθες αλλαγές στη δομή της υδρόβιας ζωής ή και το θάνατο της και 4) πιθανή προώθηση επιβλαβών φυκιών, που μπορούν να προκαλέσουν δηλητηρίαση στα ψάρια και στα όστρακα και επομένως στον άνθρωπο.

Οι τάσεις της χλωροφύλλης-α δεν μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα, λόγω των έντονων διακυμάνσεων που παρατηρούνται στις μετρήσεις της. Για αυτό το λόγο οι τάσεις πρέπει να αξιολογούνται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο. Η ευαισθησία του ευτροφισμού στις θαλάσσιες περιοχές της Ευρώπης εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Βάσει του WFD τα επιθυμητά επίπεδα της χλωροφύλλης-α που πρέπει να επιτευχθούν για την «καλή περιβαλλοντική κατάσταση» διαφέρουν ανά περιοχή και επηρεάζονται από το βάθος, την

αλατότητα, το παλιρροιακό καθεστώς κτλ. Οι οριακές τιμές για κάθε περιοχή ορίζονται αναλυτικά στην Ευρωπαϊκή Απόφαση 2008/915/EC.

Η χλωροφύλλη-α αποτελεί φυσικοχημική παράμετρο του νερού και η μέτρηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα επιφανειακά νερά χρησιμοποιείται ως εκτίμηση της βιομάζας αλγών και κυανοβακτηρίων. Μετριέται σε mg/cm<sup>3</sup>. Η συγκέντρωση της chl-a αποτελεί έναν καλό δείκτη περιγραφής της βιοπαραγωγής και μπορεί να σχετίζεται γραμμικά με τη βιομάζα, την ηλικία των κοινοτήτων άλγης, τη τροφοδοσία των κυττάρων σε θρεπτικά συστατικά κτλ. (Thiemann, et al., 2000).

### **Βάθος δίσκου Secchi (Secchi Disk Depth - SDD)**

Ο δίσκος Secchi είναι ένα όργανο μέτρησης της διαύγειας του νερού. Η διαδικασία που ακολουθείται στις μετρήσεις είναι η βύθιση του δίσκου στο νερό και στη συνέχεια η καταγραφή του βάθους που παύει να φαίνεται ο δίσκος. Η ποσότητα του φωτός που φτάνει στα φυτά κάτω από την επιφάνεια του νερού εξαρτάται από την καθαρότητα / διαύγεια του νερού. Αν η ποσότητα αυτή δεν είναι επαρκής, τα φυτά εξασθενούν. Άμεσες συνέπειες αυτού είναι η μείωση στην παραγωγή οξυγόνου και η μείωση της τροφής για πολλά ζώα. Για αυτό το λόγο, είναι σημαντικό να παρακολουθείται η διαύγεια του νερού.

### **Θερμοκρασία (Temperature, T)**

Αποτελεί σημαντική φυσική παράμετρο καθώς επηρεάζει τις φυσικοχημικές, βιοχημικές και βιολογικές διαδικασίες. Οι τιμές και οι διακυμάνσεις της εξαρτώνται από την κλιματική ζώνη, την προέλευση του νερού, την εποχή, την τοποθεσία αναφοράς, το βαθμό της παρόχθιας βλάστησης, τις εισόδους ανθρωπογενών ροών διαφορετικής θερμοκρασίας κλπ. Αύξησή της οδηγεί σε μείωση της ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου DO, αύξηση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου BOD, επιτάχυνση των χημικών αντιδράσεων, αλλαγές στο μεταβολικό ρυθμό και στις άλλες ζωτικές λειτουργίες των υδρόβιων οργανισμών και αύξηση της τοξικότητας πολλών ουσιών. Επιπλέον η θερμοκρασία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη μικροοργανισμών, καθώς η βέλτιστη θερμοκρασία μέσα στην οποία αναπτύσσεται ένας οργανισμός, αλλά και οι μεταβολές της θερμοκρασίας στις οποίες μπορεί να ανταπεξέλθει, καθορίζουν εάν τελικά θα επιβιώσει και τι ρόλο θα παίξει στο παρόν οικοσύστημα. Η πιο επιθυμητή θερμοκρασία του νερού κυμαίνεται στους 4-10 βαθμούς Κελσίου.

Για την εκτίμηση των τιμών της θερμοκρασίας στην παρούσα χρονική περίοδο μεγάλο ρόλο μπορεί να παίζει ο αισθητήρας TIRS (Thermal Infrared Sensor) του Landsat 8.

### A.3 Λίμνες της Ελλάδας

Σύμφωνα με την Οδηγία κάθε τύπος επιφανειακών υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λιμναία, μεταβατικά, παράκτια) διακρίνεται από τους άλλους στη βάση των διαφορετικών τιμών συγκεκριμένων αβιοτικών παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε παράμετρος αντιπροσωπεύει μία διακριτή οικολογική συνθήκη και αποτελεί ένα ιδιαίτερο υπόστρωμα για την ανάπτυξη διαφορετικών βιοκοινοτήτων στα νερά της κάθε κατηγορίας υδάτων. Ο προσδιορισμός των τύπων σε κάθε κατηγορία υδάτινων σωμάτων αναφέρεται ως τυπολογία (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Μακεδονίας - GR011).

Η τυπολογία στα λιμναία ΥΣ στηρίζεται στις παραμέτρους που επηρεάζουν το Βιολογικό Ποιοτικό Στοιχείο (ΒΠΣ) του φυτοπλαγκτού και αυτό επειδή το συγκεκριμένο ΒΠΣ είναι το μόνο για το οποίο υπάρχει σχετική πρόοδος σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο σχετικά με την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης. Στο πλαίσιο αυτό αξιοποιούνται τα πορίσματα στα οποία κατέληξε η σχετική άσκηση διαβαθμονόμησης που διεξήχθη μεταξύ των Κρατών Μελών της Μεσογειακής οικοπεριοχής (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας- GR04).

Η οικολογική εκτίμηση των λιμναίων υδατικών συστημάτων με βάση το φυτοπλαγκτόν απαιτεί την συνθετική αξιολόγηση πολλών παραμέτρων. Στην Ελλάδα όπως και σε άλλες χώρες μια σειρά από παραμέτρους καθιστούν αδύνατη τη χρήση του ως ποιοτικό στοιχείο λόγω του ότι τα διαθέσιμα στοιχεία παρακολούθησης του φυτοπλαγκτού εμφανίζονται ανεπαρκή για να στηρίξουν ικανοποιητικά την οικολογική αξιολόγηση που απαιτείται βάσει της ΟΠΥ. Επιπλέον, παρατηρείται έλλειψη ικανοποιητικής ποσότητας δεδομένων παρακολούθησης που καθιστά αναπόφευκτη την στήριξη της αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης, ενώ και η εύρεση λιμναίων ΥΣ σε αδιατάρακτες συνθήκες (συνθήκες δηλαδή απουσίας πιέσεων ή ελάχιστης ανθρωπογενούς παρέμβασης) για τον καθορισμό συνθηκών αναφοράς παρουσιάζει αντικειμενικές δυσκολίες και μειώνει συνεπώς την αξιοπιστία της μεθόδου καθορισμού των συνθηκών αναφοράς (την επιλογή δηλαδή σταθμών αναφοράς) (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής - GR06).

Στο πλαίσιο αυτό αξιοποιούνται τα πορίσματα στα οποία κατέληξε η σχετική άσκηση διαβαθμονόμησης που διεξήχθη μεταξύ των Κρατών Μελών της Μεσογειακής οικοπεριοχής (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας - GR04).

### 3.1 Τεχνητές Λίμνες (Ταμιευτήρες)

Σύμφωνα με το έγγραφο ΕΚΒΥ "Identification of Types Lakes, Preliminary Classification" και την Απόφαση της ΕΕ 2008/915/ΕΚ, όσον αφορά τις τεχνητές λίμνες, η τυπολογία τους βασίζεται στα αποτελέσματα της μεσογειακής γεωγραφικής ομάδας διαβαθμονόμησης (MED-GIG) με βάση το φυτοπλαγκτόν. Η MED-GIG συλλέγει τα διαθέσιμα δεδομένα παρακολούθησης από όλες τις μεσογειακές χώρες ώστε η αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των λιμνών των χωρών της μεσογειακής περιοχής να γίνει σε κοινούς τύπους λιμναίων ΥΣ (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09 και Κεντρικής Μακεδονίας - GR10).

Τα διαθέσιμα έως σήμερα δεδομένα της μεσογειακής γεωγραφικής ομάδας διαβαθμονόμησης δεν είναι επαρκή για την ταξινόμηση των φυσικών λιμνών (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου - GR01).

Η άσκηση διαβαθμονόμησης για το φυτοπλαγκτόν έλαβε χώρα αποκλειστικά σε Μεσογειακούς ταμιευτήρες οι οποίοι όπως προαναφέρθηκε αποτελούν ιδιαίτερος τροποποιημένα ΥΣ. Η διαδικασία, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της MED-GIG, αναγνώρισε 3 τύπους λιμναίων ΙΤΥΣ στη Μεσογειακή οικοπεριοχή (L-M5/7W , L-M5/7A και L-M8) που αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα. Ο τύπος L-MX προστέθηκε στη συνέχεια για να καλύψει ταμιευτήρες όπως η Κερκίνη και η Κάρλα (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09 και Κεντρικής Μακεδονίας GR10).

**Πίνακας 1: Τύποι Ταμιευτήρων [Πηγή: Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09]**

Παράγοντες	Τύπος			
	L-M5/7W (wet)	L-M5/7A(arid)	L-M8	L-MX
<b>Βάθος</b>	>15m	>15m	>15m	<15m
<b>Μέγεθος</b>	>0,5 km <sup>2</sup>	>0,5 km <sup>2</sup>	>0,5 km <sup>2</sup>	>0,5 km <sup>2</sup>
<b>Γεωλογία</b>	Πυριτικές	Πυριτικές	Ασβεστολιθικές	-
<b>Μέγεθος Λεκάνης</b>	<20.000km <sup>2</sup>	<20.000km <sup>2</sup>	<20.000km <sup>2</sup>	<20.000km <sup>2</sup>
<b>Υψόμετρο</b>	0-800m	0-800m	0-800m	0-800m
<b>Μέση ετήσια βροχόπτωση</b>	>800mm ή	<800mm και	-	-
<b>Μέση ετήσια θερμοκρασία</b>	>15°C	<15°C	-	-
<b>Αλκαλικότητα</b>	<1meq/l	<1meq/l	>1meq/l	-

Ενδεικτικό σημείο της δυσκολίας που παρουσιάζει ο καθορισμός του τύπου ενός λιμναίου οικοσυστήματος είναι η διαφοροποίηση του χαρακτηρισμού της λίμνης Κάρλας, η οποία κατά το Διαχειριστικό Σχέδιο της Θεσσαλίας ταξινομείται ως τύπου L-M5/7A.

Στο Διαχειριστικό Σχέδιο της Θεσσαλίας μεταξύ άλλων σημειώνεται:

«Ειδικά σε ότι αφορά στην αναδημιουργηθείσα λίμνη Κάρλα σημειώνεται ωστόσο ότι αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση, τόσο σε ότι αφορά την υδρολογία, όσο και την οικολογία και βιολογία της. Είναι εμφανές ότι η νέα λίμνη Κάρλα αν και με βάση τις τυπολογικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τους ταμιευτήρες της μεσογειακής οικοπεριοχής κατατάσσεται στον τύπο L-M5/7A, εντούτοις αποτελεί ειδική περίπτωση η οποία δεν μπορεί να ομαδοποιηθεί προς το παρόν τουλάχιστον με άλλες λίμνες ή ταμιευτήρες. Για τον λόγο αυτό δεν είναι δυνατόν να αναφερθούν συνθήκες αναφοράς για την ειδική αυτή περίπτωση καθώς δεν είναι δυνατόν να προσεγγιστούν οι συνθήκες απουσίας ανθρωπογενών πιέσεων που θα μπορούσαν να υφίστανται σε ένα ταμιευτήρα όπως η Κάρλα σε πλήρη λειτουργία.» (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας- GR08).

Από τους παραπάνω τύπους λιμναίων ΥΣ, για τον τύπο L-M5/7A δεν κατέστη δυνατή η περιγραφή συνθηκών αναφοράς και η εξαγωγή ορίων ταξινόμησης του οικολογικού δυναμικού λόγω έλλειψης δεδομένων. Για τους άλλους τύπους οι τιμές αναφοράς παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.



**Πίνακας 2: Τιμές εκτιμητών φυτοπλαγκτού σε συνθήκες αναφοράς για τον τύπο «Ταμειυτήρες, βαθιές, μεγάλες, πυριτικές, σε «υγρές» περιοχές, με λεκάνες απορροής < 20.000 km<sup>2</sup>»**

Εκτιμητής	L-M5/7W	L-M8
	Τιμή Αναφοράς	Τιμή Αναφοράς
% συμμετοχή κυανοβακτηρίων στον φυτοπλαγκτονικό βιοόγκο	0	0
Καταλανικός δείκτης (Catalan Index)	0,1	0,61
Δείκτης Med PTI	3,08	3,09
Συγκέντρωση χλωροφύλλης α (μg l <sup>-1</sup> )	1,4 (1,4 – 2,0)	1,8
Συνολικός Βιοόγκος (mm <sup>3</sup> l <sup>-1</sup> )	0,36	0,76

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα προήλθαν από την αξιολόγηση δειγμάτων ενός μόνο έτους. Με σκοπό την συνεκτίμηση της διαχρονικής διαφοροποίησης καθορίστηκαν όρια διακύμανσης για τον εκτιμητή χλωροφύλλη α. Για τους υπόλοιπους ωστόσο εκτιμητές δεν κατέστη δυνατό να γίνει αντίστοιχος υπολογισμός λόγω ελλείψεων ικανοποιητικού μεγέθους χρονοσειρών διαθέσιμων δεδομένων (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας- GR08) .

Οι παραπάνω τιμές αποτέλεσαν την βάση υπολογισμού των ορίων ταξινόμησης του οικολογικού δυναμικού μεταξύ καλής και μέτριας κατάστασης που αποτυπώθηκαν στην Απόφαση 2009/915 της ΕΕ ως τιμές παραμέτρων και λόγοι οικολογικής ποιότητας (EQR). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 3: Όρια μεταξύ καλού και μέτριου οικολογικού δυναμικού για τους τύπους L-M5/7W και L-M8 που καθορίζονται στην Απόφαση 2009/915 της ΕΕ**

Εκτιμητής	Τύπος L-M5/7W		Τύπος L-M8	
	Λόγοι οικολογικής ποιότητας (EQR)	Τιμή ορίου εκτιμητή	Λόγοι οικολογικής ποιότητας (EQR)	Τιμή ορίου εκτιμητή
Χλωροφύλλη α (μg/l)	0,21	6,7-9,5	0,43	4,2-6
Συνολικός βιοόγκος (mm3/l)	0,19	1,9	0,36	2,1
Ποσοστό κυανοβακτηρίων	0,91	9,2	0,72	28,5
Καταλανικός δείκτης	0,97	10,6	0,98	7,7
Δείκτης Med PTI	0,75	2,32	0,77	2,38

Οι λόγοι οικολογικής ποιότητας για τους εκτιμητές Χλωροφύλλη α, συνολικός βιοόγκος και δείκτης MED-PTI υπολογίζονται ως  $EQR = \text{τιμή ορίου} / \text{τιμή αναφοράς}$ , για τον εκτιμητή Ποσοστό κυανοβακτηρίων ως  $EQR = (100 - \text{τιμή ορίου}) / (100 - \text{τιμή αναφοράς})$  ενώ για τον Καταλανικό δείκτη ως  $EQR = (400 - \text{τιμή ορίου}) / (400 - \text{τιμή αναφοράς})$  (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας- GR08) .

Για την ταξινόμηση των ταμιευτήρων ως προς τη φυσικοχημική τους κατάσταση στο πλαίσιο της ενιαίας αντιμετώπισης σε εθνικό επίπεδο, ακολουθούνται τα όρια που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09).

**Πίνακας 4: Όρια φυσικοχημικών παραμέτρων για την ταξινόμηση ταμιευτήρων.**

Παράμετρος	Όριο μεταξύ καλής/μέτριας κατάστασης
Διαλυμένο Οξυγόνο	$> 4 \text{ mg/l}$ στο υπολίμνιο <sup>[1]</sup>
Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου pH	6-9 <sup>[2]</sup>
Δίσκος Secchi	$> 2.5 \text{ m}$ <sup>[1]</sup>
Ολικός φώσφορος	$< 30 \text{ μg/l P}$ <sup>[2]</sup>
Ολικό άζωτο	$< 1 \text{ m/l N}$ <sup>[2]</sup>
Αμμώνιο	$< 0,5 \text{ mg/l NH}_4^+$ <sup>[2]</sup>

<b>Νιτρώδη</b>		< 0,05 mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> [2]
<b>Χλωροφύλλη – α</b>	τύπος L-M5 [3]	< 9.5 mg/l [1]
	τύπος L-M8 [3]	< 6 mg/l [1]

Σημειώσεις: [1] Μέση Θερινή, [2] Μέση ετήσια τιμή, [3] Απόφαση 915/2008/ΕΚ

### 3.2 Φυσικές Λίμνες

Όσον αφορά της φυσικές λίμνες η τυπολογία τους βασίστηκε στη μελέτη «Καθορισμός συνθηκών αναφοράς σε λίμνες για φυτοπλαγκτόν – επιστημονική ανασκόπηση σχεδιασμού παρακολούθησης λιμνών & ταξινόμηση με βάση το φυτοπλαγκτόν της οικολογικής κατάστασης των λιμνών» (Μουστάκα Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010).

Στο έργο αυτό αναφέρονται λίμνες με κοινά χαρακτηριστικά που μπορεί να θεωρηθεί ότι ομαδοποιούνται σε τύπους χωρίς ωστόσο οι τύποι αυτοί να μπορούν να θεωρηθούν απόλυτοι ή τελικοί. Οι ομαδοποιήσεις αυτές συνοψίζονται στη συνέχεια:

Τύπος Α: χαμηλού υψομέτρου, μεγάλης επιφάνειας, μεσαίου βάθους >6 m και <15, θερμού μονομεικτικού τύπου, ημίξηρης περιοχής, μικρής πτώσης της στάθμης νερού (<1 m) και μικρής μεταβλητότητας του χρόνου παραμονής του νερού, με φυσική απορροή.

Τύπος Β: μεσαίου - μεγάλου υψομέτρου, μεγάλης επιφάνειας, μέσου βάθους >3 m και <6 m, πολυμεικτικού τύπου, υγρής περιοχής, μικρής πτώσης της στάθμης νερού ετησίως (<1 m) και απότομης μεταβλητότητας του χρόνου παραμονής του νερού, με τεχνητή απορροή ελεγχόμενη ανθρωπογενώς

Τύπος Γ: χαμηλού υψομέτρου, μεγάλης επιφάνειας, μέσου βάθους >3 m και <6 m, πολυμεικτικού τύπου, ημίξηρης περιοχής, μεγάλου χρόνου παραμονής του νερού με χαμηλή μεταβλητότητα

Τύπος Δ: μέτριου-μεγάλου υψομέτρου, μεγάλης επιφάνειας, μεγάλου βάθους >15 m, θερμού μονομεικτικού τύπου, σχετικά υγρής περιοχής

Οι παραπάνω πληροφορίες συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Πελοποννήσου - GR03).

**Πίνακας 5: Τύποι και χαρακτηριστικά φυσικών λιμνών [Μουστάκα Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010]**

Χαρακτηριστικά	Τύπος Α	Τύπος Β	Τύπος Γ	Τύπος Δ
<b>Υψόμετρο</b>	Χαμηλό	Μεσαίο-Μεγάλο	Χαμηλό	Μέτριο-Μεγάλο
<b>Επιφάνεια</b>	Μεγάλη	Μεγάλη	Μεγάλη	Μεγάλη
<b>Βάθος</b>	Μεσαίο 6m<B<15m	Μέσο 3m<B<6m	Μέσο 3m<B<6m	Μεγάλο B>15m
<b>Τύπος</b>	Θερμός Μονομεικτικός	Πολυμεικτικός	Πολυμεικτικός	Θερμός Μονομεικτικός
<b>Περιοχή</b>	Ημίξηρη	Υγρή	Ημίξηρη	Σχετικά Υγρή
<b>Πτώση στάθμης νερού ετησίως</b>	Μικρή (<1m)	Μικρή (1m)	-	-
<b>Μεταβλητότητα χρόνου παραμονής νερού</b>	Μικρή	Απότομη	Χαμηλή με μεγάλο χρόνο παραμονής	-
<b>Απορροή</b>	Φυσική	Τεχνητή, ελεγχόμενη ανθρωπογενώς	-	-

Σύμφωνα με την τυπολογία που ακολουθήθηκε κατά την υποβολή στοιχείων του Άρθρου 5 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ και το έγγραφο του ΕΚΒΥ "Identification of Types Lakes. Preliminary Classification", για τις φυσικές λίμνες αναγνωρίστηκαν 9 τύποι φυσικών λιμνών σε ολόκληρη τη χώρα:

- A) Φυσικές λίμνες, Μεγάλου μεγέθους, βαθιές, θερμού μονομεικτικού τύπου, σε χαμηλό υψόμετρο, σε ημίξηρες περιοχές. Η λίμνη Υλίκη και η λίμνη Βόλβη εμπίπτουν στον τύπο αυτό.
- B) Φυσικές πολυμεικτικές λίμνες, μεσαίου βάθους, μεσαίου – υψηλού υψομέτρου, σε υγρές περιοχές. Οι λίμνες Μικρή Πρέσπα, Καστοριάς και Παμβώτιδα εμπίπτουν σε αυτόν τον τύπο.
- C) Φυσικές λίμνες, μεγάλου μεγέθους, βαθιές μονομεικτικές σε υγρές περιοχές. Οι λίμνες Τριγωνίδα, Βεγορίτιδα, Μεγάλη Πρέσπα και Αμβρακία εμπίπτουν σε αυτόν τον τύπο.
- D) Φυσικές λίμνες, ρηχές, μονομεικτικές – πολυμεικτικές σε ξηρές περιοχές. Οι λίμνες Δοϊράνη, Κορώνεια και Παραλίμνη εντάσσονται σε αυτόν τον τύπο.
- E) Φυσικές λίμνες, ρηχές, μονομεικτικές, σε υγρές περιοχές. Οι λίμνες Λυσιμαχεία και Οζερός εντάσσονται σε αυτόν τον τύπο.
- F) Πολύ ρηχές φυσικές λίμνες, σε ποικίλες κλιματικές συνθήκες, Οι λίμνες Στυμφαλία, Ισμαρίδα, Δυστός, Χειμαδίτιδα, Ζάζαρη, και Πετρών εντάσσονται σε αυτό τον τύπο.
- G) Φυσικές πολύ ρηχές λίμνες, με υφάλμυρα νερά, σε υγρές περιοχές. Οι λίμνες Βουλκαριά και Σαλτίνη εμπίπτουν σε αυτόν τον τύπο.

Η) Στον τύπο αυτόν εμπίπτει η λίμνη Κερκίνη η οποία αποτελεί έναν ρηχό ταμιευτήρα που ωστόσο ομοιάζει των φυσικών λιμνών. Η κύρια διαφορά είναι ο χρόνος παραμονής των νερών ο οποίος είναι μικρότερος των φυσικών λιμνών.

Η λίμνη Πικρολίμνη αποτελεί ειδική περίπτωση χάρη στην μεγάλη περιεκτικότητά της σε Θείο και την υψηλή της αλατότητα. Βρίσκεται σε ξηρή περιοχή.

Οι παραπάνω πληροφορίες συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09):

**Πίνακας 6: Τύποι και χαρακτηριστικά φυσικών λιμνών [ΟΠΥ, ΕΚΒΥ]**

Τύπος	Περιγραφή	Παράγοντες				
		Βάθος	Μέγεθος	Στρωμάτωση[1]	Κλιματικές συνθήκες	Υψόμετρο
<b>A</b>	Μεγάλες, βαθιές λίμνες μονομεικτικού τύπου, σε ημίξηρες περιοχές με χαμηλό υψόμετρο	>15m	Μεγάλη	M	Ημίξηρο	Χαμηλό
<b>B</b>	Λίμνες μεσαίου βάθους, πολυμεικτικές σε υγρές περιοχές μέσου-υψηλού υψομέτρου	>6m και ≤15m		Π	Υγρό	Μέσο - Υψηλό
<b>C</b>	Μεγάλες, βαθιές λίμνες μονομεικτικού τύπου σε υγρές περιοχές	>15m	Μεγάλη	M	Υγρό	
<b>D</b>	Ρηχές λίμνες μονομεικτικού-πολυμεικτικού τύπου σε ξερές-ημίξηρες περιοχές	≤6m και >3m		M-Π	Ξηρό-Ημίξηρο	
<b>E</b>	Λίμνες μεσαίου βάθους, μονομεικτικές σε υγρές περιοχές	>6m και ≤15m		M	Υγρό	
<b>F</b>	Πολύ ρηχές λίμνες σε διάφορες κλιματικές συνθήκες	≤3m			Διάφορα	

<b>G</b>	Πολύ ρηχές λίμνες σε υγρές περιοχές με υφάλμυρα νερά	≤3m					Υγρό
<b>I</b>	Ειδική κατηγορία για την Πικρολίμνη λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε Θείο						

Σημείωση [1]: Μ-Μονομεικτικού τύπου, Π-Πολυμεικτικού τύπου

Παρότι καλύπτουν την μεγάλη πλειοψηφία των φυσικών λιμνών της χώρας οι τύποι (Α έως Γ) αυτοί δεν προκύπτουν από δεδομένα παρακολούθησης δηλαδή η διάκρισή τους δεν προκύπτει από διαφορές στα βιοτικά χαρακτηριστικά και άρα οι τύποι αυτοί δεν υποστηρίζονται από τυποχαρακτηριστικές συνθήκες για κανένα Βιολογικό Ποιοτικό Στοιχείο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λόγω ελλείψεων σε δεδομένα παρακολούθησης φυτοπλαγκτού ή άλλων Βιολογικών Ποιοτικών Στοιχείων η τυπολογία των φυσικών λιμνών τόσο σε εθνικό όσο και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο στην παρούσα φάση αποτελεί ακόμη «ανοιχτό θέμα». Παρόλα αυτά, για την κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης κρίθηκε σκόπιμο να ακολουθηθεί η τυπολογία που είναι δυνατόν να υποστηριχθεί από τυποχαρακτηριστικές συνθήκες ακόμη και αν αυτές στηρίζονται μόνο στο ΒΠΣ του φυτοπλαγκτού και δεν καλύπτουν όλα τα λιμναία υδάτινα σώματα της χώρας (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου - GR05) .

Έτσι ακολουθήθηκε το παραπάνω σύστημα τύπων Α έως Δ όπως αναφέρονται στο έργο «Καθορισμός συνθηκών αναφοράς σε λίμνες για φυτοπλαγκτόν – επιστημονική ανασκόπηση σχεδιασμού παρακολούθησης λιμνών & ταξινόμηση με βάση το φυτοπλαγκτόν της οικολογικής κατάστασης των λιμνών» (Μουστάκα Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010). Όσες λίμνες δεν περιλαμβάνονται στο έργο αυτό χαρακτηρίστηκαν ως «μη κατατάξιμες» (Unclassified).

Σύμφωνα με το προαναφερθέν έργο οι φυσικές λίμνες της Ελλάδας που εμπίπτουν σε καθένα από τους Τύπους Α έως Δ αναφέρονται στον ακόλουθο Πίνακα:

**Πίνακας 7: Φυσικές λίμνες που κατατάσσονται σε κάθε ένα από τους τύπους λιμναίων ΥΣ που καθορίστηκαν στο έργο «Καθορισμός συνθηκών αναφοράς σε λίμνες για φυτοπλαγκτό - επιστημονική ανασκόπηση σχεδιασμού παρακολούθησης λιμνών & ταξινόμηση με βάση το φυτοπλαγκτόν της οικολογικής κατάστασης των λιμνών»**

**(Μουστακά Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010)**

<b>Τύπος</b>	<b>Φυσικές λίμνες που εμπίπτουν σε κάθε τύπο</b>
Τύπος Α	Υλίκη, Βόλβη,
Τύπος Β	Καστοριά, Παμβώτις, Μικρή Πρέσπα
Τύπος Γ	Χειμαδίτιδα, Δοϊράνη, Ζάζαρη, Κορώνεια
Τύπος Δ	Βεγορίτιδα, Μεγάλη Πρέσπα, Τριχωνίδα

Η αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των φυσικών λιμνών στην Ελλάδα έγινε στο πλαίσιο του έργου που προαναφέρθηκε και οι συνθήκες αναφοράς που αναφέρονται για κάθε έναν από τους παραπάνω τύπους λιμνών αφορούν τιμές βιοόγκου, χλωροφύλλης-α και του δείκτη Q (Assemblage Index). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές των παραμέτρων αυτών (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου - GR05) :

**Πίνακας 8: Συνθήκες αναφοράς για το φυτοπλαγκτόν στους τύπους φυσικών λιμνών που καθορίστηκαν στο πλαίσιο του έργου «Καθορισμός συνθηκών αναφοράς σε λίμνες για φυτοπλαγκτό - επιστημονική ανασκόπηση σχεδιασμού παρακολούθησης λιμνών & ταξινόμηση με βάση το φυτοπλαγκτόν της οικολογικής κατάστασης των λιμνών» (Μουστακά Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010)**

<b>Παράμετρος</b>	<b>Τύπος Α</b>	<b>Τύπος Β</b>	<b>Τύπος Γ</b>	<b>Τύπος Δ</b>
Βιοόγκος φυτοπλαγκτού (mm <sup>3</sup> /L)	1,1	1,1	1,34	0,8
Συμμετοχή των κυανοβακτηρίων στο βιοόγκο (%)	10	12	30	8
Δείκτης Q	4,1-5	4,1-5	4,1-5	4,1-5

Για την ταξινόμηση των φυσικών λιμνών ως προς τη φυσικοχημική τους κατάσταση στο πλαίσιο της ενιαίας αντιμετώπισης σε εθνικό επίπεδο, ακολουθούνται τα όρια που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09).

Πίνακας 9: Όρια φυσικοχημικών παραμέτρων για την ταξινόμηση φυσικών λιμναίων συστημάτων.

Παράμετρος	Όριο μεταξύ καλής/μέτριας κατάστασης
Διαλυμένο Οξυγόνο	> 4 mg/l στο υπολίμνιο <sup>[1]</sup>
Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου pH	6-9 <sup>[2]</sup>
Δίσκος Secchi	>2.5 m <sup>[1]</sup>
Ολικός φώσφορος	< 30 μg/l P <sup>[2]</sup>
Ολικό άζωτο	< 1 mg/l N <sup>[2]</sup>
Αμμώνιο	< 0,5 mg/l NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sup>[2]</sup>
Νιτρώδη	< 0,05 mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> <sup>[2]</sup>
Χλωροφύλλη - α	< 10 mg/l <sup>[1]</sup>

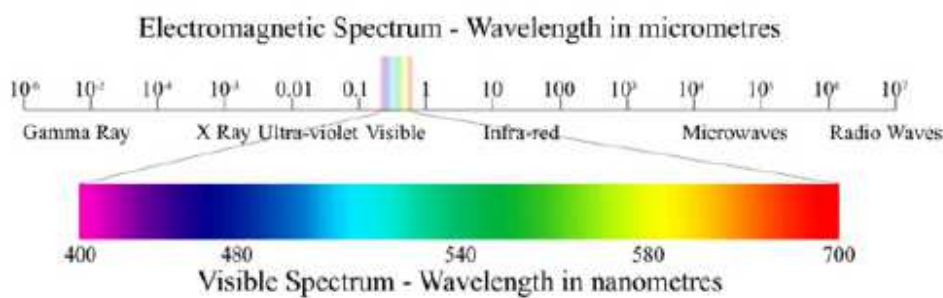
Σημειώσεις: [1] Μέση Θερινή, [2] Μέση ετήσια τιμή



## A.4 Μέθοδοι Παρατήρησης Γης και Τηλεπισκόπηση

### A.4.1 Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση

Η Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση μπορεί να οριστεί ως η επιστήμη με την οποία η πληροφορία για τα αντικείμενα αποκτάται εξ αποστάσεως με χρήση αισθητήρων, οι οποίοι συνήθως είναι τοποθετημένοι σε αεροσκάφη ή δορυφόρους. Οι απομακρυσμένοι αισθητήρες συλλέγουν τα δεδομένα ανιχνεύοντας το ποσοστό της ενέργειας που ανακλάται από τη Γη και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα.



Εικόνα 1: Το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

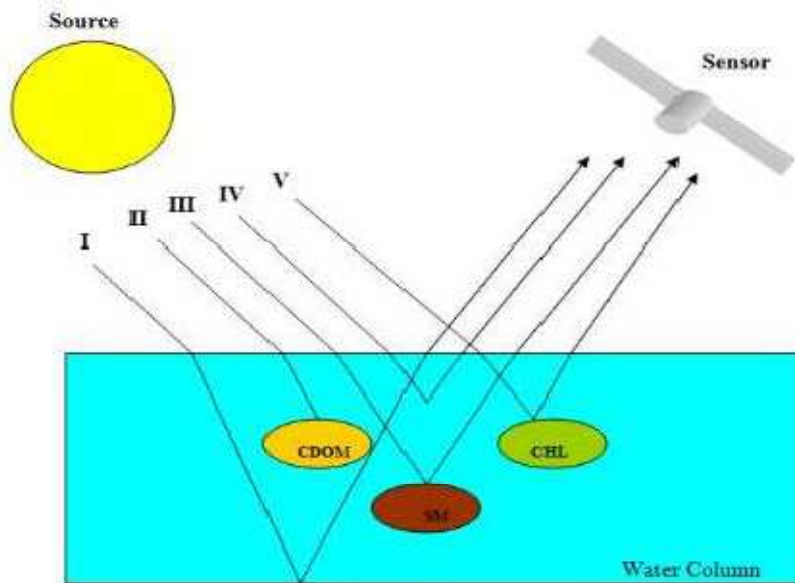
Η Τηλεπισκόπηση εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι κάθε αντικείμενο παρατήρησης που βρίσκεται πάνω στη Γη ανακλά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συγκεκριμένο τρόπο στα διαφορετικά μήκη κύματος. Αυτή η ιδιαιτερότητα εκφράζεται για κάθε αντικείμενο με τη φασματική υπογραφή του.

Οι αισθητήρες ή δέκτες μπορεί να είναι είτε ενεργητικοί, είτε παθητικοί. Οι ενεργητικοί δέκτες καταγράφουν την ενέργεια που ανακλάται από την επιφάνεια της Γης, η οποία έχει φυσική προέλευση, για παράδειγμα τον Ήλιο. Οι παθητικοί δέκτες εκπέμπουν την ενέργεια και στη συνέχεια την καταγράφουν. Παραδείγματα παθητικών δεκτών είναι τα συστήματα Radar και Laser.

Οι εφαρμογές της Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης στον τομέα του Περιβάλλοντος είναι αρκετά διευρυμένες. Μερικά παραδείγματα είναι η παρακολούθηση και η χαρτογράφηση συγκεκριμένων συστατικών στα ύδατα, η μέτρηση της θερμοκρασίας των υδάτων, η μέτρηση του ύψους κύματος σε ωκεανούς, ο εντοπισμός φυσικών καταστροφών, όπως π.χ. πλημμυρών, η χαρτογράφηση χρήσεων γης, υγρατόπων κτλ.

#### A.4.2 Διάδοση Ακτινοβολίας στο Νερό

Στην Εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας από την πηγή φωτός έως τον δέκτη. Όπως φαίνεται, εντός της υδάτινης στήλης υπάρχουν πέντε παράγοντες που διαμεσολαβούν και την επηρεάζουν. Αυτοί είναι ο πυθμένας, η έγχρωμη διαλυμένη οργανική ύλη, η αιωρούμενη ύλη, το φυτοπλαγκτόν και φυσικά το νερό, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναλύονται παρακάτω (Gerace, 2010).



Εικόνα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολία που καταγράφεται από τον αισθητήρα.  
[Πηγή: Gerace, 2010]

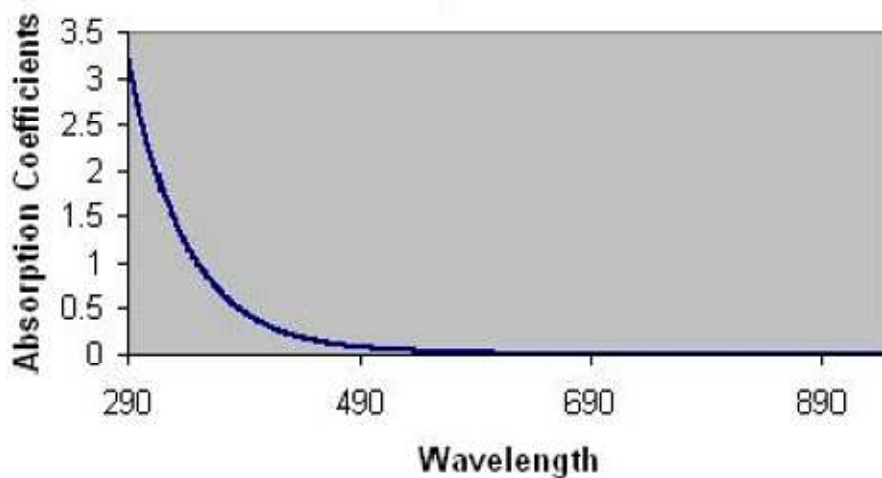
Ο βαθμός που θα επηρεάσει ο **πυθμένας** το χρώμα του νερού εξαρτάται από το βάθος της υδάτινης στήλης, τη φύση του πυθμένα και τη διαύγεια του νερού. Στα παράκτια νερά το βάθος είναι αρκετά μεγάλο, με αποτέλεσμα η συμβολή του να είναι αμελητέα.

Η **έγχρωμη διαλυμένη οργανική ύλη** (*Colored Dissolved Organic Matter - CDOM*) είναι το οπτικά μετρήσιμο μέρος της διαλυμένης οργανικής ύλης και προέρχεται από την αποδόμηση του φυτοπλαγκτού ή από εδάφη πλούσια σε οργανική ύλη. Είναι γνωστή επίσης ως *yellow substance* ή *gelbstoff*. Απορροφά πιο ισχυρά την ακτινοβολία στα μικρά μήκη κύματος και, συγκεκριμένα, από την υπεριώδη έως τη μπλε ζώνη (Σχήμα 5). Για αυτό το λόγο τα μη θολά νερά με χαμηλή ή καθόλου περιεκτικότητα σε CDOM εμφανίζονται μπλε. Καθώς η περιεκτικότητα αυξάνεται το χρώμα του νερού κυμαίνεται από πράσινο προς καφέ, λόγω και της απορρόφησης του κόκκινου από το νερό.

Τα **ανόργανα αιωρούμενα συστατικά** (*Inorganic Suspended Solids*) διαχέουν και απορροφούν το φως. Ο τρόπος και ο βαθμός επιρροής τους εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος της ύλης, π.χ. άμμος, χώμα.

Το **φυτοπλαγκτόν** αποτελείται από μικροοργανισμούς, οι οποίοι παρασύρονται από το νερό. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι φωτοσυνθετικοί και για αυτό το λόγο συναντώνται στα φωτεινά άνω στρώματα του νερού και επηρεάζουν πολύ τις οπτικές του ιδιότητες. Υπάρχουν χιλιάδες είδη φυτοπλαγκτού, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, την άλγη και τα κυανοβακτήρια. Το κοινό στοιχείο όλων είναι ότι περιέχουν τουλάχιστον μία μορφή χλωροφύλλης, ωστόσο η κύρια μορφή είναι αυτή της χλωροφύλλης-α. Για αυτό το λόγο πολλές φορές αναζητείται η χλωροφύλλη-α προκειμένου να εκτιμηθούν τα επίπεδα του φυτοπλαγκτού.

Το **καθαρό νερό** απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία ενώ ανακλά την υπεριώδη. Η παρουσία των διαλυμένων αλάτων στα θαλασσινό νερό δεν πρέπει να συγχέεται με την καθαρότητα (Gerace, 2010).



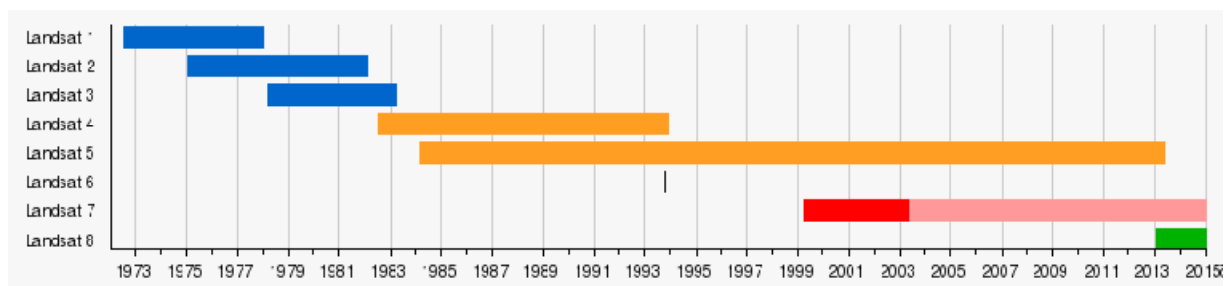
Σχήμα 5: Συντελεστής απορρόφησης της CDOM για εύρος μήκους κύματος 290-890 nm ( $\alpha$ CDOM). Οι τιμές είναι κανονικοποιημένες ώστε για μήκος κύματος 350 nm, CDOM= 1. [Πηγή: Gerace, 2010]

### A.4.3 Πρόγραμμα Landsat

Το πρόγραμμα Landsat αποτελεί τη μακροβιότερη επιχείρηση για την απόκτηση δορυφορικών εικόνων της γήινης επιφάνειας. Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν αποκτηθεί εκατομμύρια εικόνες, οι οποίες αποτελούν μοναδική πηγή δεδομένων για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορα επιστημονικά πεδία, όπως της γεωλογίας, της γεωργίας, της χαρτογραφίας κτλ.

Οι δορυφόροι του προγράμματος ανήκουν στη Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (*United States Geological Survey - USGS*), ενώ ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη των οργάνων που φέρουν αναλαμβάνονται από τη NASA.

Οι δορυφόροι που συνθέτουν μέχρι σήμερα το πρόγραμμα Landsat είναι οι Landsat-1 (1972-1978), Landsat-2 (1975-1982), Landsat-3 (1978-1983), Landsat-4 (1982-1993), Landsat-5 (1984-2013) και Landsat-6 (1993, αποτυχία εκτόξευσης) και οι εν ενεργεία Landsat-7 (1999) και Landsat-8 (2013). Έχουν αρχίσει ήδη οι προετοιμασίες για τον Landsat 9 που αναμένεται να εκτοξευθεί το 2023. Στην παρούσα διπλωματική τα πολυφασματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από το δορυφόρο Landsat 8 οπότε το πρόγραμμα του θα αναλυθεί εκτενέστερα.



Εικόνα 3: Η χρονική διάρκεια των δορυφόρων Landsat [Πηγή :[wikipedia.org/wiki/Landsat\\_program](http://wikipedia.org/wiki/Landsat_program)]

#### A.4.3.1 Δορυφόρος Landsat 8

Ο δορυφόρος Landsat-8 εκτοξεύτηκε τον Φεβρουάριο του 2013, ακολουθεί ηλιοσύγχρονη τροχιά, έχει υψόμετρο 705 km πάνω από τον ισημερινό και καλύπτει τη γήινη επιφάνεια σε περίοδο 16 ημερών. Οι λήψεις των εικόνων πραγματοποιούνται σε σταθερή χρονική διαφορά με τον Landsat-7, ίση με 8 ημέρες, ώστε κάθε τμήμα της γήινης επιφάνειας να καλύπτεται σε συχνότερη βάση. Η κάθε λήψη καλύπτει περιοχή 170 km από Βορρά προς Νότο και 183 km από Ανατολή προς Δύση. Τα δεδομένα που καταγράφονται αναφέρονται στο σύστημα *World*

*Reference System-2 (WRS-2)*, το οποίο βασίζεται σε συντεταγμένες *path/row* (το *path* δηλώνει την τροχιά από Βορρά προς Νότο, ενώ το *row* την τροχιά από Ανατολή προς Δύση).

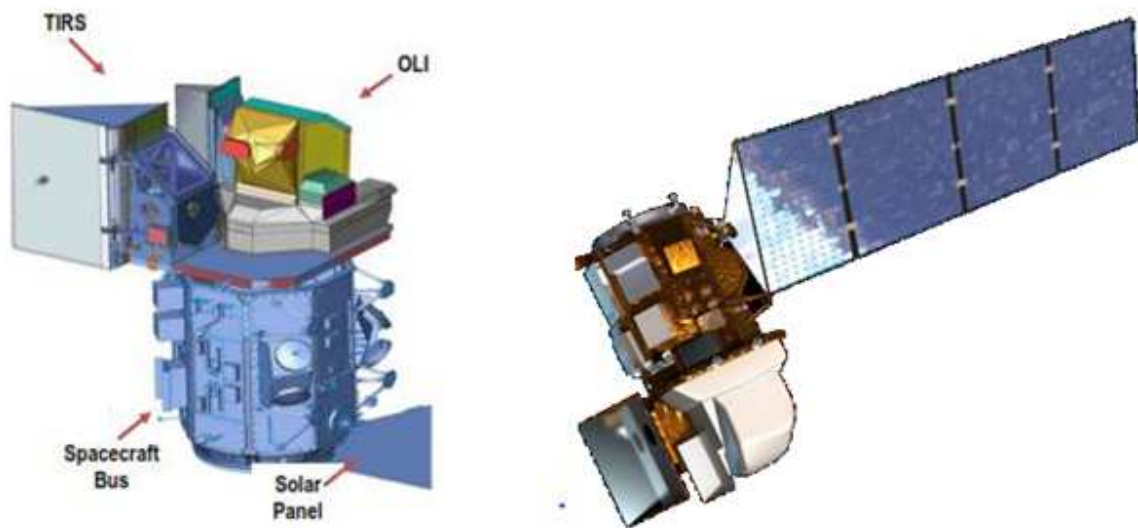
Ο Landsat-8 διαθέτει δύο αισθητήρες, τον Operational Land Imager (*OLI*) και τον Thermal Infrared Sensor (*TIRS*).

Ο αισθητήρας *OLI* έχει προσδόκιμο ζωής πέντε χρόνια. Συλλέγει δεδομένα σε εννέα φασματικά κανάλια. Τα οκτώ κανάλια βρίσκονται στην ορατή, εγγύς υπέρυθρη και μικρού κύματος υπέρυθρη περιοχή και είναι υψηλής χωρικής ανάλυσης με εδαφοψηφίδα 30x30 m, ενώ το ένατο παγχρωματικό κανάλι έχει χωρική ανάλυση 15 m. Το κανάλι 1 (*coastal/ aerosol band*) έχει σχεδιαστεί για μελέτες παράκτιων υδάτων και αερολυμάτων, ενώ το κανάλι 9 (*cirrus band*) αποσκοπεί στην ανίχνευση των θυσάνων (*cirrus clouds*). Ο αισθητήρας *TIRS* έχει περίοδο σχεδιασμού τρία χρόνια. Καταγράφει πληροφορία σε δύο θερμικά υπέρυθρα κανάλια με χωρική ανάλυση 100 m. Η χρήση των δύο καναλιών επιτρέπει το διαχωρισμό της θερμοκρασίας της Γης από την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (Εικόνα 4). Διατίθεται, επίσης, ένα κανάλι καταγραφής ποιοτικής πληροφορίας (*Quality Assurance band*), το οποίο υποδεικνύει την παρουσία σκιών και σύννεφων.

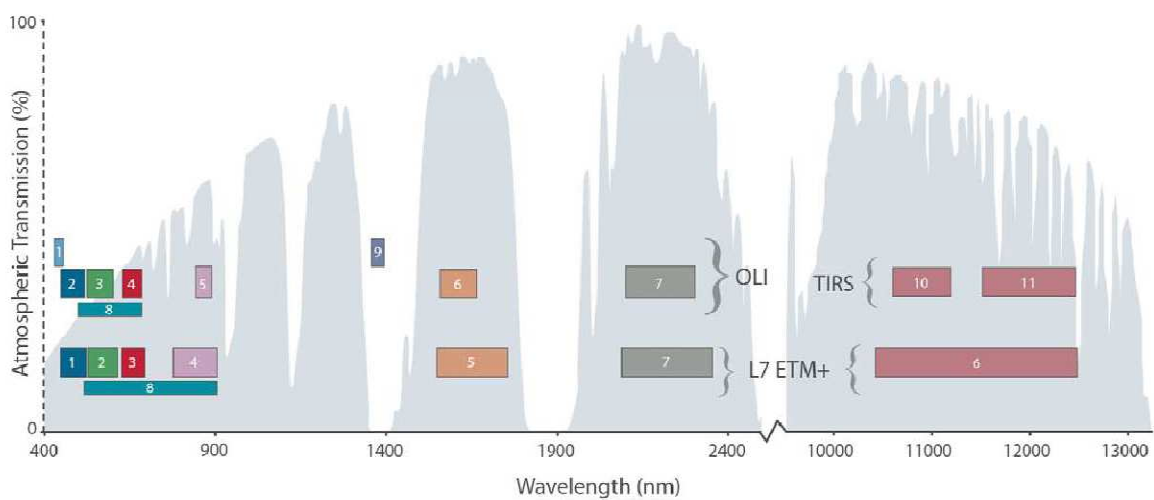
Ο *TIRS* αποτελείται από 2 θερμικά φασματικά κανάλια και ένα «τυφλό» το οποίο δεν λαμβάνει εικόνες της γης αλλά χρησιμοποιείται για βαθμονόμηση. Τα δεδομένα που συλλέγονται με τον συγκεκριμένο αισθητήρα έχουν χωρική ανάλυση 100 μέτρων αλλά ανασυντίθενται στα 30 μέτρα ώστε να ταιριάζουν με τα δεδομένα από τον *OLI* (Πίνακας 10).

**Πίνακας 10: Φασματικά Κανάλια των OLI και TIRS.**

Αισθητήρας	Κανάλι	Φασματική Περιοχή (nm)	Χωρική Ανάλυση
<b>OLI</b>	1	0.435-0.451 (Coastal / Aerosol)	30 m
	2	0.452-0.512 (Μπλέ)	30 m
	3	0.533-0.590 (Πράσινο)	30 m
	4	0.636-0.673 (Κόκκινο)	30 m
	5	0.851-0.879 (Εγγύς υπέρυθρο)	30 m
	6	1.566-1.651 (Μικρού κύματος υπέρυθρο 1)	30 m
	7	2.107-2.294 (Μικρού κύματος υπέρυθρο 2)	30 m
	8	0.503-0.676 (Πανχρωματικό)	15 m
	9	1.363-1.384 (Cirrus)	30 m
<b>TIRS</b>	10	10.60-11.19 (Θερμικό Υπέρυθρο 1)	100 m
	11	11.50-12.51 (Θερμικό Υπέρυθρο 2)	100 m



Εικόνα 4: Όψεις του δορυφόρου Landsat-8



Εικόνα 5: Περιοχές κάλυψης των καναλιών των αισθητήρων OLI και TIRS (Landsat-8) και του αισθητήρα ETM+ (Landsat-7).

#### A.4.3.2 Προϊόν Surface Reflectance

Τα πρωτογενή προϊόντα Landsat-8 (*Level 1 Products*) αποτελούνται από ψηφιακές τιμές, οι οποίες προέρχονται από τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (διαδικασία κβαντοποίησης). Οι τιμές αυτές δεν εκφράζουν την πραγματική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το επίγειο αντικείμενο. Αυτό οφείλεται στο ότι μεταξύ δέκτη και αντικειμένου παρεμβάλλονται τα αερολύματα της ατμόσφαιρας, τα οποία προκαλούν την παραμόρφωση της ακτινοβολίας. Συνεπώς, η χρήση των εικόνων αυτών απαιτεί προηγουμένως την ατμοσφαιρική διόρθωση τους. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο στάδια, αρχικά τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και, έπειτα, τη διόρθωση τους. Η ατμοσφαιρική διόρθωση σε συνδυασμό με τη γνώση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, καθιστά δυνατή τη μετατροπή της ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας σε ανακλαστικότητα της γήινης επιφάνειας.

Τα προϊόντα *Surface Reflectance* παρέχουν απευθείας αυτήν την πληροφορία, δηλαδή προσεγγίζουν αυτό που θα κατέγραφε ένας αισθητήρας πάνω από τη γήινη επιφάνεια, εάν οι συνθήκες ήταν ιδανικές (Εικόνα 6). Παράγονται για τις εικόνες των καναλιών 1 έως 7 από τα προϊόντα *Level 1* με χρήση του αλγορίθμου *L8 SR* και αποθηκεύονται σε μορφή ακεραίων 16-bit. Η χωρική ανάλυση των εικόνων αυτών είναι 30 m και αναφέρονται στην προβολή *Universal Transverse Mercator 6° (UTM 6°)* και στο ελλειψοειδές *World Geodetic System 1984 (WGS' 84)*. Κάθε σκηνή συνοδεύεται από το αρχείο των μεταδεδομένων και από τις εικόνες *Cloud QA*, *CFmask* και *CF mask Cloud Confidence*, οι οποίες παρέχουν ποιοτικές πληροφορίες.



**Εικόνα 6: (α) Εικόνα χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση, (β) Εικόνα μετά από ατμοσφαιρική διόρθωση**

Οι εικόνες *CF mask* παράγονται από τον αλγόριθμο *C version of F mask* και προσδιορίζουν αν έχουν εντοπιστεί σύννεφα, σκιές σύννεφων, χιόνι ή νερό σε κάθε pixel. Σύμφωνα με τον οδηγό της *USGS* παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα από τα αντίστοιχα των εικόνων *Cloud QA*. Οι τιμές των pixels του γέμισματος είναι 255, ενώ οι τιμές των «καθαρών» pixels είναι μηδέν (Πίνακας 11).

Οι εικόνες *CF mask Cloud Confidence* παρέχουν το επίπεδο εμπιστοσύνης για την ανίχνευση των σύννεφων, κατηγοριοποιώντας το σε τέσσερις βαθμίδες (0%,  $\leq 12,5\%$ ,  $> 12,5\%$  και  $\leq 22,5\%$ ,  $> 22,5\%$ ).

Τα μεταδεδομένα παρέχονται σε αρχεία *.xml* και περιλαμβάνουν κυρίως πληροφορίες γεωγραφικής φύσεως, όπως τις γεωγραφικές και ορθογώνιες συντεταγμένες των γωνιακών pixels, τη ζώνη προβολής, τα path και row, το πλήθος των pixels, κτλ.

**Πίνακας 11: Ερμηνεία εικόνων CF mask.**

Τιμή pixel	Ερμηνεία
255	Γέμισμα
0	Καθαρό pixel
1	Νερό
2	Σκιά
3	Χιόνι



Ο αλγόριθμος *L8 SR* βρίσκεται ακόμη υπό επεξεργασία και τα παραπάνω ισχύουν για την έκδοση 1.3 (Μάιος 2015). Η έκδοση αυτή παρουσιάζει ατέλειες σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως κοντά σε σύννεφα, σε απότομες υψομετρικές διαφορές και στα όρια ξηράς-νερού (Εικόνες 7 και 8).



**Εικόνα 7: Ατέλειες αλγορίθμου *L8 SR* απότομες υψομετρικές διαφορές (αριστερά)**

**Εικόνα 8: Ατέλειες αλγορίθμου *L8 SR* κατά μήκος των σύννεφων (δεξιά)**

## **A.5 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες**

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί πλήθος δορυφορικών δεκτών και αλγορίθμων για την παρακολούθηση υδάτων κάθε κατηγορίας, όπως λίμνες, ποτάμια, παράκτια και ωκεάνια ύδατα. Η κάθε κατηγορία υδάτων παρουσιάζει διαφορετική σύνθεση και, επομένως, διαφορετικά οπτικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, κάθε ερευνητική εργασία ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση. Ταυτόχρονα, μεγάλη είναι η ποικιλία των αλγορίθμων που αναπτύσσονται, οι οποίοι μπορεί να διαμορφώνονται από εμπειρικά, ημι-αναλυτικά και αναλυτικά μοντέλα, βιο-οπτικούς δείκτες και νευρωνικά δίκτυα. Τα όρια κάθε μαθηματικής προσέγγισης είναι διαφορετικά, καθώς η εφαρμογή των εμπειρικών μοντέλων είναι περιορισμένη στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, ενώ οι βιο-οπτικοί αλγόριθμοι μπορεί να έχουν και παγκόσμια εφαρμογή εντός των πλαισίων της κατηγορίας υδάτων που αναφέρονται.

### **A.5.1 Εργασίες της Βιβλιογραφίας στο Γενικότερο Θέμα**

Η Δορυφορική Τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εκτίμησης ποιότητας νερού σε διεθνές επίπεδο. Οι εφαρμογές αυτές αφορούν από τη μία πλευρά όλο το εύρος των ειδών του νερού, αλμυρού, γλυκού ή υφάλμυρου, και από την άλλη, διάφορα είδη ταμιευτήρων, από λίμνες, ποτάμια και φράγματα μέχρι θαλάσσια και ωκεάνια τμήματα. Λόγω της οπτικής πολυπλοκότητας του νερού ωστόσο, δεν είναι δυνατόν, ακόμα τουλάχιστον, να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος καθολικής χρήσης, ωστόσο οι έρευνες στο τομέα αυτό συνεχίζονται. (Carderatal.1989, Bukata et al. 1985).

Τα διαλυμένα και τα αιωρούμενα συστατικά του νερού παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιοχών της γης κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικούς συντελεστές παλινδρόμησης. Έτσι, είναι αναγκαίο να δημιουργείται μια εμπειρική σχέση για κάθε νέα περιοχή (Sass et al., 2007). Επιπλέον, η χρήση των εικόνων του Landsat για την εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων σε μικρές, ρηχές λίμνες μπορεί να πιέζει τα όρια της συγκεκριμένης τεχνολογίας λόγω των πιθανών σφαλμάτων που εισάγονται από το βυθό της λίμνης και την υδρόβια βλάστηση (Lillesand, etal., 1983), επομένως η επιλογή των λιμνών πρέπει να γίνεται με προσοχή.

Οι παράμετροι που έχουν απασχολήσει τις περισσότερες ερευνητικές εργασίες είναι η χλωροφύλλη (ένδειξη για το φαινόμενο του ευτροφισμού) και η διαύγεια των υδάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δύο αυτές παράμετροι μελετώνται παράλληλα.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι ερευνητικές εργασίες που πραγματοποιούν δοκιμές για δεδομένα Landsat, τα οποία μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, μετά από κατάλληλη επιλογή της περιοχής μελέτης και επεξεργασία των δεδομένων.

Οι Lathrop, Lillesand και Yandell (1991) συσχέτισαν δεδομένα Landsat TM με μετρήσεις ποιότητας νερού που έγιναν σχεδόν ταυτόχρονα στη περιοχή Green Bay της Λίμνης Μίσιγκαν (νερά Τύπου II) και δημιούργησαν ένα γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Ο εκθετικός αυτός δείκτης αποτελείτο από το λόγο των καναλιών 3 και 1 ( $0,660 \mu\text{m}/0,485 \mu\text{m}$ ) και απέδιδε με ακρίβεια 25% τη συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών (total suspended sediments) καθώς και τη διαύγεια νερού. Σημειώνεται πως, αν και η εκτίμηση της συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού παρουσιάζει προβλήματα σε περιπτώσεις νερών με χαμηλή διαύγεια, η εκτίμηση των αιωρούμενων στερεών (SS) και της διαύγειας των νερών (transparency, μετρήσεις με το δίσκο του Secchi) μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ικανοποιητικό βαθμό με το Landsat Multispectral Scanner (MSS) και το Landsat Thematic Mapper (TM) παρά τη περιορισμένη τους φασματική ανάλυση (Curran, 1989). Όπως ήταν αναμενόμενο, η συσχέτιση βελτιώθηκαν όσο αυξανόταν το μήκος κύματος στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με μέγιστες τιμές στο κόκκινο κανάλι (TM band 3), ενώ οι τιμές μειώθηκαν στα υπέρυθρα.

Η τυπική απόκλιση του μοντέλου για τα αιωρούμενα σωματίδια είναι  $+1.3\text{mg/l}$  σε εύρος τιμών  $0.5\text{-}32.5\text{mg/l}$  και για τη διαύγεια (δίσκος του Secchi)  $+1.2\text{m}$  σε εύρος τιμών  $0.5\text{-}9.0\text{m}$ . Η χλωροφύλλη εμφάνισε μεγαλύτερη συσχέτιση με τους λόγους των καναλιών (band 3)/(band 1) καθώς και (band 2)/(band 1) ωστόσο τα αποτελέσματα δεν κρίθηκαν αξιόπιστα από τους μελετητές.

Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι εκτίμησης της χλωροφύλλης ή του φυτοπλαγκτού χρησιμοποιούν την μπλε, πράσινη, κίτρινη, κόκκινη και εγγύς υπέρυθρη ζώνη. Η επιλογή των καναλιών εξαρτάται από την κατηγορία των υδάτων. Οι Blondeau - Patissieretal (2014) παρουσίασαν τα πλεονεκτήματα καθώς και τα όρια των αλγορίθμων αυτών.

Όπως αναφέρουν, για νερά κατηγορίας I προτιμώνται οι λόγοι μπλε και πράσινων καναλιών ( $440\text{-}550 \text{ nm}$ ), επειδή η μέγιστη απορρόφηση της χλωροφύλλης εντοπίζεται σε αυτό το εύρος του οπτικού φάσματος. Μειονέκτημα της μπλε ζώνης είναι ότι είναι πιο επιρρεπής σε ατμοσφαιρικά σφάλματα (π.χ. απορρόφηση της μπλε ζώνης από τα αερολύματα (Le et al., 2013)). Για νερά κατηγορίας II, όπως είναι συνήθως τα παράκτια, η ανακλαστικότητα του παραπάνω λόγου γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στις μεταβολές της χλωροφύλλης, λόγω της αυξημένης

συγκέντρωσης των CDOM και των SS. Οι Gitelson et al. (2009) και Le et al. (2013) υπέδειξαν ότι σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η χρήση της κόκκινης (620-700nm) και της εγγύς υπέρυθρης ζώνης του φάσματος (>700nm).

Οι Odermatt et al. (2012) συγκέντρωσαν τους προτεινόμενους αλγόριθμους εκτίμησης της χλωροφύλλης-α και κάνουν χρήση τεσσάρων σημείων στο οπτικό φάσμα. Αυτά είναι τα δύο σημεία μέγιστης απορρόφησης της στα 442 nm (μπλε) και στα 665 nm (κόκκινο), το σημείο εκπομπής φθορισμού στα 681 nm και το σημείο μέγιστης ανακλαστικότητας περίπου στα 700 nm (η οποία οφείλεται στο ελάχιστο άθροισμα της απορρόφησης της ακτινοβολίας από το νερό, το φυτοπλαγκτόν, τα σωματίδια και τη διαλυμένη ύλη).

Ο Matthews (2011) στην έρευνα του συγκέντρωσε και παρέθεσε τους προτεινόμενους εμπειρικούς αλγορίθμους με εφαρμογή σε εσωτερικά και παράκτια-μεταβατικά ύδατα (νερά κατηγορίας II). Ο Matthews συμπέρανε τα εξής:

- Για την εκτίμηση της διαύγειας του νερού μέσω του δίσκου Secchi χρησιμοποιείται πάντα το κόκκινο κανάλι. Η ανακλαστικότητα σε αυτή τη ζώνη αυξάνεται με τη μείωση της διαύγειας (άρα και του βάθους Secchi). Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο λόγος κόκκινου προς μπλε καναλιού (Kloiber et al., 2002 για εφαρμογή σε λίμνη). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η κανονικοποίηση στην ανακλαστικότητα του κόκκινου καναλιού, λόγω της απορρόφησης του μπλε από τη χλωροφύλλη-α και τα CDOM. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται λογαριθμικά-γραμμικά μοντέλα.
- Η επιλογή των καναλιών και των λόγων για την εκτίμηση των SS για πολυφασματικούς δέκτες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και από το εύρος των συγκεντρώσεών τους. Παρόλα αυτά για τα θολά νερά έχει αποδειχθεί η χρησιμότητα του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου καναλιού (Nechad et al., 2010). Τονίζεται ότι για χρήση απλών καναλιών πρέπει να έχει προηγηθεί ακριβής ατμοσφαιρική διόρθωση.
- Για την εκτίμηση της χλωροφύλλης-α και για συγκεντρώσεις μικρότερες των 20  $\mu\text{g/l}$  χρησιμοποιείται ευρέως ο λόγος πράσινου και μπλε καναλιού, όπως έχει ήδη αναφερθεί ή ο λόγος (μπλε - κόκκινο)/πράσινο.
- Για την εκτίμηση της θολότητας σε πολυφασματικούς δέκτες, όπως ο Landsat, χρησιμοποιούνται απλά μοντέλα κόκκινων καναλιών (Hellweger et al., 2007).

Οι Mark William Matthews & Daniel Odermatt (2015) βελτίωσαν τον αλγόριθμο MPH (maximum peak height algorithm), που στοχεύει στην επιχειρησιακή ανίχνευση της χλωροφύλλης-α και των κυανοβακτηριδίων σε εσωτερικά και παράκτια νερά. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες και in situ μετρήσεις που λήφθηκαν ταυτόχρονα. Ο αλγόριθμος MPH αξιολογήθηκε από αρκετές χιλιάδες in situ μετρήσεις για περισσότερες από 40 λίμνες σε όλο τον κόσμο (Odermatt και Brockmann, σε προετοιμασία) και κατάφερε να παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις chl-a σε σχέση με άλλους αλγορίθμους σε ευτροφικά και υπερτροφικά νερά.

Πλήθος ερευνητικών εργασιών διατίθεται για εσωτερικά ύδατα (λίμνες), τα οποία ανήκουν επίσης στα νερά Κατηγορίας II. Άλλα παραδείγματα σύγχρονων μελετών με υψηλής ανάλυσης πολυφασματικά δεδομένα είναι των Μουντογιαννάκη (2015), Theologou, (2014,2015), Θεολόγου (2014), Πατελάκη (2015) που αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.

#### **A.5.2 Πρόσφατες Σχετικές Εργασίες και Αποτελέσματα**

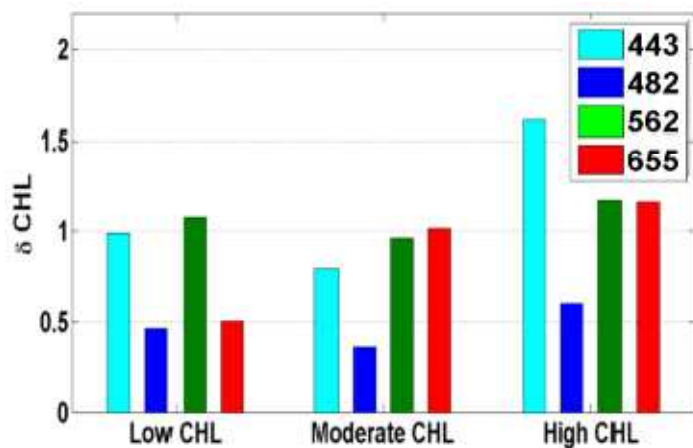
Το πλήθος των ερευνητικών εργασιών με δεδομένα Landsat-8 είναι περιορισμένο λόγω της μικρής χρονικής περιόδου που βρίσκεται εν ενεργεία. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν παραδείγματα βασισμένα σε όλο το πρόγραμμα Landsat αλλά και παραδείγματα με χρήση άλλων δεκτών, τα οποία όμως προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες.

Η Μουντογιαννάκη (2015) πετυχαίνει σημαντικές συσχετίσεις για διάφορους δείκτες ποιότητας σε παράκτιες περιοχές της Ευρώπης χρησιμοποιώντας δεδομένα Landsat-8. Ποιο συγκεκριμένα, για συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α 10-20  $\mu\text{g/l}$ , απλό γραμμικό μοντέλο με τα κανάλια B4, B2 και B6 έδωσε συσχετίσεις  $R^2 = 92\%$ ,  $87\%$  και  $88\%$  για  $dt = 7,8$  και  $9$  ημέρες απόκλισης της εικόνας Landsat-8 από την in-situ μέτρηση. Γενικά, οι ισχυρότερες συσχετίσεις φάνηκε να υπάρχουν για τους συνδυασμούς των υπέρυθρων καναλιών B5, B6, B7 με το B4. Για μεσαίες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης οι συσχετίσεις έφτασαν μέχρι  $66\%$  για το μοντέλο με χρήση των B1, B2 και B4 καναλιών για  $dt = 2$  ημέρες για πλήθος παρατηρήσεων  $n = 14$ . Σε χαμηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης η συσχέτιση δεν ξεπέρασε το  $15\%$ .

Η Πατελάκη (2015) για την εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, συγκεκριμένα της λίμνης Κάρλα με χρήση εικόνων Landsat 8, για τη χλωροφύλλη-α παρατηρεί ότι μεγαλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται με χρήση των καναλιών B4(R650), B2(R480) και B5(R865).

Η Θεολόγου (2014) με περιοχή μελέτης επίσης τη Λίμνη Κάρλα και πολυφασματικά δεδομένα Landsat 8 και SimL για τη χλωροφύλλη -α πετυχαίνει υψηλές συσχετίσεις χρησιμοποιώντας δείκτες που περιλαμβάνουν τα κανάλια B3, B4 και B2 για Landsat 8 και B3, B2 και B1 για SimL με συσχετίσεις πάνω από 90% για n=6 παρατηρήσεις.

Οι Pahlevan et al. 2014 στην έρευνα τους με τίτλο ‘Evaluating radiometric sensitivity of Landsat-8 over coastal / inland waters’ μελέτησαν την ραδιομετρική ευαισθησία του Landsat-8 στη χλωροφύλλη, στα αιωρούμενα σωματίδια και στην αCDOM σε εσωτερικά και παράκτια ύδατα. Η μελέτη βασίστηκε σε δεδομένα *Simulated Landsat* και τιμές *radiance* των καναλιών R443, R482, R562 και R655 (coastal, μπλε, πράσινο και κόκκινο, αντιστοίχως). Το Σχήμα 6, παρουσιάζει την ευαισθησία των καναλιών για τρία διαφορετικά εύρη χλωροφύλλης, δηλαδή 0,1-1, 1-5 και 5-12  $\mu\text{g/l}$ . Το μπλε κανάλι παρουσιάζει την υψηλότερη ευαισθησία και στις τρεις περιπτώσεις εντοπίζοντας διαφορές της τάξης των 0,5  $\mu\text{g/l}$ . Στις χαμηλές συγκεντρώσεις το κόκκινο κανάλι παρουσιάζει παρόμοια ευαισθησία με το μπλε, ενώ στις μεσαίες και υψηλές συγκεντρώσεις η ευαισθησία του υποδιπλασιάζεται. Τα κανάλια R443 και R562 εμφανίζουν παρόμοια ευαισθησία κατά μέσο όρο. Παρόλα αυτά το κανάλι R443 είναι ελαφρώς πιο ευαίσθητο στα νερά των πρώτων δύο περιπτώσεων, ενώ το R562 στα νερά της τρίτης περίπτωσης.



**Σχήμα 6:** Ευαισθησία των καναλιών R443, R482, R562 και R665 στη χλωροφύλλη για συγκεντρώσεις 0.1-1, 1-5 και 5-12  $\text{mg/m}^3$

Οι Harvey et al. (2015) πέτυχαν μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ παρατηρήσεων από ένα λειτουργικό σύστημα δορυφορικής παρακολούθησης που βασίζεται σε MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrophotometer) και παρακολούθηση ship-based παρακολούθηση για τις

παραγωγικές εποχές του 2008 και του 2010, σε μια παράκτια περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson για 44 ζεύγη παρατηρήσεων με απόκλιση 0- 3 ημέρες είχε τιμή  $R^2 = 0,90$ . Η ισχυρή θετική συσχέτιση δείχνει ότι η δορυφορική παρακολούθηση και η παρακολούθηση μέσω των πλοίων μπορεί να δώσει παρόμοιες εκτιμήσεις των απόλυτων επιπέδων χλωροφύλλης-α συγκέντρωσης, σε ένα εύρος μεταξύ 0 και 25  $\mu\text{g/l}$ .

Οι Zhang & Han (2015) εφάρμοσαν μοντέλα απλής και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στον κόλπο Laizhou στην Κίνα προκειμένου να αναπτύξουν ένα εμπειρικό μοντέλο χλωροφύλλης-α. Διερεύνησαν τις σχέσεις των καναλιών R443, R480, R563 και R655, καθώς και τους συνδυασμούς αυτών με μετρήσεις χλωροφύλλης-α σε δύο χρονικές περιόδους (Μάιος 2013 με συγκεντρώσεις 1,59-2,95  $\mu\text{g/l}$ , Ιανουάριος 2014 με συγκεντρώσεις 0,47-1,97  $\mu\text{g/l}$ ). Στην πρώτη περίπτωση ισχυρή συσχέτιση έδωσε μόνο το κανάλι R563 ( $R^2 = 0,83$ ), ενώ από συνδυασμούς ο δείκτης  $(R655 - R443)/(R655 + R443)$  με  $R^2 = 0,88$  και  $\text{RMSE} = \pm 0,15 \mu\text{g/l}$ . Στη δεύτερη περίπτωση τις ισχυρότερες συσχετίσεις έδωσαν τα τρία πρώτα κανάλια ( $R^2 = 0,82$  για το R443,  $R^2 = 0,90$  για το R560,  $R^2 = 0,82$  για το R563) και τελικώς επιλέχθηκε μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης των R443, R560, R563 με  $R^2 = 0,91$  και  $\text{RMSE} = 0,14 \mu\text{g/l}$ .

Για τον ίδιο σκοπό, οι Han and Jordan (2005) μελέτησαν τις σχέσεις της χλωροφύλλης-α με τα κανάλια R485, R560, R660, R835 σε μία εκβολή στον κόλπο του Μεξικού με χρήση εικόνων Landsat-7 (δέκτης ETM+). Το μέσο βάθος της περιοχής είναι 6 m, ενώ το εύρος της χλωροφύλλης-α κυμαίνεται από 1,14 έως 23,23  $\mu\text{g/l}$ . Για τα μοντέλα παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε ως εξαρτημένη μεταβλητή ο λογάριθμος της χλωροφύλλης-α, ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν απλά κανάλια, οι λόγοι τους, οι λογάριθμοι των λόγων τους και οι λόγοι των λογάριθμων των καναλιών. Όπως αναφέρουν η χρήση των λόγων έχει δύο πλεονεκτήματα. Πρώτον, οι λόγοι τείνουν να αντισταθμίζουν τις παρεκκλίσεις λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας (Jensen, 2005) και δεύτερον, οι ιδιότητες απορρόφησης και σκέδασης της χλωροφύλλης μπορούν να αναλυθούν μόνο αν χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον δύο κανάλια (Dekker et al., 2001).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, συσχέτιση με τη χλωροφύλλη-α φαίνεται να υπάρχει με τα κανάλια R485 και R660. Καλύτερη συσχέτιση έδωσε ο λόγος  $\text{Log}(R485)/\text{Log}(R660)$  με  $R^2 = 0,67$  ( $n=16$ ), ο οποίος χρησιμοποιεί δύο οπτικές ζώνες απορρόφησης της χλωροφύλλης αλλά διαφορετικού ρυθμού (πιο γρήγορος ρυθμός απορρόφησης στο R660). Επειδή το κανάλι R660 επηρεάζεται από τα ανόργανα αιωρούμενα συστατικά και από την οργανική διαλυμένη ύλη, ο

λόγος αυτός θα είναι πιο αποτελεσματικός όταν η συγκέντρωση της χλωροφύλλης ξεπερνά ένα μέγεθος και όταν η θολότητα είναι μικρή.

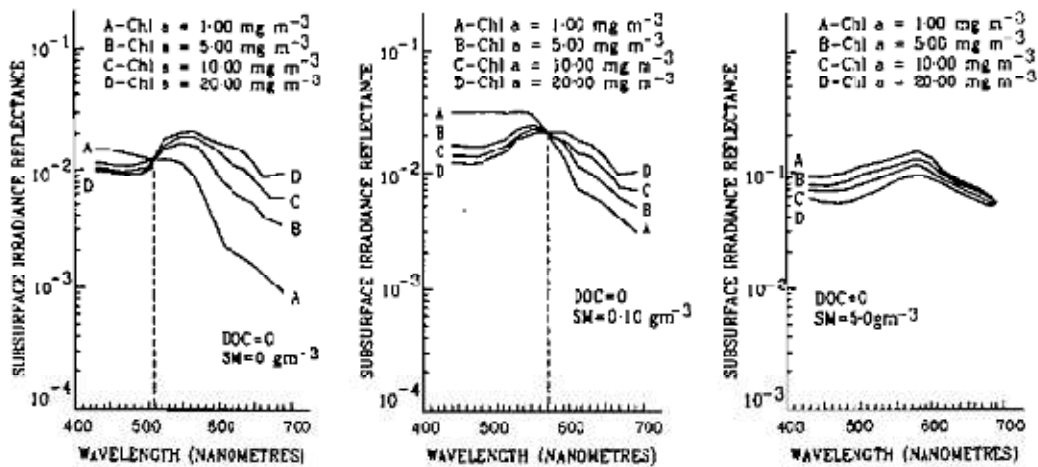
Οι Kabbara et al. (2008) βασίστηκαν στα ίδια κανάλια του Landsat-7 προκειμένου να αναπτύξουν εμπειρικά μοντέλα στην παράκτια περιοχή της Τρίπολης (Λίβανος) για την εκτίμηση της χλωροφύλλης-α (εύρος 0,30-3,07  $\mu\text{g/l}$ ), της θολότητας (μέση τιμή 2,34 FTU) και του δίσκου του Secchi (εύρος 2-11 $\mu$ ). Ως εξαρτημένη μεταβλητή επιλέχθηκε ο φυσικός λογάριθμος του εκάστοτε δείκτη. Για τη συσχέτιση χρησιμοποίησαν απλά και πολλαπλά μοντέλα παλινδρόμησης. Και για τις τρεις παραμέτρους καλύτερη συσχέτιση έδωσε το πολλαπλό μοντέλο με ανεξάρτητες μεταβλητές τους δείκτες  $\text{Ln}(R485)$  και  $\text{Ln}(R560)$ . Οι δείκτες αυτοί έδωσαν συντελεστές προσδιορισμού  $R^2 = 0,723$  για τη χλωροφύλλη-α ( $n = 34$ ),  $R^2 = 0,54$  για το βάθος Secchi ( $n = 35$ ) και  $R^2 = 0,57$  για τη θολότητα ( $n = 45$ ). Για τη χλωροφύλλη-α παρόμοια συσχέτιση έδωσε ο λόγος  $\text{Ln}(ETM1)/\text{Ln}(ETM3)$  με  $R^2 = 0,719$  ( $n = 34$ ).

Ο S. Ekstrand (1992) συνέλεξε εικόνες Landsat TM και δείγματα στα ανατολικά της Σουηδίας (κόλπος Himmerfjarden Bay) προκειμένου να αναπτύξει εμπειρικά μοντέλα για την εκτίμηση της χλωροφύλλης-α.

Γνωρίζοντας ότι η παρουσία των SS περιπλέκει την εκτίμηση της χλωροφύλλης-α, μελέτησε τμηματικά τα νερά κατηγορίας I και II. Για τα νερά κατηγορίας I (ωκεάνια) πρότεινε τον λόγο  $R485/R560$  (χρήση τιμών *radiances*). Για την εύρεση ενός κατάλληλου δείκτη για τα νερά κατηγορίας II εξαίρεσε τα δείγματα με προέλευση από περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα αιωρούμενων στερεών. Ο δείκτης που προτάθηκε εν τέλει είναι ο  $R485/(\text{Log}R660+ 1)$ .

Όπως αναφέρει, για αυξημένη συγκέντρωση χλωροφύλλης σε νερό χωρίς αιωρούμενα στερεά η ανακλαστικότητα στην μπλε ζώνη μειώνεται, ενώ αυξάνεται ραγδαίως στην πράσινη και κόκκινη ζώνη. Το οριακό σημείο είναι στα 505 nm (όριο μπλε και πράσινης ζώνης). Όσο όμως τα επίπεδα των αιωρούμενων στερεών αυξάνονται το οριακό σημείο μετακινείται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (570 nm για 0,10 mg/l SS και 690 nm για 5,0 mg/l SS), με αποτέλεσμα η ανακλαστικότητα να είναι πλέον ανεξάρτητη της χλωροφύλλης στο R560 ή και στο R660 (Bukata et al., 1983, Σχήμα 7)





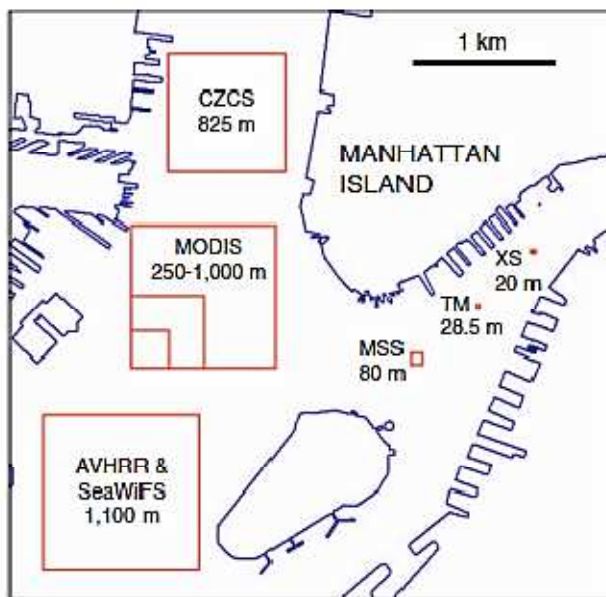
**Σχήμα 7: Φασματική υπογραφή της χλωροφύλλης-α συναρτήσει διαφορετικών συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (0 / 0,5 / 5 mg/l)**

Οι Pattiaratchi et al. (1994) μελέτησαν τις σχέσεις των ορατών καναλιών R485, R560, R660 του Landsat TM με τη χλωροφύλλη-α (εύρος 0,2-2,7  $\mu\text{g/l}$ ), το βάθος του δίσκου Secchi (εύρος 4 - 15 $\mu$ ) και τη θερμοκρασία του νερού στο Cockburn Sound (Όρμος στη Δυτική Αυστραλία). Εφάρμοσαν μοντέλα απλής και πολλαπλής παλινδρόμησης, για γραμμικές και λογαριθμικές-γραμμικές εξισώσεις σε 39 σημεία και κατέληξαν στην ανάπτυξη εμπειρικών αλγορίθμων με χρήση των καναλιών R485 και R660. Για τη χλωροφύλλη, συσχετίσεις βρέθηκαν μόνο για τα μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης. Συγκεκριμένα, καλές συσχετίσεις έδωσαν ο συνδυασμός των καναλιών R485, R660 για μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ( $R^2 = 0,59$  και  $s.e. = \pm 0,3 \mu\text{g/l}$ ) και ο συνδυασμός των R560 και R560/R660 για το λογαριθμικό-γραμμικό μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης ( $R^2 = 0,53$ ,  $s.e. = \pm 0,17 \mu\text{g/l}$ ). Συσχέτιση παρατηρήθηκε, επίσης, μεταξύ του βάθους Secchi και των καναλιών R485 και R660. Τα απλά γραμμικά μοντέλα έδωσαν  $R^2 = 0,52$  και  $s.e. = \pm 1,15 \text{ m}$  με ανεξάρτητη μεταβλητή το κανάλι R485, ενώ  $R^2 = \pm 0,52$  και  $s.e. = \pm 1,69 \text{ m}$  έδωσε το κανάλι R660. Το κανάλι R660 έδωσε καλύτερη συσχέτιση με το λογαριθμικό-γραμμικό μοντέλο με  $R^2 = \pm 0,61$  και  $s.e. = \pm 1,09 \text{ m}$ .

Ο Zhang (2005) εφάρμοσε διάφορες τεχνικές συσχέτισης μεταξύ in-situ δεδομένων και διαφόρων δεκτών στον κόλπο της Φινλανδίας (Archipelago Sea). Για τον Landsat TM συμπέρανε πως η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης μπορεί να εκτιμήσει με καλύτερη ακρίβεια τη χλωροφύλλη-α, το βάθος Secchi, τη θολότητα και τα αιωρούμενα συστατικά σε σχέση με την μέθοδο της απλής παλινδρόμησης. Όπως αναφέρει, η χρήση πολλαπλών καναλιών του Landsat TM παρέχει περισσότερες πληροφορίες για τις υδάτινες συνθήκες σε σχέση με τη χρήση απλών καναλιών ή λόγων αυτών. Συγκεκριμένα, για τη χλωροφύλλη-α συμπέρανε πως

αποτελεσματικότερη είναι η χρήση των συνδυασμών απλών καναλιών και λόγων ( $R^2 = 0,68$  έναντι  $R^2 = 0,54$  &  $n = 53$ ).

Οι Hellweger et al. (2004) στην έρευνα τους για την ποιότητα των νερών του λιμανιού της Νέας Υόρκης ανέλυσαν τη σημασία της χωρικής και της φασματικής ανάλυσης των δορυφορικών δεκτών. Για σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες από τον δέκτη MODIS (υψηλή φασματική ανάλυση / χαμηλή χωρική ανάλυση) και από τον δέκτη Landsat TM (υψηλή χωρική ανάλυση / χαμηλή φασματική ανάλυση). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ του καναλιού R660 και του βάθους του δίσκου Secchi στις περιοχές που επηρεάζονται από απορροές ποταμιών ( $R^2 = 0,85$  &  $n = 21$ ) και μεταξύ του λόγου  $R560/R660$  και της χλωροφύλλης-α ( $R^2 = 0,78$  &  $n = 16$ ). Τα δεδομένα MODIS δεν έδωσαν συσχετίσεις, το οποίο πιθανόν οφείλεται στην παρεμβολή μη υδάτινων αντικειμένων λόγω της χαμηλής χωρικής ανάλυσης του MODIS.



**Εικόνα 9: Συγκριτική χωρική ανάλυση των δεκτών CZCS, MODIS, AVHRR, SeaWiFS, LandsatMSS, Landsat TM, SPOTXS στο λιμάνι της Νέας Υόρκης. [Πηγή: Hellweger et al., 2004]**

Οι Le et al. (2013) δοκίμασαν διαφορετικούς αλγόριθμους στον κόλπο Tampa, ο οποίος χαρακτηρίζεται από ρηγά και σύνθετα νερά λόγω της παρουσίας εκβολών ποταμών. Οι συγκεντρώσεις στον κόλπο κυμαίνονται από 1 έως 80  $\mu\text{g/l}$ . Οι τρεις αλγόριθμοι αφορούσαν λόγους δύο, τριών και τεσσάρων καναλιών ( $x = Rrs(\lambda_2) / Rrs(\lambda_1)$ ,  $x = [Rrs(\lambda_1)-1 - Rrs(\lambda_2)-1] * Rrs(\lambda_3)$  και  $x = [Rrs(\lambda_1)-1-Rrs(\lambda_2)-1] / [Rrs(\lambda_4)-1-Rrs(\lambda_3)-1]$ ) των δεκτών MERIS και MODIS, επιλεγμένων από τη ζώνη του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου (660-760 nm). Το

τέταρτο μοντέλο συνέθετε ο δείκτης SCI, ο οποίος χρησιμοποιεί τέσσερα κανάλια στην πράσινη και στην κόκκινη ζώνη (*Synthetic Chlorophyll Index*, Shen et al., 2010). Το τελευταίο μοντέλο έδωσε καλύτερα αποτελέσματα για τιμές μικρότερες των 20  $\mu\text{g/l}$ . Από τα πρώτα μοντέλα καλύτερα αποτελέσματα έδωσε το εκθετικό μοντέλο με χρήση του λόγου  $R709/R665$  σε δεδομένα MERIS και κυρίως για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 2  $\mu\text{g/l}$ . Ο ίδιος δείκτης δοκιμάστηκε σε παρόμοιο υδάτινο σύστημα στον κόλπο Chesapeake και έδωσε παρόμοια αποτελέσματα (Chesapeake Bay με εύρος 4 -100  $\mu\text{g/l}$ , MRE = 34,7%).



## Μέρος Β

### B.1 Μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να βρεθούν οι πιθανές συσχετίσεις μεταξύ των πολυφασματικών και των *in situ* δεδομένων. Αρχικά, περιγράφεται η περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια περιγράφονται οι διαδικασίες συλλογής των *in situ* δεδομένων (δεδομένα δειγματοληψιών) καθώς και των δορυφορικών δεδομένων. Έπειτα αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε, προκειμένου να βρεθούν μοντέλα που θα πετυχαίνουν ικανοποιητικές συσχετίσεις των επιτόπιων μετρήσεων με τις τιμές ανακλαστικότητας του νερού για κάθε μία από τις τρεις ποιοτικές παραμέτρους (chl-a, επιφανειακή θερμοκρασία, βάθος Secchi). Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων κρίθηκε απαραίτητη η αυτοματοποίηση των επιμέρους σταδίων, με λογισμικά (Python και MATLAB) που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των εικόνων και την εξαγωγή των τιμών ανακλαστικότητας, αλλά και για τη διενέργεια των παλινδρομήσεων με απόκριση το δείκτη συσχέτισης ( $R^2$ ) και το παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας (p-value) των συγκρινόμενων τιμών.

### B.1.1 Η περιοχή μελέτης

Ως περιοχή μελέτης ορίστηκαν οι λίμνες της Ελλάδας. Λόγω έλλειψης μέχρι στιγμής προσβάσιμης στο ευρύ κοινό βάσης δεδομένων με τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών για την παρακολούθηση όλων των λιμνών, κρίθηκε απαραίτητη η επιλογή ενός αριθμού εξ αυτών που αποτέλεσαν το τελικό δείγμα μας. Έτσι, με τη βοήθεια των φορέων συγκεντρώθηκαν στοιχεία για τις λίμνες που ακολουθούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της πιθανής χρονικής απόστασης μεταξύ της δειγματοληψίας και της δορυφορικής λήψης, ήταν επιθυμητή η σχετικά σταθερή και δυσμετάβλητη κατάσταση των λιμνών επιλογής.

Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά πληροφορίες για τις λίμνες που συμπεριλήφθηκαν τελικά στο δείγμα και αντίστοιχος χάρτης.

**Χάρτης 1: Η Περιοχή Μελέτης**



1. Η λίμνη **Τριχωνίδα** είναι η μεγαλύτερη φυσική λίμνη που βρίσκεται εξ ολοκλήρου σε ελληνικό έδαφος με επιφάνεια  $96,52 \text{ km}^2$ , όγκο  $142 \times 10^6 \text{ m}^3$ , βάθος 57 m και σε υψόμετρο 11 m. Έχει μεγάλο οικολογικό ενδιαφέρον, αφού είναι ένα από τα τελευταία ενδιαιτήματα της βίδρας και φιλοξενεί επίσης 200 είδη πουλιών και 35 είδη ψαριών εκ των οποίων 11 είναι ενδημικά της Ελλάδας και ένα (ο νανογοβιός) απαντάται μόνο στην Τριχωνίδα.
2. Η **Αμβρακία** είναι μία άλλη σημαντική φυσική λίμνη της Αιτωλοακαρνανίας. Έχει έκταση  $14,4 \text{ km}^2$ , όγκο  $278 \times 10^6 \text{ m}^3$ , βάθος 40 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 25 m. Από χημικής άποψης έχει ενδιαφέρον, γιατί το καλοκαίρι, σε βάθος μεγαλύτερο από 15-20 m, επικρατούν ανοξικές συνθήκες και ευνοείται η παραγωγή υδρόθειου και αμμωνίας. Η κακή ποιότητα του νερού επιτρέπει την περιορισμένη χρήση του μόνο για αρδεύσεις, ενώ φαίνεται πως επηρεάζει αρνητικά τους ζώντες οργανισμούς στις ακτές και μέσα στο νερό (Αλμπανάκης, 1995).
3. Η λίμνη **Κρεμαστών** στον ποταμό Αχελώο είναι η μεγαλύτερη τεχνητή λίμνη της Ελλάδας. Έχει έκταση  $81 \text{ km}^2$ , όγκο  $4.750 \times 10^6 \text{ m}^3$ , βάθος 60 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 300 m.
4. Πολύ κοντά στη λίμνη Κρεμαστών και πιο χαμηλά στο ρου του ποταμού Αχελώου, σε υψόμετρο 144 m βρίσκεται η τεχνητή λίμνη **Καστρακίου**, που έχει έκταση  $28 \text{ km}^2$ , όγκο  $1000 \times 10^6 \text{ m}^3$ , βάθος 95 m.  
Τόσο η λίμνη Κρεμαστών όσο και η λίμνη Καστρακίου έχουν μεγάλη συνεισφορά στην ενεργειακή παραγωγή της χώρας με σχεδόν 800 MW εγκατεστημένη ισχύ.
5. Η λίμνη **Ταυρωπού** ή Πλαστήρα είναι επίσης τεχνητή, κατασκευάστηκε το 1960 και αποτελεί την πρώτη εκτροπή της λεκάνης απορροής του Αχελώου προς το θεσσαλικό κάμπο. Έχει έκταση  $23,6 \text{ km}^2$ , όγκο  $400 \times 10^6 \text{ m}^3$ , βάθος 60 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 750 m.
6. Η φυσική λίμνη **Υλίκη** είναι περισσότερο γνωστή ως βοηθητική πηγή υδροληψίας της Αθήνας. Πλέον λαμβάνει ύδατα και από το κανάλι του Μόρνου ενώ, λόγω της ασβεστολιθικής σύστασης του πυθμένα της, υπάρχουν πολλά καρστικά υπόγεια έγκοιλα και καταβόθρες που συντελούν στην παροχέτευση πρόσθετου υδάτινου δυναμικού (30%) προς τη γειτονική Παραλίμνη και το Βόρειο Ευβοϊκό Κόλπο. Έχει έκταση  $19 \text{ km}^2$ , όγκο  $543 \times 10^6 \text{ m}^3$ , βάθος 38,5 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 79 m.
7. Η **Βεγορίτιδα** είναι η μεγαλύτερη φυσική λίμνη της Δυτικής Μακεδονίας που βρίσκεται εξ ολοκλήρου επί ελληνικού εδάφους. Από το 1955 λειτούργησε η σήραγγα της Άρνισσας με παροχέτευση των υδάτων της λίμνης προς τον ΥΗΣ της ΔΕΗ. Αυτό προκάλεσε σημαντική ταπείνωση της στάθμης με μείωση κατά 30% της επιφάνειας και κατά 68% του όγκου της

λίμνης. Έχει σήμερα έκταση  $54.3\text{km}^2$ , όγκο  $700 \times 10^6\text{m}^3$ , βάθος 70 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 70 m.

8. Η **λίμνη Πολυφύτου** είναι μία από τις μεγαλύτερες τεχνητές λίμνες της Ελλάδας. Παρά τη δυνατότητα ανάπτυξης επαγγελματικής αλιείας, δέχεται δυστυχώς τα λύματα των πόλεων της Κοζάνης του Βελβεντού και των Σερβίων. Ταυτόχρονα, στη λεκάνη απορροής λειτουργούν σχεδόν 100 τυροκομεία και σφαγεία, τα λύματα των οποίων καταλήγουν στον ποταμό Αλιάκμονα και στους χειμάρρους και έχουν τελικό αποδέκτη τη λίμνη. Έχει έκταση  $74\text{km}^2$ , όγκο  $2244 \times 10^6\text{m}^3$ , βάθος 46 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 291 m.

9. Η **Μεγάλη Πρέσπα** βρίσκεται στα σύνορα Ελλάδας-Αλβανίας-ΠΓΔΜ. Είναι μία από τις μεγαλύτερες φυσικές λίμνες των Βαλκανίων με τεράστιο οικολογικό ενδιαφέρον. Στις Πρέσπες απαντώνται πάνω από 40 είδη θηλαστικών, περί τα 260 είδη πτηνών, 11 είδη αμφιβίων, 20 είδη ερπετών και 15 είδη ιχθύων, ενώ στην πλούσια χλωρίδα της περιλαμβάνονται περισσότερα από 1300 είδη φυτών. Έχει έκταση  $273\text{km}^2$ , όγκο  $6000 \times 10^6\text{m}^3$ , βάθος 55 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 842 m.

10. Η **Βόλβη** είναι η δεύτερη μεγαλύτερη φυσική λίμνη της Ελλάδας και παρουσιάζει τεράστιο οικολογικό ενδιαφέρον, αφού στην περιοχή απαντώνται 248 είδη πτηνών που ισοδυναμούν με το 58% της ελληνικής πανίδας. Έχει έκταση  $70\text{km}^2$ , όγκο  $940 \times 10^6\text{m}^3$ , βάθος 20 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 75 m.

11. Η λίμνη **Κάρλα** αποτελεί, όπως αναφέρθηκε, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υπερτροφικής λίμνης. Είχε αρχικά μέγεθος  $180\text{km}^2$  και αποξηράνθηκε το 1962, ενώ από το 2010 γίνεται προσπάθεια αναδημιουργίας της με άντληση υδάτων από τον Πηνειό. Σήμερα, έχει έκταση  $37\text{km}^2$ , όγκο περίπου  $111 \times 10^6\text{m}^3$ , βάθος 6 m και βρίσκεται σε υψόμετρο 70 m.



### B.1.2 Συλλογή Δεδομένων δειγματοληψιών (in situ δεδομένα)

Για τις 11 λίμνες, τις 6 φυσικές (Αμβρακία, Βεγορίτιδα, Βόλβη, Μεγάλη Πρέσπα, Τριχωνίδα και Υλίκη), τους τέσσερις ταμιευτήρες (Καστρακίου, Κρεμαστών, Πολυφύτου, Ταυρωπού) καθώς και για τη λίμνη Κάρλα συγκεντρώθηκαν στοιχεία δειγματοληψίας που αφορούσαν τους ποιοτικούς δείκτες της χλωροφύλλης-α, τη θερμοκρασία (επιφανειακή) και τη θολότητα με χρήση του βάθους Secchi. Τα στοιχεία παρασχέθηκαν από το Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων, στο πλαίσιο του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων λιμνών (ΚΥΑ 140384/2011), υπό τον συντονισμό και επίβλεψη της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων με χρηματοδότηση του Ευρωπαϊκού Ταμείου Περιφερειακής Ανάπτυξης και με εθνικούς πόρους - ΕΠΠΕΡΑΑ 2007 - 2013.

Για τη λίμνη Κάρλα, επιπλέον δεδομένα συγκεντρώθηκαν από τον Φορέα Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας - Μαυροβουνίου - Κεφαλοβρύσου - Βελεστίνου (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.).

Το πλήθος των in situ μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και παραχωρήθηκαν από τους φορείς συνοψίζεται ανά λίμνη στον πίνακα που ακολουθεί:

**Πίνακας 12: Πλήθος in situ μετρήσεων για τη χλωροφύλλη-α, την επιφανειακή θερμοκρασία και το βάθος δίσκου Secchi**

Ποιοτικός Δείκτης	Χλωροφύλλη-α	Θερμοκρασία	Βάθος Secchi	Συνολικό Πλήθος Μετρήσεων
Πλήθος μετρήσεων Αμβρακίας	8	8	8	24
Πλήθος μετρήσεων Βεγορίτιδα	8	7	8	23
Πλήθος μετρήσεων Βόλβη	8	8	7	23
Πλήθος μετρήσεων Μεγάλη Πρέσπα	16	15	16	47

Πλήθος μετρήσεων Τριγωνίδα	8	8	8	24
Πλήθος μετρήσεων Υλίκη	5	5	5	15
Πλήθος μετρήσεων Τ. Πολυφύτου	8	7	8	23
Πλήθος μετρήσεων Τ. Ταυρωπού	8	8	8	24
Πλήθος μετρήσεων Τ. Καστρακίου	7	7	7	21
Πλήθος μετρήσεων Τ. Κρεμαστών	8	7	8	23
Πλήθος μετρήσεων Τ. Κάρλας	16	-	33	49
<b>Σύνολο</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>124</b>	<b>304</b>

Οι μετρήσεις αυτές αφορούν αποτελέσματα δειγματοληψιών κατά τα έτη 2013, 2014 και 2015. Οι συντεταγμένες των σταθμών δειγματοληψίας για τα δεδομένα που παραχωρήθηκαν από το ΕΚΒΥ φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 13: Συντεταγμένες δειγματοληψίας των σταθμών του ΕΚΒΥ**

ΛΙΜΝΗ	Συντεταγμένες δειγματοληψίας	
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ	38°53'25.64" N	21°30'23.03" E
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ	38°45'4.42" N	21°21'58.67" E
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΤΑΥΡΩΠΟΥ	39°14'34.21" N	21°45'13.13" E
ΛΙΜΝΗ ΤΡΙΧΩΝΙΔΑ	38°34'22.50" N	21°32'53.33" E
ΛΙΜΝΗ ΑΜΒΡΑΚΙΑ	38°45'22.05" N	21°10'0.69" E
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΠΟΛΥΦΥΤΟΥ	40°17'40.60" N	22°5'45.59" E
ΛΙΜΝΗ ΜΕΓΑΛΗ ΠΡΕΣΠΑ (ΣΤΑΘΜΟΣ Α)	40°51'1.41" N	20°59'19.77" E
ΛΙΜΝΗ ΜΕΓΑΛΗ ΠΡΕΣΠΑ	40°50'24.41" N	21°5'7.22" E

<b>(ΣΤΑΘΜΟΣ Β)</b>		
ΛΙΜΝΗ ΥΛΙΚΗ	38° 24' 10.30" N	23° 15' 3.43" E
ΛΙΜΝΗ ΒΟΛΒΗ	40°39'47.75" N	23°32'17.89" E
ΛΙΜΝΗ ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑ	40°44'41.00" N	21°47'4.00" E
ΤΕΧΝΙΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ	39° 29' 22,31" N	22° 49' 17,56" E

Οι συντεταγμένες των σταθμών δειγματοληψίας για τα δεδομένα που παραχωρήθηκαν από το Φορέα Διαχείρισης της Κάρλας φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί σε ΕΓΣΑ87 και παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί.

**Πίνακας 14: Συντεταγμένες δειγματοληψίας των σταθμών του φορέα διαχείρισης της Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε. σε ΕΓΣΑ87**

ΤΕΧΝΙΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ	X	Y
ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ1	400512	4370422
ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ2	400481	4374165
ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ3	398656	4367232



**Εικόνα 10: Τα τρία σημεία δειγματοληψίας του φορέα διαχείρισης της λίμνης Κάρλας (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.)**

Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα δειγματοληψίας (in situ μετρήσεις) για τις τρεις παραμέτρους που εξετάστηκαν και για τις 11 λίμνες που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη.

### B.1.3 Συλλογή Δορυφορικών Δεδομένων

Μέσω της ιστοσελίδας της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών έγινε δωρεάν η λήψη δορυφορικών, ατμοσφαιρικά διορθωμένων εικόνων, από το δορυφόρο Landsat-8 για τις 11 λίμνες για τις οποίες συγκεντρώθηκαν οι επίγειες μετρήσεις, από το έτος 2013 έως και το 2015. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν όλες οι εικόνες που απείχαν από τις ημερομηνίες δειγματοληψίας έως και 15 ημέρες.

Οι δορυφορικές εικόνες που πληρούσαν αυτό το κριτήριο και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται συνολικά στον Πίνακα 15 που ακολουθεί.

**Πίνακας 15: Οι Δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη για κάθε λίμνη**

A/A	Λίμνη Αμβρακία	Λίμνη Καστρακίου	Λίμνη Κρεμαστών	Λίμνη Βόλβη
1	LC81850332014281LGN00	LC81840332014274LGN00	LC81840332014274LGN00	LC81840322014258LGN00
2	LC81840332014274LGN00	LC81850332014265LGN00	LC81850332014265LGN00	LC81830322014251LGN00
3	LC81850332014265LGN00	LC81840332014258LGN00	LC81840332014258LGN00	LC81840322014242LGN00
4	LC81840332014258LGN00	LC81850332014249LGN00	LC81850332014249LGN00	LC81830322014235LGN00
5	LC81850332014233LGN00	LC81840332014242LGN00	LC81840332014242LGN00	LC81840322014226LGN00
6	LC81840332014226LGN00	LC81850332014233LGN00	LC81850332014233LGN00	LC81840322014210LGN00
7	LC81850332014217LGN00	LC81840332014226LGN00	LC81840332014226LGN00	LC81830322014203LGN00
8	LC81840332014210LGN00	LC81850332014185LGN00	LC81850332014217LGN00	LC81840322014194LGN00
9	LC81850332014201LGN00	LC81840332014178LGN00	LC81840332014210LGN00	LC81840322014178LGN00
10	LC81850332014185LGN00	LC81850332014169LGN00	LC81850332014201LGN00	LC81830322014171LGN00
11	LC81840332014178LGN00	LC81840332014162LGN00	LC81840332014194LGN00	LC81840322014162LGN00
12	LC81850332014169LGN00	LC81850332013278LGN00	LC81850332014185LGN00	LC81830322014155LGN00
13	LC81840332014162LGN00	LC81840332013271LGN00	LC81840332014178LGN00	LC81840322013271LGN00
14	LC81850332013326LGN00	LC81850332013262LGN00	LC81850332014169LGN00	LC81840322013255LGN00
15	LC81840332013319LGN00	LC81840332013255LGN00	LC81840332014162LGN00	LC81830322013248LGN00
16	LC81850332013310LGN00	LC81850332013246LGN00	LC81850332013278LGN00	LC81830322013200LGN00
17	LC81840332013303LGN00	LC81840332013239LGN00	LC81840332013271LGN00	LC81840322013191LGN00
18	LC81840332013239LGN00	LC81850332013230LGN00	LC81850332013262LGN00	LC81830322013184LGN00
19	LC81850332013230LGN00	LC81850332013214LGN00	LC81840332013255LGN00	LC81840322013175LGN00
20	LC81840332013223LGN00	LC81840332013207LGN00	LC81850332013246LGN00	LC81840322013159LGN00
21	LC81850332013214LGN00	LC81850332013198LGN00	LC81840332013239LGN00	LC81830322013152LGN00

22	LC81840332013207LGN00	LC81850332013166LGN00	LC81850332013230LGN00	LC81840322013143LGN03
23	LC81850332013198LGN00	LC81840332013159LGN00	LC81840332013223LGN00	LC81830322013136LGN01
24	LC81840332013191LGN00	LC81850332013150LGN00	LC81850332013214LGN00	LC81830322013120LGN01
25	LC81850332013182LGN00	LC81840332013143LGN03	LC81840332013207LGN00	
26	LC81840332013159LGN00		LC81850332013198LGN00	
27	LC81850332013150LGN00		LC81840332013191LGN00	
28	LC81840332013143LGN03		LC81850332013166LGN00	
29	LC81850332013134LGN01		LC81840332013159LGN00	
30			LC81850332013150LGN00	
31			LC81840332013143LGN03	

A/A	Λίμνη Υλίκη	Λίμνη Τριχωνίδα	Λίμνη Πολυφύτου	Λίμνη Ταυρωπού
1	LC81830332014267LGN00	LC81840332014274LGN00	LC81840322014274LGN00	LC81840332014258LGN00
2	LC81830332014251LGN00	LC81840332014258LGN00	LC81840322014258LGN00	LC81840332014242LGN00
3	LC81830332014235LGN00	LC81840332014226LGN00	LC81840322014242LGN00	LC81840332014226LGN00
4	LC81830332014219LGN00	LC81840332014210LGN00	LC81840322014226LGN00	LC81840332014210LGN00
5	LC81830332014203LGN00	LC81840332014178LGN00	LC81840322014210LGN00	LC81840332014194LGN00
6	LC81830332013248LGN00	LC81840332014162LGN00	LC81840322014178LGN00	LC81840332014178LGN00
7	LC81830332013232LGN00	LC81840332013287LGN00	LC81840322014162LGN00	LC81840332014162LGN00
8	LC81830332013216LGN00	LC81840332013239LGN00	LC81840322013271LGN00	LC81840332014146LGN00
9		LC81840332013223LGN00	LC81840322013255LGN00	LC81840332013303LGN00
10		LC81840332013207LGN00	LC81840322013223LGN00	LC81840332013287LGN00
11		LC81840332013191LGN00	LC81840322013207LGN00	LC81840332013255LGN00
12		LC81840332013143LGN03	LC81840322013191LGN00	LC81840332013239LGN00
13			LC81840322013143LGN03	LC81840332013223LGN00
14				LC81840332013207LGN00
15				LC81840332013191LGN00
16				LC81840332013175LGN00

A/A	Λίμνη Μεγάλη Πρέσπα	Λίμνη Βεγορίτιδα	Λίμνη Κάρλα (α)	Λίμνη Κάρλα (β)
1	LC81850322014265LGN00	LC81850322014265LGN00	LC81840332013303LGN00	LC81840332014322LGN00
2	LC81850322014249LGN00	LC81840322014258LGN00	LC81830332013296LGN00	LC81830332014315LGN00

3	LC81850322014233LGN00	LC81850322014249LGN00	LC81840332013287LGN00	LC81840322014306LGN00
4	LC81850322014217LGN00	LC81840322014242LGN00	LC81830332013280LGN00	LC81840332014258LGN00
5	LC81850322014185LGN00	LC81850322014233LGN00	LC81840332013271LGN00	LC81830332014251LGN00
6	LC81850322014169LGN00	LC81840322014226LGN00	LC81830332013200LGN00	LC81840332014242LGN00
7	LC81850322014153LGN00	LC81850322014217LGN00	LC81840332013191LGN00	LC81830332014235LGN00
8	LC81850322013262LGN00	LC81840322014210LGN00	LC81830332013184LGN00	LC81840332014194LGN00
9	LC81850322013246LGN00	LC81840322014194LGN00	LC81840332013175LGN00	LC81830332014187LGN00
10	LC81850322013230LGN00	LC81850322014185LGN00	LC81840332013159LGN00	LC81840332014178LGN00
11	LC81850322013214LGN00	LC81840322014178LGN00	LC81840322013143LGN03	LC81830332014171LGN00
12	LC81850322013198LGN00	LC81850322014169LGN00	LC81830332013136LGN01	LC81840332014146LGN00
13	LC81850322013182LGN00	LC81840322014162LGN00	LC81830332013120LGN01	LC81830332014139LGN00
14	LC81850322013166LGN00	LC81850322014153LGN00	LC81840332013207LGN00	LC81840332014130LGN00
15	LC81850322013150LGN00	LC81840322014146LGN00	LC81830332013200LGN00	LC81830332014123LGN00
16		LC81840322013255LGN00	LC81840332013191LGN00	LC81830332014107LGN00
17		LC81850322013246LGN00	LC81840332013175LGN00	LC81840322014098LGN00
18		LC81840322013239LGN00	LC81840332013159LGN00	LC81830332014091LGN00
19		LC81850322013230LGN00	LC81840322013143LGN03	LC81840332014066LGN00
20		LC81850322013198LGN00	LC81830332013136LGN01	LC81830332014059LGN00
21		LC81840322013191LGN00	LC81830332013120LGN01	LC81840332014050LGN00
22		LC81850322013182LGN00	LC81830332013104LGN01	LC81830332014043LGN00
23		LC81840322013175LGN00		LC81840322015197LGN00
24		LC81850322013150LGN00		LC81830332015190LGN00
25		LC81840322013143LGN03		LC81840322015181LGN00
26		LC81850322013134LGN01		LC81830332015174LGN00
27				LC81840332015149LGN00
28				LC81830332015142LGN00
29				LC81840332015133LGN00
30				LC81830332015126LGN00
31				LC81830332015094LGN00
32				LC81840322015085LGN00
33				LC81830332015078LGN00
34				LC81840322015069LGN00

35				LC81840332015053LGN00
36				LC81830332015046LGN00
37				LC81840332015037LGN00
38				LC81830332015030LGN00

Για τις λίμνες, για τις οποίες υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις για τη θερμοκρασία, εκτός από τις από τις ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες, χρησιμοποιήθηκαν εκ νέου δορυφορικές εικόνες Landsat-8 χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση, στις οποίες είναι διαθέσιμα και τα 2 θερμικά κανάλια που διαθέτει ο Landsat-8, τα B10 και B11.

Ο Πίνακας 16 αναφέρει συνοπτικά το πλήθος των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν, η λήψη των οποίων απείχε χρονικά από δειγματοληψία της λίμνης ενδιαφέροντος διάστημα το πολύ ίσο με 15 ημέρες.

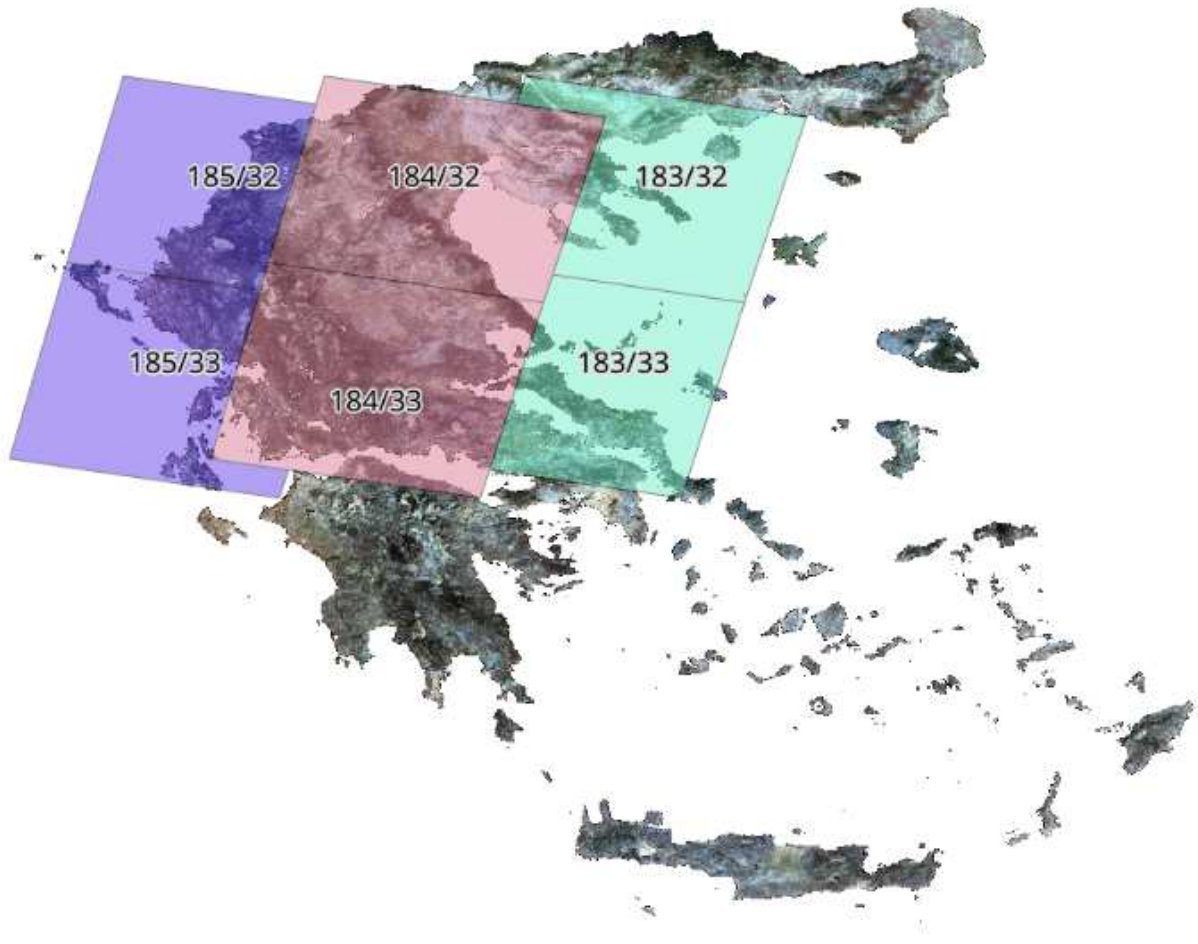
**Πίνακας 16: Πλήθος Δορυφορικών εικόνων SR και TIRS ανά λίμνη και path/row**

ΛΙΜΝΕΣ	WRS Path	WRS Row	Πλήθος Εικόνων Surface Reflectance	Πλήθος Εικόνων TIRS
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΤΑΥΡΩΠΟΥ	184	33	16	16
ΛΙΜΝΗ ΒΟΛΒΗ	183/184	32	26	26
ΛΙΜΝΗ ΤΡΙΧΩΝΙΔΑ	184	33	12	12
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ	184/185	33	31	31
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ	184/185	33	25	25
ΛΙΜΝΗ ΑΜΒΡΑΚΙΑ	184/185	33	29	29
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΠΟΛΥΦΥΤΟΥ	184	32	13	13
ΛΙΜΝΗ ΒΕΓΟΡΙΤΙΔΑ	184/185	32	26	26
ΛΙΜΝΗ ΥΛΙΚΗ	183	33	8	8
ΛΙΜΝΗ ΜΕΓΑΛΗ ΠΡΕΣΠΑ	185	32	15	15
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ (α)	184	32/33	55	-
ΤΕΧΝΗΤΗ ΛΙΜΝΗ ΚΑΡΛΑ (β)	183	33		



Στο χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τροχιές για τις εικόνες Landsat-8 που χρησιμοποιήθηκαν.

**Χάρτης 2: Τροχιές των εικόνων Landsat-8 που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία**



Για την άντληση της φασματικής πληροφορίας των σημείων δειγματοληψίας, οι εικόνες ομαδοποιήθηκαν ανά λίμνη και σημείο δειγματοληψίας και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα shapefiles με τις συντεταγμένες δειγματοληψίας. Η εξαγωγή των τιμών ανακλαστικότητας από τις εικόνες για τις συντεταγμένες δειγματοληψίας έγινε με χρήση κώδικα Python. Ο κώδικας αποκρινόταν με τη δημιουργία ενός λογιστικού φύλλου, το οποίο για τις συντεταγμένες δειγματοληψίας -pixel ενδιαφέροντος περιείχε για κάθε εικόνα τις εξής πληροφορίες:

1. το όνομα της εικόνας
2. τα path/row
3. τη μέρα λήψης (DOY)
4. το ποσοστό συννεφιάς (για όλη την εικόνα)

5. οι τιμές του pixel για όλα τα κανάλια της εικόνας
6. οι τιμές των δεικτών `cfmask` , `cfmask_conf`, `sr_cloud` οι οποίες αφορούν τη νεφοκάλυψη

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι εικόνες ομαδοποιήθηκαν, ώστε οι σταθμοί δειγματοληψίας για κάθε λίμνη να βρίσκονται εντός των ορίων της εικόνας. Να σημειωθεί ότι ο σταθμός βρίσκεται μεν εντός των ορίων, αλλά υπάρχει πιθανότητα να βρίσκεται υπό σύννεφο/σκιά. Αυτό δεν ελέγχθηκε σ' αυτό το στάδιο. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν και από τις οποίες αντλήθηκαν οι παραπάνω πληροφορίες απείχαν χρονικά από την ημέρα λήψης του δείγματος διάστημα μικρότερο ή ίσο των 15 ημερών.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν οι εξαιρετικά ακραίες τιμές που οφείλονταν είτε σε λανθασμένη ατμοσφαιρική διόρθωση είτε σε παρουσία σύννεφου ή σε pixel που δεν αντιστοιχούσε σε νερό. Για την εκπλήρωση των δύο τελευταίων όρων λήφθηκαν υπόψη οι τιμές των δεικτών `cfmask`, `cfmask_conf`, `sr_cloud`. Όσες παρατηρήσεις ικανοποίησαν τις παραμέτρους χρησιμοποιήθηκαν στο επόμενο στάδιο της διερεύνησης της συσχέτισης των ψηφιακών πολυφασματικών δεδομένων με τα in-situ δεδομένα.

#### **B.1.4 Διερεύνηση Συσχέτισης των ψηφιακών πολυφασματικών δεδομένων με τα in-situ δεδομένα με χρήση μοντέλων παλινδρόμησης**

Οι σχέσεις μεταξύ των τιμών των ποιοτικών παραμέτρων και των τιμών ανακλαστικότητας των εικόνων Landsat-8 εξετάστηκαν μέσω τεχνικών παλινδρόμησης. Τα μοντέλα παλινδρόμησης συμβάλλουν στην εκτίμηση της τιμής μίας τυχαίας μεταβλητής, όταν δίνεται η τιμή μίας άλλης μεταβλητής ή άλλων μεταβλητών. Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση (*Linear Regression*), η επιλογή της οποίας βασίστηκε στα εμπειρικά μοντέλα της βιβλιογραφίας.

##### **B.1.4.1 Δείκτες συσχετίσεων**

Σ' αυτό το στάδιο, έγινε η επιλογή των καναλιών/ δεικτών για κάθε μία από τις παραμέτρους, με σκοπό να γίνουν δοκιμές για να εντοπιστούν οι εξισώσεις που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες συσχετίσεις. Το κοινό μέρος στη διερεύνηση των προαναφερθέντων δεικτών είναι ότι για κάθε δείκτη αρχικά αναζητήθηκαν συσχετίσεις βάσει όλων των διαθέσιμων δεδομένων και στη συνέχεια για επιμέρους ομαδοποιήσεις των δεδομένων. Τόσο για τη χλωροφύλλη-α όσο και τη θερμοκρασία και το βάθος Secchi αναζητήθηκαν συσχετίσεις με τη μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Για την πραγματοποίηση των παλινδρομήσεων, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, και, προκειμένου να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία, δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος κώδικας Matlab. Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι δείκτες που δημιουργήθηκαν για τον εντοπισμό συσχέτισης με τους ποιοτικούς δείκτες των in-situ δεδομένων.

##### **Χλωροφύλλη-α**

Για τη χλωροφύλλη υπολογίστηκαν συνολικά 155 δείκτες για τη διερεύνηση της συσχέτισης των δορυφορικών με τις επίγειες μετρήσεις, με αφετηρία διερεύνησης τις προτάσεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Οι 17 εξ αυτών ήταν ή κάποιο κανάλι ή ο λογάριθμος ή  $\exp$  ενός καναλιού. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν 58 δείκτες που χρησιμοποιούσαν σχέσεις 2 καναλιών και λογαρίθμους ή  $\exp$  αυτών. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν και 80 περισσότερο σύνθετοι δείκτες με τρία ή τέσσερα κανάλια (44 τριών καναλιών -36 τεσσάρων καναλιών).

Πίνακας 17: Δείκτες καναλιών για συσχέτιση της χλωροφύλλης-α

Δείκτες 1 καναλιού	Δείκτες 2 καναλιών	Δείκτες 2 καναλιών	Δείκτες 3 καναλιών	Δείκτες 4 καναλιών
b1	b1+b2	$\ln(b2-b7)$	b1+b2-b4	$(b3-b6)\div(b1-b7)$
b2	b1-b7	$\ln b2-\ln b3$	b1+b3-b4	$(b5-b4)\div(b5+b4)$
b3	b2-b7	$\log(b2\div b3)$	b2+b3-b4	$(b2-b7)\div(b3-b6)$
b4	b4-b7	$\log(b3\div b4)$	b3+b5-b4	$(b2-b6)\div(b3-b6)$
b5	b3÷b2	$\ln b2-\ln b4$	b1+b2-b7	$(b2-b4)\div(b3-b6)$
b6	b4÷b2	$\ln b3-\ln b4$	b1+b2-b5	$(b3+b4-b5)\div b1$
b7	b2÷b3	$\exp(b4\div b2)$	b1+b6-b7	$b3\div(b1+b2+b5)$
$\exp(b2)$	b2÷b4	$\exp(b3\div b4)$	b1+b2-b6	$(b3+b4)\div(b1+b5)$
$\ln b2$	b3÷b4	$\exp(b2\div b3)$	b1+b5-b7	$(b1+b5-b4)\div b3$
$\ln b4$	b4÷b3	$\exp(b2\div b4)$	b2+b4-b5	$(b3-b6)\div(b1-b7)$
$\exp(b3)$	b5÷b3	$\exp(b5\div b3)$	b2+b4-b7	$(b3+b7-b5)\div b1$
$\ln b3$	b5÷b1	$\exp(b5\div b1)$	b3+b4-b7	$b1\div(b3+b7-b5)$
$\exp(b4)$	b1÷b5	$\exp(b5\div b2)$	b3+b4-b6	$(b3+b7-b5)\div b2$
$\ln b4$	b4÷b5	$\exp(b1\div b5)$	b2+b4-b6	$b2\div(b3+b7-b5)$
$\exp(b5)$	b5÷b4	$\exp(b2\div b5)$	b3+b4-b5	$(b3+b4-b5)\div b1$
$\exp(b1)$	b2÷b5	$\exp(b4\div b5)$	b1+b4-b5	$b3\div(2xb1+b5)$
$\ln b5$	b5÷b2	$\exp(b3\div b1)$	b1+b4-b7	$(b3+b4-b5)\div b1$
	b2-b4	$\exp(b3\div b5)$	$(b1+b6)\div b4$	$(2xb1+b5)\div b3$
	b3-b7	$\exp(b1\div b3)$	b2+b5-b7	$b3\div(b1+b5-b7)$
	b3÷b1	$\exp(b4\div b3)$	b2+b6-b7	$b2\div(b1+b2+b3)$
	b1-b4	$\exp(b3\div b2)$	$(b3\div b2)+b4$	$b4\div(b1+b2+b3)$
	b1÷b3	$\exp(b5\div b4)$	$(b1-b3)\div b4$	$(b1-b4)\div(b3-b4)$
	b3-b6		$(b4\div b3)+b5$	$b3\div(b1+b2+b3)$
	b2-b7		$(b2-b3)\div b1$	$(b4-b7)\div(b4+b7)$
	b2-b6		$(b5\div b4)+b6$	$\ln((b4-b7)\div(b4+b7))$
	b1-b7		$(b2-b4)\div b3$	$\ln((b3+b4)\div(b1+b2))$
	b3÷b5		$(b1-b3)\div b2$	$\ln((b1+b2+b5)\div b3)$
	b1-b6		$\ln((b1+b6)\div b4)$	$\ln((b1+b5-b4)\div b3)$
	b5+b6		$\ln((2xb2+b5)\div b3)$	$\ln((b3-b6)\div(b1-b7))$
	$(b4+b5)\div 2$		$\ln(b3\div(2xb1+b5))$	$\ln((b3+b4-b5)\div b1)$
	$(b2+b3)\div 2$		$\exp(b3\div(2xb1+b5))$	$\exp(b3\div(b1+b2+b7))$
	$(b3+b4)\div 2$		$\exp(b3\div(2xb2+b5))$	$\exp(b3\div(b1+b2+b6))$
	$(b1+b2)\div 2$		$\exp(b3\div(2xb1+b7))$	$\exp((b2-b4)\div(b3-b4))$
	b1+2xb2		$\exp(b3\div(2xb1+b6))$	$\exp((b1+b2+b3)\div b2)$
	2xb1+b2		$\exp((b1+b3)\div b2)$	$\exp((b1-b3)\div(b2-b4))$
			$\exp(b4\div(b2+b6))$	$\exp((b3\div(b2+b6-b5))$
			$\exp(b4\div(b2+b7))$	
			$\exp(b4\div(b1+b6))$	
			$\exp(b4\div(b1+b7))$	

			$\exp(b4 \div (b2 + b5))$	
			$\exp(b3 \div (2 \times b1 + b5))$	
			$\exp(b3 \div (2 \times b2 + b5))$	
			$\exp(b3 \div (2 \times b1 + b7))$	
			$\exp(b3 \div (2 \times b1 + b6))$	
<b>Σύνολο: 17</b>	<b>36</b>	<b>22</b>	<b>44</b>	<b>36</b>

### Θερμοκρασία

Για τη Θερμοκρασία υπολογίστηκαν συνολικά 46 δείκτες για τη διερεύνηση της συσχέτισης των δορυφορικών με τις επίγειες μετρήσεις, με αφετηρία διερεύνησης τις προτάσεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Οι 15 εξ αυτών ήταν ή κάποιο κανάλι ή ο λογάριθμος ή exp ενός καναλιού. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν 26 δείκτες που χρησιμοποιούσαν σχέσεις 2 καναλιών και λογαρίθμους ή εκρατών. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν και 5 περισσότερο σύνθετοι δείκτες με τρία ή τέσσερα κανάλια (2 τριών καναλιών -3 τεσσάρων καναλιών).

**Πίνακας 18: Δείκτες καναλιών για συσχέτιση της θερμοκρασίας**

Δείκτες 1 καναλιού	Δείκτες 2 καναλιών	Δείκτες 2 καναλιών	Δείκτες 3 καναλιών	Δείκτες 4 καναλιών
B10	$(B10+B11) \div 2$	$\exp(B10 \div B11)$	$(b4 \div b3) + b5$	$b4 \div (b1 + b2 + b3)$
B11	$b3 \div b4$	$\exp(B11 \div B10)$	$(b3 \div b2) + b4$	$b2 \div (b1 + b2 + b3)$
b1	$b4 \div b3$	$\ln((B10+B11) \div 2)$		$(b1 - b4) \div (b3 - b4)$
b2	$b3 \div b7$	$\ln b2 - \ln b4$		
b3	$b4 \div b2$	$\ln b2 - \ln b3$		
b4	$b2 \div b4$	$\log(b2 \div b3)$		
b5	$b3 - b4$	$\ln b3 - \ln b4$		
b6	$b3 \div b2$	$\log(b3 \div b4)$		
b7	$b2 \div b3$	$\exp(b4 \div b2)$		
$\ln(B10)$		$\exp(b2 \div b4)$		
$\ln(B11)$		$\exp(b3 \div b2)$		
$\ln b2$		$\exp(b2 \div b3)$		
$\ln b4$		$\exp(b3 \div b4)$		
$\ln(b7)$		$\exp(b4 \div b3)$		
$\exp(b7)$		$\exp(b5 \div (b7 + 1))$		
		$\exp(b1 \div (b7 + 1))$		
		$\exp(b2 \div (b7 + 1))$		
<b>Σύνολο: 15</b>	<b>9</b>	<b>17</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

## Βάθος Secchi

Πίνακας 19: Δείκτες καναλιών για συσχέτιση του βάθους Secchi

Δείκτες 1 καναλιού	Δείκτες 2 καναλιών	Δείκτες 3 καναλιών	Δείκτες 4 καναλιών	Δείκτες 4 καναλιών	Δείκτες 4 καναλιών	Δείκτες 4 καναλιών
b1	b1-b3	$b3x(2xb1+b5)$	$(b1-b7)/(b3-b6)$	$(b3+b7-b5)/b1$	$\exp((b3-b6)/(b1-b7))$	$\exp((b3-b5)/(b2-b3))$
b2	b2-b6	$b3x(2xb2+b5)$	$(b3-b6)/(b1-b7)$	$b1/(b3+b7-b5)$	$\exp(b3/(b1+b2+b6))$	$(b1-b2)/(b2-b3)$
b3	b3-b7	$b3x(2xb1+b7)$	$(b3+b4-b5)/b1$	$(b3+b7-b5)/b2$	$\exp(b3/(b1+b2+b7))$	$\exp((b3-b6)/(b2-b3))$
b4	b1-b6	$(2xb1+b5)xb3$	$b3/(b1+b2+b5)$	$b2/(b3+b7-b5)$	$(b3+b4-b5)/b1$	$\exp((b4-b7)/(b2-b3))$
b5	b4-b7	$\ln((b2+b6)xb3)$	$\exp(b3/(2xb1+b5))$	$(b3+b4-b5)/b1$	$\exp(b3/(b1+b2+b5))$	$\exp((b3-b4)/(b1-b5))$
b6	b1-b2	$\ln((b2+b5)xb3)$	$\exp(b3/(2xb2+b5))$	$\ln((b1+b2+b5)/b3)$	$b1/(b3+b4-b5)$	$\exp((b6-b7)/(b2-b3))$
b7	b3-b5	$\ln((b2+b7)xb3)$	$\exp(b3/(2xb1+b7))$	$(b3+b7-b5)/b2$	$\ln(b1/(b3+b4-b5))$	$(b1-b3)/(b2-b4)$
lnb2	b4 x b2	$\ln((2xb2+b5)xb3)$	$\exp(b3/(2xb1+b6))$	$\exp((b1-b3)/(b2-b4))$	$\ln(b1+b2+b5)/b3)$	$(b1-b2)/(b2-b5)$
lnb4	lnb2-lnb4	$\exp(b3x(b2+b6))$	$\ln((b1+b2+b5)/b3)$	$b3/(b1+b5-b7)$	$(b3+b4)/(b2+b5)$	$(b1-b2)/(b2-b3)$
	b3-b4	$\ln((2xb2+b6)xb3)$	$\exp(b3/(b1+b2+b6))$	$\exp((b3-b6)/(b2-b7))$	$\ln((b1+b2+b6)/b3)$	$(b1-b2)/(b2-b4)$
	ln(b1-b3)	$(b1-b3)xb2$	$(b3+b4)/(b1+b5)$	$(b2-b7)/(b3-b6)$	$\exp((b3-b4)/(b2-b3))$	$(b1-b2)/(b2-b6)$
	$\exp(b4xb2)$	$\ln(b1-b3)xb2$	$\exp(b3/(b1+b2+b7))$	$\ln((b2-b7)/(b3-b6))$	$\exp((b2-b7)/(b1-b6))$	$(b1-b2)/(b3-b6)$
	b3xb2	$b3xb2)+b4$	$\ln((2xb2+b5)/b3)$	$(b3-b5)/(b2-b7)$	$\exp((b3-b7)/(b2-b3))$	$\exp((b3+b7-b5)/b1)$
	lnb2-lnb3		$(b1+b5-b4)/b3$	$\exp((b3-b5)/(b2-b7))$	$\exp((b2-b7)/(b1-b4))$	$\exp((b3-b4)/(b1-b6))$
	$\log(b2xb3)$		$\ln((b1+b5-b4)/b3)$	$\ln((b1-b7)/(b3-b6))$	$\exp((b1-b7)/(b2-b3))$	$\exp((b3-b5)/(b2-b3))$
	$\exp(b3xb2)$		$\ln((b3-b6)/(b1-b7))$	$\exp(b3/(b2+b7))$	$\exp((b3-b7)/(b1-b4))$	
	b2xb3		$\ln((b3+b4-b5)/b1)$	$(b3-b5)/(b1-b7)$	$\exp((b3-b7)/(b1-b6))$	
<b>Σύνολο: 9</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>15</b>

Για το βάθος Secchi, υπολογίστηκαν συνολικά 105 δείκτες για τη διερεύνηση της συσχέτισης των δορυφορικών με τις επίγειες μετρήσεις, με αφετηρία διερεύνησης τις προτάσεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Οι 9 εξ αυτών ήταν ή κάποιο κανάλι ή ο λογάριθμος ή exp ενός καναλιού. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν 17 δείκτες με σχέσεις 2 καναλιών και λογαρίθμους ή exp αυτών. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν και 13 περισσότερο σύνθετοι δείκτες με τρία και 66 με τέσσερα κανάλια αντίστοιχα.

#### B.1.4.2 Θεωρία Παλινδρόμησης

Οι σχέσεις μεταξύ των τιμών των ποιοτικών παραμέτρων και των τιμών ανακλαστικότητας των εικόνων Landsat-8 εξετάστηκαν μέσω τεχνικών Παλινδρόμησης. Τα μοντέλα παλινδρόμησης συμβάλλουν στην εκτίμηση της τιμής μίας τυχαίας μεταβλητής, όταν δίνεται η τιμή μίας άλλης μεταβλητής ή άλλων μεταβλητών. Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear-Regression)

#### Γενική Γραμμική Παλινδρόμηση

Η Γενική Γραμμική Παλινδρόμηση αποτελεί μία τεχνική μοντελοποίησης της σχέσης μεταξύ μίας βαθμωτής μεταβλητής  $Y$  και μίας ή περισσότερων μεταβλητών  $X_i$  μέσω γραμμικών εξισώσεων. Για ένα δείγμα  $n$  παρατηρήσεων και  $k$  ανεξάρτητων μεταβλητών  $X$  το γραμμικό μοντέλο θα έχει την μορφή:

$$\diamond Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k,$$

όπου η μεταβλητή  $Y$  καλείται εξαρτημένη μεταβλητή και  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  είναι οι άγνωστοι συντελεστές της παλινδρόμησης. Σε περίπτωση ύπαρξης μίας μόνο ανεξάρτητης μεταβλητής ( $k=1$ ) η μέθοδος καλείται Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση. Οι τιμές των συντελεστών  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  μπορούν να προσεγγιστούν μέσω διαφρων μεθόδων. Η πιο γνωστή μέθοδος είναι αυτή των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία προσαρμόζει την καμπύλη στα δοσμένα στοιχεία έτσι, ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων να είναι το ελάχιστο δυνατό, δηλαδή:

$$\diamond S_{\text{ει}}^2 = \text{minimum} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad i=1,2,\dots,n, \quad \text{όπου } \hat{Y}_i \text{ η προβλεπόμενη τιμή της } Y_i.$$

#### Στατιστικές παράμετροι $R^2$ και p-value

Η ποιότητα της πρόβλεψης που δίνει η ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης ελέγχεται μέσω του **συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$**  (*Coefficient of determination*), ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$\diamond R^2 = 1 - SS_{\text{err}} / SS_{\text{tot}}$$

όπου  $SS_{\text{err}}$  είναι το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων του μοντέλου στις παρατηρήσεις της εξαρτημένης μεταβλητής και  $SS_{\text{tot}}$  είναι το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων των

αποστάσεων των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής από τη μέση της τιμή.

Υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\diamond SS_{err} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$\diamond SS_{tot} = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

Το εύρος των τιμών του συντελεστή  $R^2$  περιορίζεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Όσο η τιμή του συντελεστή αυτού προσεγγίζει τη μονάδα, τόσο καλύτερο είναι το αναπτυχθέν μοντέλο παλινδρόμησης και τόσο περισσότερο η προκύπτουσα ευθεία αντιπροσωπεύει τα δεδομένα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διαφορά ανάμεσα στο θεωρηθέν και στο πραγματικό μοντέλο τείνουν στο μηδέν. Αντιθέτως, όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $R^2$ , τόσο μικρότερη είναι και η συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές. Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον στην παρούσα εργασία για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η τελευταία μεταβλητή που υπολογίστηκε είναι η p-value, που αποτελεί το παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας. Εκφράζει την πιθανότητα η παρατηρηθείσα σχέση μεταξύ των μεταβλητών στο υπό μελέτη δείγμα να εμφανίζεται από τύχη και να μην ικανοποιεί μελλοντικές τιμές δεδομένων του ίδιου πληθυσμού. Αποτελεί, επομένως, έναν δείκτη αξιοπιστίας του αποτελέσματος και, όσο υψηλότερη είναι η τιμή της, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα λάθους στην αποδοχή του αποτελέσματος του μοντέλου.

Συνήθως, σε πολλούς τομείς της έρευνας, μία p-value της τάξης του 0.05 αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή μεταξύ ενός αποδεκτού και μη αποδεκτού αποτελέσματος (Drapear & Smith, 1997).

Οι τιμές της p-value εξαρτώνται από το μέγεθος του δείγματος. Για αυτό το λόγο σε περιπτώσεις μικρών δειγμάτων χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς η μικρή τιμή της μπορεί να οφείλεται στο μικρό δείγμα.



## B.2. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που έδωσαν οι συσχετίσεις των δεδομένων από τις δειγματοληψίες του νερού στην περιοχή μελέτης και των φασματικών δεδομένων του Landsat-8. Για τις συσχετίσεις χρησιμοποιήθηκε η απλή γραμμική παλινδρόμηση. Σημειώνεται ότι είναι πιθανό, με χρήση άλλου τύπου συνάρτησης στις παλινδρομήσεις, να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, αλλά η απλή γραμμική παλινδρόμηση, δεδομένου του ικανοποιητικού πλήθους παρατηρήσεων, σίγουρα αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για την ανάδειξη δυνατότητας συσχέτισης των επίγειων με τα δορυφορικά δεδομένα.

### B.2.1 Χλωροφύλλη - α

Σ' αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη χλωροφύλλη-α. Για την ανάπτυξη των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η απλή γραμμική παλινδρόμηση. Πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες δοκιμές, αναλόγως με τη συγκέντρωση και την χρονική απόσταση μεταξύ της δειγματοληψίας και δορυφορικής λήψης.

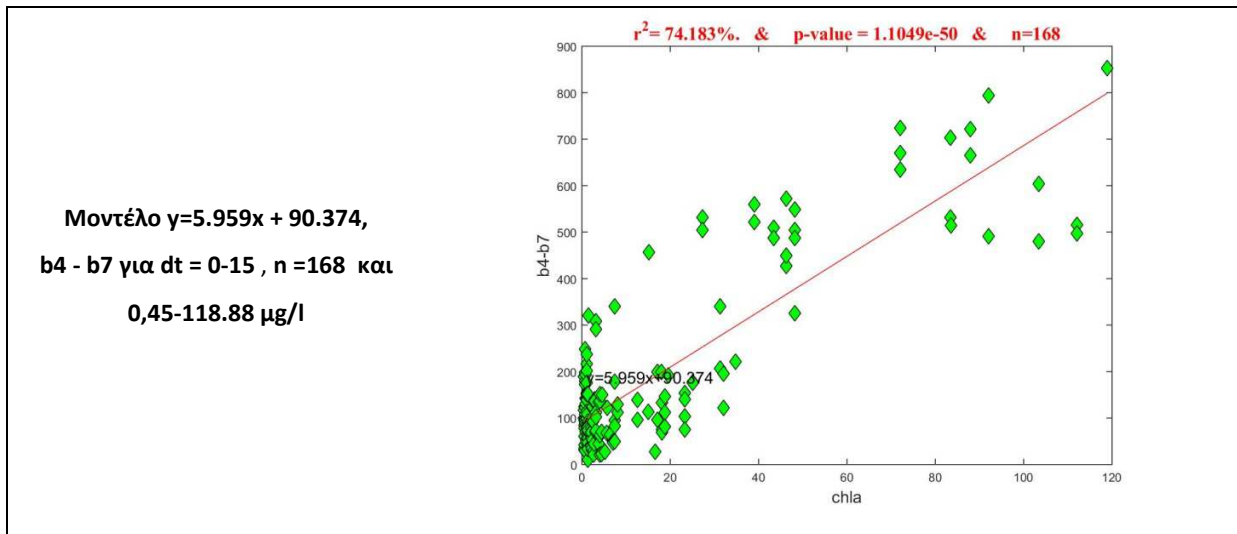
Η απλή γραμμική παλινδρόμηση για το σύνολο των παρατηρήσεων ( $dt=0-15$  ημέρες), καθώς και για δοκιμές με μικρότερη χρονική απόσταση των επίγειων και των δορυφορικών δεδομένων ( $dt=0-5$  και  $dt=0-3$  ημέρες) έδωσε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 20: Συσχετίσεις καναλιών για τη χλωροφύλλη-α

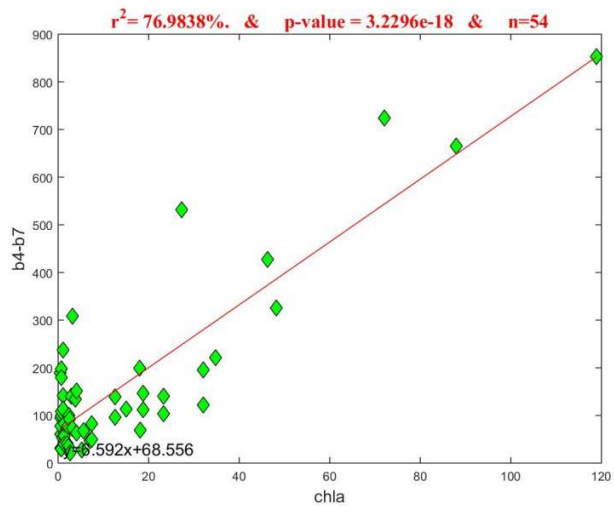
X	dt = 0-15 n =168 0,45-118.88 $\mu\text{g/l}$	dt = 0-5 n = 54 0,45-118.88 $\mu\text{g/l}$	dt = 0-3 n = 39 0,45-72,0 $\mu\text{g/l}$
b4-b7	74.183	76.984	59.588
$\exp(b4 \div b2)$	65.942	70.515	76.824
b3+b4-b5	63.764	62.078	51.838
b3+b4-b6	63.745	63.637	47.027
$(b1-b4) \div (b3-b4)$	63.348	76.719	63.39
b3+b4-b7	62.061	61.511	44.506
b4 <b><math>\div</math></b> b2	61.23	62.261	68.975
b1-b4	60.316	56.553	54.028
$\exp(b4 \div (b2+b7))$	59.284	71.715	76.914
$\exp(b4 \div (b2+b5))$	59.073	62.628	80.4
$\exp(b4 \div (b2+b6))$	56.887	69.599	75.35
$\exp b4$	56.72	66.065	43.257

b3-b7	56.334	53.477	37.665
b2-b4	56.279	51.745	50.184
b3-b6	55.815	55.153	39.84
(b3÷b2)+b4	55.811	61.842	43.403
b4	55.734	61.762	43.257
b4÷(b1+b2+b3)	54.75	56.883	59.552
(b2-b4)÷(b3-b6)	54.678	49.407	56.977
exp((b1+b3)÷b2)	53.73	49.096	73.776
(b3+b4)÷2	52.971	53.816	37.389
b2÷(b1+b2+b3)	51.896	42.998	59.552
expb3	51.896	50.352	34.639
ln((b1+b5-b4)÷b3))	51.698	48.44	63.323
(b1+b5-b4)÷b3	50.179	45.89	59.145

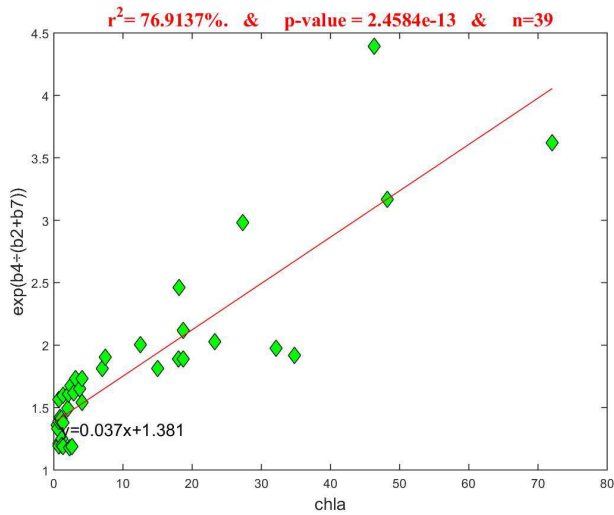
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μοντέλων που παρουσίασαν την καλύτερη συσχέτιση.



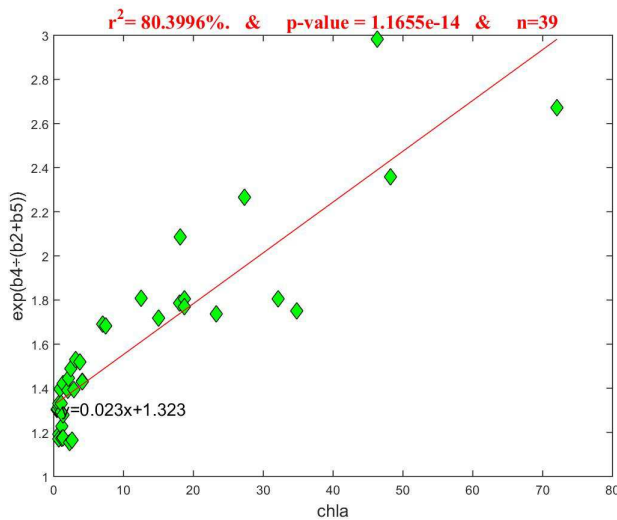
Μοντέλο  $y=6.592x + 68.556$   
dt = 0-5, n = 54, 0.45-118.88 µg/l



Μοντέλο  $y=6.592x + 68.556$   
dt = 0-3, n = 39, 0.45-72,0 µg/l



Μοντέλο  $y=0.023x + 1.323$   
dt = 0-3, n = 39, 0.45-72,0 µg/l



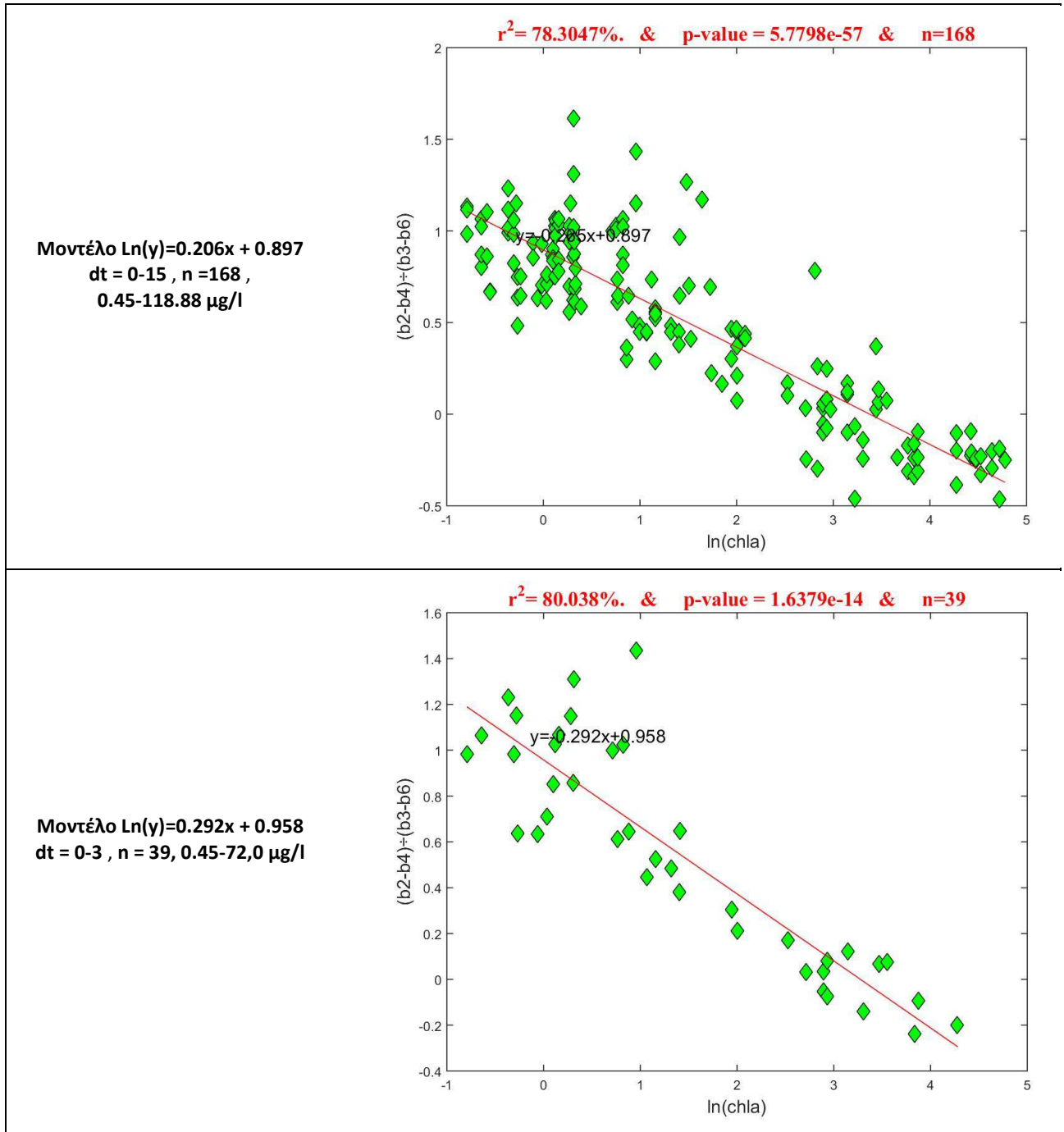
Εικόνα 11: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση της χλωροφύλλης-α

Ομοίως, η γραμμική παλινδρόμηση του λογαρίθμου της χλωροφύλλης για το σύνολο των παρατηρήσεων (dt=0-15 ημέρες), καθώς και για δοκιμές με μικρότερη χρονική απόσταση των επίγειων και των δορυφορικών δεδομένων (dt=0-5 και dt=0-3 ημέρες) έδωσε τα αποτελέσματα του Πίνακα που ακολουθουθεί.

**Πίνακας 21: Συσχετίσεις καναλιών με το λογάριθμο της χλωροφύλλης-α**

LN(X)	dt = 0-15 n =168 0,45-118.88 µg/l	dt = 0-5 n = 54 0,45-118.88 µg/l	dt = 0-3 n = 39 0,45-72,0 µg/l
$(b2-b4) \div (b3-b6)$	78.305	76.853	80.038
$b2-b4$	76.082	71.949	70.727
$b4 \div b2$	75.386	77.375	78.822
$b2 \div (b1+b2+b3)$	74.773	71.265	74.446
$b1-b4$	73.744	70.807	69.611
$\exp(b4 \div b2)$	73.293	74.118	75.392
$\ln((b3+b4) \div (b1+b2))$	71.578	74.341	76.253
$\log(b2 \div b3)$	71.404	71.578	75.842
$(b1+b5-b4) \div b3$	71.08	73.166	73.343
$b3 \div b2$	70.819	71.504	76.178
$\exp((b2-b4) \div (b3-b4))$	70.804	68.473	68.622
$(b1-b4) \div (b3-b4)$	70.548	74.037	77.411
$\ln((b1+b5-b4) \div b3)$	70.478	72.823	73.32
$b4 \div (b1+b2+b3)$	69.675	72.219	72.398
$\exp(b4 \div (b2+b5))$	68.968	71.687	73.306
$\exp((b1+b3) \div b2)$	68.539	69.992	74.542
$b2 \div b3$	67.858	67.527	71.275
$(b2-b7) \div (b3-b6)$	66.072	63.166	69.228
$b3 \div (b1+b2+b3)$	65.197	67.62	72.202
$\exp(b4 \div (b2+b7))$	64.872	64.627	62.977
$(b2-b6) \div (b3-b6)$	64.767	62.029	66.555
$\ln b2 - \ln b4$	64.242	66.416	65.846
$\exp(b3 \div b2)$	63.307	64.204	69.792
$\exp(b4 \div (b2+b6))$	62.742	62.763	61.102
$\ln((2 \times b2 + b5) \div b3)$	62.253	63.413	68.688
$(b1-b3) \div b2$	61.933	64.472	69.426
$(b2-b4) \div b3$	61.933	64.472	69.426
$\exp(b2 \div b3)$	61.29	60.528	63.616
$\ln((b1+b6) \div b4)$	60.126	61.394	62.17
$(b3+b7-b5) \div b2$	60.078	58.617	66.689

Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μοντέλων που παρουσίασαν την καλύτερη συσχέτιση του λογαρίθμου της χλωροφύλλης-α.



Εικόνα 12: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση του λογαρίθμου της χλωροφύλλης-α

Στη συνέχεια επιχειρήθηκε περαιτέρω διερεύνηση και ομαδοποίηση των παρατηρήσεων βάσει συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α, επειδή παρατηρήθηκε ότι οι χαμηλές συγκεντρώσεις έχουν τη μεγαλύτερη δυσκολία προσαρμογής στα μοντέλα που δοκιμάστηκαν. Επιπλέον το δείγμα περιλαμβάνει σημαντικά περισσότερες παρατηρήσεις με χαμηλή συγκέντρωση chl-a. Έτσι, επιχειρήθηκε περαιτέρω διερεύνηση χλωροφύλλης-α για ομαδοποιήσεις των δεδομένων για χαμηλές συγκεντρώσεις με συσχετίσεις που δεν ξεπέρασαν το 35%. Στους Πίνακες 22 και 23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης με χρήση απλής γραμμικής παλινδρόμησης για ομαδοποίηση χαμηλών και μεσαίων συγκεντρώσεων και υψηλών συγκεντρώσεων αντίστοιχα.

**Πίνακας 22: Συσχετίσεις καναλιών για τη χλωροφύλλη-α με επιλογή χαμηλών και μεσαίων συγκεντρώσεων**

X	dt = 0-15 n =101 0,45-4,6μg/l	dt = 0-15 n = 114 0,45-8,07 μg/l	dt = 0-15 n = 13 5.16-8.07μg/l
b2-b4	31.651	33.272	0.006
b1-b4	22.635	25.731	0.105
ln(b2-b7)	22.609	22.962	5.765
b1+b2-b4	22.589	20.822	6.524
lnb2	21.877	20.914	6.49
b2+b3-b4	21.747	17.212	7.036
b2-b6	21.117	20.352	5.369
b2-b7	20.875	19.939	5.968
b1+b2-b5	20.279	16.336	8.136
$\exp((b1+b3)\div b2)$	19.51	36.961	0
b1+b3-b4	18.92	18.92	7.161
b1+b2-b6	18.325	16.002	8.216
$\exp(b4\div(b1+b6))$	17.68	37.2	2.17
$(b2-b4)\div(b3-b6)$			24.459
$\exp(b4\div(b2+b5))$			16.271
$\exp(b4\div(b2+b6))$			14.021

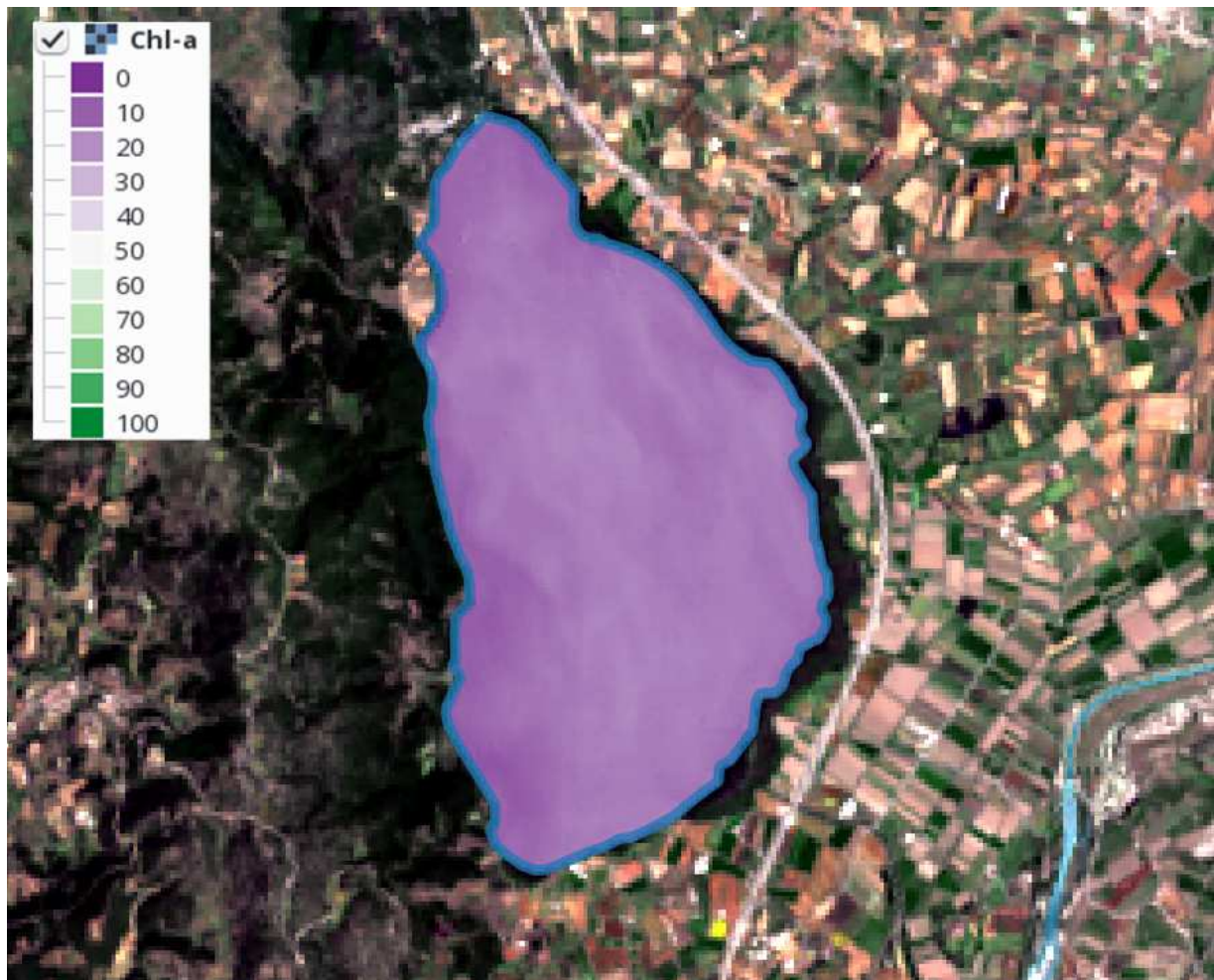
**Πίνακας 23: Συσχετίσεις καναλιών για τη χλωροφύλλη-α με επιλογή υψηλών συγκεντρώσεων**

X	dt = 0-15 n=54 9-118.88 μg/l	dt=0-3 n=13 12.52-72 μg/l
b4-b7	63.312	68.758
b3+b4-b6	60.105	55.423

b3+b4-b7	59.429	54.124
b3-b7	58.804	63.287
b2+b4-b6	58.279	54.833
b3+b4-b5	57.782	53.089
b3-b6	57.241	64.878
b2+b4-b7	56.936	52.868
b2+b4-b5	55.951	51.973
b1+b4-b7	55.512	53.224
b1+b4-b5	54.157	52.704
b2-b6	45.748	66.839
b2-b7	49.796	64.363

Για την καλύτερη κατανόηση της χρησιμότητας των παραπάνω αποτελεσμάτων, στο χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά στη Λίμνη Αμβρακία η εφαρμογή του μοντέλου συσχέτισης της χλωροφύλλης-α, b4-b7.

Χάρτης 3: Εφαρμογή μοντέλου συχέτισης b4-b7 στη Λίμνη Αμβρακία





## B.2.2 Θερμοκρασία

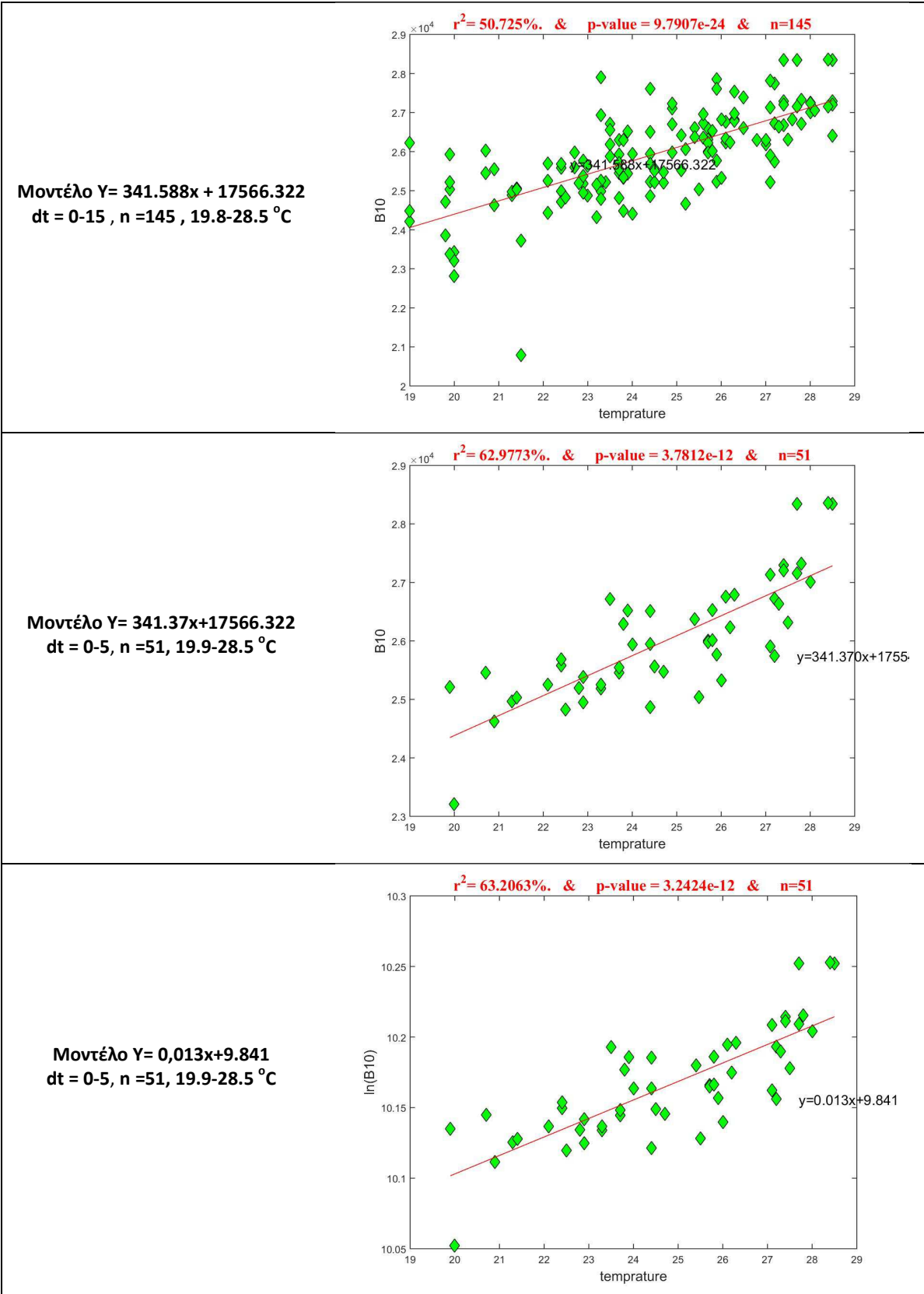
Σ' αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία. Για την ανάπτυξη των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η απλή γραμμική παλινδρόμηση. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές, αναλόγως με την χρονική απόσταση μεταξύ της δειγματοληψίας και της δορυφορικής λήψης.

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση για το σύνολο των παρατηρήσεων (dt=0-15 ημέρες) καθώς και για δοκιμές με μικρότερη χρονική απόσταση των επίγειων και των δορυφορικών δεδομένων (dt=0-5 και dt=0-3 ημέρες) έδωσε τα αποτελέσματα που ακολουθούν:

**Πίνακας 24: Συσχετίσεις καναλιών για την επιφανειακή θερμοκρασία**

X	dt = 0-15 n =145 19,8-28,5 °C	dt = 0-5 n =51 19,9-28,5 °C	dt = 0-3 n =38 19,9-28,5 °C
B10	50.725	62.977	59.784
ln(B10)	49.935	63.206	59.775
(B10+B11)÷2	45.888	54.76	51.322
ln((B10+B11)÷2)	45.233	54.752	51.032
B11	40.184	45.383	41.881
ln(B11)	39.657	45.102	41.292

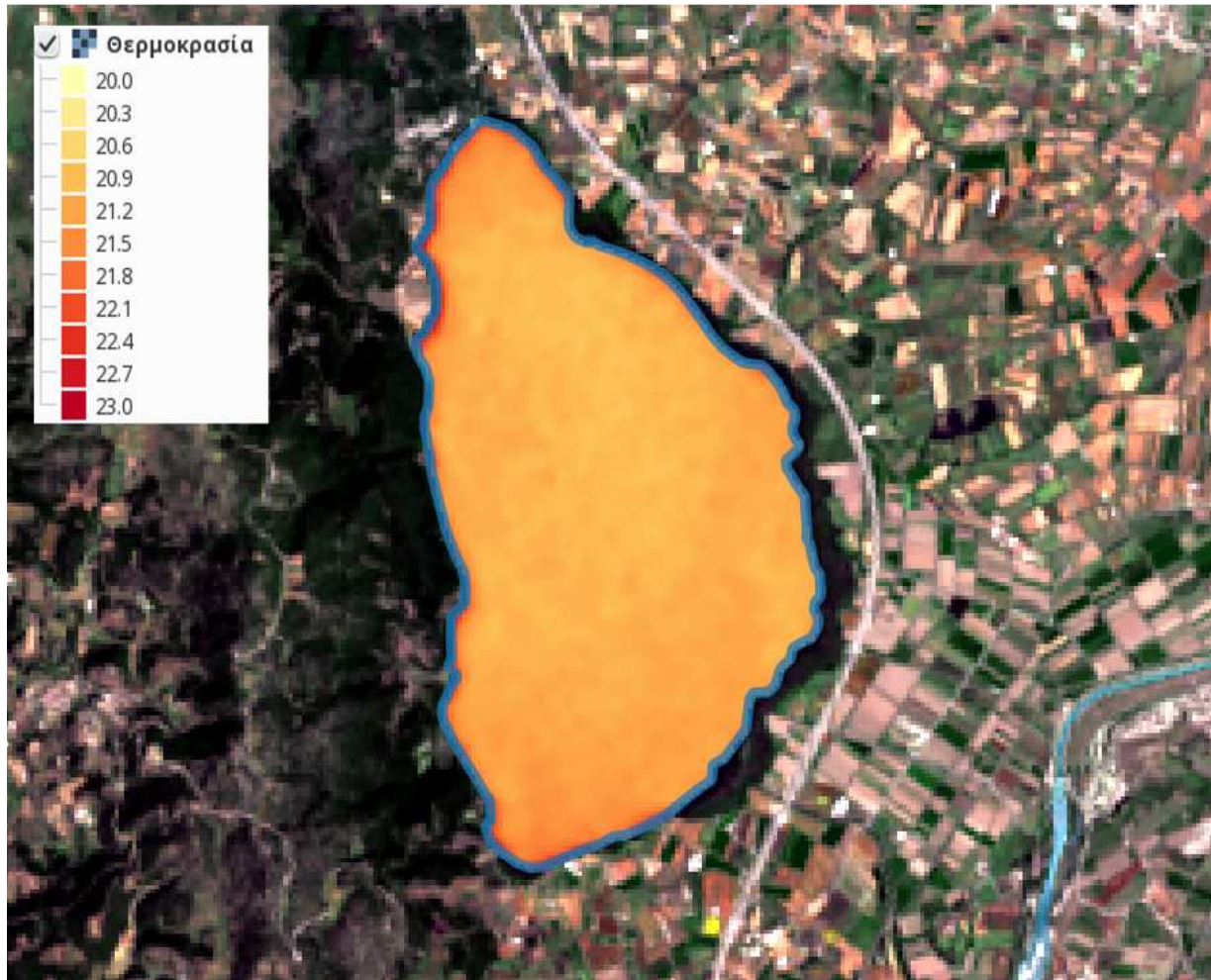
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μοντέλων που παρουσίασαν την καλύτερη συσχέτιση με τη μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.



Εικόνα 13: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση της επιφανειακής θερμοκρασίας

Για την καλύτερη κατανόηση της χρησιμότητας των παραπάνω αποτελεσμάτων, στο χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά στη Λίμνη Αμβρακία η εφαρμογή μοντέλου συσχέτισης της επιφανειακής θερμοκρασίας, για το οποίο είχαμε ικανοποιητική συσχέτιση.

**Χάρτης 4: Εφαρμογή μοντέλου συσχέτισης b10 στη Λίμνη Αμβρακία**



### B.2.3 Βάθος Secchi

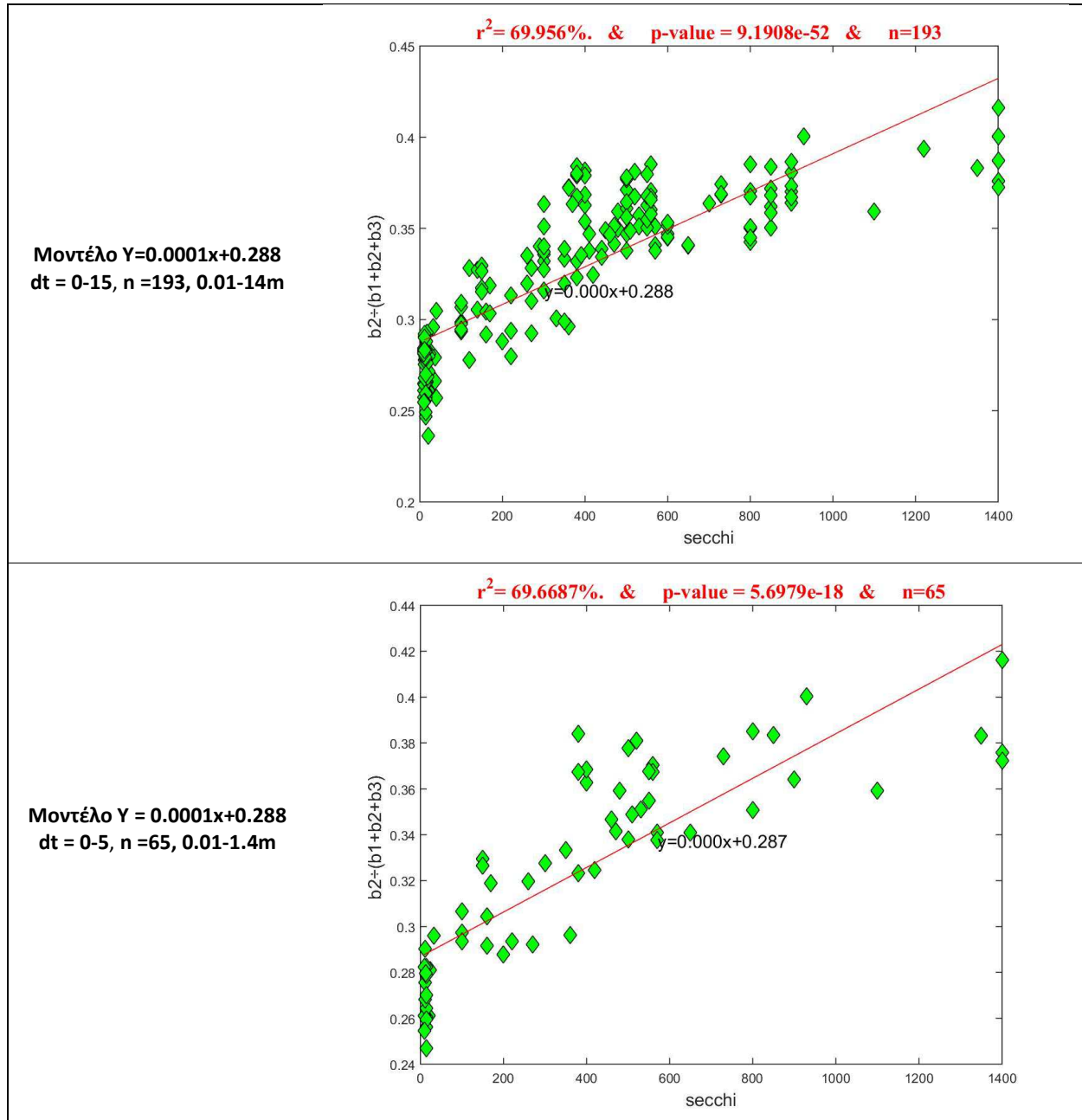
Σ' αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το βάθος Secchi. Για την ανάπτυξη των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η απλή γραμμική παλινδρόμηση. Πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες δοκιμές με μεταβολές της χρονικής απόστασης μεταξύ της δειγματοληψίας και της δορυφορικής λήψης.

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση για το σύνολο των παρατηρήσεων (dt=0-15 ημέρες), καθώς και για μικρότερη απόσταση των επίγειων και των δορυφορικών δεδομένων (dt=0-5) έδωσε τα αποτελέσματα που ακολουθούν:

**Πίνακας 25 : Συσχετίσεις καναλιών για το βάθος του δίσκου Secchi**

X	dt = 0-15 n =193 0,01-14m	dt = 0-5 n =65 0,01-1,4m
$b2 \div (b1+b2+b3)$	69.956	69.669
$\log(b2 \div b3)$	62.811	63.216
$b2 \div b3$	62.466	62.729
$b3 \div b2$	60.12	60.36
$\exp(b2 \div b3)$	59.424	59.398
$(b1+b5-b4) \div b3$	58.646	60.251
$\ln((2xb2+b6) \div b3)$	58.357	61.944
$\ln((2xb2+b5) \div b3)$	57.965	63.39
$\ln(b1 \div (b3+b4-b5))$	57.441	59.629
$b4 \div b2$	57.31	54.137
$\ln((b1+b5-b4) \div b3)$	57.129	59.259
$(b3+b4) \div (b2+b5)$	56.335	59.42
$b1 \div (b3+b4-b5)$	56.284	56.997
$\ln b2 - \ln b4$	54.966	52.045
$b3 \div (2xb2+b5)$	53.585	58.608
$b4 \div (b1+b2+b3)$	53.305	49.654
$\ln((b1+b2+b6) \div b3)$	52.786	57.195
$\ln((b2-b7) \div (b3-b6))$	46.239	65.385

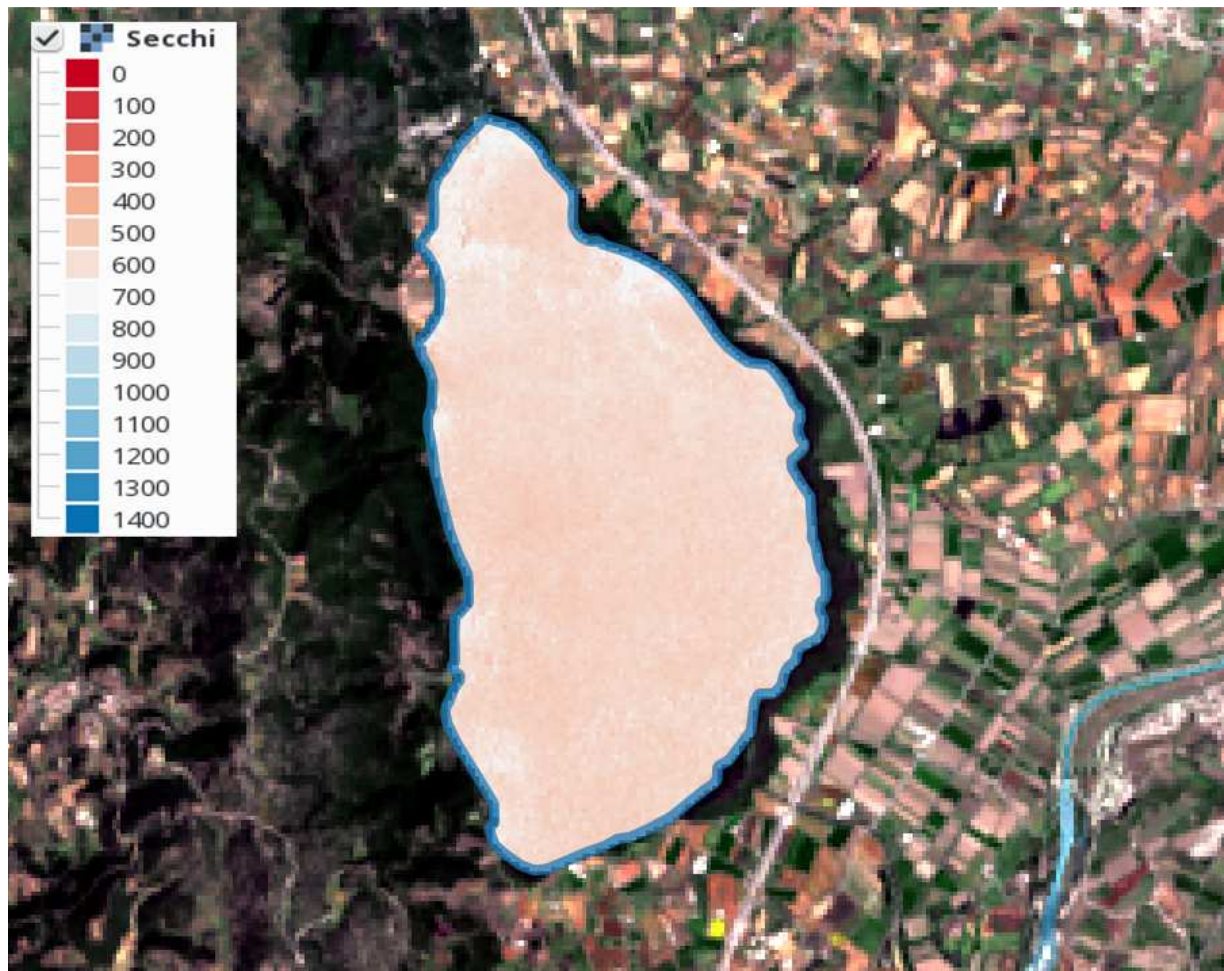
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μοντέλων που παρουσίασαν την καλύτερη συσχέτιση με τη μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.



Εικόνα 14: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση του βάθους Secchi

Όμοια με παραπάνω, για την καλύτερη κατανόηση της χρησιμότητας των αποτελεσμάτων, στο χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά στη Λίμνη Αμβρακία η εφαρμογή μοντέλου συσχέτισης του βάθους Secchi, για το οποίο είχαμε ικανοποιητική συσχέτιση.

Χάρτης 5: Εφαρμογή μοντέλου συχέτισης  $b2/(b1+b2+b3)$  στη Λίμνη Αμβρακία



### B.3. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Τα πολλαπλά πειραματικά αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα και συμφωνούν σε γενικές γραμμές με τη σχετική βιβλιογραφία. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις παραμέτρους και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη χλωροφύλλη-α και το βάθος Secchi με τη βιβλιογραφία.

#### Χλωροφύλλη

Συγκεκριμένα, για την χλωροφύλλη-α επιτεύχθηκαν συσχετίσεις για εύρη συγκεντρώσεων από 0,45 έως 118.88  $\mu\text{g/l}$  της τάξης του 75% (για 168 παρατηρήσεις), ενώ η συσχέτιση αυτή αυξήθηκε ακόμα περισσότερο στη γραμμική παλινδρόμηση του λογαρίθμου της χλωροφύλλης ( $R^2 = 78.305\%$  για 168 παρατηρήσεις). Επιπλέον η έρευνα έδειξε ότι, όταν η χρονική απόκλιση δειγματοληψίας - δορυφορικής λήψης μειώνεται στο  $\text{dt}$  έως 3 ημέρες, η συσχέτιση αυτή φτάνει και για τις παλινδρομήσεις τόσο της χλωροφύλλης όσο και του λογαρίθμου της στο 80% για 39 παρατηρήσεις.

Στη σχετική βιβλιογραφία για τη χλωροφύλλη-α επιτυγχάνονται συσχετίσεις από 67% μέχρι 93%, αλλά για πολύ μικρή χρονική απόκλιση επίγειας με δορυφορική μέτρηση και για αρκετά μικρό πλήθος παρατηρήσεων σε σχέση με την παρούσα εργασία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο στην παρούσα εργασία όσο και στη βιβλιογραφία οι δείκτες με τα καλύτερα αποτελέσματα περιλαμβάνουν το κόκκινο κανάλι, το οποίο στη βιβλιογραφία συνδυάζεται τις περισσότερες φορές με μπλέ ή πράσινο και στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συνδυάζεται με το μπλε κανάλι ή κανάλια στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καλύτερες συσχετίσεις για τη χλωροφύλλη-α που έχουν επιτευχθεί σε σχετικές ερευνητικές εργασίες με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα που έχει ήδη πραγματοποιηθεί και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

**Πίνακας 26 : Αποτελέσματα για τη χλωροφύλλη-α σύμφωνα με τη βιβλιογραφία**

Reference	Equation / Bands Sensor, Model chl-a	$R^2$	N
Zhang & Han, 2015	$(R655-R440)/(R655+R440)$ Landsat OLI, SLR 0.5-2.0 $\mu\text{g/l}$	0.88	8

<b>Kabbara et al. ,2008</b>	$\ln(R485)/\ln(R660)$ Landsat ETM+, LT-LR. 0.3-3.1 $\mu\text{g/l}$	0.72	34
<b>Koponen et al., 2007</b>	L709/L665 MERIS, SLR, 22-95 $\mu\text{g/l}$	0.87	51
<b>Han and Jordan, 2005</b>	$\text{Log}(R485)/\text{Log}(R660)$ LS 7 ETM+	0.67	16
<b>Giardino et al., 2001, Wang et al., 2006</b>	TM2, TM3 LS 5 TM	0.71	8
<b>Hellweger et al., 2004</b>	$\text{Log}(TM2/TM3)$ LS TM	0.78	16
<b>Μουντογιαννάκη, 2015</b>	R655-R2200 Landsat 8 10-20 $\mu\text{g/l}$	0.93	7
<b>Θεολόγου et al., 2015</b>	$R480/(R440+R480+R560)$ Landsat 8	0.93	12

**Πίνακας 27: Αποτελέσματα για τη χλωροφύλλη-α σύμφωνα με την παρούσα εργασία**

<b>Equation / Bands Sensor, Model chl-a</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>N</b>	<b>dt</b>
R655-R2200 Landsat 8 0,45-118.88 $\mu\text{g/l}$	0.74	168	0-15
R655-R2200 Landsat 8 0,45-118.88 $\mu\text{g/l}$	0.77	54	0-5
$\exp(R655 \div (R480+865))$ Landsat 8 0,45-72 $\mu\text{g/l}$	0.80	39	0-3



## Βάθος Secchi

Η διερεύνηση για την ύπαρξη συσχέτισης στο βάθος Secchi έδωσε συσχετίσεις της τάξης του 70% για πλήθος N=193 παρατηρήσεις, για μεγάλο εύρος τιμών από 0,01 έως 14m και για χρονική απόκλιση δειγματοληψίας - δορυφορικής λήψης 0-15 ημέρες. Αντίστοιχη συσχέτιση εντοπίστηκε και, όταν μειώθηκε η χρονική απόκλιση, για μικρότερο όμως εύρος τιμών από 0,01-1,4m και για N=65 παρατηρήσεις.

Στη σχετική βιβλιογραφία για το βάθος Secchi επιτυγχάνονται συσχετίσεις από 48% μέχρι 85% αλλά για πολύ μικρή χρονική απόκλιση επίγειας με δορυφορική μέτρηση και για αρκετά μικρό πλήθος παρατηρήσεων σε σχέση με την παρούσα εργασία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, τόσο στην παρούσα εργασία όσο και στη βιβλιογραφία, οι δείκτες με τα καλύτερα αποτελέσματα περιλαμβάνουν το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο κανάλι, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις συνδυάζονται με κάποιο κανάλι στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καλύτερες συσχετίσεις για το βάθος Secchi που έχουν επιτευχθεί σε σχετικές ερευνητικές εργασίες με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα που έχει ήδη πραγματοποιηθεί και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

**Πίνακας 28: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία για το βάθος Secchi**

Reference	Equation / Bands Sensor, Model SD range	R <sup>2</sup>	N
Kabbara et al, 2008	<b>Ln(R485), Ln(R560)</b> Landsat ETM+, 2-11 m	0.54	35
Kratzer et al., 2008	<b>R490/R620</b> Sim. MERIS, LT-LR, 3-6 m	0.79	23
Zhang, 2005	<b>R485, R560, R660</b> Landsat TM, MLR 1,6-11 m	0.72	53
Hellweger et al, 2004	<b>Log(R660)</b> Landsat TM, LT-LR, 0,45-2 m	0.85	21
Pekka Harma et al., 2001	<b>(L560-L830)/ (L660-L830)</b> Sim. Landsat TM, SLR, 0,7-5,0 m	0.48	107
Pattiaratchi et al., 1994	<b>R660</b> Landsat TM, LT-LR, 4-15 m	0.61	39

**Πίνακας 29: Αποτελέσματα για το βάθος Secchi σύμφωνα με την παρούσα εργασία**

<b>Equation / Bands Sensor, Model Secchi</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>N</b>	<b>dt</b>
R480/(R440+R480+R560) Landsat 8 0,01-14m	0.7	193	0-15
R480/(R440+R480+R560) Landsat 8 0,01-1,4m	0.7	65	0-5
$\ln((R480 - R2200) \div (R560 - R1610))$ Landsat 8 0,01-1,4m	0.65	65	0-5

### **Επιφανειακή Θερμοκρασία**

Όσον αφορά την επιφανειακή θερμοκρασία, ο δείκτης R<sup>2</sup> δεν ξεπέρασε κατά πολύ το 50% για χρονική διαφορά από 0-15 ημέρες (145 παρατηρήσεις), αλλά έφτασε το 63% (για χρονική διαφορά από 0-5 ημέρες (51 παρατηρήσεις). Το αποτελέσματα αυτά δεν κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθότι ο Landsat 8 με τα θερμικά κανάλια που διαθέτει παρέχει τη φασματική πληροφορία για τον υπολογισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι για μεγάλο χρονικό διάστημα πραγματοποιούνταν συνεχείς επαναβαθμονομήσεις των θερμικών καναλιών του Landsat 8 λόγω τεχνικών προβλημάτων.

Επομένως, η μικρή συσχέτιση που πετύχαμε είναι πιθανό να οφείλεται είτε σε προβλήματα βαθμονόμησης των αισθητήρων TIRS (θερμικών) είτε σε σφάλμα κατά τη μέτρηση στους σταθμούς είτε σε συνδυασμό των παραπάνω.

## Μέρος Γ - Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αρχικά επιχειρήθηκε η μελέτη και η διερεύνηση του θεσμικού πλαισίου που αφορά τη διαχείριση των υδατικών πόρων, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, που αποτελεί ορόσημο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων στην Ευρώπη και που στοχεύει στην ολοκληρωμένη διαχείρισή τους. Επιπλέον, προσεγγίστηκε εκτενώς η τυπολογία των λιμνών της Ελλάδας (φυσικών και τεχνητών) και ορίστηκαν οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της οικολογικής, της χημικής και της συνολική τους κατάστασης, προκειμένου να ταξινομηθεί το υδατικό σύστημα, όπως ορίζεται στην Οδηγία Πλαίσιο.

Κεντρικό άξονα της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της αξιοποίησης δορυφορικών δεκτών υψηλής ανάλυσης μέσω της επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων για την αξιολόγηση της κατάστασης των υδατικών πόρων και συγκεκριμένα των λιμνών. Η αξιολόγηση αυτή έγινε με χρήση τριών δεικτών ποιότητας λιμναίων υδάτων, τη χλωροφύλλη-α, το βάθος Secchi και την επιφανειακή θερμοκρασία. Έτσι, με περιοχή μελέτης τις λίμνες της Ελλάδας, συλλέχθηκαν, όσο ήταν δυνατό περισσότερα δεδομένα από in situ δειγματοληψίες (N=100 μετρήσεις για τη χλωροφύλλη-α, N=80 μετρήσεις για την επιφανειακή θερμοκρασία και N=124 μετρήσεις για το βάθος του δίσκου Secchi) και ακολούθησε συλλογή και επεξεργασία όλων των διαθέσιμων δορυφορικών εικόνων Landsat 8 που απείχαν από τις δειγματοληψίες το πολύ 15 ημέρες.

Μετά από την μελέτη της βιβλιογραφίας, την επιλογή και τη δημιουργία κατάλληλων δεικτών συσχέτισης επίγειων και δορυφορικών δεδομένων μέσω της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς και μετά από τη χρήση κατάλληλου λογισμικού για την αυτοματοποίηση των επιμέρους σταδίων, καταλήξαμε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, για τη χλωροφύλλη-α επιτεύχθηκαν συσχετίσεις για μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων της τάξης του **75%** για **165** παρατηρήσεις, ενώ η συσχέτιση αυτή αυξήθηκε ακόμα περισσότερο στη γραμμική παλινδρόμηση του λογαρίθμου της χλωροφύλλης-α ( $R^2 = 78.305\%$  για 168 παρατηρήσεις). Επίσης, για μικρή χρονική απόσταση δειγματοληψίας - δορυφορικής λήψης, dt έως 3 ημέρες, η συσχέτιση αυτή φτάνει το **80%** για **39** παρατηρήσεις. Το βάθος του δίσκου Secchi έδωσε ικανοποιητικές συσχετίσεις της τάξης του **70%** για **193** παρατηρήσεις και για μεγάλο εύρος τιμών (0,01-14m). Τις μικρότερες συσχετίσεις έδωσε η θερμοκρασία, όπου ο δείκτης  $R^2$  δεν ξεπέρασε κατά πολύ το 50% για χρονική διαφορά από 0-15 ημέρες (145 παρατηρήσεις), αλλά έφτασε το **63%** για **51** παρατηρήσεις (με χρονική διαφορά από 0-5 ημέρες).

Με όσα ειπώθηκαν και μετά την επίτευξη ικανοποιητικών συσχετίσεων μεταξύ των επίγειων και των δορυφορικών δεδομένων, εύκολα συμπεραίνουμε ότι η ψηφιακή τηλεπισκόπηση είναι μία επιστήμη που πρέπει να χρησιμοποιείται στην παρατήρηση του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα για την εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων. Τα δορυφορικά δεδομένα παρέχουν τεράστιες δυνατότητες και αποτελούν μία εναλλακτική και οικονομική μέθοδο που επιτρέπει την παροχή πληροφοριών σε τακτά χρονικά διαστήματα, χωρίς δαπάνη, σε μέρη που δεν υπάρχει δυνατότητα δειγματοληψίας. Επιπλέον, οι τηλεπισκοπικές μέθοδοι αναδεικνύουν τη χωρική κατανομή των φαινομένων και παρέχουν πληροφορίες για το σύνολο του υδάτινου σώματος και όχι αυστηρά για το σημείο δειγματοληψίας. Τέλος, με αυτές τις μεθόδους δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης ενός υδατικού σώματος σε παρελθοντικό χρόνο, δυνατότητα που στερείται η χρήση οποιασδήποτε άλλης μεθόδου.

Έτσι, με πολλαπλές διαχρονικές, πολυφασματικές, τηλεπισκοπικές παρατηρήσεις και αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου είναι εφικτό να εκτιμηθούν έγκαιρα και για εκτεταμένες χωρικά περιοχές βασικοί δείκτες ποιότητας σε παράκτια ύδατα. Η αύξηση της χρονικής διασποράς μεταξύ των δειγματοληψιών και της λήψης των δορυφορικών δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο για την αξιολόγηση των μοντέλων συσχέτισης, όταν συνοδεύεται με ικανή αύξηση του πλήθους των μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε θα μπορούσαν να βελτιωθούν, αν είχαμε πρόσβαση σε περισσότερα στοιχεία δειγματοληψίας και κυρίως, αν υπήρχε η πρόβλεψη από τους αρμόδιους φορείς η δειγματοληψία να γίνεται ταυτόχρονα ή όσο το δυνατόν πιο κοντά στη διέλευση των δορυφόρων παρατήρησης της γης, προκειμένου τα στοιχεία να είναι πιο αξιόπιστα. Επιπλέον, τα προβλήματα βαθμονόμησης των αισθητήρων, σε κάποιο βαθμό, επηρέασαν την επίτευξη καλύτερης συσχέτισης.

Νέα προοπτική στη χρήση της ψηφιακής τηλεπισκόπησης πρόκειται να προσφέρει η βελτίωση της χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας των δορυφόρων. Έτσι, με τους νέους δορυφόρους της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας Sentinel I, II και III ανοίγονται νέοι ορίζοντες προς την κατεύθυνση αυτή.

## Βιβλιογραφία

- Αδαμαντίδου, Ε. (2000). Η Ευρωπαϊκή πολιτική προστασίας των υδάτων, Νόμος + Φύση 2000, 421-451.
- Αλμπανάκης, Κ., Βουβαλίδης, Κ., et al. (1995) Φαινόμενα ανοξικών συνθηκών στην καρστική κρυπτολίμνη Αμβρακία, Πρακτικά του 4ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Αθήνα 12, 13, 14 Οκτωβρίου 1995.
- Αργιαλάς, Δ. Π. (1999). Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1999.
- Γιαννακούρου, Γ., Κρεμλής, Γ., et al. (2007). Η Εφαρμογή του Κοινοτικού Δικαίου Περιβάλλοντος στην Ελλάδα 1981 – 2006, Ελληνική Εταιρία Δικαίου του Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα – Κομοτηνή 2007
- Γιωτάκης, Κ. (2000). Η Οδηγία – Πλαίσιο Κοινοτικής Δράσης στον τομέα πολιτικής υδάτων [www.waterinfo.gr/eedyp/Paros\\_papers/giotakis\\_k.pdf](http://www.waterinfo.gr/eedyp/Paros_papers/giotakis_k.pdf), Ημ. ανακτ: 20/9/15.
- Δανιλάκης, Β. (2011). Ελλείμματα και προβλήματα στην εφαρμογή της πολιτικής της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων στην Ελλάδα: Η περίπτωση της Λίμνης Κορώνειας Νόμος + Φύση, Ιούνιος 2011
- Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ., et al. (2004). Η εναρμόνιση του εθνικού δικαίου με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ για την προστασία και διαχείριση των υδάτων, ΠερΔικ4/2004, εκδ. Νομική Βιβλιοθήκη.
- EKBY (2007) Αμφίβιον, Τεύχος 68 Μάρτιος- Απρίλιος 2007, EKBY Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας [http://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY\\_AMPHIVION\\_el.html](http://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY_AMPHIVION_el.html) 6-7
- EKBY (2008) Αμφίβιον, Τεύχος 76 Ιούλιος – Αύγουστος 2008, EKBY Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας [http://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY\\_AMPHIVION\\_el.html](http://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY_AMPHIVION_el.html).
- Ζησιμόπουλος, Γ., Καφεντζόπουλος, Κ., et al. (2002). Διδακτική για τα Μαθήματα των Φυσικών Επιστημών. Εκδόσεις Πατάκης, Αθήνα.
- Θεολόγου Ι. Μ. (2014). Εκτίμηση και χαρτογράφηση ποιοτικών χαρακτηριστικών σε υδάτινους αποδέκτες με τεχνικές τηλεπισκόπησης : Η περίπτωση της λίμνης Κάρλα. Διπλωματική Εργασία , Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2014.
- ΙΣΤΑΜΕ (2007). Η κατάσταση του περιβάλλοντος στην Ελλάδα, Ετήσιος Απολογισμός, Απρίλιος 2007
- Κάλλια-Αντωνίου, Α. (2006). Νομικό Πλαίσιο διαχείρισης υδάτινων πόρων - Η εφαρμογή της Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ, ΠερΔικ4/2006, εκδ. Νομική Βιβλιοθήκη.
- Καραγεώργου, Β. (2003). Η Οδηγία-Πλαίσιο για το Νερό: Ένας Σημαντικός Σταθμός για το Ευρωπαϊκό Δίκαιο Περιβάλλοντος, Νόμος και Φύση (Αύγουστος 2003).
- Καριψιάδης, Γ. (2008). Η Οδηγία- Πλαίσιο για τα Ύδατα. Διαχείριση Διασυνοριακών Υδάτων, Νόμος και Φύση (Νοέμβριος 2008 )

- Κούγκολος, Α.(2004). Κριτική Θεώρηση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2000/60 και του Ν 3199/2003, ΠερΔικ1/2004, εκδ. Νομική Βιβλιοθήκη.
- Μαμάης, Δ. (2014). Σημειώσεις του μαθήματος, Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Δ.Π.Μ.Σ. Περιβάλλον και Ανάπτυξη 2013-2014 .
- Μαμάης, Ν. (2014). Σημειώσεις του μαθήματος, Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Δ.Π.Μ.Σ. Περιβάλλον και Ανάπτυξη 2013-2014.
- Μίχας, Σ. & Μαμάης, Ν. (2010). Ευρωπαϊκές Οδηγίες για τα Νερά, Πρόγραμμα Εκπαίδευσης Συστημάτων Υδροσκοπίου , Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, 8-17 Μαρτίου 2010.
- Μουντογιαννάκη, Δ. (2015). Εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων σε παράκτιες περιοχές της Ευρώπης με υψηλής ανάλυσης πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα. Διπλωματική Εργασία , Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
- Πατελάκη, Μ. (2015). Εκτίμηση και χαρτογράφηση ποιοτικών χαρακτηριστικών σε υδάτινους αποδέκτες από διαχρονικά τηλεπισκοπικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης. Διπλωματική Εργασία , Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
- Τασιόπουλος, Σ. (2014). Διαχείριση Υδάτων στον Ευρωπαϊκό Χώρο - Οδηγία 2000/60/ΕΚ, ΠερΔικ3/2014, εκδ. Νομική Βιβλιοθήκη.
- Τσερβένης, Β. (2008). Το νερό στην κοινωνία της Διακινδύνευσης, ΠερΔικ 1/2008, εκδ. Νομική Βιβλιοθήκη.
- Χαϊνταρλής, Μ. (2003). Η Οδηγία 2000/60 για τα νερά και η ορθή ενσωμάτωσή της στην ελληνική νομική και διοικητική Πραγματικότητα, Εισήγηση στο 3ο Συνέδριο Ανάπτυξης της Θεσσαλίας (Επιστημονικό συνέδριο για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και την αειφόρο ανάπτυξη στη Θεσσαλία), Λάρισα, 12-13 Δεκεμβρίου 2003.
- Χαραλάμπους, Αικ. (2014). Σημειώσεις του μαθήματος, Ρύπανση και Συστήματα Προστασίας Περιβάλλοντος, Δ.Π.Μ.Σ. Περιβάλλον και Ανάπτυξη 2013-2014.
- Alparslan, E., Aydoner, C., et al. (2007). Water Quality Assessment at Omerli Dam Using Remote Sensing Techniques, *Environmental Monitoring and Assessment*, 135, pp. 391–398.
- Blondeau-Patissier, D., et al. (2014). A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans, *Progress in Oceanography*, 2014, Vol. 123, pp. 123-144
- Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., et al. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters, *Remote Sensing of Environment* 157 (2015) 199–215

- Bukata, R. P., Bruton, J. E., & Jerome, J. H. (1985). Application of direct measurements to the estimation of lake water quality indicators, Environment Canada, 1985, NWRI IWD Scientific Series No. 140.
- Carder, K. L., Steward, R. G., et al. (1989). Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll, *Limnology and Oceanography*, 1989, pp. 34, 68-81.
- Chamoglou M., Papadimitriou T., & Kagalou I., (2014). Key-Descriptors for the Functioning of a Mediterranean Reservoir: The Case of the New Lake Karla-Greece. *Environmental Process*, 1, pp 127-135.
- Chavula, Geoffrey, et al. (2009). Estimating chlorophyll concentration in Lake Malawi from MODIS satellite imagery, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2009, Vol. 34, 13–16, pp. 755-760. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2009.07.015>.
- Chen, L., Tan, C.H., Kao, S.J., & Wang, T.S., (2008). Improvement of remote monitoring on water quality in a subtropical reservoir by incorporating grammatical evolution with parallel genetic algorithms into satellite imagery. *Water Research*, 42, pp. 296–306.
- Curran, P.J. and Novo, E.M.M. (1988). The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. *Journal of Coastal Research*. 1988, 4, pp. 351-368.
- Dash, Padmanava, et al. (2011). Estimation of cyanobacterial pigments in a freshwater lake using OCM satellite data, *Remote Sensing of Environment*. 15 December 2011, Τόμ. 115, 12, σσ. 3409-3423. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.004>.
- Dekker, A., Vos, R., & Peters, S. (2002). Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(1), 15–35.
- Draper, N. & Smith, H. (1997). Εφαρμοσμένη Ανάλυση Παλινδρόμησης. Αθήνα, Παπαζήση.
- Gerace, A. (2010). Demonstrating Landsat's New Potential to Monitor Coastal and Inland Waters.
- Harvey, E.T., Kratzer, S. Philipson, P. (2015) Satellite-based water quality monitoring for improved spatial and temporal retrieval of chlorophyll-a in coastal waters, *Remote Sensing of Environment* 158 (2015) 417–430
- Hellweger, F. L., et al. (2004). Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, Vol. 61, pp. 437-448
- Lathrop, R. G., Lillesand, T. M. & Yandell, B. S. (1991). Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters, *International Journal of Remote Sensing*.

- Latinopoulos, D. Ntislidou, C. & Kagalou, I. (2016). Multipurpose Plans for the Sustainability of the Greek Lakes: Emphasis on Multiple Stressors, Springer International Publishing Switzerland 2016, DOI 10.1007/s40710-016-0152-4.
- Lillesand, T. M., et al. (1983) Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota lakes, 1983, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, pp. 49, 219–229.
- Matthews, M. W. & Odermatt, D. (2015). Improved algorithm for routine monitoring of cyanobacteria and eutrophication in inland and near-coastal waters, Remote Sensing of Environment 156 (2015) 374–382
- O'Reilly, J. E., et al. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiifs, Journal of Geophysical Research. October 15, 1998, Vol. C11, C103, pp. 24,937-24,953.
- Sass, G.Z., Creed, I.F., Bayley, S.E. & Devito, K.J. (2007). Understanding variation in trophic status of lakes on the Boreal Plain: A 20 year retrospective using Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment.109 (2), pp. 127-141.
- Theologou I., Kagalou I., Papadopoulou M.P., Karantzalos K. (2015). Evaluating Multi-temporal High Resolution Satellite Chlorophyll- $\alpha$  maps in Sensitive Shallow Inland Water Systems: The Case of Lake Karla. World Congress of the European Water Resources Association (EWRA), Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities, Istanbul, June 2015.
- Theologou, I., Patelaki, M. & Karantzalos K. (2015). Can single empirical algorithms accurately predict inland shallow water quality status from high resolution, multi-sensor, multi-temporal satellite data? ISPRS Archives, Editors: G. Schreier, P. E. Skrovseth, and H. Staudenrausch, International Symposium on Remote Sensing of Environment (Volume XL-7/W3), pp.1511-1516
- Theologou, I., Karantzalos, K., Chamoglou, M., Papadopoulou, M.P. & Kagalou, I. (2014). Earth Observation Techniques for Monitoring Inland Water Quality in the Mediterranean Region: A case study in Lake Karla. The Mediterranean City 2014, Adaptation Strategies to Global Environmental Change in the Mediterranean City and the Role of Global Earth Observation
- Thiemann, S. & Kaufmann, H. (2000). Determination of Chlorophyll Content and Trophic State of Lakes Using Field Spectrometer and IRS-1C Satellite Data in the Mecklenburg Lake District, Germany, Remote Sensing of Environment.73 (2), pp.227-235.
- Wrigley, R. C. & Horne, A. J. (1974). Remote sensing and lake eutrophication., Nature, 250, pp. 213-214.





## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Τύποι Ταμιευτήρων [Πηγή: Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας - GR09].....	55
Πίνακας 2: Τιμές εκτιμητών φυτοπλαγκτού σε συνθήκες αναφοράς για τον τύπο «Ταμιευτήρες, βαθιές, μεγάλες, πυριτικές, σε «υγρές» περιοχές, με λεκάνες απορροής < 20.000 km <sup>2</sup> » .....	57
Πίνακας 3: Όρια μεταξύ καλού και μέτριου οικολογικού δυναμικού για τους τύπους L-M5/7W και L-M8 που καθορίζονται στην Απόφαση 2009/915 της ΕΕ .....	58
Πίνακας 4: Όρια φυσικοχημικών παραμέτρων για την ταξινόμηση ταμιευτήρων. ....	58
Πίνακας 5: Τύποι και χαρακτηριστικά φυσικών λιμνών [Μουστάκα Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010].....	60
Πίνακας 6: Τύποι και χαρακτηριστικά φυσικών λιμνών [ΟΠΥ, ΕΚΒΥ].....	61
Πίνακας 7: Φυσικές λίμνες που κατατάσσονται σε κάθε ένα από τους τύπους λιμναίων ΥΣ που καθορίστηκαν στο έργο «Καθορισμός συνθηκών αναφοράς σε λίμνες για φυτοπλαγκτό - επιστημονική ανασκόπηση σχεδιασμού παρακολούθησης λιμνών & ταξινόμηση με βάση το φυτοπλαγκτόν της οικολογικής κατάστασης των λιμνών».....	63
Πίνακας 8: Συνθήκες αναφοράς για το φυτοπλαγκτόν στους τύπους φυσικών λιμνών που καθορίστηκαν στο πλαίσιο του έργου «Καθορισμός συνθηκών αναφοράς σε λίμνες για φυτοπλαγκτό – επιστημονική ανασκόπηση σχεδιασμού παρακολούθησης λιμνών & ταξινόμηση με βάση το φυτοπλαγκτόν της οικολογικής κατάστασης των λιμνών» (Μουστάκα Μ. και Κατσιάπη Μ., 2010).....	63
Πίνακας 9: Όρια φυσικοχημικών παραμέτρων για την ταξινόμηση φυσικών λιμναίων συστημάτων. ....	64
Πίνακας 10: Φασματικά Κανάλια των OLI και TIRS. ....	69
Πίνακας 11: Ερμηνεία εικόνων CF mask. ....	72
Πίνακας 12: Πλήθος in situ μετρήσεων για τη χλωροφύλλη-α, την επιφανειακή θερμοκρασία και το βάθος δίσκου Secchi .....	89
Πίνακας 13: Συντεταγμένες δειγματοληψίας των σταθμών του ΕΚΒΥ.....	90
Πίνακας 14: Συντεταγμένες δειγματοληψίας των σταθμών του φορέα διαχείρισης της Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε. σε ΕΓΣΑ87.....	91
Πίνακας 15: Οι Δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη για κάθε λίμνη....	93
Πίνακας 16: Πλήθος Δορυφορικών εικόνων SR και TIRS ανά λίμνη και path/row .....	96
Πίνακας 17: Δείκτες καναλιών για συσχέτιση της χλωροφύλλης-α .....	100
Πίνακας 18: Δείκτες καναλιών για συσχέτιση της θερμοκρασίας.....	101
Πίνακας 19: Δείκτες καναλιών για συσχέτιση του βάθους Secchi .....	102
Πίνακας 20: Συσχετίσεις καναλιών για τη χλωροφύλλη-α.....	105

Πίνακας 21: Συσχετίσεις καναλιών με το λογάριθμο της χλωροφύλλης-α.....	108
Πίνακας 22: Συσχετίσεις καναλιών για τη χλωροφύλλη-α με επιλογή χαμηλών και μεσαίων συγκεντρώσεων .....	110
Πίνακας 23: Συσχετίσεις καναλιών για τη χλωροφύλλη-α με επιλογή υψηλών συγκεντρώσεων.....	110
Πίνακας 24: Συσχετίσεις καναλιών για την επιφανειακή θερμοκρασία.....	113
Πίνακας 25 : Συσχετίσεις καναλιών για το βάθος του δίσκου Secchi.....	116
Πίνακας 26 : Αποτελέσματα για τη χλωροφύλλη-α σύμφωνα με τη βιβλιογραφία .....	119
Πίνακας 27: Αποτελέσματα για τη χλωροφύλλη-α σύμφωνα με την παρούσα εργασία.....	120
Πίνακας 28: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία για το βάθος Secchi .....	121
Πίνακας 29: Αποτελέσματα για το βάθος Secchi σύμφωνα με την παρούσα εργασία.....	122

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	65
Εικόνα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολία που καταγράφεται από τον αισθητήρα. [Πηγή: Gerace, 2010].....	66
Εικόνα 3: Η χρονική διάρκεια των δορυφόρων Landsat [Πηγή :wikipedia.org/wiki/Landsat_program] ..	68
Εικόνα 4: Όψεις του δορυφόρου Landsat-8.....	70
Εικόνα 5: Περιοχές κάλυψης των καναλιών των αισθητήρων OLI και TIRS (Landsat-8) και του αισθητήρα ETM+ (Landsat-7). .....	70
Εικόνα 6: (α )Εικόνα χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση, (β) Εικόνα μετά από ατμοσφαιρική διόρθωση ....	72
Εικόνα 7: Ατέλειες αλγορίθμου L8 SR απότομες υψομετρικές διαφορές (αριστερά)	Εικόνα
Εικόνα 8: Ατέλειες αλγορίθμου L8 SR κατά μήκος των σύννεφων (δεξιά) .....	73
Εικόνα 9: Συγκριτική χωρική ανάλυση των δεκτών CZSS, MODIS, AVHRR, SeaWiFS, LandsatMSS, Landsat TM, SPOTXS στο λιμάνι της Νέας Υόρκης. [Πηγή: Hellweger et al., 2004].....	82
Εικόνα 10: Τα τρία σημεία δειγματοληψίας του φορέα διαχείρισης της λίμνης Κάρλας (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.) .....	91
Εικόνα 11: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση της χλωροφύλλης-α.....	107
Εικόνα 12: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση του λογαρίθμου της χλωροφύλλης-α	109
Εικόνα 13: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση της επιφανειακής θερμοκρασίας .....	114
Εικόνα 14: Παρουσίαση μοντέλων με την καλύτερη συσχέτιση του βάθους Secchi .....	117

## Περιεχόμενα Χαρτών

Χάρτης 1: Η Περιοχή Μελέτης .....	86
Χάρτης 2: Τροχιές των εικόνων Landsat-8 που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.....	97
Χάρτης 3: Εφαρμογή μοντέλου συχέτισης b4-b7 στη Λίμνη Αμβρακία.....	112
Χάρτης 4: Εφαρμογή μοντέλου συχέτισης b10 στη Λίμνη Αμβρακία.....	115
Χάρτης 5: Εφαρμογή μοντέλου συχέτισης $b2/(b1+b2+b3)$ στη Λίμνη Αμβρακία .....	118

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατηγορίες ποιοτικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατάταξη επιφανειακών υδατικών σωμάτων .....	45
Σχήμα 2: Κατηγορίες αξιολόγησης οικολογικής κατάστασης επιφανειακών συστημάτων.....	46
Σχήμα 3: Κατηγορίες αξιολόγησης χημικής κατάστασης συστημάτων.....	47
Σχήμα 4: Λογικό Διάγραμμα αξιολόγησης κατάστασης φυσικού υδατικού συστήματος.....	48
Σχήμα 5: Συντελεστής απορρόφησης της CDOM για εύρος μήκους κύματος 290-890 nm ( $\alpha$ CDOM). Οι τιμές είναι κανονικοποιημένες ώστε για μήκος κύματος 350 nm, $CDOM=1$ . [Πηγή: Gerace, 2010] .....	67
Σχήμα 6: Ευαισθησία των καναλιών R443, R482, R562 και R665 στη χλωροφύλλη για συγκεντρώσεις 0.1-1, 1-5 και 5-12 mg/m <sup>3</sup> .....	78
Σχήμα 7: Φασματική υπογραφή της χλωροφύλλης-α συναρτήσει διαφορετικών συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (0 / 0,5 / 5 mg/l ) .....	81

## Παράρτημα

### In situ δεδομένα

Λίμνη	Ημερομηνία δειγματοληψίας	Chl α	Δίσκος Secchi (cm)	Θερμοκρασία (επιφάνεια)
Αμβρακία	24/05/13	2.37	300	22.1
	15/07/13	3.1746	570	27.2
	12/08/13	0.7655	800	28
	08/11/13	1.3661	730	20
	24/06/14	0.790	300	26.5
	31/07/14	0.527	560	27.4
	13/08/14	2.283	800	28.5
	25/09/14	2.126	900	25.2
Βεγορίτιδα	22/5/2013	2.291	330	21.5
	3/7/2013	3.18175	350	23.3
	28/8/2013	2.7168	410	-
	3/9/2013	3.7509	500	24
	5/6/2014	31.344	120	19
	3/7/2014	7.417	270	23.8
	6/8/2014	5.687	220	24.9
	11/9/2014	19.534	100	23.2
Βόλβη	10/5/2013	17.0795	140	23
	4/6/2013	12.5185	160	22.9
	5/7/2013	32.12325	100	25.8
	12/9/2013	18.7465	170	25.4
	19/06/2014	34.806	100	25.5
	22/07/2014	25.058	100	27
	27/08/2014	23.275	150	27.1
	23/09/2014	18.109	-	24.5
Μεγάλη Πρέσπα (ΣΤΑΘΜΟΣ Α)	28/6/2013	15.038	360	22.5
	29/7/2013	3.838	200	28.2
	29/8/2013	8.078	220	23.8
	11/06/2014	4.542	360	20.1
	02/07/2014	18.725	200	22.1
	11/08/2014	6.349	220	24.7
	09/09/2014	5.208	300	21.8
Μεγάλη Πρέσπα (ΣΤΑΘΜΟΣ Β)	28/1/2013	4.582	460	-
	30/5/2013	1.697	290	17.5

	28/6/2013	16.618	370	21.3
	29/7/2013	2.511	420	27.5
	29/8/2013	7.366	260	23.7
	17/9/2013	7.015	350	20.9
	11/06/2014	4.116	370	20.8
	02/07/2014	18.011	220	22.4
	09/09/2014	4.905	350	22
Τριχωνίδα	17/05/2013	1.153	460	21.4
	15/07/2013	5.169	1400	27.3
	16/08/2013	0.558	1400	27.8
	14/10/2013	2.045	1350	22.8
	24/06/2014	2.411	1100	26.2
	29/07/2014	0.758	930	27.7
	13/08/2014	2.606	1400	28.4
Υλίκη	16/09/2014	4.396	1220	26.8
	14/08/2013	8.071	440	26.3
	12/09/2013	2.157	600	27.6
	30/07/2014	4.606	390	28.1
	19/08/2014	5.623	510	27.7
Πολυφύτου	16/09/2014	2.981	680	25.8
	09/05/2013	2.293	650	-
	12/07/2013	2.902	380	26
	09/08/2013	4.060	300	26.3
	17/09/2013	4.515	600	23.8
	26/06/2014	1.359	650	23.9
	31/07/2014	2.149	470	24.4
	28/08/2014	3.064	600	25.9
29/09/2014	4.085	530	21.4	
Ταυρωπού	01/07/2013	1.476	290	23.4
	06/08/2013	0.576	550	25.7
	06/09/2013	1.027	450	22.9
	24/10/2013	1.501	770	16.6
	05/06/2014	1.387	300	19.8
	10/07/2014	0.943	460	24.7
	07/08/2014	1.393	560	24.9
11/09/2014	1.363	440	22.8	
	05/06/2013	1.326	520	-

Κρεμαστά	23/07/2013	1.104	400	26.1
	26/08/2013	0.734	550	25.7
	25/09/2013	1.128	500	23.7
	26/06/2014	0.898	500	25.1
	23/07/2014	1.132	360	25.6
	27/08/2014	0.454	400	25.9
	18/09/2014	0.695	380	24.4
Καστράκι	06/06/2013	1.089	700	20.7
	26/07/2013	1.033	480	23.5
	27/08/2013	0.985	850	22.7
	25/09/2013	1.172	850	19.9
	23/06/2014	1.306	600	23.5
	26/08/2014	1.376	900	23.3
	17/09/2014	1.307	900	22.4
Κάρλα ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ1	9/4/2013	118.88	0.33	21.6
	15/5/2013	92.1	0.4	24.7
	18/6/2013	112.1	0.37	29.7
	19/7/2013	46.3	-	26.6
Κάρλα ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ2	9/4/2013	84.79	-	15.5
	15/5/2013	83.6	-	26.7
	18/6/2013	83.44	-	25.4
	19/7/2013	27.3	-	28.2
Κάρλα ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ3	9/4/2013	87.92	-	15.7
	15/5/2013	87.98	-	25.4
	18/6/2013	103.48	-	29.3
	19/7/2013	72	-	32.2
Κάρλα Σταθμός ΕΚΒΥ	15/5/2013	15.2	-	-
	18/6/2013	43.4	-	-
	4/7/2013	48.23	-	-
	10/10/2013	38.99	-	-
Κάρλα ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ1	21/02/2014	-	0.2	-
	8/4/2014	-	0.18	-
	15/05/2014	-	0.15	-
	4/7/2014	-	0.2	-
	4/9/2014	-	0.15	-
	7/11/2014	-	0.1	-
	11/2/2015	-	0.24	-



	24/03/2015	-	0.16	-
	14/05/2015	-	0.15	-
	1/7/2015	-	0.1	-
Κάρλα ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ2	21/02/2014	-	0.13	-
	8/4/2014	-	0.22	-
	15/05/2014	-	0.14	-
	4/7/2014	-	0.15	-
	4/9/2014	-	0.12	-
	7/11/2014	-	0.1	-
	11/2/2015	-	0.16	-
	24/03/2015	-	0.19	-
	14/05/2015	-	0.11	-
	1/7/2015	-	0.15	-
Κάρλα ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΛ3	21/02/2014	-	0.16	-
	8/4/2014	-	0.18	-
	15/05/2014	-	0.15	-
	4/7/2014	-	0.15	-
	4/9/2014	-	0.1	-
	7/11/2014	-	0.05	-
	11/2/2015	-	0.13	-
	24/03/2015	-	0.15	-
	14/05/2015	-	0.1	-
	1/7/2015	-	0.12	-