

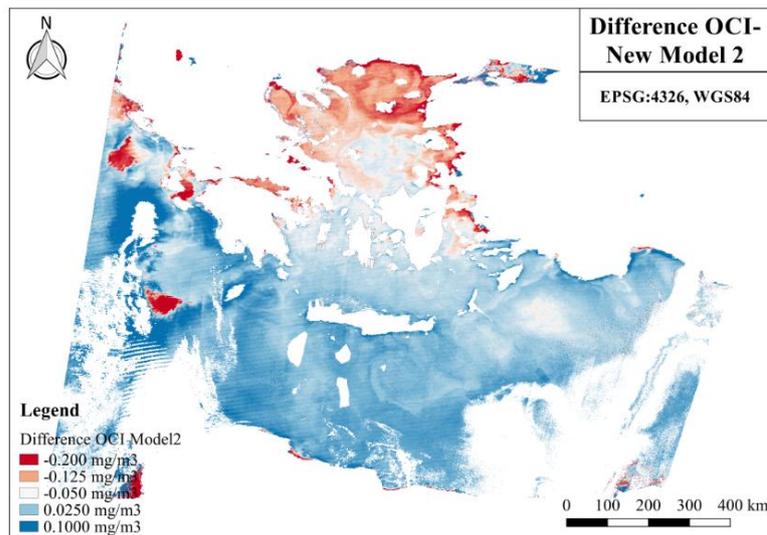


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΣΑΤΜ - Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση Μοντέλων Εκτίμησης Επιπέδων
Χλωροφύλλης και Θερμοκρασίας
στην Νοτιοανατολική Μεσόγειο από
Δορυφορικά Δεδομένα MODIS και Sentinel-3



Τσαμουρά Ευγενία-Ελισάβετ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Περιβάλλον
και
Ανάπτυξη

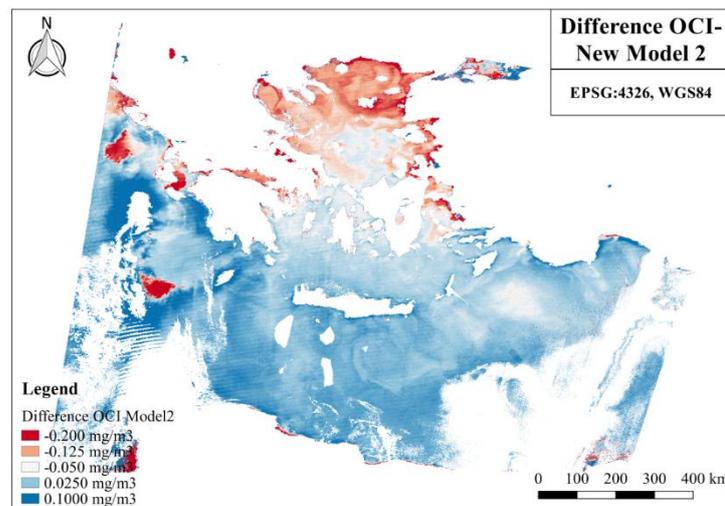


NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
Remote Sensing Laboratory

INTERDISCIPLINARY PROGRAMME OF POSTGRADUATE STUDIES
"ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT"

Master Thesis:

Evaluation of Chlorophyll and Temperature Estimation Models in
the Southeast Mediterranean from MODIS and Sentinel-3 Data



Tsamoura Evgenia-Elisavet
Athens, October 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία:

**Αξιολόγηση Μοντέλων Εκτίμησης Επιπέδων Χλωροφύλλης
και Θερμοκρασίας στην Νοτιοανατολική Μεσόγειο από
Δορυφορικά Δεδομένα MODIS και Sentinel-3**

Τσαμουρά Ευγενία-Ελισάβετ
Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Κ. Καράντζαλος

Δ. Αργιαλάς

Π. Κολοκούσης

.....

.....

.....

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Επιβλέπων

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε.Δ.Ι.Π.

Τσαμουρά Ευγενία-Ελισάβετ

Γεωλόγος Ε.Κ.Π.Α.

Copyright © All rights reserved. Ευγενία-Ελισάβετ Τσαμουρά, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σήμερα οι αυξανόμενες πιέσεις που δέχεται το περιβάλλον καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση τεχνικών και μεθόδων χαμηλού κόστους για τη συνεχή παρακολούθησή του. Οι σύγχρονες τεχνολογίες και τηλεπισκοπικές μέθοδοι παρακολούθησης του γήινου περιβάλλοντος αποτελούν πολύτιμα εργαλεία προς την κατεύθυνση αυτή. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης και εμπειρικοί αλγόριθμοι με συνδυασμό επίγειων και τηλεπισκοπικών δεδομένων. Παράλληλα έγινε αξιολόγηση των μοντέλων που χρησιμοποιεί ο δορυφόρος MODIS για τα προϊόντα της χλωροφύλλης (Chl-a) και της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (SST) και του μοντέλου του Sentinel-3 (OLCI) για τα προϊόντα της χλωροφύλλης. Δεδομένα αποτέλεσαν οι δορυφορικές εικόνες του MODIS για την περίοδο τεσσάρων ετών (2013-2016), τα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων για τις υπό μελέτη παραμέτρους που λήφθηκαν από το Sea Data Net και μία εικόνα του MODIS και του Sentinel-3 για τις 24 Αυγούστου 2017. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων και των τελικών χαρτών ήταν ενθαρρυντικά για τον δορυφόρο MODIS, ενώ ο θόρυβος στις εικόνες του Sentinel-3 αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα για την σύγκριση με τα προϊόντα του MODIS σε στην περιοχή του Κεντρικού και Νοτίου Αιγαίου.

Abstract

Today, the increasing pressure on the environment makes it necessary to use low-cost techniques and methods for efficient environmental monitoring. Earth observation and remote sensing are valuable tools in this direction. In the present study, regression models and empirical algorithms were developed using a combination of in-situ and remote sensing data. MODIS satellite images for a four-year period (2013-2016) as well as in-situ data from the Sea Data Net and one MODIS satellite image and one Sentinel-3 for 24 August 2017 were employed. An evaluation of MODIS satellite models for Chl- α and SST and Sentinel -3 (OLCI) for chlorophyll products were performed. Experimental results were promising regarding MODIS products and developed models. The noise in the Sentinel-3 OLCI images on the specific studied dates was an inhibiting factor for comparing MODIS and Sentinel-3 products at the Central and Southern Aegean regions.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και συνέβαλλαν λίγο ή πολύ και ο καθένας με τον δικό του τρόπο σε αυτήν μου τη προσπάθεια. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι με στηρίζουν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και από τους οποίους έχω αντλήσει πολλά παραδείγματα προς μίμηση. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την αδερφή μου για την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε και την υπομονή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν στην περάτωση των σπουδών μου. Από τη σχολή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου και ιδιαιτέρως τον κ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο, το οποίο αφορά την μελέτη και προστασία του περιβάλλοντος συνδυαστικά με τις τεχνολογικές μεθόδους της τηλεπισκόπησης, και να διευρύνω το πεδίο των γνώσεών μου πάνω σε δύο εξαιρετικά σημαντικούς επιστημονικούς κλάδους, και στη συνέχεια με κατεύθυne μέχρι το τέλος της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κατερίνα Κικάκη για τη βοήθεια που ήταν πάντα πρόθυμη να μου προσφέρει, καθώς και τον Αριστείδη Βαϊόπουλο και τον Ζαχαρία Κανδυλάκη για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στο προγραμματιστικό κομμάτι.

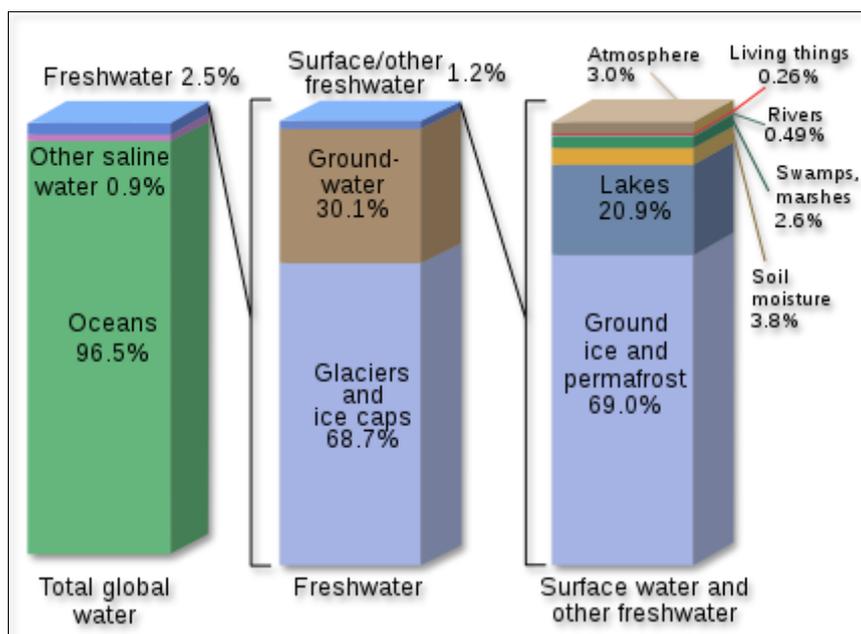
Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Κίνητρο	10
1.2 Συνεισφορά	11
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετική Βιβλιογραφία	12
Χημική Σύσταση του Θαλάσσιου Νερού.....	12
2.1 Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του Θαλάσσιου Νερού	13
2.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την Προστασία των Υδάτων	16
Η Οδηγία Πλαίσιο 2008/56/EK	16
2.3 Τα Ποιοτικά Χαρακτηριστικά του Νερού.....	16
2.3.1 Χλωροφύλλη a (chlorophyll-a, chl-a)	17
2.3.2 Θερμοκρασία.....	17
2.3.3 Διαλυμένο Οξυγόνο (Dissolved Oxygen, DO)	18
2.3.4 pH.....	18
2.3.5 Αγωγιμότητα (Conductivity, Conduct)	19
2.3.6 Ολικός Φώσφορος (Total phosphorus, TP)	20
2.3.7 Θρεπτικά Συστατικά	20
2.4 Μέθοδοι Παρατήρησης της Γης και Τηλεπισκόπηση.....	20
2.4.1 Ο Δέκτης MODIS	21
Ο δορυφόρος Terra (EOS/AM-1)	23
Ο δορυφόρος Aqua MODIS (EOS/PM-1)	24
2.4.2 Ο Δέκτης Sentinel-3	25
Το όργανο μετρήσεων του χρώματος των ωκεανών και της γης (OLCI).....	26
Το ραδιόμετρο θερμοκρασίας των ωκεανών και της γης (SLSTR).....	28
Το αλτίμετρο ραντάρ συνθετικής διάταξης (SRAL).....	28
2.5 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες	29
2.5.1 Σχετικές Εργασίες της Βιβλιογραφίας	29
2.5.2 Πρόσφατες Σχετικές Εργασίες και Αποτελέσματα.....	31
3. Μεθοδολογία.....	37
3.1 Περιοχή Μελέτης	37
3.2 Συλλογή in-situ Δεδομένων	38
3.3 Συλλογή Δορυφορικών Δεδομένων	39
3.3.1 Επεξεργασία Εικόνων	40

3.4 Μοντέλα Παλινδρόμησης και Συσχετίσεις Δεδομένων	41
3.4.1 Γενική Γραμμική Παλινδρόμηση	41
3.4.2 Λογαριθμική - Γραμμική Παλινδρόμηση	43
3.4.3 Στατιστικές Παράμετροι R^2 και p-value	43
3.4.4 Δημιουργία Δεικτών Συσχετίσεων	44
4. Πειραματικά Αποτελέσματα και Αξιολόγηση	45
4.1 Αποτελέσματα Συσχετίσεων των προϊόντων Modis με τα in situ Δεδομένα	45
4.2 Αποτελέσματα Συσχετίσεων με χρήση Δεικτών της Βιβλιογραφίας	47
4.2 Αποτελέσματα Συσχετίσεων για τα νέα μοντέλα που αναπτύχθηκαν	56
4.3 Αποτελέσματα Συσχετίσεων του δορυφόρου MODIS με τον Sentinel-3	61
5. Συμπεράσματα και Προοπτικές	65
Βιβλιογραφικές Αναφορές	67
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	67
Ελληνική Βιβλιογραφία	72
Διαδικτυακοί Τόποι	75
Πρόσθετη Βιβλιογραφία	77
Κατάλογος Εικόνων	78
Κατάλογος Πινάκων	79

1. Εισαγωγή

Η ζωή των έμβιων όντων στον πλανήτη εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας από τους σημαντικότερους είναι το νερό. Το νερό καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της γης και η συνολική ποσότητα του νερού στη γη εκτιμάται στα 1386 εκατομμύρια Km³ (USGS, 2016). Συγκεκριμένα το 96.5 % απαντάται στους ωκεανούς, ενώ το υπόλοιπο 2.5% αντιστοιχεί σε γλυκό νερό. Στην Εικόνα 1 παρατηρείται ότι από αυτό το ποσοστό του 2.5%, το 68.7% εντοπίζεται στους πάγους, το 30.1% στο υπέδαφος και μόλις το 1.2% στις λίμνες, στα ποτάμια και στα υπόλοιπα επιφανειακά ύδατα. Ένα πολύ μικρό ποσοστό της τάξης του 0.3% του γλυκού νερού βρίσκεται στις λίμνες, τα ποτάμια και στην ατμόσφαιρα (USGS, 2016).



Εικόνα 1: Κατανομή του νερού στη γη (Πηγή: USGS 2016, με αναφορά σε Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources* (Oxford University Press, New York).

Η θάλασσα, είτε πρόκειται για κλειστές λεκάνες όπως η Μεσόγειος, είτε για ωκεανούς, συμβάλλει καθοριστικά στην διατήρηση της ζωής και την ανάπτυξη του πλανήτη. Η θάλασσα καθορίζει τη θερμική ισορροπία, ρυθμίζει τον κύκλο του νερού, δεσμεύει και αποθηκεύει διοξείδιο του άνθρακα, συνεισφέρει σε ναυτιλιακές και εμπορικές δραστηριότητες, και συντελεί στην παραγωγή μεγάλων ποσοστών οξυγόνου, χάρη στο φυτοπλαγκτόν (Ποϊραζίδης, 2013).

1.1 Κίνητρο

Η εργασία αυτή αποσκοπεί στην αξιοποίηση σύγχρονων τηλεπισκοπικών μέσων για την παρακολούθηση των θαλάσσιων υδάτων στο χώρο της Μεσογείου. Κίνητρο αποτέλεσαν τα νέα δεδομένα Sentinel-3 που μαζί με αυτά του MODIS προσφέρουν πολλαπλά φασματικά κανάλια για την παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι δορυφορικοί δέκτες αυτοί παρέχουν ελεύθερα δεδομένα παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων και καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις. Επιπλέον, είναι δυνατή η παρακολούθηση και η εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων

κατά τη διάρκεια προηγούμενων ετών, ώστε να εντοπισθούν και να μελετηθούν οι μεταβολές και να δημιουργηθεί μία βάση δεδομένων.

1.2 Συνεισφορά

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στην αξιολόγηση των τηλεπισκοπικών δεδομένων και στην σύγκριση δεδομένων από διαφορετικούς δορυφορικούς δέκτες για την μελέτη και την εκτίμηση της ποιότητας των θαλάσσιων υδάτων σε περιοχές μεγάλων εκτάσεων, όπως η Μεσόγειος. Μελετήθηκαν δείκτες ποιότητας των υδάτων, συγκεκριμένα η χλωροφύλλη-α και η θερμοκρασία, κατά τα έτη 2013-2016 με μετρήσεις in-situ.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετική Βιβλιογραφία

Η ζωή στον πλανήτη εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τους ωκεανούς, που, όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του ελεύθερου νερού στη Γη. Παράγουν περισσότερο από το ήμισυ του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα και απορροφούν τον περισσότερο άνθρακα από αυτό, επηρεάζουν τη θερμοκρασία και συμβάλουν στη διαμόρφωση του κλίματος και του καιρού. Επιπλέον, περίπου το ήμισυ του παγκόσμιου πληθυσμού ζει μέσα στην παράκτια ζώνη, ενώ οι επιχειρήσεις που βασίζονται στον ωκεανό συνεισφέρουν πάνω από 500 δισεκατομμύρια δολάρια στην παγκόσμια οικονομία (Protect Planet Ocean, 2010).

Χημική Σύσταση του Θαλάσσιου Νερού

Το θαλασσινό νερό αποτελεί ένα μίγμα νερού και αλάτων, ενώ σε μικρότερες ποσότητες απαντώνται διαλυμένα ανόργανα και οργανικά υλικά, ιχθυοστοιχεία και αέρια. Σύμφωνα με τον Βρυώνη (2013 όπως αναφέρει ο Mason, 1996), ο Πίνακας 1 που ακολουθεί δείχνει τη μέση περιεκτικότητα του θαλάσσιου νερού στα διαλυμένα συστατικά του.

Πίνακας 1: Τα σημαντικότερα συστατικά του θαλάσσιου νερού (Βρυώνης, 2013 όπως αναφέρει ο Mason, 1996)

Ιόν	Cl=19%	%
Cl ⁻¹	18.980	55.05
Br ⁻¹	0.065	0.19
SO ₄ ⁻²	2.649	7.68
HCO ₃ ⁻¹	0.140	0.41
F	0.001	0.00
H ₃ BO ₃	0.026	0.07
Mg ⁺²	1.272	3.69
Ca ⁺²	0.400	1.16
Si ⁺²	0.008	0.03
K ⁺¹	0.380	1.10
Na ⁺¹	10.556	30.61
Ολικό Ποσό	34.477	99.99

Η περιγραφή της σύστασης του θαλάσσιου νερού βασίζεται κυρίως σε δύο παραμέτρους, την αλατότητα και την χλωριότητα. Η αλατότητα (salinity) του θαλάσσιου νερού σύμφωνα με την Καρύδη (2011 όπως αναφέρουν οι Μπελιμπασάκης και Χατζηκωνσταντής, 2005) ορίζεται ως «η συνολική ποσότητα των στερεών ουσιών σε γραμμάρια που περιέχονται σε ένα κιλό θαλασσινού νερού, όταν όλα τα ανθρακικά ιόντα έχουν μετατραπεί σε οξείδια, τα βρωμιούχα και τα ιωδιούχα έχουν αντικατασταθεί με χλωριούχα και τα οργανικά έχουν οξειδωθεί» (σελ. 9). Η χλωριότητα του νερού είναι η συνολική ποσότητα των χλωριούχων, βρωμιούχων και ιωδιούχων ενώσεις σε γραμμάρια που περιέχονται σε 1Kg νερού. Αυτές οι παράμετροι μεταβάλλονται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, το βάθος και τη γεωμορφολογία του πυθμένα (Καρύδη, 2011 όπως αναφέρουν οι Μπελιμπασάκης και Χατζηκωνσταντής, 2005).

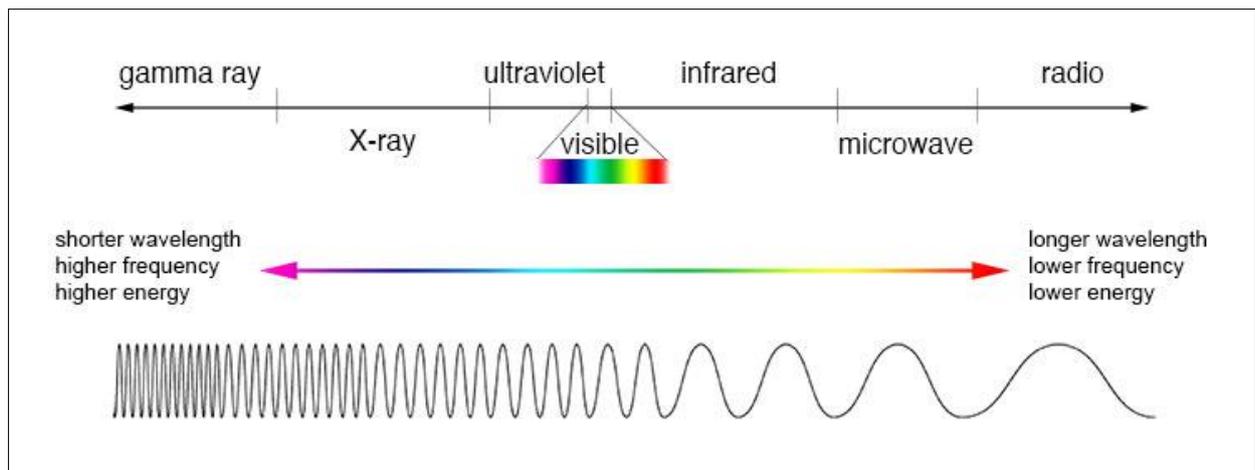
2.1 Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του Θαλάσσιου Νερού

Ο καθοριστικός αυτός ρόλος του θαλάσσιου νερού στη διατήρηση της ζωής οφείλεται στις φυσικές και χημικές ιδιότητες που παρουσιάζει. Σύμφωνα με τον Ποϊραζίδη (2013) και τον Αλμπανάκη (2007) αυτές είναι:

- Η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού, η οποία παρουσιάζει μέγιστη τιμή όταν η θερμοκρασία ξεπερνάει εκείνη του σημείου τήξης. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την επιβίωση των οργανισμών ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.
- Το pH κυμαίνεται από 7,5 έως 8,4 και ,συνεπώς, υπάρχει μεγάλη χημική ουδετερότητα.
- Μεγάλη θερμοχωρητικότητα (περίπου 4.2kJ/(kg °C) σε πίεση 1bar).
- Υψηλή διηλεκτρική σταθερά.
- Μεγάλη διαλυτική ικανότητα.
- Σχετικά μικρό ιζώδες.
- Μεγάλη επιφανειακή τάση, ιδιότητα σημαντική για τον σχηματισμό σταγόνων και κυμάτων, αλλά και με βιολογική σημασία, καθώς ελέγχει τη φυσιολογία του κυττάρου.
- Μεγάλη ειδική θερμότητα εξάτμισης (περίπου 2260kJ/kg σε πίεση 1bar).
- Μεγάλη ειδική θερμότητα τήξης (330.5 kJ/kg σε πίεση 1bar).
- Σχετικά υψηλή διαπερατότητα στο φως.

Για τους παραπάνω λόγους και επειδή η Ελλάδα, ως γεωγραφικός χώρος, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη θάλασσα είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας των θαλάσσιων υδάτων. Ένας συνήθης τρόπος διεξαγωγής ποιοτικών ελέγχων είναι η δειγματοληψία και η μετέπειτα εργαστηριακή ανάλυση των δειγμάτων. Η δειγματοληψία παρέχει δεδομένα μεγάλης ακρίβειας, όμως υπόκειται σε οικονομικούς περιορισμούς και σε περιορισμούς που αφορούν τις περιοχές μεγάλης έκτασης, όπως η Μεσόγειος (Μουντογιαννάκη, 2015). Η αξιοποίηση της Τηλεπισκόπησης συμβάλλει σημαντικά στην άρση των παραπάνω περιορισμών. Ήδη από το 1974 ήταν δυνατή η μελέτη δορυφορικών εικόνων για την εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδάτων και τη χαρτογράφησή τους (Parageorgiou, 2016 όπως αναφέρουν οι Wrigley and Horne, 1974).

Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης αξιοποιεί την ιδιότητα των διαφορετικών αντικειμένων να εκπέμπουν σε διαφορετικά τμήματα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Εικόνα 2) με αποτέλεσμα να έχουν χαρακτηριστικές φασματικές ταυτότητες. Ως «φασματική ταυτότητα» (*spectral signature*) ή «φασματική απόκριση» (*spectral response*) ενός αντικειμένου αναφέρεται η ποσότητα και η κατανομή στο φάσμα της ανακλώμενης και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που εκπέμπει και καταγράφεται από τους δέκτες των δορυφόρων (Παρχαρίδης, 2015 όπως αναφέρουν οι Campbell 1996, Sabins 1997, Mather 1999). Τα συστήματα τηλεπισκόπησης κατηγοριοποιούνται σε παθητικά και σε ενεργητικά με βάση την πηγή προέλευσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Τα παθητικά συστήματα δέχονται την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπει μία φυσική πηγή, ενώ τα ενεργητικά συστήματα λαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που έχουν εκπέμψει τα ίδια ή κάποια άλλη εξωτερική πηγή. Παράδειγμα ενεργητικού συστήματος αποτελούν τα Radars (Παρχαρίδης, 2015).



Εικόνα 2: Σύγκριση του μήκους κύματος, της συχνότητας και της ενέργειας για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Πηγή: NASA's Imagine the Universe)

Οι διάφορες μετρήσεις και η χαρτογράφηση των υδάτων πραγματοποιείται με την πληθώρα των διαθέσιμων αλγορίθμων που έχουν αναπτυχθεί και, συνήθως, βασίζονται στις ακόλουθες τρεις προσεγγίσεις (Papageorgiou, 2016 όπως αναφέρουν οι Giardino, et al. 2007):

- Εμπειρική προσέγγιση: Δημιουργούνται μοντέλα παλινδρόμησης μεταξύ των δεδομένων ψηφιακής τηλεπισκόπησης και των μετρήσεων της ποιότητας του νερού.
- Ημι-εμπειρική προσέγγιση: Δύναται να χρησιμοποιηθεί όταν είναι γνωστές οι οπτικές ιδιότητες των παραμέτρων ενδιαφέροντος και αξιοποιούνται στη βελτίωση των εμπειρικών αλγορίθμων.
- Αναλυτική προσέγγιση: Οι παράμετροι της ποιότητας του νερού σχετίζονται με τις οπτικές ιδιότητες του νερού, συγκεκριμένα με τις Εγγενείς Οπτικές Ιδιότητες¹ (Inherent Optical Properties) και τις Φαινομενικές Οπτικές Ιδιότητες² (Apparent Optical Properties). Η αναλυτική προσέγγιση εμπεριέχει σχέσεις ανάμεσα στα προαναφερθέντα και την ατμοσφαιρική ακτινοβολία.

Έχει διεξαχθεί πλήθος μελετών για τα νερά της Κατηγορίας I, οι οποίες έδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά την εκτίμηση της χλωροφύλλης και του φυτοπλαγκτού, σε αντίθεση με τις μελέτες των νερών της Κατηγορίας II, των οποίων τα αποτελέσματα για την εκτίμηση διαφόρων ουσιών είναι συχνά ανακριβή. Συνεπώς, ένα σημαντικό ζήτημα αποτελεί η βελτίωση της ακριβείας των αλγορίθμων αυτών μέσω της κατανόησης των οπτικών ιδιοτήτων των συστατικών του νερού.

Τα ύδατα της Κατηγορίας I (Case-I) είναι εκείνα των οποίων οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες (Preisendorfer, 1976) μπορούν να περιγραφούν επαρκώς από το φυτοπλαγκτόν (που αντιπροσωπεύεται από τη συγκέντρωση χλωροφύλλης ή Chl) (Gordon & Morel, 1983, IOCCG, 2000, Morel, 1988). Ο ορισμός του νερού της Κατηγορίας I δεν βασίζεται στη γεωγραφική του θέση ούτε στην τιμή της χλωροφύλλης. Ο όρος «Case-I» χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία για να χαρακτηρίσει τα ανοιχτά ωκεάνια ύδατα. Τα ύδατα της Κατηγορίας II (Case-II) είναι τα ύδατα των οποίων οι οπτικές ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από άλλα

¹ Ιδιότητες που εξαρτώνται μόνο από το νερό και τις διαλυμένες ή αιωρούμενες σε αυτό ουσίες.

² Εξαρτώνται από τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες και από τη φωτεινότητα της περιοχής.

συστατικά όπως ορυκτά σωματίδια, αιωρούμενα συστατικά και έγχρωμη διαλυμένη οργανική ύλη. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα εσωτερικά και παράκτια ύδατα (Gerace, 2010).

2.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την Προστασία των Υδάτων

Το θαλάσσιο περιβάλλον δέχεται καθημερινά πλήθος πιέσεων τόσο από χερσαίες πηγές ρύπανσης όσο και από θαλάσσιες, με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η προστασία, η αποκατάσταση και η διατήρηση των θαλασσών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση προκειμένου να εξασφαλίσει την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος καθιέρωσε την Οδηγία Πλαίσιο 2008/56/ΕΚ για τη Θαλάσσια Στρατηγική.

Η Οδηγία Πλαίσιο 2008/56/ΕΚ

Οι θάλασσες και οι ωκεανοί αποτελούν διεθνείς περιοχές, οι οποίες, ως επί το πλείστον, έχουν μεγάλη αξία λόγω του τουρισμού και της ιχθυοπαραγωγής και, συνεπώς, χρήζουν προστασίας. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση απαντώνται η Βαλτική Θάλασσα, η Βόρεια Θάλασσα, η Μαύρη Θάλασσα και η Μεσόγειος. Προκειμένου να προστατευθούν οι θάλασσες αυτές διαμορφώθηκε η Οδηγία Πλαίσιο 2008/56/ΕΚ για τη Θαλάσσια Στρατηγική. Στόχοι της είναι η αποκατάσταση και η διατήρηση του θαλάσσιου οικοσυστήματος μέχρι το 2020 και η αειφόρος χρήση των θαλάσσιων πόρων που είναι καθοριστικής σημασίας για διάφορες οικονομικές και κοινωνικές δράσεις. Τα επιμέρους Κράτη Μέλη καλούνται να λάβουν τα κατάλληλα μέτρα διαχείρισης ανάλογα με τα προβλήματα και τις ανάγκες των επιμέρους θαλάσσιων περιοχών, ενώ στην περίπτωση που μοιράζονται μία θαλάσσια περιοχή οι στρατηγικές που αναπτύσσονται είναι κοινές, όπως είναι η Συνθήκη της Βαρκελώνης στη Μεσόγειο (ΥΠΕΚΑ, 2009-2017).

Η Οδηγία 2008/56/ΕΚ ενσωματώθηκε στην εθνική νομοθεσία με το Ν. 3983/2011 «Εθνική στρατηγική για την προστασία και διαχείριση του θαλάσσιου περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την οδηγία 2008/56/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 17ης Ιουνίου 2008 και άλλες διατάξεις» (ΥΠΕΚΑ, 2009-2017).

Συνθήκη της Βαρκελώνης για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και των παράκτιων περιοχών της Μεσογείου

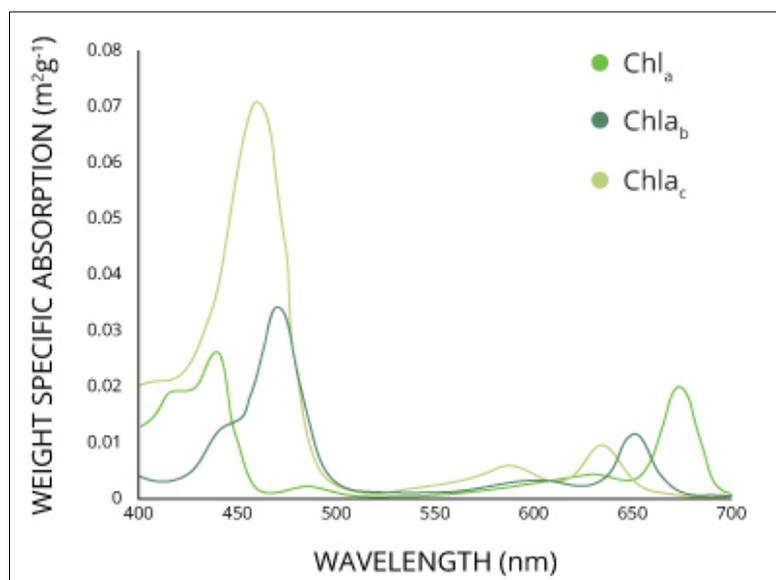
«Η Συνθήκη της Βαρκελώνης, συμπράττοντα μέρη της οποίας είναι η Ευρωπαϊκή Ένωση και οι περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο, αφορά τη διαμόρφωση στρατηγικών και πολιτικών με στόχο την προστασία του θαλάσσιου και του παράκτιου περιβάλλοντος στη περιοχή της Μεσογείου, και τίθεται σε εφαρμογή από το Μεσογειακό Πρόγραμμα Δράσης (Mediterranean Action Plan)» (ΥΠΕΚΑ, 2009-2017).

2.3 Τα Ποιοτικά Χαρακτηριστικά του Νερού

Ο όρος «ποιότητα του νερού» χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατάσταση του νερού, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών του. Οι παράμετροι που ακολουθούν είναι σημαντικοί για την διατήρηση της ζωής στα υδατικά οικοσυστήματα, καθώς η μεταβολή τους επηρεάζει τόσο τη χλωρίδα, όσο και την πανίδα.

2.3.1 Χλωροφύλλη a (chlorophyll-a, chl-a)

Οι διαφορετικοί τύποι της χλωροφύλλης ανήκουν, από άποψη χημικής δομής, στις φωτοσυνθετικές χρωστικές και απαντώνται στην πλειοψηφία των φωτοσυνθετικών οργανισμών. Η χλωροφύλλη 'a' είναι μια μορφή χλωροφύλλης που εντοπίζεται σε όλους τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς, εξαιρουμένων των ανοξυγονικών φωτοσυνθετικών βακτηρίων. Μία άλλη σημαντική μορφή της χλωροφύλλης είναι η χλωροφύλλη 'b' που βρίσκεται στα βρύα, στα πράσινα φύκη, στα σπερματοφύτα και στις πτέριδες. Η αναλογία της χλωροφύλλης 'a' ως προς την 'b' είναι συνήθως 3:1 στους φυτικούς οργανισμούς. Οι χλωροφύλλες 'c' και 'd' βρίσκονται σε ορισμένα είδη φυκιών, αντί για τη χλωροφύλλη 'b', ενώ στα ανοξυγονικά φωτοσυνθετικά βακτήρια απαντώνται ειδικές μορφές χλωροφύλλης, οι βακτηριοχλωροφύλλες (Μανέτας κ.ά., 2015). Οι διάφορες μορφές χλωροφύλλης a, b, c έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά απορρόφησης με κάποιες διαφορές στα σημεία μέγιστης απορρόφησης (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Οι διάφορες μορφές χλωροφύλλης (a,b,c) απορροφούν ελαφρώς διαφορετικά μήκη κύματος (Πηγή: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/algae-phytoplankton-chlorophyll/>)

Η χλωροφύλλη-a συμβάλλει στην εκτίμηση της βιομάζας του φυτοπλαγκτού σε μία θαλάσσια περιοχή, αφού μπορεί να σχετίζεται γραμμικά με εκείνη, καθώς και με την ηλικία των κοινοτήτων άλγης και την τροφοδοσία των κυττάρων σε θρεπτικά συστατικά (Πατελάκη, 2015 όπως αναφέρουν οι Thiemann, et al., 2000). Επιπλέον, αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-a αποτελεί επίδραση του ευτροφισμού των υδάτων και, συνεπώς, η χλωροφύλλη-a είναι δείκτης ρύπανσης ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος (Βρυώνης, 2013, όπως αναφέρουν οι Jorgensen & Richardson, 1996).

2.3.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί το μέτρο της μέσης τιμής της κινητικής ενέργειας των μορίων του νερού και, συνεπώς, υπεισέρχεται σε όλες τις βιοχημικές και τις φυσικοχημικές αντιδράσεις.

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα διεξαγωγής των βιοχημικών αντιδράσεων, ενώ επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και ο πολλαπλασιασμός των μικροοργανισμών (Νταρακάς, 2010).

Η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Temperature-SST) είναι η θερμοκρασία του κορυφαίου χιλιοστού της επιφάνειας του ωκεανού. Όπως η επιφάνεια της γης, οι θερμοκρασίες της θάλασσας είναι θερμότερες κοντά στον ισημερινό και ψυχρότερες κοντά στους πόλους. Τα ρεύματα κινούν ζεστό και κρύο νερό γύρω από τους ωκεανούς του κόσμου (NASA, 2017).

Η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας είναι σημαντική για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης των ωκεανών με την ατμόσφαιρα της Γης. Παρέχει βασικές πληροφορίες για το παγκόσμιο κλιματικό σύστημα και αποτελεί βασική παράμετρο στην πρόβλεψη καιρού και την προσομοίωση των ατμοσφαιρικών μοντέλων. Ακόμη, είναι σημαντική για τη μελέτη των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας συμβάλλουν θετικά σε ένα ευρύ φάσμα επιχειρησιακών εφαρμογών, όπως η κλιματική και εποχιακή παρακολούθηση / πρόβλεψη, οι στρατιωτικές αμυντικές επιχειρήσεις, η παρακολούθηση των θαλάσσιων χελωνών, ο τουρισμός και η εμπορική διαχείριση της αλιείας (NOAA, 2016).

2.3.3 Διαλυμένο Οξυγόνο (Dissolved Oxygen, DO)

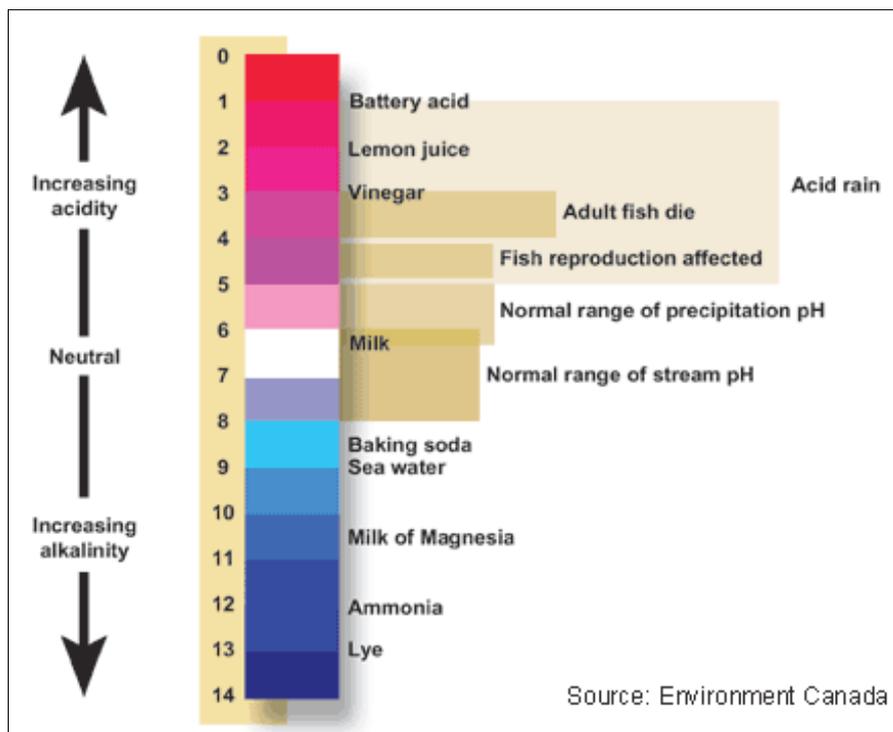
Η ύπαρξη του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό είναι ζωτικής σημασίας για τους υδρόβιους οργανισμούς, καθώς είναι απαραίτητο για την αναπνοή και την οξείδωση οργανικών ουσιών. Η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου στα επιφανειακά ύδατα εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες. Αυτοί είναι η θερμοκρασία, η ποσότητα που καταναλώνεται από τους υδρόβιους οργανισμούς, η ποσότητα που προκύπτει από την φωτοσύνθεση, η ποσότητα των ιζημάτων, η ταχύτητα ροής του νερού και ο αερισμός του. Η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου μετράται σε mg/l ή σε ppm (Βασιλάτος, 2010).

Το διαλυμένο οξυγόνο είναι πολύ σημαντικό για την επιβίωση και τη σταθερότητα των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Οι μειωμένες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου έχουν αρνητικές συνέπειες στους παγκόσμιους βιογεωχημικούς κύκλους, τους θαλάσσιους οικοτόπους και τους οργανισμούς. Οι ποσότητες νερού με συγκεντρώσεις οξυγόνου μικρότερες από 2 mg/L είναι υποξικές και θεωρούνται ανοξικές όταν οι συγκεντρώσεις φθάσουν τα 0 mg/L. Οι ανοξικές περιοχές αναφέρονται ως «νεκρές ζώνες», οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στα παράκτια ύδατα λόγω του μικρού βάθους των υδάτων, της αφθονίας των βιολογικών οργανισμών και την επαφή με τη γη (Ganoe and DeYoung, 2013 όπως αναφέρουν οι Dybas, Cheryl, 2005).

2.3.4 pH

Το pH είναι ένα μέτρο της οξύτητας ή της αλκαλικότητας μιας ουσίας και είναι μία από τις σταθερές μετρήσεις στο θαλασσινό νερό. Σύμφωνα με τον Βρυώνη (2013 όπως αναφέρουν οι Goldman & Horne, 1994 και Dodson, 2005): «Το pH ορίζεται ως ο αρνητικός λογάριθμος της

συγκέντρωσης του ιόντος υδρογόνου, με την οξύτητα να κυμαίνεται από το 0 έως το 7 και την αλκαλικότητα να κυμαίνεται από το 7 έως το 14. Δηλαδή, $pH = -\log[H^+]$ » (σελ. 13-14).



Εικόνα 4: Η κλίμακα pH (Πηγή: USGS, <https://water.usgs.gov/edu/ph.html>)

Το pH επηρεάζει σημαντικά πολλές βιολογικές και χημικές αντιδράσεις, καθώς επίσης και βιοχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε ουδέτερο pH (pH=7), ενώ συχνά αποτελεί δείκτη ρύπανσης. Αντίθετα, επηρεάζεται από (Νταρακάς, 2010):

- Τη θερμοκρασία
- Την αλατότητα (παρουσία ανιόντων θείου, χλωρίου κ.ά., κατιόντων ασβεστίου, μαγνησίου κ.ά.)
- Τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου
- Τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή)
- Την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών

Περιβάλλοντα με πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές τιμές pH καθιστούν δύσκολη, έως αδύνατη, την πορεία των αντιδράσεων (Νταρακάς, 2010). Το νερό του ωκεανού έχει ένα εξαιρετικό σύστημα ρύθμισης με την αλληλεπίδραση διοξειδίου του άνθρακα και νερού, έτσι ώστε το pH των ωκεανών να είναι ελαφρώς βασικό με μέσο όρο περίπου 8.2 τα τελευταία 300 εκατομμύρια χρόνια. Σήμερα, είναι περίπου 8.1, και η μείωσή του αντιπροσωπεύει μια αύξηση κατά 25 τοις εκατό της οξύτητας τους τελευταίους δύο αιώνες (National Geographic, 2015-2017).

2.3.5 Αγωγιμότητα (Conductivity, Conduct)

Η αγωγιμότητα αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Εξαρτάται από τους εξής παράγοντες: α) την παρουσία και την συγκέντρωση ιόντων, β) την ευκινησία των ιόντων και το σθένος τους και γ) τη θερμοκρασία του διαλύματος

(Νταρακάς, 2010). Η μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας είναι το mho/cm, ή το Siemens/cm (S/cm), με υποδιαιρέσεις: το microSiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$) ίσο με 10^{-6} S/cm και το milliSiemens/cm (mS/cm) ίσο με 10^{-3} S/cm. Οι τιμές της σχετίζονται με την ποιότητα των υδάτων, καθώς απότομη αύξηση της αγωγιμότητας αποτελεί ένδειξη ρύπανσης (Νταρακάς, 2010).

2.3.6 Ολικός Φώσφορος (Total phosphorus, TP)

Πρόκειται για το σύνολο του οργανικού και του ανόργανου, καθώς και του διαλυμένου σωματιδιακού φωσφόρου (Νταρακάς, 2010). Αποτελεί ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών οργανισμών, αφού αποτελεί δομικό συστατικό πολλών βιολογικών μακρομορίων. Ο φώσφορος σχηματίζει διαλυτές ενώσεις, οι βασικές μορφές των οποίων είναι τα ανόργανα φωσφορικά άλατα. Συγκεκριμένα, το 87% του θαλάσσιου νερού αποτελείται από μονόξινα φωσφορικά, το 12% από φωσφορικά άλατα, ενώ το υπόλοιπο 1% από δισόξινα φωσφορικά άλατα (Δασενάκης, 2015, όπως αναφέρουν οι Benitz-Nelson 2000, Jackson and Williams 1985, Hensen et al 2006).

2.3.7 Θρεπτικά Συστατικά

Πρόκειται κυρίως για ανόργανες, αλλά και οργανικές ενώσεις, με τις οποίες τρέφονται οι φυτικοί οργανισμοί, το φυτοπλαγκτόν και τα μακρόφυτα. Ανόργανα θρεπτικά συστατικά είναι οι ενώσεις του αζώτου (νιτρικά, άλατα, νιτρώδη, αμμωνιακά ιόντα), που αποτελούν, στην πλειοψηφία τους, θρεπτικά στοιχεία του φυτοπλαγκτού. Σε υδάτινο περιβάλλον το μοριακό άζωτο (N_2) αποτελεί την κύρια μορφή του στοιχείου, όμως στις βιολογικές διεργασίες συμμετέχει είτε ως ένωση νιτρικών ιόντων (NO_3^-) ή νιτρωδών (NO_2^-) ή αμμωνιακών (NH_4^+), είτε ως οργανικό άζωτο (Δασενάκης, 2015, όπως αναφέρουν οι Σκούλλος 1987, Dugdale and Goering 1967, Yoshinari 2001).

2.4 Μέθοδοι Παρατήρησης της Γης και Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση (remote sensing, teledetection, telerilevamento) αποτελεί μία τεχνική με την οποία είναι εφικτή η απόκτηση πληροφοριών για αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης. Ειδικά όργανα, που δεν βρίσκονται σε φυσική επαφή με τα αντικείμενα σε αντίθεση με τις επιτόπιες παρατηρήσεις και μετρήσεις, συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα. Επομένως, η τηλεπισκόπηση μπορεί να ορισθεί και ως η αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση (Παρχαρίδης, 2015 όπως αναφέρουν οι Avery & Berlin, 1992). Η Αμερικανική Εταιρεία Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης (ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) ορίζει την τηλεπισκόπηση ως: «Η μέτρηση ή συλλογή πληροφοριών για κάποια ιδιότητα ενός αντικειμένου ή φαινομένου μέσω κάποιου οργάνου καταγραφής το οποίο δε βρίσκεται σε άμεση επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο ή φαινόμενο» (Parageorgiou, 2016 όπως αναφέρει ο Colwell, 1983) (σελ. 13).

Η τηλεπισκόπηση βασίζεται στην ικανότητα των αντικειμένων να ανακλούν και να εκπέμπουν ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος, ανάλογα με τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και τη σύστασή τους. Η ποσότητα και η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας ενός αντικειμένου (φασματική ταυτότητα - spectral signature ή φασματική απόκριση - spectral response) χρησιμεύουν ως μέσα αναγνώρισής του και καταγράφονται από τους δορυφορικούς δέκτες (sensors) που βρίσκονται σε τροχιά παρατήρησης της Γης (Παρχαρίδης, 2015 όπως αναφέρουν οι Campbell 1996, Sabins 1997, Mather 1999). Η μελέτη της συμπεριφοράς των διαφόρων αντικειμένων στην ανάκλαση και την εκπομπή της ακτινοβολίας συμβάλλει στην επιλογή των κατάλληλων δεκτών και φασματικών ζωνών προκειμένου να είναι ευκολότερος ο εντοπισμός των υπό μελέτη αντικειμένων και των ιδιοτήτων τους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πληροφορία που συλλέγεται με τις μεθόδους της τηλεπισκόπησης επηρεάζεται από τις επιδράσεις με την ύλη (απορρόφηση, ανάκλαση, διάχυση) και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (Παρχαρίδης, 2015).

Τα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης της ακτινοβολίας, ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης, από απόσταση και των ανακλώμενων ακουστικών κυμάτων από αντικείμενα που βρίσκονται κάτω από υδάτινες μάζες καλούνται απομακρυσμένοι αισθητήρες (remote sensors) (Παρχαρίδης, 2015 όπως αναφέρουν οι Avery & Berlin, 1992).

Η ψηφιακή τηλεπισκόπηση έχει εφαρμογές σε πολλά ερευνητικά πεδία, όπως είναι η γεωργία, η γεωλογία, η αρχαιολογία, η διαχείριση των κινδύνων, η αστική δόμηση, το περιβάλλον, η ωκεανογραφία, που δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης και αντιμετώπισης ραγδαίων μεταβολών. Η πλειοψηφία των εφαρμογών αυτών χρειάζονται δεδομένα από διαφορετικές φασματικές περιοχές (πολυφασματική/multispectral-multiband), τα οποία λαμβάνονται είτε από διαφορετικούς αισθητήρες (πολυαισθητήρες/multisensor) είτε από έναν μεμονωμένο αισθητήρα που λειτουργεί παράλληλα σε διαφορετικές φασματικές περιοχές (multispectral ή multiband sensor) (Παρχαρίδης, 2015).

2.4.1 Ο Δέκτης MODIS

Ο δέκτης MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) αποτελεί ένα όργανο-κλειδί για τους δορυφόρους Terra (γνωστό ως EOS AM-1) και Aqua (γνωστό ως EOS PM-1). Το πρώτο όργανο πτήσης MODIS, ProtoFlight Model ή PFM, είναι ενσωματωμένο στο διαστημικό σκάφος Terra (EOS AM-1). Το Terra εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 18 Δεκεμβρίου 1999. Το δεύτερο όργανο πτήσης MODIS, Flight Model 1 ή FM1, είναι ενσωματωμένο στο διαστημικό σκάφος Aqua (EOS PM-1). Εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 4 Μαΐου 2002. Αυτά τα όργανα προσφέρουν μια πρωτοφανή ματιά στην επίγεια, ατμοσφαιρική και ωκεάνια φαινομενολογία για μια ευρεία και ποικίλη κοινότητα χρηστών σε όλο τον κόσμο (NASA, 2017).

Η τροχιά του Terra γύρω από την Γη χρονομετρείται με τέτοιο τρόπο ώστε να περνάει από το Νότο στο Βορρά κατά μήκος του Ισημερινού το πρωί, ενώ ο δορυφόρος Aqua περνάει από το Νότο στο Βορρά πάνω από τον Ισημερινό το απόγευμα. Οι δορυφόροι Terra και Aqua παρέχουν ολοκληρωμένη κάλυψη της επιφάνειας της Γης κάθε μία (1) με δύο (2) ημέρες, λαμβάνοντας

δεδομένα σε τριάντα έξι (36) φασματικά κανάλια, ή ομάδες μηκών κύματος. Το όργανο MODIS παρέχει υψηλή ραδιομετρική ευαισθησία (12bit) σε τριάντα έξι (36) φασματικά κανάλια που κυμαίνονται σε μήκη κύματος από 0.4 μm έως 14.4 μm, όπως φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακας 2 και Πίνακας 3). Τα δεδομένα αυτά θα βελτιώσουν την κατανόηση των παγκόσμιων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη γη, στους ωκεανούς και στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Ο MODIS διαδραματίζει ένα ζωτικής σημασίας ρόλο στην ανάπτυξη παγκόσμιων, διαδραστικών μοντέλων ικανών να προβλέψουν την κλιματική αλλαγή με ακρίβεια ώστε να βοηθήσουν τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής να λαμβάνουν σωστές αποφάσεις σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος (NASA, 2017).

Πίνακας 2: Τεχνικές Προδιαγραφές του δέκτη MODIS (EARTHDATA, 2017)

Orbit:	705 km, 10:30am descending node (Terra) or 1:30p.m. ascending node (Aqua), sun-synchronous, near-polar, circular
Repeat Cycle:	16 days
Swath Dimensions:	2330km (cross track) by 10km (along track at nadir)
Weight:	228.7kg
Spatial Resolution:	250m (bands 1-2) 500m (bands 3-7) 1000m (bands 8-36)
Data Rate:	10.6 Mbs/sec
Quantization:	12 bits
Field of View:	110 deg
Wavebands:	36 bands: 1-19 from 620 to 965nm 20-36 from 3.66 to 14.28 microns
Design Life:	6 years
Duration:	Operational

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα κανάλια του MODIS με τα μήκη κύματος που τους αντιστοιχούν, καθώς και η εφαρμογή τους. Παρατηρείται ότι τα κανάλια 8-16 χρησιμοποιούνται για εφαρμογές στα ωκεάνια ύδατα.

Πίνακας 3: Κανάλια MODIS (EARTHDATA, 2017)

Primary Use	Band	Bandwidth	Spectral Radiance	Required SNR
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	274
	7	2105 - 2155	1.0	110
Ocean Color/Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	438 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910

	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Atmospheric Water Vapor	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250
Primary Use	Band	Bandwidth	Spectral Radiance	Required NE[delta]T(K)
Surface/Cloud Temperature	20	3.660 - 3.840	0.45 (300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38 (335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67 (300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79 (300K)	0.07
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498	0.17 (250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59 (275K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16 (240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18 (250K)	0.25
Cloud Properties	29	8.400 - 8.700	9.58 (300K)	0.05
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69 (250K)	0.25
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55 (300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94 (300K)	0.05
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485	4.52 (260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76 (250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11 (240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08 (220K)	0.35

Ο δορυφόρος Terra (EOS/AM-1)

Ο δορυφόρος Terra (παλαιότερα γνωστός ως EOS / AM-1) είναι μια αποστολή παρατήρησης της γης στο πρόγραμμα ESE (Earth Science Enterprise) της NASA μεταξύ των Ηνωμένων Πολιτειών, της Ιαπωνίας και του Καναδά. Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής παρείχαν το διαστημικό σκάφος, την εκτόξευση και τρία όργανα που ανέπτυξε η NASA (CERES, MISR, MODIS). Η Ιαπωνία παρείχε τον ASTER και ο Καναδάς το MOPITT. Το διαστημικό σκάφος Terra θεωρείται η ναυαρχίδα του προγράμματος EOS (Earth Observing Satellite) της NASA. Τον Φεβρουάριο του 1999, ο δορυφόρος EOS / AM-1 μετονομάστηκε από τη NASA σε "Terra" (NASA, 2017).

Στόχος της αποστολής είναι η απόκτηση πληροφοριών σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες και την ακτινοβολία των σύννεφων (ASTER, CERES, MISR, MODIS), μετρήσεις αερίων ιχνών (MOPITT), την ηφαιστειότητα (ASTER, MISR, MODIS), ανταλλαγές ενέργειας, άνθρακα και νερού μεταξύ αέρα - γης και αέρα - θάλασσας (ASTER, MISR, MODIS). Οι επιστημονικοί στόχοι είναι (NASA, 2017):

1. Να παράσχει τις πρώτες παγκόσμιες και εποχιακές μετρήσεις του Γήινου συστήματος, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών λειτουργιών όπως η βιολογική παραγωγικότητα της γης και των ωκεανών, το χιόνι και ο πάγος, η θερμοκρασία της επιφάνειας, τα σύννεφα, οι υδρατμοί και η κάλυψη της γης.
2. Να βελτιωθεί η ικανότητα ανίχνευσης των ανθρωπίνων επιπτώσεων στο σύστημα και το κλίμα της Γης, να προσδιοριστεί το "δακτυλικό αποτύπωμα" της ανθρώπινης δραστηριότητας στο κλίμα και να προβλεφθεί η κλιματική αλλαγή χρησιμοποιώντας τις νέες παγκόσμιες παρατηρήσεις στα κλιματικά μοντέλα.
3. Να συμβάλει στην ανάπτυξη τεχνολογιών για την πρόβλεψη των καταστροφών, το χαρακτηρισμό και τη μείωση του κινδύνου από πυρκαγιές, ηφαίστεια, πλημμύρες και ξηρασίες.
4. Να αρχίσει μακροπρόθεσμα παρακολούθηση της αλλαγής του κλίματος και των περιβαλλοντικών αλλαγών.

Τα δεδομένα του Terra, σε συνδυασμό με μετρήσεις εδάφους και αεροσκαφών, θα επιτρέψουν στους επιστήμονες να κάνουν διάκριση μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών αλλαγών.

Ο δορυφόρος Aqua MODIS (EOS/PM-1)

Η αποστολή του Aqua αποτελεί μέρος του Διεθνούς Συστήματος Παρακολούθησης της Γης (NASA's international Earth Observing System-EOS) της NASA. Ο Aqua ονομαζόταν στο παρελθόν EOS / PM-1, υποδηλώνοντας τον απογευματινό ισημερινό χρόνο διασταύρωσης (afternoon equatorial crossing time). Η NASA μετονόμασε τον δορυφόρο EOS / PM-1 σε Aqua στις 18 Οκτωβρίου 1999.



Εικόνα 5: Ο δορυφόρος Aqua (Πηγή: NASA)

Η αποστολή του Aqua αποτελεί μέρος του προγράμματος ESE (Earth Science Enterprise) της NASA (NASA, 2017 όπως αναφέρει ο C. L. Parkinson, 2003).

Το επίκεντρο της αποστολής του δορυφόρου Aqua είναι η πολυεπιστημονική μελέτη του υδάτινου κύκλου της γης, συμπεριλαμβανομένων των αλληλένδετων διεργασιών (ατμόσφαιρα, ωκεανοί και επιφάνεια της γης), και η σχέση τους με τις αλλαγές του συστήματος της γης. Τα σύνολα δεδομένων του Aqua παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το σχηματισμό σύννεφων, τις βροχοπτώσεις και τις ακτινοβολίες, τις ροές αέριας-θαλάσσιας ενέργειας, τον άνθρακα, και την υγρασία (AIRS, AMSU, AMSR-E, HSB, CERES, MODIS), καθώς και τις συγκεντρώσεις θαλάσσιου πάγου και τις εκτάσεις του (AMSR-E) (NASA, 2017).

2.4.2 Ο Δέκτης Sentinel-3

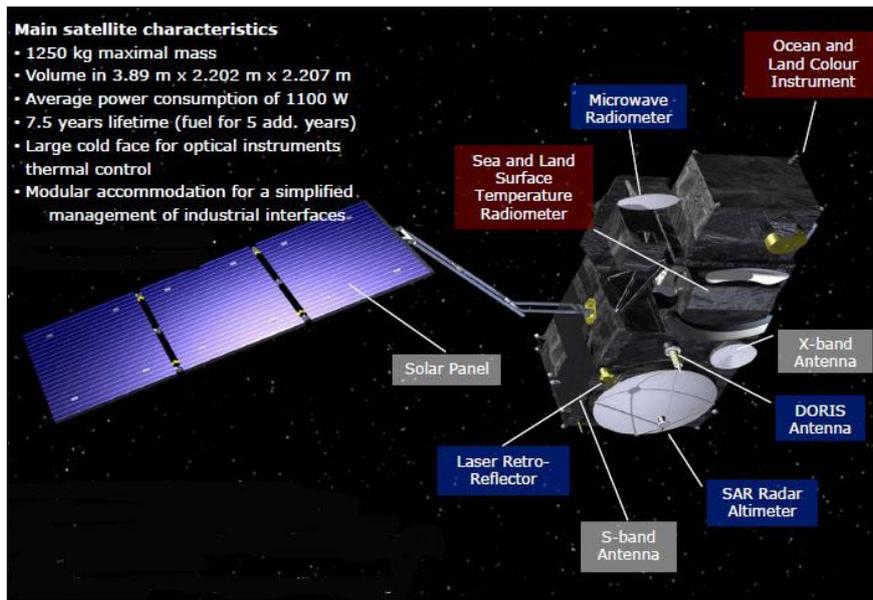
Ο Sentinel-3 είναι ένας δορυφόρος του Copernicus που παρέχει μια ποικιλία ποιοτικών μετρήσεων ωκεανού. Η αποστολή του Sentinel-3 λειτουργεί από κοινού από την ESA και την EUMETSAT για την παροχή επιχειρησιακών υπηρεσιών παρατήρησης των ωκεανών και της ξηράς. Ο κύριος στόχος της αποστολής του Sentinel-3 είναι η μέτρηση της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας, της θερμοκρασίας της θαλάσσιας επιφάνειας και της επιφάνειας της γης, καθώς και του χρώματος της επιφάνειας των ωκεανών και της γης με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία, ώστε να στηριχθούν τα συστήματα πρόβλεψης των ωκεανών και παρακολούθησης του περιβάλλοντος και του κλίματος (EESA, 2000-2017). Παρέχει δεδομένα παγκόσμιας κάλυψης δύο ημερών (με δύο δορυφόρους) για εφαρμογές στη θάλασσα και στη γη με προϊόντα σε πραγματικό χρόνο που παραδίδονται σε λιγότερο από τρεις ώρες (EUMETSAT, 2017).

Οι προϋποθέσεις της αποστολής περιλαμβάνουν:

- Την τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) και το σημαντικό ύψος κύματος (SWH) στον παγκόσμιο ωκεανό με ακρίβεια που υπερβαίνει εκείνη του Envisat RA-2.
- Η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (SST) προσδιορίζεται συνολικά με ισοδύναμη ακρίβεια όπως αυτή που επιτυγχάνεται επί του παρόντος από τα A / ATSR (δηλ. <0,3 K), σε χωρική ανάλυση 1 km.
- Ορατές και θερμικές υπέρυθρες ακτινοβολίες (Ocean Color) για τα ωκεάνια και τα παράκτια ύδατα, που καθορίστηκαν σε ένα ισοδύναμο επίπεδο ακρίβειας όπως τα δεδομένα MERIS με πλήρη κάλυψη της Γης σε διάστημα δύο έως τριών ημερών, και καταχωρήθηκαν μαζί με μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (SST).

Ο πρώτος δορυφόρος Sentinel-3 (Sentinel-3a) εκτοξεύθηκε από το Plesetsk Cosmodrome, στη Ρωσία, στις 16 Φεβρουαρίου 2016. Το δεύτερο διαστημικό σκάφος Sentinel-3b εκτοξεύθηκε το 2017, και θα συνεργαστεί με τον πρώτο δορυφόρο για να προσφέρει τη μέγιστη κάλυψη (EUMETSAT, 2017).

Ο Sentinel-3 φέρει διαφορετικούς αισθητήρες, τρεις από τους οποίους χρησιμοποιεί η EUMETSAT για να συλλέξει και να παρέχει δεδομένα. Αυτοί είναι ο OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), ο SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) και ο SRAL (Synthetic Aperture Radar Altimeter).



Εικόνα 6: Ο δορυφόρος Sentinel-3 (Πηγή: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Sentinel3/Sentinel3Design/index.html>)

Το όργανο μετρήσεων του χρώματος των ωκεανών και της γης (OLCI)

Το όργανο OLCI παρατηρεί σε 21 στενά φασματικά κανάλια του ορατού και εγγύς υπέρυθρου φάσματος σε ανάλυση 300 m. Με πλάτος της τάξης των 1270 km και πέντε κεκλιμένες κάμερες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ειδικά για να μειώσουν την ηλιακή αντανάκλαση, το όργανο μετρήσεων του χρώματος των ωκεανών και της γης προσφέρει βελτιωμένη παγκόσμια κάλυψη του ωκεάνιου χρώματος - σε λιγότερο από δύο ημέρες με δύο δορυφόρους Sentinel-3 σε λειτουργία. Επεκτείνει τις μετρήσεις μέσης ανάλυσης των ωκεανών που συλλέγονται από το όργανο MERIS της Envisat (2002-2012) (EUMETSAT, 2017).

Η παρατήρηση του OLCI εκτελείται ταυτόχρονα σε 21 φασματικές ζώνες, που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4), οι οποίες κυμαίνονται από το ορατό έως το εγγύς υπέρυθρο (400 nm έως 1020 nm). Κάθε μία από αυτές τις ζώνες είναι προγραμματιζόμενη σε θέση και πλάτος (EESA, 2000-2017).

Πίνακας 4: Τα κανάλια του OLCI (EESA, 2000-2017)

Band	λ centre (nm)	Width (nm)	Function
Oa1	400	15	Aerosol correction, improved water constituent retrieval
Oa2	412.5	10	Yellow substance and detrital pigments (turbidity)
Oa3	442.5	10	Chl absorption max., biogeochemistry, vegetation
Oa4	490	10	High Chl, other pigments
Oa5	510	10	Chl, sediment, turbidity, red tide
Oa6	560	10	Chlorophyll reference (Chl minimum)
Oa7	620	10	Sediment loading
Oa8	665	10	Chl (2nd Chl abs. max.), sediment, yellow substance/vegetation
Oa9	673.75	7.5	For improved fluorescence retrieval and to better account for smile together with the bands 665 and 680 nm

Oa10	681.25	7.5	Chl fluorescence peak, red edge
Oa11	708.75	10	Chl fluorescence baseline, red edge transition
Oa12	753.75	7.5	O2 absorption/clouds, vegetation
Oa13	761.25	2.5	O2 absorption band/aerosol corr.
Oa14	764.375	3.75	Atmospheric correction
Oa15	767.5	2.5	O2A used for cloud top pressure, fluorescence over land
Oa16	778.75	15	Atmos. corr./aerosol corr.
Oa17	865	20	Atmos. corr./aerosol corr., clouds, pixel co-registration
Oa18	885	10	Water vapour absorption reference band. Common reference band with SLSTR instrument. Vegetation monitoring
Oa19	900	10	Water vapour absorption/vegetation monitoring (max. reflectance)
Oa20	940	20	Water vapour absorption, atmos./aerosol corr.
Oa21	1020	40	Atmos./aerosol corr.

Τα κανάλια του OLCI βασίζονται σε εκείνα του δορυφόρου MERIS, όμως έχουν βελτιστοποιηθεί για να μετρήσουν το χρώμα των ωκεανών σε ανοιχτές ωκεάνιες και παράκτιες ζώνες. Συγκεκριμένα, έχει συμπεριληφθεί ένα νέο κανάλι στα 1,02 μm για τη βελτίωση των δυνατοτήτων της ατμοσφαιρικής διόρθωσης και της διόρθωσης των αερολυμάτων. Δύο επιπλέον κανάλια στη γραμμή απορρόφησης O₂A (764,4 nm και 767,5 nm, επιπλέον του υπάρχοντος καναλιού στα 761,25 nm) περιλαμβάνονται για τη βελτίωση της κορυφαίας πίεσης νέφους (ύψος), με ένα επιπλέον κανάλι στα 940 nm στην περιοχή απορρόφησης H₂O, για τη βελτίωση της ανάκτησης ατμών. Ακόμη, έχει προστεθεί ένα κανάλι στα 673 nm για μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης (EESA, 2000-2017). Τα κανάλια αυτά απεικονίζονται με κίτρινο χρώμα στην Εικόνα 7.

Band #	λ center	Width	Lmin	Lref	Lsat	SNR@Lref
	nm	nm	W/(m ² .sr.μm)	W/(m ² .sr.μm)	W/(m ² .sr.μm)	
Oa1	400	15	21.60	62.95	413.5	2188
Oa2	412.5	10	25.93	74.14	501.3	2061
Oa3	442.5	10	23.96	65.61	466.1	1811
Oa4	490	10	19.78	51.21	483.3	1541
Oa5	510	10	17.45	44.39	449.6	1488
Oa6	560	10	12.73	31.49	524.5	1280
Oa7	620	10	8.86	21.14	397.9	997
Oa8	665	10	7.12	16.38	364.9	883
Oa9	673.75	7.5	6.87	15.70	443.1	707
Oa10	681.25	7.5	6.65	15.11	350.3	745
Oa11	708.75	10	5.66	12.73	332.4	785
Oa12	753.75	7.5	4.70	10.33	377.7	605
Oa13	761.25	2.5	2.53	6.09	369.5	232
Oa14	764.375	3.75	3.00	7.13	373.4	305
Oa15	767.5	2.5	3.27	7.58	250.0	330
Oa16	778.75	15	4.22	9.18	277.5	812
Oa17	865	20	2.88	6.17	229.5	666
Oa18	885	10	2.80	6.00	281.0	395
Oa19	900	10	2.05	4.73	237.6	308
Oa20	940	20	0.94	2.39	171.7	203
Oa21	1020	40	1.81	3.86	163.7	152

Εικόνα 7: Τα κανάλια του OLCI. Με γαλάζιο χρώμα είναι τα κανάλια από τον δορυφόρο MERIS, ενώ με κίτρινο χρώμα είναι τα επιπρόσθετα κανάλια (EESA, 2000-2017).

Το ραδιόμετρο θερμοκρασίας των ωκεανών και της γης (SLSTR)

Το SLSTR, με εννιά κανάλια, έχει ανάλυση 500 m στην ορατή και στην μέση υπέρυθρη ακτινοβολία (visible and shortwave infrared) και 1 km στο θερμικό υπέρυθρο και περιλαμβάνει δύο κανάλια βελτιστοποιημένα για την παρακολούθηση της πυρκαγιάς. Συνεχίζει και βελτιώνει περαιτέρω την καταγραφή της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας που συλλέγεται από τα όργανα AATSR, τα οποία μεταφέρονται στους δορυφόρους ERS και Envisat. Στόχος είναι να συγκεντρωθούν μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας για την παροχή ενός συνόλου δεδομένων αναφοράς για άλλες αποστολές που αφορούν μετρήσεις της θερμοκρασίας της θαλάσσιας επιφάνειας σε άλλους δορυφόρους. Ο σχεδιασμός του SLSTR έχει βελτιωθεί από τα προηγούμενα όργανα AATSR, ώστε να περιλαμβάνει μία ευρύτερη ζώνη της τάξης των 1400 km στην προβολή του ναδίρ και 740 km στη διπλή όψη. Πέρα από την παρακολούθηση της θερμοκρασίας της θαλάσσιας επιφάνειας (SST), το όργανο παρακολουθεί επίσης τη θερμοκρασία πάγου της θάλασσας και της γης, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα και τις ιδιότητες του νέφους, καθώς και τις πυρκαγιές (EUMETSAT, 2017).

Το αλτίμετρο ραντάρ συνθετικής διάταξης (SRAL)

Το διπλής συχνότητας αλτίμετρο ραντάρ συνθετικής διάταξης (SRAL) στον Sentinel-3 παρέχει μετρήσεις της τοπογραφίας της θαλάσσιας επιφάνειας σε λειτουργία SAR δηλαδή με χωρική ανάλυση τόσο στενή όσο 300 m. Το όργανο SRAL υποστηρίζεται από ένα ραδιόμετρο μικροκυμάτων για ατμοσφαιρική διόρθωση και από έναν δέκτη DORIS, το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (Global Navigation Satellite System) και αναδρομικό ανακλαστήρα λέιζερ για τον προσδιορισμό της θέσης του στο διάστημα με ακρίβεια και του ανακλαστήρα λέιζερ (laser retroreflector) για να καθορίσει τη θέση του στο χώρο με μεγάλη ακρίβεια. Το όργανο αυτό χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας και των λιμνών, του σημαντικού ύψους κύματος, της ταχύτητας του ανέμου της επιφανείας, καθώς επίσης και του ύψους και του πάχους του θαλάσσιου πάγου (EUMETSAT, 2017).

2.5 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες

Οι τεχνικές της Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης έχουν χρησιμοποιηθεί διεθνώς σε εφαρμογές για την εκτίμηση της ποιότητας του νερού. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλοί δορυφορικοί δέκτες και αλγόριθμοι για την παρακολούθηση υδάτων κάθε κατηγορίας, συγκεκριμένα, αλμυρών υδάτων, γλυκών ή υφάλμυρων, καθώς και των διάφορων ειδών των ταμιευτήρων, δηλαδή λίμνες, ποτάμια και φράγματα, ακόμα και θαλάσσια και ωκεάνια τμήματα. Η κάθε κατηγορία υδάτων έχει διαφορετικά οπτικά χαρακτηριστικά λόγω της διαφορετικής σύνθεσης, συνεπώς, δεν είναι εφικτή, προς το παρόν τουλάχιστον, η δημιουργία ενός αλγορίθμου καθολικής χρήσης. Αντιθέτως, κάθε ερευνητική εργασία χρησιμοποιεί διαφορετική προσέγγιση, ωστόσο διεξάγονται έρευνες σε αυτό τον τομέα (Πατελάκη, 2015 όπως αναφέρουν οι Carder et al. 1989, Bukata et al. 1985). Παράλληλα, αναπτύσσονται πολλοί αλγόριθμοι που διαμορφώνονται από αναλυτικά, εμπειρικά και ημι-αναλυτικά μοντέλα, βιο-οπτικούς δείκτες και νευρωνικά δίκτυα. Τα όρια κάθε μαθηματικής προσέγγισης διαφέρουν, αφού η εφαρμογή των εμπειρικών μοντέλων περιορίζεται στα όρια της εκάστοτε περιοχής μελέτης, ενώ οι βιο-οπτικοί αλγόριθμοι μπορεί να έχουν και παγκόσμια εφαρμογή εντός των πλαισίων της κατηγορίας υδάτων που αναφέρονται.

2.5.1 Σχετικές Εργασίες της Βιβλιογραφίας

Η πλειοψηφία των ερευνητικών εργασιών έχουν ως αντικείμενο μελέτης τη χλωροφύλλη, η οποία αποτελεί ένδειξη για το φαινόμενο του ευτροφισμού, των αιωρούμενων στερεών (Total Suspended Solids ή TSS), των έγχρωμων διαλυμένων οργανικών ουσιών και της διαύγειας του νερού μέσω της θολότητας (Turbidity) ή του βάθους του δίσκου Secchi (Secchi Disk Depth ή SDD). Επιπλέον, αντικείμενο μελέτης έχει αποτελέσει και η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (SST).

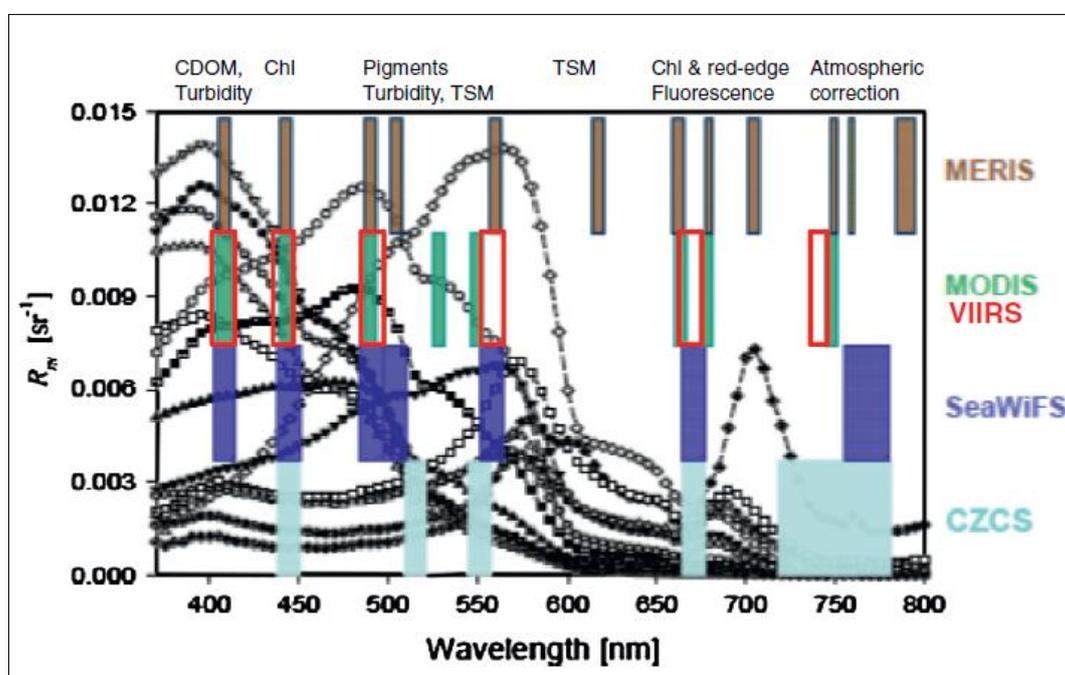
Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τη μπλε, την πράσινη, την κόκκινη και την εγγύς υπέρυθρη ζώνη προκειμένου να εκτιμήσουν τη χλωροφύλλη ή το φυτοπλαγκτόν. Τα κανάλια επιλέγονται ανάλογα με τη μελετώμενη κατηγορία υδάτων. Τα όρια των αλγορίθμων αυτών, καθώς και τα πλεονεκτήματά τους παρουσιάζονται από τους David Blondeau-Patissier et al. (2014).

Οι λόγοι μπλε και πράσινων καναλιών (440-550 nm) προτιμώνται για τα ύδατα της Κατηγορίας I, αφού σε αυτό το εύρος του οπτικού φάσματος εντοπίζεται η μέγιστη απορρόφηση της χλωροφύλλης. Μειονέκτημα της μπλε ζώνης αποτελεί το γεγονός ότι είναι πιο επιρρεπής σε ατμοσφαιρικά σφάλματα (π.χ. απορρόφηση της μπλε ζώνης από τα αερολύματα, Chengfeng Le et al., 2013). Οι John E. O' Reilly et al. (1998) ανέπτυξαν τους εμπειρικούς αλγόριθμους OC1, OC2, OC3, OC4 (Ocean Chlorophyll) για τα δεδομένα του SeaWiFS. Στη συνέχεια ο OC3 προσαρμόστηκε στον δέκτη MODIS καλύπτοντας συγκεντρώσεις από 0,008 έως 90 $\mu\text{g}/\text{l}$ (αλγόριθμος με παγκόσμια εφαρμογή OC3M, Campbell and Feng, 2005a, 2005b).

Σύμφωνα με τους Odermatt et al. (2012) οι αλγόριθμοι εκτίμησης της χλωροφύλλης-α χρησιμοποιούν τέσσερα σημεία στο οπτικό φάσμα. Αυτά είναι τα δύο σημεία μέγιστης απορρόφησης της στα 442 nm (μπλε) και στα 665 nm (κόκκινο), το σημείο εκπομπής φθορισμού στα 681 nm και το σημείο μέγιστης ανακλαστικότητας περίπου στα 700 nm (η οποία

οφείλεται στο ελάχιστο άθροισμα της απορρόφησης της ακτινοβολίας από το νερό, το φυτοπλαγκτόν, τα σωματίδια και τη διαλυμένη ύλη). Το μέγεθος a_{CDOM} (Colored Dissolved Organic Matter-CDOM) υπερκαλύπτει το πρώτο σημείο απορρόφησης (442 nm) και, συνεπώς, χρησιμοποιείται μόνο σε νερά Κατηγορίας I. Το μέγεθος αυτό αποτελεί βασικό κομμάτι στην εκτίμηση της χλωροφύλλης, καθώς προκαλεί ένα «κενό» στο σήμα και, συνεπώς, συχνά εκτιμάται απευθείας η απορρόφηση από την έγχρωμη διαλυμένη οργανική ύλη και όχι η συγκέντρωση της.

Σύμφωνα με τους Blondeau-Patissier et al. (2014) σε οπτικά πολύπλοκα ύδατα της Κατηγορίας II, οι αναλογίες των ζωνών μπλε-πράσινου καθίστανται λιγότερο ευαίσθητες στις μεταβολές των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης α επειδή αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων χρωμάτων οργανικής ύλης (CDOM) και των ολικών αιωρούμενων ουσιών (TSM) (π.χ. Bowers et al. , 1996). Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση φασματικών ζωνών που βρίσκονται στο κόκκινο (620-700 nm) και NIR (> 700 nm) (π.χ., Gitelson et al., 2009) (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Σύγκριση των θέσεων των φασματικών ζωνών για πέντε αισθητήρες μελέτης του χρώματος των ωκεανών της πρώτης (CZCS), δεύτερης (SeaWiFS), τρίτης (MERIS, MODIS) και τέταρτης (VIIRS) γενιάς. (Εικόνα τροποποιημένη από την Εικόνα 1 του Lee et al., 2007) Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν 14 φάσματα ανάκλασης από διάφορα ύδατα σε όλο τον κόσμο, υποδεικνύοντας τις πιθανές εφαρμογές για κάθε φασματική περιοχή (Blondeau-Patissier et al., 2014).

Πολλοί αλγόριθμοι δεν βασίζονται μόνο στην ανάκλαση της ακτινοβολίας, αλλά χρησιμοποιούν και την απορρόφηση της. Δεδομένου ότι η μεταβολή της απορρόφησης είναι ταχύτερη από εκείνη της ανακλαστικότητας, δύο γειτονικά φασματικά κανάλια είναι πιθανό να έχουν ίδιες ανακλαστικές ιδιότητες αλλά θα διαφέρουν στην απορρόφηση (Μουντογιαννάκη, 2015, όπως αναφέρουν οι David Blondeau-Patissier et al., 2014). Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων με εφαρμογή σε θολά νερά είναι ο FLH (Fluorescence Line Height) (Μουντογιαννάκη, 2015, όπως αναφέρουν οι Neville and Gower, 1977) και ο δείκτης FAI (Floating Algae Index) (Μουντογιαννάκη, 2015, όπως αναφέρουν οι Hu et al., 2009, 2010c). Γνωστός δείκτης με

πλήθος εφαρμογών είναι ο MCI (Maximum Chlorophyll Index) για ανίχνευση χλωροφύλλης υψηλής συγκέντρωσης.

Οι Hu et al. (2012) προτείνουν τον εμπειρικό αλγόριθμο CIA για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης α (Chl) στον παγκόσμιο ωκεανό για τιμές χλωροφύλλης $Chl \leq 0,25 \text{ mg m}^{-3}$ (~ 78% της παγκόσμιας ωκεάνιας περιοχής). Ο αλγόριθμος CIA (Color Index Algorithm) είναι ένας αλγόριθμος διαφοράς ανάκλασης τριών ζωνών που χρησιμοποιεί τη διαφορά μεταξύ Rrs στην πράσινη ζώνη και μια αναφορά που σχηματίζεται γραμμικά μεταξύ των Rrs στις μπλε και κόκκινες ζώνες. Για τιμές της χλωροφύλλης $0,25 \text{ mg m}^{-3} \leq chl \leq 0,3 \text{ mg m}^{-3}$ οι Hu et al. (2012) προτείνουν ένα συνδυασμό του CI και του OC3M.

Μία από τις κύριες μεταβλητές που προέρχονται από τις μετρήσεις των υπέρυθρων ζωνών του MODIS είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (SST). Υπάρχουν δύο φασματικά διαστήματα στα οποία η ατμόσφαιρα είναι σχετικά διαφανής, σε μήκη κύματος περίπου 4 και 11 μm . Σύμφωνα με τους Minnett et al. (2004) στα διαστήματα αυτά οι μετρήσεις SST μπορούν να γίνουν σε συνθήκες χωρίς σύννεφα, αν και η μόλυνση των μετρήσεων του μικρότερου μήκους κύματος από το ηλιακό φως που ανακλάται τα περιορίζει στο νυχτερινό τμήμα κάθε τροχιάς. Ο MODIS χρησιμοποιεί πέντε φασματικές ζώνες στα υπέρυθρα ατμοσφαιρικά παράθυρα για να κάνει μετρήσεις από τις οποίες μπορεί να προκύψει η SST. Τα κανάλια 31 και 32 στο παράθυρο του θερμικού υπέρυθρου αντιστοιχούν περίπου στα κανάλια 4 και 5 του AVHRR, ενώ το κανάλι 20 στο παράθυρο μεσαίας υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι παρόμοιο με το κανάλι 3 του AVHRR (Minnett et al. 2004). Ο MODIS διαθέτει δύο επιπλέον, στενές ζώνες στο παράθυρο μεσαίας υπέρυθρης ακτινοβολίας (Ζώνες 22 και 23). Παρόλο που το παράθυρο μεσαίας υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι πιο "καθαρό" από εκείνο της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας, οι μετρήσεις στα βραχύτερα μήκη κύματος είναι επιρρεπείς σε μόλυνση από την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται στην επιφάνεια της θάλασσας (Minnett et al. 2004).

Η ατμοσφαιρική διόρθωση της SST είναι εφικτή με τη χρήση κάποιων αλγορίθμων. Η μορφή του αλγορίθμου ημέρας και νύχτας είναι: $SST = c_1 + c_2 * T_{11} + c_3 * (T_{11} - T_{12}) * T_{sfc} + c_4 * (\sec(z) - 1) * (T_{11} - T_{12})$, όπου T_n είναι θερμοκρασίες φωτεινότητας που μετρούνται στα κανάλια σε «n» μm μήκος κύματος, το T_{sfc} είναι μια «κλιματολογική» εκτίμηση του SST στην περιοχή και το z είναι η ζενίθ δορυφορική γωνία. Αυτό βασίζεται στον μη γραμμικό αλγόριθμο SST (Minnett et al. 2004, όπως αναφέρουν οι Walton et al., 1998).

2.5.2 Πρόσφατες Σχετικές Εργασίες και Αποτελέσματα

Ακολούθως γίνεται αναφορά σε ορισμένες ερευνητικές εργασίες που αξιοποιούν δεδομένα MODIS και Sentinel-3. Το πλήθος των ερευνητικών εργασιών με δεδομένα του Sentinel-3 είναι περιορισμένο λόγω της μικρής χρονικής περιόδου που βρίσκεται εν ενεργεία.

Οι Pieri et al. (2015) αξιολόγησαν τρεις αλγόριθμους για την εκτίμηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης-α στις εικόνες του MODIS στη Δυτική Μεσόγειο Θάλασσα. Ο πρώτος αλγόριθμος (OC3M) εφαρμόζεται συνήθως σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ ο δεύτερος (MedOC3) έχει χρησιμοποιηθεί στη λεκάνη της Μεσογείου. Ο τρίτος αλγόριθμος (SAM_LT) είναι ειδικά σχεδιασμένος για τη θάλασσα της Λιγουρίας (Ligurian Sea) και τη Βόρεια Τυρρηνική θάλασσα

(North Tyrrhenian Sea). Οι τρεις αλγόριθμοι αξιολογήθηκαν μέσω σύγκρισης με 240 δείγματα θαλάσσης (Chl) που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 2002-2011. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι ο OC3M είναι ο πιο ακριβής αλγόριθμος όταν χρησιμοποιείται για ολόκληρη τη Δυτική Μεσόγειο, αλλά ο SAM_LT δίνει καλύτερα αποτελέσματα στην περιοχή όπου αναπτύχθηκε (Εικόνα 9).

Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος OC3M, είναι σχεδιασμένος για δεδομένα MODIS, είναι εμπειρικός και προέρχεται από *in situ* μετρήσεις της χλωροφύλλης και των αναλογιών μπλε / πράσινης ζώνης (Rrs) (O'Reilly et al., 2000). Η αβεβαιότητα του αλγορίθμου OC3M στα ανοικτά θαλάσσια ύδατα είναι $\pm 35\%$, αλλά αυτό παρατηρείται μόνο στις πιο ολιγοτροφικές ζώνες του κόσμου (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Moore et al., 2009), ενώ τα σφάλματα εκτίμησης της χλωροφύλλης μπορεί να αυξηθούν σε οπτικά σύνθετα νερά, όπως είναι τα παράκτια θαλάσσια ύδατα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σημαντική παρουσία άλλων οπτικών συστατικών νερού, τα οποία ποικίλουν ανεξάρτητα από τη χλωροφύλλη, και στην ανακρίβεια των ατμοσφαιρικών μοντέλων που εφαρμόζονται. Ειδικότερα για το τελευταίο αυτό ζήτημα, οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις είναι κρίσιμες για τα θολά θαλάσσια ύδατα και για τις πιο μπλε ζώνες του φάσματος (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Antoine et al., 2008, Goyens et al., 2013).

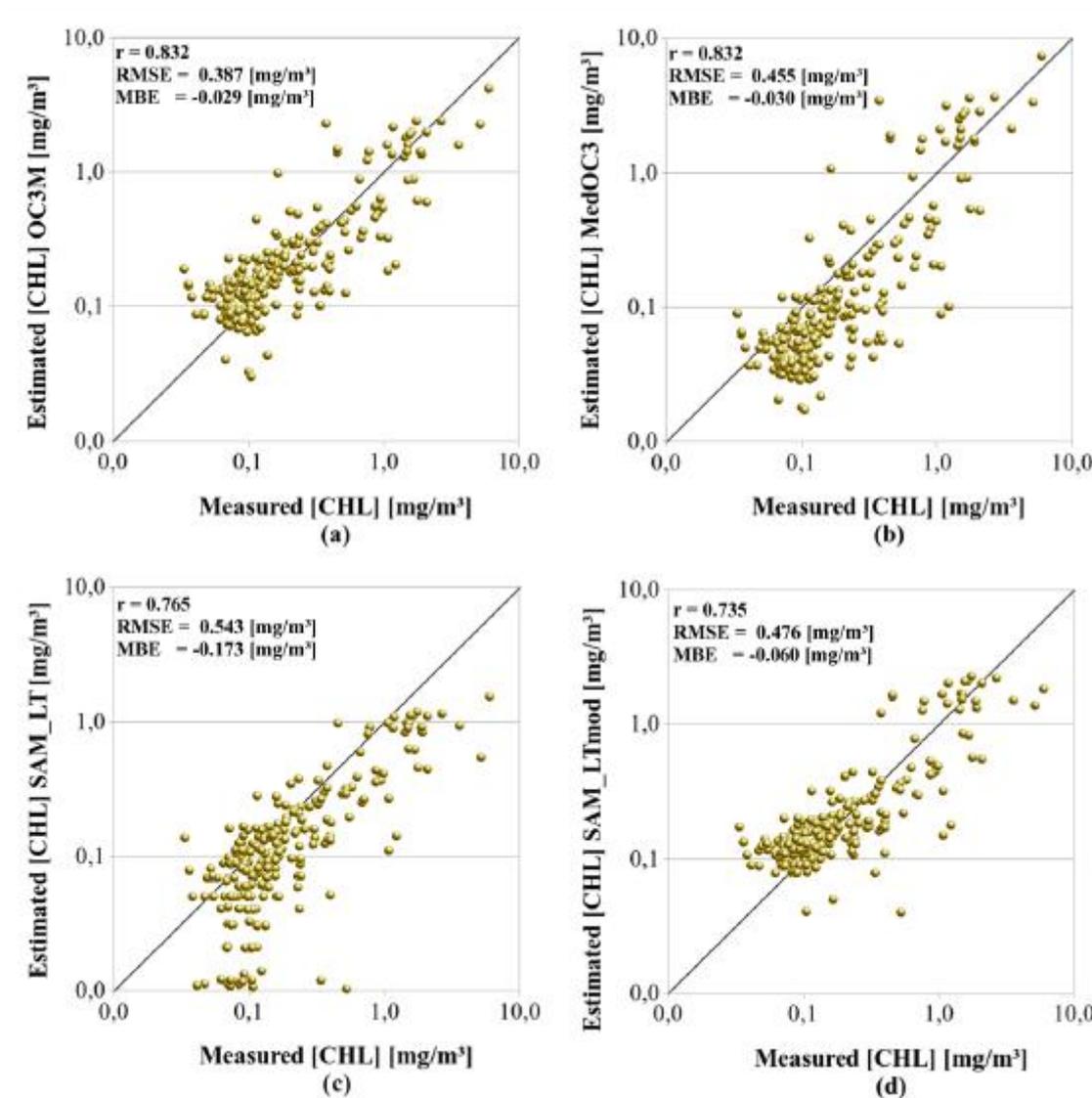
Επιπλέον, η εφαρμογή παγκόσμιων αλγορίθμων μπορεί να μην είναι επαρκής σε ορισμένες θαλάσσιες περιοχές όπως η Βαλτική Θάλασσα, ο Νοτιοδυτικός Ατλαντικός Ωκεανός και η Μεσόγειος Θάλασσα λόγω των διακριτών τους χαρακτηριστικών (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Volpe et al., 2007). Συγκεκριμένα, μια σημαντική υπερεκτίμηση της χλωροφύλλης παρατηρείται συνήθως στη Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία οφείλεται στις ιδιαίτερες οπτικές της ιδιότητες (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Gitelson et al., 1996, Moulin et al., 2001, Claustre et al., 2002, D'Ortenzio et al., 2002). Μεταξύ άλλων, οι Volpe et al. (2007, όπως αναφέρεται από τους Pieri et al., 2015) έδειξαν ότι τα ολιγοτροφικά θαλάσσια ύδατα της Μεσογείου είναι λιγότερο μπλε (30%) και πιο πράσινα (15%) από αυτά του παγκόσμιου ωκεανού. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παρουσία συγκεκριμένων ομάδων φυτοπλαγκτού (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Santoleri et al., 2008) ή σε ασυνήθιστα υψηλά ποσοστά έγχρωμης διαλυμένης οργανικής ύλης (CDOM) από αυτά που παρατηρούνται στον κοντινό Ατλαντικό Ωκεανό στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος και σε παρόμοιες τροφικές συνθήκες (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Morel and Gentili, 2009).

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι ιδιόμορφες οπτικές ιδιότητες της Μεσογείου, έχουν αναπτυχθεί ορισμένοι περιφερειακοί αλγόριθμοι, όπως ο BRIC (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Bricaud et al., 2002), ο DORMA (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι D'Ortenzio et al., 2002), ο MedOC4 (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Volpe et al., 2007) για τον SeaWiFS και ο MedOC3 για τον MODIS (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Santoleri et al., 2008). Ο MedOC3, ειδικότερα, είναι ένας τοπικός εμπειρικός αλγόριθμος, παρόμοιος με τον παγκόσμιο αλγόριθμο, αλλά αποκλειστικά συντονισμένος για τη Μεσόγειο Θάλασσα σε ένα αντιπροσωπευτικό ανοιχτό βιο-οπτικό σύνολο δεδομένων θαλασσινού νερού.

Διάφορες μελέτες που χρησιμοποιούν τη δορυφορική τηλεπισκόπηση για την πρόβλεψη της χλωροφύλλης και της πρωτογενούς παραγωγής έχουν πραγματοποιηθεί πρόσφατα σε ορισμένες υπολεκάνες της Δυτικής Μεσογείου (WMed), συμπεριλαμβανομένου του χρηματοδοτούμενου

από την Ευρωπαϊκή Ένωση έργου MOMAR (<http://www.mmo-mar.net>) (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Maselli et al., 2009, Lazzara et al., 2010a, Massi et al., 2011, Lapucci et al., 2012, Marchese et al., 2015).

Συγκεκριμένα, οι Maselli et al. (2009, όπως αναφέρεται από τους Pieri et al., 2015) ανέπτυξαν έναν ημι-αναλυτικό αλγόριθμο (SAM_LT) για την ανάκτηση των τριών οπτικών ενεργών συστατικών, της χλωροφύλλης (CHL), της έγχρωμης διαλυμένης οργανικής ύλης (CDOM) και των στερεών αιωρούμενων σωματιδίων (suspended particulate matter-SPM) στις Θάλασσες της Λιγουρίας και του Βόρειου Τυρρηνικού. Ο SAM_LT βασίζεται στην τεχνική χαρτογράφησης φασματικής γωνίας (Spectral Angle Mapping-SAM) (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Sohn and Rebello, 2002, Chang et al., 2006) και, αν και αρχικά σχεδιάστηκε για παράκτια θαλάσσια ύδατα, έχει επανεξεταστεί πρόσφατα και εφαρμόζεται σε ανοικτά θαλάσσια ύδατα (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Massi et al., 2011).



Εικόνα 9: Μετρήσεις της χλωροφύλλης συγκριτικά με τις τιμές που υπολογίσθηκαν από τους αλγόριθμους- a=OC3M, b=MedOC3, c =SAM_LT, d=SAM_LT_{mod} (N=240, r με πολύ σημαντική συσχέτιση, P < 0.01) (Pieri et al., 2015).

Οι Katlane et al. (2009), προκειμένου να μελετήσουν την ποιότητα των υδάτων και των επιπτώσεων των βιομηχανικών απορρίψεων στον Κόλπο Gabes, χρησιμοποιούν τους ημι-

εμπειρικούς αλγόριθμους (OC3, OC5) για τη διερεύνηση δεδομένων MODIS για την ανάκτηση χλωροφύλλης (Chl) και έναν επικυρωμένο αλγόριθμο για την θολότητα (turbidity-TU) συνδυαστικά με τις επί τόπου μετρήσεις της χλωροφύλλης. Ο αλγόριθμος OC3 (MODIS-A) χρησιμοποιεί τη μέγιστη αναλογία των καναλιών Rrs (443) / Rrs (551) και των καναλιών Rrs (488) / Rrs (551). Ο αλγόριθμος OC5 (Gohin et al., 2002) τείνει να διορθώνει την υπερεκτίμηση της χλωροφύλλης στα θολά ύδατα χρησιμοποιώντας έναν πίνακα αναζήτησης προσαρμοσμένο στα γαλλικά βόρεια παράκτια ύδατα με βάση τα κατώτατα όρια των Rrs στα 555 nm και στα 412 nm. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ο MODIS OC3 με γραμμική συνάρτηση (CHLMODIS_OC3 = 2,78 CHLin-situ) υπερεκτιμά τη χλωροφύλλη, ενώ οι δεύτεροι αλγόριθμοι OC5 (CHLMODIS_OC5 = 1.11 CHLin-situ) επιτρέπουν καλύτερη ανάκτηση συγκεντρώσεων χλωροφύλλης.

Οι Drakopoulos et. al (2015) αναφέρουν ότι οι σύνθετες οπτικές ιδιότητες του Βορειοανατολικού Αιγαίου, συμπεριλαμβανομένης της ακτινοβολίας, μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια του προγράμματος AegeanMarTech. Οι εκτιμήσεις συγκεντρώσεων χλωροφύλλης προέκυψαν από ταυτόχρονες ραδιομετρικές μετρήσεις πάνω και εντός των υδάτων. Αυτά εξετάστηκαν με δεδομένα πεδίου συγκέντρωσης χλωροφύλλης και συγκρίθηκαν με τα δεδομένα MODIS από τα οποία προέκυψε χλωροφύλλη χρησιμοποιώντας δύο απλούς εμπειρικούς αλγόριθμους. Διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος MedOC3 δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον λειτουργικό αλγόριθμο OC3M-547 και παράγει την ελάχιστη κλίση (bias) όταν συγκρίνεται με την υγρή χρωματογραφία υψηλής πίεσης (HPLC) που παράγεται από τις μετρήσεις πεδίου (in situ) της χλωροφύλλης. Συμπεραίνεται ότι η μεγαλύτερη αβεβαιότητα στην αντιστροφή (inversion) προκύπτει λόγω της απορρόφησης CDOM κάτω από τη ζώνη των 488 nm. Οι αναλογίες ανάκλασης έδειξαν ότι υπάρχει πάντα μια περίσσεια κίτρινης ύλης στην περιοχή μελέτης και ο τύπος νερού δεν μπορούσε να χαρακτηριστεί οπτικά ως «τυπικός ανοικτός ωκεανός» της Κατηγορίας I.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5) παρατίθενται οι αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα δεδομένα του MODIS, ενώ ο Πίνακας 6 δείχνει τους συντελεστές για την εξίσωση των αλγορίθμων OC3M και MedOC3.

Πίνακας 5: Αλγόριθμοι για την εκτίμηση της χλωροφύλλης από δεδομένα του MODIS.

Reference	Name of Algorithm	Equation
O'Reilly et al., 2000 Pieri et al., 2015	OC3M, MedOC3	$[CHL]= 10.0(C0-C1R+C2R^2 + C3R^3 -C4R^4)$ [1] Όπου $R= \log_{10}(R_{547}^{443} > R_{547}^{488})$
Hu et al., 2012	OCI	$CI= Rrs(\lambda_{green})-[Rrs(\lambda_{blue})+(\lambda_{green}-\lambda_{blue})/(\lambda_{red}-\lambda_{blue})*(Rrs(\lambda_{red})-Rrs(\lambda_{blue}))]$ Όπου λ_{blue} , λ_{green} and λ_{red} είναι τα ειδικά μήκη κύματος που βρίσκονται πιο κοντά στα 443, 555 και 670nm αντίστοιχα
	OCIxOC3	$\alpha*Chl_{OC3}+\beta*Chl_{CI}$, όπου $\alpha=(Chl_{CI} - 0,25)/(0,3 - 0,25)$ και $\beta=(0,3 - Chl_{CI})/(0,3 - 0,25)$ για $0,25 < Chl_{CI} < 0,3 \text{ mg m}^{-3}$
Pieri et al., 2015	SAM_LT	$Rrs_{sim}=0.051*(b_{bw}+[CHL]*b_{bPH}+[SPM]*b_{bNAP})/$ $(a_w+[CHL]*a_{PH}+[SPM]*a_{NAP}+[CDOM]*a_{CDOM})$ Όπου [CHL], [SPM] και [CDOM] είναι οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α, σωματίδια NAP (non-algal particles) και CDOM, αντίστοιχα. a_w είναι ο συντελεστής απορρόφησης καθαρού θαλάσσιου ύδατος, τα a_{PH} , a_{NAP} και a_{CDOM} είναι οι ειδικοί συντελεστές απορρόφησης του φυτοπλαγκτού, του NAP και του CDOM. b_{bw} είναι ο

		συντελεστής καθυστέρησης του καθαρού θαλασσινού νερού, b_{bPH} και b_{bNAP} *, * είναι οι συγκεκριμένοι συντελεστές backscattering του φυτοπλαγκτού και του NAP
--	--	---

Πίνακας 6: Συντελεστές της εξίσωσης 1 για τους αλγόριθμους OC3M και MedOC3 (Pieri et al., 2015).

	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4
OC3M	0.2424	-2.7423	1.8017	0.0015	-1.2280
MedOC3	0.3800	-3.6880	1.0360	1.6160	-1.3280

Οι Minh T. Nguyen and Trung L. V. (2008) μελέτησαν τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και σύγκριναν τις τιμές τους με εκείνες που εξάγονται από τις εικόνες του MODIS. Οι μετρήσεις SST συλλέχθηκαν από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας, Nha Trang σε είκοσι δύο (22) σημεία στο Binh Thuan και αφορούν το χρονικό διάστημα από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο του 2007 και από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο του 2008. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν από την επιφάνεια της θάλασσας έως και 0,5 μέτρα βάθος. Η μεταβολή των τιμών SST με το βάθος σε κάθε σημείο δειγματοληψίας είναι μικρή, περίπου 0,40 ° C. Υπάρχουν πολλοί άλλοι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της SST που χρησιμοποιούν την υπέρυθη ακτινοβολία. Η θεμελιώδης προσέγγιση ήταν η πολυκαναλική SST (Multi Channel-MCSST, Mihn and Trung, 2008 όπως αναφέρουν οι McClain et al., 1985). Για τη βελτίωση του MCSST, οι επιστήμονες του NOAA / NESDIS αποφάσισαν να συμπεριλάβουν και τα μη γραμμικά αποτελέσματα (Mihn and Trung, 2008 όπως αναφέρουν οι Walton et al., 1990, Walton et al., 1998). Ο πρώτος επίσημος εναλλακτικός αλγόριθμος ονομάστηκε Cross Product SST (CPSST) για να τονίσει το μη γραμμικό τμήμα του υπολογισμού. Κάποιες αλλαγές έγιναν αργότερα στον CPSST και ο αλγόριθμος είναι τώρα γνωστός ως μη γραμμικός ή NLSST. Αυτός είναι επίσης ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία της SST από τον MODIS.

Οι Malenovský et al. (2012) αναφέρουν ότι οι δορυφορικές αποστολές Sentinel-1, -2 και -3 μπορούν να ικανοποιήσουν διάφορες παρατηρητικές ανάγκες για χωρικά σαφείς φυσικές, βιογεωφυσικές και βιολογικές μεταβλητές της θάλασσας, της κρυόσφαιρας και των δραστηριοτήτων έρευνας της γης. Οι σημερινές γνωστές παρατηρητικές απαιτήσεις εξήχθησαν από έγγραφα που παρήχθησαν από μεγάλα διεθνή επιστημονικά προγράμματα. Οι συνοπτικές παρατηρητικές ανάγκες στη συνέχεια διασταυρώθηκαν με τις δυνατότητες των προγραμματισμένων αισθητήρων επί των τριών πρώτων Sentinels. Μια συγκριτική ανάλυση, η οποία περιλαμβάνει επίσης επιστημονικές προκλήσεις του Προγράμματος Living Planet του ESA και των βασικών μεταβλητών του κλίματος, οδήγησε σε μια προκαταρκτική επιστημονική αξιολόγηση της προτεραιότητας των αναθεωρημένων περιβαλλοντικών μεταβλητών. Τα αποτελέσματα αυτών των δραστηριοτήτων, που συζητήθηκαν και ενοποιήθηκαν τον Μάρτιο του 2011 στο επιστημονικό εργαστήριο Sentinels for Science (SEN4SCI), καταδεικνύουν το υψηλό δυναμικό των αποστολών Sentinel-1, -2 και -3 για συστηματικές, μακροχρόνιες παρατηρήσεις του γήινου συστήματος (Malenovský et al., 2012).

Σύμφωνα με τους Robertson Lain et al. (2013) οι αποστολές Sentinel 2 και 3 προσφέρουν νέες δυνατότητες για παρατηρήσεις επιβλαβών αλγών (Harmful Algal Bloom - HAB) στη Νότια Αφρική και πιο έξω στην αφρικανική ήπειρο, όπου υπάρχει μεγάλη ανάγκη για βελτιωμένη παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων: τόσο στους πόρους γλυκών υδάτων όπου ο

ευτροφισμός είναι κοινός, όσο και στα ευάλωτα παράκτια οικοσυστήματα. Εξετάστηκαν δύο καλά επικυρωμένοι αλγόριθμοι - ισοδύναμοι πληθυσμοί των αλγών (Equivalent Algal Populations - EAP) και μέγιστο ύψος αιχμής (Maximum Peak Height - MPH) - που διατίθενται για επιχειρησιακή χρήση στα ευτροφικά νερά. Οι φασματικές ανακλάσεις (Rrs) και οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες (IOPs) χαρακτηρίζονται με τη μέτρηση και τη μοντελοποίηση των συναθροίσεων φυτοπλαγκτού που είναι χαρακτηριστικές των φυκιών υψηλής βιομάζας του Southern Benguela και των εσωτερικών υδάτων της Νότιας Αφρικής. Η ευαισθησία σε λειτουργικούς τύπους φυτοπλαγκτού (phytoplankton functional types - PFTs) διερευνάται, με έμφαση σε οπτικά σημαντικά βιολογικά χαρακτηριστικά, όπως η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων και η ενδοκυτταρική δομή (Robertson Lain et al., 2013).

Οι Kaishan Song et al. (2013) στην εργασία τους «Remote estimation of chlorophyll-a in turbid inland waters: Three-band model versus GA-PLS model» ανέπτυξαν ένα προσαρμοστικό μοντέλο με βάση τα πλεονεκτήματα της σύζευξης ενός γενετικού αλγορίθμου για την επιλογή φασματικών μεταβλητών και μερικών ελαχίστων τετραγώνων (GA-PLS) για παλινδρόμηση. Οι στόχοι της εργασίας τους είναι (Kaishan Song et al., 2013):

1. η αξιολόγηση της απόδοσης μοντέλου GA-PLS χρησιμοποιώντας σύνολα δεδομένων που συλλέχθηκαν από 1140 σταθμούς που περιλάμβαναν ένα ευρύ φάσμα Chl-a και αιωρούμενα ιζήματα από εννέα υδάτινα σώματα στην κεντρική Ιντιάνα (CIN), τις ΗΠΑ, τη Νότια Αυστραλία (SA), της λίμνης Taihu (THL) στην Ανατολική Κίνα και του Shitoukoumen Reservoir (STKR) στη βορειοανατολική Κίνα σε σύγκριση με ένα ευρέως αποδεκτό μοντέλο τριών ζωνών και
2. η αξιολόγηση της χωρικής μεταβίβασης GA-PLS με προσομοιωμένους ESA / Sentinel3 / Φάσματα OLCI και Hyperion.

Το GA-PLS και το μοντέλο τριών ζωνών αποδίδουν ακριβείς βαθμονομήσεις (Cal) για το σύνολο δεδομένων SA με R^2 πάνω από 0,98 και η αντίστοιχη επικύρωση (Val) δείχνει σχετικό ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (rRMSE) μικρότερο από 6,2% στα φάσματα. Τόσο το μοντέλο GA-PLS όσο και το μοντέλο τριών ζωνών δείχνουν σταθερή απόδοση για το σύνολο δεδομένων CIN (Cal: $R^2 = 0,91$ και $0,77$ · Val: rRMSE = 20,1% και 33,4%), το σύνολο δεδομένων THL (Cal: $R^2 = 0,91$ και $0,88$ · Val: rRMSE = 30,1% και 33,7%) και το σύνολο δεδομένων STKR ($R^2 = 0,84$ και $0,82$, rRMSE = 29,1% και 33,2%). Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν επίσης ότι τα προσομοιωμένα σύνολα δεδομένων OLCI υποβαθμίζουν τόσο την απόδοση GA-PLS όσο και την απόδοση του μοντέλου τριών ζωνών εξαιτίας της πιο χονδρικής και ασυνεχούς φασματικής διαμόρφωσης. Αντίθετα, τόσο το μοντέλο GA-PLS όσο και το μοντέλο τριών ζωνών παρουσιάζουν βελτιωμένα αποτελέσματα με τα προσομοιωμένα σύνολα δεδομένων Hyperion. Το μοντέλο GA-PLS ξεπερνά το μοντέλο των τριών ζωνών από την άποψη της χωρικής μεταφοράς. Ωστόσο, το μοντέλο τριών ζωνών έχει τα δικά του πλεονεκτήματα, λαμβάνοντας υπόψη την απλότητα του. Περαιτέρω αναλύσεις υποδεικνύουν ότι τα πρωτόκολλα φασματικής μέτρησης, τα όργανα και η ανόργανη αιωρούμενη ύλη επηρεάζουν τις επιδόσεις μοντέλου GA-PLS και του μοντέλου των τριών ζωνών (Kaishan Song et al., 2013).

3. Μεθοδολογία

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να εντοπισθούν οι πιθανές συσχετίσεις μεταξύ των *in situ* δεδομένων και των φασματικών τιμών που λήφθηκαν από τις εικόνες. Γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης και, ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία συλλογής των δεδομένων. Η διαχείριση του μεγάλου όγκου των δεδομένων έγινε ευκολότερη με την αυτοματοποίηση των επιμέρους σταδίων, με τη δημιουργία κατάλληλων scripts στο MATLAB. Συνοπτικά, ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Συλλογή *in situ* δεδομένων.
2. Συλλογή εικόνων.
3. Μετατροπή των εικόνων σε αρχεία geotiff.
4. Εξαγωγή τιμών χλωροφύλλης και θερμοκρασίας από τις εικόνες με βάση τις συντεταγμένες από τα *in situ* δεδομένα.
5. Σύγκριση των τιμών και δημιουργία δεικτών συσχετίσεων.

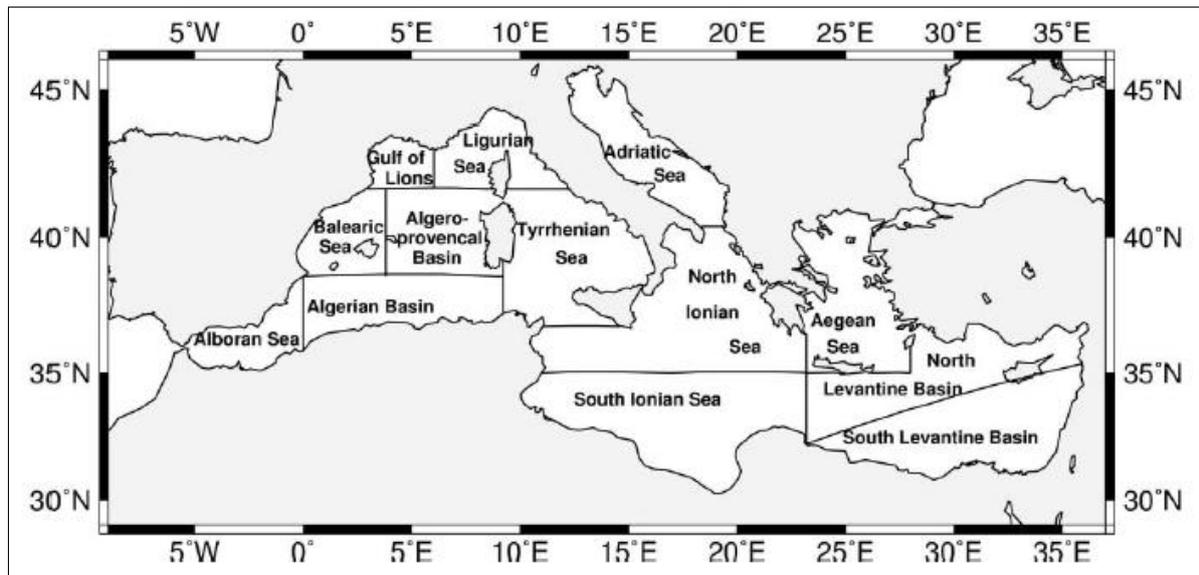
Στη συνέχεια, περιγράφονται οι στατιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση των πιθανών συσχετίσεων και, τέλος, αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία των δεικτών.

3.1 Περιοχή Μελέτης

Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από oligοτροφικά έως υπερoligoτροφικά νερά, ταχέως αυξανόμενη θερμοκρασία της θαλάσσιας επιφάνειας και μεταβαλλόμενη χημεία όσον αφορά τον άνθρακα (Oviedo et al., 2015).

Η λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου (Eastern Mediterranean Basin - EMB) (Εικόνα 10), η οποία εκτείνεται στην ανατολή από 11°E έως 36°E και Βόρεια από 30°N έως 46°N, είναι μια ημι-κλειστή λεκάνη με αρνητικό υδάτινο ισοζύγιο (δηλαδή εξάτμιση μεγαλύτερη από την καθίζηση συν απορροή ποταμού). Το κανάλι της Σικελίας (πλάτος 149 km) και το στενό της Μεσσήνης (πλάτος 4 χιλιομέτρων) συνδέουν τις λεκάνες της Ανατολικής και της Δυτικής Μεσογείου (Shaltout, Omstedt, 2012).

Το Αιγαίο Πέλαγος βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Μεσογείου στα ανατολικά του Ιονίου και στα βορειοδυτικά της Θάλασσας της Λεβαντίνης, που οριοθετείται στα βόρεια και δυτικά από την ηπειρωτική Ελλάδα και στα ανατολικά από τις ακτές της Ασίας. Στο βορρά συνδέεται με τη θάλασσα του Μαρμαρά και τον Εύξεινο Πόντο με τα στενά των Δαρδανελλίων και το Βόσπορο. Το Αιγαίο παρουσιάζει μια πολύ ακανόνιστη ακτογραμμή και πολύ περίπλοκη τοπογραφική δομή που αποκαλύπτει πάνω από 3000 ελληνικά νησιά και νησίδες και ένα ακανόνιστο δάπεδο της θάλασσας. Οι σημαντικότερες υδάτινες μάζες στο Αιγαίο πέλαγος είναι (i) το υφάλμυρο και κρύο νερό του Εύξεινου Πόντου που εισέρχεται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μέσω των στενών των Δαρδανελλίων, (ii) τα πολύ αλατούχα και θερμά νερά προερχόμενα από τη Θάλασσα της Λεβαντίνης που εισέρχονται στο νότιο Αιγαίο μέσω του Κρητικού Τόξου και (iii) τα πολύ πυκνά βαθιά νερά που γεμίζουν το κάτω μέρος των διαφόρων υποζωνών (Sykioti et al., 2015 όπως αναφέρουν οι Tsimplis et al., 2002, Skliris et al., 2011, Torouzelis et al., 2012, Velaoras et al., 2013, Borzelli et al., 2014).



Εικόνα 10: Χάρτης της Λεκάνης της Μεσογείου και των 13 περιοχών όπως αυτές ορίζονται στην εργασία των Bricaud et al. (2002).

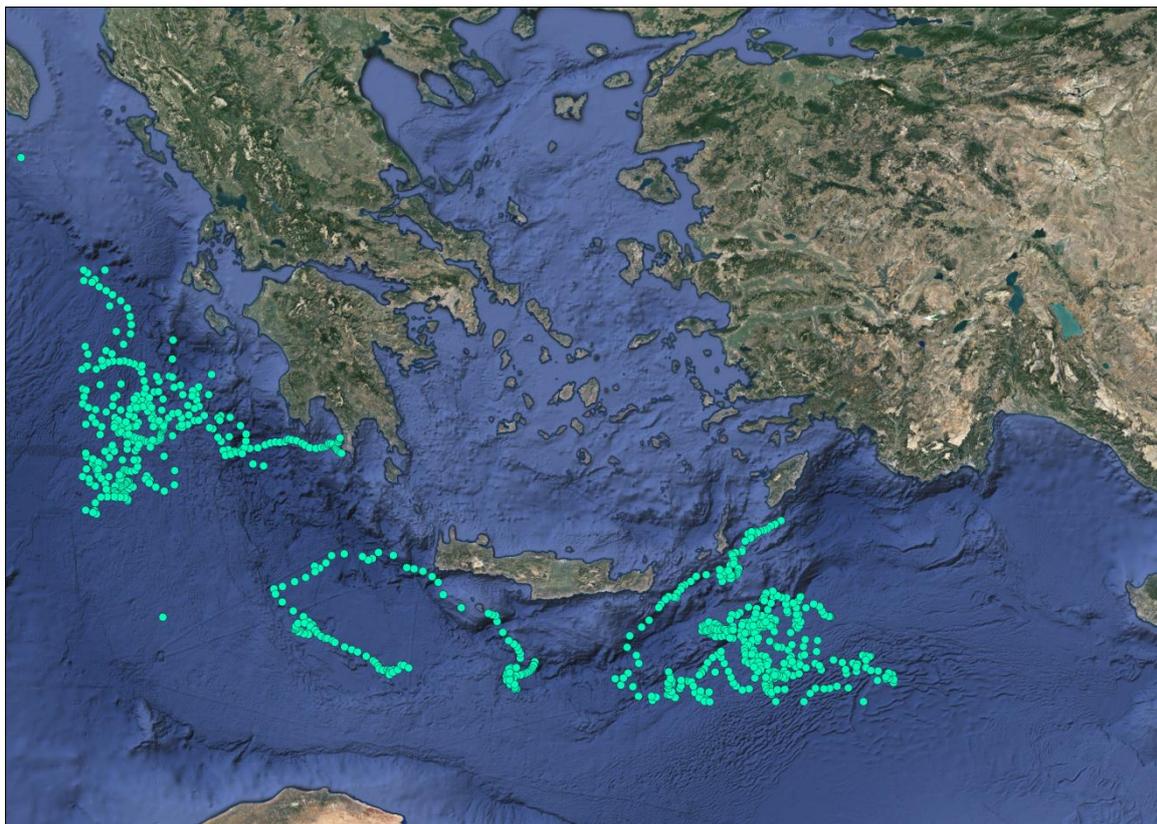
3.2 Συλλογή in-situ Δεδομένων

Το Sea Data Net είναι μία υποδομή θαλάσσιων δεδομένων για τη διαχείριση μεγάλων και ποικίλων συνόλων δεδομένων που προέρχονται από επιτόπια και απομακρυσμένη παρατήρηση των θαλασσών και των ωκεανών. Μέσω της ιστοσελίδας της εν λόγω υποδομής λήφθηκαν δεδομένα που αφορούσαν τιμές χλωροφύλλης και θερμοκρασίας σε συγκεκριμένες συντεταγμένες του Ιονίου και του Αιγαίου Πελάγους για τα έτη 2013-2016 (Ιούλιος του 2013 έως Δεκέμβριος του 2016).

Πίνακας 7: Πλήθος διαθέσιμων δειγμάτων στην περιοχή μελέτης.

Ποιοτικός Δείκτης	Πλήθος Δειγμάτων
Χλωροφύλλη-α (Chla-a)	839
Θερμοκρασία Επιφάνειας της Θάλασσας (SST)	885

Οι μετρήσεις κατανέμονταν στην πλειοψηφία τους νοτιοανατολικά και ανατολικά της Κρήτης και δυτικά της Πελοποννήσου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Οι θέσεις των σημείων όπου έγιναν οι μετρήσεις.

3.3 Συλλογή Δορυφορικών Δεδομένων

Δεδομένα MODIS

Για τις ίδιες συντεταγμένες και για τις ίδιες ημερομηνίες απόκτησης, ανασύρθηκαν τα Chla και τα SST και οι παράμετροι χρώματος ωκεανού από τα προϊόντα Level 2 του MODIS από την NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl>). Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν εκδίδονται από τον δορυφόρο Aqua και η λήψη τους ήταν δωρεάν. Οι εικόνες του MODIS που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τον δορυφόρο OLCI ήταν επίσης προϊόντα του Level-2.

Τα αρχαικά προϊόντα MODIS Ocean Level-2 παράγονται και διανέμονται από το Ωκεανικό σύστημα επεξεργασίας δεδομένων Ocean Data System (ODPS) του NASA Goddard Space Flight Center. Ένα προϊόν δεδομένων MODIS Level-2 παράγεται από το αντίστοιχο προϊόν Level-1B. Τα βασικά περιεχόμενα δεδομένων του προϊόντος είναι οι γεωφυσικές τιμές για κάθε εικονοστοιχείο, οι οποίες προέρχονται από την ακτινοβολία του επιπέδου Level-1, εφαρμόζοντας τη βαθμονόμηση του αισθητήρα (για Level-1A), τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις και τους αλγόριθμους γεωφυσικών παραμέτρων. Η επεξεργασία του επιπέδου Level-2 χρησιμοποιεί επίσης μετεωρολογικές πληροφορίες και πληροφορίες σχετικά με το όζον από βοηθητικούς πόρους. Κάθε προϊόν Level-2 ανταποκρίνεται ακριβώς σε γεωγραφική κάλυψη (έκταση γραμμής σάρωσης και pixel) με εκείνη που έχει το γονικό προϊόν του επιπέδου Level-1 (NASA Ocean Level-2 Data Products, 2010). Τα προϊόντα επιπέδου Level-2 των ωκεανών

παρέχουν σχεδόν καθημερινές μετρήσεις του χρώματος του ωκεανού και μετρήσεις SST σε ανάλυση 1 km με ανερχόμενη / φθίνουσα κάλυψη ημέρας / νύχτας.

Από τις διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες έγινε επιλογή εκείνων με την μικρότερη νεφοκάλυψη προκειμένου να εξασφαλισθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Οι δορυφορικές εικόνες που επιλέχθηκαν από τον MODIS συνολικά ήταν 293 για τη χλωροφύλλη και 537 για τη θερμοκρασία.

Δεδομένα Sentinel-3

Οι εικόνες του Sentinel-3 είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα του Copernicus (<https://coda.eumetsat.int/#/home>), από όπου έγινε και η δωρεάν λήψη των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ο OLCI έχει ανάλυση 300 m. Τα προϊόντα Level-1 βαθμονομούνται με τις τιμές της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας (Top Of Atmosphere) στα 21 κανάλια του OLCI (EUMETSAT, 2017). Χρησιμοποιήθηκε μία (1) εικόνα MODIS και μία (1) εικόνα Sentinel-3 για τις 24 Αυγούστου 2017.

3.3.1 Επεξεργασία Εικόνων

Αρχικά, οι εικόνες του MODIS ήταν σε μορφή «.nc» και η επεξεργασία τους ήταν εφικτή μόνο μέσω του προγράμματος SeaDAS, συνεπώς κρίθηκε απαραίτητη η μετατροπή τους σε αρχεία «geotiff» που πραγματοποιήθηκε στο MATLAB με τη χρήση κατάλληλων scripts που δημιουργήθηκαν από τον Βαϊόπουλο Αριστείδη (2017). Με τον τρόπο αυτό έγινε η γεωαναφορά των εικόνων και ήταν ευκολότερη και πιο σύντομη η εξαγωγή των τιμών της χλωροφύλλης και της θερμοκρασίας στις συντεταγμένες των μετρήσεων που είχαν ληφθεί από το Sea Data Net. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε επίσης στο MATLAB με τους αλγόριθμους του Βαϊόπουλου (2017). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι εικόνες αφορούσαν την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, αλλά δεν απεικόνιζαν την ίδια περιοχή. Αντίθετα απεικόνιζαν ξεχωριστά τμήματα του Ιονίου και του Αιγαίου Πελάγους, ανάλογα με τις συντεταγμένες και την ημερομηνία των in situ μετρήσεων.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν αρχεία που περιείχαν τις τιμές της χλωροφύλλης και της θερμοκρασίας για κάθε εικόνα που αργότερα συγκρίθηκαν με τα δεδομένα in situ του Sea Data Net.

Η επόμενη διαδικασία ήταν η εξαγωγή της ανακλαστικότητας ανά σημείο και κανάλι με τη χρήση του προγράμματος MATLAB και των αλγορίθμων που προαναφέρθηκαν. Τα αρχικά αρχεία «.nc» περιείχαν εικόνες των Rrs (Remote Sensing Reflectance), οι οποίες μετατράπηκαν σε αρχεία «geotiff» με την διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω. Με παρόμοιο τρόπο εξήχθησαν οι τιμές της ανακλαστικότητας στις συντεταγμένες των μετρήσεων.

Οι εικόνες επιλέχθηκαν για τη συσχέτιση των προϊόντων χλωροφύλλης του OLCI και του MODIS περικόπηκαν με το πρόγραμμα QGIS με τη χρήση συντεταγμένων ώστε να απεικονίζεται ακριβώς η ίδια περιοχή, αφού πρώτα μετατράπηκαν σε geotiff στο MATLAB (scripts του Βαϊόπουλου, 2017). Από τις εικόνες αυτές με κατάλληλες πράξεις αφαιρέθηκαν τα pixel που δεν είχαν τιμές, καθώς και τα pixels της στεριάς και της νεφοκάλυψης.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν σημεία σε τρεις περιοχές και εξήχθηκαν οι τιμές της χλωροφύλλης και οι συντεταγμένες τους. Για τις ίδιες συντεταγμένες εξήχθηκαν οι τιμές της χλωροφύλλης των προϊόντων OC4Me και Neural Net του OLCI στο MATLAB, ώστε να είναι εφικτή η μεταξύ τους σύγκριση.

3.4 Μοντέλα Παλινδρόμησης και Συσχετίσεις Δεδομένων

Η Παλινδρόμηση (regression) είναι μία στατιστική τεχνική μοντελοποίησης που εξετάζει τη σχέση μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής με δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές προκειμένου να προβλέψει τον τρόπο που οι μεταβολές των ανεξάρτητων μεταβλητών επηρεάζουν την εξαρτώμενη (Κόκκινος, 2011). Η παλινδρόμηση περιλαμβάνει μία συνάρτηση της μορφής $y=f(x)$, όπου 'x' είναι ένα στοιχειώδες δεδομένο και 'y' μία πραγματική μεταβλητή πρόβλεψης (Κόκκινος, 2011 όπως αναφέρουν οι Dunham, 2004, Han and Kamber, 2006, Bishop, 1995).

Δημιουργήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης ώστε να διερευνηθούν οι πιθανές συσχετίσεις ανάμεσα στις φυσικοχημικές παραμέτρους και τις τιμές reflectance (ανακλαστικότητα) των καναλιών του MODIS. Έγιναν πολλές δοκιμές προκειμένου να εντοπισθούν τα σημεία με τις μεγαλύτερες συσχετίσεις και τελικά οι τεχνικές που επιλέχθηκαν είναι η Γενική Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression) και η Λογαριθμική-Γραμμική Παλινδρόμηση (Log-Transformed Linear Regression ή Log-linear Regression).

3.4.1 Γενική Γραμμική Παλινδρόμηση

Η τεχνική αυτή μοντελοποιεί τη σχέση μεταξύ μίας βαθμωτής μεταβλητής Y και μίας ή περισσότερων μεταβλητών X_i μέσω γραμμικών εξισώσεων. Τα X_i , Y_i συνδέονται με τη σχέση (Κουγιουμτζής, 2016):

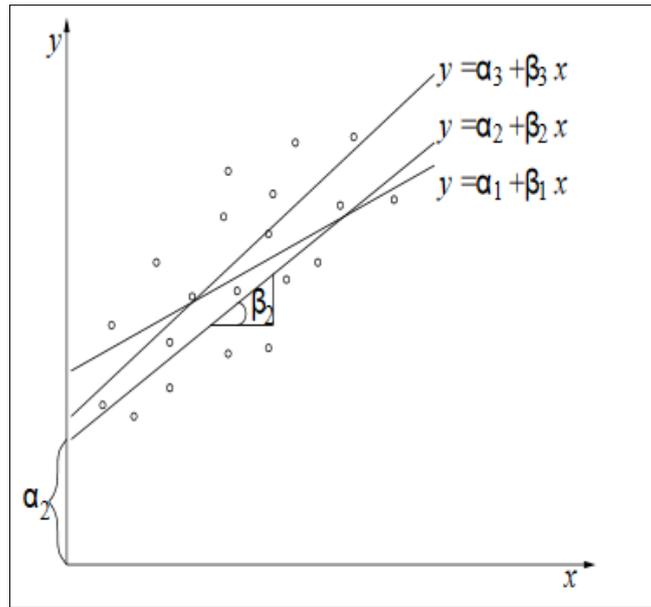
$$Y = \alpha + \beta_i X_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n$$

α : Ο σταθερός όρος για $x=0$ και λέγεται διαφορά ύψους (intercept)

β : Η κλίση της ευθείας (slope) ή αλλιώς συντελεστής παλινδρόμησης (regression coefficient)

ε : Το σφάλμα της παλινδρόμησης (regression error)

Η τιμή X καλείται ανεξάρτητη μεταβλητή και η τιμή Y εξαρτημένη μεταβλητή. Σε περίπτωση ύπαρξης μίας μόνο ανεξάρτητης μεταβλητής ($i=1$), τότε η μέθοδος καλείται Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση.



Εικόνα 12: Ευθείες γραμμικής παλινδρόμησης (Κουγιουμτζής, 2009).

Το γραμμικό μοντέλο περιγράφεται και με την βοήθεια πινάκων ως εξής (Τζαβελάς, 2009):

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Η εκτίμηση των α , β , συνεπώς και ο υπολογισμός της ζητούμενης βέλτιστης ευθείας, γίνεται συνήθως με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (method of least squares). Το όνομα της μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι εντοπίζει την ευθεία παλινδρόμησης με παραμέτρους α και β ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποστάσεων των σημείων από την ευθεία. Οι εκτιμήσεις των α και β δίνονται από την εξίσωση (Κουγιουμτζής, 2009):

$$\min_{\alpha, \beta} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad \text{ή} \quad \min_{\alpha, \beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2$$

Η προσαρμογή της ευθείας στα δεδομένα αξιολογείται με τα παρακάτω μοντέλα (Κουνετάς, 2012):

- Το Συνολικό Άθροισμα Τετραγώνων (Total Sum of Squares) των διαφορών κάθε τιμής από τη μέση, το οποίο δείχνει την απόκλιση των δεδομένων από το «χειρότερο μοντέλο», δηλαδή τη μέση τιμή, και εκφράζει τη μεταβλητότητά τους.

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

- Το Άθροισμα των Τετραγώνων Υπολοίπων (Residual Sum of Squares) που παρουσιάζει την απόκλιση των δεδομένων από το «καλύτερο μοντέλο», δηλαδή την ευθεία.

$$SS_R = \sum_i (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2$$

- Το Άθροισμα των Τετραγώνων Μοντέλου (Model Sum of Squares) που αποτελεί τη διαφορά ανάμεσα στο «χειρότερο μοντέλο» και το «καλύτερο μοντέλο».

$$SS_M = SS_T - SS_R$$

3.4.2 Λογαριθμική - Γραμμική Παλινδρόμηση

Το εκθετικό μοντέλο είναι ένα εναλλακτικό μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης που έχει την μορφή:

$$Y = a(1 + r)^x \quad \text{ή συνήθως} \quad Y = e^{a+bx}$$

Ο λογάριθμος της μεταβλητής Y συνδέεται γραμμικά με την ανεξάρτητη μεταβλητή X , καθώς οι λογάριθμοι των δύο μελών του μοντέλου δίνουν (Πανάρετος, 1994):

$$\ln Y = \alpha + \beta X$$

Η εκτίμηση των παραμέτρων α και β πραγματοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων αλλά αφορά τη σχέση που αναφέρεται στον λογάριθμο της Y .

3.4.3 Στατιστικές Παράμετροι R^2 και p-value

Η ποιότητα της προσαρμογής του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να υπολογισθεί από τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 (Coefficient of determination), ο οποίος, σύμφωνα με τον Κουγιουμτζή (2009) δίνει το ποσοστό μεταβλητότητας των τιμών της Y που υπολογίζεται από τη X (κι αντίστροφη). Ορίζεται ως:

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

Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού παίρνουν τιμές στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$ και συνήθως εκφράζονται σε ποσοστό % (Κουγιουμτζή, 2009). Όσο πλησιέστερα στη μονάδα είναι η τιμή του, τόσο πιο καλά προσαρμόζεται το μοντέλο παλινδρόμησης στα δεδομένα. Αντιθέτως, η συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές είναι μικρή όσο η τιμή του R^2 πλησιάσει το μηδέν (0).

Τα προτεινόμενα μοντέλα ελέγχθηκαν με την τιμή p-value (παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας - observed level of significance), η οποία αποτελεί έναν δείκτη αξιοπιστίας ενός αποτελέσματος. Σε κάθε έρευνα διατυπώνονται δύο υποθέσεις, η μηδενική (H_0) και η εναλλακτική ή πειραματική (H_1) και η μηδενική υπόθεση εξετάζεται ως προς την εναλλακτική. Σύμφωνα με τους Πανάρετος και Ξεκαλάκη (2000): «Ως τιμή p-value ή παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας ή τιμή πιθανότητας ορίζεται η πιθανότητα ή στατιστική συνάρτηση ελέγχου να πάρει μία τιμή τόσο ακραία ή περισσότερο ακραία από αυτή που πήρε για ένα συγκεκριμένο δείγμα, κάτω από τη μηδενική υπόθεση» (σελ. 372). Μεγάλες τιμές της p value συνεπάγονται

μεγάλη πιθανότητα να είναι τυχαίο το αποτέλεσμα, συνεπώς είναι επιθυμητό οι τιμές να είναι μικρότερες του 5% για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

3.4.4 Δημιουργία Δεικτών Συσχετίσεων

Οι τιμές που προέκυψαν στο προηγούμενο στάδιο χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία δεικτών προκειμένου να γίνει ανάλυση της παλινδρόμησης και να εντοπισθεί ο βαθμός συσχέτισης των δεικτών που προκύπτουν από τις εικόνες με τα επίγεια δεδομένα συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α.

Οι δείκτες είναι πράξεις που έγιναν μεταξύ των καναλιών ή των εκθετικών τους συναρτήσεων με βάση το e ή των λογαρίθμων τους. Για τη χλωροφύλλη εξετάστηκαν συνολικά 569 δείκτες, συμπεριλαμβανομένων και δεικτών που πρότεινε η βιβλιογραφία.

Η εξαγωγή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , των εξισώσεων που αντιστοιχούν σε κάθε δείκτη και των διαγραμμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Matlab με κατάλληλα scripts που δημιουργήθηκαν από τον Κανδυλάκη Ζαχαρία (2017).

Οι δείκτες με τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού στο μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή χαρτών και τη μετέπειτα σύγκρισή τους με τον αλγόριθμο OCI, με τον οποίο δημιουργήθηκαν τα προϊόντα του MODIS. Η εξαγωγή των χαρτών των μοντέλων αυτών έγιναν με στο MATLAB με κατάλληλο script που δημιουργήθηκε από την Κικάκη Κατερίνα (2017).

4. Πειραματικά Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έδωσαν οι συσχετίσεις των *in situ* δεδομένων στην περιοχή μελέτης με τα φασματικά δεδομένα του δορυφόρου MODIS. Τόσο για τη χλωροφύλλη-α, όσο και για τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (SST) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των προτεινόμενων δεικτών για τις μετρήσεις της χλωροφύλλης-α, για τις οποίες εφαρμόστηκε η απλή γραμμική και η λογαριθμική-γραμμική παλινδρόμηση, και τέλος τα αποτελέσματα των συσχετίσεων των εικόνων των δορυφόρων MODIS και Sentinel-3.

Αρχικά, γίνεται αξιολόγηση των συσχετίσεων των παραμέτρων και σύγκριση με τα *in situ* δεδομένα στις δύο πρώτες περιπτώσεις και, ακολούθως, παρατίθενται οι χάρτες που δημιουργήθηκαν με τις τελικές συναρτήσεις που έδωσαν τους μεγαλύτερους R^2 . Στην τρίτη περίπτωση γίνεται μία σύγκριση των εικόνων του MODIS και του Sentinel-3 που αφορούν τις ίδιες ημερομηνίες.

4.1 Αποτελέσματα Συσχετίσεων των προϊόντων Modis με τα *in situ* Δεδομένα

Μελετήθηκαν οι συσχετίσεις των τιμών της χλωροφύλλης-α και της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (SST) από τα δεδομένα *in situ* με τις τιμές της χλωροφύλλης-α και της θερμοκρασίας SST των εικόνων MODIS στις ίδιες συντεταγμένες. Το άθροισμα των μετρήσεων της χλωροφύλλης σε αυτό το στάδιο είναι **365** και της **SST 689**, καθώς αφαιρέθηκαν οι αρνητικές τιμές, ενώ στην περίπτωση της SST, αφαιρέθηκαν οι τιμές των εικόνων MODIS για τις οποίες η SST ήταν μικρότερη των 15°C . Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν με τη μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

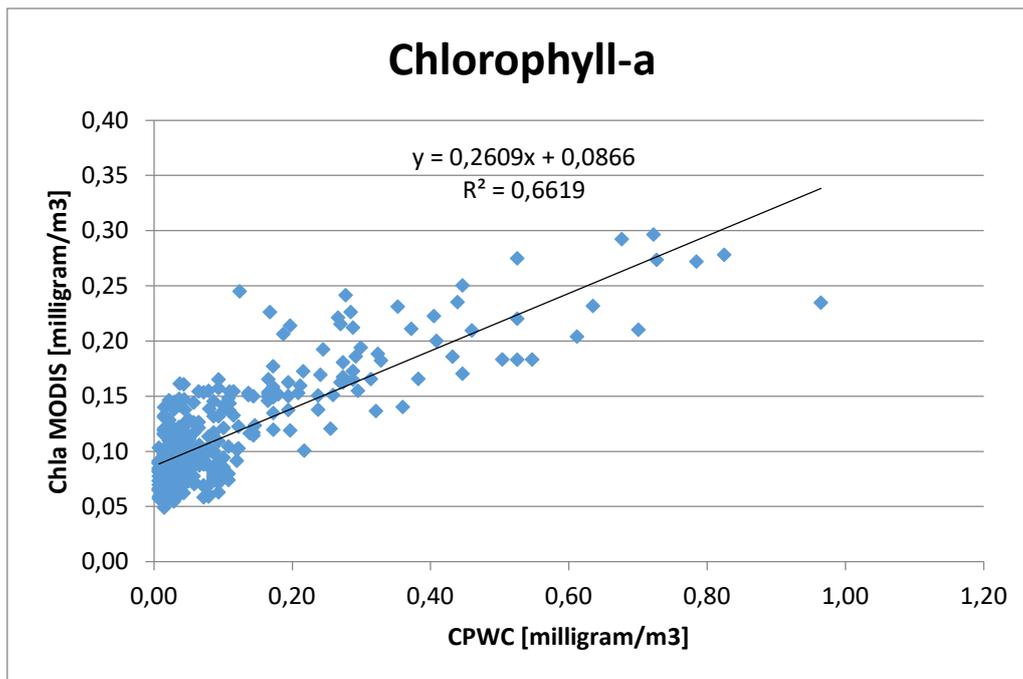
Τα προϊόντα της χλωροφύλλης του MODIS δημιουργήθηκαν με βάση τον αλγόριθμο OCI του Hu et al. (2012). Συγκεκριμένα, το νέο παγκόσμιο προϊόν της χλωροφύλλης (Chl_{OCI}) υπολογίζεται ως εξής (Hu et al., 2012):

$$Chl_{OCI} = Chl_{CI}, \text{ για } Chl_{CI} \leq 0,25 \text{ mg/m}^3$$

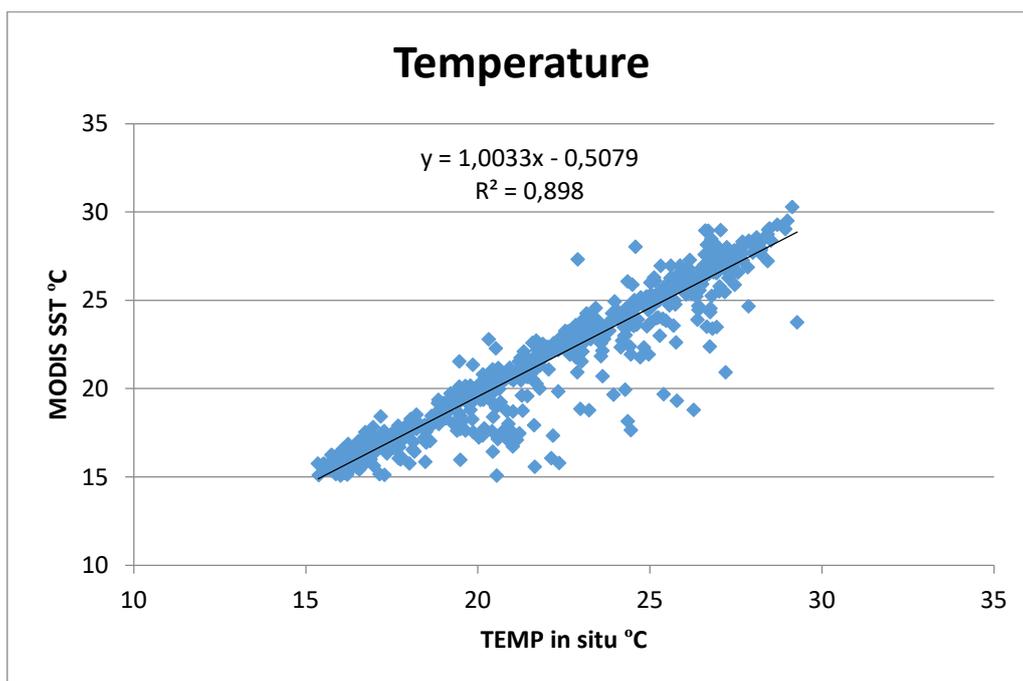
$$Chl_{OCI} = Chl_{OC3}, \text{ για } Chl_{CI} > 0,3 \text{ mg/m}^3$$

$$\alpha \times Chl_{OC3} + \beta \times Chl_{CI}, \text{ για } 0,25 < Chl_{CI} \leq 0,3 \text{ mg/m}^3$$

Όπου $\alpha = (Chl_{CI} - 0,25) / (0,3 - 0,25)$ και $\beta = (0,3 - Chl_{CI}) / (0,3 - 0,25)$. Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του CI αναφέρονται στην σελίδα 34 (Πίνακας 5).



Διάγραμμα 1: Συσχέτιση Chl-a MODIS και in situ δεδομένων (CPWC).



Διάγραμμα 2: Συσχέτιση SST MODIS και in situ δεδομένων (TEMP).

Για τις συσχετίσεις που προέκυψαν με τη χρήση του απλού γραμμικού μοντέλου παρατηρείται ότι ο R^2 έπαιρνε τιμές πάνω από 60% ($R^2 > 0,6$). Συγκεκριμένα, για τη χλωροφύλλη-α ο R^2 ήταν 66% ($R^2=0,6619$) και για τη SST η τιμή του R^2 ($R^2=0,898$) ήταν περίπου 89%. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, όσο πλησιέστερα στη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο καλύτερα προσαρμόζεται το μοντέλο παλινδρόμησης στα δεδομένα, συνεπώς στη συγκεκριμένη περίπτωση ο αλγόριθμος OCI έδωσε καλή συσχέτιση για τη χλωροφύλλη. Ομοίως, το μοντέλο της SST έδωσε καλή συσχέτιση με τα δεδομένα in situ.

4.2 Αποτελέσματα Συσχετίσεων με χρήση Δεικτών της Βιβλιογραφίας

Σύμφωνα με τον Drakopoulos et al. (2015) στο Αιγαίο και την Ανατολική Μεσόγειο υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των in situ δεδομένων των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης και των δεδομένων που προέρχονται από τους δορυφόρους. Σε αυτό το στάδιο διερευνήθηκαν οι συσχετίσεις των καναλιών του MODIS και των δεδομένων in situ. Η ανακλαστικότητα (Rrs) στα κανάλια του MODIS που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Τα κανάλια του MODIS που χρησιμοποιήθηκαν στους δείκτες.

Remote Sensing Reflectance (Rrs):	Bands of MODIS
412 nm	8
443 nm	9
469 nm	10
488 nm	10
531 nm	11
547 nm	12
555 nm	12
645 nm	-
667 nm	13
678 nm	14

Οι συσχετίσεις προέκυψαν ανάμεσα στη χλωροφύλλη-α και στην ανακλαστικότητα των καναλιών, τις διαφορές, τους λόγους, τα αθροίσματα, τους λόγους των αθροισμάτων και των διαφορών, των φυσικών λογαρίθμων και των λογαρίθμων των λόγων τους. Ορισμένοι από τους δείκτες αποτελούν προτάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας, ενώ οι υπόλοιποι είναι προέκταση των προτάσεων αυτών, καθώς χρησιμοποιούν διαφορετικούς συνδυασμούς των διαθέσιμων καναλιών. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν **569 συσχετίσεις**, για κάθε μία από τις οποίες υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις της μορφής $y = chla = \alpha + \beta x$ και $y = \ln(chla) = \alpha + \beta x$.

Ακολουθώς παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα. Από το σύνολο των συσχετίσεων αναφέρονται εκείνες για τις οποίες ισχύει $R^2 \geq 50\%$ στο μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης και $R^2 \geq 70\%$ στο μοντέλο της λογαριθμικής-γραμμικής παλινδρόμησης.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα συσχετίσεων για τη χλωροφύλλη με τη χρήση του απλού γραμμικού μοντέλου.

Χλωροφύλλη-α (Chla)		
Δείκτης	R^2	$y = chla = \alpha + \beta x$
$\exp(Rrs531/Rrs469)$	65,922	$y=1,009874x-1,278895$
Chl_C1	63,968	$y=2,259760x-0,182110$
$Rrs531/(Rrs443+Rrs469+Rrs547)$	63,023	$y=4,150905x-0,450819$
$Rrs531/(Rrs443+Rrs469+Rrs555)$	62,802	$y=3,949187x-0,436643$
$Rrs531/Rrs469$	62,664	$y=1,616400x-0,399028$
$\exp(Rrs547/Rrs469)$	62,622	$y=1,158676x-1,363523$
$(Rrs531/Rrs469)+678$	62,615	$y=1,614662x-0,398671$

$(Rrs531/Rrs469)+667$	62,604	$y=1,614587x-0,398639$
$(Rrs531/Rrs469)+645$	62,592	$y=1,613963x-0,398441$
OCI	62,544	$y=1,386580x-0,063917$
$Rrs531/(Rrs443+Rrs469+Rrs531)$	62,347	$y=4,324196x-0,454987$
$exp(Rrs555/Rrs469)$	62,284	$y=1,381574x-1,554382$
$Rrs531/(Rrs443+Rrs488+Rrs547)$	61,577	$y=4,281263x-0,515095$
$Rrs531/(Rrs443+Rrs488+Rrs555)$	61,467	$y=4,079763x-0,501347$
OC3	61,07	$y=1,294013x-0,039700$
$Rrs531/(Rrs443+Rrs488+Rrs531)$	60,92	$y=4,462115x-0,518437$
$(Rrs443-Rrs531)/Rrs469$	60,869	$y=-0,941540x+0,836742$
$exp(Rrs531/Rrs488)$	60,274	$y=1,045346x-1,426681$
$Rrs547/Rrs469$	59,815	$y=1,710269x-0,295674$
$(Rrs547/Rrs469)+678$	59,757	$y=1,708057x-0,295350$
$(Rrs547/Rrs469)+Rrs667$	59,744	$y=1,707949x-0,295316$
$(Rrs547/Rrs469)+Rrs645$	59,728	$y=1,707113x-0,295116$
$Rrs547/(Rrs443+Rrs469+Rrs547)$	59,349	$y=4,321524x-0,329262$
$Rrs547/(Rrs443+Rrs469+Rrs555)$	59,174	$y=4,118846x-0,319016$
$Rrs555/(Rrs443+Rrs469+Rrs555)$	59,153	$y=4,544059x-0,255668$
$Rrs555/Rrs469$	58,909	$y=1,862608x-0,231956$
$(Rrs555/Rrs469)+Rrs678$	58,842	$y=1,859851x-0,231668$
$(Rrs555/Rrs469)+Rrs667$	58,827	$y=1,859666x-0,231625$
$(Rrs555/Rrs469)+Rrs645$	58,8	$y=1,858368x-0,231384$
$(Rrs443-Rrs555)/Rrs469$	58,555	$y=-1,018221x+1,029653$
$Rrs555/(Rrs443+Rrs469+Rrs547)$	58,481	$y=4,686061x-0,258122$
$Rrs547/(Rrs443+Rrs469+Rrs531)$	58,457	$y=4,473026x-0,329683$
$(Rrs443-Rrs547)/Rrs469$	58,28	$y=-0,957695x+0,923693$
$Rrs555/(Rrs443+Rrs469+Rrs531)$	57,707	$y=4,852327x-0,258582$
$Rrs547/(Rrs443+Rrs488+Rrs547)$	57,701	$y=4,375177x-0,370042$
$exp(Rrs547/Rrs488)$	57,679	$y=1,181081x-1,468345$
$Rrs547/(Rrs443+Rrs488+Rrs555)$	57,64	$y=4,178123x-0,360570$
$(Rrs443-Rrs531)/Rrs488$	57,096	$y=-0,628729x+0,711854$
$Rrs547/(Rrs443+Rrs488+Rrs531)$	56,784	$y=4,526179x-0,369045$
$Rrs555/(Rrs443+Rrs488+Rrs555)$	56,774	$y=4,490280x-0,280328$
$Rrs555/(Rrs443+Rrs488+Rrs547)$	55,967	$y=4,616375x-0,281078$
$exp(Rrs555/Rrs488)$	55,894	$y=1,337755x-1,564126$
$(Rrs443-Rrs547)/Rrs488$	55,39	$y=-0,624776x+0,767495$
$(Rrs443-Rrs555)/Rrs488$	55,291	$y=-0,638934x+0,824120$
$Rrs555/(Rrs443+Rrs488+Rrs531)$	55,207	$y=4,780360x-0,280612$
$Rrs531/Rrs488$	54,301	$y=1,627120x-0,511575$
$(Rrs531/Rrs488)+Rrs678$	54,245	$y=1,624878x-0,510910$
$(Rrs531/Rrs488)+Rrs667$	54,231	$y=1,624707x-0,510836$
$(Rrs531/Rrs488)+Rrs645$	54,216	$y=1,623888x-0,510521$
$Rrs488-Rrs531$	52,869	$y=-150,353658x+0,629356$
$Rrs547/Rrs488$	52,328	$y=1,676297x-0,371088$

(Rrs547/Rrs488)+Rrs678	52,264	$y=1,673624x-0,370517$
(Rrs547/Rrs488)+Rrs667	52,249	$y=1,673424x-0,370451$
(Rrs547/Rrs488)+Rrs645	52,229	$y=1,672381x-0,370150$
Rrs555/Rrs488	50,647	$y=1,740641x-0,275800$
(Rrs555/Rrs488)+Rrs678	50,581	$y=1,737696x-0,275350$
(Rrs555/Rrs488)+Rrs667	50,564	$y=1,737419x-0,275280$
(Rrs555/Rrs488)+Rrs645	50,536	$y=1,735997x-0,274961$
Rrs469-Rrs531	50,514	$y=-93,038254x+0,554404$

Οι συνδυασμοί των καναλιών που έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα με το απλό γραμμικό μοντέλο ήταν αρκετοί. Το κανάλι b10 στα 469 nm εμφανίστηκε σε όλους τους δείκτες που έδωσαν R^2 πάνω από 62%, ενώ το κανάλι b11 στα 531 nm εμφανίστηκε στους περισσότερους δείκτες με R^2 πάνω από 60%. Αντίθετα, το κανάλι b10 στα 488 nm συμμετείχε σε όλους τους δείκτες με R^2 κάτω από 57,7% με εξαίρεση τον τελευταίο (Rrs469-Rrs531). Το κανάλι b12 (547nm και 555 nm) συμμετείχε στην πλειοψηφία των δεικτών με R^2 μικρότερο του 60%, ενώ επίσης εμφανίστηκε και στους δείκτες με το μικρότερο ικανοποιητικό R^2 (μικρότερο του 51%). Στο σύνολο των δεικτών δεν παρατηρείται επανάληψη ενός συγκεκριμένου είδους πράξεων ανάμεσα στα κανάλια, το οποίο να εμφανίζει συγκεκριμένα μεγαλύτερες συσχετίσεις.

Σύμφωνα με την NASA (2017), το προϊόν chlor_a συνδυάζει δύο αλγόριθμους, τον αλγόριθμο O'Reilly OCx και τον αλγόριθμο χρωματικού δείκτη OCI του Hu (chl_hu). Στην περίπτωση του MODIS χρησιμοποιήθηκαν για τον Chl_{OCI} τα $\lambda_{blue} = 443$ nm, $\lambda_{green} = 547$ nm και $\lambda_{red} = 667$ nm. Για τιμές της χλωροφύλλης μικρότερες ή ίσες των $0,25$ mg/ m^3 χρησιμοποιείται ο δείκτης CI, ενώ για τιμές μεγαλύτερες των $0,3$ mg/ m^3 χρησιμοποιείται ο OCx, που στην περίπτωση του MODIS αντιστοιχεί στον OC3 (λ_{blue} : $443 > 488$ nm, $\lambda_{green} = 547$ nm). Συγκεκριμένα, ο Hu et al. (2012) αναφέρει ότι ο δείκτης CI (CIA) μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε χαμηλές συγκεντρώσεις, επειδή η σχέση «καταρρέει» γρήγορα για $CI > 0,0005$ sr^{-1} , που αντιστοιχεί σε $Chl_{CI} \approx 0,4$ mg/ m^3 . Πάνω από αυτή τη συγκέντρωση ο OCI υποτιμά σημαντικά τη χλωροφύλλη, επομένως θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ο OC3M. Για τις ενδιάμεσες συγκεντρώσεις χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός μεταξύ των δύο αλγορίθμων (OC3 και OCI), όπως φαίνεται στην σελίδα 45.

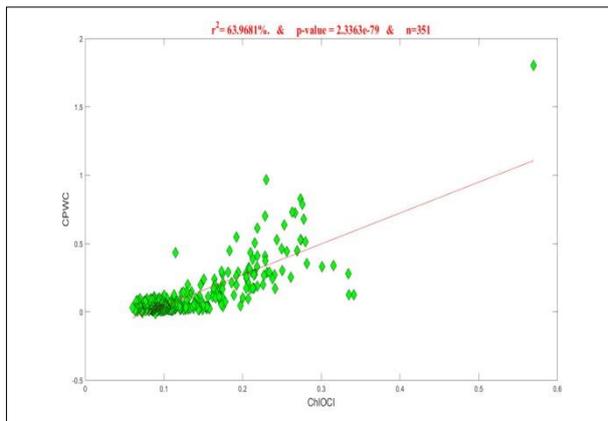
Οι περισσότερες τιμές της χλωροφύλλης των in situ δεδομένων ήταν μικρότερες των $0,25$ mg/ m^3 , μία (1) τιμή ήταν μεγαλύτερη από $0,3$ mg/ m^3 , ενώ εννιά (9) τιμές καταλάμβαναν το διάστημα $0,25 - 0,3$ mg/ m^3 . Υπολογίστηκαν και οι τρεις δείκτες (Chl_{CI} , OCI, OC3M) για όλες τις τιμές της χλωροφύλλης.

Οι αλγόριθμοι OC3 και OCI είχαν R^2 πάνω από 60% (Εικόνες 14 και 15), ενώ ο CI έδωσε την δεύτερη υψηλότερη τιμή (περίπου 64%). Επιπλέον, ο αλγόριθμος OCI έδωσε $R^2 = 62,544\%$, δηλαδή μεγαλύτερη τιμή από τον OC3, αλλά μικρότερη από τον CI. Συνεπώς, ο διαχωρισμός των αλγορίθμων με βάση τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης που προτείνει ο Hu et al. (2012) έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη περίπτωση, με εξαίρεση το γεγονός ότι είχε μικρότερο R^2 από τον CI. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι στην πλειοψηφία των μετρήσεων οι τιμές της χλωροφύλλης ήταν μικρότερες από $0,25$ mg/ m^3 .

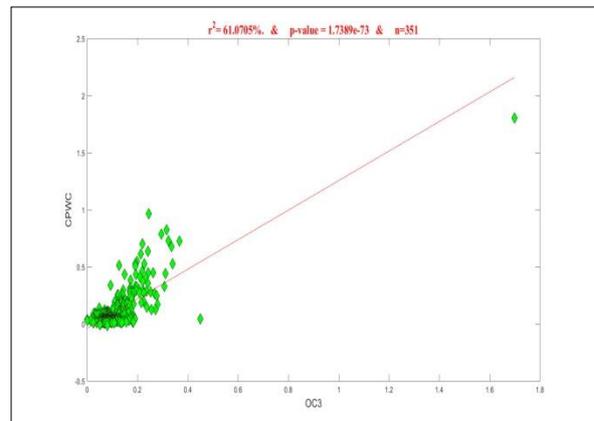
Ένας, επιπλέον, δείκτης που εξετάστηκε ήταν ο αλγόριθμος MedOC3 που προτάθηκε από τους Santoleri et al. (2008). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, πρόκειται για έναν τοπικό

εμπειρικό αλγόριθμο, παρόμοιο με τον παγκόσμιο αλγόριθμο, αλλά αποκλειστικά συντονισμένο για τη Μεσόγειο Θάλασσα σε ένα αντιπροσωπευτικό ανοιχτό βιο-οπτικό σύνολο δεδομένων θαλασσινού νερού. Σύμφωνα με την Santoleri et al. (2008) οι τυποποιημένοι αλγόριθμοι υπερεκτιμούν τη χαμηλή τιμή Chl-a και υποτιμούν τις υψηλές συγκεντρώσεις, συνεπώς συνίσταται η εφαρμογή αλγορίθμων προσαρμοσμένων σε τοπικό επίπεδο. Οι Drakopoulos et al. (2015) έδειξαν για την περιοχή του Βορείου Αιγαίου Πελάγους ότι ο OC3 υπερεκτιμά τις τιμές της χλωροφύλλης, ιδιαίτερα για χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ ο MedOC3 δίνει καλύτερα αποτελέσματα και φαίνεται να είναι καλύτερα «ισορροπημένος» στις συγκεντρώσεις πεδίου. Στην περίπτωση του MedOC3 χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια κανάλια που εφαρμόστηκαν και στον OC3 (λ_{blue} : 443 > 488 nm, λ_{green} = 547 nm), με διαφορετικούς συντελεστές “c” στην εξίσωση. Παρά όλα αυτά, ο αλγόριθμος MedOC3 στη συγκεκριμένη περίπτωση έδωσε $R^2 \approx 47,2\%$, τιμή σημαντικά μικρότερη από τον OC3, επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική (Εικόνα 16).

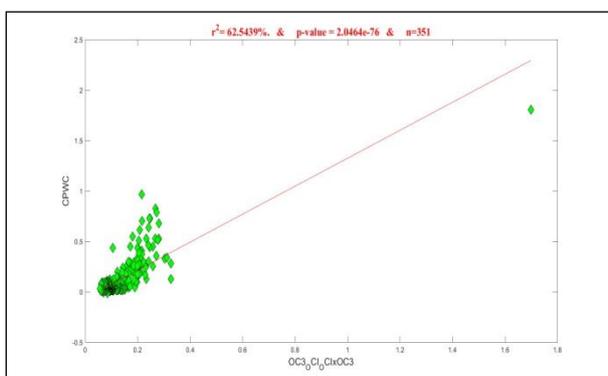
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα διαγράμματα της χλωροφύλλης in situ και των παραπάνω δεικτών και των αλγορίθμων (CPWC είναι οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης των μετρήσεων in situ σε mg/m^3). Παρατηρείται μία απομακρυσμένη τιμή με συγκέντρωση χλωροφύλλης περίπου $1,8 \text{ mg}/\text{m}^3$, η οποία στις δοκιμές που έγιναν για τη βελτίωση των διαγραμμάτων και του R^2 αφαιρέθηκε. Με αυτή την τιμή το R^2 των δεικτών φθάνει περίπου το 66%, ενώ χωρίς αυτή την τιμή το R^2 δεν ξεπερνάει το 54%. Επομένως, η τιμή αυτή παρέμεινε στα τελικά αποτελέσματα.



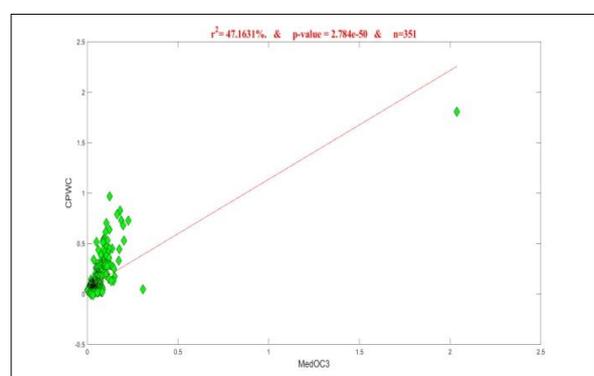
Εικόνα 13: Δείκτης CI.



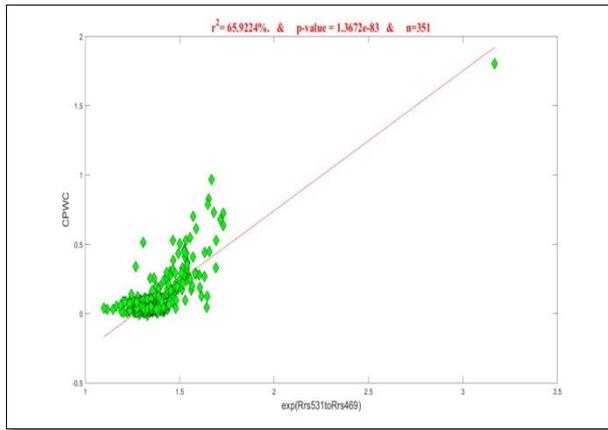
Εικόνα 14: Αλγόριθμος OC3.



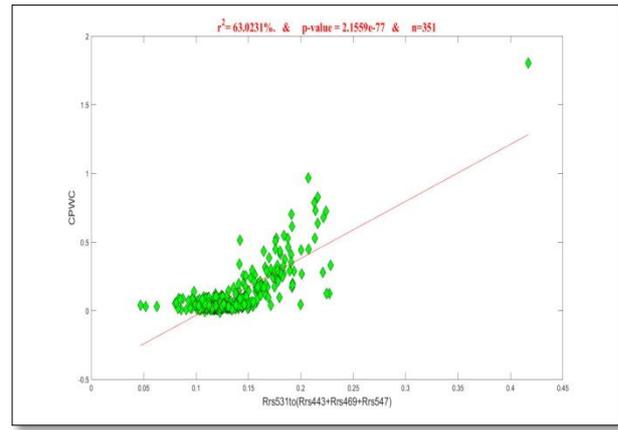
Εικόνα 15: Αλγόριθμος OCI.



Εικόνα 16: Αλγόριθμος MedOC3.

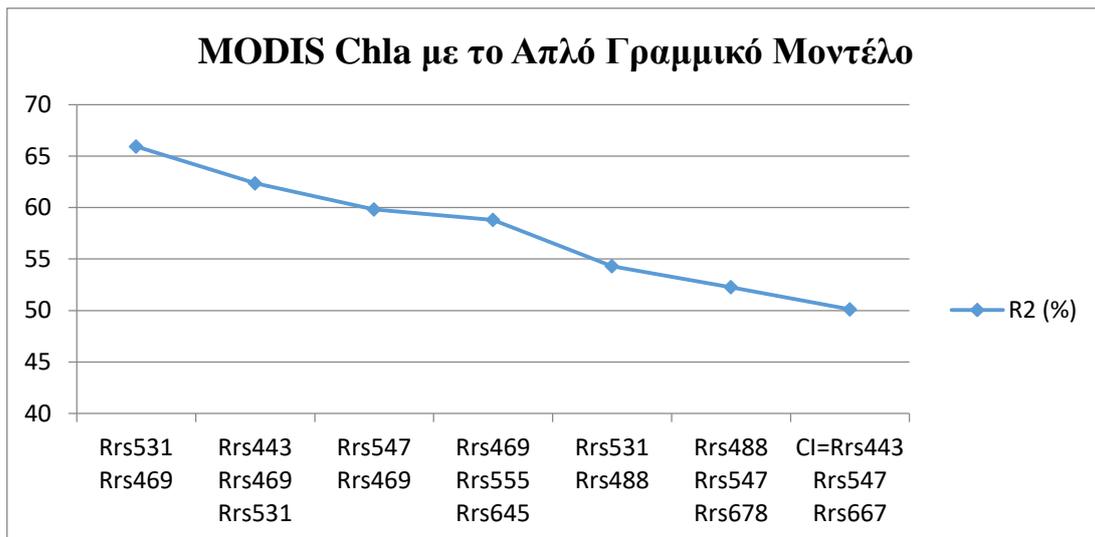


Εικόνα 17: Δείκτης $\exp(Rrs531/Rrs469)$



Εικόνα 18: Δείκτης $Rrs531 / (Rrs443 + Rrs469 + Rrs547)$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 3) φαίνεται το ποσοστό της συσχέτισης των αντίστοιχων καναλιών (συνδυασμών) για τη χλωροφύλλη με το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Το κανάλι b8 (Rrs 412 nm) δεν έχει συμπεριληφθεί, καθώς δεν συμμετείχε στους δείκτες που δίνουν R^2 μεγαλύτερο του 50%.



Διάγραμμα 3: Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για τη χλωροφύλλη του MODIS με το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Το μοντέλο της λογαριθμικής – γραμμικής παλινδρόμησης έδωσε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με εκείνο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς το R^2 παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 70% (Πίνακας 10).

Πίνακας 10: Αποτελέσματα συσχετίσεων για τη χλωροφύλλη με τη χρήση του λογαριθμικού-γραμμικού μοντέλου.

Χλωροφύλλη-α (Chla)		
Δείκτης	R^2	$y = \ln(chla) = \alpha + \beta x$
$\exp[(Rrs488-Rrs645)/(Rrs531-Rrs667)]$	78,289	$y = 4,036649 * \exp(-0,325465 * x) + 0,033595 * \exp(0,000475 * x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs645)/(Rrs531-Rrs667)]$	78,271	$y = 2,627859 * \exp(-0,205555 * x) + 0,047009 * \exp(-0,000131 * x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs645)/(Rrs547-Rrs667)]$	78,261	$y = 2,605914 * \exp(-0,151143 * x) + 0,048696 * \exp(-0,000016 * x)$

$\exp[(Rrs488-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs667)]$	78,257	$y=3,890967*\exp(-0,316560*x)+ 0,031354*\exp(0,000821*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs667)]$	77,823	$y=4,059576*\exp(-0,320110*x)+ 0,032017*\exp(0,000797*x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs678)]$	77,557	$y=2,690350*\exp(-0,204688*x)+ 0,047374*\exp(-0,000074*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs678)]$	76,798	$y=4,055098*\exp(-0,319071*x)+ 0,032749*\exp(0,000486*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs645)/ (Rrs547-Rrs678)]$	76,741	$y=2,683487*\exp(-0,150641*x)+ 0,049083*\exp(-0,000000*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs678)]$	76,415	$y=4,220615*\exp(-0,329726*x)+ 0,035469*\exp(0,000219*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs678)/ (Rrs547-Rrs678)]$	76,207	$y=2,583116*\exp(-0,146015*x)+ 0,048951*\exp(-0,000001*x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs667)]$	75,936	$y=2,403946*\exp(-0,195891*x)+ 0,046187*\exp(-0,000207*x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs667)]$	75,917	$y=2,479107*\exp(-0,197457*x)+ 0,046617*\exp(-0,000210*x)$
$(Rrs469-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs667)$	75,86	$y=9814,514544*\exp(-0,796386*x)+ (-9809,949924)*\exp(-0,796281*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs678)]$	75,772	$y=4,230672*\exp(-0,323843*x)+ 0,034118*\exp(0,000363*x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs678)]$	75,558	$y=2,504888*\exp(-0,196983*x)+ 0,046965*\exp(-0,000126*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs547-Rrs678)]$	75,472	$y=2,637841*\exp(-0,146590*x)+ 0,049271*\exp(-0,000001*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs645)]$	75,354	$y=3,785052*\exp(-0,307100*x)+ 0,027864*\exp(0,005147*x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs678)]$	75,177	$y=2,556805*\exp(-0,197632*x)+ 0,047217*\exp(-0,000110*x)$
$(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs667)$	75,112	$y=6404,924608*\exp(-0,789262*x)+ (-6400,445563)*\exp(-0,789104*x)$
$(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs667)$	74,976	$y=-51209,542238*\exp(-0,812156*x)+ 51214,300841*\exp(-0,812177*x)$
$(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs555-Rrs667)$	74,601	$y=3,967945*\exp(-0,667909*x)+ 0,004086*\exp(0,035658*x)$
$(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs555-Rrs667)$	74,56	$y=4,155314*\exp(-0,677816*x)+ 0,004701*\exp(0,033628*x)$
$(Rrs469-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs678)$	74,529	$y=238622,133372*\exp(-0,817351*x)+ (-238617,319640)*\exp(-0,817346*x)$
$(Rrs469-Rrs645)/ (Rrs555-Rrs667)$	74,324	$y=3,976481*\exp(-0,672313*x)+ 0,005309*\exp(0,030857*x)$
$(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs678)$	74,083	$y=21715,055324*\exp(-0,808054*x)+ (-21710,322184)*\exp(-0,808006*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs678)/ (Rrs547-Rrs667)]$	74,071	$y=1,435242*\exp(-0,094077*x)+ 1271846579904,563200*\exp(-10,312414*x)$
$\exp[(Rrs469-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs645)]$	73,985	$y=148650,415228*\exp(-5,143955*x)+ 1,139231*\exp(-0,106657*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs547-Rrs667)]$	73,772	$y=1,491389*\exp(-0,095817*x)+ 1766955434042,824500*\exp(-9,999930*x)$
$(Rrs469-Rrs645)/ (Rrs547-Rrs667)$	73,761	$y=10327,575301*\exp(-0,615738*x)+ (-10323,703815)*\exp(-0,615682*x)$
$(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs678)$	73,679	$y=-13262,583025*\exp(-0,834859*x)+ 13267,624538*\exp(-0,834943*x)$
$(Rrs443-Rrs645)/$	73,642	$y=2,779980*\exp(-0,579897*x)+$

(Rrs555-Rrs667)		$0,010299 \cdot \exp(0,020866 \cdot x)$
$\exp(\text{Rrs488}/\text{Rrs531})$	73,641	$y = 4,548409 \cdot \exp(-0,371377 \cdot x) + 0,037209 \cdot \exp(0,000012 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs667})$	73,615	$y = 17393,389162 \cdot \exp(-0,989702 \cdot x) + (-17386,830430) \cdot \exp(-0,989589 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs667})$	73,425	$y = 41281,026773 \cdot \exp(-0,617057 \cdot x) + (-41276,229720) \cdot \exp(-0,617040 \cdot x)$
$\exp(\text{Rrs469}/\text{Rrs531})$	73,416	$y = 0,048805 \cdot \exp(-0,000011 \cdot x) + 2,819284 \cdot \exp(-0,237501 \cdot x)$
$(\text{Rrs443}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs667})$	73,291	$y = 6677,077183 \cdot \exp(-0,684659 \cdot x) + (-6674,192928) \cdot \exp(-0,684579 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs667})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs667})$	73,219	$y = -20967,290834 \cdot \exp(-1,030852 \cdot x) + 20974,478658 \cdot \exp(-1,030954 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs645})$	73,207	$y = -16809,976937 \cdot \exp(-0,593767 \cdot x) + 16814,848873 \cdot \exp(-0,593810 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs667})$	73,053	$y = -21489,270449 \cdot \exp(-1,018139 \cdot x) + 21495,980991 \cdot \exp(-1,018231 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs667})$	73,004	$y = 43910,011436 \cdot \exp(-0,748287 \cdot x) + (-43904,697104) \cdot \exp(-0,748261 \cdot x)$
$(\text{Rrs469}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs645})$	72,899	$y = 3,926630 \cdot \exp(-0,651879 \cdot x) + 0,000572 \cdot \exp(0,202812 \cdot x)$
$(\text{Rrs469}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs645})$	72,876	$y = -32066,412891 \cdot \exp(-0,775972 \cdot x) + 32070,837210 \cdot \exp(-0,776003 \cdot x)$
$(\text{Rrs443}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs678})$	72,846	$y = 5789,671310 \cdot \exp(-0,690298 \cdot x) + (-5786,688093) \cdot \exp(-0,690202 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs667})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs667})$	72,721	$y = -107575,616443 \cdot \exp(-0,771659 \cdot x) + 107581,312945 \cdot \exp(-0,771670 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs667})$	72,713	$y = -37417,009425 \cdot \exp(-0,765125 \cdot x) + 37422,428199 \cdot \exp(-0,765154 \cdot x)$
$(\text{Rrs469}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs667})$	72,656	$y = -57985,780049 \cdot \exp(-0,603084 \cdot x) + 57989,507170 \cdot \exp(-0,603094 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs667})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs667})$	72,602	$y = 5,822110 \cdot \exp(-0,874362 \cdot x) + 0,000304 \cdot \exp(0,084113 \cdot x)$
$(\text{Rrs469}-\text{Rrs667})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs667})$	72,583	$y = -75799,819375 \cdot \exp(-0,619510 \cdot x) + 75803,744703 \cdot \exp(-0,619518 \cdot x)$
$(\text{Rrs469}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs678})$	72,344	$y = 12565,063256 \cdot \exp(-0,634271 \cdot x) + (-12560,963694) \cdot \exp(-0,634222 \cdot x)$
$\text{Rrs469}/\text{Rrs531}$	72,184	$y = 2399,431665 \cdot \exp(-0,947075 \cdot x) + (-2394,068388) \cdot \exp(-0,946588 \cdot x)$
$(\text{Rrs443}-\text{Rrs667})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs667})$	72,09	$y = 2,759410 \cdot \exp(-0,576712 \cdot x) + 0,010175 \cdot \exp(0,021230 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs678})$	71,893	$y = 25375,263617 \cdot \exp(-1,035594 \cdot x) + (-25368,065893) \cdot \exp(-1,035510 \cdot x)$
$(\text{Rrs443}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs667})$	71,862	$y = 2,638480 \cdot \exp(-0,566895 \cdot x) + 0,009275 \cdot \exp(0,022774 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs531}-\text{Rrs645})$	71,841	$y = 35311,348747 \cdot \exp(-0,986135 \cdot x) + (-35304,616254) \cdot \exp(-0,986077 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs667})$	71,764	$y = 5,479441 \cdot \exp(-0,867881 \cdot x) + 0,001178 \cdot \exp(0,060047 \cdot x)$
$\exp[(\text{Rrs488}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs645})]$	71,709	$y = 2,127809 \cdot \exp(-0,129830 \cdot x) + 0,047921 \cdot \exp(-0,000285 \cdot x)$
$\exp[(\text{Rrs469}-\text{Rrs645})/(\text{Rrs547}-\text{Rrs667})]$	71,707	$y = 1,665223 \cdot \exp(-0,084661 \cdot x) + 0,055444 \cdot \exp(-0,000000 \cdot x)$
$(\text{Rrs488}-\text{Rrs678})/(\text{Rrs555}-\text{Rrs645})$	71,544	$y = -108224,789680 \cdot \exp(-0,590217 \cdot x) + 108229,492265 \cdot \exp(-0,590223 \cdot x)$

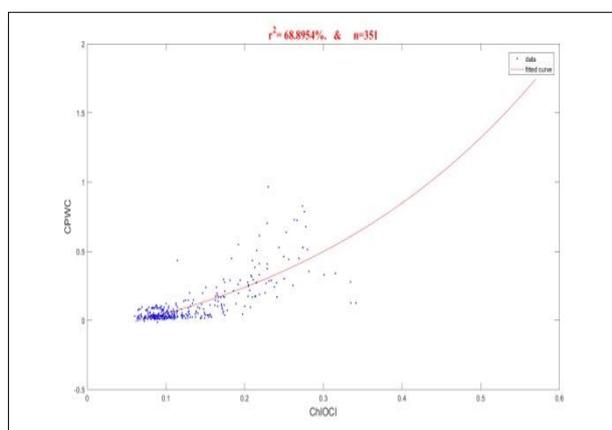
(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs547-Rrs678)	71,497	$y=20076,669357*\exp(-0,623157*x)+$ $(-20072,698787)*\exp(-0,623128*x)$
(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs547-Rrs678)	71,197	$y=18738,285715*\exp(-0,642161*x)+$ $(-18734,097371)*\exp(-0,642129*x)$
(Rrs488-Rrs678)/ (Rrs547-Rrs678)	71,135	$y=250608,098828*\exp(-0,777899*x)+$ $(-250602,333579)*\exp(-0,777894*x)$
(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs678)	71,123	$y=-16393,142857*\exp(-1,086157*x)+$ $16401,105157*\exp(-1,086300*x)$
(Rrs488-Rrs645)/ (Rrs531-Rrs678)	71,019	$y=42804,711766*\exp(-1,069433*x)+$ $(-42797,340139)*\exp(-1,069383*x)$
(Rrs469-Rrs678)/ (Rrs555-Rrs645)	70,755	$y=-8788,380703*\exp(-0,511047*x)+$ $8791,858113*\exp(-0,511081*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs678)/$ $(Rrs531-Rrs645)]$	70,703	$y=3,365647*\exp(-0,295134*x)+$ $0,026962*\exp(0,006285*x)$
(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs555-Rrs645)	70,69	$y=5,930213*\exp(-0,865301*x)+$ $0,000015*\exp(0,449688*x)$
(Rrs488-Rrs645)/ (Rrs547-Rrs645)	70,673	$y=-41278,673560*\exp(-0,725059*x)+$ $41283,896444*\exp(-0,725085*x)$
(Rrs469-Rrs667)/ (Rrs555-Rrs645)	70,628	$y=3,907706*\exp(-0,651188*x)+$ $0,000644*\exp(0,204508*x)$
$\exp[(Rrs488-Rrs667)/$ $(Rrs531-Rrs645)]$	70,49	$y=2,176733*\exp(-0,227415*x)+$ $268092790391,596800*\exp(-10,116485*x)$
(Rrs488-Rrs667)/ (Rrs547-Rrs678)	70,487	$y=72631,829829*\exp(-0,806485*x)+$ $(-72625,621573)*\exp(-0,806467*x)$
(Rrs488-Rrs645)/ (Rrs547-Rrs678)	70,467	$y=-9506,351326*\exp(-0,796627*x)+$ $9512,207639*\exp(-0,796751*x)$
(Rrs443-Rrs667)/ (Rrs531-Rrs667)	70,375	$y=6167,478811*\exp(-0,669169*x)+$ $(-6164,718221)*\exp(-0,669086*x)$
(Rrs443-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs667)	70,269	$y=-5246,223081*\exp(-0,651932*x)+$ $5248,855604*\exp(-0,652025*x)$
(Rrs443-Rrs645)/ (Rrs547-Rrs667)	70,094	$y=-14121,449389*\exp(-0,530737*x)+$ $14123,930304*\exp(-0,530757*x)$
(Rrs443-Rrs678)/ (Rrs531-Rrs678)	70,076	$y=-7044,373528*\exp(-0,659298*x)+$ $7047,111772*\exp(-0,659370*x)$

Οι συνδυασμοί των καναλιών που έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα με το λογαριθμικό-γραμμικό μοντέλο ήταν περισσότεροι από εκείνους του απλού γραμμικού μοντέλου. Στους δείκτες με R^2 πάνω από 75% δεν εμφανίστηκαν τα κανάλια b8 (412 nm), και b9 (443 nm), ενώ το κανάλι b12 στα 555 nm εμφανίστηκε για $R^2=74,6\%$. Το κανάλι b8 (412 nm) εμφανίστηκε στους δείκτες με R^2 μικρότερο του 58,15%, σε αντίθεση με το απλό γραμμικό μοντέλο όπου δεν εμφανιζόταν καθόλου, καθώς συμμετείχε σε δείκτες που δεν θεωρούνται ικανοποιητικοί ($R^2<50\%$). Επίσης, το κανάλι b10 (469, 488 nm) συμμετείχε σε όλους τους δείκτες με $R^2>75\%$. Στο προηγούμενο μοντέλο το κανάλι b10 συμμετείχε επίσης στους δείκτες με τις μεγαλύτερες τιμές R^2 (>62,3%) όμως μόνο στα 469 nm, καθώς το b10 στα 488 nm αντιστοιχούσε σε δείκτες με R^2 μικρότερο του 57,7%. Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο, δεν παρατηρείται επανάληψη ενός συγκεκριμένου είδους πράξεων ανάμεσα στα κανάλια στο σύνολο των δεικτών που να εμφανίζει συγκεκριμένα μεγαλύτερες συσχετίσεις.

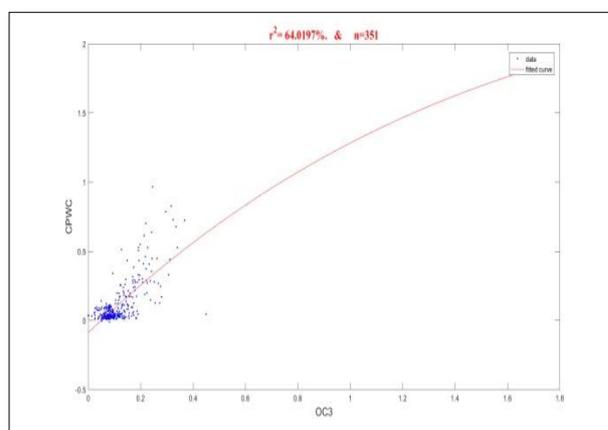
Στο μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης ο δείκτης CI είχε το μεγαλύτερο R^2 (= 63,968%) συγκριτικά με τον αλγόριθμο OCI ($R^2=62,544\%$) και τον OC3 (=61,07%). Αντίθετα, στο λογαριθμικό - γραμμικό μοντέλο ο αλγόριθμος OCI έδωσε το μεγαλύτερο R^2 (=69,443%),

ενώ ο δείκτης CI και ο αλγόριθμος MedOC3 είχαν τιμές R^2 μεγαλύτερες του 65% (68,895% και 65,911% αντίστοιχα). Επομένως, ο OCI έδωσε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα με το γραμμικό – λογαριθμικό μοντέλο, συγκριτικά με τους υπόλοιπους αλγόριθμους. Ο αλγόριθμος MedOC3 έδωσε καλύτερη συσχέτιση από τον OC3 με το γραμμικό-λογαριθμικό μοντέλο, σε αντίθεση με το γραμμικό μοντέλο όπου μεγαλύτερο R^2 έδινε ο OC3.

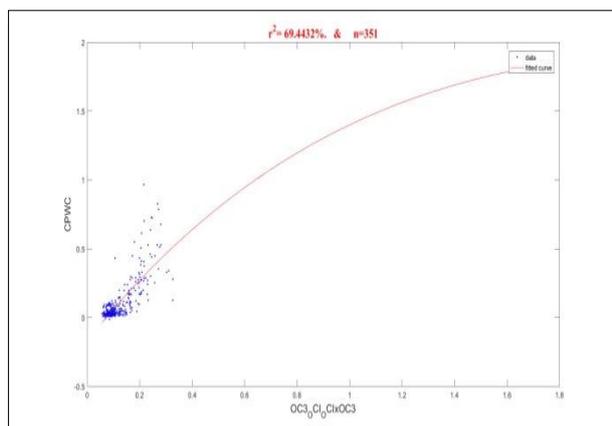
Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο, στα διαγράμματα στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνες 19-23) (CPWC είναι οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης των μετρήσεων in situ σε mg/m^3) παρατηρείται μία απομακρυσμένη τιμή, η οποία στις δοκιμές που έγιναν για τη βελτίωση των διαγραμμάτων και του R^2 αφαιρέθηκε. Με αυτή την τιμή το R^2 των δεικτών φθάνει περίπου το 78%, ενώ χωρίς αυτή την τιμή το R^2 δεν ξεπερνάει το 76%. Επομένως, η τιμή αυτή παρέμεινε στα τελικά αποτελέσματα. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των R^2 με και χωρίς την τιμή αυτή ήταν σημαντικά μικρότερη σε αυτό το μοντέλο από εκείνη στο γραμμικό μοντέλο.



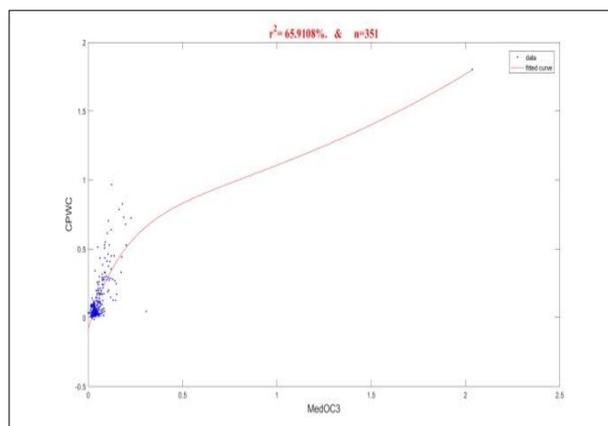
Εικόνα 19: Αλγόριθμος CI.



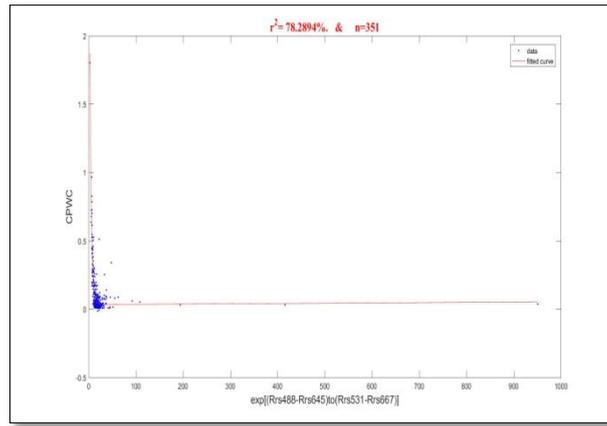
Εικόνα 20: Αλγόριθμος OC3.



Εικόνα 21: Αλγόριθμος OCI.

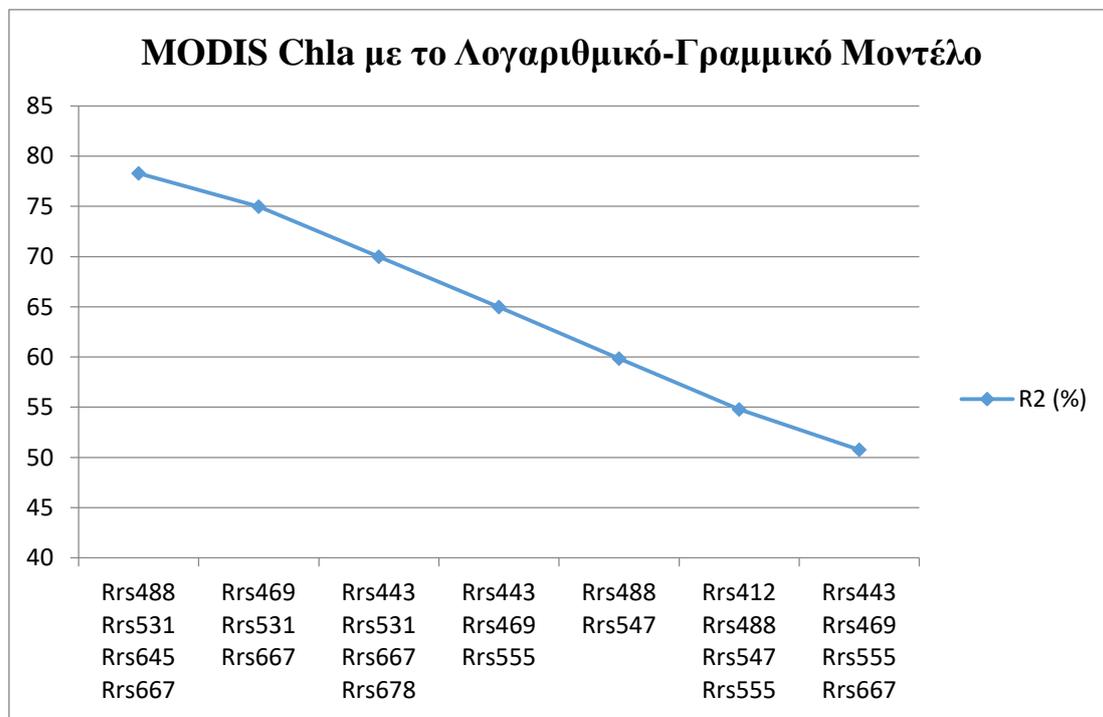


Εικόνα 22: Αλγόριθμος MedOC3



Εικόνα 23: Δείκτης $\exp[(Rrs488-Rrs645)/(Rrs531-Rrs667)]$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 4) φαίνεται το ποσοστό της συσχέτισης των αντίστοιχων καναλιών (συνδυασμών) για τη χλωροφύλλη με το μοντέλο της λογαριθμικής-γραμμικής παλινδρόμησης. Έχουν συμπεριληφθεί όλα τα κανάλια του MODIS.



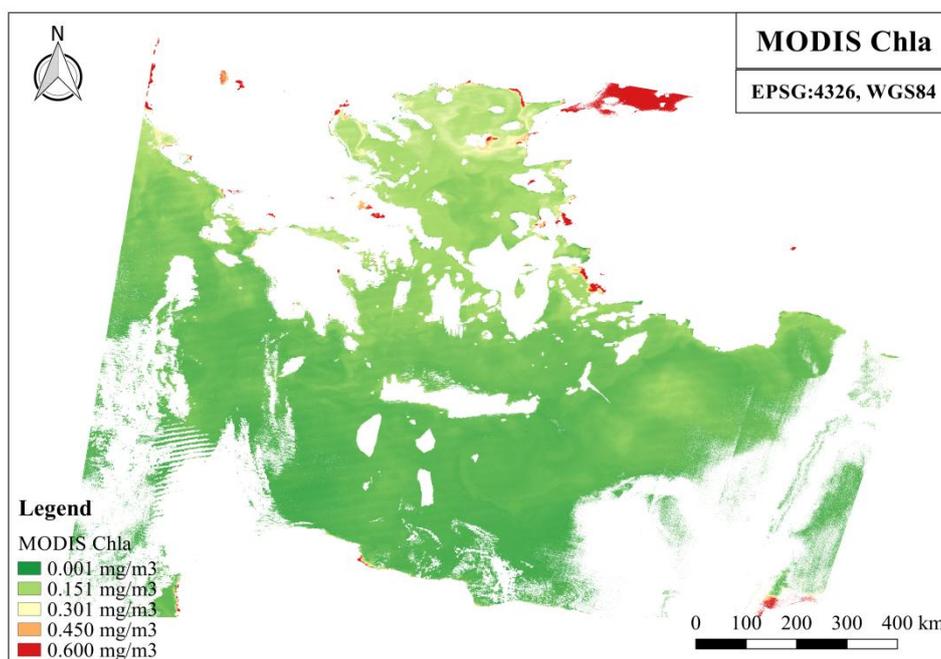
Διάγραμμα 4: Συνδυασμοί καναλιών και συσχετίσεις για τη χλωροφύλλη του MODIS με το μοντέλο της λογαριθμικής-γραμμικής παλινδρόμησης.

4.2 Αποτελέσματα Συσχετίσεων για τα νέα μοντέλα που αναπτύχθηκαν

Σε αυτό το στάδιο διερευνήθηκαν οι συσχετίσεις της χλωροφύλλης του MODIS και των γραμμικών μοντέλων New Model 1 ($y=1,009874x-1,278895$, δείκτης $\exp(Rrs531/Rrs469)$) και New Model 2 ($y=4,150905x-0,450819$, δείκτης $Rrs531/(Rrs443+Rrs469+Rrs547)$) που έδωσαν τις μεγαλύτερες τιμές R^2 (Πίνακας 9).

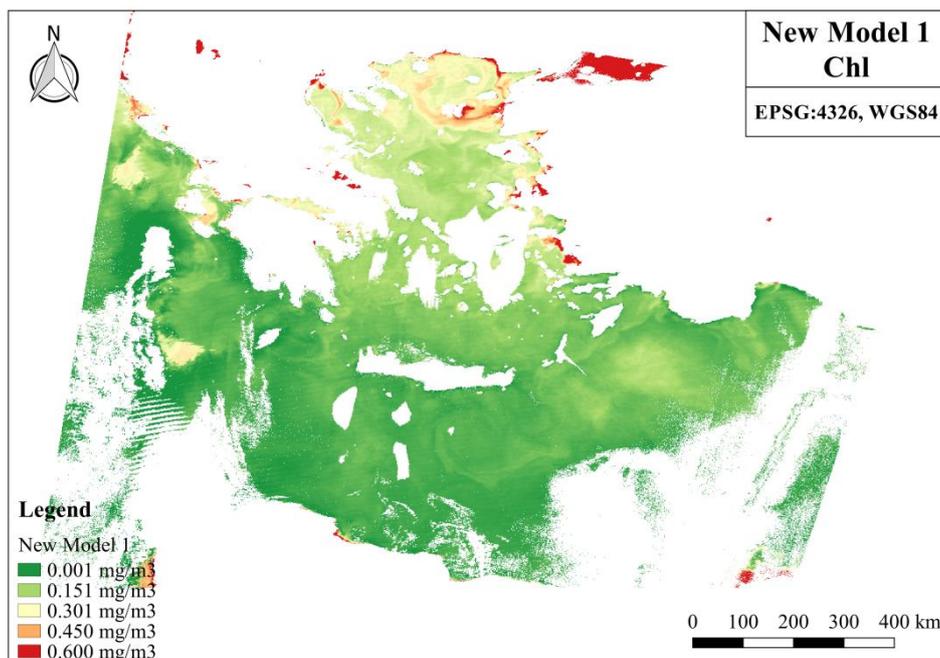
Ο δορυφόρος MODIS χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο OCI ($\lambda_{blue} = 443 \text{ nm}$, $\lambda_{green} = 547 \text{ nm}$ και $\lambda_{red} = 667 \text{ nm}$) για τον υπολογισμό της χλωροφύλλης-α. Ακολούθως, παρουσιάζεται ο χάρτης που

δημιουργήθηκε με βάση τον αλγόριθμο αυτό (Χάρτης 1). Στο τμήμα του Κεντρικού και Νοτίου Αιγαίου επικρατούν συγκεντρώσεις χλωροφύλλης μικρότερες από $0,25 \text{ mg/m}^3$, επομένως το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο σε αυτή την περιοχή. Στο τμήμα του Βορείου Αιγαίου εντοπίστηκαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της επαφής του Αιγαίου με τη Θάλασσα του Μαρμαρά. Το ανώτερο στρώμα του υδάτινου σώματος του ΒΑ Αιγαίου χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεταβλητής εκροής υφάλμυρων υδάτων της Μαύρης Θάλασσας μέσω των στενών των Δαρδανελίων. Φέρουν θρεπτικά συστατικά και η αφθονία του CDOM στην περιοχή πιστεύεται ότι συνδέεται με αυτά (Drakopoulos et al. 2015 όπως αναφέρουν οι Zeri et al. 2014). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο αλγόριθμος OC3M υπερεκτιμά τις τιμές των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης στις παράκτιες περιοχές και στις περιοχές με οργανική ύλη (CDOM) (Jiang et al., 2017, Brewin et al., 2015). Επιπλέον, η αβεβαιότητα του αλγόριθμου OC3M στα ανοικτά θαλάσσια ύδατα είναι $\pm 35\%$. Το γεγονός αυτό παρατηρείται μόνο στις πιο ολιγοτροφικές ζώνες του κόσμου (Pieri et al., 2015, όπως αναφέρουν οι Moore et al., 2009). Επομένως, τα αποτελέσματα του OCI είναι αξιόπιστα για την περιοχή του Νοτίου Αιγαίου, αλλά όχι για την περιοχή του Βορείου Αιγαίου.



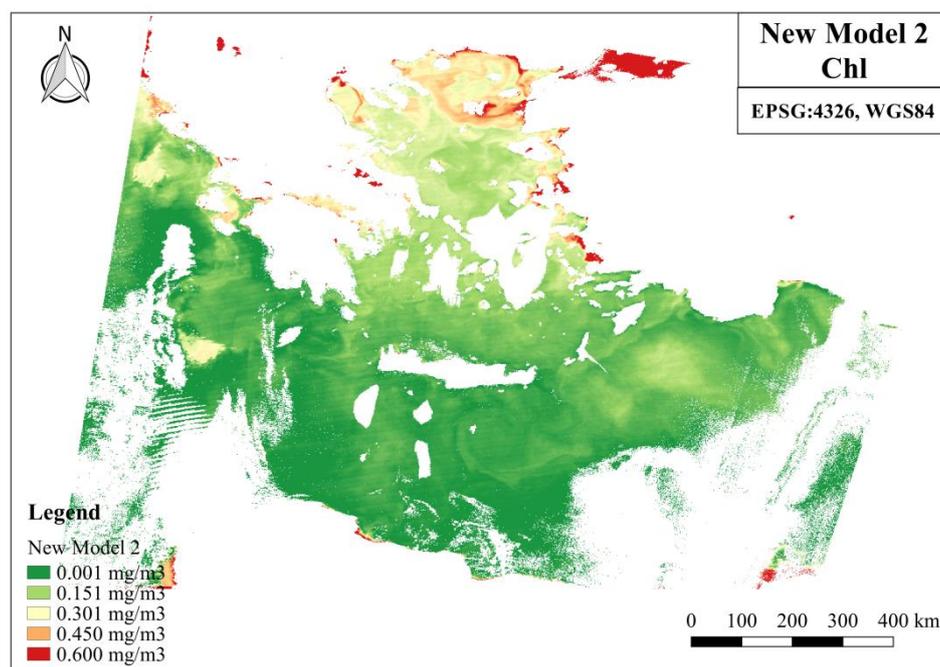
Χάρτης 1: Χλωροφύλλη με βάση τον αλγόριθμο OCI του MODIS.

Στην παράγραφο 4.2 το μοντέλο $y=1,009874x-1,278895$ (δείκτης $\exp(Rrs531/Rrs469)$) ήταν το μοναδικό που έδινε μεγαλύτερο R^2 από τον δείκτη CI και χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του χάρτη του New Model 1 (Χάρτης 2). Μελετήθηκε επίσης το μοντέλο $y=4,150905x-0,450819$ (δείκτης $Rrs531/(Rrs443+Rrs469+Rrs547)$) από το οποίο δημιουργήθηκε ο χάρτης του New Model 2 (Χάρτης 3). Για τη δημιουργία των χαρτών αυτών χρησιμοποιήθηκαν τα κανάλια του MODIS προκειμένου να συγκριθούν τα μοντέλα με τον αλγόριθμο OCI.



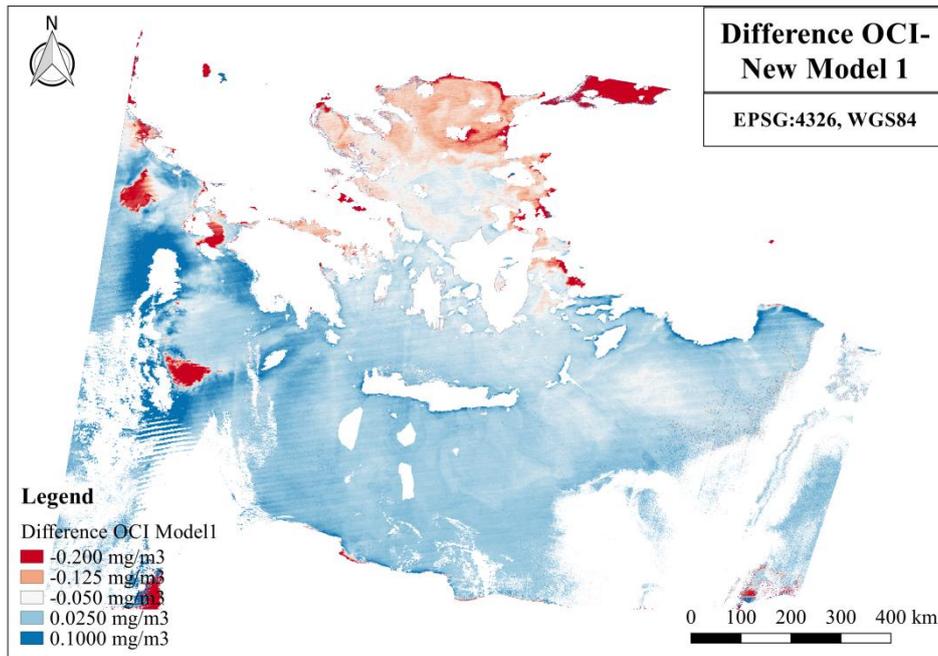
Χάρτης 2: Χλωροφύλλη με βάση το μοντέλο New Model 1.

Μεταξύ των δύο μοντέλων εντοπίστηκαν τα ίδια μοτίβα σε όλη την περιοχή, όμως παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου, καθώς το New Model 2 έδωσε υψηλότερες τιμές συγκριτικά με το New Model 1.



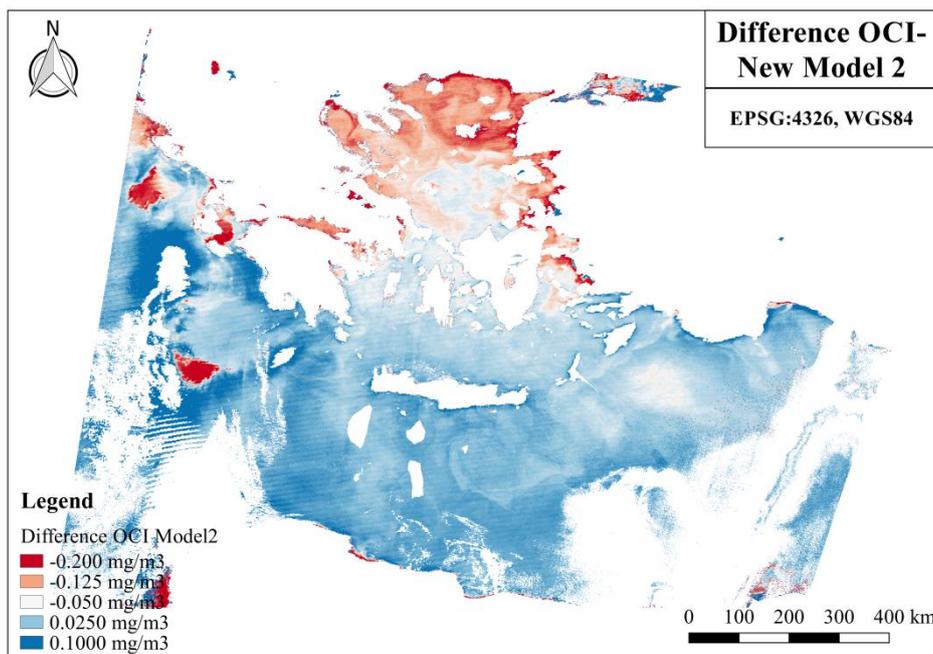
Χάρτης 3: Χλωροφύλλη με βάση το μοντέλο New Model 2.

Ακολουθεί η διαφορά του OCI με τα μοντέλα New Model 1 και New Model 2. Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα στο χάρτη παίρνουν αρνητικές τιμές, καθώς οι τιμές της χλωροφύλλης του OCI είναι μικρότερες από αυτές που δίνει το New Model 1 (Χάρτης 4) και το New Model 2 (Χάρτης 5).



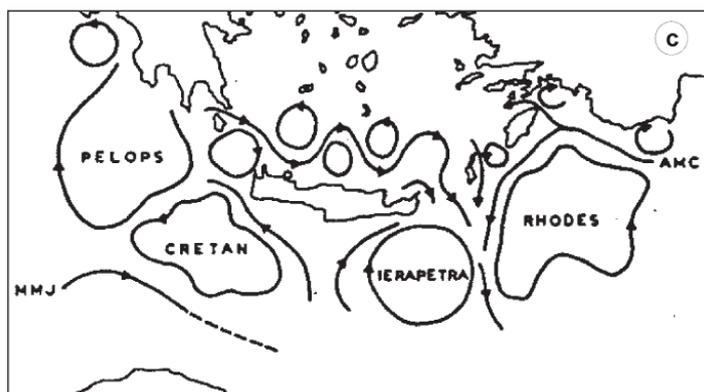
Χάρτης 4: Διαφορά του OCI του MODIS με το New Model 1.

Στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου τα μοντέλα (New Model 1, New Model 2) έδωσαν υψηλότερες τιμές χλωροφύλλης από τον OCI, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές του χάρτη ήταν μεγαλύτερες οι τιμές του OCI. Παρατηρήθηκαν τα ίδια χρωματικά μοτίβα και στους δύο χάρτες, όμως στον χάρτη που ακολουθεί (Χάρτης 5) εμφανίζονται πιο έντονες οι χρωματικές διαφοροποιήσεις κυρίως στην περιοχή του Νοτίου Αιγαίου. Αυτό συμβαίνει επειδή οι τιμές της χλωροφύλλης του New Model 2 στην συγκεκριμένη περιοχή είναι πιο μικρές από τις αντίστοιχες τιμές στο New Model 1, επομένως, το New Model 1 προσεγγίζει περισσότερο το προϊόν του MODIS.



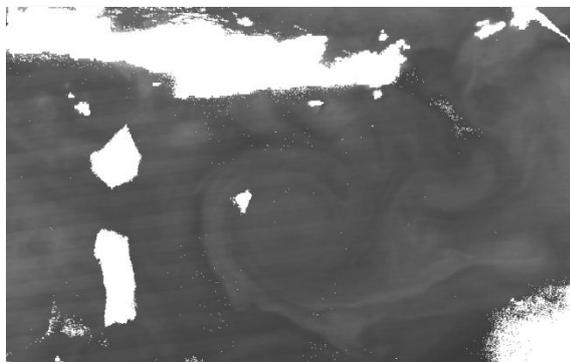
Χάρτης 5: Διαφορά του OCI του MODIS με το New Model 2.

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι μεταξύ των χαρτών του OCI (Χάρτης 1), του New Model 1 (Χάρτης 2) και του New Model 2 (Χάρτης 3) εντοπίστηκαν σε ορισμένες περιοχές ίδια μοτίβα. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη κυκλώνων και αντικυκλώνων στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους (Βόρειου και Νότιου) που έχουν αποτελέσει πολλές φορές αντικείμενο μελέτης. Ορισμένοι από αυτούς απεικονίζονται στην Εικόνα 24, όπως περιγράφονται από τον Theocharis et al. (1993), Theocharis et al. (1999) (Hamad et al., 2006). Οι κυκλώνες-αντικυκλώνες Pelops, Ierapetra και Rhodes είναι εκείνοι που αντιστοιχούν στα χρωματικά μοτίβα των χαρτών. Το σχήμα και η κυκλική τροχιά των κυκλώνων ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσης εργασίας.



Εικόνα 24: Επιφανειακή Κυκλοφορία στην Ανατολική Μεσόγειο όπως περιγράφονται από τον Theocharis et al. (1993), Theocharis et al. (1999) (όπως αναφέρουν οι Hamad et al., 2006).

Στην Εικόνα 25 απεικονίζεται ο αντικυκλώνας Ierapetra και στην Εικόνα 26 ο κυκλώνας Rhodes, όπως εμφανίζονται στο προϊόν της χλωροφύλλης του MODIS.

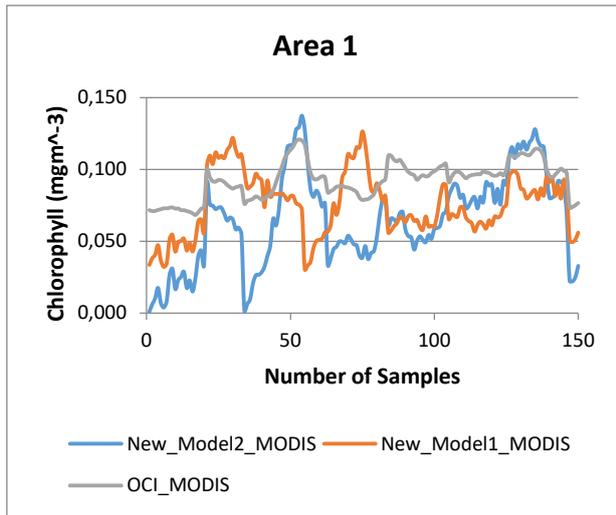


Εικόνα 25: Αντικυκλώνας Ierapetra.

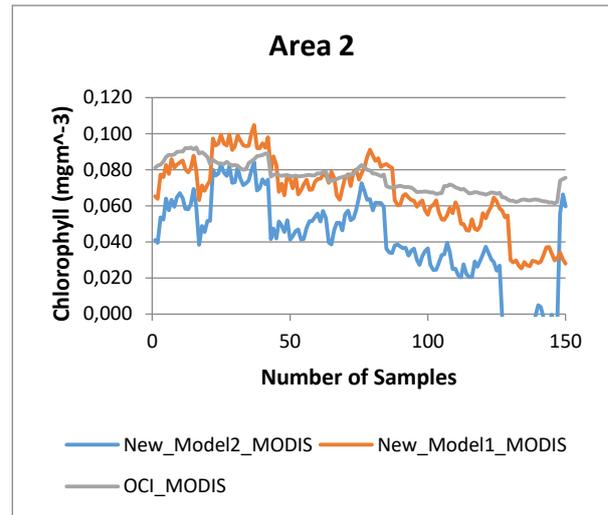


Εικόνα 26: Κυκλώνας Rhodes.

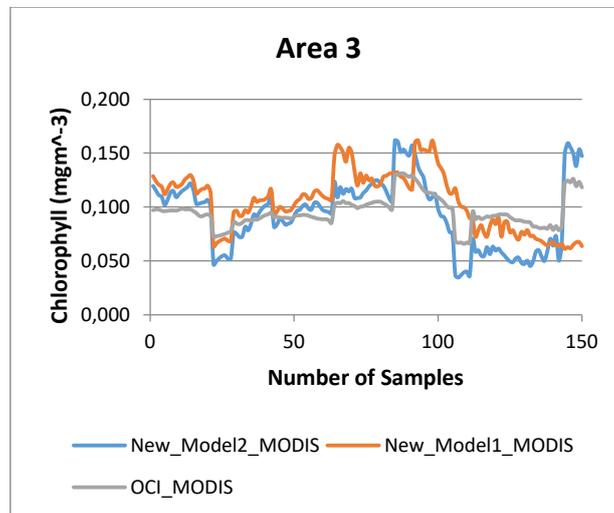
Στα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 5-7) παρατηρείται η συσχέτιση του OCI με τα μοντέλα New Model 1 και 2. Και στα τρία διαγράμματα παρατηρείται η ίδια τάση ανάμεσα στα μοντέλα και τον OCI ενώ το New Model 1 προσεγγίζει καλύτερα τον OCI κυρίως όταν οι τιμές της chl a είναι μικρότερες από $0,1 \text{ mg/m}^3$.



Διάγραμμα 5: Ο αλγόριθμος και τα μοντέλα του MODIS για την area 1.



Διάγραμμα 6: Ο αλγόριθμος και τα μοντέλα του MODIS για την area 2.



Διάγραμμα 7: Ο αλγόριθμος και τα μοντέλα του MODIS για την area 3.

4.3 Αποτελέσματα Συσχετίσεων του δορυφόρου MODIS με τον Sentinel-3

Σε αυτό το στάδιο διερευνήθηκαν οι συσχετίσεις της χλωροφύλλης του MODIS και της χλωροφύλλης του Sentinel-3 OLCI για τις 24 Αυγούστου 2017. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κανάλια του MODIS και του OLCI, καθώς και η αντιστοιχία τους που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των μοντέλων New Model 1 και 2. Ο δορυφόρος OLCI έδωσε για την ίδια ημερομηνία προϊόντα χλωροφύλλης με τον αλγόριθμο OC4Me και με νευρωνικά δίκτυα (Neutral Net). Ο αλγόριθμος OC4Me χρησιμοποιεί τα κανάλια R_{560}^{442} , R_{560}^{490} και R_{560}^{510} . Η αλλαγή μεταξύ των R_{560}^{442} και R_{560}^{490} γίνεται όταν η χλωροφύλλη έχει συγκέντρωση $\sim 0,54 \text{ mg/m}^3$ και μεταξύ των R_{560}^{490} και R_{560}^{510} όταν η συγκέντρωση είναι $\sim 2,2 \text{ mg/m}^3$ (MERIS ATBD 2.9, Morel & Antoine, 2011). Ο OC4Me χρησιμοποιεί τη μέγιστη αναλογία των καναλιών αυτών σε ένα πολυώνυμο, σε αντίθεση με τον OCI ο οποίος χρησιμοποιεί διαφορετικές πράξεις καναλιών (Πίνακας 5). Ο OC4Me έχει τη μορφή (EESA, 2000-2007):

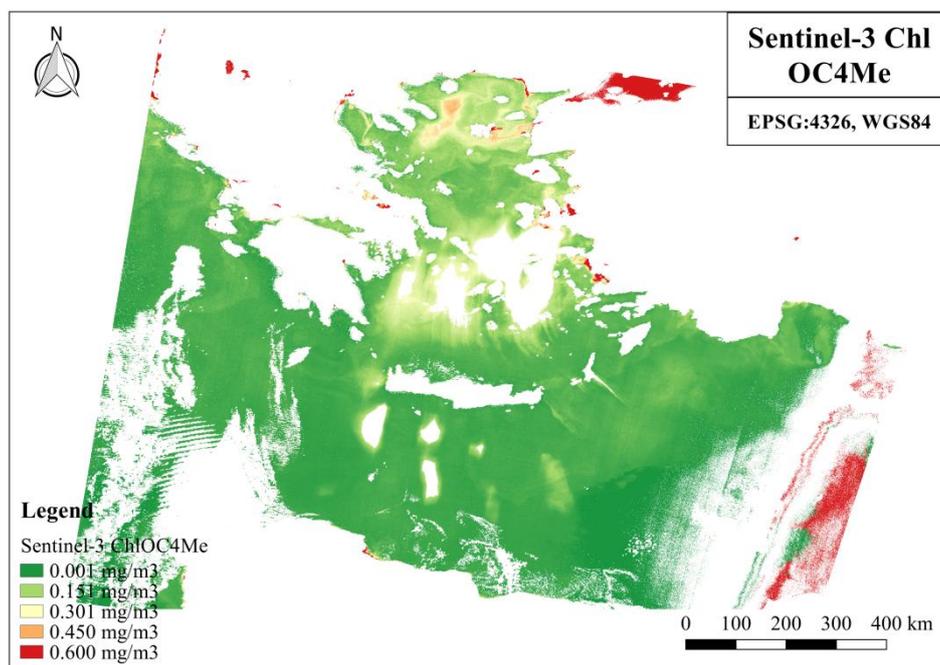
$$\log_{10}[\text{Chl}] = \sum_{x=0}^4 (A_x (\log_{10}(R_j^i))^x$$

Πίνακας 11: Αντιστοιχία των καναλιών του MODIS με τα κανάλια του OLCI.

OLCI		MODIS	
Bands	λcenter (nm)	Bands (nm)	
Oa02	412,5	b8	412
Oa03	442,5	b9	443
Oa04	490	b10	469, 488
Oa05	510	b11	531
Oa06	560	b12	547, 555
Oa08	665	-, b13	645, 667
Oa10	681,25	b14	678

Τα ύδατα της κατηγορίας Case II που αφορούν αποκλειστικά παράκτιες περιοχές και, συνεπώς, χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη CDOM και διαφόρων ιζημάτων, δεν υπόκεινται στον παραπάνω αλγόριθμο. Εάν ο αλγόριθμος εξακολουθεί να εφαρμόζεται, γενικά οδηγεί σε σημαντική υπερεκτίμηση της περιεκτικότητας σε χρωστικές ουσίες (MERIS ATBD 2.9, Morel & Antoine, 2011).

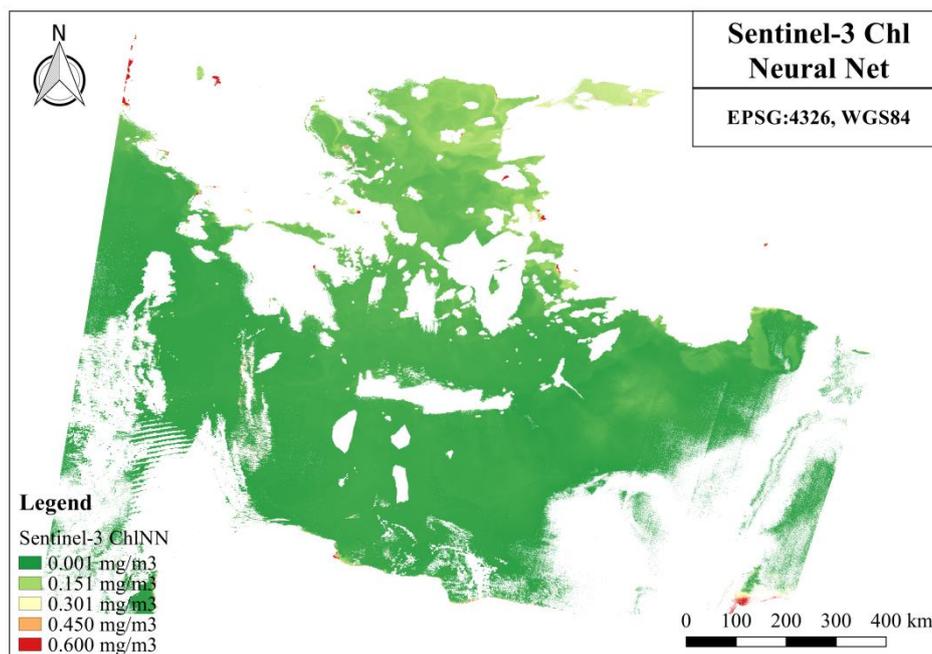
Ο Χάρτης 6 εμφανίζει ορισμένες περιοχές που με τα ίδια χρωματικά μοτίβα με τον χάρτη του MODIS (Χάρτης 1), όπως στην περιοχή δυτικά της Πελοποννήσου και στην περιοχή ανατολικά της Κρήτης. Λόγω της ποιότητας της αρχικής εικόνας δεν ήταν δυνατή η σύγκριση του Κεντρικού και Νοτίου Αιγαίου μεταξύ των δύο αλγορίθμων (OCI και OC4Me). Στο Βόρειο Αιγαίο ο αλγόριθμος OC4Me έδωσε περισσότερα σημεία με υψηλές τιμές συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης από τον OCI.



Χάρτης 6: Χλωροφύλλη με βάση τον αλγόριθμο OC4Me του OLCI.

Τα προϊόντα του δορυφόρου Sentinel-3 OLCI υπολογίζονται με ένα προ-εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο που δίνει έμφαση στα ύδατα της κατηγορίας Case II (παράκτιες περιοχές). Εντοπίστηκαν παρόμοια μοτίβα στην περιοχή του Νοτίου Αιγαίου συγκριτικά με τον OCI,

όμως παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση στο Βόρειο Αιγαίο, καθώς το νευρωνικό δίκτυο έδωσε μικρότερες τιμές χλωροφύλλης από τον OCI και τον OC4Me.



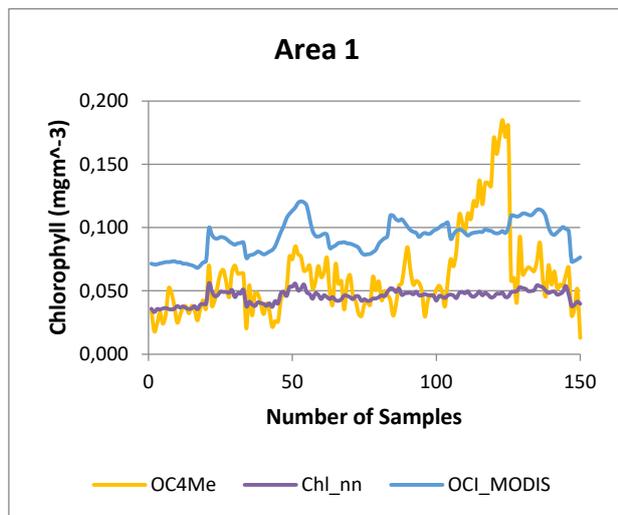
Χάρτης 7: Χλωροφύλλη με βάση τα νευρωνικά δίκτυα (Neural Net) του OLCI.

Εν συνεχεία, επιλέχθηκαν σημεία με τις ίδιες συντεταγμένες σε τρεις περιοχές που παρουσίαζαν τα ίδια μοτίβα στις εικόνες της χλωροφύλλης του OLCI (OC4Me, NN) και στην εικόνα του MODIS (chl-a). Από αυτές τις περιοχές εξήχθησαν οι τιμές της χλωροφύλλης και δημιουργήθηκαν διαγράμματα για κάθε μία περιοχή, ενώ υπολογίστηκαν και οι τιμές της χλωροφύλλης για τα μοντέλα New Model 1 και 2.

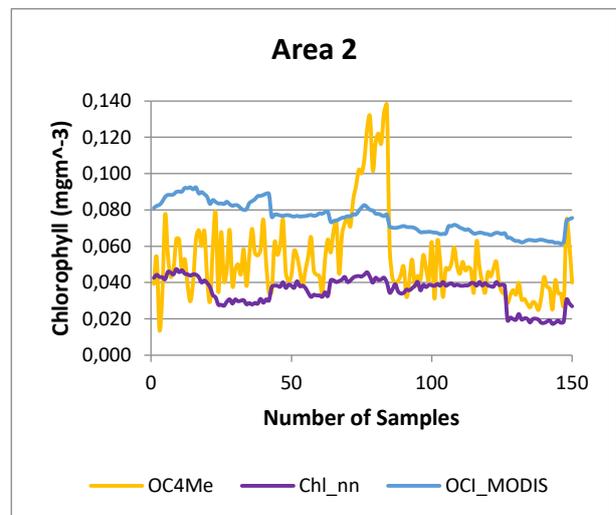


Εικόνα 27: Οι τρεις περιοχές που επιλέχθηκαν.

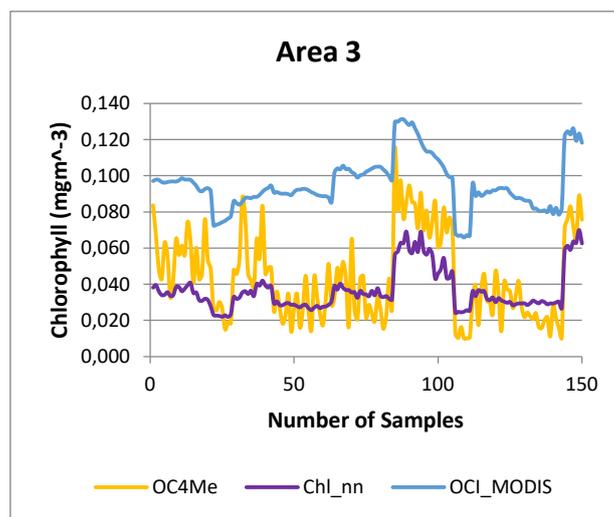
Ακολούθως γίνεται σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων OCI, OC4Me και του νευρωνικού δικτύου (NN). Στις τρεις περιοχές παρατηρήθηκε παρόμοια τάση μεταξύ του αλγορίθμου OCI, OC4Me και του νευρωνικού δικτύου, όμως οι τιμές της χλωροφύλλης OCI ήταν υψηλότερες από εκείνες του νευρωνικού δικτύου και του OC4 στα περισσότερα σημεία, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα. Σύμφωνα με τον Morel et al. (2007), ο OC4Me δίνει χαμηλότερες τιμές από εκείνες του MODIS στα ολιγοτροφικά νερά για συγκεντρώσεις χλωροφύλλης $< 0,09 \text{ mg/m}^3$, γεγονός που παρατηρήθηκε στα διαγράμματα και των τριών περιοχών. Παρόλο τη σταθερή απόκλιση που φαίνεται ανάμεσα στους αλγόριθμους OCI και OC4Me χρειάζεται περαιτέρω έρευνα και χρήση περισσότερων εικόνων αλλά και in situ μετρήσεων για την αξιολόγηση και τη σύγκριση μεταξύ τους.



Διάγραμμα 8: Οι αλγόριθμοι OCI, OC4Me και το νευρωνικό δίκτυο για την area 1.



Διάγραμμα 9: Οι αλγόριθμοι OCI, OC4Me και το νευρωνικό δίκτυο για την area 2.



Διάγραμμα 10: Οι αλγόριθμοι OCI, OC4Me και το νευρωνικό δίκτυο για την area 3.

5. Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα που απορρέουν από το σύνολο των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Γενικά

Τα αποτελέσματα συμφωνούν σε γενικές γραμμές με τη σχετική βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, επιτεύχθηκαν καλές συσχετίσεις με τα δεδομένα *in situ* και τα δεδομένα από τα προϊόντα του MODIS (Chl_a, SST), ενώ ένα από τα γραμμικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις τιμές της χλωροφύλλης του OCI.

Ορισμένα από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, στα οποία συμμετέχουν τα κανάλια b10 (469nm, 488nm), b11 (531nm), 469nm και b13 (667nm) έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από τα έτοιμα προϊόντα του MODIS.

Τα διαγράμματα συσχέτισης του OCI με τον OC4Me έδειξαν παρόμοιες τάσεις και στις τρεις περιοχές που επιλέχθηκαν, αν και οι τιμές παρουσίαζαν σταθερές αποκλίσεις. Για την περαιτέρω έρευνα και σύγκριση των συγκεκριμένων αλγορίθμων είναι αναγκαία η λήψη περισσότερων εικόνων και συλλογή *in situ* μετρήσεων.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης των υδάτινων οικοσυστημάτων με χαμηλό κόστος. Με διαδοχικές τηλεπισκοπικές παρατηρήσεις σε συνδυασμό με μετρήσεις πεδίου είναι εφικτή η έγκαιρη εκτίμηση των βασικών ποιοτικών δεικτών στις θαλάσσιες περιοχές (ωκεάνιες και παράκτιες). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη παρακολούθηση και προστασία των υδάτων.

Ειδικά

Μερικά ειδικότερα συμπεράσματα είναι:

- Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης και η θερμοκρασία SST που υπολογίσθηκαν από τα προϊόντα του MODIS έδωσαν ικανοποιητικές συσχετίσεις με τα δεδομένα *in situ*.
- Η χλωροφύλλη *a* (Chl-*a*, chlorophyll-*a*) είχε μεγαλύτερες συσχετίσεις όταν στον συνδυασμό των καναλιών περιλαμβάνονταν τα b10 (469nm) και b11 (531nm) στο γραμμικό μοντέλο και το κανάλι b10 (469, 488 nm) στο γραμμικό-λογαριθμικό μοντέλο.
- Ο δείκτης CI έδωσε την καλύτερη συσχέτιση συγκριτικά με τον OCI, τον OC3 και τον MedOC3 με το γραμμικό μοντέλο. Με το γραμμικό-λογαριθμικό μοντέλο την καλύτερη συσχέτιση έδωσε ο OCI, ενώ ο MedOC3 έδωσε καλύτερη συσχέτιση από τον OC3.
- Στην περιοχή του Νοτίου Αιγαίου υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ του OCI και των μοντέλων New Model 1 και 2, καθώς παρατηρήθηκαν ίδια μοτίβα και παραπλήσιες τιμές χλωροφύλλης.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων New Model 1 και 2 με τον αλγόριθμο OCI του MODIS, έδειξε ότι το New Model 1 προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές της χλωροφύλλης του OCI από το New Model 2.
- Τα μοντέλα χαρτών που προέκυψαν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο είναι απαραίτητη η δημιουργία μοντέλων αναφερόμενων μόνο στην περιοχή του Βορείου

Αιγαίου, που εντοπίζονται σημαντικές συγκεντρώσεις CDOM και θρεπτικών συστατικών.

- Τα διαγράμματα σύγκρισης του OCI με τον OC4Me υπέδειξαν ότι ο OCI δίνει μεγαλύτερες τιμές χλωροφύλλης από τον OC4Me, ιδιαίτερα όταν οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης είναι μικρότερες από 0,09 mg/m³. Σύμφωνα με τον Morel et al. (2007) παρόμοια απόκλιση εντοπίζεται και μεταξύ των αλγορίθμων OC4Me και OC3.
- Δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα στη σύγκριση αποτελεσμάτων MODIS και OLCI αφού σε κάποιες περιοχές υπήρχε συσχέτιση αποτελεσμάτων αλλά σε άλλες όχι. Επιπλέον, ο θόρυβος στις εικόνες του OC4Me αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα για την σύγκριση με τον OCI στην περιοχή του Κεντρικού και Νοτίου Αιγαίου.

Προτάσεις

Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας και η περαιτέρω αξιολόγησή τους σε βάθος χρόνου μπορούν να συμβάλουν στην καθολική χρήση των τηλεπισκοπικών δεδομένων για την μελέτη της ποιότητας των υδάτων και την ακριβή εκτίμηση της περιβαλλοντικής τους κατάστασης. Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Επανάληψη των υπολογισμών με περισσότερα προϊόντα Sentinel-3 και συσχέτισή τους με δεδομένα in situ, ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τον αλγόριθμο OC4Me.
- Έλεγχος της επαναληψιμότητας των δεδομένων με νέα δεδομένα για δειγματοληψίες του 2017-2018.
- Εφαρμογή περισσότερων μεθόδων παλινδρόμησης, όπως η απλή γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση και η λογαριθμική-γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση.
- Διερεύνηση των δεδομένων βάσει εποχικής περιόδου.
- Διερεύνηση των δεδομένων βάσει των κυκλώνων της Ανατολικής Μεσογείου.
- Ανάλυση περισσότερων ποιοτικών δεικτών, όπως τα αιωρούμενα στερεά, η οργανική ύλη (CDOM), το pH, τα νιτρώδη, τα νιτρικά, το BOD κτλ.
- Διεξαγωγή έρευνας με την χρήση διαφορετικών δορυφόρων πέρα του MODIS.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Antoine D., D'Ortenzio F., Hooker S.B., Bécu G., Gentili B., Tailliez D., Scott A.J. (2008). *Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project)*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 113 (C07013). doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004472>.

Bishop C.M. (1995). *Neural Network for Pattern Recognition*. Oxford University Press Inc., New York.

Blondeau-Patissier D., Gower F.R. J., Dekker G.A., Phinn R. S., Brando E. V. (2014). *A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans*. Progress in Oceanography 123 (2014) 123–144. doi: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661114000020?via%3Dihub>

Brewin R. J.W, Raitsos D.E. , Dall'Olmo G., Zarokanellos N., Jackson T., Racault M.F., Boss S. E., Sathyendranath S., Jones H. B., Ibrahim Hoteit I. (2015). *Regional ocean-colour chlorophyll algorithms for the Red Sea*. Remote Sensing of Environment 165 (2015) 64–85.

Bricaud, A., Morel, A., Babin, M., Allali, K., & Claustre, H. (1998). *Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models*. Journal of Geophysical Research-Oceans, 103, 31033-31044.

Bricaud A., Bosc E., Antoine D. (2002). *Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin: Intercomparison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates*. Remote Sensing of Environment, 81: 163-178. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00335-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00335-2).

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.

Campbell, J. B., & Ran, L. (1993). *CHROM: A C Program to Evaluate the Application of the Dark Object Subtraction Technique to Digital Remote Sensing Data*. Computers and Geosciences, Vol. 19.

Campbell W. J., Feng H. (2005). *The empirical chlorophyll algorithm for MODIS: Testing the OC3M algorithm using NOMAD data*. University of New Hampshire, https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/meetings/ocbam/Evaluation_of_OC3M.pdf

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.

Chang G.C., Barnard A.H., McLean S., Egli P.J., Moore C., Zanevel J.R.V., Dickey T.D., Hanson A. (2006). *In situ optical variability and relationships in the Santa Barbara Channel: implications for remote sensing*. *Applied Optics*, 45 (15): 3593-3604. doi: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.45.003593>.

Chengfeng L., et al. 2013. Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary. *Remote Sensing of Environment*. 2013, Vol. 129, pp. 75-89.

Claustre H., Morel A., Hooker S.B., Babin M., Antoine D., Oubelkheir K. (2002). *Is Desert Dust Making Oligotrophic Waters Greener?* *Geophysical Research Letters*, 29 (10): 1071-1074. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2001GL014056>.

D'Ortenzio F., Marullo S., Ragni M., Ribera d'Alcala M., Santoleri R. (2002). *Validation of Empirical SeaWiFS Algorithms for Chlorophyll-Alpha Retrieval in the Mediterranean Sea: Case Study for Oligotrophic Seas*. *Remote Sensing of Environment*, 82 (1): 79-94. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00026-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00026-3).

Drakopoulos P.G., Banks A.C., Kakagiannis G., Karageorgis A.P., Lagaria A., Papadopoulou A., Psarra S., Spyridakis N., Zervakis V. (2015). *Estimating chlorophyll concentrations in the optically complex waters of the North Aegean Sea from field and satellite ocean colour measurements*. Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, Proc. of SPIE Vol. 9535 95351I-4. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> (πρόσβαση στις 3 Αυγούστου 2017).

Dunham M.H. (2004). *Data Mining introductory and advanced topics*. Prentice Hall.

Ganoe, R., DeYoung, R. J., (2013). NASA Technical Reports Server (NTRS) 20140005468: *Remote Sensing of Dissolved Oxygen and Nitrogen in Water Using Raman Spectroscopy*. NASA Technical Reports Servers (NTRS), National Aeronautics and Space Administration, NASA CASI. Διαθέσιμο στο: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140005468> (πρόσβαση στις 24 Ιουνίου 2017).

Gerace, Aaron. (2010). *Demonstrating Landsat's New Potential to Monitor Coastal and Inland Waters*. 2010.

Gitelson A., Karnieli A., Goldman N., Yacobi Y.Z., Mayo M. (1996). *Chlorophyll estimation in the Southeastern Mediterranean using CZCS images: adaptation of an algorithm and its validation*. *Journal of Marine Systems*, 9 (3-4): 283-290. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963\(95\)00047-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(95)00047-X).

Goyens C., Jamet C., Schroeder T. (2013). *Evaluation of four atmospheric correction algorithms for MODIS-AQUA images over contrasted coastal waters*. Remote Sensing of Environment, 131: 63-75. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.006>.

Hamad N., Millot C., Taupier-Letage (2006). *The surface circulation in the eastern basin of the Mediterranean Sea*. Scientia Marina 70 (3), 457-503, Barcelona (Spain).

Han J. and Kamber M. (2006). *Data Mining: Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann Publishers.

Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). *Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference*. Journal of Geophysical Research, 117(C1).

Jiang W., Knight B. R., Cornelisen C., Barter P. and Kudela R. (2017). *Simplifying Regional Tuning of MODIS Algorithms for Monitoring Chlorophyll-a in Coastal Waters*. Frontiers in Marine Science, Volume 4, Article 151. doi: 10.3389/fmars.2017.00151

Kaishan Song, Lin Li , Tedesco L. P., Shuai Li, Hongtao Duan, Dianwei Liu , Hall B. E., Jia Du, Zuchuan Li, Kun Shi, Ying Zhao (2013). *Remote estimation of chlorophyll-a in turbid inland waters: Three-band model versus GA-PLS model*. Remote Sensing of Environment 136 (2013) 342–357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.017>.

Lapucci C., Rella M.A., Brandini C., Ganzin N., Gozzini B., Maselli F., Massi L., Nuccio C., Ortolani A., Trees C. (2012). *Evaluation of empirical and semi-analytical chlorophyll algorithms in the Ligurian and North Tyrrhenian Seas*. Journal of Applied Remote Sensing, 6 (1). doi: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.6.063565>.

Lazzara L., Marchese C., Massi L., Nuccio C., Maselli F., Santini C., Pieri M., Sorani V. (2010a). *Sub-regional patterns of primary production annual cycle in the Ligurian and North Tyrrhenian seas, from satellite data*. Italian Journal of Remote Sensing, 42 (2): 87-102. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/ItJRS20104227>.

Lee Z., Hu C. (2006). *Global distribution of Case-1 waters: An analysis from SeaWiFS measurements*. Remote Sensing of Environment 101, 270-276.

Letelier R., Culver M. (2000). *Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4, Version 4*. In: SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, Hooker S.B., Firestone E.R. (Eds.), NASA Tech. Memo. 2000-206892, 11, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, pp. 49.

Malenovský Z., Rott H., Cihlar J., Schaepman M. E., García-Santos G., Fernandes R., Berger M. (2012). *Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific*

observations of ocean, cryosphere, and land. Remote Sensing of Environment 120 (2012) 91–101. doi:10.1016/j.rse.2011.09.026.

Marchese C., Lazzara L., Pieri M., Massi L., Nuccio C., Santini C., Maselli F. (2015). *Analysis of chlorophyll-a and primary production dynamics in north Tyrrhenian and Ligurian coastal-neritic and ocean waters*. Journal of Coastal Research, 31 (3): 690-701, Coconut Creek (Florida). doi: <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00210.1>.

Maselli F., Massi L., Pieri M., Santini C. (2009). *Spectral Angle Minimization for the Retrieval of Optically Active Seawater Constituents from MODIS Data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75 (5): 595-605. doi: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.75.5.595>.

Massi L., Santini C., Pieri M., Nuccio C., Maselli F. (2011). *Use of MODIS imagery for the optical characterization of Western Mediterranean water*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 43 (3): 19-37. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/ItJRS20114332>.

Minnett J. P., Brown O. B., Evans R. H., Key E. L., Kearns E. J., Kilpatrick K., Kumar A., Maillet K. A., Szczodrak G. (2004). *Sea-surface temperature measurements from the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on Aqua and Terra*. Published in: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International.

Minh T. Nguyen, Trung L. V. (2008). *Primary Results in Monitoring Sea Surface Temperature (SST) from MODIS Imageries, Case Study: East Sea, Vietnam*. International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences.

Moore T.S., Campbell J.W., Dowell M.D. (2009). *A class-based approach to characterizing and mapping the uncertainty of the MODIS ocean chlorophyll product*. Remote Sensing of Environment, 113: 2424-2430. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.016>.

Morel, A., & Maritorena, S. (2001). *Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal*. Journal of Geophysical Research-Oceans, 106, 7163-7180.

Morel, A., Gentili, B., Claustre, H., Babin, M., Bricaud, A., Ras, J., et al. (2007). *Optical properties of the "clearest" natural waters*. Limnology and Oceanography, 52, 217-229.

Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P. J., Hooker, S. B., & Franz, B. A. (2007). *Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach*. Remote Sensing of Environment, 111, 69-88.

Morel A., Gentili B. (2009). *The dissolved yellow substance and the shades of blue in the Mediterranean Sea*. Biogeosciences, 6: 2625-2636. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/bg-6-2625-2009>.

Morel A, Antoine D (2011). *ATBD 2.9-Pigment index retrieval in case 1 waters*, MERIS Algorithm Theoretical Basis Document. Laboratoire d' Océanographie de Villefranche. ATBD2 9–26.

Moulin C., Gordon H.R., Chomko R.M., Banzon V.F., Evans R.H. (2001). *Atmospheric correction of ocean color imagery through thick layers of Saharan dust*. Geophysical Research Letters, 28 (1): 5-8. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL011803>.

Odermatt, Daniel, et al. 2012. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2012, 118, pp. 116-126.

O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C. (1998). *Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103 (C11): 24937-24953. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/98JC02160>.

O'Reilly J.E., Maritorena S., O'Brien M., Siegel D., Toole D., Menzies D., Smith R., Muelle J., Mitchell B., Kahru M., Chavez F., Strutton P., Cota G., Hooker S., McClain C., Carder K., Muller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G., Aiken J., Arrigo K., Letelier R., Culver M. (2000). *Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4, Version 4*. In: *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3*, Hooker S.B., Firestone E.R. (Eds.), NASA Tech. Memo. 2000-206892, 11, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, pp. 20, 49.

Oviedo A., Ziveri P., Álvarez M., Tanhua T. (2015). *Is coccolithophore distribution in the Mediterranean Sea related to seawater carbonate chemistry?*. *Ocean Sci.*, 11, 13–32, 2015. www.ocean-sci.net/11/13/2015/ doi:10.5194/os-11-13-2015

Parkinson, C. L., (2003). *Aqua: An Earth-Observing Satellite Mission to Examine Water and other Climate Variables*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, Feb. 2003, pp. 173-183, Note: The entire issue is devoted to the EOS Aqua Mission.

Pieri M., Massi L., Lazzara L., Nuccio C., Lapucci C., Maselli F. (2015). *Assessment of three algorithms for the operational estimation of [CHL] from MODIS data in the Western Mediterranean Sea*. *European Journal of Remote Sensing*, 48:1, 383-401, DOI: <http://dx.doi.org/10.5721/EuJRS20154822>

Robertson Lain L., Bernard S., Evers-King H., Matthews M. W., Smith M. (2013). *From Meris to OLCI and Sentinel 2: Harmful algal bloom applications & Modelling in South Africa*. Proc. 'ESA Living Planet Symposium 2013', Edinburgh, UK 9–13 September 2013 (ESA SP-722, December 2013).

Sabins, F.F., (1997). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, 3rd edition, p. 494.

Santoleri R., Volpe G., Marullo S., Buongiorno Nardelli B. (2008). *Observing the Mediterranean Sea from space: ocean color algorithms and chlorophyll variability*. In: Remote Sensing of the European Seas, Barale V., Gade V.M. (Eds.), pp. 103-116. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6772-3_8.

Shaltout M., Omstedt A. (2012). *Calculating the water and heat balances of the Eastern Mediterranean Basin using ocean modelling and available meteorological, hydrological and ocean data*. OCEANOLOGIA, 54 (2), 2012. pp. 199–232. doi:10.5697/oc.54-2.199.

Sohn Y., Rebello N.S. (2002). *Supervised and unsupervised spectral angle classifiers*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68 (12): 1271-1280.

Sykoti O., Florou H., Mavrokefalou G., Evangeliou N. (2015). *Correlations of salinity, temperature and ocean colour variations from SMOS and MODIS satellite data in the Eastern Mediterranean for creating an inventory data base as to be compared to conservative radionuclides for remote recording under routine and case*. Pan-Hellenic Geographical Conferences, Proceedings; 10ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας = 10th International Congress of Hellenic Geographical Society; 1273-1282. <http://geolib.geo.auth.gr/digeo/index.php/pgc/article/view/10513>

Volpe G., Santoleri R., Vellucci V., Ribera d'Alcalà M., Marullo S., D'Ortenzio F. (2007). *The colour of the Mediterranean Sea: Global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates*. Remote Sensing of Environment, 107 (4): 625-638. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.017>.

Walton C. C., Pichel W. G., Sapper J. F., May D. A. (1998). *The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites*. Journal of Geophysical Research. Vol. 103, 27,999-28,012.

Zeri, C., Beşiktepe, Ş., Giannakourou, A., Krasakopoulou, E., Tzortziou M., Tsoliakos, D., Pavlidou, A., Mousdis, G., Pitta, E., Scoullou, M., Papathanassiou E., (2014). *Chemical properties and fluorescence of DOM in relation to biodegradation in the interconnected Marmara–North Aegean Seas during August 2008.*, J. Marine Sys., 135, 124–136, (2014).

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αλμπανάκης, Κ., 2007. *Μαθήματα Ωκεανογραφίας*, Κεφάλαιο Τέταρτο, Ψηφιακό βιβλίο-Εικονικά Εργαστήρια Ωκεανογραφίας, Θεσσαλονίκη.

http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge768e/E_OCEAN_ALBANAKIS/PDF_/KEF_4_PHYSI_COCHEMICAL_PROPERTIES_OF_WATER.pdf Διαθέσιμο στο:

<http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge768e/> (πρόσβαση στις 6 Μαΐου 2017)

Vasilatos, Ch, (2010) *Determination of physical and chemical parameters of water and wastewater (pH, TDS, DO, BOD, COD, TOC)*, Department of Economic Geology and Geochemistry, Faculty of Geology and Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens (NKUA). <http://users.uoa.gr/~hvasilat/files/BOD-COD-TOC.pdf>. Διαθέσιμο στο: <http://users.uoa.gr/~hvasilat/files/> (πρόσβαση στις 10 Ιουνίου 2017)

Βρυώνης, Π., 2013. *Μελέτη των πεδίων ανάμειξης γλυκού και αλμυρού νερού με βάση εποχιακές μεταβολές φυσικοχημικών παραμέτρων*. Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον', Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, [ηλεκτρ. βιβλ.] Πάτρα: Νημερτής, το Ιδρυματικό Αποθετήριο του Πανεπιστημίου Πατρών, Σελίδες 11-23. Διαθέσιμο στο: <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/7881> (πρόσβαση στις 9 Ιουνίου 2017)

Δασενάκης, Ε., Καραβόλτσος, Σ., Λαδάκης, Ε., Παρασκευοπούλου, Β., 2015. *Οι κύριοι βιογεωχημικοί κύκλοι στο θαλάσσιο περιβάλλον*. [Κεφάλαιο Συγγράμματος]. Στο Δασενάκης, Ε., Καραβόλτσος, Σ., Λαδάκης, Ε., Παρασκευοπούλου, Β. 2015. *Χημική ωκεανογραφία*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Κεφ 6. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/4682> (πρόσβαση στις 10 Ιουνίου 2017).

Καρύδη, Α., 2011. *Συμβολή στην Αντιμετώπιση Θαλάσσιας Ρύπανσης με Νέα Προσοροφητικά Μέσα από Τροποποιημένη Απορριπτόμενη Βιομάζα*, Διπλωματική Εργασία, Διαπανεπιστημιακό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Πειραιώς, Αθήνα.

Κόκκινος, Ι. 2011. *Παράλληλοι Αλγόριθμοι Εξόρυξης Γνώσης από Βάσεις Δεδομένων με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης*, Μεταπτυχιακή εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Τμήμα Εφαρμοσμένης Μηχανικής [ηλεκτρ. βιβλ.], ΨΗΦΙΔΑ-Ψηφιακή Βιβλιοθήκη και Ιδρυματικό Καταθετήριο του Πανεπιστημίου Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη. Διαθέσιμο στο: <http://dspace.lib.uom.gr/handle/2159/14399> (πρόσβαση στις 14 Σεπτεμβρίου 2017).

Κουγιουμτζής Α. (2016). *Εφαρμοσμένη Στατιστική – Μέρος Α*. Σημειώσεις Μαθήματος Τεχνικής Συλλογής και Ανάλυσης Δεδομένων – Στοιχεία Επιχειρησιακής Έρευνας. Διαθέσιμο στο: <http://users.auth.gr/dkugiu/Teach/CivilTransport/> (πρόσβαση στις 14 Σεπτεμβρίου 2017).

Κουγιουμτζής Α. (2009). *Σημειώσεις για το μάθημα της Στατιστικής - Μέρος Β*. Κεφάλαιο 4: Συσχέτιση και Παλινδρόμηση [Κεφάλαιο ηλεκτρ. βιβλ.]. Διαθέσιμο στο: <http://users.auth.gr/dkugiu/Teach/CivilEngineer/#syllabus> (πρόσβαση στις 15 Σεπτεμβρίου 2017).

Κουνετάς Κ. (2012). *Econometrics Notes*. Παρουσιάσεις μαθήματος Οικονομετρικά Πρότυπα, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας. Διαθέσιμο στο: <http://eclass.teipat.gr/eclass/modules/document/index.php?course=728129&openDir=/4f5ca1b80q7j> (πρόσβαση στις 15 Σεπτεμβρίου 2017)

Μανέτας, Ι., Γραμματικόπουλος, Γ., Πετροπούλου, Γ., Ψαράς, Γ. 2015. *Φωτοσύνθεση*. [Κεφάλαιο Συγγράμματος]. Στο Μανέτας, Ι., Γραμματικόπουλος, Γ., Πετροπούλου, Γ., Ψαράς, Γ. 2015. Εργαστηριακές ασκήσεις φυσιολογίας φυτών. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 2. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2695>

Μουντογιαννάκη, Δ., 2015. *Εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων σε παράκτιες περιοχές της Ευρώπης με υψηλής ανάλυσης πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα - Estimating the quality of coastal European waters with high resolution multispectral remote sensing data*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Νταρακάς Ευθ. , «Ποιοτικά χαρακτηριστικά και διεργασίες επεξεργασίας νερού», Τ.Π.Μ., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σελίδες 21-23, Θεσσαλονίκη, 2010.
https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/EY182/ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ_ΑΠΘ_ΓΙΑ_ΤΗ_ΘΕΩΡΙΑ/Simioseis_1.2_water%25281%2529.pdf

Πανάρετος Ι. (1994). *Γραμμικά Μοντέλα με Έμφαση στις Εφαρμογές*. Κεφ. 5, Το Γενικό Γραμμικό Μοντέλο (General Linear Model) [ηλεκτρ. βιβλ.], Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <http://www2.stat-athens.aueb.gr/~jpan/index-stud-gr.html> (πρόσβαση στις 15 Σεπτεμβρίου 2017)

Πανάρετος Ι. και Ξεκαλάκη Ε. (2000). *Εισαγωγή στη Στατιστική Σκέψη, τόμος II (Εκτιμητική και Έλεγχοι Υποθέσεων)*. Κεφ. 17, Έλεγχοι Υποθέσεων [ηλεκτρ. βιβλ.], Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <http://www2.stat-athens.aueb.gr/~jpan/index-stud-gr.html> (πρόσβαση στις 16 Σεπτεμβρίου 2017)

Parageorgiou, A., 2016. *Εκτίμηση ποιοτικών χαρακτηριστικών σε λιμναία συστήματα της Γαλλίας με χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Παρχαρίδης, Ι., 2015. *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3960> (πρόσβαση στις 14 Ιουνίου 2017)

Πατελάκη, Μ., 2015. *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, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Ποϊραζίδης, Κ., 2013. *Θαλάσσια Ρύπανση*, σημειώσεις του μαθήματος ‘Αρχές Επιστήμης Περιβάλλοντος’, Κεφάλαιο Ενδέκατο, ΤΕΙ Ιόνιων Νήσων, Τμήμα Τεχνολόγων Περιβάλλοντος Τ.Ε.- Τεχνολόγων Φυσικού Περιβάλλοντος, σελ. 1-, Ζάκυνθος.

http://eclass.teiion.gr/modules/document/file.php/ECO141/ΥΠΙΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΟ_ΥΛΙΚΟ/ΘΑΛΑΣΣΙΑ_ΡΥΠΑΝΣΗ.pdf

Τζαβελάς Γ. (2009). *Γενικευμένα Γραμμικά Μοντέλα - Μέρος Α, Εισαγωγή στη Λογιστική Παλινδρόμηση*. Σημειώσεις Μαθημάτων, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης, Ειδικά Θέματα Στατιστικής. Διαθέσιμο στο: <http://www.unipi.gr/faculty/tzafor/> (πρόσβαση στις 15 Σεπτεμβρίου 2017).

Διαδικτυακοί Τόποι

EESA Sentinel Online (2000-2017):

- <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3;jsessionid=A8E2A88FF197DA1C92CD77F0AD9B1E30.jvm2> (πρόσβαση στις 29 Απριλίου 2017)
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci/overview/heritage> (πρόσβαση στις 4 Σεπτεμβρίου 2017)
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-olci/level-2/oc4me-chlorophyll> (πρόσβαση στις 8 Οκτωβρίου 2017)
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-olci/level-2/imt-neural-net> (πρόσβαση στις 8 Οκτωβρίου 2017)

Encyclopaedia Britannica, Chlorophyll, Biology
<https://www.britannica.com/science/chlorophyll> (πρόσβαση 9 Ιουνίου 2017)

EO Sharing Earth Observation Resources eoPortal Directory, Aqua Terra Mission (EOS/AM-1):
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terra> (πρόσβαση στις 28 Απριλίου 2016)

- Special issue on EOS/AM-1 Platform, Instruments and Scientific Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No 4, July 1998
- Terra The EOS Flagship: <http://terra.nasa.gov/>
- “Terra: Flagship of the Earth Observing System,” Press Kit, Nov. 1999, URL: http://www.nasa.gov/pdf/156293main_terra_press_kit.pdf

EO Sharing Earth Observation Resources eoPortal Directory, Aqua Mission (EOS/PM-1):
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/aqua> (πρόσβαση στις 28 Απριλίου 2016)

- Aqua Project Science: <http://aqua.nasa.gov/>
- Aqua: http://www.nasa.gov/pdf/151986main_Aqua_brochure.pdf

EUMETSAT:

- EUMETSAT Monitoring Weather and Climate from Space, Sentinel-3: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Sentinel3/index.html> (πρόσβαση στις 28 Απριλίου 2017)

- EUMETSAT Monitoring Weather and Climate from Space, Sentinel-3 Design: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Sentinel3/Sentinel3Design/index.html> (πρόσβαση στις 28 Απριλίου 2017)
- EUMETSAT Monitoring Weather and Climate from Space, Metadata Details: http://navigator.eumetsat.int/discovery/Start/DirectSearch/Extended.do?f%28r0%29=EO:EUM:DAT:SENTINEL-3:OL_1_EFR_NTC (πρόσβαση στις 11 Σεπτεμβρίου 2017)

Fundamentals of Environmental Measurements, Algae, Phytoplankton and Chlorophyll, <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/algae-phytoplankton-chlorophyll/> (πρόσβαση 9 Ιουνίου 2017)

Marine Science, physical ocean, Seawater Composition <http://www.marinebio.net/marinescience/02ocean/swcomposition.htm> (πρόσβαση 10 Ιουνίου 2017)

National Geographic, Pristine Seas (2015-2017), Ocean Acidification. Διαθέσιμο στο: <http://ocean.nationalgeographic.com/ocean/explore/pristine-seas/critical-issues-ocean-acidification/> (πρόσβαση στις 24 Ιουνίου 2017)

NASA:

- MODIS, MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/> (πρόσβαση στις 28 Απριλίου 2017)
- MODIS, MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER, MODIS Design: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php> (πρόσβαση στις 28 Απριλίου 2017)
- Earth in Future, NASA: <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/701> (πρόσβαση στις 6 Μαΐου 2017)
- NASA's Imagine the Universe <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> (πρόσβαση 21 Ιουνίου 2017)
- NASA Earth Observations, *Sea Surface Temperature (1 month - Aqua/MODIS)*. Διαθέσιμο στο: <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MYD28M> (πρόσβαση στις 24 Ιουνίου 2017)
- EARTDATA, LAADS DAAC, Terra & Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Διαθέσιμο στο: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/> (πρόσβαση στις 4 Σεπτεμβρίου 2017)
- Εικόνες <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl>
- Εικόνες <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/> (11 Σεπτεμβρίου 2017)

NOAA, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce (2016) *Why do scientists measure sea surface temperature?*. Διαθέσιμο στο: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/sea-surface-temperature.html> (πρόσβαση στις 24 Ιουνίου 2017)

Physical Science Project, <http://scienceandtechproject.tumblr.com/> (πρόσβαση 10 Ιουνίου 2017)

Protect Planet Ocean (2010) *Why are oceans important?*. Διαθέσιμο στο: <http://www.protectplanetocean.org/collections/introduction/introbox/oceans/introduction-item.html> (πρόσβαση στις 23 Ιουνίου 2017)

Sentinel-3 εικόνα <https://coda.eumetsat.int/#/home> (11/9/2017)

Slide Share <https://www.slideshare.net/seamonr/extra-credit-light> (πρόσβαση στις 14 Μαΐου 2017)

USGS:

- USGS, The USGS Water Science School (2016) *The World's Water*. Διαθέσιμο στο: <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html> (πρόσβαση στις 14 Ιουνίου 2017).
- USGS, The USGS Water Science School (2016) *How much water is there on, in and above the Earth*. Διαθέσιμο στο: <https://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html> (πρόσβαση στις 14 Ιουνίου 2017).
- USGS, The USGS Water Science School (2016), *pH -- Water properties*. Διαθέσιμο στο: <https://water.usgs.gov/edu/ph.html> (πρόσβαση στις 24 Ιουνίου 2017)

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ), Υδατικοί Πόροι, Θαλάσσια Στρατηγική: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=254&language=el-GR> (πρόσβαση στις 03 Μαΐου 2017)

- Οδηγία Πλαίσιο 2008/56/EK για τη Θαλάσσια Στρατηγική: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=zhQu4jR%2bPek%3d&tabid=254&language=el-GR>
- Ν.3983/2011 «Εθνική στρατηγική για την προστασία και διαχείριση του θαλάσσιου περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την οδηγία 2008/56/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 17ης Ιουνίου 2008 και άλλες διατάξεις»: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=J0bEj4EfXRY%3d&tabid=254&language=el-GR>

Πρόσθετη Βιβλιογραφία

Parkinson, C. L., and R. Greenstone, 2000: EOS Data Products Handbook, Volume 2: ACRIMSAT, Aqua, Jason-1, Landsat 7, Meteor 3M/SAGE III, QuikScat, QuikTOMS, and VCL, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 253 pp. [Available on the internet at eosps0.gsfc.nasa.gov or in hard copy through a request by email to lmcgrier@pop900.gsfc.nasa.gov or by phone to Lee McGrier at 301-867-2037 or Steve Graham at 301-614-5561.]

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κατανομή του νερού στη γη (Πηγή: USGS 2016, με αναφορά σε Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, <i>Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources</i> (Oxford University Press, New York)).....	10
Εικόνα 2: Σύγκριση του μήκους κύματος, της συχνότητας και της ενέργειας για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Πηγή: NASA's <i>Imagine the Universe</i>).....	14
Εικόνα 3: Οι διάφορες μορφές χλωροφύλλης (a,b,c) απορροφούν ελαφρώς διαφορετικά μήκη κύματος (Πηγή: http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/algae-phytoplankton-chlorophyll/)	17
Εικόνα 4: Η κλίμακα pH (Πηγή: USGS, https://water.usgs.gov/edu/ph.html)	19
Εικόνα 5: Ο δορυφόρος Aqua (Πηγή: NASA)	24
Εικόνα 6: Ο δορυφόρος Sentinel-3 (Πηγή: http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Sentinel3/Sentinel3Design/index.html)	26
Εικόνα 7: Τα κανάλια του OLCI. Με γαλάζιο χρώμα είναι τα κανάλια από τον δορυφόρο MERIS, ενώ με κίτρινο χρώμα είναι τα επιπρόσθετα κανάλια (EESA, 2000-2017).	27
Εικόνα 8: Σύγκριση των θέσεων των φασματικών ζωνών για πέντε αισθητήρες μελέτης του χρώματος των ωκεανών της πρώτης (CZCS), δεύτερης (SeaWiFS), τρίτης (MERIS, MODIS) και τέταρτης (VIIRS) γενιάς. (Εικόνα τροποποιημένη από την Εικόνα 1 του Lee et al., 2007) Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν 14 φάσματα ανάκλασης από διάφορα ύδατα σε όλο τον κόσμο, υποδεικνύοντας τις πιθανές εφαρμογές για κάθε φασματική περιοχή (Blondeau-Patissier et al., 2014).....	30
Εικόνα 9: Μετρήσεις της χλωροφύλλης συγκριτικά με τις τιμές που υπολογίσθηκαν από τους αλγόριθμους- a=OC3M, b=MedOC3, c =SAM_LT, d=SAM_LT _{mod} (N=240, r με πολύ σημαντική συσχέτιση, P < 0.01) (Pieri et al., 2015).	33
Εικόνα 10: Χάρτης της Λεκάνης της Μεσογείου και των 13 περιοχών όπως αυτές ορίζονται στην εργασία των Bricaud et al. (2002).	38
Εικόνα 11: Οι θέσεις των σημείων όπου έγιναν οι μετρήσεις.	39
Εικόνα 12: Ευθείες γραμμικής παλινδρόμησης (Κουγιουμτζής, 2009).	42
Εικόνα 13: Αλγόριθμος CI.	50
Εικόνα 14: Αλγόριθμος OC3.	50
Εικόνα 15: Αλγόριθμος OCl.	50
Εικόνα 16: Αλγόριθμος MedOC3.	50
Εικόνα 17: Δείκτης $\exp(Rrs531/Rrs469)$	51
Εικόνα 18: Δείκτης $Rrs531 / (Rrs443+Rrs469+Rrs547)$	51
Εικόνα 19: Αλγόριθμος CI.	55
Εικόνα 20: Αλγόριθμος OC3.	55
Εικόνα 21: Αλγόριθμος OCl.	55
Εικόνα 22: Αλγόριθμος MedOC3.	55
Εικόνα 23: Δείκτης $\exp[(Rrs488-Rrs645)/(Rrs531-Rrs667)]$	56
Εικόνα 24: Κυκλώνες στην Ανατολική Μεσόγειο όπως περιγράφονται από τον Theocharis et al. (1993), Theocharis et al. (1999) (όπως αναφέρουν οι Hamad et al., 2006).	60
Εικόνα 25: Κυκλώνας Ierapetra.....	60
Εικόνα 26: Κυκλώνας Rhodes.....	60
Εικόνα 27: Οι τρεις περιοχές που επιλέχθηκαν.....	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τα σημαντικότερα συστατικά του θαλάσσιου νερού (Βρυώνης, 2013 όπως αναφέρει ο Mason, 1996).....	12
Πίνακας 2: Τεχνικές Προδιαγραφές του δέκτη MODIS (EARTHDATA, 2017).....	22
Πίνακας 3: Κανάλια MODIS (EARTHDATA, 2017).....	22
Πίνακας 4: Τα κανάλια του OLCI (EESA, 2000-2017).....	26
Πίνακας 5: Αλγόριθμοι για την εκτίμηση της χλωροφύλλης από δεδομένα του MODIS.	34
Πίνακας 6: Συντελεστές της εξίσωσης 1 για τους αλγόριθμους OC3M και MedOC3 (Pieri et al., 2015).....	35
Πίνακας 7: Πλήθος διαθέσιμων δειγμάτων στην περιοχή μελέτης.	38
Πίνακας 8: Τα κανάλια του MODIS που χρησιμοποιήθηκαν στους δείκτες.	47
Πίνακας 9: Αποτελέσματα συσχετίσεων για τη χλωροφύλλη με τη χρήση του απλού γραμμικού μοντέλου.....	47
Πίνακας 10: Αποτελέσματα συσχετίσεων για τη χλωροφύλλη με τη χρήση του λογαριθμικού-γραμμικού μοντέλου.....	51
Πίνακας 11: Αντιστοιχία των καναλιών του MODIS με τα κανάλια του OLCI.	62