



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

Εκτίμηση και χαρτογράφηση ποιοτικών χαρακτηριστικών σε υδάτινους αποδέκτες από διαχρονικά τηλεπισκοπικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης

Water quality estimation and mapping water quality parameters in reservoirs using multitemporal, multispectral remote sensing data



Διπλωματική Εργασία

Πατελάκη Μαριάντζελα

Αθήνα, Ιούλιος 2015

© Αθήνα, 2015 Πατελάκη Μαριάντζελα

Με επιφύλαξη παντός 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. Το παρόν έγγραφο διανέμεται με την ελπίδα ότι θα είναι χρήσιμο, αλλά χωρίς καμία εγγύηση, χωρίς ακόμη και την έμμεση εγγύηση εμπορευσιμότητας ή καταλληλότητας για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σήμερα η ανάγκη παρακολούθησης και προστασίας του περιβάλλοντος είναι πιο έντονη από ποτέ, ενώ απαραίτητες καθίστανται μέθοδοι και τεχνικές αξιόπιστες και χαμηλού κόστους. Οι σύγχρονες τεχνολογίες και οι μέθοδοι παρακολούθησης του γήινου περιβάλλοντος αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο προς την κατεύθυνση αυτή. Με αυτό το κίνητρο, στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης και εμπειρικών αλγορίθμων με συνδυασμό ταυτόχρονων επίγειων και δορυφορικών πολυφασματικών παρατηρήσεων, για την εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, συγκεκριμένα της λίμνης Κάρλα. Δεδομένα αποτέλεσαν οι δορυφορικές εικόνες των Landsat 7 και 8 για περίοδο τεσσάρων χρόνων (2011-2014), σε συνδιασμό με υπερφασματικά δεδομένα από φασματογράφο χειρός και τα αποτελέσματα επίγειων χημικών αναλύσεων για τις υπό μελέτη παραμέτρους. Για όλα τα δορυφορικά δεδομένα πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων και των τελικών χαρτών ήταν ενθαρρυντικά και για τους δύο δορυφόρους για κάθε παράμετρο όμως διαπιστώθηκε η ανάγκη δημιουργίας και διαφορετικού μοντέλου για εφαρμογή στα σημεία της λίμνης με μικρότερο βάθος που επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τον πυθμένα της λίμνης.

Abstract

Monitoring and assessing the water quality status through timely, cost effective and accurate manner is of fundamental importance for numerous environmental management and policy making purposes. Therefore, there is a, current, need for validated methodologies which can effectively exploit, in an unsupervised way, the enormous amount of earth observation imaging datasets from various high-resolution satellite multispectral sensors. To this end, many research efforts are based on building concrete regression models and empirical algorithms from concurrent satellite and in-situ data collection campaigns. We have experimented with Landsat 7 and Landsat 8 high resolution satellite data, coupled with the corresponding hyperspectral data from a field spectroradiometer and other in-situ data for calculating physicochemical and other key monitoring parameters. All available datasets, covering a 4 year period (2011-2014) in our case study Lake Karla, Greece, were processed and fused under a quantitative evaluation framework. The performed comprehensive analysis poses certain questions regarding the applicability of single empirical models build across multi-temporal, multi-sensor datasets for the accurate prediction of key water quality indicators for shallow inland systems. The results turned out to be quite promising for both satellites, although the shallower parts of the inland system seem to follow a different multi-temporal pattern and they need to be researched further.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο τηλεπισκόπησης του τομέα Τοπογραφίας της σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων μηχανικών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Καραντζαλου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις συμβουλές και τον χρόνο του που διέθεσε απλόχερα κατά την εκπόνηση της εργασίας, αλλά κυρίως για την ενθάρρυνση και υποστήριξη που μου προσέφερε. Ευχαριστίες αρμόζουν επίσης στον κ. Πολυχρόνη Κολοκούση του εργαστηρίου τηλεπισκόπησης για την πολύτιμη βοήθεια του και τη διάθεση να βοηθήσει σε όποια απορία προέκυπτε. Ένα τεράστιο ευχαριστώ στην φίλη και συμφοιτήτρια μου Ιωάννα Θεολόγου που με μεγάλη προθυμία μοιράστηκε μαζί μου τις γνώσεις της και συνέβαλλε σε τεράστιο βαθμό στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένειά μου για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| 1. Εισαγωγή..... | 11 |
| 1.1. Κίνητρο..... | 14 |
| 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο..... | 15 |
| 2.1. Η Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για τα ύδατα..... | 16 |
| 2.2. Η περιοχή μελέτης..... | 18 |
| 2.3. Βασικές ποιοτικές παράμετροι..... | 20 |
| 2.4. Το πρόγραμμα Landsat..... | 23 |
| 2.4.1. Το πρόγραμμα Landsat 7..... | 24 |
| 2.4.2. Το πρόγραμμα Landsat 8..... | 25 |
| 3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση..... | 28 |
| 3.1. Πολυφασματικά Δεδομένα..... | 29 |
| 4. Μεθοδολογία..... | 30 |
| 4.1. Πολυφασματικά Δεδομένα..... | 31 |
| 4.2. Συλλογή δεδομένων πεδίου..... | 37 |
| 4.3. Μοντέλα Παλινδρόμησης..... | 40 |
| 4.4. Εφαρμογή εξισώσεων και εξαγωγή χαρτών..... | 43 |
| 5. Αποτελέσματα και Αξιολόγηση..... | 46 |
| 5.1. Αποτελέσματα συσχετίσεων για πολυφασματικά δεδομένα..... | 47 |
| 5.2. Χάρτες εκτίμησης ποιοτικών χαρακτηριστικών..... | 63 |
| 6. Συμπεράσματα και προτάσεις..... | 79 |
| Βιβλιογραφία..... | 82 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.1: Κατανομή του νερού στη Γη..... | 12 |
| Εικόνα 2.2 Το φάσμα του ορατού φωτός | 13 |
| Εικόνα 2.1: Η θέση της λίμνης Κάρλα στον ελλαδικό χώρο | 18 |
| Εικόνα 0.3 Η χρονική διάρκεια των δορυφόρων Landsat | 23 |
| Εικόνα 0.3 Σχηματική απεικόνιση Landsat 7 | 25 |
| Εικόνα 0.4 Ο Landsat 8 με ευδιάκριτους τους δύο αισθητήρες..... | 25 |
| Εικόνα 1.1 Εικόνα Landsat 8 πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση..... | 35 |
| Εικόνα 4.2 Εικόνα της λίμνης σε Landsat 7 πριν και μετά το γέμισμα των λωρίδων | 36 |
| Εικόνα 4.3 Τα 3 σημεία δειγματοληψίας του φορέα διαχείρισης της λίμνης..... | 38 |
| Εικόνα 4.4 Θέσεις μετρήσεων στο ΕΓΣΑ '87 στις 19.07.2013..... | 39 |
| Εικόνα 4.5 Αποτέλεσμα εικόνας μετά την εφαρμογή του δείκτη NDWI..... | 44 |
| Εικόνα 4.6 Παράδειγμα αποτελέσματος για τον ολικό φώσφορο..... | 44 |
| Εικόνα 4.7 Ο χάρτης που προέκυψε για τον ολικό φώσφορο..... | 45 |
| Εικόνα 5.1 Οι χάρτες της χλωροφύλλης-α ανά ημερομηνία ανά έτος | 64 |
| Εικόνα 5.2 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για Chla..... | 65 |
| Εικόνα 5.3 Οι χάρτες NH ₄ ανά ημερομηνία ανά έτος..... | 66 |
| Εικόνα 5.4 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για NH ₄ | 67 |
| Εικόνα 5.5 Οι χάρτες NO ₃ ανά ημερομηνία ανά έτος..... | 68 |
| Εικόνα 5.6 Σύγκριση χαρτών L7-SimL με διαφορά μίας ημέρας για NO ₃ | 69 |
| Εικόνα 5.7 Οι χάρτες pH ανά ημερομηνία ανά έτος..... | 70 |
| Εικόνα 5.8 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για pH..... | 71 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 5.9 Οι χάρτες DO ανά ημερομηνία ανά έτος..... | 72 |
| Εικόνα 5.10 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για DO..... | 73 |
| Εικόνα 5.11 Οι χάρτες TP ανά ημερομηνία ανά έτος..... | 74 |
| Εικόνα 5.12 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για TP..... | 75 |
| Εικόνα 5.13 Οι χάρτες αγωγιμότητας ανά ημερομηνία ανά έτος..... | 77 |
| Εικόνα 5.14 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για αγωγιμότητα.. | 78 |

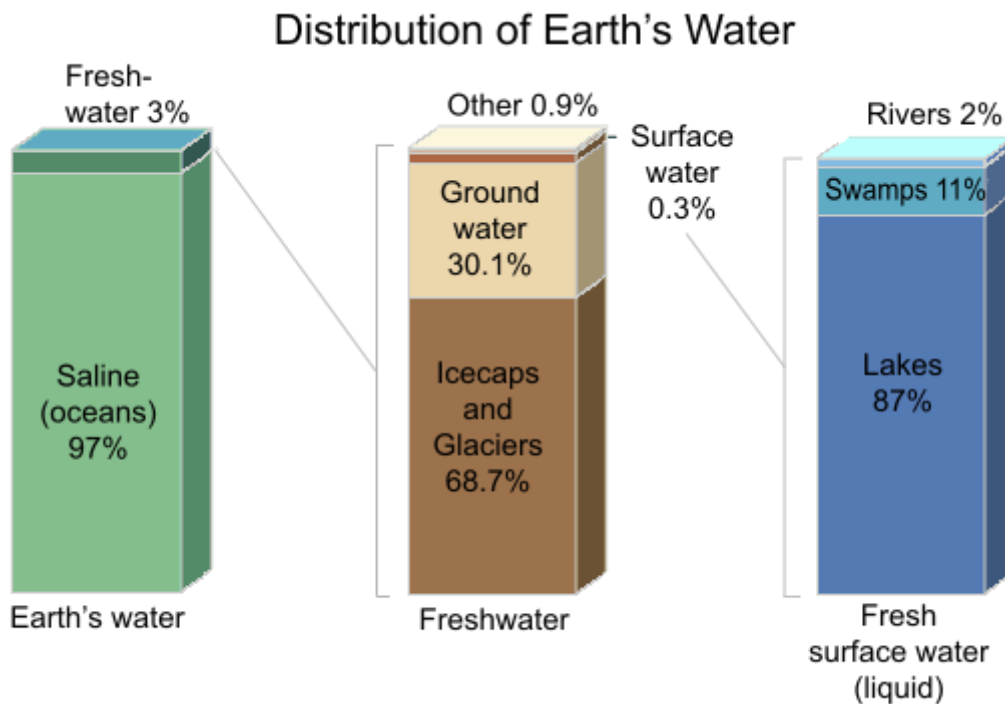
Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 0.1 Τα κανάλια του Landsat 7(ETM+)..... | 24 |
| Πίνακας 0.2 Τα κανάλια του OLI..... | 26 |
| Πίνακας 0.3 Τα κανάλια του TIRS..... | 26 |
| Πίνακας 0.4 Αντιστοιχία καναλιών Landsat 7 και Landsat 8..... | 27 |
| Πίνακας 4.1 Τελικές ημερομηνίες εικόνων Landsat 7 και Landsat 8 που επιλέχθηκαν..... | 32 |
| Πίνακας 4.2 Διαδοχή καναλιών που εισήχθηκαν σε ENVI για Landsat 7..... | 33 |
| Πίνακας 4.3 Διαδοχή καναλιών που εισήχθηκαν σε ENVI για Landsat 8..... | 33 |
| Πίνακας 4.4 Συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87 και οι αντίστοιχες ημερομηνίες που χρησιμοποιήθηκαν στο γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για Landsat 7..... | 42 |
| Πίνακας 4.5 Συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87 και οι αντίστοιχες ημερομηνίες που χρησιμοποιήθηκαν στο γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για Landsat 8..... | 43 |
| Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα συσχετίσεων για τη χλωροφύλλη-α..... | 48 |
| Πίνακας 5.2 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7..... | 49 |
| Πίνακας 5.3 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8..... | 50 |
| Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα συσχετίσεων για τα νιτρικά ιόντα..... | 51 |
| Πίνακας 5.5 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7..... | 52 |
| Πίνακας 5.6 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για SimL..... | 52 |
| Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα συσχετίσεων για το αμμώνιο..... | 54 |
| Πίνακας 5.8 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7..... | 55 |
| Πίνακας 5.9 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8..... | 55 |
| Πίνακας 5.10 Αποτελέσματα συσχετίσεων για τον ολικό φώσφορο..... | 55 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Πίνακας 5.11 | Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7..... | 56 |
| Πίνακας 5.12 | Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8..... | 56 |
| Πίνακας 5.13 | Αποτελέσματα συσχετίσεων για το pH..... | 58 |
| Πίνακας 5.14 | Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7..... | 59 |
| Πίνακας 5.15 | Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8..... | 59 |
| Πίνακας 5.16 | Αποτελέσματα συσχετίσεων για την αγωγιμότητα..... | 59 |
| Πίνακας 5.17 | Αποτελέσματα συσχετίσεων για το αμμώνιο..... | 60 |
| Πίνακας 5.18 | Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7..... | 62 |
| Πίνακας 5.19 | Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8..... | 62 |

1 ■ Εισαγωγή

Η ύπαρξη νερού στη γη είναι ζωτική για τη ζωή. Αποτελεί αγαθό υψίστης σημασίας και έναν από τους κυριότερους λόγους για τους οποίους εμφανίστηκε η ζωή στη γη. Δεν αποτελεί εμπορικό αντικείμενο αλλά κληρονομιά. Ο ρόλος του είναι καθοριστικός αφού αποτελεί βασικό συστατικό όλων των οργανισμών καθώς και απαραίτητο στοιχείο για την επιβίωση τους. Από το σύνολο του νερού στον πλανήτη , το 97% βρίσκεται στις θάλασσες και τους ωκεανούς ενώ το γλυκό νερό αποτελεί μόλις το 3%. Από αυτό, το 68.7% βρίσκεται στους πάγους και το 30.1% στο υπέδαφος, ενώ από το υπόλοιπο 1.2%, το 87% βρίσκεται στις λίμνες, το 11% στους βάλτους και 2% στα ποτάμια.



Εικόνα 1.1 Κατανομή νερού στην γη (Πηγή : el.wikipedia.org/wiki/Νερό)

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. Είναι απολύτως ικανοποιητική από άποψη ακρίβειας ωστόσο υστερεί σε κάποιους τομείς. Αναλυτικότερα:

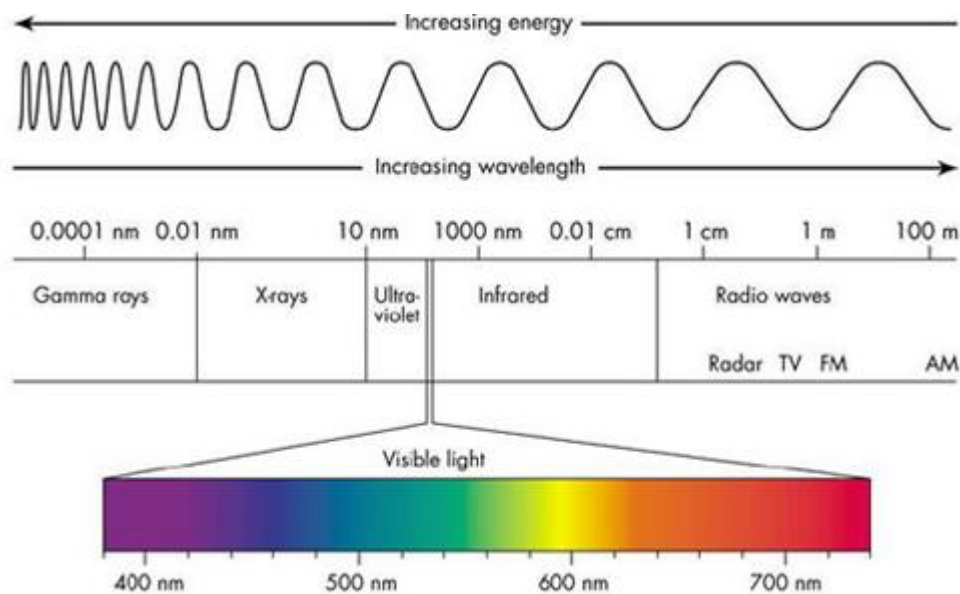
- ✓ Υστερεί όσον αφορά την απεικόνιση της χωρικής διάστασης ενός φαινομένου, μιας και τα αποτελέσματα δεν δίνουν τη συνολική εικόνα της κατάστασης που επικρατεί σε όλη την έκταση του υδάτινου αποδέκτη, αφού αντιστοιχούν στο σημείο από το οποίο λήφθηκε το δείγμα.
- ✓ Σαν διαδικασία είναι αρκετά δαπανηρή 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 υπήρξαν 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».



Εικόνα 1.2 Το φάσμα του ορατού φωτός (Πηγή : istellas.gr)

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.

1.1. Κίνητρο

Κίνητρο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η προσπάθεια εφαρμογής νέων τεχνολογιών και μη συμβατικών μεθόδων στο τομέα της εκτίμησης ποιότητας των υδάτων. Είναι γεγονός ότι στο εξωτερικό ο τομέας αυτός είναι συνεχώς αναπτυσσόμενος, όμως στην Ελλάδα υστερεί από άποψη μελέτης. Σημαντικός στόχος είναι η ανάγκη αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προβλημάτων, ιδιαίτερα στην εποχή που διανύουμε λόγω της οικονομικής κατάστασης που επικρατεί στη χώρα, με εναλλακτικές και οικονομικότερες μεθόδους. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας έχει τεράστιες δυνατότητες. Μία από αυτές αποτελεί η δημιουργία και ενημέρωση μιας ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων για τους υδάτινους αποδέκτες της χώρας, με λήψεις εικόνων να πραγματοποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

2. ■ Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται κάποια βασικά στοιχεία τόσο για τη περιοχή μελέτης της εργασίας, όσο και για τα μέσα και τα εργαλεία με τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε κάποια βασικά θεωρητικά στοιχεία που εισάγουν τον αναγνώστη στη νομοθεσία που διέπει τη παρακολούθηση (monitoring) των υδάτινων όγκων αλλά και στα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη παραμέτρων.

2.1. Η Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για τα ύδατα

Όλα τα Κράτη-Μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι υποχρεωμένα να ακολουθούν πιστά την οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000, για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Μέσω αυτού του κοινοτικού πλαισίου, τα κράτη μέλη καλούνται να πραγματοποιήσουν ταυτοποιήσεις και αναλύσεις των υδάτων τους και να τα ταξινομήσουν ανά υδρογραφική λεκάνη και ανά περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού. Με βάση την υπάρχουσα κατάσταση και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε υδατικού συστήματος, εγκρίνονται σχέδια διαχείρισης και προγράμματα μέτρων. (Πηγή: *Europa, Σύνοψη της νομοθεσίας της ΕΕ*)

Σκοπός της οδηγίας αυτής, η οποία αποτελεί το επιστέγασμα των «Αρχών Νερού του Δουβλίνου», είναι η διατήρηση ή η επίτευξη της καλής κατάστασης όλων των υδατικών σωμάτων, η αποτροπή της περαιτέρω επιδείνωσης τους και η προώθηση μιας βιώσιμης χρήσης ύδατος βασισμένης στη μακροπρόθεσμη προστασία των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Επιπλέον, για πρώτη φορά στη πολιτική της Ε.Ε., εισήχθηκε ένα νομικό κείμενο το οποίο προτείνει τόσο τις οικονομικές αρχές όσο και τα οικονομικά εργαλεία μέσω των οποίων θα πραγματοποιθούν οι πιο πάνω στόχοι. Στην Ελλάδα η οδηγία αυτή ενσωματώθηκε στο ΠΔ 51/ΦΕΚΑ54/8 Μαρτίου 2007 και έχουν καθοριστεί οι παράμετροι ελέγχου των υδάτων, συμπεριλαμβάνοντας 33 ουσίες προτεραιότητας.

Οι παράμετροι αυτές ομαδοποιούνται στις εξής κατηγορίες:

- Φυσικοχημικές: Θερμοκρασία Νερού (*T*), pH, Θολότητα (*Turbidity*), Διαλυμένο Οξυγόνο (*DO*) κτλ.,
- Χημικές Οργανικές: Συνολικός Οργανικός Άνθρακας (*TOC*), Οργανο-χλωροφυτοφάρμακα (*PCB*), Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (*PAH*) κτλ.,
- Χημικές Ανόργανες: Άζωτο (*N*), Φώσφορος (*P*), Χλώριο (*Cl*), Νάτριο (*Na*), Νιτρικά Ιόντα (NO_3^{-1}), Αμμώνιο (NH_4^{+}) κτλ.,
- Βιολογικές: Φυτοπλαγκτόν (*PHYTPL*), Ζωοπλαγκτόν (*ZOOPL*), Χλωροφύλλη (*CHLA*) κτλ.,
- Μικροβιολογικές: Σαλμονέλα, *E. Coli*, Εντερόκοκκοι κτλ.,
- Ραδιενεργές: Ραδιοϊσότοπα, συνολική Α, Β ραδιενέργεια κτλ.

(Πηγή: *Ecosystem Database Observatory - EcoDo-net*)

Σύμφωνα με τους Duan and Bastiaanssen, 2015; Giardino et al. 2007, Chen et al. 2008, Alparslan et al., 2007, Hellweger et al, 2007, Tyler et al., 2006, Han et al., 2005, Vincent et al, 2004; Young et al., 2011 για την εκτίμηση των παραμέτρων αυτών, μπορούν να εφαρμοστούν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- i. Η εμπειρική προσέγγιση η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης ανάμεσα σε δεδομένα ψηφιακής τηλεπισκόπησης και στις μετρήσεις των παραμέτρων ποιότητας νερού. Συγκεκριμένα, οι τιμές της ακτινοβολίας που καταγράφονται από τον αισθητήρα, σε συνάρτηση με κατάλληλους συνδυασμούς καναλιών, συσχετίζονται με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των παραμέτρων στα ύδατα, όπως αυτές προέκυψαν από επιτόπιες δειγματοληψίες με τις οποίες συμπίπτουν χρονικά.
- ii. Η ημι-εμπειρική προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν τα φασματικά χαρακτηριστικά των παραμέτρων ενδιαφέροντος είναι γνωστά και εισάγονται στη στατιστική ανάλυση, ενώ καλά επιλεγμένες φασματικές περιοχές και κατάλληλες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται ως στοιχεία εισόδου.
- iii. Η αναλυτική προσέγγιση στην οποία οι παράμετροι της ποιότητας του νερού σχετίζονται με Εγγενείς Οπτικές Ιδιότητες (Inherent Optical Properties- ιδιότητες που εξαρτώνται μόνο από το νερό και τις άλλες ουσίες που είναι διαλυμένες ή αιωρούμενες σε αυτό) καθώς και με τις Φαινόμενες Οπτικές Ιδιότητες (Apparent Optical Properties - εξαρτώνται τόσο από τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες αλλά και από τη φωτεινότητα της περιοχής) ενώ περιλαμβάνει σχέσεις ανάμεσα στα παραπάνω και την ατμοσφαιρική ακτινοβολία οι οποίες αντιστρέφονται για να δώσουν τις τελικές τιμές των παραμέτρων.

Οι δύο πρώτες περιπτώσεις είναι σε μεγαλύτερο βαθμό εξαρτώμενες από τη περιοχή μελέτης αλλά η τρίτη περίπτωση, υπό ορισμένες προϋποθέσεις μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε εικόνα που λήφθηκε πάνω από τη συγκεκριμένη λίμνη δίνοντας τη δυνατότητα απόκτησης αποτελεσμάτων ανεξάρτητων από επίγειες μετρήσεις.

Οι μελέτες καταδεικνύουν ως κύριους υπευθύνους το κλίμα, το οποίο οδηγεί σε υδρο-οικολογικές διεργασίες, τη γεωλογία και τη τοπογραφία της περιοχής ως

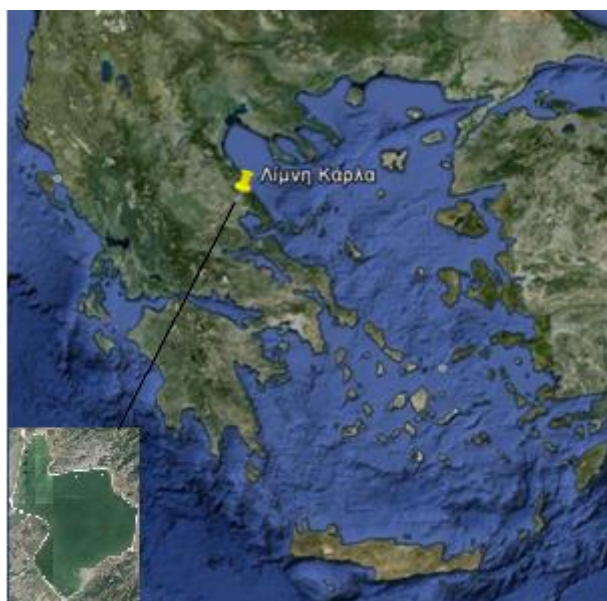
παράγοντες που ελέγχουν τη μεταβολή της τροφικής κατάστασης των ρηχών λιμνών. (Sass, et al., 2007).

Τα φυσικά λιμνάζοντα νερά είναι οπτικά περίπλοκα (optically complex waters) λόγω της συγκέντρωσης και αλληλεπίδρασης κυρίως τριών παραμέτρων: της χλωροφύλλης (chlorophyll-chl), των ανόργανων αιωρούμενων στερεών (inorganic suspended solids-SS) και της διαλυμένης οργανικής ύλης (dissolved organic matter-DOM). (Lathrop, et al., 1991)

2.2. Η περιοχή μελέτης

Η λίμνη Κάρλα ή λίμνη Βοιβηίδα (ή Βοιβιάς ή Βοίβη ή λίμνη της Πελασγιώτιδος κατά την αρχαιότητα) βρίσκεται νοτιοανατολικά της Λάρισας, κοντά στις βόρειες πλαγιές του Πηλίου, στα όρια των Νομών Λαρίσης και Μαγνησίας. Δημιουργήθηκε από τεκτονικό βύθισμα της πρώτης περιόδου της τεταρτογενούς εποχής, στο οποίο εναποτέθηκαν τα πρώτα λιμναία ιζήματα ενώ στη συνέχεια προστέθηκαν προϊόντα διάβρωσης που μετέφεραν ο Πηνειός και άλλοι χείμαρροι από τη λεκάνη απορροής τους. (Πηγή: *Ελευθεροτυπία*)

Η λίμνη αποξηράνθηκε ολοκληρωτικά το 1962 ως μέρος σχεδίου με στόχο την αντιμετώπιση των πλημμυρών που προκαλούνταν στις γύρω περιοχές, τη δημιουργία νέων γεωργικών εκτάσεων και τη μείωση της έντονης παρουσίας εντόμων και κατ' επέκταση των κρουσμάτων ελονοσίας, λόγω της ύπαρξης των βαλτωδών εκτάσεων.



Εικόνα 2.1 Η θέση της λίμνης Κάρλα στον ελλαδικό χώρο (Πηγή: *maps.google.gr*)

Ωστόσο, μετά την ολοκλήρωση της αποξήρανσης παρατηρήθηκαν έντονες επιπτώσεις στο οικοσύστημα, οι οποίες ήταν σοβαρότερες από τα οφέλη του έργου και αποτέλεσαν απόρροια της μη ορθής ολοκλήρωσής του, η οποία προϋπέθετε κατασκευή ταμιευτήρα 64.700 στρεμμάτων. Με την αποξήρανση της λίμνης φάνηκαν οι τρομακτικές επιπτώσεις από τη μη ολοκλήρωση του έργου όπως προβλεπόταν με την κατασκευή του ταμιευτήρα των 64700 στρεμμάτων. (Πηγή: fdkarlas.gr)

- ✓ Αυτές οι επιπτώσεις ήταν τόσο περιβαλλοντικές όσο και κοινωνικές:
- ✓ Ραγδαία πτώση της υπόγειας υδροφορίας
- ✓ Εισχώρηση του θαλάσσιου μετώπου στον ευρύτερο χώρο της περιοχής της Κάρλας
- ✓ Ρύπανση και επιπτώσεις στον κλειστό Παγασητικό κόλπο και εμφάνιση φυτοπλαγκτού
- ✓ Εμφάνιση ρηγμάτων μεγάλου βάθους και καταστροφή κτισμάτων
- ✓ Επιπτώσεις στην πανίδα και στην χλωρίδα της περιοχής
- ✓ Καταστροφή γεωτρήσεων και ξήρανση πηγών μεταξύ των οποίων και η Υπέρεια Κρήνη στο Βελεστίνο
- ✓ Αλλαγές στο μικροκλίμα της περιοχής
- ✓ Αδυναμία υδροδότησης πόλεων και οικισμών

Λόγω των παραπάνω, κρίθηκε αναγκαία η αναδημιουργία της λίμνης, συγκεκριμένα ενός ταμιευτήρα 42.000 στρεμμάτων και έτσι, από το Δεκέμβριο του 2010 άρχισε η άντληση νερού από το ποταμό Πηνειό.

Όσον αφορά τη πανίδα και τη χλωρίδα της περιοχής, σύμφωνα με στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ (νυν ΥΠΕΚΑ), η λίμνη είχε πλούσια υδρόβια βλάστηση ενώ ζούσαν εκεί 430.000 πουλιά 143 καταγεγραμμένων ειδών, από τα οποία τα 55 τουλάχιστον θεωρούνται σήμερα προστατευόμενα. Παράλληλα, η λίμνη ήταν από τις πλουσιότερες σε ιχθυοπανίδα. Ακόμα και μετά τις καταστροφικές επεμβάσεις, η βιοποικιλότητά της παραμένει υψηλή με πολλά είδη πανίδας και χλωρίδας να παραμένουν στη περιοχή (75 είδη ορνιθοπανίδας, 106 μεταναστευτικά είδη, 6 είδη αμφιβίων και ερπετών, θηλαστικά, ψάρια). (Πηγή: [Θεολόγου, 2014](#))

Για τη προστασία, τη διατήρηση και τη διαχείριση της φύσης και του τοπίου της περιοχής ως πολύτιμου εθνικού φυσικού αγαθού, δημιουργήθηκε το 2003 ο

Φορέας Διαχείρισης Οικοανάπτυξης Κάρλας-Μαυροβουνίου-Κεφαλόβρυσου-Βελεστίνου (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε), ο οποίος αποτελεί Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου.

Ο Φορέας πραγματοποιούσε σε τακτά χρονικά διαστήματα δειγματοληψίες στη περιοχή της λίμνης Κάρλας, ωστόσο από τον Ιούλιο του 2013 και καθώς ανακυρήχθηκε ανάδοχος στη περιοχή ο οποίος εφαρμόζει την Οδηγία 2000/60, οι δειγματοληψίες του Φορέα προσωρινά σταμάτησαν. (Πηγή: *Φορέας Διαχείρισης Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε*)

2.3. Βασικές ποιοτικές παράμετροι

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρατίθενται οι βασικές παράμετροι για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από το φορέα διαχείρισης Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε. Εν συνεχεία, έγινε η προσπάθεια εφαρμογής των τηλεπισκοπικών δεικτών. Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες έχουν ως αντικείμενο τη μελέτη της χλωροφύλλης-α (chl-a), τη διαύγεια και τη θολότητα των υδάτων ενώ ελάχιστες επικεντρώνονται στις υπόλοιπες παραμέτρους. Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια διερεύνησης με αντίστοιχους συνδυασμούς καναλιών των υπόλοιπων φυσικοχημικών παραμέτρων για τους οποίους υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις από το φορέα Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.

Χλωροφύλλη-α (chlorophyll-a, chl-a)

Είναι φυσικοχημική παράμετρος του νερού απαραίτητη για τους περισσότερους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Η μέτρηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα επιφανειακά νερά χρησιμοποιείται ως εκτίμηση της βιομάζας αλγών και κυανοβακτηριών. Μετριέται σε mg/cm³. 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*). Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης για τη χλωροφύλλη b και c είναι παρόμοια με αυτά της χλωροφύλλης a, με ελαφρές διαφορές ωστόσο στη θέση των σημείων μέγιστης απορρόφησης.

Διαλυμένο Οξυγόνο (Dissolved Oxygen, DO)

Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες φυσικοχημικές παραμέτρους της ποιότητας των υδάτων. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό σχετίζεται με την ανάπτυξη των περισσότερων μορφών ζωής. Χρησιμοποιείται από τους περισσότερους οργανισμούς για την αναπνοή και την οξείδωση των οργανικών ουσιών. Το νερό οξυγονώνεται κυρίως από την ατμόσφαιρα, μέσω του φαινομένου της διάχυσης, και δευτερευόντως χάρη στη φωτοσύνθεση των υδρόβιων φυτικών οργανισμών. Έλλειψη οξυγόνου οδηγεί σε αφανισμό τους ανώτερους αερόβιους οργανισμούς (π.χ. ψάρια) και επιτρέπει μόνο την επιβίωση σε ορισμένα είδη βακτηρίων. (Πηγή: *EcoDo-Net*).

pH

Το pH παίζει σπουδαίο ρόλο στα υδάτινα οικοσυστήματα καθώς καθορίζει τη διαλυτότητα και την ιοντική μορφή των περισσότερων ουσιών που βρίσκονται διαλυμένες σε αυτά. Η μείωση ή η αύξηση του pH είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη φωτοσύνθεση και την αναπνοή των διαφόρων οργανισμών και επομένως σχετίζεται άμεσα με την παραγωγικότητα βιομάζας. Το κρίσιμο όριο επιβίωσης για τη ζωή στις λίμνες και τα ποτάμια, δεν εξαρτάται τόσο από τη μέση τιμή του pH κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, αλλά από την πιο χαμηλή τιμή του pH. Τέτοιες σύντομες αλλά ιδιαίτερα επικίνδυνες περιόδους με χαμηλές τιμές pH εμφανίζονται κυρίως την άνοιξη και ονομάζονται πλήγματα οξύτητας. Σε τιμές pH κάτω του 5 όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί στα συγκεκριμένα οικοσυστήματα πεθαίνουν. Το pH κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0-14 με το 7 να είναι το ουδέτερο.. (Πηγή: *hydroscopio*)

Αγωγιμότητα (Conductivity, Conduct)

Είναι η αριθμητική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα και εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως την παρουσία ιόντων και την θερμοκρασία. Απόβλητα και ρύποι αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι μονάδες μέτρησης της είναι microsiemens ανά εκατοστό ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και οι συνήθεις τιμές είναι <1500 . (Πηγή: *hydroscopio*)

Ολικός Φώσφορος (Total phosphorus, TP)

Ολικός φώσφορος καλείται το σύνολο του οργανικού και του ανόργανου, διαλυμένου και σωματιδιακού φωσφόρου και αποτελεί χημική ανόργανη

παράμετρο που βρίσκεται στο νερό κυρίως με τη μορφή φωσφορικών ιόντων και αποτελεί ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά των ζωικών και των φυτικών οργανισμών. Αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της πρωτογενούς παραγωγής συνεπώς είναι υψίστης σημασίας για την αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας μιας λίμνης. Στα περισσότερα φυσικά νερά οι συγκεντρώσεις του είναι της τάξης των 10-50μg/l, στα μη παραγωγικά oligοτροφικά οι συγκεντρώσεις αυτές μπορεί να είναι μικρότερες των 5 μg/l, ενώ σε ευτροφικές λίμνες μπορεί να ξεπερνούν τα 100 μg/l. Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία (μιας και υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τους ρυθμούς αποικοδόμησης των οργανικών ουσιών επομένως και την απελευθέρωση φωσφόρου), το pH (σχετίζεται με την επαναιώρηση του φωσφόρου του πυθμένα), τα νιτρικά και τα νιτρώδη ιόντα (αύξησή τους μειώνει το ρυθμό απελευθέρωσής του από τον πυθμένα εξαιτίας της οξειδωτικής τους δράσης) και τη παρουσία υδρόβιας μακροφυτικής βλάστησης. (Πηγή: ΚΠΕ Καστοριάς)

Νιτρικά Ιόντα (NO₃⁻)

Είναι χημική ανόργανη παράμετρος, αποτελούν μία από τις μορφές που παίρνει το άζωτο σε υδάτινο περιβάλλον. Υπάρχουν στα φυσικά νερά, αλλά η συγκέντρωσή τους είναι συνήθως χαμηλή. Σε αερόβιες συνθήκες διεισδύουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα νιτρικά αποτελούν το τελικό στάδιο οξείδωσης της αμμωνίας και παρουσία τους στα νερά δείχνει παλαιά ρύπανση. Υψηλές συγκεντρώσεις οφείλονται σε λιπάσματα, απορρίμματα και ζωικά ή ανθρώπινα απόβλητα. Υπάρχουν ακόμη και στον αέρα, λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με αποτέλεσμα να παρασύρονται από τη βροχή ή να αποτίθενται στο έδαφος. Τα νιτρικά ιόντα αποτελούν θρεπτικά στοιχεία του φυτοπλαγκτόν και, παρά τη θεώρηση ότι συγκεντρώσεις νιτρικών μικρότερες των 0.5mg/l δεν προκαλούν αρνητικές επιδράσεις στα ψάρια, τα ιόντα αυτά πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λιγότερα στα επιφανειακά ύδατα. (Πηγή: *hydroscopio*, ΚΠΕ Καστοριάς)

Αμμώνιο (NH₄⁺)

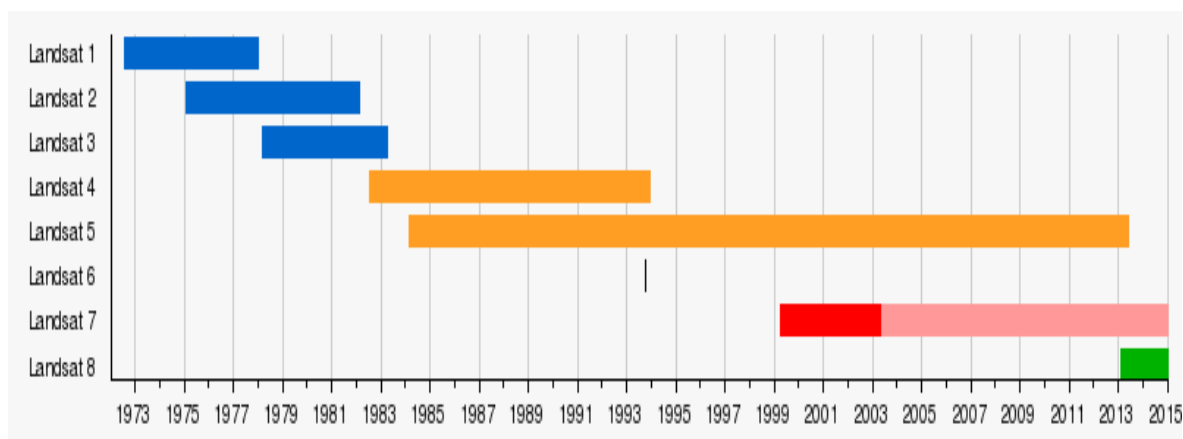
Χημική ανόργανη παράμετρος, αποτελεί, μαζί με τα νιτρικά ιόντα, μία από τις μορφές που παίρνει το άζωτο σε υδάτινο περιβάλλον. Αποτελεί τοξικό απόβλητο του μεταβολισμού των ζώων. Στα ψάρια και τα υδρόβια ασπόνδυλα αποβάλλεται απευθείας στο νερό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για το πόσιμο νερό η ανώτατη

επιτρεπόμενη τιμή του είναι τα 0.50 mg/l, σύμφωνα με τη κοινοτική οδηγία 98/83.
(Πηγή: ΚΠΕ Καστοριάς10, ΕΚΠΑ, Τμήμα Χημείας)

2.4. Το πρόγραμμα Landsat

Είναι μία σύμπραξη της NASA με την Γεωλογική υπηρεσία των Η.Π.Α. (U.S. Geological Survey) που παρέχει την μακροβιότερη συνεχόμενη (πάνω από 40 χρόνια) καταγραφή της επιφάνειας της γης μέσω δορυφόρων. Καθημερινώς, οι δορυφόροι Landsat παρέχουν πολυφασματικά δεδομένα για ολόκληρο τον πλανήτη, παρέχοντας έτσι καίριες πληροφορίες για τις αλλαγές στην επιφάνεια της γης στην επιστημονική κοινότητα. (http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=2)

Οι δορυφόροι που έχουν ως τώρα εκτοξευθεί επιτυχώς είναι επτά. Πρόκειται για τους Landsat 1 (1972-1978), Landsat 2 (1975-1982), Landsat 3 (1978-1983), Landsat 4 (1982-1993), Landsat 5 (1984-2013), Landsat 7 (1999-) και Landsat 8 (2013-).(https://en.wikipedia.org/wiki/Landsat_program). 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 τους δορυφόρους Landsat 7 και 8 οπότε τα προγράμματα τους θα αναλυθούν εκτενέστερα.



Εικόνα 2.2 Η χρονική διάρκεια των δορυφόρων Landsat (Πηγή : [wikipedia.org/wiki/Landsat_program](https://en.wikipedia.org/wiki/Landsat_program))

2.4.1. Το πρόγραμμα Landsat 7

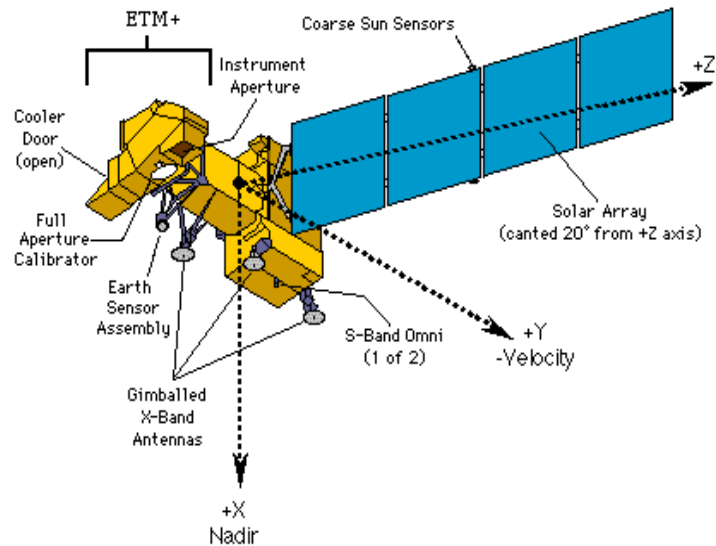
Ο Landsat 7 εκτοξεύθηκε στις 15 Απριλίου του 1999. Σαν πρωταρχικό σκοπό του είχε την ανανέωση του παγκόσμιου αρχείου των δορυφορικών εικόνων. Σχεδιάστηκε ώστε να διαρκέσει τουλάχιστον για 5 χρόνια και έχει την δυνατότητα να συλλέγει και να μεταδίδει ως και 532 εικόνες την ημέρα. Η τροχιά του είναι γεωσύγχρονη δηλαδή κινείται με την ταχύτητα περιστροφής της γης, βρίσκεται σε ύψος 705 χιλιομέτρων και καλύπτει όλη την υδρόγειο σε 16 μέρες. Διαθέτει σαν αισθητήρα τον ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). (en.wikipedia.org/wiki/Landsat_7) Τα προϊόντα του αποτελούνται από κβαντισμένους βαθμονομημένους ψηφιακούς αριθμούς (Digital Numbers-DN) οι οποίοι αντιπροσωπεύουν πολυφασματικά δεδομένα εικόνας.

Ο ETM+ περιλαμβάνει οχτώ κανάλια. Ένα παγχρωματικό (κανάλι 8) με 15 μέτρα χωρική ανάλυση και το θερμικό (κανάλι 6) με 60 μέτρα χωρική ανάλυση. Τα υπόλοιπα κανάλια είναι πολυφασματικά με χωρική ανάλυση 30 μέτρων. Πρόκειται για τα εξής κανάλια: μπλε (κανάλι 1), πράσινο (κανάλι 2), κόκκινο (κανάλι 3), εγγύς υπέρυθρο (κανάλι 4), μικρού μήκους κύματος υπέρυθρο 1 (κανάλι 5) και το μικρού μήκους κύματος υπέρυθρο 2 (κανάλι 7). (βλ. Πίνακα 2.1)

| Bands | Wavelength | Name | Resolution | Band group |
|-------|------------------|--------------|------------|---------------------|
| 1 | 450-515 nm | Blue | 30m | Multispectral |
| 2 | 525-605 nm | Green | 30m | Multispectral |
| 3 | 630-690 nm | Red | 30m | Multispectral |
| 4 | 750-900 nm | NIR | 30m | Multispectral |
| 5 | 1550 - 1750 nm | SWIR1 | 30m | Multispectral |
| 6 (1) | 10400 - 12500 nm | Thermal | 60m | Thermal - high gain |
| 6 (2) | 10400 - 12500 nm | Thermal | 60m | Thermal - low gain |
| 7 | 2090 - 2350 nm | SWIR2 | 30m | Multispectral |
| 8 | 520 -900 nm | Panchromatic | 15m | Panchromatic |

Πίνακας 2.1 Τα κανάλια του Landsat 7(ETM+) (Πηγή: fundisa.sansa.org.za)

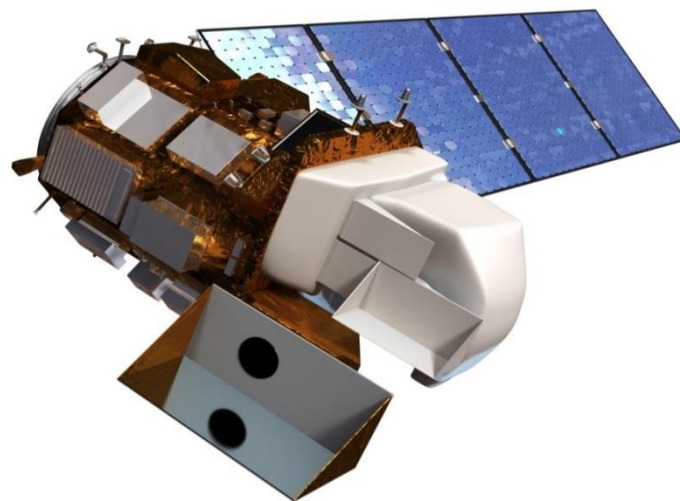
Στις 31 Μαΐου του 2003 το scan line corrector του ETM+ παρουσίασε πρόβλημα, το οποίο από την έρευνα που έγινε διαπιστώθηκε πως είναι μηχανικό και δεν έχει ακόμα διορθωθεί, με αποτέλεσμα πολλές εικόνες να παρουσιάζουν πρόβλημα στην εικονιζόμενη πληροφορία (μαύρες γραμμές στην εικόνα που δεν περιέχουν πληροφορία). Έχει υπολογιστεί ότι περίπου 22% της εικόνας «χάνεται» λόγω του συγκεκριμένου προβλήματος.



Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση Landsat 7 (Πηγή: geog.ucsb.edu)

2.4.2. Το πρόγραμμα Landsat 8

Ο Landsat 8 εκτοξεύθηκε στις 11 Φεβρουαρίου του 2013. Όπως και στην περίπτωση του Landsat 7, η τροχιά του είναι γεωσύγχρονη δηλαδή κινείται με την ταχύτητα περιστροφής της γης, βρίσκεται σε ύψος 705 χιλιομέτρων και καλύπτει όλη την υδρόγειο σε 16 μέρες. Διαθέτει δύο αισθητήρες τον Operation Land Imager (OLI) και τον Thermal Infrared Scanner (TIRS).



Εικόνα 2.4 Ο Landsat 8 με ευδιάκριτους τους δύο αισθητήρες (Πηγή: gallery.usgs.gov)

Τα προϊόντα του όπως και στον Landsat 7 αποτελούνται από κβαντισμένους βαθμονομημένους ψηφιακούς αριθμούς (Digital Numbers-DN) οι οποίοι αντιπροσωπεύουν πολυφασματικά δεδομένα εικόνας τα οποία αποκτήθηκαν από τους αισθητήρες. Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της Γεωλογικής υπηρεσίας των Η.Π.Α (USGS), τα προϊόντα παραδίδονται ηλεκτρονικά σε μορφή 16δικών ψηφίων και μέσω των συντελεστών που δίνονται στο αρχείο με τα μεταδεδομένα (MTL file), είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία των βαθμονομημένων ψηφιακών αριθμών προκειμένου να δώσουν την ανακλαστικότητα (reflectance) και την ακτινοβολία (radiance) στην κορυφή της ατμόσφαιρας, καθώς και την ανακλαστικότητα στην επιφάνεια του εδάφους.

Ο OLI περιέχει 9 φασματικά κανάλια, συμπεριλαμβανομένου και του παγχρωματικού με διακριτική ικανότητα 30 και 15 μέτρων αντίστοιχα. (Πίνακας 2.2). 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 ταιριάξουν με τα δεδομένα από τον OLI. (Πίνακας 2.3)

| Spectral Band | Wavelength | Resolution |
|------------------------------------|-----------------------------|------------|
| Band 1 - Coastal / Aerosol | 0.433 - 0.453 μm | 30 m |
| Band 2 - Blue | 0.450 - 0.515 μm | 30 m |
| Band 3 - Green | 0.525 - 0.600 μm | 30 m |
| Band 4 - Red | 0.630 - 0.680 μm | 30 m |
| Band 5 - Near Infrared | 0.845 - 0.885 μm | 30 m |
| Band 6 - Short Wavelength Infrared | 1.560 - 1.660 μm | 30 m |
| Band 7 - Short Wavelength Infrared | 2.100 - 2.300 μm | 30 m |
| Band 8 - Panchromatic | 0.500 - 0.680 μm | 15 m |
| Band 9 - Cirrus | 1.360 - 1.390 μm | 30 m |

Πίνακας 2.2 Τα κανάλια του OLI (Πηγή: en.wikipedia.org/wiki/Landsat_8)

| Spectral Band | Wavelength | Resolution |
|------------------------------------|-----------------------------|------------|
| Band 10 - Long Wavelength Infrared | 10.30 - 11.30 μm | 100 m |
| Band 11 - Long Wavelength Infrared | 11.50 - 12.50 μm | 100 m |

Πίνακας 2.3 Τα κανάλια του TIRS (Πηγή: en.wikipedia.org/wiki/Landsat_8)

| Landsat-7 ETM+ Bands (μm) | | | Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm) | | |
|--|-------------|---------------|--|---------------|---------|
| | | | 30 m Coastal/Aerosol | 0.435 - 0.451 | Band 1 |
| Band 1 | 30 m Blue | 0.441 - 0.514 | 30 m Blue | 0.452 - 0.512 | Band 2 |
| Band 2 | 30 m Green | 0.519 - 0.601 | 30 m Green | 0.533 - 0.590 | Band 3 |
| Band 3 | 30 m Red | 0.631 - 0.692 | 30 m Red | 0.636 - 0.673 | Band 4 |
| Band 4 | 30 m NIR | 0.772 - 0.898 | 30 m NIR | 0.851 - 0.879 | Band 5 |
| Band 5 | 30 m SWIR-1 | 1.547 - 1.749 | 30 m SWIR-1 | 1.566 - 1.651 | Band 6 |
| Band 6 | 60 m TIR | 10.31 - 12.36 | 100 m TIR-1 | 10.60 - 11.19 | Band 10 |
| | | | 100 m TIR-2 | 11.50 - 12.51 | Band 11 |
| Band 7 | 30 m SWIR-2 | 2.064 - 2.345 | 30 m SWIR-2 | 2.107 - 2.294 | Band 7 |
| Band 8 | 15 m Pan | 0.515 - 0.896 | 15 m Pan | 0.503 - 0.676 | Band 8 |
| | | | 30 m Cirrus | 1.363 - 1.384 | Band 9 |

Πίνακας 2.4 Αντιστοιχία καναλιών *Landsat 7* και *Landsat 8* (Πηγή: landsat.gsfc.nasa.gov)

3 ■ Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

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. (*Carder et al. 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, et al., 1983*) επομένως η επιλογή των λιμνών πρέπει να γίνεται με προσοχή.

Οι παράμετροι οι οποίες έχουν απασχολήσει τις περισσότερες ερευνητικές εργασίες είναι η χλωροφύλλη (ένδειξη για το φαινόμενο του ευτροφισμού) και η διαύγεια των υδάτων. Όπως φαίνεται και στη συνέχεια, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι δύο αυτές παράμετροι μελετώνται παράλληλα.

3.1. Πολυφασματικά Δεδομένα

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, et al. (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 φυτοπλαγκτόν 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, et al., 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 $\pm 1.3\text{mg/l}$ σε εύρος τιμών 0.5-32.5mg/l και για τη διαύγεια (δίσκος του Secchi) $\pm 1.2\text{m}$ σε εύρος τιμών 0.5 -9.0m. 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.

4. ■ Μεθοδολογία

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναφέρονται οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν ώστε να επιτευχθεί, με όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερο τρόπο, η συλλογή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Πέρα από την συλλογή δεδομένων παρουσιάζεται και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία τους, ώστε να επιτευχθούν τα τελικά αποτελέσματα.

4.1. Πολυφασματικά Δεδομένα

4.1.1. Συλλογή δορυφορικών εικόνων

Μέσω της ιστοσελίδας της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών έγινε δωρεάν η λήψη δορυφορικών εικόνων από τους δορυφόρους Landsat 7 και 8 για την περιοχή μελέτης, από το έτος 2011 έως και το 2014. Από τις διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες έγινε επιλογή εκείνων με την μικρότερη νεφοκάλυψη ώστε να μπορούν αφού έχει γίνει η απαραίτητη επεξεργασία να δώσουν έγκυρα αποτελέσματα.

Η λίμνη ήταν διαθέσιμη σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες λήψης, στον Landsat 7 όμως και στις δύο η λίμνη επηρεαζόταν από τον πρόβλημα στον ETM+. Τελικά οι δορυφορικές εικόνες που επιλέχθηκαν και από τους δύο δορυφόρους συνολικά ήταν 32, των οποίων οι χρονολογίες καθώς και οι ημερομηνίες φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

4.1.1. Επεξεργασία εικόνων με το πρόγραμμα ENVI

Αρχικά, μετά την λήψη των αρχείων από την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών κάθε κανάλι κάθε δορυφόρου αντιστοιχούσε σε ξεχωριστή εικόνα. Με την βοήθεια του προγράμματος ENVI για κάθε ημερομηνία για την οποία υπήρχε εικόνα, έγινε η απεικόνιση όλων των απαραίτητων καναλιών σε μία εικόνα, έτσι ώστε να είναι στην κατάλληλη μορφή για να ακολουθήσει η διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης. Τα κανάλια εισήχθησαν στο πρόγραμμα με αύξουσα σειρά κατά μήκος κύματος και όχι με την αριθμητική σειρά των καναλιών και για τους δύο δορυφόρους. Επιπλέον για τον Landsat 7, λόγω της ύπαρξης των μαύρων λωρίδων (πρόβλημα στον SLC) , για να μην υπάρξει πρόβλημα κατά την ατμοσφαιρική διόρθωση έγινε ρύθμιση ώστε να «αγνοείται» η τιμή 0 , μέσω της διαδικασίας *edit header – edit attributes-data ignore value = 0*. Η σειρά με την οποία εισήχθησαν για κάθε δορυφόρο τα κανάλια φαίνεται στους πίνακες 4.2 και 4.3.

| Δορυφόρος | Έτος | Ημερομηνία |
|------------------|-------------|-------------------|
| Landsat 7 | 2011 | 12 Φεβρουαρίου |
| | | 24 Απριλίου |
| | | 20 Ιουνίου |
| | | 27 Ιουνίου |
| | | 13 Ιουλίου |
| | | 22 Ιουλίου |
| | | 14 Αυγούστου |
| | | 23 Αυγούστου |
| | | 15 Σεπτεμβρίου |
| | | Landsat 7 |
| 19 Απριλίου | | |
| 5 Μαΐου | | |
| 22 Ιουνίου | | |
| 15 Ιουλίου | | |
| 1 Σεπτεμβρίου | | |
| 3 Οκτωβρίου | | |
| Landsat 8 | 2013 | 15 Μαΐου |
| | | 16 Ιουνίου |
| | | 17 Ιουνίου |
| | | 24 Ιουνίου |
| | | 10 Ιουλίου |
| Landsat 7 | | 11 Ιουλίου |
| Landsat 8 | 2014 | 11 Αυγούστου |
| | | 12 Φεβρουαρίου |
| | | 16 Μαρτίου |
| | | 23 Μαρτίου |
| | | 10 Μαΐου |
| | | 26 Μαΐου |
| | | 11 Ιουνίου |
| | | 14 Αυγούστου |
| | | 23 Αυγούστου |
| 24 Σεπτεμβρίου | | |

Πίνακας 4.1 Τελικές ημερομηνίες εικόνων Landsat 7 και Landsat 8 που επιλέχθηκαν

Landsat 7

| Band | Name | Wavelength(μm) |
|------|--------------------------------|----------------|
| 1 | Blue | 0,4825 |
| 2 | Green | 0,5650 |
| 3 | Red | 0,6600 |
| 4 | Near Infrared | 0,8250 |
| 5 | Short Wavelength Infrared 1 | 1,6500 |
| 7 | Short Wavelength Infrared 2 | 2,2200 |
| 6 | Thermal | 11,450 |

Πίνακας 4.2 Διαδοχή καναλιών που εισήχθηκαν σε ENVI για Landsat 7

Landsat 8

| Band | Name | Wavelength(μm) |
|------|--------------------------------|----------------|
| 1 | Coastal | 0,442982 |
| 2 | Blue | 0,482589 |
| 3 | Green | 0,567335 |
| 4 | Red | 0,654608 |
| 5 | Near Infrared | 0,864571 |
| 9 | Cirrus | 1,373480 |
| 6 | Short Wavelength Infrared 1 | 1,609090 |
| 7 | Short Wavelength Infrared 2 | 2,201250 |

Πίνακας 4.3 Διαδοχή καναλιών που εισήχθηκαν σε ENVI για Landsat 8

Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν αρχεία που περιείχαν τις απαραίτητες παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διάρκεια της διόρθωσης. Αναλυτικότερα, πρόκειται για ένα αρχείο `.hdr` –header- που περιέχει μήκη κύματος και το αρχείο `.cal` που περιέχει τα στοιχεία c_1 , c_0 όπως αυτά δίνονται στο αρχείο με τα METADATA (.mtl) της εικόνας. (μόνο για τον Landsat 8, αφού για τον 7 υπήρχε ήδη στα αρχεία του προγράμματος)

4.1.2. Ατμοσφαιρική διόρθωση - ATCOR

Σε όλες τις δορυφορικές εικόνες έγινε ατμοσφαιρική διόρθωση (βλ. εικόνα 4.1), διαδικασία απαραίτητη για την διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, καθώς οι τιμές οι οποίες καταγράφονται σε κάθε δορυφορικό δέκτη δεν είναι οι πραγματικές τιμές που εκπέμπονται από κάθε επίγειο αντικείμενο. Το γεγονός

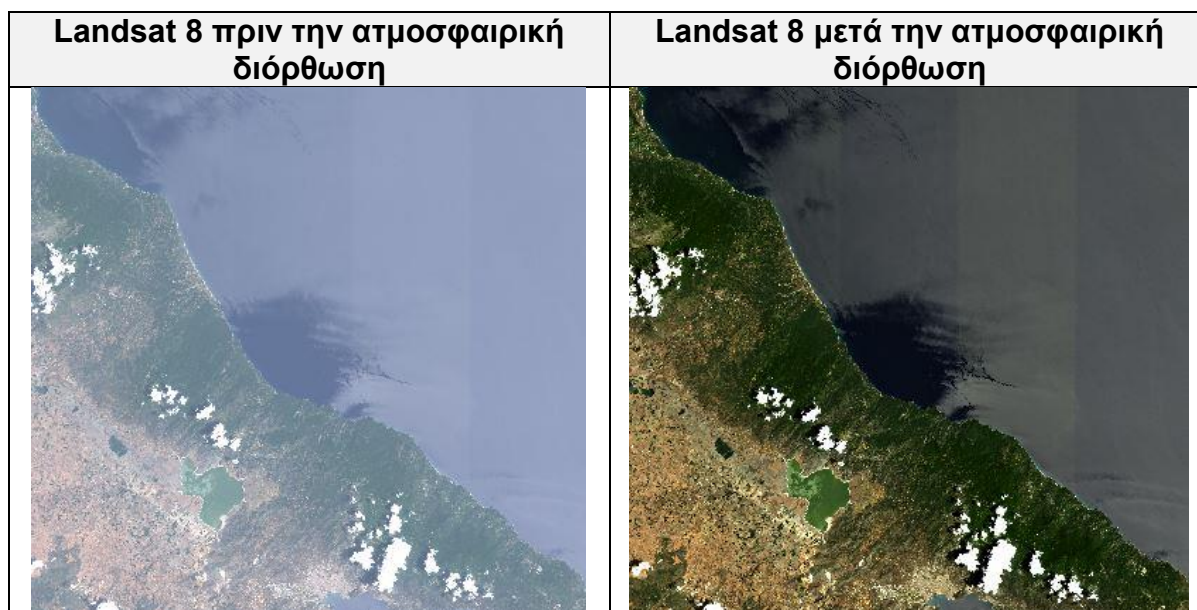
αυτό οφείλεται στα στρώματα της ατμόσφαιρας που παρεμβάλλονται ανάμεσα στη γη και τον δορυφορικό δέκτη και επηρεάζουν την ενέργεια που καταγράφεται σε αυτόν καθώς και την πορεία της ακτινοβολίας.

Η ατμοσφαιρική διόρθωση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος ATCOR. Πρόκειται για ένα επαγγελματικό εργαλείο απόλυτων ατμοσφαιρικών διορθώσεων για τηλεπισκοπικά δεδομένα το οποίο αναπτύχθηκε από το Γερμανικό Διαστημικό κέντρο σε συνεργασία με την εταιρία ReSe. Καλύπτει περίπου το 80% των τυπικών περιπτώσεων και ειδικεύεται στις διορθώσεις πάνω από ξηρά. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του είναι ότι λαμβάνει υπόψη την τοπογραφία της περιοχής ενώ μπορεί να επεξεργαστεί και δορυφορικές εικόνες. Η ατμοσφαιρική διόρθωση που εφαρμόστηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση ανήκει στην κατηγορία των ατμοσφαιρικών διορθώσεων που αξιοποιούν δεδομένα από μοντέλα διάδοσης της ακτινοβολίας, βασίζεται δηλαδή σε φυσικές αρχές. (Σισμανίδης, 2012)

Οι εικόνες στο πρόγραμμα εισήχθησαν και τα κανάλια είχαν την σειρά που προαναφέρθηκε για κάθε δορυφόρο. Πέρα από την σειρά των καναλιών και τα αρχεία *.cal* και άλλα στοιχεία ήταν απαραίτητα προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα έγκυρο αποτέλεσμα:

- ✓ Δέκτης : ανάλογα τον δορυφόρο έγινε η επιλογή του αντίστοιχου δέκτη, για Landsat 7 επιλέχθηκε ο ETM+ ενώ για Landsat 8 ο OLI.
- ✓ Κλίση δορυφόρου (inclination satellite) : 98,23 degrees
- ✓ Στοιχεία γεωμετρίας ήλιου : διαθέσιμα από το αρχείο *.mtl* κάθε εικόνας και πρόκειται για τα Sun Azimuth και Sun zenith=90°-sun elevation
- ✓ Μέσο υψόμετρο περιοχής σε km
- ✓ Ατμοσφαιρικό αρχείο : δείχνει το ποσοστό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, για την περιοχή της εικόνας έγινε η επιλογή "rural"

Τα αρχεία που προέκυψαν ήταν εικόνες της μορφής *atm.bsq* η οποία μπορεί να επεξεργαστεί με την χρήση του προγράμματος QuantumGIS(QGIS).



Εικόνα 2.1 Εικόνα Landsat 8 πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση

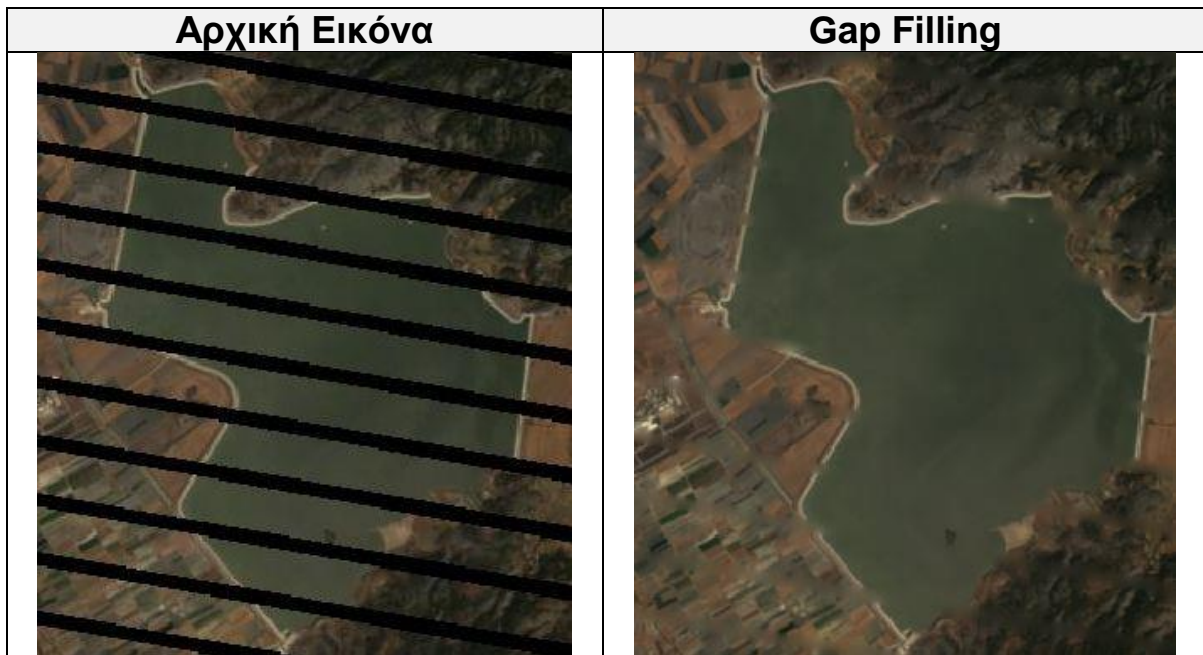
4.1.3. Περικοπή εικόνων

Η επόμενη διαδικασία ήταν η περικοπή όλων των εικόνων με την χρήση του προγράμματος QGIS. Πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συντεταγμένων ώστε όλες οι εικόνες να έχουν το ίδιο μέγεθος και να απεικονίζουν ακριβώς την ίδια περιοχή ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα εξαγωγή της φωτεινότητας ανά σημείο και κανάλι με τη χρήση του προγράμματος Matlab. Η επιλογή των συντεταγμένων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται εύκολη η μετάβαση από τις άκρες των εικόνων στις τελικές θέσεις.

4.1.4. Χρήση προγράμματος Matlab για τις εικόνες Landsat 7

Με την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου στο πρόγραμμα Matlab οι εικόνες του Landsat 7 βελτιώθηκαν οπτικά, αφού συμπληρώθηκαν οι μαύρες λωρίδες που υπήρχαν στην περιοχή της λίμνης και προήλθαν από το πρόβλημα του Scan Line Corrector του Landsat 7 (βλ. εικόνα 4.2). Η διαδικασία αυτή έγινε μόνο για να βελτιωθεί οπτικά η εικόνα και δεν επηρέασε σε κανένα βαθμό τα τελικά αποτελέσματα. Η διαδικασία έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου *Inpainting* που χρησιμοποιήθηκε για να γεμίσει τα κομμάτια που λείπουν με οπτικά αληθοφανή τρόπο. Η προβληματική περιοχή σημειώνεται με πολύγωνο και το πρόγραμμα παρεμβάλλει προς το εσωτερικό τις τιμές των pixel που βρίσκονται στα όρια του

πολυγώνου με τη χρήση της εξίσωσης Laplace. Τα pixel των ορίων δεν τροποποιήθηκαν. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για κάθε κανάλι κάθε εικόνας.



Εικόνα 4.2 Εικόνα της λίμνης με Landsat 7 πριν και μετά το γέμισμα των λωρίδων

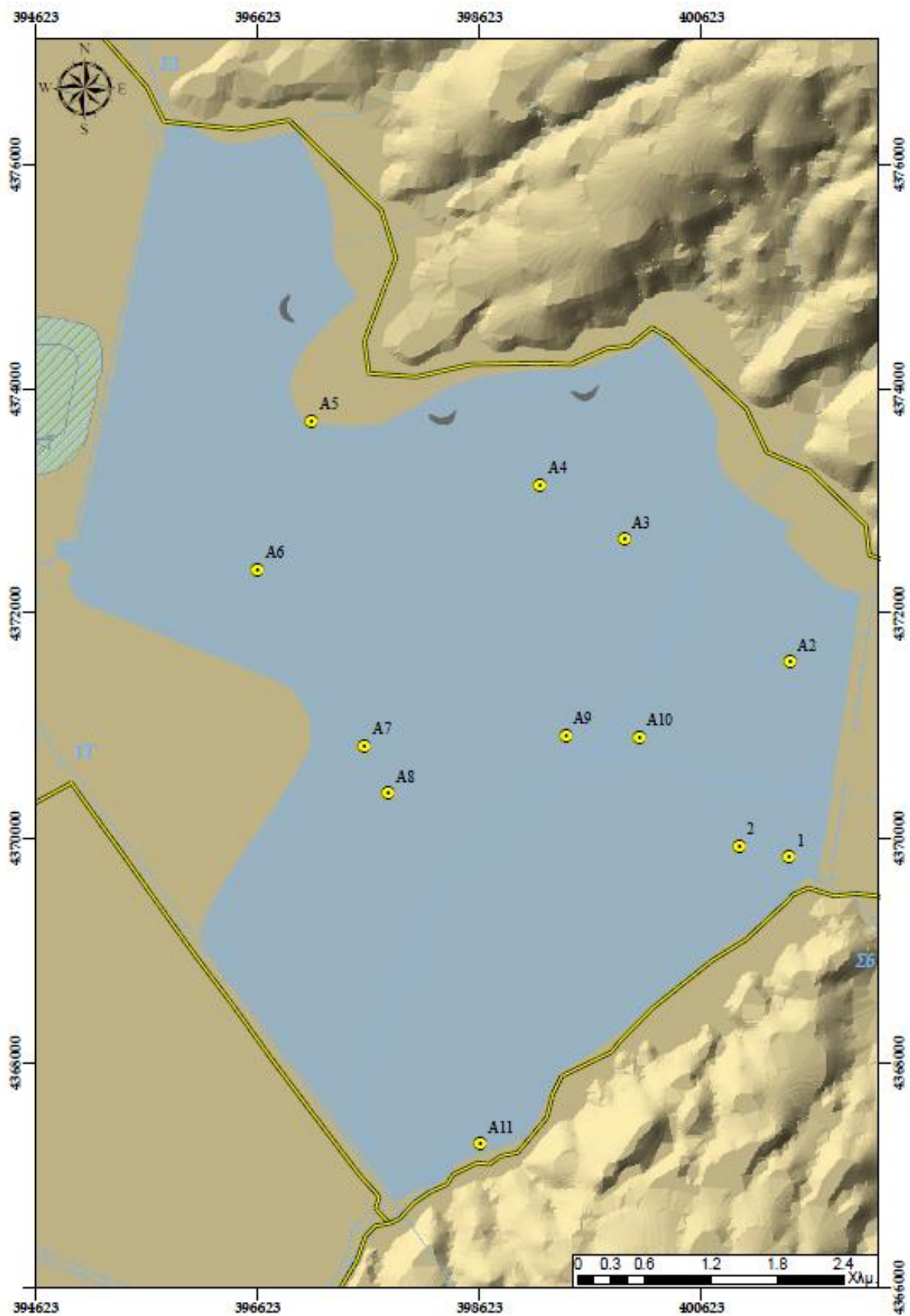
4.2. Συλλογή δεδομένων πεδίου

Από το 2011 μέχρι και το 2014 έχουν διεξαχθεί μελέτες στην περιοχή της λίμνης που τα αποτελέσματά τους έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες δημοσιεύσεις (Σιδηρόπουλος, 2012 και Χαμόγλου, 2014). Επιπλέον δεδομένα συγκεντρώθηκαν από τον Φορέα Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας - Μαυροβουνίου - Κεφαλόβρυσου - Βελεστίνου (Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.) στην βάση δεδομένων τους www.fdkarlas.gr μαζί με δεδομένα μακροπρόθεσμης παρατήρησης όπως οι μαζικές θανατώσεις ψαριών, οι βροχοπτώσεις κτλ. Τα δεδομένα αποτελούνται από φυσικοχημικές παραμέτρους και είναι το ΡΗ, η αγωγιμότητα (conductivity), το διαλυμένο οξυγόνο (DO), ανόργανες ενώσεις του αζώτου (NH_4 και NO_3), ο ολικός φώσφορος (TP) και η μέτρηση τους πραγματοποιήθηκε με το φορητό ψηφιακό πολυόργανο Hach's HQ40d Portable Multi-Parameter Meter. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α που αποτελεί έμμεσο δείκτη της βιομάζας φυκιών πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας διαφορετικό πρωτόκολλο προσδιορισμού για κάθε ένωση, βασιζόμενα σε πρότυπες μεθόδους (ΑΡΗΑ, 1998) και με τη χρήση του φασματοφωτόμετρου Hach DR/3900. (Χαμόγλου, 2014). Παράλληλα, έγιναν μετρήσεις με GPS χειρός, με τα αποτελέσματα σε ΕΓΣΑ'87 του οποίου οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει άμεση συσχέτιση ανάμεσα στη θέση λήψης του δείγματος και στο ριxel της δορυφορικής εικόνας. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιούνταν σε 3 σημεία της λίμνης που φαίνονται στην εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 Τα 3 σημεία δειγματοληψίας του φορέα διαχείρισης της λίμνης

Στην παρούσα διπλωματική έγινε και χρήση των συντεταγμένων των θέσεων των υπερφασματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας της Ιωάννας Θεολόγου στις 19 Ιουλίου 2013 στην λίμνη Κάρλα. Πραγματοποιήθηκαν με το φασματοραδιόμετρο GER1500 της Spectra Vista Corporation συνδεδεμένο με GPS χειρός το οποίο δίνει τις συντεταγμένες του σημείου μέτρησης σε φ, λ του WGS84 και στην συνέχεια μετατράπηκαν σε Χ και Υ μέσω του προγράμματος COORD_GR. (Θεολόγου, 2014). Οι θέσεις των σημείων φαίνονται αναλυτικότερα στην εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4 Θέσεις μετρήσεων στο ΕΓΣΑ '87 στις 19.07.2013 (Πηγή: Θεολόγου, 2014)

4.3. Μοντέλα Παλινδρόμησης

Η διαδικασία μέσω της οποίας έγινε η διερεύνηση των πιθανών συσχετίσεων ανάμεσα στις φυσικοχημικές παραμέτρους και τις τιμές *radiance* και *reflectance* που κατεγράφησαν στα κανάλια του φασματοραδιόμετρου και του δορυφόρου αντίστοιχα, περιελάμβανε τη δημιουργία μοντέλων παλινδρόμησης. Παράλληλα, εκπονήθηκαν ποικίλες δοκιμές προκειμένου να βρεθούν τα σημεία τα οποία εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συσχετίσεις.

Συγκεκριμένα, η τεχνική η οποία εφαρμόστηκε ήταν αυτή της γραμμικής παλινδρόμησης η οποία μοντελοποιεί τη σχέση ανάμεσα σε μία βαθμωτή μεταβλητή Y (απόκλισης ή εξαρτημένη) και μία μεταβλητή X (ερμηνευτική ή ανεξάρτητη). Το μοντέλο έχει την εξής μορφή:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad \text{ή} \quad Y = X\beta + \varepsilon$$

όπου

- Y είναι ένας διάνυσμα διαστάσεων $n \times 1$,
- X ένας πίνακας διαστάσεων $n \times 2$,
- β είναι διάνυσμα διαστάσεων 2×1 . Αποτελείται από τους αγνώστους συντελεστές της παλινδρόμησης (regression coefficients) β_0 , δηλαδή το σημείο τομής της ευθείας με το κατακόρυφο άξονα (intercept), και β_1 που αποτελεί τη κλίση της ευθείας (slope). Σε ένα «κακό» μοντέλο το β_1 προσεγγίζει τη τιμή μηδέν.
- ε ($n \times 1$) ο πίνακας με τα υπόλοιπα (residuals).

Τα παραπάνω με τη μορφή πινάκων δίνουν:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών της παλινδρόμησης, επομένως και η εύρεση της ζητούμενης βέλτιστης ευθείας στην οποία υπακούν τα δεδομένα, γίνεται μέσω της

μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η ποσότητα:

$$\sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2$$

Η αξιολόγηση της προσαρμογής (goodness of fit) της ευθείας στα δεδομένα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ορισμένων αθροισμάτων και μοντέλων.

Τα αθροίσματα αυτά είναι:

$$\checkmark SS_T = \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2 .$$

Το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων (*Total Sum of Squares*) των διαφορών κάθε τιμής από τη μέση. Καταδεικνύει την απόκλιση των δεδομένων από τη μέση τιμή και εκφράζει τη μεταβλητότητά τους.

$$\checkmark SS_R = \sum_i (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2$$

Το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων (*Residual Sum of Squares*). Παρουσιάζει την απόκλιση των δεδομένων από το «καλύτερο μοντέλο», δηλαδή την ευθεία.

$$\checkmark SS_M = SS_T - SS_R$$

Το άθροισμα των τετραγώνων του μοντέλου (*Model Sum of Squares*). Αποτελεί τη διαφορά ανάμεσα στο «χειρότερο» και το «καλύτερο μοντέλο».

Επιπροσθέτως, μέτρο αξιολόγησης του μοντέλου αποτελεί και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Πρόκειται για το πηλίκο:

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = \frac{SS_T - SS_M}{SS_T} = 1 - \frac{SS_M}{SS_T}$$

το οποίο εκφράζει το ποσοστό μεταβλητότητας των Y_i , που ερμηνεύεται από το μοντέλο. 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 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 στη παρούσα εργασία για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η τελευταία μεταβλητή που υπολογίστηκε είναι η p -value που αποτελεί το παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας. Εκφράζει τη 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. (*Draper & Smith, 1997*)

Το μοντέλο που επιλέχθηκε ως καταλληλότερο μετά από δοκιμές για τον Landsat 7 περιελάμβανε τις συντεταγμένες του κεντρικού σημείου δειγματοληψίας (το σημείο με το μεγαλύτερο βάθος) της λίμνης από τον φορέα διαχείρισης σε έξι ημερομηνίες (Πίνακας 4.4). Επιπλέον, δοκιμάστηκαν ακόμα δύο μοντέλα, το ένα περιελάμβανε μόνο τα σημεία στις όχθες της λίμνης όπου το βάθος είναι πολύ μικρό ενώ το άλλο όλα τα σημεία από τα προηγούμενα μοντέλα (τα δύο σημεία στις όχθες και το κεντρικό). Οι συσχετίσεις των παραμέτρων που προέκυψαν από τα προς δοκιμή μοντέλα δεν ήταν ικανοποιητικές και έτσι απορρίφθηκαν.

| X (m) | Y (m) | Ημερομηνία |
|----------|----------|------------|
| 00400512 | 04370422 | 15/07/2012 |
| | | 01/09/2012 |
| | | 03/10/2012 |
| | | 06/04/2013 |
| | | 15/05/2013 |
| | | 16/06/2013 |

Πίνακας 4.4 Συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87 και οι αντίστοιχες ημερομηνίες που χρησιμοποιήθηκαν στο γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για Landsat 7

Το μοντέλο που επιλέχθηκε ως καταλληλότερο για τον Landsat 8 περιελάμβανε τις συντεταγμένες από τα σημεία δειγματοληψίας της 19^{ης} Ιουλίου 2013 (σημεία A3, A5, A6, A7, A9, A10) καθώς και το κεντρικό σημείο δειγματοληψίας από τον φορέα διαχείρισης στις 18.06.2013. (Πίνακας 4.5). Επιπλέον δοκιμάστηκε και μοντέλο που περιελάμβανε όλα τα προαναφερθέντα σημεία καθώς και μία εικόνα Landsat 7 που δεδομένα της χρησιμοποιήθηκαν ως ground truth data. Οι συσχετίσεις που προέκυψαν από το προαναφερθέν μοντέλο δεν ήταν τόσο ικανοποιητικές όπως του πρώτου μοντέλου και έτσι δεν επιλέχθηκε.

| X (m) | Y (m) | Ημερομηνία |
|----------|----------|------------|
| 00400512 | 04370422 | 18/06/2013 |
| 00399934 | 04372667 | 19/07/2013 |
| 00397115 | 04373718 | |
| 00397591 | 04370829 | |
| 00399407 | 04370923 | |
| 00396629 | 04372396 | |
| 00400073 | 04370900 | |

Πίνακας 4.5 Συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87 και οι αντίστοιχες ημερομηνίες που χρησιμοποιήθηκαν στο γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για Landsat 8

Στο σημείο αυτό , πρέπει να αναφερθεί ότι η χρονική διαφορά ανάμεσα στα επίγεια δεδομένα και τις δορυφορικές εικόνες είναι 3 μέρες, εκτός από μία περίπτωση που η διαφορά φτάνει τις 7 ημέρες. Από το μοντέλο του Landsat 7 προέκυψαν γραμμικές εξισώσεις παλινδρόμησης από 118 συνδιασμούς των πολυφασματικών καναλιών και από 138 συνδιασμούς για τον Landsat 8. Οι εξισώσεις προέκυψαν χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγορίθμους σε περιβάλλον Matlab.

4.4. Εφαρμογή εξισώσεων και εξαγωγή χαρτών

Σε αυτό το στάδιο, έγινε η επιλογή των καταλληλότερων εξισώσεων για κάθε μία από τις παραμέτρους για καθένα από τους δύο δορυφόρους αφού έγιναν δοκιμές με τις εξισώσεις που έδιναν τις μεγαλύτερες συσχετίσεις. Έπειτα, με τη χρήση του περιβάλλοντος Matlab και του προγράμματος QGIS εξάχθηκαν οι τελικοί χάρτες για όλες τις παραμέτρους για κάθε ημερομηνία.

Εφόσον επιλέχθηκαν οι κατάλληλες εξισώσεις για κάθε παράμετρο δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον Matlab δύο αλγόριθμοι (ένας για κάθε δορυφόρο) με την βοήθεια των οποίων εξάχθηκαν τα τελικά αποτελέσματα. Κάθε αλγόριθμος αποτελούνταν από δύο σκέλη:

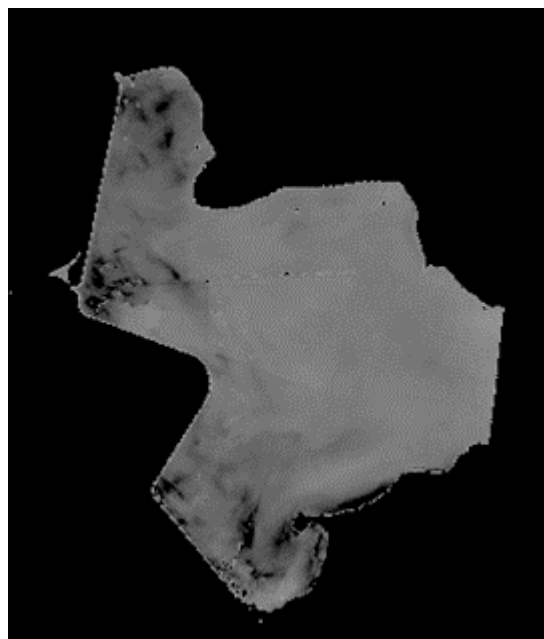
- ✓ Το πρώτο σκέλος περιελάμβανε την δημιουργία μάσκας για κάθε εικόνα με τη χρήση του δείκτη NDWI (Normalized Difference Water Index) που υποδεικνύει την ύπαρξη νερού. Έτσι, στην εικόνα τα σημεία που είχαν νερό εμφανιζόταν με άσπρο χρώμα ενώ όλα τα υπόλοιπα εμφανιζόταν με μαύρο

χρώμα, με αποτέλεσμα την οριοθέτηση της περιοχής της λίμνης. (Εικόνα 4.5)



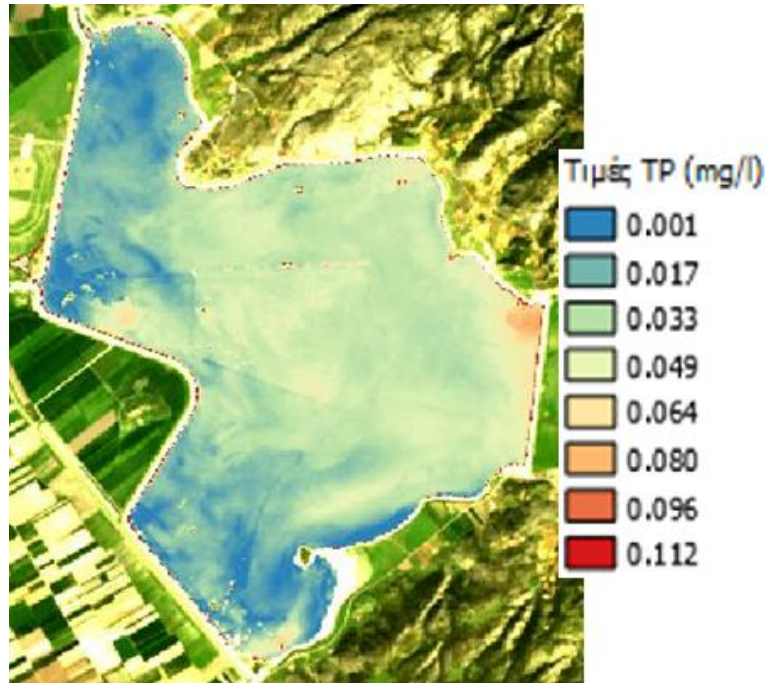
Εικόνα 4.5 Αποτέλεσμα εικόνας μετά την εφαρμογή του δείκτη *NDWI*

- ✓ Στο δεύτερο σκέλος, αφού δημιουργήθηκαν οι μάσκες για κάθε εικόνα εφαρμόστηκαν οι επιλεγμένες εξισώσεις για την κάθε παράμετρο και προέκυψαν τα τελικά αποτελέσματα για κάθε παράμετρο και για κάθε ημερομηνία. (βλ. εικόνα 4.6)



Εικόνα 4.6 Παράδειγμα αποτελέσματος για τον ολικό φώσφορο

Μετάπειτα, κάθε εικόνα εισήχθηκε στο πρόγραμμα QGIS όπου και επιλέχθηκαν τα κατάλληλα εύρη τιμών ανά παράμετρο καθώς επίσης εφαρμόστηκαν οι κατάλληλες παλέτες χρωμάτων ώστε να γίνεται αντιληπτό οπτικά το αποτέλεσμα και να εξαχθούν οι τελικοί χάρτες. (Εικόνα 4.7)



Εικόνα 4.7 Ο χάρτης που προέκυψε για τον ολικό φώσφορο

5 ■ Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των προτεινόμενων δεικτών και οι εμφανιζόμενες συσχετίσεις στις δορυφορικές εικόνες. Αρχικά γίνεται αξιολόγηση των συσχετίσεων των παραμέτρων σε Landsat 7 & 8 και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα επίγεια δεδομένα για κάθε στοιχείο. Εν συνεχεία, παρατίθενται οι χάρτες που σχεδιάστηκαν με βάση τις τελικές συναρτήσεις για τους καλύτερους συνδυασμούς καναλιών και γίνεται μία σύγκριση ανάμεσα στους χάρτες των δύο δορυφόρων σε κοντινές ημερομηνίες.

5.1. Αποτελέσματα συσχετίσεων για πολυφασματικά δεδομένα

Σε αυτό το στάδιο, διερευνήθηκαν οι συσχετίσεις που προέκυψαν για τα κανάλια Landsat 7 (B1 έως B7) και Landsat 8 (B1 έως B8), αντίστοιχα. Οι συσχετίσεις αυτές, προέκυψαν ανάμεσα στις παραμέτρους και τα μεμονωμένα κανάλια, τους λόγους, τις διαφορές, τους λόγους των διαφορών και των αθροισμάτων, των φυσικών λογαρίθμων και τέλος των λογαρίθμων των λόγων τους. Οι δείκτες αυτοί, αποτελούν είτε προτάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας, είτε προέκταση των προτάσεων αυτών με χρήση και άλλων διαθέσιμων συνδυασμών καναλιών.

Για τα Landsat 7 δεδομένα πραγματοποιήθηκαν 118 συσχετίσεις για κάθε μία από τις εκάστοτε παραμέτρους, ενώ για τα δεδομένα Landsat 8, 138 συσχετίσεις. Για κάθε μία από αυτές υπολογίστηκε η συνάρτηση της μορφής $y=ax+b$.

Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα. Από το συνολικό αριθμό των πραγματοποιηθέντων συσχετίσεων, ως αξιοσημείωτα αναφέρονται αυτά που έδωσαν r^2 μεγαλύτερο του 50%. Οι παράμετροι που απέδωσαν τις μεγαλύτερες συσχετίσεις, ήταν η chl_a, το διαλυμένο οξυγόνο και η αγωγιμότητα.

Εν συνεχεία, για κάθε μία από τις παραμέτρους, έγινε επιλογή ορισμένων από τις συσχετίσεις προκειμένου να κατασκευαστούν οι αντίστοιχοι χάρτες και οι οποίες φαίνονται σε κάθε πίνακα με χρώμα κίτρινο. Συγκεκριμένα, όπου αυτό ήταν επιτρεπτό, επιλέχθησαν οι δείκτες με τις καλύτερες συσχετίσεις.

✓ Χλωροφύλλη-α (chlorophyll-a, chl-a)

| CHL-α (Χλωροφύλλη-α) σε L8 | | |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Δείκτης | r² | Y=ax+b |
| R480/(R440+R480+R560) | 93.21 | γ = 520.2151x -84.763 |
| EXP(R560/R480) | 92.68 | γ = -4.6853x + 78.1388 |
| R560/R480 | 91.37 | γ = -35.4545x + 114.155 |
| (R560/R480)+R655 | 91.04 | γ = -36.9929x + 119.3549 |
| EXP(R480) | 90.66 | γ = 949.7053x + -944.9629 |
| R480 | 90.64 | γ = 986.0178x + 4.0687 |
| LnR480-LnR560 | 90.58 | γ = 71.375x + 92.583 |
| Log(R480/R560) | 90.58 | γ = 164.3471x + 92.583 |
| EXP(R655/R480) | 90.10 | γ = -46.3695x + 240.4158 |
| LnR480 | 89.77 | γ = 36.5777x + 161.4695 |
| R655/R480 | 89.74 | γ = -196.735x + 327.9551 |
| R480/R560 | 89.70 | γ = 143.2762x -28.6648 |
| LnR480-LnR655 | 89.48 | γ = 284.2454x + 148.2715 |
| EXP(R560/R655) | 89.35 | γ = -16.4485x + 108.8308 |
| EXP(R480/R560) | 89.24 | γ = 86.9263x -100.4114 |
| R480/R655 | 89.23 | γ = 410.607x -240.5538 |
| EXP(R480/R655) | 89.05 | γ = 205.4566x -366.8799 |
| R560/R655 | 88.42 | γ = -66.1803x + 134.6372 |
| (R440+R480)/2 | 88.04 | γ = 1009.5333x + 1.7942 |
| LnR560-LnR655 | 87.67 | γ = -91.8724x + 72.7968 |
| R655/R560 | 86,86 | γ = 127.2997x -49.142 |
| (R440-R560)/R655 | 77.76 | γ = 61.893x + 82.9819 |
| R865/R560 | 77.51 | γ = 103.4582x + 22.1924 |
| EXP(R865/R560) | 76.90 | γ = 84.7111x -60.663 |
| LnR440-LnR865 | 75.91 | γ = -23.9851x + 66.9185 |
| R865/R440 | 75.59 | γ = 68.8928x + 17.2387 |
| R440/R865 | 75.25 | γ = -8.0986x + 65.2829 |
| EXP(R865/R440) | 75.22 | γ = 48.1368x -27.0828 |
| LnR655-LnR865 | 75.17 | γ = -24.5982x + 74.9882 |
| R655/R865 | 75.07 | γ = -6.2717x + 66.3438 |
| R865/R655 | 74.28 | γ = 93.6291x + 17.1625 |
| (R865/R655)+R1610 | 74.26 | γ = 91.7237x + 17.4315 |
| EXP(R865/R655) | 73.87 | γ = 71.4779x + -51.2784 |
| EXP(R560) | 72.45 | γ = 750.2349x -768.6735 |
| R560 | 72.41 | γ = 808.7599x -20.6494 |
| R480/R865 | 71.75 | γ = -9.6857x + 67.8391 |
| LnR560 | 71.74 | γ = 60.5388x + 197.0205 |
| Ln((R560+R655)/(R440+R480)) | 71.57 | γ = -109.8883x + 99.2233 |
| R865/R480 | 70.84 | γ = 68.8435x + 15.542 |
| EXP(R865/R480) | 70.27 | γ = 46.6155x -26.573 |
| EXP(R440/R865) | 68.87 | γ = -0.34403x + 49.2202 |
| EXP(R480/R865) | 68.35 | γ = -0.56208x + 51.0071 |
| EXP(R655/R865) | 67.52 | γ = -0.091552x + 47.7979 |
| R480-R655 | 67.06 | γ = -2781.3567x -5.9982 |
| EXP(R560/R440) | 64.25 | γ = -6.2945x + 84.236 |
| R560-R2200 | 63.73 | γ = 783.3294x -17.0161 |

| CHL-α (Χλωροφύλλη-α) σε L7 | | |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Δείκτης | r² | Y=ax+b |
| EXP(R835/R2220) | 93.96 | γ = 46.4551x + -37.5519 |
| EXP(R835/R660) | 93.88 | γ = 151.7135x + -178.7266 |
| EXP(R835/R1650) | 90.75 | γ = 0.013089x + 115.1225 |
| R835/R660 | 89.80 | γ = 391.3413x + -138.9378 |
| EXP(R835) | 89.60 | γ = 6.1177e-007x + 103.1744 |
| R835/R2220 | 82.49 | γ = 215.5404x + -126.3055 |
| R835/(R485+R560+R660) | 82.21 | γ = 1510.6624x + -183.5263 |
| EXP(R835/R560) | 81.81 | γ = 348.4939x + -443.639 |
| LnR660-LnR835 | 79.52 | γ = -318.4371x + 262.3635 |
| Log(R660/R835) | 79.52 | γ = -733.2285x + 262.3635 |
| R660-R835 | 76.95 | γ = -17.8103x + 262.2285 |
| R835/R1650 | 74.93 | γ = 39.7313x + -37.0334 |
| R835/R560 | 74.54 | γ = 602.53x + -163.002 |
| R660/R835 | 63.95 | γ = -221.8364x + 480.2699 |
| (R485-RR835)/R660 | 62.03 | γ = -387.6676x + 219.0784 |
| EXP(R835/R485) | 61.20 | γ = 160.2953x + -220.7003 |
| LnR835-LnR1650 | 57.31 | γ = 186.1991x + -118.0806 |
| R485-R835 | 56.52 | γ = -20.0842x + 224.5241 |
| R485/R835 | 56.03 | γ = 368.1912x + -148.7275 |
| (R560-R835)/R660 | 54.99 | γ = -336.3958x + 381.2712 |
| LnR560-LnR835 | 50.21 | γ = -288.3314x + 221.8836 |

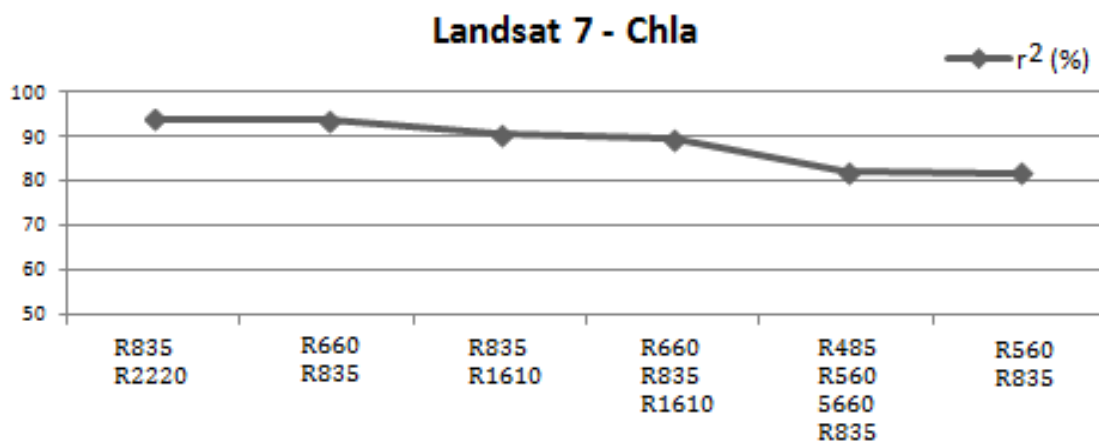
| | | |
|----------------|-------|----------------------------------|
| EXP(R560/R865) | 63.21 | $\gamma = -0.0068184x + 45.6184$ |
| R560/R440 | 61.33 | $\gamma = -38.9354x + 116.018$ |
| R440-R655 | 59.77 | $\gamma = -1782.1538x + 16.3568$ |
| LnR440-LnR560 | 59.74 | $\gamma = 70.7033x + 87.3684$ |
| R440/R560 | 58.15 | $\gamma = 128.1299x - 25.4991$ |
| EXP(R440/R560) | 57.28 | $\gamma = 73.7052x - 82.8468$ |
| R560-R1610 | 56.39 | $\gamma = 770.0114x - 15.4439$ |

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα συσχετίσεων για τη χλωροφύλλη-α

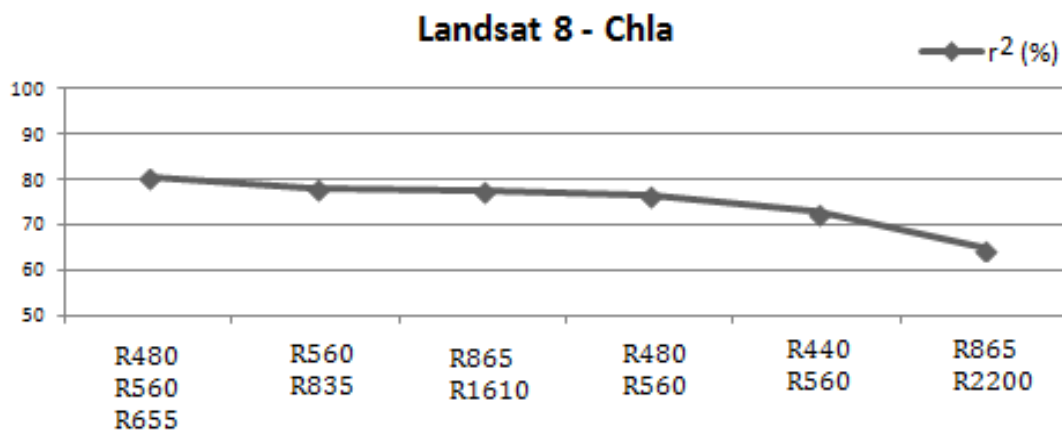
Τα πρώτα υπό μελέτη αποτελέσματα αφορούν τη παράμετρο chl-a. Παρατηρείται ότι οι συνδυασμοί καναλιών που δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι πολλοί και οι διαφορές ανάμεσα στα τελικά r^2 μικρές. Μεγαλύτερος αριθμός δυνατών συσχετίσεων πετυχαίνεται με τα δεδομένα του Landsat 8, όπως είναι φανερό. Το κανάλι το οποίο εμφανίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό κατά την επίτευξη των καλύτερων συσχετίσεων στον Landsat 7 είναι το B4(R835) που υπάρχει σε κάθε εξίσωση με συσχέτιση άνω του 50%. Όσον αφορά τον Landsat 8, μεγάλος είναι ο αριθμός εμφάνισης των καναλιών B4(R650) και B2(R480), ενώ ακολουθεί το B5(R865).

Μετά από μελέτη των δεικτών, δεν παρατηρείται κάποιο πρότυπο εμφάνισης ενός συγκεκριμένου είδους πράξεων ανάμεσα στα κανάλια, το οποίο να εμφανίζει συγκεκριμένα μεγαλύτερες συσχετίσεις.

Παρακάτω στους πίνακες 5.2 και 5.3 φαίνεται το ποσοστό της συσχέτισης των αντίστοιχων καναλιών (μεμονωμένων και συνδυασμών) του Landsat 7 με τον Landsat 8 για την χλωροφύλλη. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι δεν έχει συμπεριληφθεί το κανάλι 1 (Cirrus) του Landsat 8 καθώς και οι συνδυασμοί που το συμπεριλαμβάνουν καθώς δεν υπάρχει αντιστοιχία για τον Landsat 7.



Πίνακας 5.2 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7



Πίνακας 5.3 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8

✓ Νιτρικά Ιόντα (NO_3^-)

| NO_3^- (Νιτρικά Ιόντα) σε SimL | | |
|---|-------|----------------------------|
| Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ |
| EXP(R865/R560) | 82,68 | $y = 11.3936x - 13.4323$ |
| R865/R560 | 82,32 | $y = 13.979x - 2.3108$ |
| R560/R590 | 81,94 | $y = -16.7803x + 20.3396$ |
| EXP(R560/R590) | 81,76 | $y = -5.1853x + 17.415$ |
| R560/R865 | 78,62 | $y = -0.57791x + 3.3859$ |
| EXP(R865/R590) | 78,27 | $y = 10.4206x - 12.7162$ |
| R865/R590 | 77,88 | $y = 13.241x - 2.6456$ |
| LnR865-LnR590 | 76,25 | $y = 3.1636x + 5.0522$ |
| EXP(R865/R480) | 73,27 | $y = 7.0757x - 9.2486$ |
| R865/R480 | 72,93 | $y = 9.8059x - 2.6409$ |
| R480/R865 | 70,92 | $y = -1.0388x + 3.7525$ |
| EXP(R560/R865) | 68,66 | $y = -0.0039376x + 1.1078$ |
| EXP(R480/R865) | 67,88 | $y = -0.047417x + 1.5995$ |
| EXP(R655/R560) | 65,93 | $y = 4.429x - 8.1235$ |
| (R655/R560)+R865 | 65,22 | $y = 7.4537x - 4.6401$ |
| R655/R560 | 65,2 | $y = 8.6641x - 5.2714$ |
| LnR560-LnR655 | 64,1 | $y = -5.8072x + 2.8616$ |
| Log(R560/R655) | 64,1 | $y = -13.3716x + 2.8616$ |
| EXP(R865/R655) | 64,02 | $y = 8.9932x - 11.6565$ |
| R865/R655 | 63,78 | $y = 12.1542x - 3.162$ |
| LnR655-LnR865 | 63,02 | $y = -3.6577x + 4.8916$ |
| R560/R655 | 62,99 | $y = -3.8884x + 6.3419$ |
| R655/R865 | 62,28 | $y = -1.0998x + 4.1574$ |

| NO_3^- (Νιτρικά Ιόντα) σε L7 | | |
|---------------------------------------|-------|---------------------------|
| Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ |
| R835/R2220 | 62,74 | $y = 0.027883x + 0.13419$ |
| EXP(R835/R2220) | 52,26 | $y = -0.27788x + 0.94213$ |
| LnR2220 | 50,98 | $y = -0.27054x + 0.29358$ |

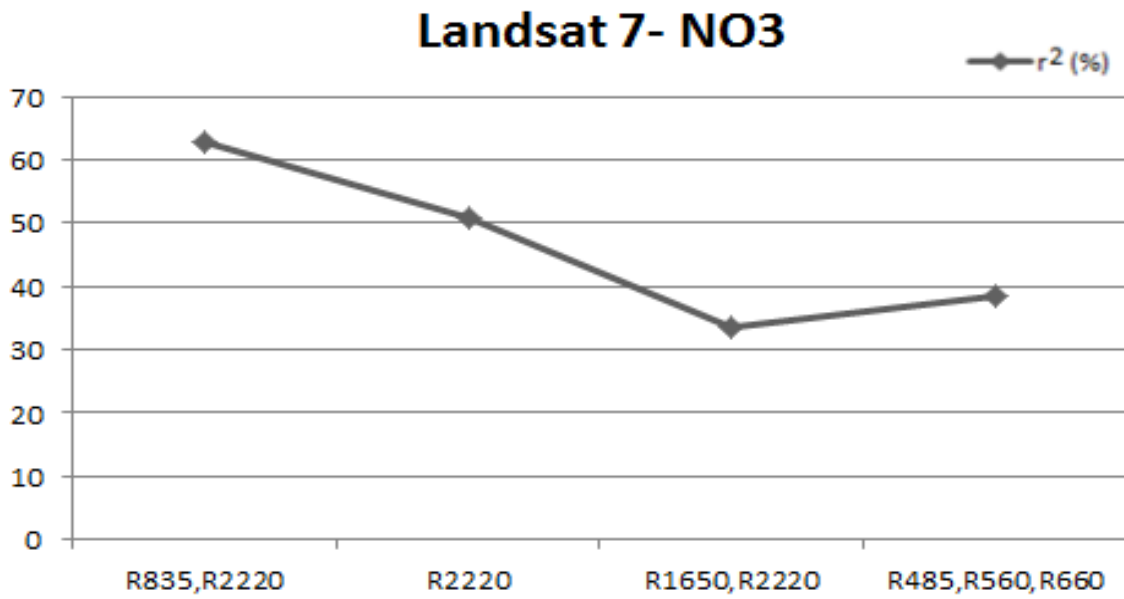
| | | |
|----------------|-------|---------------------------|
| EXP(R560/R655) | 61,3 | $y = -0.87133x + 4.4177$ |
| EXP(R655/R865) | 59,99 | $y = -0.039257x + 1.6038$ |

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα συσχετίσεων για τα νιτρικά ιόντα

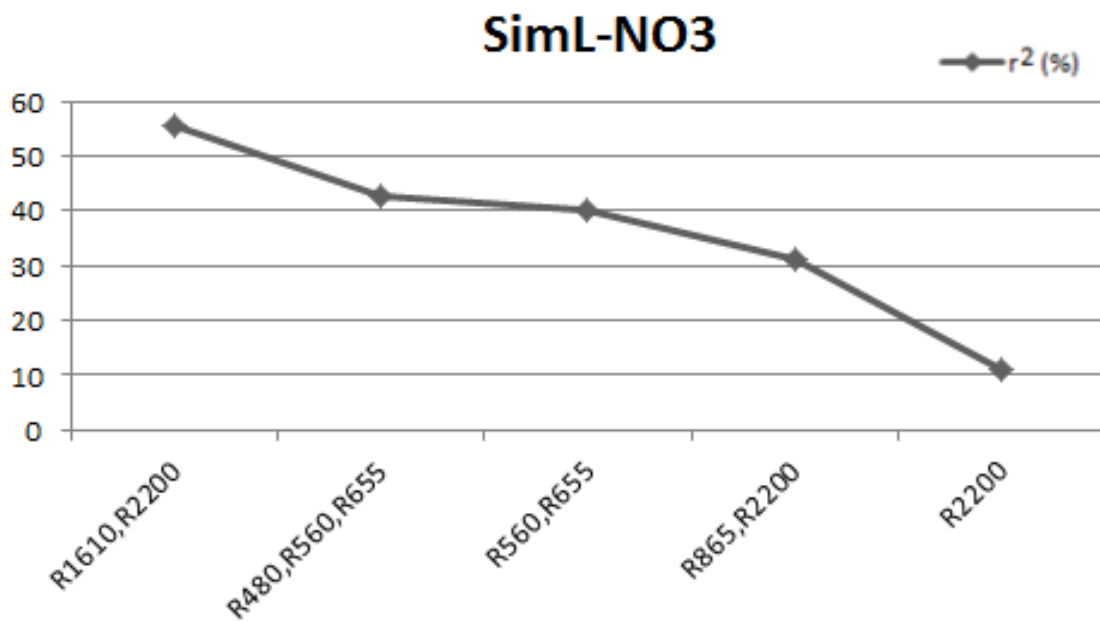
Για τη παράμετρο NO_3 τα αποτελέσματα των συσχετίσεων του L8 ήταν αρνητικά με μόνο ένα δείκτη να δίνει μέτρια συσχέτιση ($\text{LnR}_{1610} - \text{LnR}_{2200}$ με $r^2=51.68$). Για τον λόγο αυτό προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα Simulated Landsat όπως προέκυψαν από τη διπλωματική της Ιωάννας Θεολόγου ώστε τα αποτελέσματα να είναι εγκυρότερα. Από τις μετρήσεις του φασματοραδιόμετρου που πραγματοποιήθηκαν στις 19/07/2013 κατασκευάστηκαν τα Simulated Landsat δεδομένα. Πρόκειται ουσιαστικά για πλασματικά κανάλια τα οποία προσομοιώνουν τα αντίστοιχα του δορυφόρου Landsat 8 και δημιουργούνται με τη ποσοτική συμμετοχή των κατάλληλων υπερφασματικών καναλιών του GER. Με βάση αυτά πραγματοποιήθηκαν οι συσχετίσεις που παρατίθενται και προέκυψαν τα τελικά αποτελέσματα. (Θεολόγου, 2014). Τα συγκεκριμένα δεδομένα δίνουν ικανοποιητικές συσχετίσεις οι οποίες φτάνουν μέχρι και το 82%. Συγκεκριμένα, το κανάλι που εμφανίζεται περισσότερες φορές στους δείκτες είναι το B5(R865), ακολουθούμενο από το B4(R655) και B3(R560). Παράλληλα, ισχυρότερες συσχετίσεις παρουσιάζονται για τους λόγους των εκάστοτε καναλιών, είτε αυτοί εμφανίζονται ξεχωριστά, είτε υψωμένα ως δύναμη του e.

Ο Landsat 7 επίσης έδωσε μόλις τρεις συνδιασμούς με συσχέτιση άνω του 50% με την υψηλότερη να φτάνει το 62.74%. Το κανάλι που εμφανίζεται και στις 3 περιπτώσεις είναι το B6 (R2220).

Στους πίνακες 5.5 και 5.6 παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα με το ποσοστό της συσχέτισης των αντίστοιχων καναλιών (μεμονωμένων και συνδυασμών) του Landsat 7 με τον SimL για τα νιτρικά ιόντα.



Πίνακας 5.5 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7



Πίνακας 5.6 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για SimL

✓ Αμμώνιο (NH₄⁺)

| NH ₄ (Αμμώνιο) σε L8 | | |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Δείκτης | r ² | Y=ax+b |
| (R440-R655)/(R560-R655) | 87,19 | y = -0.16865x - 0.048761 |
| R655/(R440+R480+R560) | 85,76 | y = 2.6633x - 0.87777 |
| (R480-R655)/R560 | 79,58 | y = -4.2992x - 0.89229 |
| EXP(R865/R440) | 76,75 | y = 0.23208x - 0.26873 |
| R865/R440 | 75,74 | y = 0.32914x - 0.05391 |
| LnR440-LnR865 | 72,38 | y = -0.11179x + 0.18064 |
| R480/(R440+R480+R560) | 71,54 | y = 2.1754x - 0.4651 |
| EXP(R560/R655) | 71,37 | y = -0.070169x + 0.35 |
| R560/R655 | 71,18 | y = -0.28343x + 0.46162 |
| LnR560-LnR655 | 70,99 | y = -0.39461x + 0.19715 |
| Log(R560/R655) | 70,99 | y = -0.90862x + 0.19715 |
| (R655/R560)+R865 | 69,11 | y = 0.00048533x + 0.0087567 |
| R655/R560 | 70,75 | y = 0.54841x - 0.32778 |
| EXP(R655/R560) | 70,55 | y = 0.26664x - 0.48105 |
| EXP(R865) | 69,12 | y = 4.7853x - 4.7932 |
| R865 | 69,11 | y = 4.8574x - 0.0084707 |
| R865/R560 | 68,6 | y = 0.46456x + 0.024265 |
| EXP(R865/R480) | 68,54 | y = 0.21976x + 0.25881 |
| EXP(R865/R560) | 68,49 | y = 0.38161x - 0.39782 |
| R440/R865 | 68,42 | y = -0.036862x + 0.17059 |
| R865/R480 | 68,15 | y = 0.3223x - 0.059382 |
| (R655+R865)/2 | 67,37 | y = 3.8372x - 0.071051 |
| LnR865 | 66,84 | y = 0.068129x + 0.35319 |
| EXP(R865/R655) | 66,6 | y = 0.32396x - 0.35813 |
| R865/R655 | 66,49 | y = 0.42283x - 0.047514 |
| R560/R865 | 66,36 | y = -0.015792x + 0.15117 |
| EXP(R560/R480) | 66,09 | y = -0.018885x + 0.2108 |
| (R865/R655)+R1610 | 66,02 | y = 0.41281x - 0.045906 |

| NH ₄ (Αμμώνιο) σε L7 | | |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Δείκτης | r ² | Y=ax+b |
| EXP(R600/R835) | 97,73 | y = 0.021397x + 0.046112 |
| R600/R835 | 94,32 | y = 0.2542x + 0.35521 |
| EXP(R660/R835) | 93,72 | y = 0.088129x + 0.23937 |
| EXP(R600/R1650) | 89,52 | y = 6.459e-009x + 0.086768 |
| EXP(R660/R1650) | 89,47 | y = 4.3261e-006x + 0.083624 |
| (R600-R835)/R660 | 85,01 | y = 0.62186x + 0.24348 |
| EXP(R600/R2220) | 78,76 | y = 1.1605e-016x + 0 |
| R660/R835 | 78,1 | y = 0.0088054x + 0.00024501 |
| R600-R835 | 73,78 | y = 0.36465x + 0.36176 |
| EXP(R485/R1650) | 69,48 | y = 0.021617x + 0.14498 |
| R835/560 | 68,80 | y = 2.9213e-005x + 0.044107 |
| R560-R660 | 65,46 | y = -0.86067x + 0.62515 |
| R660-R560 | 65,46 | y = 0.060915x + 0.36011 |
| EXP(R660/R2220) | 63,63 | y = -1.0523x + 0.13616 |
| LnR660-LnR835 | 61,86 | y = 0.041871x + 0.12041 |
| Log(R660/R835) | 61,86 | y = 0.41758x + 0.029034 |
| R835/R485+R560+R660 | 60,32 | y = 0.96152x + 0.029034 |
| EXP(R835/R560) | 60,12 | y = -1.924x + 0.60062 |
| R560-R1650 | 57,45 | y = -0.44418x + 0.9325 |
| EXP(R485/R835) | 57,01 | y = 0.025536x + 0.49776 |
| R660/R1650 | 56,45 | y = 0.094675x + 0.20018 |
| R485/R835 | 53,93 | y = 0.048269x + 0.16473 |
| R560/R1650 | 52,98 | y = 0.35217x + 0.28904 |
| LnR485-LnR1650 | 50,84 | y = 0.027139x + 0.1066 |

| | | |
|----------------------------------|-------|-----------------------------|
| $\ln R655 - \ln R865$ | 65,48 | $y = -0.10959x + 0.21168$ |
| $R440 - R655$ | 65,2 | $y = -8.8841x - 0.063651$ |
| $R560/R480$ | 65,02 | $y = -0.14275x + 0.35567$ |
| $(R560/R480) + R655$ | 64,67 | $y = -0.14882x + 0.37633$ |
| $\ln R480 - \ln R560$ | 64,38 | $y = 0.28721x + 0.26868$ |
| $\log(R480/R560)$ | 64,38 | $y = 0.66132x + 0.26868$ |
| $R480/R865$ | 64,34 | $y = -0.043779x + 0.18144$ |
| $\text{EXP}(R655)$ | 64,08 | $y = 2.9038x - 3.0053$ |
| $R655$ | 64,02 | $y = 3.0648x - 0.10584$ |
| $(R865 + R1610)/2$ | 63,84 | $y = 7.5501x - 0.0017412$ |
| $R655/R865$ | 63,67 | $y = -0.02757x + 0.17178$ |
| $R480/R560$ | 63,67 | $y = 0.57614x - 0.21901$ |
| $\text{EXP}(R480/R560)$ | 63,29 | $y = 0.34942x - 0.50731$ |
| $\ln R655$ | 62,88 | $y = 0.16397x + 0.53951$ |
| $\text{EXP}(R480)$ | 62,84 | $y = 3.774x - 3.8569$ |
| $R480$ | 62,82 | $y = 3.9182x - 0.085537$ |
| $(R440 - R655)/R560$ | 62,47 | $y = -1.0594x - 0.13129$ |
| $\ln R480$ | 62,12 | $y = 0.14524x + 0.53958$ |
| $R480 - R655$ | 61,96 | $y = -12.7609x - 0.15564$ |
| $R480 - R2200$ | 60,35 | $y = 4.1418x - 0.085736$ |
| $R480 - R1610$ | 60,02 | $y = 4.4963x - 0.095774$ |
| $(R560 + R655)/2$ | 57,85 | $y = 3.1909x - 0.14749$ |
| $(R440 + R480)/2$ | 57,7 | $y = 3.9011x - 0.090062$ |
| $\ln(R560 + R655)/(R440 + R480)$ | 57,22 | $y = 0.0042016x + 0.17385$ |
| $(R480/R440) + R560$ | 57,1 | $y = 0.55073x - 0.48935$ |
| $(R480 + R560)/2$ | 56,9 | $y = 3.6241x - 0.14499$ |
| $\text{EXP}(R480/R865)$ | 56,26 | $y = -0.002434x + 0.10384$ |
| $\text{EXP}(R440/R865)$ | 55,64 | $y = -0.001476x + 0.095853$ |

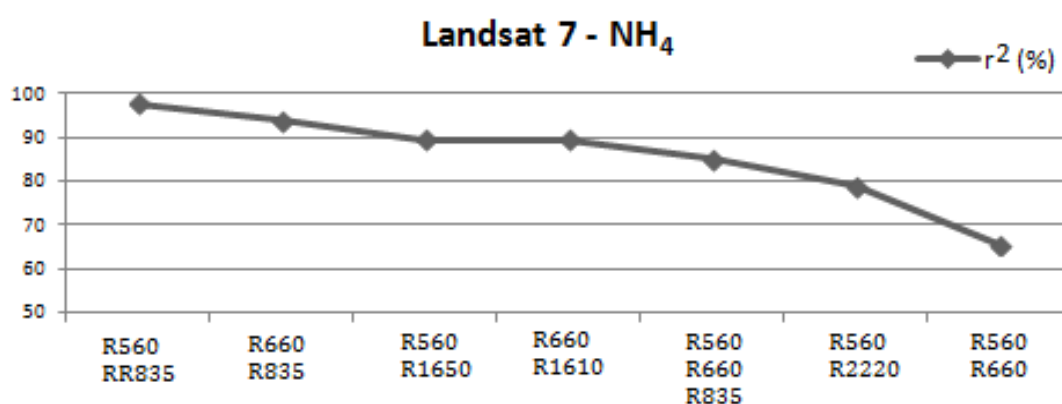
Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα συσχετίσεων για το αμμώνιο

Το NH₄ αποτελεί την επόμενη παράμετρο η οποία παρέχει ενθαρρυντικά καλά αποτελέσματα και για τις δύο ομάδες δεδομένων με συσχετίσεις που φτάνουν

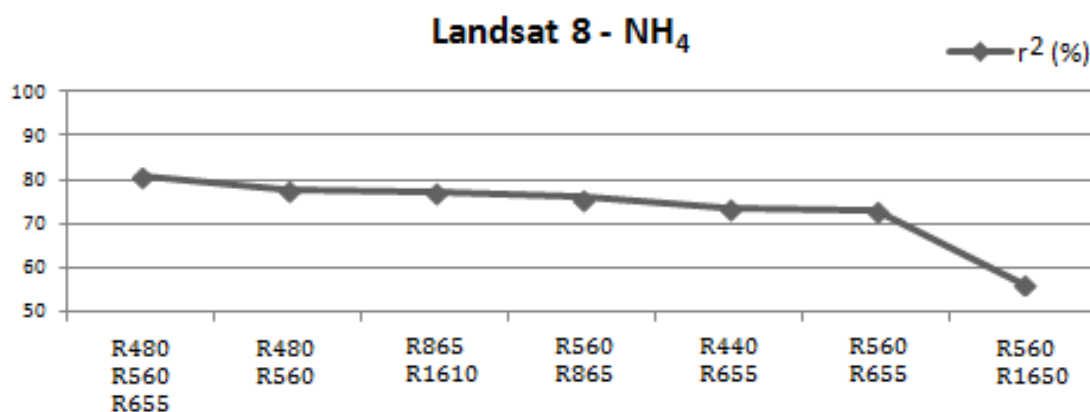
ακόμα και το 97%. Όπως είναι φανερό η συγκεκριμένη παράμετρος απέδωσε μεγάλη ποικιλία συνδυασμών με ικανοποιητικές συσχετίσεις άνω του 50% και για τους δύο δορυφόρους και ιδιαίτερα στον Landsat 8.

Τα κανάλια τα οποία εμφανίζονται περισσότερες φορές και στις δύο περιπτώσεις είναι τα B3, B4 και B5 ενώ οι δείκτες με τις μεγαλύτερες συσχετίσεις είναι αυτοί που περιέχουν κυρίως αθροίσματα και λόγους καναλιών.

Στους ακόλουθους πίνακες (5.8 και 5. φαίνεται το ποσοστό της συσχέτισης των αντίστοιχων καναλιών (μεμονωμένων και συνδυασμών) του Landsat 7 με τον Landsat 8 για το αμμώνιο.



Πίνακας 5.8 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7



Πίνακας 5.9 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8

✓ Ολικός φώσφορος (TP)

| TP (Ολικός Φώσφορος) σεL8 | | |
|---------------------------|----------------|-----------------------|
| Δείκτης | r ² | Y=ax+b |
| (R480-R655)/R560 | 78,9 | y = 2.4517x + 0.58629 |

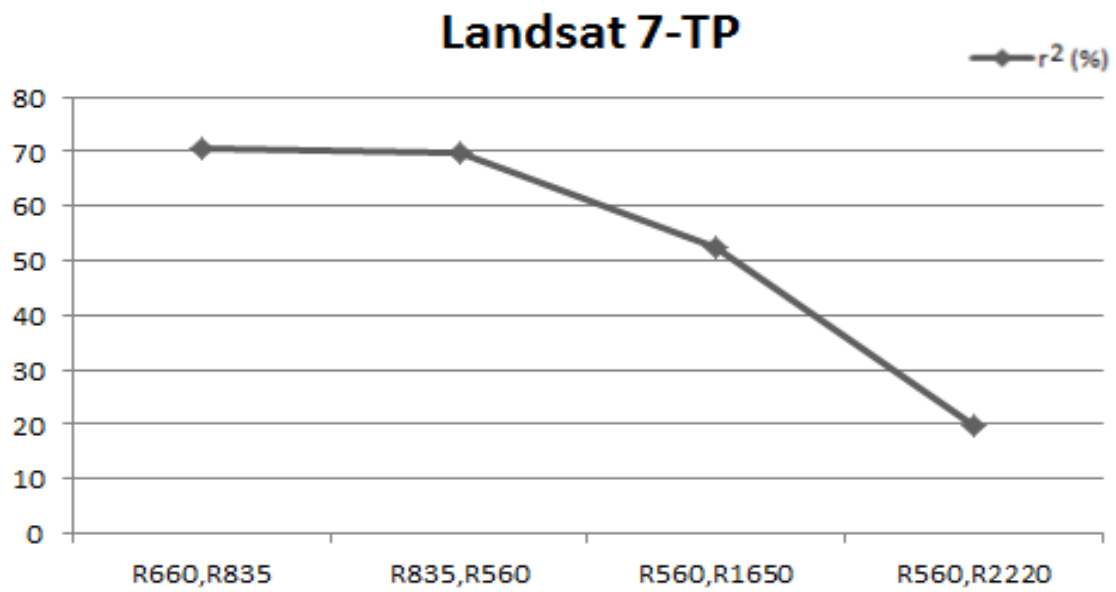
| TP (Ολικός Φώσφορος) σεL7 | | |
|---------------------------|----------------|----------------------------|
| Δείκτης | r ² | Y=ax+b |
| R660/R835 | 70,6 | y = -0.049434x + 0.12158 |
| R600-R835 | 69,6 | y = -0.0029962x + 0.093114 |
| R835/R600 | 67,3 | y = 0.12145x + -0.0148 |

| | | |
|-----------------------|------|-------------------------------|
| LnR660-LnR835 | 66,5 | $y = -0.061798x + 0.070203$ |
| Log(R660/R835) | 66,5 | $y = -0.1423x + 0.070203$ |
| EXP(R660/R835) | 66,2 | $y = -0.010569x + 0.098781$ |
| R660-R835 | 66,1 | $y = -0.0035014x + 0.070424$ |
| EXP(R835/R600) | 64,6 | $y = 0.065703x + -0.063446$ |
| (R600-R835)/R660 | 64,3 | $y = -0.077143x + 0.10093$ |
| R560/R835 | 63,4 | $y = -0.029731x + 0.11115$ |
| EXP(R560/R485) | 61,6 | $y = -0.010855x + 0.10788$ |
| R835/R660 | 58,7 | $y = 0.067022x + -0.00076171$ |
| R485-R560 | 58,5 | $y = 0.0035779x + 0.090524$ |
| R560-R485 | 57,9 | $y = -0.0035779x + 0.090524$ |
| R560/R485 | 57,9 | $y = -0.059105x + 0.14598$ |
| R660-R1650 | 57,6 | $y = -0.0052906x + 0.14199$ |
| R835/(R485+R560+R660) | 57,6 | $y = 0.26489x + -0.0098183$ |
| LnR485-LnR560 | 56,6 | $y = 0.094407x + 0.094149$ |
| Log(R485/R560) | 56,2 | $y = 0.21738x + 0.094149$ |
| R560-R1650 | 53,2 | $y = -0.0034796x + 0.14048$ |
| EXP(R835/R660) | 53,2 | $y = 0.0237x + -0.002416$ |
| (R485-R660)/R835 | 52,4 | $y = 0.063752x + 0.061114$ |
| R485/(R485+R560+R660) | 50,9 | $y = 0.46204x + -0.074695$ |

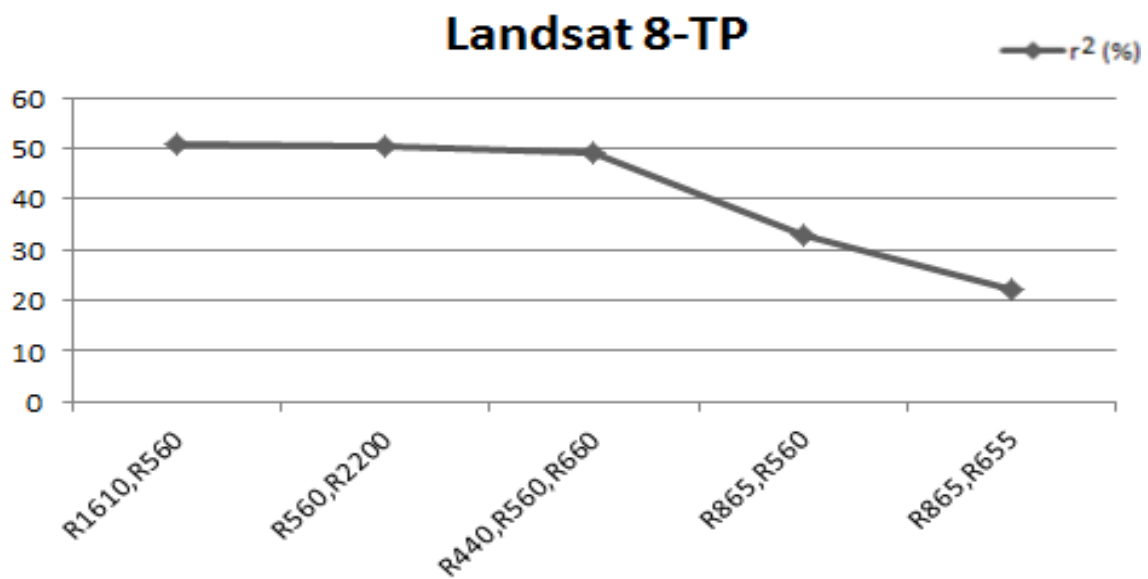
Πίνακας 5.10 Αποτελέσματα συσχέτισεων για τον ολικό φώσφορο

Αρνητικές συσχέτισεις παρουσιάστηκαν και για τον ολικό φώσφορο με τη μοναδική εξαίρεση να εμφανίζεται στα δεδομένα του L8 για το δείκτη (B2-B4)/B3 [(R480-R655)/R560]. Για τον Landsat 7 είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα είναι αρκούντως πιο ικανοποιητικά ως προς την ποσότητα των συσχέτισεων άνω του 50% όμως η μέγιστη συσχέτιση φτάνει το 70,6% ποσοστό όχι ιδιαίτερα υψηλό με τα κανάλια που εμφανίζονται συχνότερα να είναι το B3(R660) και B4(R835) και εν συνεχεία το B2(R560).

Τα διαγράμματα του ολικού φωσφόρου για τους δύο δορυφόρους και τους αντίστοιχους συνδιασμούς καναλιών παρατίθενται στη συνέχεια (πίνακες 5.11 και 5.12).



Πίνακας 5.11 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7



Πίνακας 5.12 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8

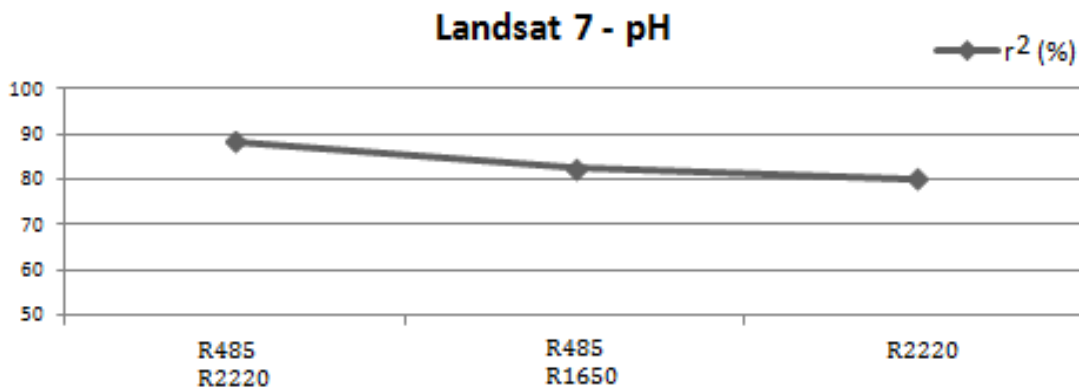
✓ pH

| pH σε L8 | | | pH σε L7 | | |
|----------------|-------|--------------------------|-----------------------|-------|---------------------------|
| Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ | Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ |
| LnR865-LnR1610 | 79,26 | $y = 0.5305x + 7.398$ | LnR485-LnR2220 | 88,4 | $y = 1.3965x + 7.763$ |
| R440-R560 | 75,31 | $y = -59.755x + 6.1576$ | R485-R2220 | 83 | $y = 0.091871x + 7.7915$ |
| R560-R440 | 75,31 | $y = 59.755x + 6.1576$ | R485/R2220 | 82,5 | $y = 0.93609x + 6.8697$ |
| R865/R1610 | 73,98 | $y = 0.080532x + 7.8489$ | R485-R1650 | 82,3 | $y = 0.20141x + 5.4194$ |
| R480-R560 | 64,71 | $y = -72.0517x + 5.516$ | EXP(R2220) | 80,2 | $y = -0.13133x + 9.9712$ |
| R560-R480 | 64,71 | $y = 72.0517x + 5.516$ | R2220 | 80,1 | $y = -0.12737x + 9.9539$ |
| EXP(R440/R655) | 63,98 | $y = -3.1801x + 14.9992$ | LnR2220 | 73,2 | $y = -1.5418x + 12.184$ |
| R440/R655 | 63,94 | $y = -6.6221x + 13.2333$ | EXP(R485/R2220) | 72,1 | $y = 0.18249x + 7.3918$ |
| LnR440-LnR655 | 63,85 | $y = -4.8543x + 6.8698$ | EXP(R660/R485) | 67,4 | $y = -0.38369x + 9.6129$ |
| R655/R440 | 63,76 | $y = 3.5565x + 3.524$ | R660/R485 | 57,8 | $y = -1.2741x + 9.825$ |
| EXP(R655/R440) | 63,6 | $y = 0.90734x + 4.8235$ | R660/(R485+R560+R660) | 56,1 | $y = -13.2447x + 12.3677$ |
| R865/R2200 | 59,86 | $y = 0.064122x + 7.8333$ | | | |

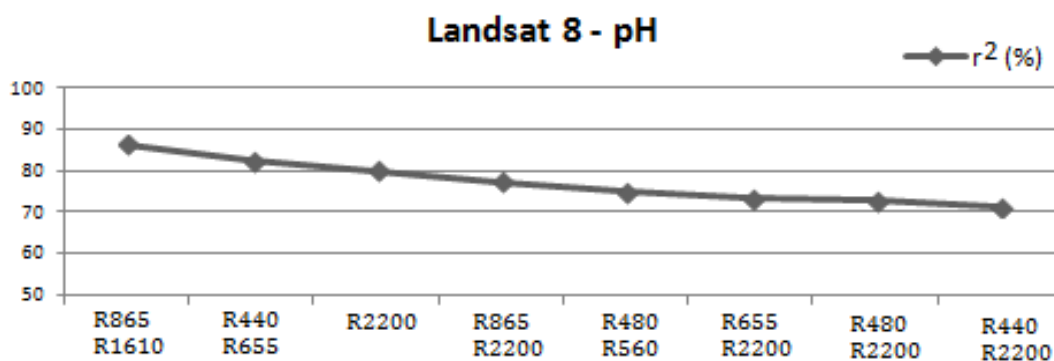
Πίνακας 5.13 Αποτελέσματα συσχέτισεων για το pH

Για το επόμενο αντικείμενο μελέτης, το pH, τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά. Για τον Landsat 8, ισχυρότερη συσχέτιση έδωσε ο δείκτης LnR₈₆₅-LnR₁₆₁₀, η οποία κυμαινόταν στο 79% ενώ στον Landsat 7 πάλι ο συνδιασμός με τους εκθετικούς λογαριθμούς απέδωσε την υψηλότερη συσχέτιση 88,4%. Τα κανάλια με τις περισσότερες εμφανίσεις στους βέλτιστους δείκτες ήταν τα B1(R440), B4(R655) και B3(R560) για τον Landsat 8 ενώ για τον Landsat 7 το B6(R2220) είναι το κανάλι που εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους δείκτες.

Οι πίνακες 5.14 και 5.15 που δείχνουν για την συγκεκριμένη παράμετρο τους κοινούς συνδιασμούς καναλιών για τους δύο δορυφόρους φαίνονται παρακάτω.



Πίνακας 5.14 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7



Πίνακας 5.15 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8

✓ Αγωγιμότητα

| CONDUCTIVITY (Αγωγιμότητα) σε L8 | | | CONDUCTIVITY (Αγωγιμότητα) σε L7 | | |
|----------------------------------|-------|-----------------------------|----------------------------------|-------|--------------------------|
| Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ | Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ |
| R480-R865 | 57,48 | $y = -0.00067982x + 4.0864$ | $(R485-R835)/(R660-R835)$ | 66,02 | $y = 0.34911x + 3.1631$ |
| | | | $\ln((R660+R835)/(R485+R600))$ | 65,27 | $y = -1.2254x + 3.0278$ |
| | | | $EXP(R485/R835)$ | 64,09 | $y = 0.11676x + 2.9287$ |
| | | | $R485/R835$ | 60,59 | $y = 0.43414x + 2.8193$ |
| | | | $R485-R1650$ | 55,74 | $y = 0.076875x + 2.2425$ |
| | | | $\ln R485 - \ln R835$ | 55,6 | $y = 0.52468x + 3.2652$ |

Πίνακας 5.16 Αποτελέσματα συσχετίσεων για την αγωγιμότητα

Στη συνέχεια, η αγωγιμότητα έδωσε μόνο μία συσχέτιση, και μάλιστα μέτριας τιμής ($r^2=57.5\%$), για τα δεδομένα του L8 και τη διαφορά των καναλιών B2-B5. Ωστόσο ισχυρότερες εμφανιζόμενες συσχετίσεις είχαμε για τα δεδομένα L7, με τιμές που έφτασαν μέχρι το 66% όμως και πάλι δεν υπήρξε μεγάλη ποσότητα

αποτελεσμάτων με συσχέτιση μεγαλύτερη του 50%. Για τον Landsat 7, επικρατέστατο ήταν το κανάλι B4(R835) το οποίο εμφανίστηκε στους περισσότερους από τους δείκτες που έδωσαν θετικά αποτελέσματα, ενώ ικανοποιητικά ήταν και τα αποτελέσματα για τα κανάλια B3(R660) και B1(R485).

✓ Διαλυμένο Οξυγόνο

| DO (Διαλυμένο Οξυγόνο) σε L8 | | | DO (Διαλυμένο Οξυγόνο) σε L7 | | |
|------------------------------|-------|----------------------------|------------------------------|-------|---------------------------|
| Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ | Δείκτης | r^2 | $Y=ax+b$ |
| R560-R655 | 93,65 | $y = 0.036842x + 0.84038$ | (R560+R660)/2 | 88,53 | $y = 0.49444x + -4.8013$ |
| LnB7 | 91,37 | $y = -2.317x + 15.7486$ | EXP(B3) | 86,8 | $y = 0.47423x + -5.5992$ |
| B7 | 87,98 | $y = -0.11328x + 11.1584$ | B3 | 86,8 | $y = 0.50935x + -4.3213$ |
| B3/B7 | 80,11 | $y = 0.053301x + 6.6373$ | LnB2 | 86,07 | $y = 11.8589x + -33.5178$ |
| (B6+B7)/2 | 79,2 | $y = -0.074431x + 10.6157$ | LnB3 | 85,9 | $y = 10.1892x + -24.3646$ |
| LnB6 | 77,46 | $y = -1.5887x + 13.9818$ | B2 | 84,32 | $y = 0.41546x + -5.881$ |
| EXP(B2/B3) | 74,72 | $y = -11.4139x + 27.629$ | EXP(B2) | 84,26 | $y = -9.0454x + 4.9636$ |
| B1/B7 | 74,34 | $y = 0.11036x + 6.4302$ | (B1-B3)/B4 | 84,06 | $y = 0.70438x + -5.7169$ |
| B2/B3 | 74,33 | $y = -18.714x + 18.1588$ | B3-B5 | 82,8 | $y = -18.1081x + 5.2087$ |
| LnB1-LnB7 | 74,03 | $y = 2.5104x + 1.1694$ | Ln(B3+B4)/(B1+B2) | 82,55 | $y = -0.58035x + 4.9241$ |
| LnB2-LnB3 | 73,43 | $y = -9.2215x + 2.3923$ | (B1-B3)/B2 | 81,73 | $y = 0.58035x + 4.9241$ |
| Log(B2/B3) | 73,43 | $y = -21.2332x + 2.3923$ | B1-B3 | 81,62 | $y = -5.2777x + 19.7792$ |
| (B2-B3)/B1 | 72,47 | $y = -5.6059x + 3.5292$ | B3-B1 | 81,25 | $y = -13.1038x + 18.3803$ |
| B3/B6 | 72,46 | $y = 0.05323x + 7.1006$ | EXP(B1/B3) | 81,01 | $y = -0.46214x + 1.2914$ |
| EXP(B4/B3) | 72,45 | $y = -8.1234x + 25.5608$ | B1/B3 | 80,72 | $y = 0.46214x + 1.2914$ |
| B3/B2 | 72,44 | $y = 4.5299x + -0.29287$ | B1-B2 | 79,74 | $y = -11.2134x + 5.1614$ |
| (B5/B4)+B6 | 72,36 | $y = -0.053251x + 10.3041$ | B2-B1 | 79,74 | $y = -63.3063x + 23.62$ |
| B6 | 72,33 | $y = -0.053417x + 10.294$ | LnB1-LnB3 | 78,72 | $y = 0.6982x + -6.3671$ |
| EXP(B4/B2) | 72,32 | $y = 5.9611x + -16.5807$ | B1/(B1+B2+B3) | 78,05 | $y = 9.0937x + -3.9863$ |
| B4/B2 | 72,23 | $y = 25.3269x + -27.8857$ | (B3+B4)/2 | 75,68 | $y = -10.4255x + 26.3684$ |
| LnB2-LnB4 | 72,16 | $y = -36.6263x + -4.7664$ | B3/B1 | 74,98 | $y = -19.5387x + 18.9729$ |
| B2/B4 | 72,08 | $y = -52.9557x + 45.368$ | EXP(B1/B2) | 72,83 | $y = -11.8738x + 0.96892$ |
| EXP(B2/B4) | 72,02 | $y = -26.5132x + 61.6914$ | B1/B2 | 71,6 | $y = -27.3405x + 0.96892$ |
| B4/B3 | 71,96 | $y = -16.6263x + 20.8327$ | LnB1-LnB2 | 69,45 | $y = 2.4295x + -1.4741$ |
| B3/(B1+B2+B3) | 71,71 | $y = 41.4032x + -11.565$ | Log(B1/B2) | 69,45 | $y = 0.57988x + -7.5421$ |
| (B1-B3)/B2 | 71,27 | $y = -5.1415x + 3.9805$ | EXP(B3/B1) | 69,31 | $y = 7.0198x + -4.8861$ |
| LnB3-LnB4 | 71,2 | $y = 11.8801x + 4.9453$ | (B2/B1)+B3 | 68 | $y = 88.8418x + -20.4182$ |
| Log(B3/B4) | 71,2 | $y = 27.3549x + 4.9453$ | (B1+B2)/2 | 67,66 | $y = 1.2102x + 0.052256$ |
| B2/(B1+B2+B3) | 70,4 | $y = -64.8722x + 24.7307$ | B2/B1 | 67,01 | $y = 0.4202x + -4.4102$ |
| B3/B4 | 70,38 | $y = 8.4721x + -2.9326$ | B3/(B1+B2+B3) | 64,28 | $y = 0.44691x + 2.4273$ |
| EXP(B3/B2) | 70,11 | $y = 0.58475x + 4.4128$ | EXP(B2/B1) | 63,2 | $y = -4.4285x + 8.9993$ |
| | | | B2-B5 | 63,07 | $y = -11.6429x + 0.5105$ |
| | | | B3-B7 | 59,47 | $y = 16.0172x + -13.3048$ |

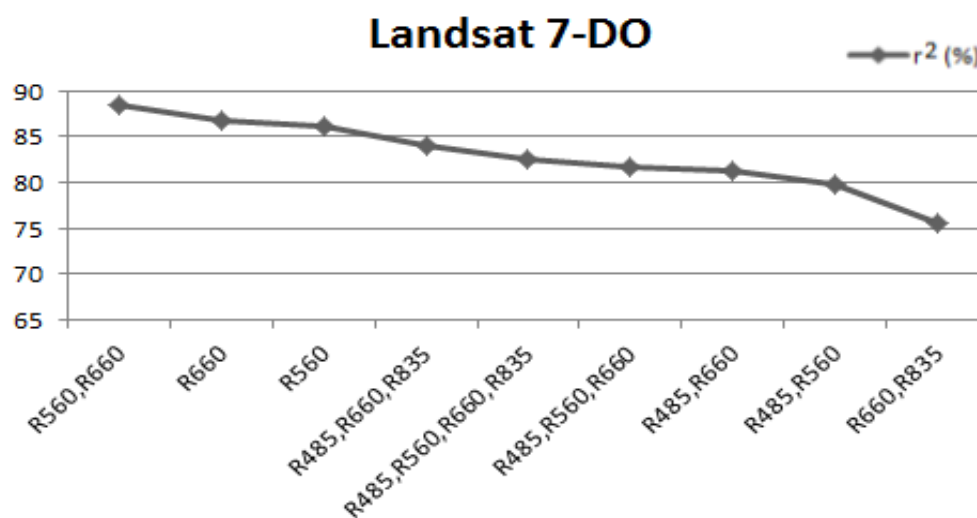
| | | | | | |
|-----------------------|-------|-----------------------------|-------------------|-------|----------------------------|
| $(B1-B3)/B4$ | 70,11 | $y = -8.4233x + 3.357$ | $(B1-B4)/(B3-B4)$ | 58,26 | $y = -209.3864x + 22.2718$ |
| $B4/B7$ | 70,11 | $y = 0.076274x + 6.5771$ | $(B1-B2)/B3$ | 52,81 | $y = 19.7492x + 2.3968$ |
| $EXP(B3/B4)$ | 70,11 | $y = 2.0759x + 0.49018$ | | | |
| $B1/B6$ | 70,11 | $y = 0.10886x + 6.9683$ | | | |
| $Ln((B3+B4)/(B1+B2))$ | 70,11 | $y = 15.3566x + 0.94126$ | | | |
| $B2/B7$ | 70,11 | $y = 0.11192x + 6.5525$ | | | |
| $(B5+B6)/2$ | 70,11 | $y = -0.022812x + 10.9407$ | | | |
| $EXP(B5/B3)$ | 70,11 | $y = -11.0834x + 22.3613$ | | | |
| $EXP(B3/B1)$ | 70,11 | $y = 0.89957x + 2.9052$ | | | |
| $B4/B6$ | 70,11 | $y = 0.074118x + 7.1051$ | | | |
| $(B1-B4)/(B3-B4)$ | 70,11 | $y = 4.3073x + 11.8103$ | | | |
| $B5/B3$ | 70,11 | $y = -13.3759x + 11.4885$ | | | |
| $B3/B1$ | 70,11 | $y = 3.9414e-005x + 8.4188$ | | | |
| $EXP(B5/B7)$ | 70,11 | $y = -10.28x + 2.3473$ | | | |
| $LnB1-LnB3$ | 70,11 | $y = 0.10854x + 7.0918$ | | | |
| $B2/B6$ | 70,11 | $y = -18.7457x + 18.8199$ | | | |
| $B1/B3$ | 70,11 | $y = -10.8201x + 27.2729$ | | | |
| $EXP(B1/B3)$ | 70,11 | $y = -9.0788x + 20.7731$ | | | |
| $EXP(B5/B4)$ | 70,11 | $y = -0.013257x + 10.9268$ | | | |
| $(B4/B3)+B5$ | 70,11 | $y = -0.013267x + 10.9188$ | | | |
| $B5$ | 70,11 | $y = -65.2881x + 32.0113$ | | | |
| $B4/(B1+B2+B3)$ | 70,11 | $y = -6.0044x + 17.5402$ | | | |
| $EXP(B5/B1)$ | 70,11 | $y = -11.722x + 12.0331$ | | | |
| $B5/B4$ | 70,11 | $y = 1.1841e-012x + 8.5467$ | | | |
| $EXP(B2/B7)$ | 70,11 | $y = -8.4056x + 11.9415$ | | | |
| $B5/B1$ | 70,11 | $y = -5.8968x + 17.5992$ | | | |
| $EXP(B5/B2)$ | 70,11 | $y = -8.527x + 12.1993$ | | | |
| $B5/B2$ | 70,11 | | | | |

Πίνακας 5.17 Αποτελέσματα συσχετίσεων για το αμμώνιο

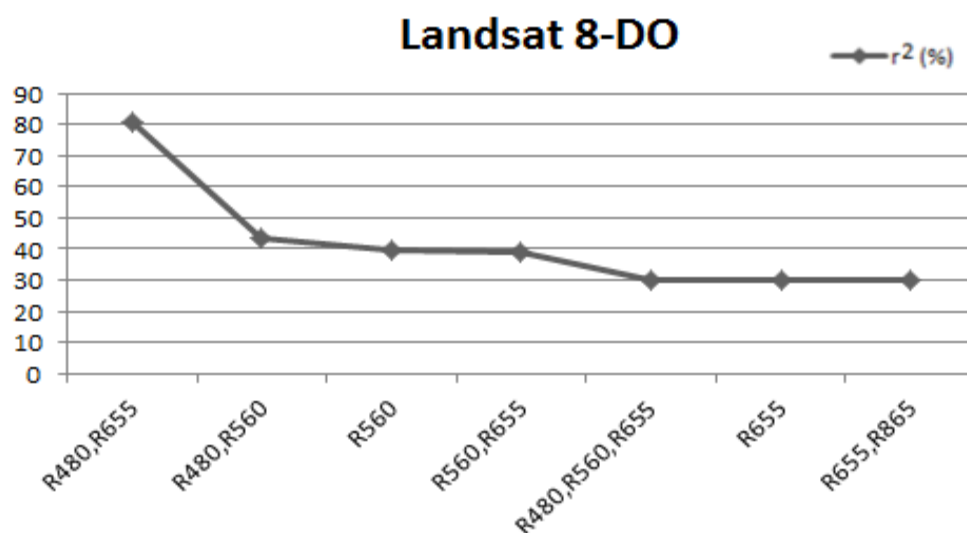
Τελευταία υπό μελέτη παράμετρο αποτελεί το διαλυμένο οξυγόνο. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά αφού μεγάλος ήταν ο όγκος των δεικτών με υψηλές συσχετίσεις, ιδιαίτερα για τον Landsat 8 που η μέγιστη συσχέτιση έφτασε το 93,65% ενώ για τον Landsat 7 ήταν 88.53%.

Τα κανάλια που εμφανίζονται συχνότερα για τον Landsat 8 είναι το B3(R560) και B4(R655) ακολουθούμενα από το B7(R1610). Για τον Landsat 7 τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης έχει το κανάλι B3(R660) και έπονται τα B1(R485) και B2(R560).

Τέλος, όπως σε όλες τις παραμέτρους που έδωσαν πάνω από μία συσχετίσεις με ποσοστό άνω του 50% παρατίθενται τα διαγράμματα για τις συσχετίσεις στους 2 δορυφόρους για τους κοινούς συνδυασμούς αντίστοιχων καναλιών.



Πίνακας 5.18 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 7



Πίνακας 5.19 Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για Landsat 8

5.2. Χάρτες εκτίμησης ποιοτικών χαρακτηριστικών

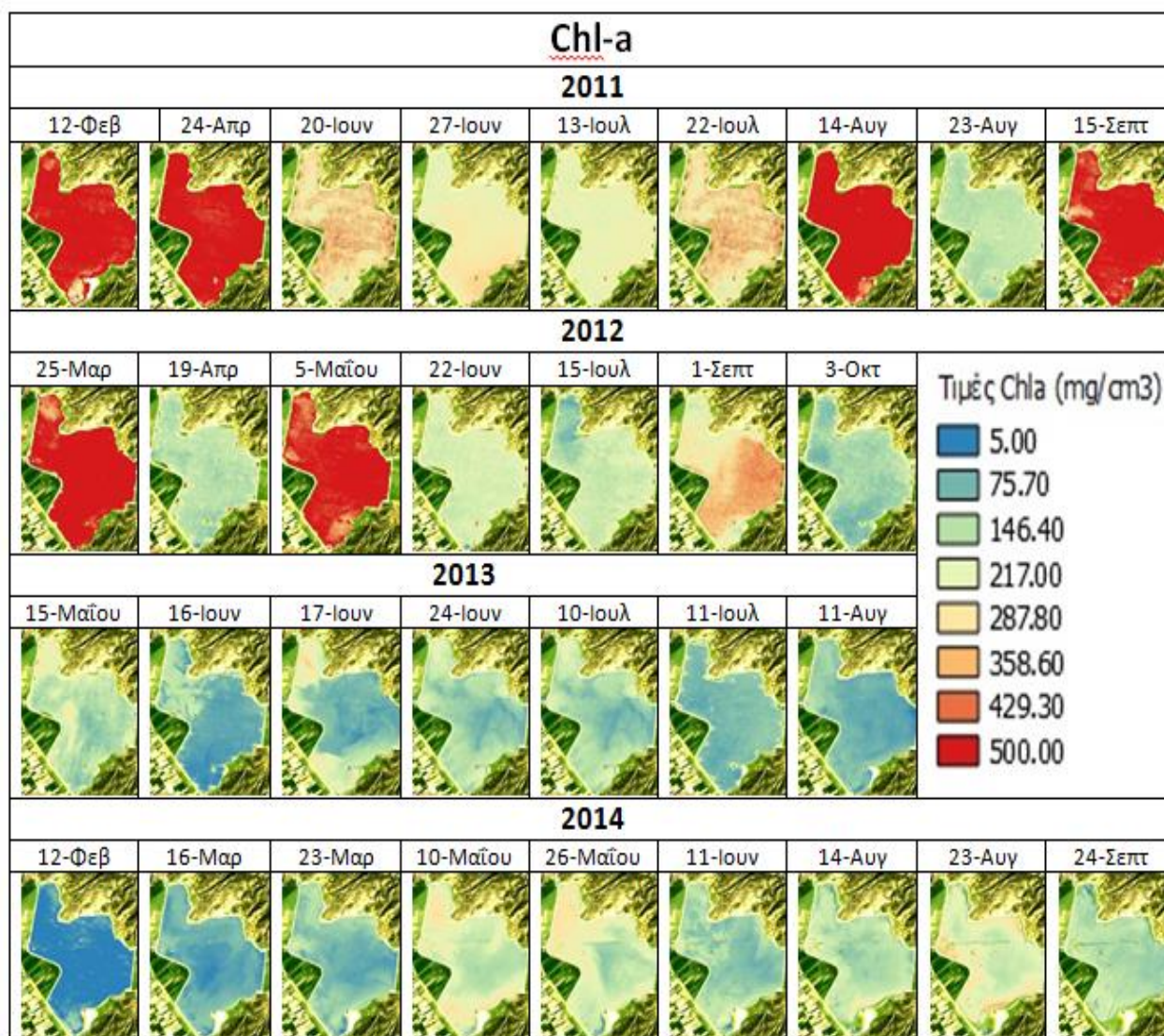
Σε αυτό το σημείο παρατίθενται οι χάρτες ποιότητας νερού της περιοχής μελέτης, για την περίοδο 4 χρόνων όπως αυτοί προέκυψαν από την εφαρμογή των συναρτήσεων στις δορυφορικές εικόνες μέσω αλγορίθμων που δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον Matlab. Τα αποτελέσματα εφαρμόστηκαν για δείκτες που έδωσαν ικανοποιητικές συσχετίσεις για τα δεδομένα των δύο δορυφόρων, ενώ για κάθε παράμετρο γίνεται σύγκριση των χαρτών με τα διαθέσιμα επίγεια δεδομένα. Τέλος, γίνεται σύγκριση μεταξύ των χαρτών των δύο δορυφόρων στις ημερομηνίες που υπήρχε διαφορά μίας ημέρας.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι οι αλγόριθμοι που περιελάμβαναν την εκθετική συνάρτηση (EXP) παρόλο που σε πολλές παραμέτρους έβγαζαν υψηλές συσχετίσεις, αποδείχθηκαν πολύ ευαίσθητες, ώστε να μην μπορούν να παρέχουν έγκυρα αποτελέσματα, ιδίως σε εικόνες με μεγάλο ποσοστό νεφοκάλυψης

➤ Χλωροφύλλη-α (Ch1a)

Οι χάρτες για τη χλωροφύλλη-α δημιουργήθηκαν για Landsat 8 με βάση τον δείκτη R655/R560 ο οποίος έδωσε συσχετίσεις με τις τιμές των δεδομένων υπαίθρου της τάξης του 86,86%. Η εξίσωση είναι η $y = 127.2997x - 49.142$ όπου x η τιμή της φωτεινότητας και y το αναμενόμενο αποτέλεσμα για τη Ch1a. Για Landsat 7 χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης R835/R660 με συσχέτιση 89.80% και εξίσωση την $y = 391.3413x - 138.937$.





Τα αποτελέσματα είναι τα επιθυμητά, με τις τιμές να κινούνται στα αντίστοιχα επίπεδα με αυτά που προέκυψαν από τις μετρήσεις υπαίθρου. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στο νότιο τμήμα της λίμνης. Το μοντέλο αυτό ωστόσο είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί καλύτερα για περιοχές με αντίστοιχο βάθος, επομένως αναμένεται να μην αντιπροσωπεύει σε βέλτιστο βαθμό τις όχθες. Θα πρέπει επομένως να πραγματοποιούνται επιπλέον μετρήσεις στις όχθες της λίμνης και να δημιουργείται ένα δεύτερο μοντέλο συσχετίσεων. Παρ' όλα αυτά, σε πρώτο βαθμό, το παρόν μοντέλο δίνει μία ικανοποιητική εικόνα της κατάστασης που επικρατεί.



Εικόνα 5.1 Οι χάρτες της χλωροφύλλης-α ανά ημερομηνία ανά έτος

Παρατηρείται ότι οι τιμές της πλην κάποιων εξαιρέσεων το 2011 και το 2012 κινούνται σε σχετικά σταθερά επίπεδα. Τα δεδομένα πλην της 12^{ης} Φεβρουαρίου ταυτίζονται με τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του φορέα διαχείρισης σε πολύ μεγάλο βαθμό. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η χλωροφύλλη μειώνεται με την πάροδο των ετών με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται το 2011 και στις αρχές του 2012 όπου η λίμνη είχε ένα χρόνο που είχε αναδημιουργηθεί (η αναδημιουργία της λίμνης έγινε στα τέλη του 2010).

Παρακάτω, γίνεται η σύγκριση μεταξύ των χαρτών που προέκυψαν από τους δύο δορυφόρους με διαφορά μίας ημέρας. (εικόνα 5.2).

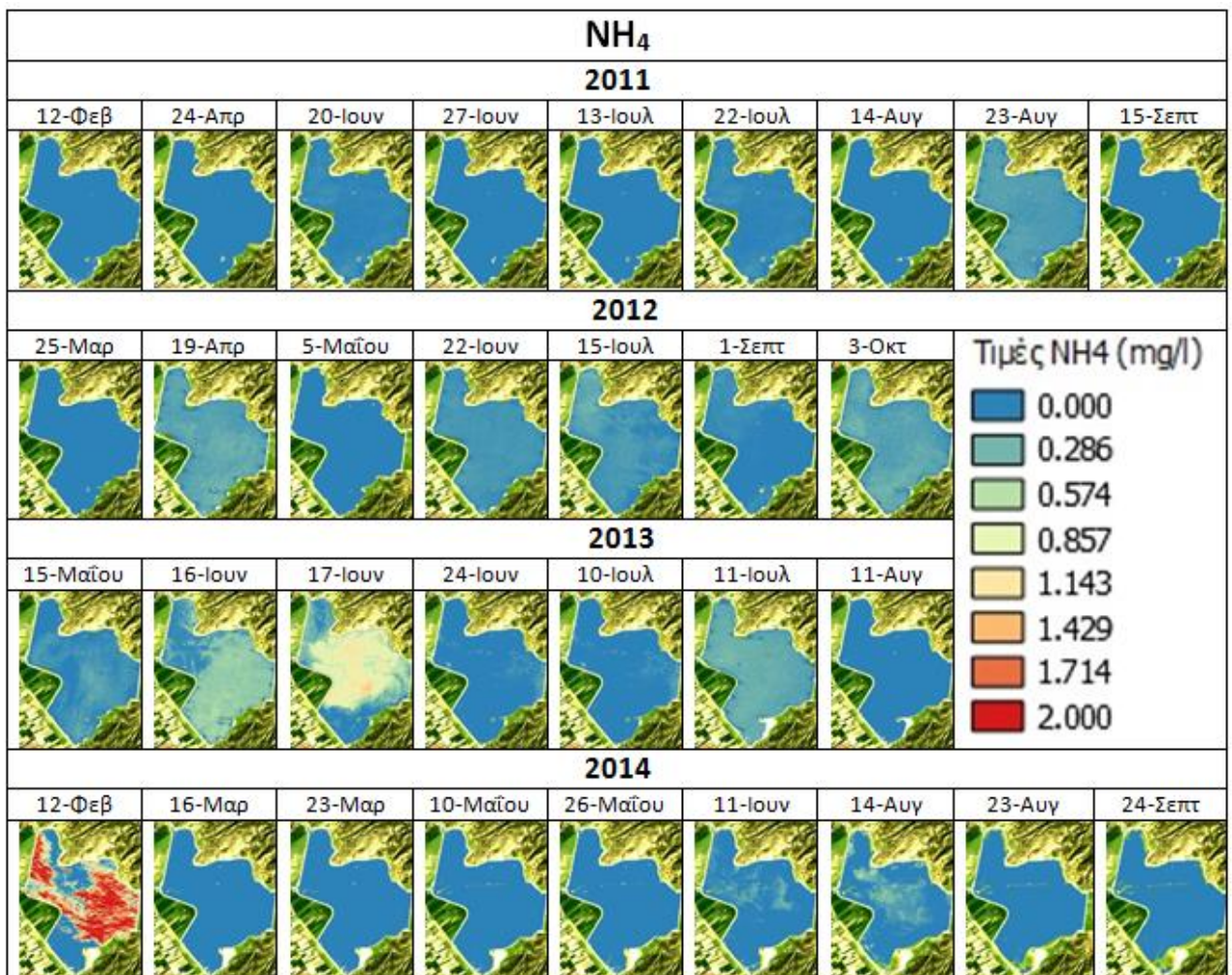
| Landsat 7 | Landsat 8 |
|--|---|
| 16 Ιουνίου 2013 | 17 Ιουνίου 2013 |
|  |  |
| 11 Ιουλίου 2013 | 10 Ιουλίου 2013 |
|  |  |

Εικόνα 5.2 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για Chla

Είναι ευδιάκριτο ότι και οι δύο δορυφόροι έχουν δώσει ίδιας τάξης αποτελέσματα και για το εσωτερικό της λίμνης όπου το βάθος είναι μεγαλύτερο απ' ό,τι στα σημεία που βρίσκονται περιμετρικά της λίμνης. Στα σημεία με μικρότερο βάθος ο Landsat 8 τείνει να εκτιμάει μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τα δεδομένα του Landsat 7. Συγκεκριμένα για τον Ιούνιο στο βόρειο και το νότιο τμήμα της λίμνης ο Landsat 8 έχει αποδώσει μεγαλύτερες τιμές από τον Landsat 7. Για τον Ιούλιο οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες με τον Landsat 8 να έχει αποδώσει ελαφρώς ανώτερες τιμές από τον Landsat 7.

➤ **Αμμώνιο (NH₄⁺)**

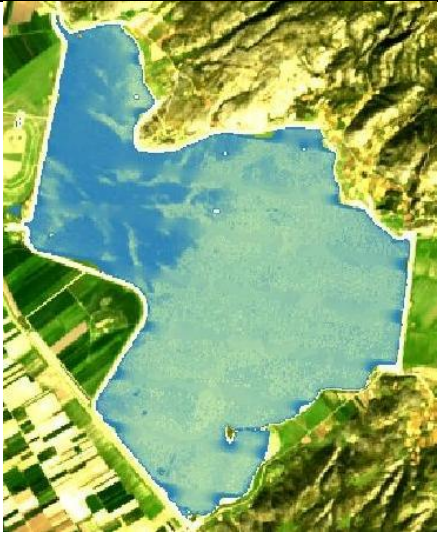



Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των χαρτών του αμμωνίου, μιας παραμέτρου που δεν έχει μελετηθεί όπως η χλωροφύλλη από τις διεθνείς μελέτες. Τα μοντέλα παλινδρόμησης που εφαρμόστηκαν και στους δύο δορυφόρους για τα αμμώνια, έδωσαν πολύ υψηλές συσχετίσεις, όμως το εύρος των τιμών που προέκυψε στους χάρτες που δημιουργήθηκαν για την παράμετρο με βάση τις παραπάνω συσχετίσεις περιελάμβανε και αρνητικές τιμές, κάτι που υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος είναι ευαίσθητη σε οπτικές παραμέτρους. Οι χάρτες που ακολουθούν προέκυψαν με βάση τον δείκτη (R440-R655)/(R560-R655) με συσχέτιση 87,19% και εξίσωση $y = -0.16865x - 0.048761$ για τον Landsat 8 και R600/R835 με 94,32%, εξίσωση $y = 0.2542x + -0.35521$ για τον Landsat 7 αντίστοιχα. Όπως είναι φυσικό η σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα δεν ήταν επιτυχής αφού το εύρος περιελάμβανε και αρνητικές τιμές, ενώ οι θετικές τιμές που προέκυψαν ήταν πολύ κοντά στο μηδέν.



Εικόνα 5.3 Οι χάρτες NH₄ ανά ημερομηνία ανά έτος

Οι χάρτες που προέκυψαν δεν ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικοί και ελάχιστοι φαίνεται να περιλαμβάνουν τιμές ανώτερες του μηδενός. Στις περισσότερες ημερομηνίες δεν μπορούν να εντοπιστούν διαβαθμίσεις στο εσωτερικό της λίμνης ενώ σε λίγους χάρτες γίνονται αντιληπτές τιμές άνω του μηδενός. Πλην ελαχίστων εξαιρέσεων οι χάρτες παρουσιάζουν ομοιομορφία στην κατανομή των τιμών σε όλα την επιφάνεια της λίμνης.

Στην εικόνα 5.4 φαίνονται οι χάρτες των δύο δορυφόρων σε αντιπαράθεση για ημερομηνίες με διαφορά μίας ημέρας.

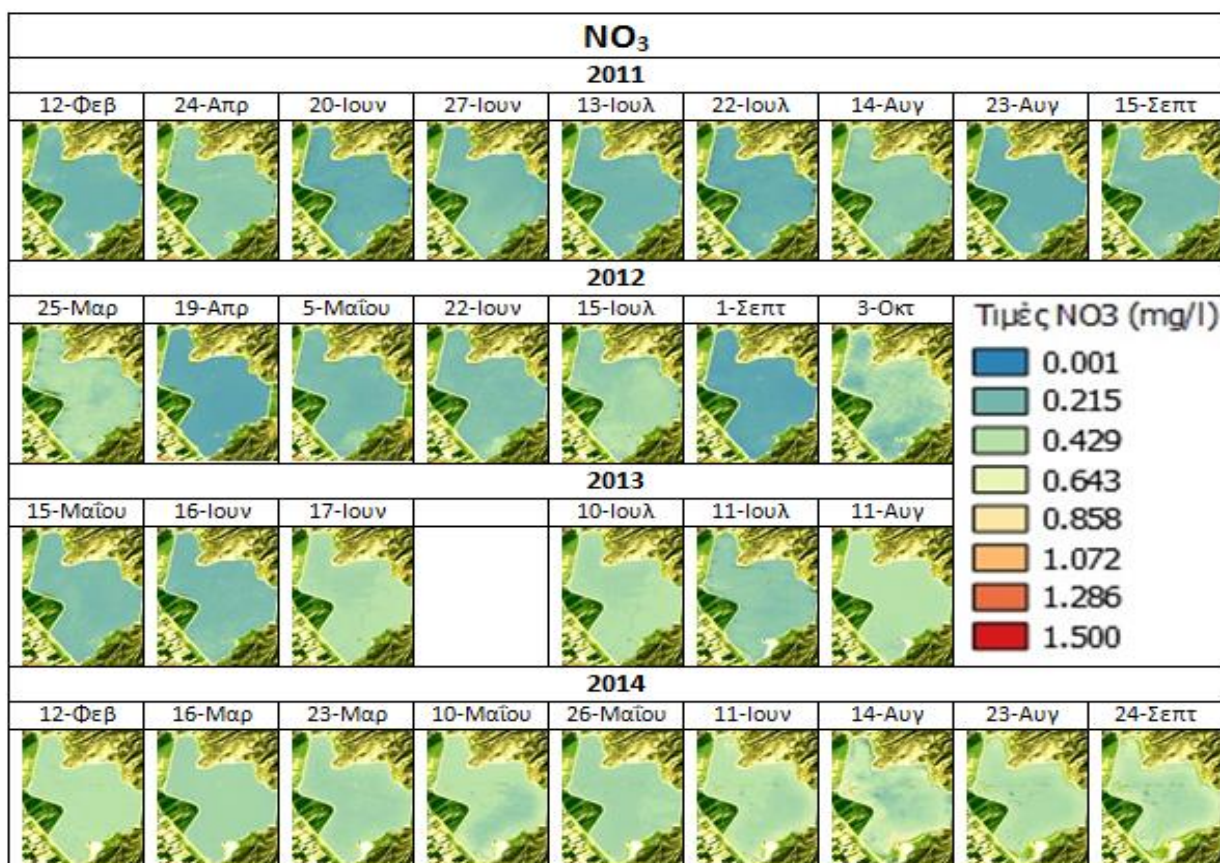
| Landsat 7 | Landsat 8 |
|---|--|
| 16 Ιουνίου 2013 | 17 Ιουνίου 2013 |
|  |  |
| 11 Ιουλίου 2013 | 10 Ιουλίου 2013 |
|  |  |

Εικόνα 5.4 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για NH_4

Για τον Ιούνιο παρατηρείται ότι ενώ τα εύρη των τιμών διαφέρουν το μοτίβο που ακολουθείται και στους δύο δορυφόρους είναι κοινό, δηλαδή στο εσωτερικό της λίμνης οι τιμές είναι πιο αυξημένες σε σχέση με τις όχθες στο βόρειο και νότιο τμήμα της. Για τον Ιούλιο οι εκτιμήσεις διαφέρουν καθώς για τον Landsat 8 είναι μικρότερες σε σχέση με τον Landsat 7 όμως το κοινό και στους δύο χάρτες είναι ότι οι τιμές είναι ομοίως κατανομημένες σε όλη την επιφάνεια της λίμνης και στους δύο δορυφόρους.

➤ Νιτρικά Ιόντα (NO₃⁻)





Οι χάρτες των νιτρικών ιόντων προέκυψαν από την εφαρμογή του δείκτη R865/R560 με $r^2=82,32\%$ και την εξίσωση $y = 13.979x - 2.3108$ για τον SimL ενώ για τον Landsat 7 ο δείκτης που επιλέχθηκε είναι ο R835/R2220 με συσχέτιση 62,74 και εξίσωση $y = 0.027883x + 0.13419$. Παρά το γεγονός ότι τα νιτρικά ιόντα δεν είχαν τόσο υψηλές συσχετίσεις όπως οι προηγούμενες παράμετροι, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά αν και για μία ημερομηνία το εύρος των τιμών δεν συμβάδιζε με τις υπόλοιπες και πάρθηκε η απόφαση να μην παρουσιαστεί σαν χάρτης.



Εικόνα 5.5 Οι χάρτες NO₃ ανά ημερομηνία ανά έτος

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχει μία ομοιογένεια ως προς τα αποτελέσματα των χαρτών που προέκυψαν για τα νιτρικά ιόντα για όλες τις εποχές και τα έτη. Ελάχιστες διακυμάνσεις παρατηρούνται με την πάροδο των ετών και τα αποτελέσματα έρχονται σε ταύτιση με τα διαθέσιμα επίγεια δεδομένα. Παρατηρείται μία ελαφρά αύξηση των τιμών με την πάροδο των ετών με τους χάρτες να παρουσιάζουν ομοιομορφία τιμών σε όλη την επιφάνεια της λίμνης κάτι που υποδηλώνει ότι το μικρό βάθος δεν επηρεάζει τα νιτρικά ιόντα σαν παράμετρο.

Στην εικόνα 5.6 γίνεται η σύγκριση μεταξύ των δύο δορυφόρων στις ημερομηνίες με διαφορά μίας ημέρας

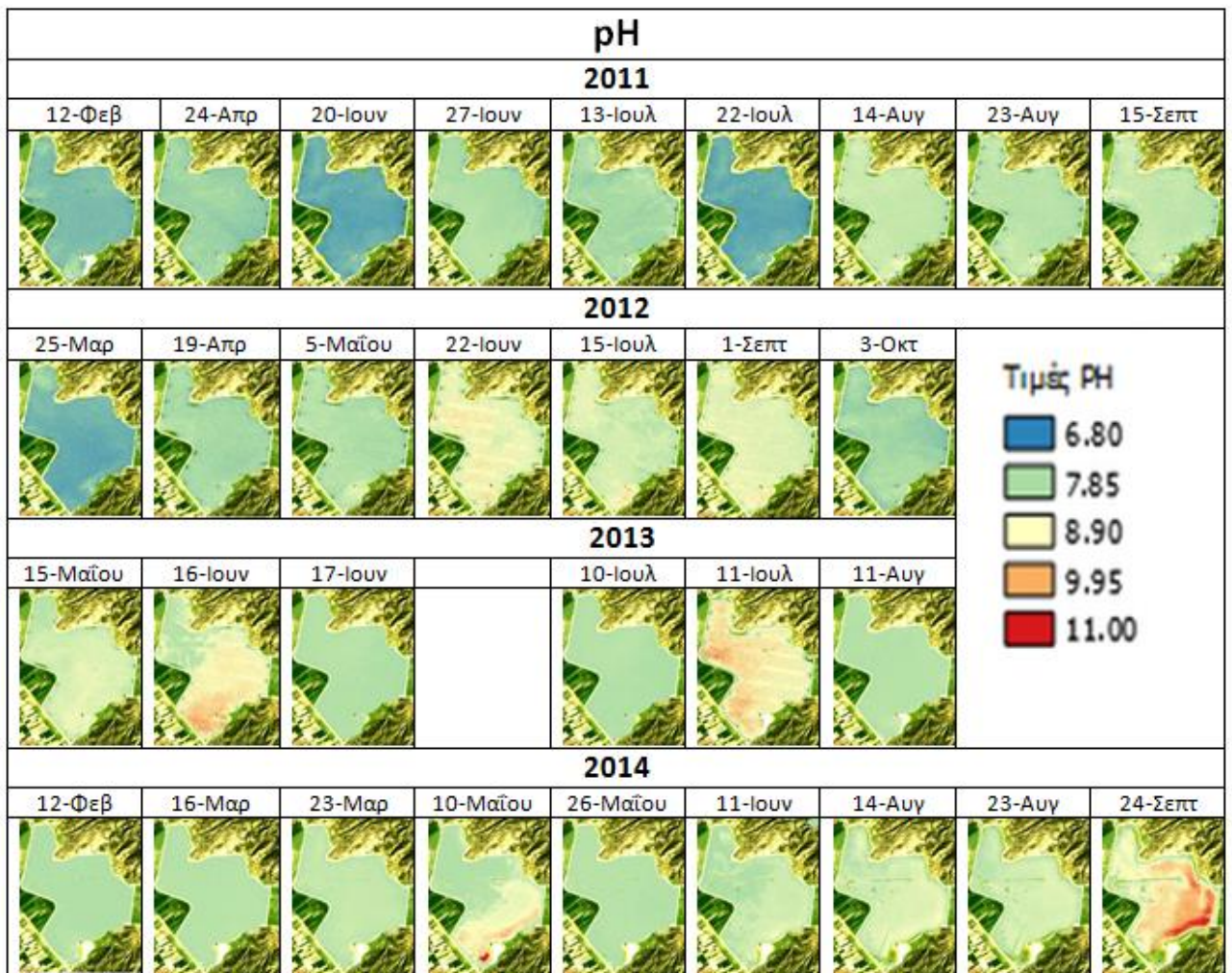
| Landsat 7 | Landsat 8 |
|---|--|
| 16 Ιουνίου 2013 | 17 Ιουνίου 2013 |
|  |  |
| 11 Ιουλίου 2013 | 10 Ιουλίου 2013 |
|  |  |

Εικόνα 5.6 Σύγκριση χαρτών L7-SimL με διαφορά μίας ημέρας για NO_3

Παρατηρείται και για τον Ιούλιο και τον Ιούνιο ότι ο SimL εκτιμάει ελαφρώς υψηλότερες τιμές από τον Landsat 7 . Η κατανομή των τιμών είναι όμοια για όλη την επιφάνεια της λίμνης και για τους δύο δορυφόρους κάτι που είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικό.

➤ **pH**

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των χαρτών για το pH. Τα δεδομένα για Landsat 8 που χρησιμοποιήθηκαν είναι, σαν δείκτης το R865/R1610 που η συσχέτιση του ήταν 73,98% με την εξίσωση $y = 0.080532x + 7.8489$. Από Landsat 7 επιλέχθηκε ο δείκτης R485/R2220 με αρκετά υψηλή συσχέτιση που έφτανε το 82,5% και εξίσωση $y=0.93609x + 6.8697$. Εδώ οι τιμές που επικρατούν κυμαίνονται πλην ελάχιστων εξαιρέσεων σε τιμές κοντά στο 7.8 με 8.

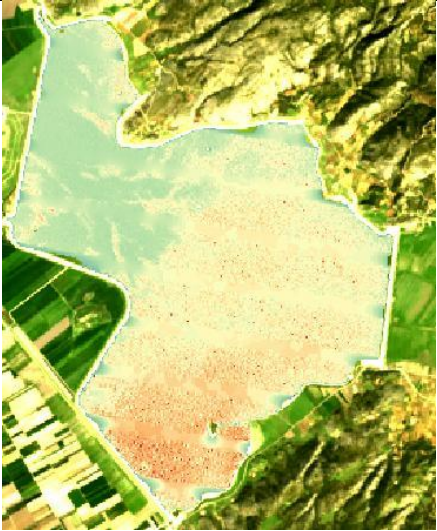





Εικόνα 5.7 Οι χάρτες pH ανά ημερομηνία ανά έτος

Με την πάροδο των ετών το pH της λίμνης φαίνεται να αυξάνεται ενώ παρατηρείται η ύπαρξη διακυμάνσεων στη διάρκεια των ετών 2013 και 2014. Η

πλειοψηφία των χαρτών συμφωνούν με τις διαθέσιμες επίγειες μετρήσεις. Η λίμνη κατατάσσεται στις αλκαλικές αφού το pH της είναι βασικό (ουδέτερο pH θεωρείται η τιμή 7).

Στον πίνακα 5.8 φαίνονται οι χάρτες που προέκυψαν από τους δύο δορυφόρους για ημερομηνίες με διαφορά μίας ημέρας.

| Landsat 7 | Landsat 8 |
|---|--|
| 16 Ιουνίου 2013 | 17 Ιουνίου 2013 |
|  |  |
| 11 Ιουλίου 2013 | 10 Ιουλίου 2013 |
|  |  |

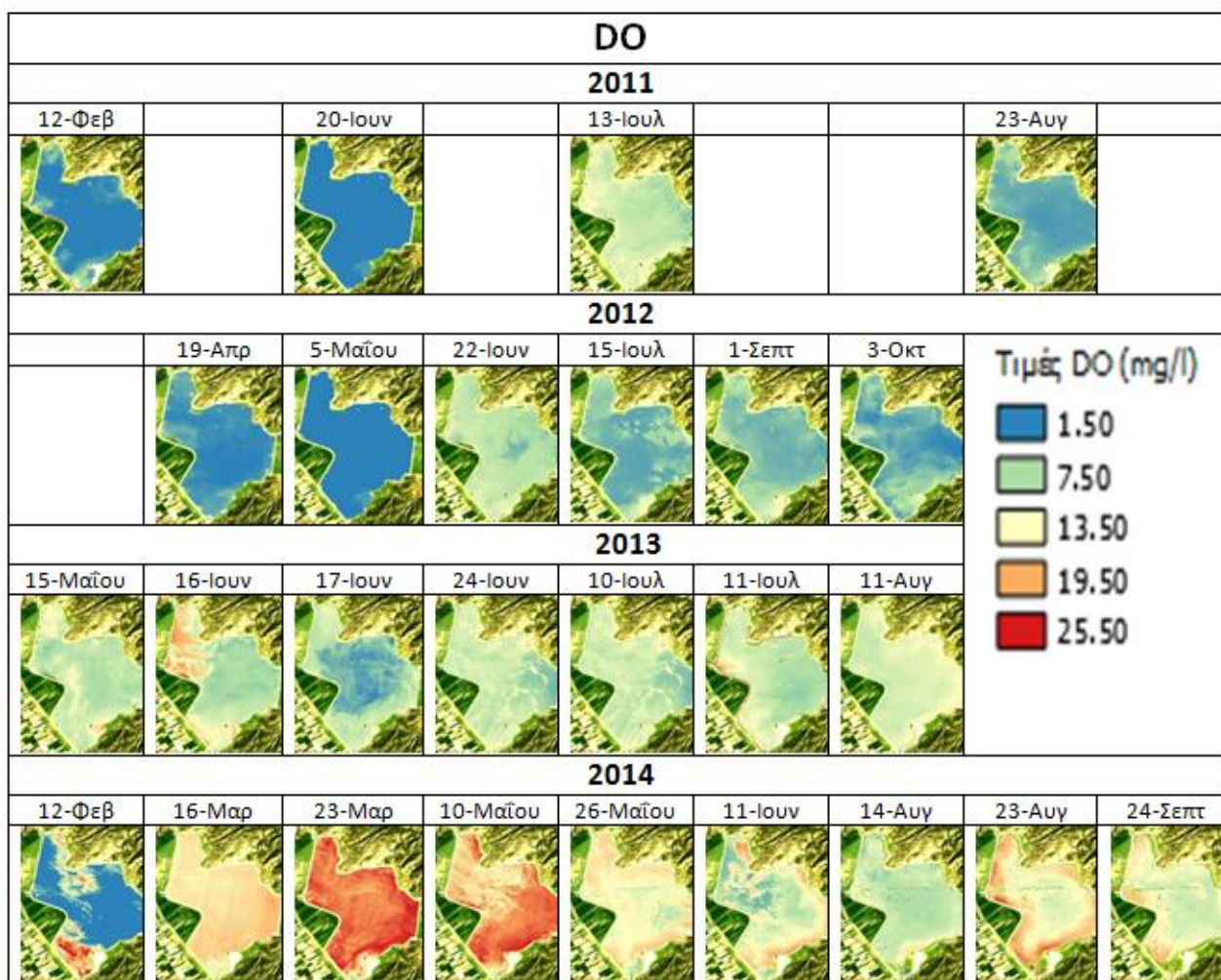
Εικόνα 5.8 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για pH

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα των δύο δορυφόρων διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό για την συγκεκριμένη παράμετρο. Ο Landsat 7 εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από τον Landsat 8 και για τους δύο μήνες, ενώ παρατηρούνται και διακυμάνσεις τιμών στην επιφάνεια της λίμνης κάτι που για τον Landsat 8 δεν

ισχύει. Οι χάρτες του Landsat 8 παρουσιάζουν ομοιομορφία και συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα επίγεια δεδομένα. Επομένως στη συγκεκριμένη παράμετρο οι χάρτες του Landsat 8 θεωρούνται πιο αξιόπιστοι.

➤ **Διαλυμένο Οξυγόνο**




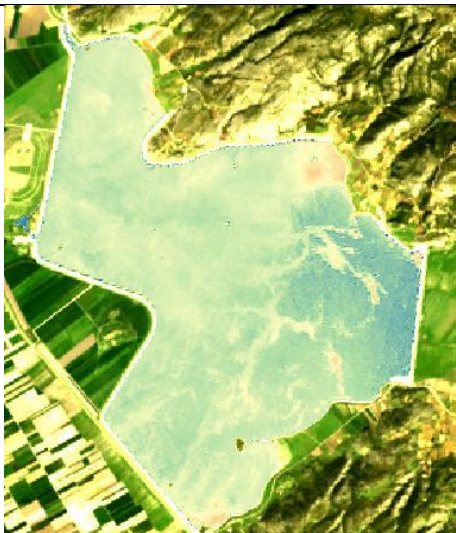
Η συγκεκριμένη παράμετρος απέδωσε υψηλές συσχετίσεις και μεγάλο αριθμό εξισώσεων και για τους δύο δορυφόρους. Οι χάρτες του Διαλυμένου Οξυγόνου κατασκευάστηκαν για το συνδιασμό καναλιών R560-R655 με καταγεγραμμένη συσχέτιση 93,65%, και τελική συνάρτηση $y = 0.036842x + 0.84038$ για τον Landsat 8. Για Landsat 7 επιλέχθηκε σαν δείκτης το πηλίκιο $(R560+R660)/2$ με συσχέτιση 88,53% και εξίσωση $y = 0.49444x - 4.8013$. Παρά τις υψηλές συσχετίσεις το διαλυμένο οξυγόνο αποδείχθηκε ευαίσθητη παράμετρος και για πολλές ημερομηνίες τα αποτελέσματα των χαρτών περιείχαν κυρίως αρνητικές τιμές, γιαυτό και δεν συμπεριλήφθηκαν στα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.9 Οι χάρτες DO ανά ημερομηνία ανά έτος

Οι χάρτες είναι λιγότεροι σε αριθμό από τις προηγούμενες παραμέτρους αφού κάποιοι αποκλείστηκαν αφού απέδιδαν ή μόνο υψηλότερες τιμές ή μόνο αρνητικές και έτσι δεν είχαν σωστά αποτελέσματα. Οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου φαίνεται να αυξάνονται με την πάροδο των ετών. Η σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα είχε και αυτή τη φορά θετικά αποτελέσματα για όσες ημερομηνίες απέδωσαν χάρτες.

Στην εικόνα 5.10 φαίνεται η σύγκριση των χαρτών για Landsat 7 και Landsat 8.

| Landsat 7 | Landsat 8 |
|---|--|
| 16 Ιουνίου 2013 | 17 Ιουνίου 2013 |
|  |  |
| 11 Ιουλίου 2013 | 10 Ιουλίου 2013 |
|  |  |

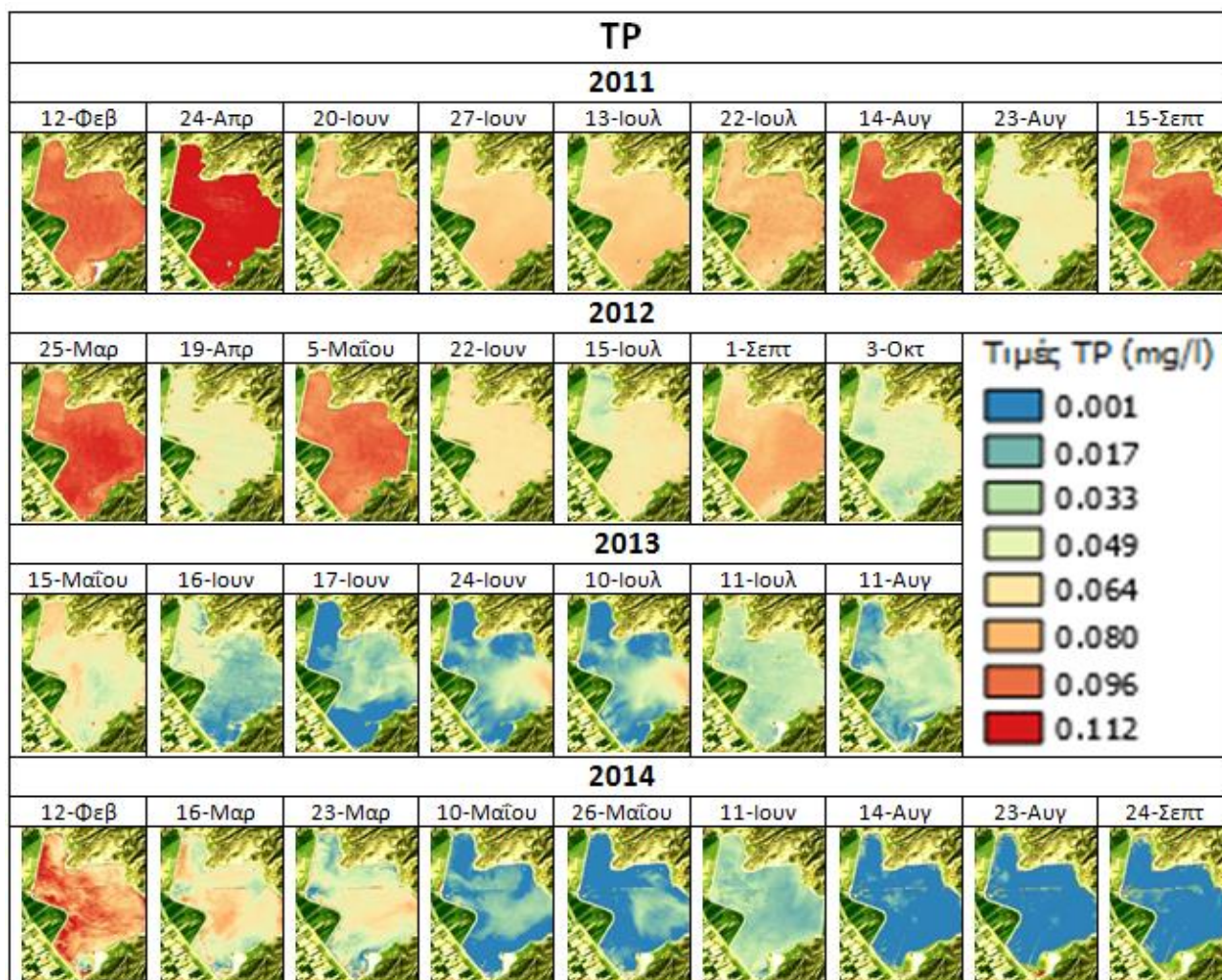
Εικόνα 5.10 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για DO

Για τον Ιούνιο οι χάρτες φαίνεται να έχουν σημαντικές διαφορές καθώς στο εσωτερικό της λίμνης ο Landsat 8 αποδίδει χαμηλότερες τιμές από τον 7 ενώ ούτε

στις όχθες υπάρχει ταύτιση αποτελεσμάτων με τον Landsat 7 και πάλι να εκτιμάει μεγαλύτερες τιμές. Για τον Ιούλιο τα εύρη τιμών και για τους δύο δορυφόρους κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τις υψηλότερες τιμές να εντοπίζονται όμως σε διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια της λίμνης.

➤ **Ολικός φώσφορος**

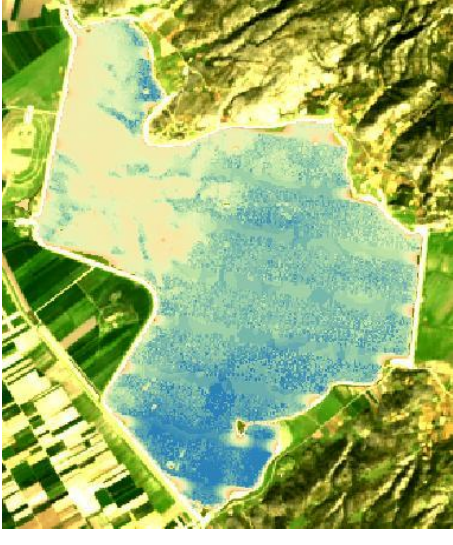



Ο ολικός φώσφορος ανήκει στις παραμέτρους που δεν είχε τόσο υψηλές συσχετίσεις όσο οι προηγούμενες παράμετροι. Για τον Landsat 7 την υψηλότερη συσχέτιση έδωσε ο συνδυασμός καναλιών R660/R835 με $r^2=70,55\%$ και επιλέχθηκε να εφαρμοστεί με την εξίσωση $y = 2.4517x + 0.58629$, ενώ για τον Landsat 8 επιλέχθηκε (R480-R655)/R560 με συσχέτιση 78,9% και αντίστοιχη εξίσωση την $y = 2.4517x + 0.58629$. Εντούτοις, οι χάρτες που προέκυψαν ήταν ικανοποιητικοί.



Εικόνα 5.11 Οι χάρτες TP ανά ημερομηνία ανά έτος

Παρατηρείται πτώση της τιμής του ολικού φωσφόρου με την πάροδο των ετών. Οι υψηλότερες τιμές υπάρχουν το 2011 όπου η λίμνη είναι μόλις κάποιοι μήνες που έχει αναδημιουργηθεί ενώ το 2014 παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές στην διάρκεια του έτους. Συνολικά, οι χάρτες βρίσκονται σε συμφωνία με τις επίγειες μετρήσεις.

Στην εικόνα 5.12 φαίνονται οι χάρτες που προέκυψαν από τους δύο δορυφόρους και στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση τους.

| Landsat 7 | Landsat 8 |
|---|--|
| 16 Ιουνίου 2013 | 17 Ιουνίου 2013 |
|  |  |
| 11 Ιουλίου 2013 | 10 Ιουλίου 2013 |
|  |  |

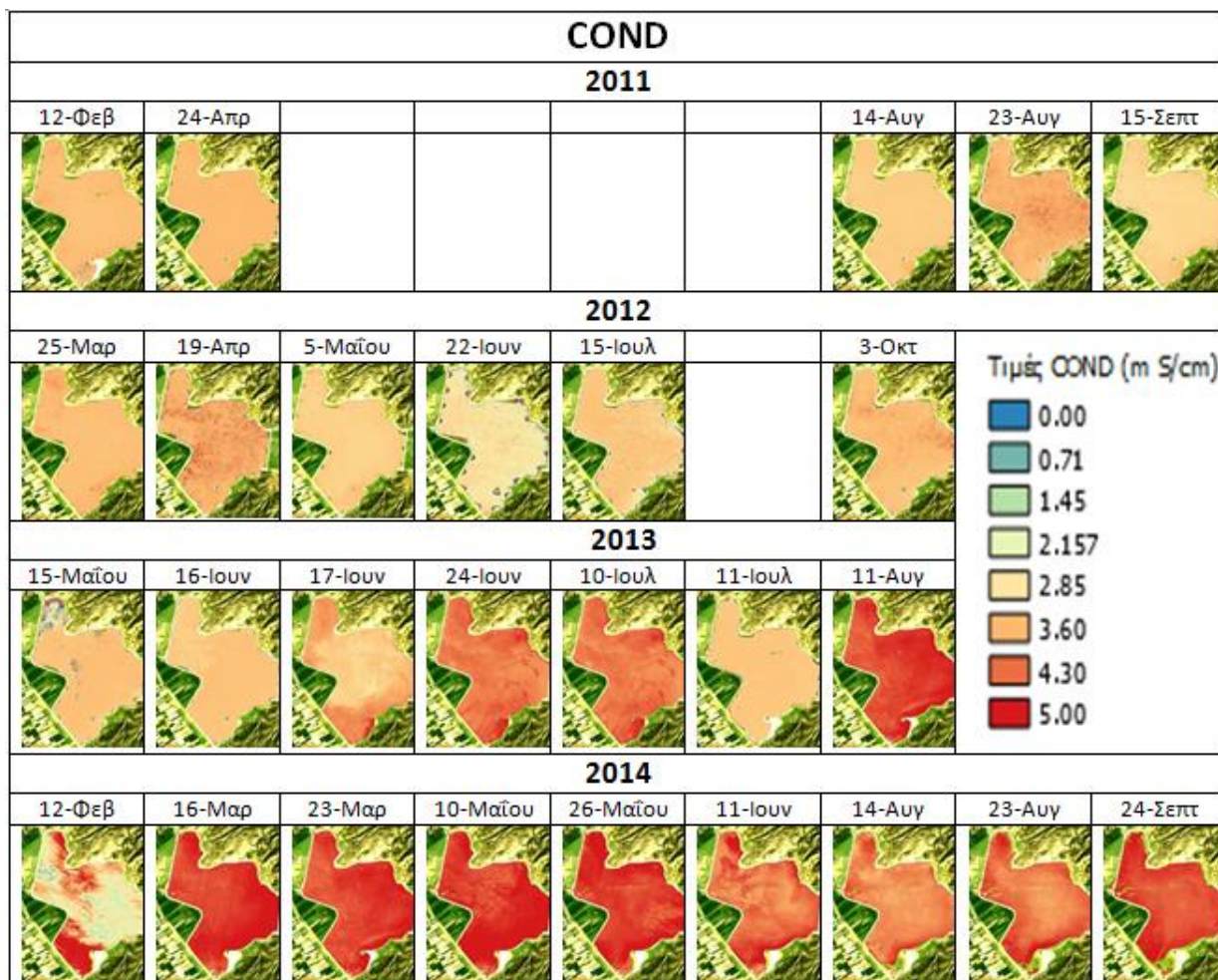
Εικόνα 5.12 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για TP

Τον Ιούνιο οι δύο δορυφόροι στην περιοχή της λίμνης που το βάθος είναι μεγαλύτερο απέδωσαν συναφή αποτελέσματα αλλά στο βόρειο και νότιο σημείο της όπου τα βάθη είναι μικρότερα υπάρχει αστοχία καθώς ο Landsat 8 παρουσιάζει κατά πολύ μικρότερες τιμές από τον 7. Στο ίδιο μοτίβο κινούνται τα αποτελέσματα και για τον Ιούλιο όπου ο Landsat 7 παρουσιάζει ομοιομορφία τιμών σε όλη την επιφάνεια της λίμνης και έχει αποδώσει συνολικά υψηλότερες τιμές από τον Landsat 8 ο οποίος έχει και αρκετές διακυμάνσεις στην επιφάνεια της (από πολύ χαμηλές έως πολύ υψηλές τιμές).

➤ **Αγωγιμότητα**

Η αγωγιμότητα σαν παράμετρος δεν έδωσε υψηλές συσχετίσεις και για τους δύο δορυφόρους. Για την εξαγωγή των χαρτών, για Landsat 7 επιλέχθηκε σαν δείκτης ο συνδιασμός καναλιών R485-R835/ R660-R835 με $r^2=66,02\%$ με εξίσωση $y = 0.34911x + 3.1631$. Για τον Landsat 8 υπήρχε μόνο μία επιλογή και ήταν ο δείκτης R480-R865 με $r^2=57,48\%$ και αντίστοιχη εξίσωση την $y = -0.00067982x + 4.0864$. Επιπλέον, στην συγκεκριμένη παράμετρο κάποιες ημερομηνίες απέδωσαν μη έγκυρους χάρτες που δεν παρουσιάζονται. Οι χάρτες που προέκυψαν για τις υπόλοιπες παραμέτρους ήταν συστηματικά έγκυροι σε σχέση με τις διαθέσιμες επίγειες μετρήσεις για όλες τις ημερομηνίες των δορυφορικών εικόνων που μελετήθηκαν.

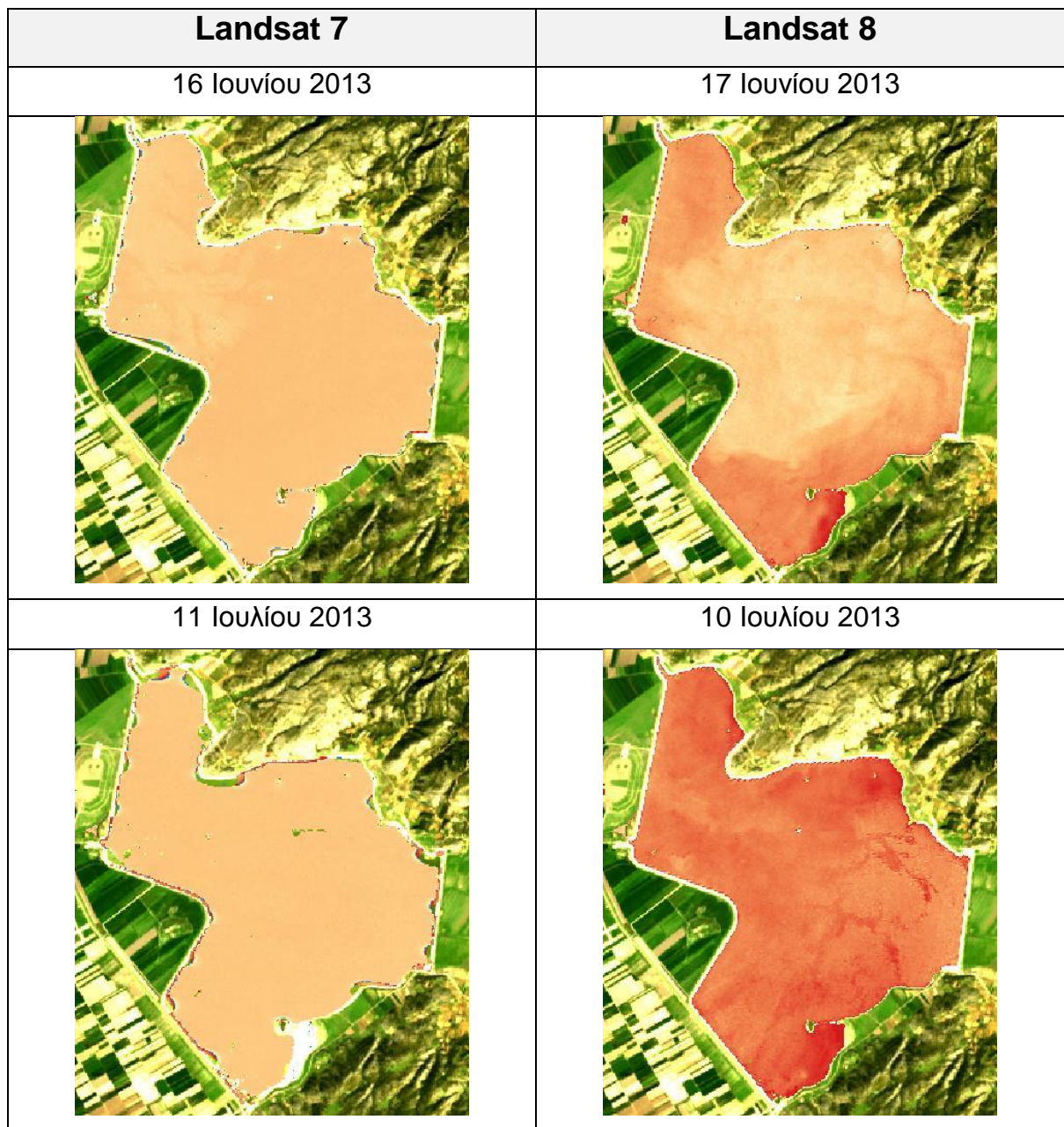
Οι χάρτες του ολικού φωσφόρου παρουσιάζονται παρακάτω στην εικόνα 5.13.



Εικόνα 5.13 Οι χάρτες αγωγιμότητας ανά ημερομηνία ανά έτος

Η αγωγιμότητα της λίμνης από το 2011 κυμαίνονταν σε υψηλά επίπεδα όμως με την πάροδο των ετών φαίνεται να αυξάνεται περισσότερο. Είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την λίμνη. Υπάρχει πλήρης ταύτιση των δεδομένων με τα διαθέσιμα επίγεια, παρόλο που οι συσχετίσεις που προέκυψαν ήταν σε μέτρια προς χαμηλά επίπεδα. Συμπεραίνουμε ότι η αγωγιμότητα δεν έχει την ευαισθησία άλλων παραμέτρων που ενώ είχαν υψηλές συσχετίσεις δεν απέδωσαν έγκυρα αποτελέσματα.

Στην εικόνα 5.14 φαίνονται σε αντιπαράθεση τα αποτελέσματα των δύο δορυφόρων.



Εικόνα 5.14 Σύγκριση χαρτών L7-L8 με διαφορά μίας ημέρας για αγωγιμότητα

Το μοτίβο αποτελεσμάτων και για τους δύο δορυφόρους είναι κοινό με τον Landsat 8 να παρουσιάζει αποδίδει υψηλότερες τιμές από τον Landsat 7 και για τους δύο μήνες, ιδιαίτερα για τον Ιούλιο. Οι τιμές είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια της λίμνης και για τους δύο δορυφόρους εκτός από τον Ιούνιο για τον Landsat 8 όπου φαίνονται κάποιες διακυμάνσεις με υψηλότερες τιμές στο βόρειο και το νότιο τμήμα της λίμνης, ενώ στο κεντρικό οι τιμές φαίνεται να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τον Landsat 7 στον αντίστοιχο χάρτη.

6 ■ Συμπεράσματα και προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα που απορρέουν από το σύνολο των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν καθώς και κάποια σχόλια πάνω στις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν ενώ υπογραμμίζεται η ανάγκη ενασχόλησης με το συγκεκριμένο αντικείμενο και αξιοποίησης των εργαλείων που προσφέρει.

➤ **Συμπεράσματα για τα Πολυφασματικά δεδομένα**

- ✓ η χλωροφύλλη α (Chl-a, chlorophyll-a) είχε μεγαλύτερες συσχετίσεις όταν στον συνδυασμό των καναλιών περιλαμβάνονταν το κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο κανάλι (NIR).
- ✓ Υψηλές συσχετίσεις εμφανίζονται και για τα δεδομένα του Landsat 8, παρά το γεγονός ότι ο δορυφόρος αυτός διαθέτει σχετικά μεγάλη εδαφοψηφίδα και πολυφασματικά κανάλια, κάτι που θα μπορούσε ενδεχομένως να δημιουργήσει πρόβλημα.
- ✓ Τα δεδομένα των δορυφορικών εικόνων πριν τη πραγματοποίηση των ατμοσφαιρικών διορθώσεων έδωσαν εξαιρετικά χαμηλές συσχετίσεις εν αντιθέσει με τις συσχετίσεις που προέκυψαν μετά τη πραγματοποίηση της ατμοσφαιρικής διόρθωσης. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αναγκαιότητα πραγματοποίησης ατμοσφαιρικής διόρθωσης σε τέτοιου είδους περιπτώσεις.
- ✓ Τα μοντέλα χαρτών που προέκυψαν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο για ακριβέστερη ανάκτηση των τιμών της εκάστοτε παραμέτρου είναι απαραίτητη η δημιουργία μοντέλων αναφερόμενων μόνο στις παρόχθιες περιοχές της λίμνης, σε περιοχές δηλαδή που η επίδραση του πυθμένα είναι εντονότερη.
- ✓ Τα νιτρικά ιόντα NO_3 απέδωσαν μεγαλύτερες συσχετίσεις όταν στον δείκτη υπήρχε το swir2.
- ✓ Το αμμώνιο NH_4 απέδωσαν μεγαλύτερες συσχετίσεις όταν στον δείκτη υπήρχε το μπλε ή το πράσινο κανάλι.
- ✓ Μεγάλο r^2 δεν συνεπάγεται και έγκυρα αποτελέσματα απαραίτητα αφού η εξεταζόμενη παράμετρος μπορεί να είναι οπτικά ευαίσθητη και να επηρεάζεται από άλλους παράγοντες.
- ✓ Οι χάρτες στην πλειοψηφία τους απέδωσαν έγκυρα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.
- ✓ Δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα στη σύγκριση αποτελεσμάτων Landsat 7 & 8 αφού σε κάποιες παραμέτρους υπήρχε ταύτιση αποτελεσμάτων αλλά σε άλλες όχι.

➤ Γενικότερα Συμπεράσματα

Τα γενικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη παρούσα εργασία ακολουθούν τις εξής κατευθύνσεις:

- ✓ Η συγκεκριμένη μεθοδολογία προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης υδατικών συστημάτων με χαμηλό κόστος.
- ✓ Επιτρέπεται η δημιουργία και ενημέρωση μιας γεωβάσης με δεδομένα εισόδου ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
- ✓ Γίνεται εφικτή η αποτελεσματικότερη παρακολούθηση και προστασία των υδάτων στη χώρα μας.
- ✓ Υπάρχει δυνατότητα μακροπρόθεσμης παρακολούθησης υδάτινων σωμάτων αφού μεγάλος όγκος δεδομένων είναι διαθέσιμος και για το παρόν και το παρελθόν.

Οι έρευνες ωστόσο στη κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να συνεχιστούν.

➤ Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Σε αυτό το σημείο αναφέρονται κάποιες βασικές κατευθύνσεις που προτείνεται να ακολουθήσει η έρευνα στο μέλλον. Συγκεκριμένα, μερικές από τις εργασίες που θα ήταν ορθό να πραγματοποιηθούν σε επόμενο στάδιο είναι:

- ✓ Η διερεύνηση και ανάλυση των σημείων που προκάλεσαν αποτυχία εμφανίσεων υψηλών συσχετίσεων.
- ✓ Η διερεύνηση και ανάλυση των ποιοτικών παραμέτρων που παρουσίασαν διαφορές στη συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων.
- ✓ Περαιτέρω έρευνα για τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο δορυφόρων .
- ✓ Διεξαγωγή έρευνας με την χρήση διαφορετικών δορυφόρων πέρα του Landsat
- ✓ Η σύγκριση με δεδομένα μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης.

Βιβλιογραφία

Alparslan, E., Aydoner, C., Tufekci, V. And Tufekci, H., 2007. Water Quality Assessment at Omerli Dam Using Remote Sensing Techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135, pp. 391–398.

Bukata, R. P., Bruton, J. E., and 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., Harvey, G. R., and Ortner, P. B. 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., and 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, και συν. 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. και Smith, H. 1997. *Εφαρμοσμένη Ανάλυση Παλινδρόμησης*. Αθήνα : Παπαζήση, 1997.

Duan Z., Bastiaanssen, W.G.M., 2015. A new empirical procedure for estimating intra-annual heat storage changes in lakes and reservoirs: Review and analysis of 22 lakes, *Remote Sensing of Environment*, 156, pp 143-156.

Giardino, Claudia, et al. 2007. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. *Remote Sensing of Environment*. July 30, 2007, Vol. 109, 2, pp. 183-195. ISSN 0034-4257, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.017>.

Han, L., Jordan, K., 2005. Estimating and mapping chlorophyll a concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, pp. 5245–5254.

Hellweger, F.L., Schlosser, P., Lall, U., Weissel, J.K., 2004. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61, pp. 437–448.

Hunter, P. D., Tyler N. A., Présing M., Kovács, W. A., Preston T. 2008. Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: The effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution. *Remote Sensing of Environment*. 112 (4), pp. 1527-1544.

Lathrop, Richard G., Lillesand, Thomas M. and Yandell, Brian S. 1991. Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. *International Journal of Remote Sensing*. 1991.

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.

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.

Shiklomanov, I., 1993. Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources, (edit) Peter H. G., New York : *Oxford University Press*.

Sidiropoulos, P., Papadimitriou, T., Stabouli, Z., Loukas, A., Mylopoulos, N., Kagalou, I., 2012. Past, present and future concepts for conservation of the re-constructed Lake Karla (Thessaly-Greece). *Fresen Environment Bulletin*, Vol 21, Issue 10a, pp. 3027–34

Simis, S.G.H., Peters, S.W.M., Gons, H.J., 2005. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. *Limnology and Oceanography*, 50, pp. 237–245.

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.

Tyler, A.N., Svab, E., Preston, T., Présing, M. Kovács, W.A., 2006. Remote Sensing of the water quality of shallow lakes: a mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 1521–1537.

Vincent, R.K., Qin, X.M., McKay, R.M.L., Miner, J., Czajkowski, K., Savino, J. and Bridgeman, T., 2004. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 89, pp. 381–392.

Wrigley, R. C., Horne, A. J., 1974. *Remote sensing and lake eutrophication.* *Nature*, 250, pp. 213-214.

Zheng, Z., Yuanling, Z., 2011. Research on the Water Quality Monitoring System for Inland Lakes based on Remote Sensing, *Procedia Environmental Sciences*, 10, pp. 1707-1711.

Changchun, H., Kun, S., Hao, Y., Yunmei L., A-xing, Z., Deyong, S., Liangjiang, X., Jun, Z., Xia, C., 2015, Satellite observation of hourly dynamic characteristics of algae with Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data in Lake Taihu, *Remote Sensing of Environment*, 159, pp. 278-287.

Palmer, S. C. J., Hunter, P. D. , Lankester, T., Hubbard, S., Spyarakos, E., Tyler, A. N., Présing, M., Horváth, H., Lamb, A., Balzter, H., Tóth, V. R., 2015. Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake, *Remote Sensing of Environment*, 157, pp. 158-169.

Young, D. J., Winter, G. J., Molot, L., 2011. A re-evaluation of the empirical relationships connecting dissolved oxygen and phosphorus loading after dreissenid mussel invasion in Lake Simcoe, *Journal of Great Lakes Research*, 37, pp. 7-14.

Αργιαλάς, Δημήτρης Π. 1999. *Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση.* Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1999.

Θεολόγου, Ιωάννα Μ. 2014 . Εκτίμηση και χαρτογράφηση ποιοτικών χαρακτηριστικών σε υδάτινους αποδέκτες με τεχνικές τηλεπισκόπησης : Η περίπτωση της λίμνης Κάρλα. *Διπλωματική Εργασία.* 2014

Κουσούρης, Θεόδωρος Σ. 2000. *Μικροβιακή Οικολογία.* Αθήνα : Χρήστος Ε. Δαρδανός, 2000.

Σισμανίδης, Παναγιώτης Ι. 2012. Διάδοση της Ακτινοβολίας μέσα από την Ατμόσφαιρα. Εφαρμογή & Αξιολόγηση Απόλυτων Ατμοσφαιρικών Αλγορίθμων Διόρθωσης Τηλεπισκοπικών Απεικονίσεων. *Διπλωματική Εργασία.* 2012.

Διαδικτυακοί τόποι

- www.enet.gr – Ηλεκτρονική εφημερίδα «Ελευθεροτυπία».
- europa.eu – Επίσημη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- landsat.gsfc.nasa.gov – Επίσημη ιστοσελίδα της NASA του προγράμματος Landsat.
- Landsat.usgs.gov – Επίσημη ιστοσελίδα της NASA για τη προμήθεια των δορυφορικών εικόνων.
- landsathandbook.gsfc.nasa.gov – Το εγχειρίδιο χρήσης των δορυφορικών εικόνων του Landsat 7.
- kre-kastor.kas.sch.gr/ - Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Καστοριάς.
- science1.nasa.gov – Επίσημη ιστοσελίδα της NASA.
- wikipedia.com – Ελεύθερη διαδικτυακή εγκυκλοπαίδεια.
- www.ecodonet.gr–Επίσημη ιστοσελίδα του Διαδικτυακού Εικονικού Παρατηρητηρίου των ποταμών Αχέροντα, Καλαμά και Τόρρε Γκουασέτο.
- www.chem.uoa.gr/- Τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Αθηνών.
- www.fdkarlas.gr – Ιστοσελίδα του Φορέα Διαχείρισης Π.Ο.Κα.Μα.Κε.Βε.
- www.spectravista.com – Εταιρική ιστοσελίδα για το GER1500.
- www.sat.dundee.ac.uk/spectrum.html-Natural Environment Research Council (NERC) Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service (NEODAAS)
- www.hydroscopio.gr
- www.istelas.gr
- geog.ucsb.edu