



## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ



«Διερεύνηση και μελέτη ακρίβειας και αξιοπιστίας της εφαρμογής μεθοδολογιών για την εξαγωγή βαθυμετρίας από την επεξεργασία πολυφασματικών εικόνων, σε παράκτια ύδατα, για την υποστήριξη της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας»

*Αθανάσιος Κ. Μαυραειδόπουλος*

*Αθήνα, 2019*





## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Διερεύνηση και μελέτη ακρίβειας και αξιοπιστίας της εφαρμογής μεθοδολογιών για την εξαγωγή βαθυμετρίας από την επεξεργασία πολυφασματικών εικόνων, σε παράκτια ύδατα, για την υποστήριξη της ασφάλειας ναυσιπλοΐας»

Αθανάσιος Κ. Μαυραειδόπουλος

## DOCTORATE OF PHILOSOPHY THESIS

"Investigation and study on the accuracy and reliability of the application of the satellite-derived bathymetry using multi-spectral imagery in coastal waters for the safety of Navigation"

Athanasios K. Mavraeidopoulos

### Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Σεραφείμ Πούλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ (επιβλέπων)

Αθανάσιος Παλληκάρης, Καθηγητής ΣΝΔ (μέλος)

Εμμανουήλ Οικονόμου, Επίκουρος Καθηγητής Παν/μιου Δυτικής Αττικής

(συνεπιβλέπων)

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Διερεύνηση και μελέτη ακρίβειας και αξιοπιστίας της εφαρμογής μεθοδολογιών για την εξαγωγή βαθυμετρίας από την επεξεργασία πολυφασματικών εικόνων, σε παράκτια ύδατα, για την υποστήριξη της ασφάλειας ναυσιπλοΐας.»

Αθανάσιος Κ. Μαυραειδόπουλος

### Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Σεραφείμ Πούλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Αθανάσιος Παλληκάρης, Καθηγητής ΣΝΔ

Εμμανουήλ Οικονόμου, Επίκουρος Καθηγητής Παν/μιου Δυτικής Αττικής

Πάνος Δρακόπουλος, Καθηγητής Παν/μιου Δυτικής Αττικής

Νικολέττα Ευελπίδου, Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Νικολακόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Παν/μιου Πατρών

Εμμανουήλ Βασιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Υπογραφή

Αθανάσιος Κ. Μαυραειδόπουλος

Αξιωματικός Π.Ν., Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., M.Sc

Copyright © Αθανάσιος Κ. Μαυραειδόπουλος, 2019

Με επιφύλαξη παντός διακώματος. All rights reserved.

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

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

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής στο Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, σε όλους όσους υπήρξαν στήριγμα σε αυτή μου την προσπάθεια.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον αείμνηστο Καθηγητή ΕΚΠΑ κ. Δημήτριο Βαϊόπουλο για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, τις συμβουλές και για το σπουδαίο διδακτικό του έργο που μου παρείχε καθόλο το διάστημα που ήταν ο Επιβλέπων καθηγητής της παρούσας διδακτορικής έρευνας. Ακολούθως, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες στον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κ. Εμμανουήλ Οικονόμου για την πολύτιμη συνεισφορά του στην διαμόρφωση του επιστημονικού υποβάθρου μου και της έρευνας στα εξειδικευμένα αντικείμενα που πραγματεύεται η παρούσα διδακτορική διατριβή. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στον Καθηγητή της Σ.Ν.Δ. κ. Αθανάσιο Η. Παλληκάρη για τις συνεχείς παροτρύνσεις και την αδιάλειπτη υποστήριξη του σε όλες τις φάσεις εκπόνησης της εν λόγω έρευνας. Στην συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Καθηγητή ΕΚΠΑ κ. Σεραφείμ Πούλο για τις άμεσες ενέργειες που ανέλαβε, για την συμπλήρωση του κενού που άφησε ο αείμνηστος καθηγητής Δημ. Α. Βαϊόπουλος, αναφορικά με την διαδικασία ολοκλήρωσης της διατριβής και τις πολύτιμες κατευθύνσεις και συμβουλές σχετικά με την αρτιότερη παρουσίαση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του ΕΚΠΑ και ΠΑΔΑ, οι οποίοι ενεπλάκησαν και συνέβαλαν στην εκπόνηση της εν λόγω ερευνητικής εργασίας, καθ' όλη την διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών.

## Παραχώρηση Δεδομένων (Αναγνώριση-Acknowledgements)

*"Pleiades Data used in this research provided free of charge by the European Space Agency" in the framework of the acceptance of proposal of Mr. A. Mavraeidopoulos Nr. 40867 titled "Bathymetry/Hydrography Extraction from Imagery", (ESA Cat-1/EO Data User Project ID: 40867).*

*«Τα δεδομένα βιο-οπτικών παραμέτρων από θαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου, Ιονίου και Κρητικού Πελάγους, τα οποία συλλέχτηκαν κατά το παρελθόν από επιστημονικές εργασίες στο πλαίσιο αντίστοιχων ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων χορηγήθηκαν ατελώς από πλευράς επιστημονικού υπεύθυνου του εν λόγω προγράμματος, Δρ. G. Zibordi, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την ατελώς χορηγία αυτών προκειμένου τα αξιοποιήσω στην παρούσα διατριβή. »*

*"Bio-optical data from marine areas in the Aegean, Ionian and Cretan seas, which have been collected in the past from Scientific work in the framework of corresponding European research programs have been granted free of charge by the scientific director of the program., Dr. G. Zibordi, whom I greatly thank for their sponsorship in order to make use of his in my dissertation."*

*«Τα δεδομένα βαθυμετρίας από την θαλάσσια περιοχή του όρμου Γέρακα ν. Ζακύνθου συλλέχτηκαν κατά το παρελθόν (10.05.2015) από το μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής της παρούσας διατριβής, Καθηγητή Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κο Εμμανουήλ Οικονόμου και τον Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Αιγαίου κο Θωμά Χασιώτη στο πλαίσιο Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος που πραγματοποιήθηκε στην εν λόγω περιοχή, τους οποίους ευχαριστώ θερμά για την ατελώς χορηγία αυτών προκειμένου τα αξιολογήσω και τα αξιοποιήσω ανάλογα στην έρευνά μου».*

*«Κάλλιστον Κόσμος. Ποίημα γαρ Θεού».*

(Το ωραιότερο πράγμα είναι ο Κόσμος, Γιατί είναι έργο του Θεού).

Θαλής ο Μιλήσιος (643-548 π.Χ.)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης και αξιοποίησης μίας νέας μεθοδολογίας ανάλυσης και επεξεργασίας των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων (*Passive Multispectral Imagery*), για την εξαγωγή βαθυμετρίας (*Bathymetry Extraction*). Στόχος είναι το νέο μοντέλο εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας να αξιοποιηθεί στις διαδικασίες παραγωγής ναυτικών χαρτών και άλλων ναυτιλιακών εκδόσεων.

Αρχικά, το θέμα της διδακτορικής διατριβής ήταν η «*Μελέτη της βαθυμετρίας και των ακτομηχανικών χαρακτηριστικών του Β. Ευβοϊκού με τη χρήση δεδομένων από διάφορα μέσα τηλεανίχνευσης και ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού για την καλύτερη αξιοποίηση των δεδομένων*» (ΕΚΠΑ/Τμ. Γεωλογίας/Αρ. Πρωτ. 1096//27.06.2000). Στην συνέχεια, με απόφαση της Γενικής Συνέλευσης Ειδικής Σύνοψης του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, στην συνεδρίαση της 08.02.2016 αντικαταστάθηκαν δύο (2) από τα τρία (3) μέλη της επιτροπής και τροποποιήθηκε το θέμα ως ακολούθως : «*Διερεύνηση και μελέτη ακρίβειας και αξιοπιστίας της εφαρμογής μεθοδολογιών για την εξαγωγή βαθυμετρίας από την επεξεργασία πολυφασματικών εικόνων, σε παράκτια ύδατα, για την υποστήριξη της ασφάλειας ναυσιπλοΐας*». Η τελευταία αλλαγή στην σύνθεση της Τριμελούς Επιτροπής έγινε σύμφωνα με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, που ελήφθη κατά την 15<sup>η</sup> συνεδρίαση της, που πραγματοποιήθηκε στις 19.04.2019, σύμφωνα με την οποία αντικαταστάθηκε ο εκλιπών επιβλέπων Ομότιμος Καθηγητής Δημ. Βαϊόπουλος, από τον Καθηγητή ΕΚΠΑ κο Σεραφείμ Πούλο.

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε, αξιολογήθηκε και αξιοποιήθηκε η φασματική επίδραση (*Spectral Influence*) των θαλασσιών υδάτων συγκεκριμένων περιοχών μελέτης σε ολόκληρο το φάσμα της γεωμορφολογίας του πυθμένα (ακτή, παράκτια/ρηχά ύδατα, βαθιά ύδατα) της παράκτιας ζώνης, η οποία επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των μοντέλων της βαθυμετρίας. Η εξαγωγή (προσδιορισμός) των δεδομένων βαθυμετρίας από τον νέο μοντέλο δορυφορικής βαθυμετρίας, πρέπει να είναι εφικτή ανεξαρτήτως της χωρικής μεταβολής της σύστασης της θαλάσσιας μάζας (*Water Color Reflectance*), της ανακλαστικότητας του θαλάσσιου πυθμένα (*Seabed Reflectance*) και των ατμοσφαιρικών συνθηκών (*Atmospheric Conditions*) που επικρατούν στις εκάστοτε περιοχές μελέτης.

Επιπρόσθετα, με βάση τα αποτελέσματα αξιολόγησης του εκπονηθέντος στην παρούσα διατριβή βαθυμετρικού μοντέλου/αλγορίθμου επιχειρήθηκε να δοθούν απαντήσεις σε ερωτήματα όπως (1) εάν η βαθυμετρία που υπολογίζεται από το επινοηθέν στην παρούσα εργασία μοντέλο/αλγόριθμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της ναυτικής χαρτογραφίας, και εάν ναι, ποια η ακρίβεια που επιτυγχάνεται, ή σε ποια(-ες) κατηγορία (-ες) ή προδιαγραφές υδρογράφησης δύναται να χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με τα πρότυπα του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού (Δ.Υ.Ο/Ι.Η.Ο. S-44). (2) Πως και υπό ποιες προϋποθέσεις τα δεδομένα βαθυμετρίας, που προέρχονται από ανάλυση των δορυφορικών εικόνων, δύναται να συνεισφέρουν στην ταχύτερη επικαιροποίηση (*Charts Updating*) των διαφόρων κατηγοριών έντυπων ή Η/Ν Ναυτικών Χαρτών.

Με βάση τα προαναφερθέντα, και ύστερα από την διενέργεια μεγάλου αριθμού πειραμάτων και δοκιμών εκτιμάται ότι η εξαγόμενη βαθυμετρική πληροφορία από το μοντέλο (Υβριδικό μοντέλο) που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή δύναται να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά με τα υπόλοιπα υδρογραφικά δεδομένα στην χαρτογραφική διαδικασία παραγωγής των έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για μία τεχνική, η οποία μπορεί να αντιμετωπίσει τις δυσχέρειες που παρουσιάζονται σήμερα στην τακτική και ταχεία συλλογή βαθυμετρικών στοιχείων, καθόσον δύναται να συνεισφέρει στην σύντομη συμπλήρωση, παραγωγή και επικαιροποίηση των ναυτικών χαρτών.

Τέλος, επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι η χαρτογραφική αξιοποίηση της μεθόδου που ερευνήθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή δύναται να εξοικονομήσει πόρους (ανθρώπινο δυναμικό, χρόνο, οικονομική δαπάνη), ώστε αυτά να διατεθούν από τους αρμόδιους φορείς σε άλλα έργα-δράσεις ή να εκτελεστούν εργασίες πεδίου σε άλλες περιοχές, εκεί δηλαδή που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην συλλογή των βαθυμετρικών δεδομένων.

**Λέξεις κλειδιά:** Βαθυμετρία, Υδρογραφία, Τηλεπισκόπηση υδάτων, Ασφάλεια της Ναυσιπλοΐας, Διεθνείς Τεχνικές Προδιαγραφές Εκτέλεσης Υδρογράφησης, Ταξινόμηση Υδάτων, Μοντέλα Δορυφορικής Βαθυμετρίας.

## ABSTRACT

In this PhD dissertation the results of the investigation and exploitation of a new method of analysis and processing of the Passive Multispectral Imagery are presented for the extraction of Bathymetry. The aim is to exploit the new satellite derived bathymetry model in the production process of nautical charts and other maritime publications.

Initially, the subject of the dissertation was the *"Study of Bathymetry and the coastal engineering characteristics of Evoikos Gulf by using data from various sources of remote sensing and development of appropriate software for better exploitation of the data"* (NKUA / Geology / Prot. 1096 // 27.06.2000). Subsequently, by a decision of the General Assembly of Special Composition of the Department of Geology and Geo-environment, at its meeting on 08.02.2016, two (2) of the three (3) members of the Committee were replaced and the subject was modified as follows: *"Investigation and study on the accuracy and reliability of the application of the satellite-derived bathymetry using multi-spectral imagery in coastal waters for the safety of Navigation"*. The last change in the composition of the Three-member Committee was made in accordance with a decision of the Assembly of the Department of Geology and Geoenvironment, received at its 15th meeting, held on 19.04.2019, which replaced the late Supervisor Emeritus Professor Dimitrios Vaiopoulos, by Professor of National and Kapodistrian University of Athens Serafim Poulos.

In the present study, the spectral effect of the marine waters of specific study areas on the entire coastal zone (shore, coastal / marine / deep water) geomorphology of the coastal zone has been investigated, evaluated and exploited, which influences the accuracy of the results of the bathymetry models. The derivation (determination) of bathymetry data from the new model must be possible irrespective of the spatial variation of the Water Color Reflectance, Seabed Reflectance, and Atmospheric Conditions prevailing in each study area.

In addition, based on the results of the assessment of this dissertation the new bathymetric model / algorithm developed, tries to ask questions such as: (1) if the bathymetry calculated by the model / algorithm created in the present study, can be used for purposes of nautical cartography, and if this the case what is the accuracy achieved or which are the hydrographic categories or specifications that can be satisfied according to the standards of the International Hydrographic Organization (IHO, S-44). (2) How and under what conditions

the bathymetry data from the analysis of satellite imagery can contribute to the faster updating of the different categories of printed or electronic nautical charts.

On the basis of the above and after a large number of experiments and tests it is estimated that the extracted (modelled) bathymetric data from the new model (Hybrid model) developed in this PhD thesis can be used in addition to the other hydrographic data in the cartographic process of the production of the printed and electronic nautical charts. It has also been found that this is a technique that can cope with the current difficulties in rapid collection of bathymetric data, as it can contribute to the short completion, production and updating of nautical charts.

Finally, it was confirmed that the cartographic exploitation of the method investigated in this PhD thesis can save resources (human resources, time, and financial expenses) to be made available by the competent bodies in other actions-actions or to perform other work in the field where more accuracy is required in bathymetric data collection.

**Λέξεις κλειδιά:** Bathymetry, Hydrography, Remote Sensing of Coastal Waters, Safety of Navigation, International Standards for Hydrographic Surveys, Classification, Satellite Derived Bathymetry Models.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>   | <b>8</b>  |
| 1.1 ΣΚΟΠΟΣ .....   | 8         |
| 1.2 «Η ΙΔΕΑ» .....   | 11        |
| 1.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....  | 15        |
| 1.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....  | 17        |
| 1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....  | 19        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....</b>  | <b>22</b> |
| 2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ .....  | 22        |
| 2.1.1 Διάδοση Ακτινοβολίας στην Ατμόσφαιρα .....   | 24        |
| 2.1.3 Διάδοση Ακτινοβολίας στο Νερό .....  | 27        |
| 2.1.4 Οπτικές Ιδιότητες Νερού .....  | 34        |
| 2.1.5 Ιστορική Εξέλιξη και Σημερινή Κατάσταση Μεθόδων Δορυφορικής<br>Βαθυμετρίας .....   | 41        |
| 2.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ<br>ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ 66 .....   | 66        |
| 2.2.1 Μοντέλο LYZENGA (ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ) .....   | 66        |
| 2.2.2 Μοντέλο Αναλογικού Αλγορίθμου (RATIO TRANSFORM) .....  | 70        |
| 2.2.3 Μοντέλο JUPP .....   | 73        |
| 2.2.4 Μοντέλο 4SM .....  | 79        |
| 2.2.5 Ημι-αναλυτικός Αλγόριθμος QAA .....  | 82        |
| 2.2.6 Αναλυτικός Αλγόριθμος ALBERT-MOBLEY.....   | 84        |
| 2.2.7 Ημι-αναλυτικός Αλγόριθμος SAMBUCA .....  | 90        |
| 2.3 ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ .....   | 101       |
| 2.3.1 Αποφάσεις Διεθνών Οργανισμών για την Τυποποίηση των Ναυτικών Χαρτών Επ’<br>ωφελεία της Ασφάλειας της Ναυσιπλοΐας.....  | 101       |
| 2.3.1.1 Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός και Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός.....  | 101       |
| 2.3.1.2 Αποφάσεις του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για την Υποχρεωτική Χρήση<br>Επίσημων Ναυτικών Χαρτών επ’ Ωφελεία της Ασφάλειας της Ναυσιπλοΐας.....                       | 104       |
| 2.3.1.3. Αποφάσεις του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού για την Εκτέλεση Βαθυμετρήσεων<br>και την Τυποποίηση των Ναυτικών Χαρτών επ’ Ωφελεία της Ασφάλειας της Ναυσιπλοΐας ..... | 106       |
| 2.3.1.4 Άλλοι Συναφείς Διεθνείς Φορείς και Επιτροπές .....   | 109       |
| 2.3.2 Διεθνείς Προδιαγραφές Απεικόνισης Βαθυμετρίας στους Ναυτικούς Χάρτες .....   | 111       |
| 2.3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Ναυτικών Χαρτών .....  | 111       |
| 2.3.2.2 Κατηγορίες και Προδιαγραφές Έντυπων Ναυτικών Χαρτών.....   | 113       |

|   |            |
|---|------------|
| 2.3.2.3 Κατηγορίες και Προδιαγραφές Ηλεκτρονικών Ναυτικών Χαρτών.....   | 118        |
| 2.3.3 Μέθοδοι και Προδιαγραφές Εκτέλεσης Βαθυμετρήσεων για την Έκδοση και Ενημέρωση των Ναυτικών Χαρτών.....  | 134        |
| 2.3.3.1 Ιστορική Εξέλιξη, Σημερινή Κατάσταση και Προοπτικές Μεθόδων Υδρογράφησης-Βαθυμετρίας .....  | 134        |
| 2.3.3.2 Διεθνείς Προδιαγραφές Εκτέλεσης Υδρογραφικών Εργασιών /Βαθυμετρίας.....   | 136        |
| 2.3.4 Διεθνείς Προδιαγραφές Ακρίβειας Ναυτικών Χαρτών .....   | 149        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....</b>   | <b>153</b> |
| 3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ .....   | 153        |
| 3.1.1 Περιοχή Στενού Ν. Πάρου-Αντιπάρου (Case Study 1) .....  | 154        |
| 3.1.2 Περιοχή Μαρίνας Αγ. Κοσμά, Σαρωνικού Κόλπου (Case Study 2) .....  | 159        |
| 3.1.3 Περιοχή Κόλπου Λαγανά Ν. Ζακύνθου (Case Study 3) .....  | 162        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....</b>  | <b>167</b> |
| 4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....  | 167        |
| 4.1.1 Εφαρμοζόμενη Τεχνολογία Αιχμής (State-Of-The Art) .....   | 167        |
| 4.1.2 Τύποι Δεδομένων .....   | 169        |
| 4.1.3 Κριτήρια Επιλογής Θαλασσιών Περιοχών Πειραμάτων.....  | 181        |
| 4.1.4 Πηγές Πρόσκτησης Ψηφιακών Γεωχωρικών Δεδομένων .....  | 185        |
| 4.1.5 Λογισμικά Επεξεργασίας-Ανάλυσης Δεδομένων.....  | 190        |
| 4.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ (HYBRID MODEL) - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΆΛΛΑ ΜΟΝΤΕΛΑ .....  | 193        |
| 4.2.1 Αναλυτική Περιγραφή του Προτεινομένου Υβριδικού Μοντέλου .....  | 193        |
| 4.2.2 Δυσχέρειες – Προβλήματα .....   | 203        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>  | <b>206</b> |
| 5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 206   |            |
| 5.1.1 Περιγραφή Αποτελεσμάτων Βαθυμετρίας Περιπτώσιολογικών Περιοχών.....   | 206        |
| 5.1.2 Στατιστική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....   | 235        |
| 5.1.3 Σύγκριση με άλλα Μοντέλα Εξαγωγής Βαθυμετρίας από Δορυφορικά Δεδομένα .....   | 245        |
| 5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΕΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ..... | 251        |
| 5.2.1 Σύγκριση της Ακρίβειας του Δημιουργηθέντος Μοντέλου με τις Διεθνείς Προδιαγραφές Εκτέλεσης Υδρογραφικών Εργασιών .....  | 251        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2.2 Δυνατότητες Αξιοποίησης των Αποτελεσμάτων της Διδακτορικής Έρευνας για την Έκδοση και Ενημέρωση Ναυτικών Χαρτών ..... | 259        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....</b>  | <b>267</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>   | <b>272</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ ΤΟΥ ΥΠ. ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ</b>   |            |
| <b>Α. Κ. ΜΑΥΡΑΕΙΔΟΠΟΥΛΟΥ .....</b>  | <b>A-1</b> |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ

Σύμφωνα με τα επίσημα στατιστικά δημογραφικά στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 70% περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού συγκεντρώνεται, ζει και εργάζεται μέχρι απόσταση 100 km από τις ακτές. Επίσης, σχεδόν το 50% του πληθυσμού της Ε.Ε. ζει σε απόσταση μικρότερη από 50 km από τη θάλασσα. Η πλειοψηφία δε αυτού, συγκεντρώνεται στις αστικές περιοχές κατά μήκος της ακτής. Το 2001, 70 εκατομμύρια άνθρωποι ή ποσοστό 14% του συνολικού πληθυσμού της Ε.Ε. ζούσε σε απόσταση 500 m από την ακτή (European Environment Agency, 2018).

Η θάλασσα είναι ο πιο δημοφιλής προορισμός διακοπών της Ευρώπης, καθόσον το 63% των Ευρωπαίων παραθεριστών επιλέγουν τη θάλασσα ως προορισμό για τις διακοπές τους. Επίσης, υπολογίζεται ότι 8 με 10 εκατομμύρια ερασιτέχνες αλιείς επιδίδονται στο ψάρεμα ως άθλημα ή ως διασκέδαση, υποστηρίζοντας την συγκεκριμένη ευρωπαϊκή «βιομηχανία» μεταξύ 8 και 10 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως. Παράλληλα με τις προαναφερόμενες δραστηριότητες, η εκτιμώμενη αξία των ιδιωτικών οικονομικών περιουσιακών στοιχείων σε απόσταση 500 m από τη θάλασσα ανέρχεται σε 500 έως 1000 δισεκατομμύρια ευρώ. Ταυτόχρονα, οι δημόσιες δαπάνες της ΕΕ για την προστασία των ακτογραμμών από τον κίνδυνο της διάβρωσης και των πλημμυρών ανέρχονται σε 5,4 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως για την περίοδο 1990-2020 (European Environment Agency, 2018).

Ειδικότερα, η Μεσόγειος θάλασσα αποτελεί μία ξεχωριστή ζώνη βιοποικιλότητας με ιδιαίτερη βιο-χημική σύσταση υδάτων. Παρά το γεγονός ότι αποτελεί μόνο το 0,82% της συνολικής έκτασης της υδάτινης επιφάνειας της γης έχει υπολογιστεί ότι φιλοξενεί το 4-18% των θαλάσσιων ειδών σε ολόκληρο τον κόσμο, εκ των οποίων πάνω από το 25% θεωρούνται ενδημικοί οργανισμοί. Επιπρόσθετα, τα τελευταία 50 χρόνια, η κυκλοφορία των πλοίων στην περιοχή της Μεσογείου έχει αυξηθεί δραματικά και, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, τα πλοία αυτά κατασκευάζονται όλο και μεγαλύτερα, ταχύτερα και με μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Η ανατολική Μεσόγειος, αποτελεί πύλη για τη μεταφορά καυσίμων μεταξύ της Μέσης Ανατολής (Μαύρη Θάλασσα) και Δυτικής Ευρώπης, με τάση τα επόμενα χρόνια να



διαπλέεται ακόμα συχνότερα (Ινστιτούτο Θαλάσσιας Προστασίας, 2018). Αναφορικά, με τις θαλάσσιες περιοχές εθνικού ενδιαφέροντος (Αιγαίο Πέλαγος, Ιόνιο, κτλ) τονίζεται ότι είναι υδάτινες περιοχές που χαρακτηρίζονται στην πλειονότητά τους ως παράκτια ύδατα (coastal waters). Τα παράκτια ύδατα θεωρούνται διεθνώς ως πολυσύνθετα οικολογικά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο περιοχές αλιείας όσο και περιοχές έντονης ναυσιπλοΐας. Ειδικά σε χώρες σαν την Ελλάδα, οι οποίες αποτελούνται από κατοικήσιμα νησιωτικά συμπλέγματα με έντονη τουριστική κίνηση, τα οποία εξυπηρετούνται μέσω κρίσιμων θαλάσσιων έργων και λιμενικών εγκαταστάσεων, και διαπλέονται από διάφορους τύπους πλοίων (Ε/Γ-Ο/Γ, LNG, GARGO's, κτλ) είναι προφανής η περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική σημασία των υπόψη περιοχών.

Διεθνείς ερευνητές εκτιμούν ότι η θαλάσσια έκταση της Ελληνικής Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (Α.Ο.Ζ.), η οποία σε εμβαδόν ταυτίζεται ως γεωγραφικό όριο με την ελληνική υφαλοκρηπίδα, ανέρχεται σε 500.000 km<sup>2</sup> περίπου, γεγονός που κάνει την θαλάσσια έκταση Εθνικής αρμοδιότητας τέσσερις (4) φορές μεγαλύτερη από εκείνη της χερσαίας (Vivero, 2007). Από τα παραπάνω, προκύπτει το γεγονός ότι η Ελλάδα είναι μία αμιγώς ναυτική χώρα με μεγάλο τμήμα των κοινωνικών και οικονομικών της πόρων να σχετίζεται με την θάλασσα και εν γένει το νερό (ύδωρ).

Η επιστήμη, η οποία ασχολείται με την εκτέλεση μετρήσεων σε παράκτιες και πελάγιες περιοχές, που σκοπό έχουν την περιγραφή του αναγλύφου του θαλασσίου πυθμένα και των αντικειμένων που βρίσκονται επί αυτού είναι η Υδρογραφία και ειδικότερα η Βαθυμετρία. Πρωταρχικός στόχος της Υδρογραφίας/βαθυμετρίας είναι η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και η υποστήριξη άλλων θαλάσσιων δραστηριοτήτων, όπως η κατασκευή λιμενικών έργων, η θαλάσσια έρευνα, η έρευνα υδρογονανθράκων, δραστηριότητες προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος και διαχείρισης της παράκτιας ζώνης.

Αξιολογώντας τις πηγές προέλευσης των βαθών και τις λοιπές πληροφορίες ως αυτές αναγράφονται στους Χάρτες Ελληνικής Έκδοσης (ΧΕΕ) εκδόσεως της Υδρογραφικής Υπηρεσίας Π.Ν. (Υ.Υ./Π.Ν.), προκύπτει ότι το ποσοστό κάλυψης στην θαλάσσια περιοχή Ελληνικής αρμοδιότητας με υδρογραφικά (βαθυμετρικά) δεδομένα πεδίου δεν υπερβαίνει το 35%, ενώ το ποσοστό δεδομένων (βαθών) επί των ναυτικών χαρτών, τα οποία έχουν συλλεχθεί με σύγχρονα συστήματα υδρογράφησης και σύμφωνα με τις ισχύουσες διεθνείς προδιαγραφές, είναι μικρότερο του 20%. Το εν λόγω μικρό σχετικά ποσοστό κάλυψης

οφείλεται σε εγγενείς δυσκολίες που σχετίζονται με τις διάφορες φάσεις εκτέλεσης βαθυμετρικών αποτυπώσεων, όπως αυτές περιγράφονται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Οι τάσεις που επικρατούν στις σύγχρονες υδρογραφήσεις είναι η απόκτηση περισσότερων δεδομένων υψηλότερης ακρίβειας και η συλλογή περισσότερων δεδομένων με μεγαλύτερες ταχύτητες. Ωστόσο, υφίστανται διάφοροι παράγοντες που περιορίζουν την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ακρίβειας και ταχύτητας συλλογής των δεδομένων. Τα παραπάνω στοιχεία καταδεικνύουν την αναγκαιότητα ταχείας συλλογής δεδομένων βαθυμετρίας για την άμεση επικαιροποίηση των υπαρχόντων ΧΕΕ ή παραγωγή νέων έντυπων ή ψηφιακών-η/ν ναυτικών χαρτών.

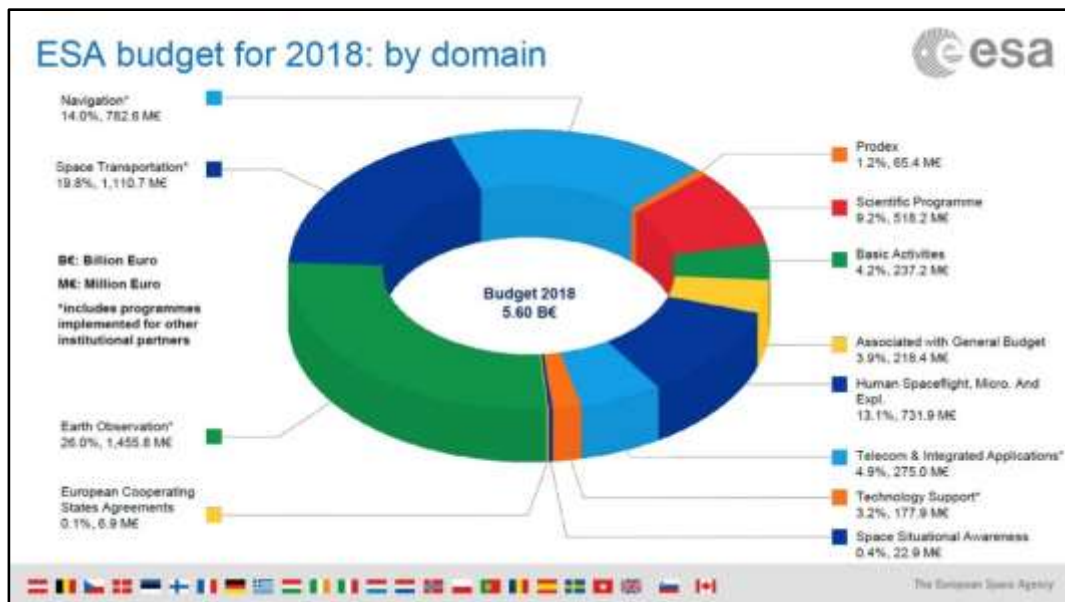
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να ερευνηθούν τρόποι, μεθοδολογίες και τεχνικές, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν την προαναφερόμενη αναγκαιότητα, δηλαδή την ταχεία συλλογή ψηφιακών δεδομένων περιβάλλοντος, και ειδικότερα της βαθυμετρίας, αξιοποιώντας τεχνολογίες αιχμής (*State-of-the-Art*), όπως είναι οι τεχνικές με χρήση των συστημάτων τηλεπισκόπησης. Ταυτόχρονα, διερευνώνται οι δυνατότητες εάν ο υπόψη σκοπός μπορεί να επιτευχθεί με όσο το δυνατόν λιγότερους πόρους και μη κοστοβόρες δράσεις και μεθοδολογίες, όπως για παράδειγμα με ελεύθερα στο διαδίκτυο λογισμικά και δεδομένα ή στοιχεία σχετικά πολύ μικρού κόστους. Ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής έρευνας ασχολείται με ένα ζήτημα (ερευνητικό αντικείμενο), το οποίο επί της ουσίας απασχολεί σε παγκόσμιο επίπεδο την ναυτιλία. Εκτιμάται δε ως πολύ σημαντικό, καθόσον άπτεται των ζητημάτων που σχετίζονται με την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στην θάλασσα και της ασφαλούς πλοήγησης των σκαφών σε παράκτια ύδατα, δηλαδή στις πιο επικίνδυνες περιοχές από άποψη συχνότητας ναυτικών ατυχημάτων (Manraeidopoulos, 2019).

Η δυνατότητα συλλογής γεωχωρικών δεδομένων ακριβείας, σε σύντομο χρονικό διάστημα, με σύγχρονα συστήματα, από υδάτινες περιοχές μεγάλης έκτασης, οι οποίες στην πλειονότητά τους είναι και απομεμακρυσμένες (*remote areas*) από τα μεγάλα αστικά κέντρα λήψης αποφάσεων, συμβάλλει στην ταχύτερη επικαιροποίηση των ναυτικών χαρτών (ΧΕΕ), για την υποστήριξη της ασφαλούς διακίνησης επιβατών και εμπορευμάτων, και κατά συνέπεια αποτελεί παράμετρο υποστήριξης της εθνικής οικονομίας και της ανάπτυξης ενός παράκτιου κράτους.

## 1.2 «Η ΙΔΕΑ»

Η ιδέα και το κίνητρο (motivation) για την παρούσα διατριβή είναι να αξιοποιηθούν περισσότερο οι ήδη υπάρχοντες πόροι διαστήματος, ώστε να αποκτηθούν εξειδικευμένα δεδομένα που αφορούν σε πληροφορία βαθυμετρίας, με σκοπό αφενός την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στην θάλασσα, αφετέρου την προστασία του θαλασσιού περιβάλλοντος, δηλαδή κατ' ουσίαν την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας.

Η χώρα μας όπως και άλλες ευρωπαϊκές χώρες (ESA, 2018) συνεισφέρουν ετησίως με ένα πολύ σημαντικό ποσοστό από τον προϋπολογισμό τους για την υποστήριξη των προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA). Ενδεικτικά για το έτος 2018 ο προϋπολογισμός (Π/Υ) της ESA ανήλθε στο ύψος των 5.60 δισεκατομμυρίων ευρώ (€), τα οποία κατανεμήθηκαν σε διάφορους τομείς της διαστημικής τεχνολογίας (Εικόνα 1.1).

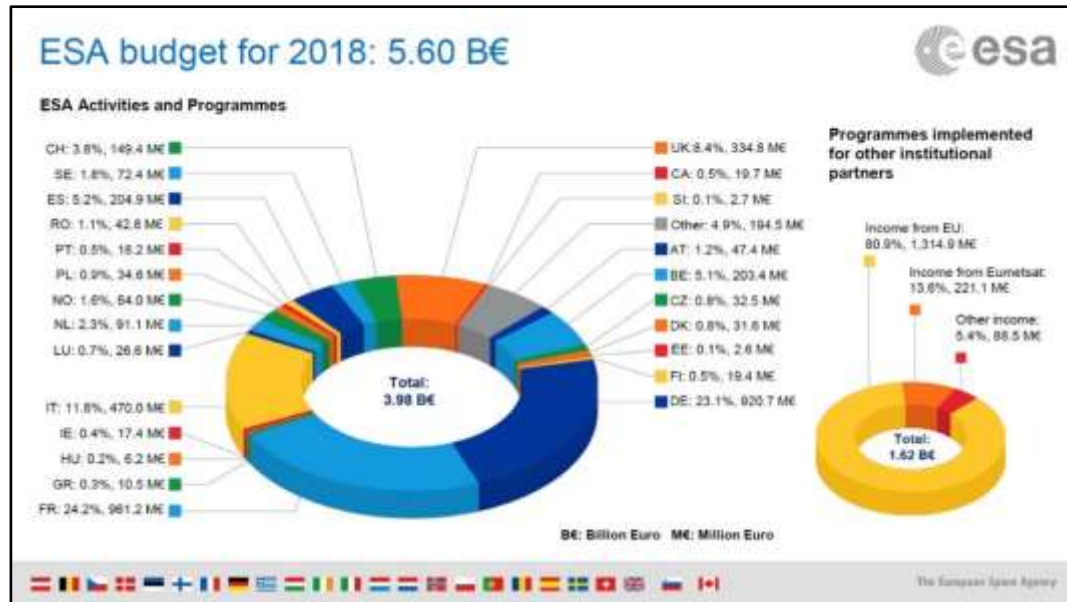


Εικόνα 1.1: Προϋπολογισμός Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος για το έτος 2018 ([https://www.esa.int/About\\_Us/Welcome\\_to\\_ESA/Funding](https://www.esa.int/About_Us/Welcome_to_ESA/Funding))

Η χώρα μας μαζί με τα υπόλοιπα κράτη-μέλη κατέβαλαν μόνο το έτος 2018, 3,98 δισεκατομμύρια € που αντιστοιχεί σε ποσοστό 71,0 % του συνολικού Π/Υ της ESA. Η Ελλάδα, πιο συγκεκριμένα, συμμετείχε κατά το 2018 με το ποσό των 10,5 εκατομμυρίων ευρώ που αντιστοιχεί σε ποσοστό 0,18 % του συνολικού Π/Υ της ESA (Εικόνα 1.1).






Τα παραπάνω ποσά προφανώς θεωρούνται αμελητέα συγκρινόμενα με το κόστος σε ανθρώπινα θύματα και με τα κεφάλαια που απαιτούνται για την αποκατάσταση των ζημιών









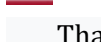
από φυσικές καταστροφές στις παράκτιες ζώνες, όπως ενδεικτικά αναφέρονται σε ορισμένες (όχι όλες) περιπτώσεις ακραίων φαινομένων, τα οποία παρατηρούνται από το διάστημα με τις τεχνικές τηλεπισκόπησης (Πίνακας 1.1).



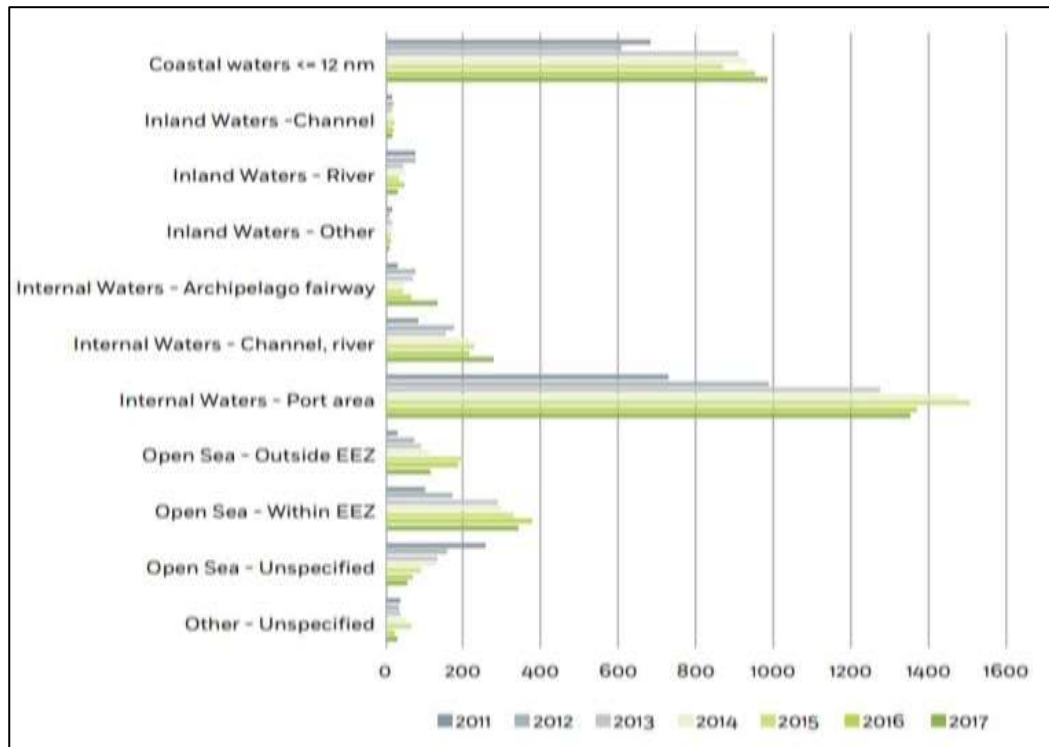
Εικόνα 1.1: Συνεισφορά χωρών Ε.Ε. στην Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος για το έτος 2018 ([https://www.esa.int/About\\_Us/Welcome\\_to\\_ESA/Funding](https://www.esa.int/About_Us/Welcome_to_ESA/Funding))

Πίνακας 1.1 : Κόστος αποκατάστασης ζημιών μετά από φυσικές καταστροφές κατά τα έτη 2017-18 ([https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_disasters\\_by\\_cost#cite\\_note-42](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_disasters_by_cost#cite_note-42))

| List of Natural Disasters by Cost |                  |                 |   |                     |      |   |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|---|---------------------|------|---|
| Cost in billions USD              | Cost (2017-2018) | Fatalities      | Event   | Type                | Year | Nation  |
| \$15                              | \$19.4           | 230000 – 280000 | <u>2004 Indian Ocean earthquake and tsunami</u> | Earthquake, Tsunami | 2004 | <br>Southeast Asia |
| \$8.1 – \$14                      | \$9.2 – \$16     | 100000 – 220000 | <u>2010 Haiti earthquake</u>                    | Earthquake          | 2010 | <br>Haiti          |
| \$53.25                           | \$115.8          | 4800 – 17000    | <u>1988-89 North American drought</u>           | Drought             | 1988 | <br>U.S., Canada   |
| \$197                             | \$329.8          | 5502 – 6434     | <u>Great Hanshin earthquake</u>                 | Earthquake          | 1995 | <br>Japan          |
| \$10                              | \$29.6           | 1700 – 10000    | <u>1980 United States heat wave</u>             | Drought             | 1980 | <br>United States  |

|                |         |                       |   |                     |      |  |
|----------------|---------|-----------------------|---|---------------------|------|--|
| <u>\$40</u>    | \$115.5 | 2483 - 4900           | <u>1980 Irpinia earthquake</u>            | Earthquake          | 1980 | <br>Italy         |
| <u>≥\$91.6</u> | ≥\$94.9 | <u>3057 - 8498[7]</u> | <u>Hurricane Maria</u>                    | Tropical cyclone    | 2017 | <br>North America |
| <u>\$125</u>   | \$164.9 | 1245 - 1836           | <u>Hurricane Katrina</u>                  | Tropical cyclone    | 2005 | <br>United States |
| <u>\$12.9</u>  | \$14.7  | 138366                | <u>Cyclone Nargis</u>                     | Tropical cyclone    | 2008 | <br>Myanmar       |
| <u>\$148</u>   | \$176.4 | 87587                 | <u>2008 Sichuan earthquake</u>            | Earthquake          | 2008 | <br>China         |
| <u>\$360</u>   | \$411.3 | 15894                 | <u>2011 Tōhoku earthquake and tsunami</u> | Earthquake, Tsunami | 2011 | <br>Japan         |
| <u>\$18.5</u>  | \$23.2  | 97 - 125              | <u>Hurricane Rita</u>                     | Tropical cyclone    | 2005 | <br>United States |
| <u>\$45.7</u>  | \$49.8  | 815                   | <u>2011 Thailand floods</u>               | Flood               | 2011 | <br>Thailand      |
| \$15.1         | \$15.4  | 603                   | <u>Hurricane Matthew</u>                  | Tropical cyclone    | 2016 | <br>North America |

Σε ότι αφορά τα ειδικότερα θέματα της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας αξίζει να σημειωθεί ότι κατά το χρονικό διάστημα 2011-17, συνέβησαν 23.264 περιστατικά στην θάλασσα από τα οποία σε 20.616 περιπτώσεις προκλήθηκαν ατυχήματα. Κατά την διάρκεια των εν λόγω ναυτικών ατυχημάτων προκλήθηκαν 6.812 τραυματισμοί προσωπικού και επιβατών, ενώ υπήρξαν 683 θύματα. Για την διερεύνηση των προαναφερομένων συμβάντων διενεργήθηκαν 1.070 πραγματογνωμοσύνες (EMSA, 2018) απασχολώντας ανάλογους πόρους και δαπάνη για τους εμπλεκόμενους φορείς. Όλα τα παραπάνω μεταφράζονται σε πολύ υψηλό κόστος (€), το οποίο αναλαμβάνεται από τα ενδιαφερόμενα μέρη (Stakeholders) όπως για παράδειγμα κράτη-μέλη, ιδιοκτήτες πλοίων, ασφαλιστικές εταιρείες, κτλ.



**Εικόνα 1.2:** Αριθμός ναυτικών ατυχημάτων ανά κατηγορία θαλάσσιας περιοχής κατά τα έτη 2011-18 (© European Maritime Safety Agency).

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Ασφάλειας Ναυσιπλοΐας (European Maritime Safety Agency-EMSA), η οποία ιδρύθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό 1406/2002 (REGULATION (EC) No. 1406/2002) της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), όπως αυτός έχει συμπληρωθεί, τροποποιηθεί και ισχύει μέχρι σήμερα, τα περισσότερα ναυτικά ατυχήματα συμβαίνουν στην παράκτια ζώνη (Internal Waters, Port Areas, Coastal Waters) (Εικόνα 1.2)

Από την παραπάνω ανάλυση, προκύπτει η ανάγκη, το ενδιαφέρον, το κίνητρο και η σύλληψη της ιδέας για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής που ήταν να ερευνηθεί κατά πόσο οι υφιστάμενοι πόροι, η υπάρχουσα υποδομή και εγκαταστάσεις που σχετίζονται με τον τομέα του διαστήματος και ειδικότερα με το τμήμα παρατήρησης γης (remote sensing) μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω και να συνεισφέρουν στα αντικείμενα της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας.

### 1.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η διερεύνηση των δυνατοτήτων εξαγωγής της βαθυμετρίας από παράκτιες θαλάσσιες περιοχές, με χρήση ψηφιακών δορυφορικών εικόνων υψηλής διακριτικής ικανότητας, αποτελεί αντικείμενο υψηλού επιστημονικού ενδιαφέροντος και απασχολεί διαρκώς τους επιστήμονες τα τελευταία πενήντα (50) περίπου χρόνια.

Οι πρώτες προσπάθειες ερευνητών για την συλλογή δεδομένων βαθυμετρίας από εναέριους (airborne) ή διαστημικούς (space borne) αισθητήρες αρχίζουν την δεκαετία 1970, όταν σε μια μελέτη που διεξήχθη από το Πανεπιστήμιο του Michigan (USA), χρησιμοποιήθηκε ένα Δορυφορικό Σύστημα επωφελεία της Ωκεανογραφικής Υπηρεσίας του Ναυτικού των ΗΠΑ (U.S. Naval Oceanographic Office), με το οποίο υπολογίστηκε το βάθος σε ρηχά ύδατα, μετρώντας τις μεταβολές της διάθλασης κύματος και χρησιμοποιώντας μετασχηματισμούς Fourier (Polcyn *et al.*, 1970).

Λίγο αργότερα (1975), η NASA με το πείραμα «Cousteau Ocean Bathymetry Experiment» κατέδειξε τη χρησιμότητα της δορυφορικής βαθυμετρίας μέσω της απεικόνισης του πολυφασματικού σαρωτή LandSat Multispectral Scanner (MSS). Το εν λόγω πείραμα απέδειξε τη δυνατότητα της δορυφορικής απεικόνισης και χαρτογράφησης των κινδύνων της ναυσιπλοΐας, σε καθαρό θαλάσσιο ύδωρ, σε βάθη έως και 22 μέτρα (ακρίβεια 10%). Τα βάθη που υπολογίστηκαν από το δορυφορικό σύστημα LandSat MSS επαληθεύτηκαν από την ομάδα εδάφους που επέβαινε στο πλοίο Calypso Survey (Hammack, 1977).

Από το 1970, οι μεγάλες εξελίξεις στη διαστημική επιστήμη και δορυφορική τεχνολογία, οι νέες τεχνικές τηλεπισκόπησης, οι περίπλοκοι αλγόριθμοι και τα εξειδικευμένα λογισμικά επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων έχουν βελτιώσει σε μεγάλο βαθμό την δυνατότητα των επιστημόνων να αποκτήσουν καλύτερη γνώση της θαλάσσιας μορφολογίας, της αποτύπωσης των θαλάσσιων οικοτόπων και της διαχείρισης των παράκτιων περιοχών.

Ωστόσο, παρόλο που η εξαγόμενη από τους δορυφόρους βαθυμετρία (Satellite Derived Bathymetry-SDB) παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα ότι μπορεί να παρέχει επαρκή κάλυψη δεδομένων, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές, καλύτερη ικανότητα ανίχνευσης αντικειμένων στα ρηχά ύδατα από τις παραδοσιακές μεθόδους υδρογράφησης (π.χ. βολίδα (Lead line) ή τα ακουστικά συστήματα μονής δέσμης (Single-

beam Echo sounders), μέχρι σήμερα, δεν έχει αξιοποιηθεί επαρκώς για την υποστήριξη της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας.

Ο βασικός στόχος λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει κατά πόσο τα δεδομένα βαθυμετρίας-υδρογραφίας που υπολογίζονται από δορυφορικά συστήματα δύνανται να χρησιμοποιηθούν για τους σκοπούς της ασφάλειας ναυσιπλοΐας και κυρίως για την κατασκευή ή/και επικαιροποίηση των έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών.

Εντούτοις, για να μελετηθεί κατά πόσο η εξαγόμενη από τις δορυφορικές εικόνες βαθυμετρία δύνανται να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των ναυτικών χαρτών (έντυπων ή η/ν) πρέπει προηγουμένως να δημιουργηθεί μία μεθοδολογία, η οποία να οδηγεί σε ασφαλή αποτελέσματα, δηλαδή να δύνανται να υπολογίζει τα βάθη σε μία περιοχή ενδιαφέροντος, με αποδεκτές αποκλίσεις ως προς την αβεβαιότητα/σφάλματα. Η έρευνα για την δημιουργία μίας τέτοιας μεθοδολογίας αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της παρούσας διατριβής.

Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων, στη παρούσα διδακτορική διατριβή, καταρχήν, διερευνώνται, αναλύονται και συγκρίνονται οι δυνατότητες και η λειτουργικότητα των υφισταμένων στο εμπόριο λογισμικών επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων και αξιολογείται κατά πόσο η εξαγόμενη βαθυμετρία από τα εν λόγω λογισμικά μπορεί να είναι εφικτή με το μικρότερο δυνατό κόστος. Επίσης, διερευνάται και κατά πόσο είναι εφικτό να επιτευχθούν ικανοποιητικές ακρίβειες αποτελεσμάτων με μικρό αριθμό πρωτογενών δεδομένων, λαμβανομένης υπόψη της δυσκολίας συλλογής των.

Ακολούθως, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των πιο «δημοφιλών» αλγορίθμων και τεχνικών-μεθόδων που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εξαγωγή βαθυμετρίας από πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες. Η υπόψη αξιολόγηση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της εκτελεσθείσας διδακτορικής έρευνας.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο/αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για την εξαγωγή βαθυμετρίας από δεδομένα παθητικής τηλεπισκόπησης, τα αποτελέσματα εφαρμογής του σε επιλεγμένες θαλάσσιες περιοχές και οι προτάσεις περαιτέρω αξιοποίησης του που στοχεύουν στην ταχεία έκδοση ή/και επικαιροποίηση των διαφόρων κατηγοριών των έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών επωφελεία της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας.



## 1.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Για την επίτευξη του «Σκοπού» και των στόχων της παρούσας έρευνας, όπως αυτοί αναφέρθηκαν παραπάνω, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία, η οποία εστιάζεται στη διερεύνηση τρόπων ταχείας συλλογής ψηφιακών δεδομένων βαθυμετρίας, αξιοποιώντας τεχνολογίες αιχμής (*State-of-the-Art*), όπως είναι οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης. Η δημιουργία μίας κατάλληλης μεθόδου (model) για τον συγκεκριμένο σκοπό (εξαγωγή βαθυμετρίας), και ταυτόχρονα η εκπόνηση έρευνας, η οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί με στόχο την ελαχιστοποίηση των διατιθέμενων πόρων, και με αντικειμενικό σκοπό τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Τέλος, η υπόψη μέθοδος διερευνά την εφικτότητα τα δεδομένα βαθυμετρίας που εξάγονται από την υιοθετηθείσα τεχνική εξαγωγής βαθυμετρίας να δύνανται να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή των ναυτικών χαρτών, οι οποίοι σκοπό έχουν την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας.

Για την επίτευξη των προαναφερόμενων στόχων της παρούσας έρευνας επιλέχθηκαν τρεις (3) παράκτιες περιοχές. Η μία είναι η θαλάσσια περιοχή του στενού ν. Πάρου-ν. Αντιπάρου (Νομ. Κυκλάδων), η δεύτερη είναι η ευρύτερη παράκτια περιοχή του Αγ. Κοσμά-Ελληνικού (Νομ. Αττικής) και η τρίτη είναι η υδάτινη περιοχή του Κόλπου Λαγανά-Γέρακα ν. Ζακύνθου. Πρόκειται για τρεις (3) πολύ αναπτυγμένες τουριστικά θαλάσσιες περιοχές που παρουσιάζουν αρκετή ναυτιλιακή κίνηση κυρίως από σκάφη αναψυχής διαφόρων μεγεθών.

Η εξαγωγή της βαθυμετρίας, μέσω αναλυτικής ή την ημι-αναλυτικής προσέγγισης, προϋποθέτει τη δημιουργία κάποιου αλγόριθμου/μοντέλου, το οποίο περιγράφει τη διαδικασία διάδοσης της ακτινοβολίας στα διάφορα οπτικά μέσα (π.χ. ατμόσφαιρα, υδάτινο μέσο, κτλ) κυρίως με αναλυτικό (μαθηματικό) τρόπο. Για τον λόγο αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας επινοήθηκε/δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος/μοντέλο βαθυμετρίας, ο οποίος για να λειτουργήσει απαιτεί γνώση των συνθηκών και του τρόπου διάδοσης του φωτός (H/M ακτινοβολίας) στην υδάτινη μάζα, ενώ για την παραμετροποίηση του απαιτείται η γνώση των οπτικών ιδιοτήτων του νερού, όπως για παράδειγμα του «Συντελεστή Εξασθένησης» ( $K_d(\lambda)$ ) (Attenuation Coefficient), του συντελεστή Απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ) (absorption coefficient) ή/και του «Συντελεστή Οπισθοσκέδασης» ( $b_b(\lambda)$ ) (Backscattering Coefficient).

Παράλληλα, ελέγχθηκε το γεγονός εάν το συγκεκριμένο μοντέλο βαθυμετρίας δύναται να εκτελεστεί-εφαρμοστεί από τα υφιστάμενα λογισμικά επεξεργασίας εικόνων (ESA/SNAP

Desktop, ENVI, ArcGIS Pro) και ανάλυσης δεδομένων, ποιο είναι το καταλληλότερο λογισμικό για την επεξεργασία των βιο-οπτικών παραμέτρων, ποιο είναι εκείνο το οποίο διατίθεται με το μικρότερο κόστος. Από την υπόψη αξιολόγηση αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί στο μεγαλύτερο ποσοστό της επεξεργασίας της παρούσας έρευνας το ανεπτυγμένο από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) λογισμικό «SNAP Desktop», το οποίο διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο.

Επίσης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την στατιστική συσχέτιση των αποτελεσμάτων προέρχονται από πηγές σχετικά μικρού κόστους διάθεσης των προϊόντων τους, όπως για παράδειγμα ένας ναυτικός χάρτης του εμπορίου που έχει κόστος 15-20 €/τέμ. Εξαιρέση αποτελούν τα βαθυμετρικά δεδομένα πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση της περιοχής ν. Ζακύνθου.

Το υπόψη μοντέλο στην συνέχεια βαθμονομείται, όπως συμβαίνει στους «εμπειρικούς αλγορίθμους», με δεδομένα πεδίου (υδρογράφησης) ή δεδομένα που απεικονίζονται στους Χάρτες Ελληνικής Έκδοσης (ΧΕΕ), για βελτίωση της ακρίβειάς του. Το «Υβριδικό» μοντέλο (Hybrid Model), το οποίο εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας και περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο, αποτελεί τον πυρήνα της υιοθετηθείσας μεθοδολογίας στην παρούσα διατριβή.

Στην συνέχεια κάθε θαλάσσια περιοχή μελέτης ταξινομείται σε κλάσεις (classes) με βάση την «συμπεριφορά» (μεταβολή) των βιο-οπτικών παραμέτρων της υδάτινης μάζας.

Εφαρμόζονται τεχνικές στατιστικής συσχέτισης σε καθεμία κλάση με αξιοποίηση των σχέσεων των βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων και των δεδομένων πεδίου σε κάθε κλάση/περιοχή. Αφαιρούνται τα βάθη που αφορούν σε θόρυβο-σφάλματα (blunders). Ακολούθως, επιλέγεται η εξίσωση που παρουσιάζει την καλύτερη στατιστική συσχέτιση, ήτοι εκείνη με τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού συσχέτισης ( $R^2$ - Coefficient of Determination) σε κάθε κλάση υδάτινης περιοχής και υπολογίζεται η δορυφορική βαθυμετρία.

Εάν απαιτείται, το τελικά διορθωμένο μοντέλο βαθυμετρίας επανελέγχεται φιλτράροντας τα υπολογιζόμενα βάθη, τα οποία δίνουν τιμές με απόκλιση από τις τιμές πεδίου ή των ΧΕΕ πάνω από μία οριακή τιμή. Ελέγχεται ξανά η στατιστική συσχέτιση μεταξύ του τελικού μοντέλου και των «φιλτραρισμένων» βαθών. Ξαναεκτελείται (εφόσον απαιτηθεί)

ο αλγόριθμος προκειμένου βελτιωθεί η ακρίβεια του βαθυμετρικού μοντέλου στο μέγιστο βαθμό.

Τα εξαγόμενα δεδομένα βαθυμετρίας (Satellite Derived Bathymetry-SDB) αξιολογούνται ως προς την ακρίβειά τους συγκρινόμενα (στατιστικά) με τα αποτελέσματα βαθυμετρίας άλλων αλγορίθμων βαθυμετρίας (π.χ. Stumpf, *et al.*, 2003) που υφίσταται ήδη σε εμπορικά λογισμικά (ENVI Harris Software), με δεδομένα βαθών που αναγράφονται στους εν ισχύ ΧΕΕ ή/και με δεδομένα βαθυμετρίας που προέρχονται από εργασίες πεδίου.

Τέλος, αξιολογείται η δυνατότητα τα εξαγόμενα αποτελέσματα βαθυμετρίας από την προαναφερθείσα διαδικασία-μοντέλο (Hybrid Model) να χρησιμοποιηθούν σε προϊόντα ναυτικής χαρτογραφίας.

Επειδή το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής έρευνας έπρεπε να ελεγχθεί και να επιβεβαιωθεί ότι λειτουργεί σε διάφορες υδάτινες περιοχές, με διαφορετικούς αισθητήρες και με διαφορετικούς τύπους δεδομένων πεδίου για την βαθμονόμηση του, για τον σκοπό αυτό το Υβριδικό βαθυμετρικό Μοντέλο εκτελέστηκε, ως προαναφέρθηκε, σε τρεις (3) διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές, με τρεις (3) διαφορετικούς αισθητήρες (Sentinel-2, Pleiades-1A, Landsat 8(OLI)), διαφορετικής φασματικής και χωρικής ανάλυσης και με διαφορετικούς τύπους δεδομένων αναφοράς (reference data/depths) για βαθμονόμησης του. Τα αποτελέσματα εκτιμώνται ως αρκετά ικανοποιητικά.

## **1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

Η παρούσα διατριβή αποτελείται συνολικά από έξι (6) Κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα στο «Κεφάλαιο 1», αναλύεται ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής έρευνας και οι βασικοί της στόχοι. Αναφέρεται στα κίνητρα και την «ιδέα» που οδήγησαν στη διερεύνηση νέων τρόπων-μεθοδολογιών υποστήριξης των θεμάτων της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας, ενώ περιγράφεται συνοπτικά η δομή της διατριβής αναφέροντας σε τι πραγματεύεται κάθε κεφάλαιο της υπόψη εργασίας.

Στο «Κεφάλαιο 2», παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Οπτικής Ωκεανογραφίας, εστιάζοντας στον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και στο νερό. Περιγράφονται οι βιο-οπτικές ιδιότητες των υδάτων και τα φαινόμενα που

σχετίζονται με την εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας και πως αυτά επιδρούν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαγωγής βαθυμετρίας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σημαντικότερων πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν (μέχρι και σήμερα) από επιστήμονες και ερευνητές στα αντίστοιχα ερευνητικά αντικείμενα (εξαγωγή δορυφορικής βαθυμετρίας) και αναφέρονται εκτενώς οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές πηγές. Επίσης, γίνεται αναφορά στους εφαρμοζόμενους διεθνώς αλγορίθμους/μοντέλα εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας. Παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε καθέναν από αυτούς, οι παραδοχές εφαρμογής, οι οριακές συνθήκες, μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα κάθε περίπτωσης. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στις πιο σημαντικές αποφάσεις των Διεθνών Οργανισμών που είναι αρμόδιοι για τα αντικείμενα που άπτονται της ασφάλειας ναυσιπλοΐας. Περιγράφονται οι βασικές αρχές που διέπουν τις υδρογραφικές-βαθυμετρικές αποτυπώσεις, οι δυσχέρειες που διαπιστώνονται στην συλλογή και αξιοποίηση των συλλεχθέντων από το πεδίο δεδομένων για την ταχύτερη αξιοποίησή τους στην παραγωγή των ναυτικών χαρτών (ΧΕΕ), στις ισχύουσες διεθνείς προδιαγραφές και στα πρότυπα για την κατασκευή ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών (ENCs) καθώς και των συστημάτων απεικόνισης (ECDIS) αυτών.

Στο «Κεφάλαιο 3», περιγράφονται αναλυτικά οι θαλάσσιες περιοχές μελέτης. Εξηγείται για ποιο λόγο επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες υδάτινες περιοχές, προκειμένου πραγματοποιηθούν τα πειράματα εξαγωγής βαθυμετρίας της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Περιγράφονται τα βασικά υδρογραφικά, ωκεανογραφικά, κλιματολογικά και εν γένει περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν καθεμία από αυτές.

Στο «Κεφάλαιο 4», περιγράφεται αναλύεται η τεχνολογία αιχμής (*State-of-the-Art*) που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία, όπως είναι η εκπόνηση νέας μεθοδολογίας (Hybrid Model), η οποία δοκιμάστηκε σε όλες τις περιοχές των παράκτιων περιοχών που επιλέχθηκαν στην παρούσα έρευνα. Επίσης, γίνεται αναφορά στους τύπους των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, και στους αισθητήρες τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που διενεργήθηκαν, ούτως ώστε να επιτευχθούν όλοι οι «βασικοί στόχοι» της παρούσας έρευνας. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα δεδομένα πεδίου και τα λοιπά γεωχωρικά δεδομένα/προϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περιοχή έρευνας δίδοντας λεπτομέρειες για την ακρίβεια αυτών, την κλίμακα, το έτος προέλευσης, και άλλες γεωδαιτικής φύσεως πληροφορίες. Τέλος, παρουσιάζονται τα λογισμικά που

χρησιμοποιήθηκαν στα διάφορα πειραματικά στάδια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, για την επεξεργασία, ανάλυση και θέαση των αποτελεσμάτων, ενώ επεξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα εργαλεία (Toolboxes). Περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια (βήματα) εφαρμογής του Υβριδικού μοντέλου εξαγωγής βαθυμετρίας που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής έρευνας. Ακολούθως, γίνεται συγκριτική αξιολόγησή του με τα λοιπά μοντέλα βαθυμετρίας, ενώ αναφέρονται κάποιες δυσχέρειες που διαπιστώθηκαν κατά την εφαρμογή του. Σημειώνεται ότι ή εν λόγω τεχνική/μεθοδολογία/αλγόριθμος εξαγωγής βαθυμετρίας (Υβριδικό Μοντέλο) από πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες δεν έχει αναφερθεί προηγουμένως στην διεθνή βιβλιογραφία.

Στο «Κεφάλαιο 5» παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία, την ανάλυση και εν γένει τα πειράματα σε κάθε περιοχή ερεύνης. Γίνεται αναφορά στον τρόπο αξιολόγησης των μοντέλων, στην ακρίβεια που επιτεύχθηκε, στις αβεβαιότητες (σφάλματα) που τελικώς πρόεκυψαν ανά περιοχή μελέτης καθώς και στις λοιπές τεχνικές ιδιαιτερότητες που διαπιστώθηκαν κατά το στάδιο των πειραμάτων εξαγωγής βαθυμετρίας. Επίσης, Συγκρίνονται οι ακρίβειες του νέου μοντέλου εξαγωγής βαθυμετρίας με τις ακρίβειες των διεθνών προδιαγραφών εκτέλεσης υδρογράφησης και κατασκευής ναυτικών χαρτών. Τέλος, παρουσιάζονται οι δυνατότητες αξιοποίησης των αποτελεσμάτων του δημιουργηθέντος στην παρούσα εργασία μοντέλου εξαγωγής βαθυμετρίας στην παραγωγή και επικαιροποίηση χαρτογραφικών προϊόντων που στοχεύουν στην υποστήριξη της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας.

Στο «Κεφάλαιο 6», αναφέρονται τα βασικότερα συμπεράσματα ως αυτά προέκυψαν από τα πειράματα βαθυμετρίας, που διενεργήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Στο τέλος, παρατίθενται κάποιες προτάσεις για το μέλλον που προορίζονται για επιστήμονες και ερευνητές, οι οποίοι ενδεχομένως να ενδιαφερθούν να ασχοληθούν με την βελτιστοποίηση της χαρτογραφικής απόδοσης, του πραγματικά τεράστιου και πολύ ενδιαφέροντος, παράκτιου ανάγλυφου της χώρας μας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ

Από αρκετούς ερευνητές στο παρελθόν, έχει αναφερθεί η δυνατότητα καλύτερης διαχείρισης της παράκτιας ζώνης (υδρογραφήσεις, παρακολούθηση θαλάσσιας χλωρίδας, ταξινόμηση ιζημάτων πυθμένα, παράκτια αστική πολεοδόμηση, κτλ), μέσω της αξιοποίησης δορυφορικών δεδομένων από τους αισθητήρες μεσαίας και υψηλής ανάλυσης, όπως είναι οι Landsat 8 (OLI), Sentinel-2, Pleiades. Στις εν λόγω περιπτώσεις το κρίσιμο ζήτημα είναι να προσδιοριστεί η ποσότητα της ακτινοβολίας που φθάνει στον αισθητήρα (αποκλειστικά) από το νερό, δηλαδή το ποσοστό της ακτινοβολίας που εξέρχεται των υδάτων (water-leaving radiance). Η ποσότητα της ακτινοβολίας που εξέρχεται από το θαλάσσιο ύδωρ είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια, αφού αποτελεί ένα πολύ μικρό μέγεθος συγκριτικά με την ποσότητα της ακτινοβολίας που ανακλάται από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας ή/και από την θαλάσσια επιφάνεια (water surface scattering). Η με οπτικό τρόπο υπολογιζόμενη βαθυμετρία είναι συνάρτηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας από τον θαλάσσιο πυθμένα, της απόστασης του υδάτινου πυθμένα από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας (βάθους) και της φυσικής και χημικής σύστασης της υδάτινης στήλης.

Επιπρόσθετα των προαναφερομένων παραμέτρων, η θαλάσσια χαρτογράφηση (εξαγωγή βαθυμετρίας) των παράκτιων περιοχών με χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης, γίνεται ακόμα πιο δύσκολο και σύνθετο έργο-διαδικασία, αφού μόνο εκείνες οι φασματικές ζώνες (κανάλια) με την μεγαλύτερη διεισδυτικότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν-αξιοποιηθούν για τον σκοπό αυτό. Έτσι η απαίτηση να χαρτογραφηθούν παράκτιες περιοχές μέχρι βάθη περίπου στα 20 m, μπορεί να καλυφθεί μόνο με την χρήση καναλιών που λαμβάνουν φασματική πληροφορία στις ζώνες του μπλε και του πράσινου (blue-green range) φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Το γεγονός αξιοποίησης του φάσματος μόνο δύο (2) φασματικών ζωνών περιορίζει τις δυνατότητες ταξινόμησης των βενθικών πλυθυσμών και ιζημάτων του υδάτινου πυθμένα, λόγω της μικρής διαφοροποίησης των ιζημάτων και ενδιαιτημάτων του θαλάσσιου πυθμένα σε αυτές τις φασματικές ζώνες (blue-green). Αποτέλεσμα της μικρής φασματικής διακρίβωσης των διαφόρων κλάσεων του πυθμένα στις ζώνες blue και green, είναι η

δυσχέρεια που παρουσιάζεται στο να διαχωριστούν με σαφήνεια η ποιότητα και η έκταση των ιζημάτων, όποτε και να χαρτογραφηθούν με μεγάλη ακρίβεια κατά την διαδικασία της ταξινόμησης.

Επίσης, το πολύ χαμηλό επίπεδο (ένταση) του σήματος που φθάνει στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (Top-of-Atmosphere) και λαμβάνεται από τον αισθητήρα του δορυφόρου, συγκριτικά με το μεγάλο ποσοστό του θορύβου περιβάλλοντος που εμφανίζεται στην εικόνα λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας, των αερολυμάτων και των νεφών, της ηλιακής ανάκλασης στην υδάτινη επιφάνεια, καθώς και της θολότητας των υδάτων στην παράκτια ζώνη, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή χρήση των αλγορίθμων της ταξινόμησης της εικόνας, του προσδιορισμού της βαθυμετρίας και της χαρτογράφησης των βενθικών ενδαιτημάτων του πυθμένα.

Άρα, το κρίσιμο ερώτημα που τίθεται είναι εάν μπορούν τα δεδομένα των παραπάνω αισθητήρων να χρησιμοποιηθούν για εξαγωγή βαθυμετρίας ικανής ακρίβειας ώστε αυτή στην συνέχεια να δύναται να χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της ασφάλειας ναυσιπλοΐας, μέσω της αξιοποίησής της στην κατασκευή των ναυτικών χαρτών (έντυπων ή ηλεκτρονικών).

Από τα παραπάνω συνάγεται το γεγονός ότι η σημαντικότερη παράμετρος για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων εξαγωγής βαθυμετρίας μέσω της παθητικής οπτικής τηλεπισκόπησης, είναι η διαθεσιμότητα στον αισθητήρα/δέκτη της ηλεκτρομαγνητικής (H/M) ακτινοβολίας ή με άλλα λόγια της ποσότητας του φωτός (ηλιακής ενέργειας), που φθάνει στον υδάτινο πυθμένα ανακλάται από αυτόν και επιστρέφει πίσω στον αισθητήρα τηλεπισκόπησης. Η εξαγωγή βαθυμετρίας βασίζεται πρωτίστως στον τρόπο διάδοσης του φωτός, στα μέσα διάδοσης, όπως στην προκειμένη περίπτωση είναι η ατμόσφαιρα και το νερό, και στο τρόπο που αυτή διαδίδεται/επιστρέφει πίσω στον αισθητήρα τηλεπισκόπησης του δορυφόρου, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 800 km περίπου (TOA-Top-of-Atmosphere). Η σύσταση, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες και τα συστατικά του μέσου διάδοσης, ήτοι της ατμόσφαιρας και του νερού, επηρεάζουν την διαθεσιμότητα και εν γένει τον τρόπο διάδοσης του φωτός σε αυτά. Το πρόβλημα είναι αρκετά σύνθετο, αν αναλογιστεί κανείς ότι η περιοχή που παρουσιάζεται σε μία δορυφορική εικόνα να μην έχει ομοιογενή χαρακτηριστικά και η σύσταση κάθε μέσου (ατμόσφαιρας και υδάτινης μάζας) μπορεί να διαφέρει, είτε χωρικά (τοπικά), είτε χρονικά. Είναι σύνθηες το γεγονός, το εκάστοτε μέσο διάδοσης της ακτινοβολίας να μην παρουσιάζει χωρική (οριζόντια

ή κατακόρυφα), ή χρονική ομοιογένεια με συνέπεια μία παράκτια περιοχή να παρουσιάζει διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά ανά γεωγραφική θέση και από εποχή σε εποχή.

### 2.1.1 Διάδοση Ακτινοβολίας στην Ατμόσφαιρα

Ένας αισθητήρας τηλεπισκόπησης όταν ίπταται πάνω από μία υδάτινη περιοχή, καταγράφει ακτινοβολία, η οποία ορίζεται ως ανακλαστικότητα τηλεπισκόπησης ( $R_{rs}$  – Remote Sensing Reflectance,  $sr^{-1}$ ) που ισούται με το λόγο της ηλιακής ενέργειας (ακτινοβολίας/Radiance,  $W/m^2 \cdot sr^{-1}$ ) που βγαίνει από το νερό ( $L_w$  – water leaving radiance) προς την (ηλιακή) ενέργεια (ακτινοβολία/irradiance,  $W/m^2$ ) που εισέρχεται στο νερό ( $E_d(0+)$ - down-welling irradiance), μετρούμενη λίγο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (επιφάνεια της γης). Η τιμή της  $R_{rs}$  ποικίλει αναλόγως του περιεχομένου των υδάτων (είδος πυθμένα, τύπος αιωρούμενων σωματιδίων, κλπ) και της γεωμετρίας διάδοσης-λήψης της ηλιακής ενέργειας. Η εξερχόμενη των υδάτων ακτινοβολία ( $L_w$ ) είναι δυνατόν να μετρηθεί στο πεδίο με ειδικά όργανα, ή μπορεί να εκτιμηθεί από τα συστήματα που φέρει ο δορυφόρος για συγκεκριμένες γωνίες, ενώ η προσπίπτουσα στην θαλάσσια επιφάνεια ακτινοβολία ( $E_d(0+)$ ) μπορεί να μετρηθεί από παρατηρήσεις πεδίου ή να εκτιμηθεί αξιοποιώντας τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες και τις λοιπές ιδιότητες (φυσικές, χημικές) της ατμόσφαιρας.

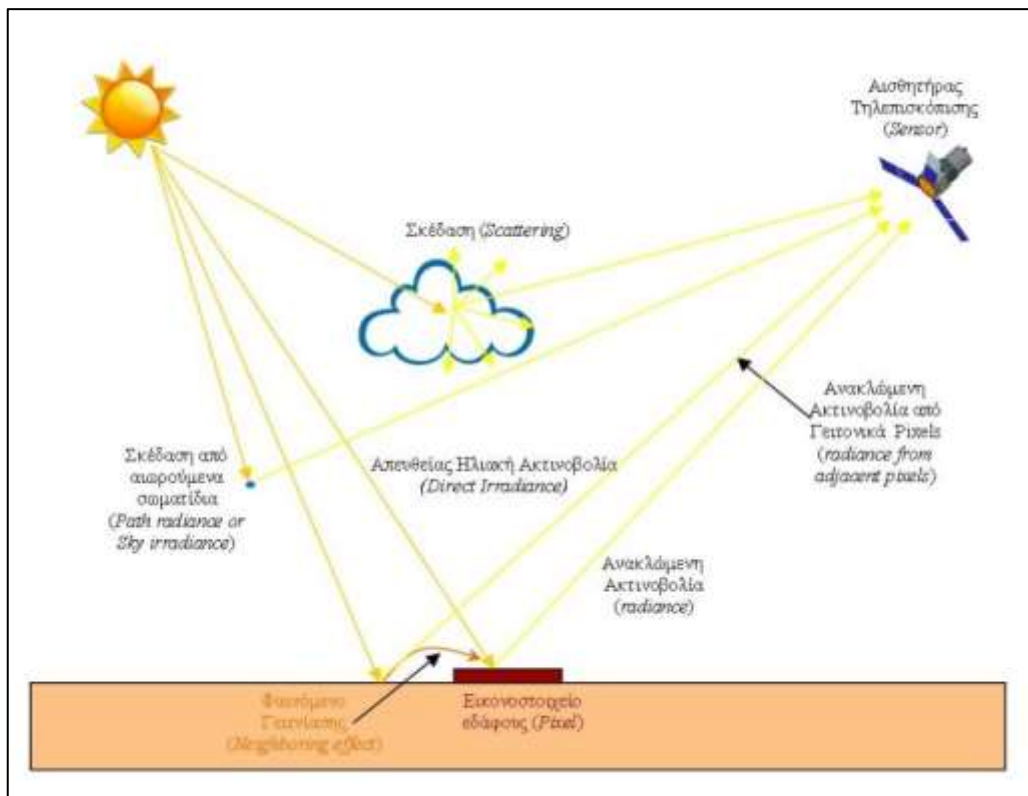
Γενικότερα, η γνώση του τρόπου επίδρασης-απομείωσης που πραγματοποιείται στην ηλιακή (H/M) ακτινοβολία, λόγω της ανομοιομορφίας που παρουσιάζει η ατμόσφαιρα, ή λόγω της φυσικής της κατάστασης, της χημικής της σύστασης και της μεταβλητότητας της πυκνότητάς της κατά την διέλευσή της ακτινοβολίας (Atmospheric path radiance), εκτιμάται ως πολύ σημαντική. Τα κύρια φαινόμενα που περιγράφουν την επίδραση της ατμόσφαιρας στο σήμα (ακτινοβολία) που λαμβάνει (καταγράφει) ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης, κατά την παρατήρηση της γης, είναι εκείνα της ατμοσφαιρικής σκέδασης (scattering), απορρόφησης (absorption), διάχυσης (diffusion), ανάκλασης (reflection) και διάθλασης (refraction). Πρέπει να σημειωθεί, ότι τα παραπάνω φαινόμενα επηρεάζουν δύο (2) φορές την ακτινοβολία, που τελικά λαμβάνεται από τον αισθητήρα/δέκτη τηλεανίχνευσης, δηλαδή μία κατά την διαδρομή της ακτινοβολίας από τον ήλιο προς την γη και την δεύτερη κατά την διαδρομή της από την επιφάνεια της γης προς τον δορυφόρο (αισθητήρα τηλεπισκόπησης).



Κυρίως, η ατμόσφαιρα συνίσταται από δύο (2) κατηγορίες στοιχείων-συστατικών τα «μόνιμα» και τα «μη μόνιμα». Τα «μόνιμα» είναι το άζωτο (78%), το Οξυγόνο (21%), το Αργόν (0,93%) και το Διοξείδιο του Άνθρακα (0,03%), ενώ τα «μη μόνιμα» είναι κυρίως το Όζον, υδρατμοί, και λοιπά αέρια που προέρχονται κυρίως από την βιομηχανική δραστηριότητα της κάθε περιοχής.

Η ποσότητα και η κατανομή των «μονίμων» συστατικών της ατμόσφαιρας είναι γενικώς γνωστή, με αποτέλεσμα να μπορεί να εκτιμηθεί η επίπτωσή τους στην Η/Μ (ηλιακή) ακτινοβολία. Όμως, η ποσότητα και η κατανομή των «μη μόνιμων» συστατικών, τα οποία ονομάζονται και «αερολύματα» (aerosols), η επίδραση των οποίων είναι και σημαντικότερη, δεν είναι γνωστή, δεδομένου ότι αυτά μεταβάλλονται τόσο τοπικά όσο και χρονικά. Το πόσο έντονη θα είναι η επίδραση των αερολυμάτων στην διάδοση της Η/Μ ακτινοβολίας, εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά αυτών, όπως το σχήμα, μέγεθος, πυκνότητα και κατανομή τους στον χώρο, καθώς και από τον δείκτη διαθλάσεως (refraction index) της εκάστοτε αέριας μάζας της ατμόσφαιρας. Η ύπαρξη για παράδειγμα νεφών και ομίχλης έχει ως αποτέλεσμα την απότομη εξασθένηση της απευθείας ακτινοβολίας, καθώς και την δημιουργία έντονων φαινομένων σκέδασης και απορρόφησης (Εικόνα 2.1). Επίσης, η ύπαρξη υψηλής πυκνότητας ατμοσφαιρικών αερίων, αερολυμάτων και υδρατμών έχει ως συνέπεια την πρόκληση φαινομένων απορρόφησης, διάχυσης και διάθλασης της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας.

Γενικά, η απορρόφηση έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της έντασης της Η/Μ ακτινοβολίας, σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, ενώ η σκέδαση ως φαινόμενο διασπείρει/διασκορπίζει την αρχική/απευθείας διεύθυνση διάδοσης της Η/Μ ενέργειας, εκτός της κύριας και σε άλλες διευθύνσεις στον χώρο.



Εικόνα 2.1 : Αλληλεπίδραση Ατμόσφαιρας-Ακτινοβολίας.

### 2.1.2 Αλληλεπίδραση Ατμόσφαιρας-Ακτινοβολίας.

Τέλος, η διάθλαση τροποποιεί την αρχική διαδρομή (διεύθυνση) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όλα αυτά συμβαίνουν πριν προλάβει η ακτινοβολία του ήλιου να ανακλαστεί από την επιφάνεια της γης, ενώ μετά την ανάκλασή της, τα παραπάνω φαινόμενα επαναλαμβάνονται και συνήθως με διαφορετική διαδικασία.

Επιπρόσθετα, η μοριακή δομή του κάθε αερίου της ατμόσφαιρας, συντελεί στο γεγονός να πραγματοποιείται διαφορετικός βαθμός απορρόφησης σε κάθε διαφορετικό μήκος κύματος για κάθε τύπο αερίου.

Τονίζεται ότι το φαινόμενο της απορρόφησης παρατηρείται με επιλεκτική συμπεριφορά για κάθε φασματική ζώνη, δηλαδή συγκεκριμένα αέρια ή μόρια νερού απορροφούν την εισερχόμενη στην ατμόσφαιρα ακτινοβολία σε συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος, ενώ δεν αλληλεπιδρούν μαζί της σε άλλα μήκη κύματος. Για παράδειγμα, τα αέρια που ευθύνονται για την απορρόφηση των ακτίνων Χ και των υπεριωδών ακτίνων (UV) είναι το Όζον ( $O_3$ ), το Οξυγόνο ( $O_2$ ), ενώ οι υδρατμοί ( $H_2O$ ) και το Όζον απορροφούν την ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού. Αντίστοιχα, οι υδρατμοί/νερό και το διοξείδιο του

Άνθρακα (CO<sub>2</sub>) απορροφούν την ακτινοβολία στο φάσμα του υπέρυθρου (Infrared-IR). Άρα, υπάρχει μία μεταβλητότητα στην διαθεσιμότητα της Η/Μ ακτινοβολίας για την αξιοποίηση της από τις τηλεπισκοπικές μεθόδους, σε συγκεκριμένα διαστήματα φάσματος, τα οποία ονομάζονται «ατμοσφαιρικά παράθυρα» (Atmospheric windows).

Η «σκέδαση» εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συγκέντρωση των αερολυμάτων (aerosols) και λοιπών σωματιδίων (particles) στην ατμόσφαιρα. Κάποια μετεωρολογικά δεδομένα που αφορούν στην ατμοσφαιρική πίεση και την ατμοσφαιρική πυκνότητα συνεισφέρουν στον προσδιορισμό της έντασης του φαινομένου της σκέδασης. Η απορρόφηση και η σκέδαση της ατμόσφαιρας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον λόγο (ratio) της καταγραφόμενης (recorded radiance) στον δέκτη ακτινοβολίας, προς την αρχική.

Τέλος, η «διάθλαση» εξαρτάται από τα οπτικά χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης.

Αποτέλεσμα των παραπάνω φαινομένων, είναι η ετήσια ροή πυκνότητας ακτινοβολίας (flux density of incident radiation) στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας (TOA) να απομειούται από 341,8 W/m<sup>2</sup> στα 147,3 W/m<sup>2</sup> στην επιφάνεια της γης (Gomarasca, 2009).

Άρα, είναι προφανές ότι μία εικόνα που λαμβάνεται από το επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας (Base-of-the-Atmosphere, BOA) δεν είναι η ίδια με μία εικόνα που λαμβάνεται από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (Top-of Atmosphere, TOA), παρόλο που και στις δύο εικόνες αποτυπώνεται η ίδια θαλάσσια μάζα.

Τα προαναφερόμενα φαινόμενα (απορρόφηση, σκέδαση, διάθλαση) έχουν ως συνέπεια να προκαλείται μία μείωση της αντίθεσης (contrast) της εικόνας, με αποτέλεσμα να μην είναι διακριτά τα παρατηρούμενα γήινα αντικείμενα.

### 2.1.3 Διάδοση Ακτινοβολίας στο Νερό

Τί συμβαίνει όμως με τον τρόπο διάδοσης της Η/Μ ακτινοβολίας στο άλλο μέσο που είναι το νερό; Είναι προφανές, ότι όσο περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία διέλθει της ατμόσφαιρας και προσπέσει σε μία υδάτινη μάζα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ποσότητα της ακτινοβολίας που θα διεισδύσει στο νερό και κατά συνέπεια πολύ περισσότερα φωτόνια θα φθάσουν στον πυθμένα, τα οποία θα ανακλαστούν και θα επιστρέψουν προς τα πίσω (backscattered energy), δηλαδή προς τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης.

Προκειμένου κάποιος μελετήσει με ακρίβεια τις διαφοροποιήσεις της ανακλώμενης ενέργειας ( $R_{rs}$ ) από την επιφάνεια της γης ή των υδάτων που λαμβάνεται από τον αισθητήρα του δορυφόρου, οι οποίες (διαφοροποιήσεις) προέρχονται από την μεταβολή του περιεχομένου του θαλασσιού ύδατος, απαιτείται να διορθωθούν (αφαιρεθούν) και οι επιδράσεις που προκαλούνται από την γεωμετρία (σχετική θέση) πηγής ακτινοβολίας (ήλιου) και αισθητήρα. Η εν λόγω διαδικασία απαιτείται και στις περιπτώσεις ρύθμισης (calibration) και ποιοτικού ελέγχου (validation) των μετρήσεων που γίνονται από αισθητήρες τηλεπισκόπησης πελάγιων ή ωκεάνιων περιοχών. Στις παράκτιες περιοχές το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο σύνθετο, καθόσον η εξερχόμενη ακτινοβολία από τα ύδατα ( $L_w$ ) περιέχει και το σήμα που ανακλάται από το θαλάσσιο πυθμένα. Περιέχει δηλαδή και την φασματική πληροφορία της σύστασης του βενθικού ιζήματος.

Όταν το ηλιακό φως εισέρχεται στο νερό, αλληλεπιδρά με τα μόρια του νερού και με τα αιωρούμενα σ' αυτό σωματίδια, με αποτέλεσμα να προκαλείται εξασθένηση της έντασης του φωτός, η οποία παρουσιάζεται ως μεταβολή στην απόχρωσή του, δηλαδή μεταβολή στο μήκος κύματος H/M ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα, μπορεί να συμβαίνουν και άλλα φαινόμενα όπως προαναφέρθηκε, όπως για παράδειγμα διάχυση, ήτοι μεταβολή της ευκρίνειας και της αντίθεσής του (contrast), καθώς και δευτερευούσης σημασίας άλλα φαινόμενα. Η ενέργεια που λαμβάνει τελικά ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης (RS sensor), είναι αντιστρόφως ανάλογη του βάθους του πυθμένα, λαμβανομένου υπόψη ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του πυθμένα τόσο μεγαλύτερος είναι ο υπερκείμενος όγκος νερού της υδάτινης στήλης, οπότε παράλληλα αυξάνει και η επίδραση της στήλης ύδατος στην ακτινοβολία (ηλιακό φως) κατά την διπλή διαδρομή της μέσα στο νερό.

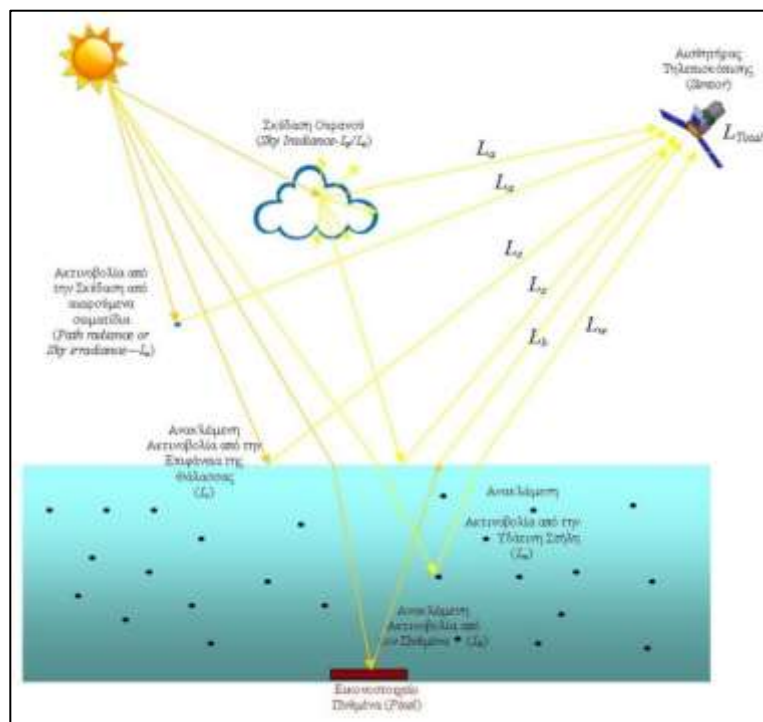
Είναι σημαντικό λοιπόν, να μπορούμε μέσω των τεχνικών της τηλεπισκόπησης να εξερευνήσουμε, μελετήσουμε και αξιοποιήσουμε τόσο την χωρική πληροφορία όσο και την ποιοτική (φασματική), που αφορά στην έκταση, το είδος και μέγεθος των οργανικών/ανόργανων συστατικών, στην μέτρηση του βάθους της θάλασσας, και την παρακολούθηση της θερμοκρασίας του νερού σε ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες, θάλασσες, και ωκεανούς, δεδομένου ότι αυτές οι πληροφορίες αφορούν στο μεγαλύτερο τμήμα του πλανήτη μας.

Παράλληλα, η κατάσταση της επιφανείας της υδάτινης μάζας είναι καθοριστικής σημασίας για τον τρόπο με τον οποίο το φως θα διέλθει μέσα σε αυτήν. Προερχόμενο το φως

από ένα μέσο οπτικά αραιότερο (ατμοσφαιρικός αέρας) σε ένα μέσο πυκνότερο (νερό καθαρό ή μη), ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται, ενώ ένα τμήμα αυτού διεισδύει δηλ. διαθλάται στο νερό. Αναλόγως της κατάστασης θαλάσσης, δηλαδή της μορφής της διαχωριστικής επιφάνειας αέρα-νερού, κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας, συμβαίνει το ηλιακό φως αφενός να σκεδάζεται (ανακλάται) προς άλλες τις κατευθύνσεις (Specular or Lambertian reflectance), αφετέρου ένα τμήμα αυτού διαθλάται, γεγονός το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Ειδικότερα σε ότι αφορά στα ρηχά ύδατα (shallow waters) η ανερχόμενη από τα ύδατα ακτινοβολία (water leaving radiance/reflectance), λίγο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας ισούται με το άθροισμα της ακτινοβολήσης (φωτονίων) που οπισθοσκεδάζονται από τα συστατικά της υδάτινης στήλης (upwelling irradiance- $E_u(0^-)$ ) και την ακτινοβολία (ακτινοβολήση φωτονίων) η οποία ανακλάται/σκεδάζεται από τον θαλάσσιο πυθμένα.

Συνοψίζοντας, η ακτινοβολία, ( $L_{rs}$  ή  $R_{rs}$ ), που λαμβάνεται και τελικώς καταγράφεται από έναν αισθητήρα τηλεπισκόπησης είναι το άθροισμα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ακτινοβολιών/radiances) από τις παραμέτρους-πηγές ως αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.2 : Αλληλεπίδραση Ατμόσφαιρας-Ακτινοβολίας-νερού.

Όπου:

$L_a$  είναι η ακτινοβολία ( $L_{Atmosphere}$  ή  $L_{path\ radiance}$ ) που καταγράφεται από τον δέκτη (sensor) τηλεπισκόπησης, και η οποία προέρχεται από την σκεδαζόμενη στην ατμόσφαιρα ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiance- $E_{sun}$ ) και τη λοιπή ακτινοβολία (Sky Irradiance- $E_{sky}$ ) που σκεδάζεται από τον ουρανό. Δηλαδή αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο ανακλάται (οπισθοσκεδάζεται) προς το άνω ημισφαίριο θέασης και δεν φθάνει ποτέ στην υδάτινη επιφάνεια. Αυτός είναι ο λεγόμενος «ατμοσφαιρικός θόρυβος» και μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η «ανεπιθύμητη ακτινοβολία» που προέρχεται από την διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα (path radiance).

$L_s$  είναι η ακτινοβολία ( $L_{sea\ surface}$ ), η οποία προέρχεται από την κατερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και την σκεδαζόμενη στην ατμόσφαιρα ακτινοβολία που φθάνει στη διεπιφάνεια αέρα - νερού (γνωστό και ως «στρώμα ελεύθερης επιφάνειας ή οριακό στρώμα» - free-surface layer/boundary layer), αλλά το διαπερνά μόνο κατά λίγα χιλιοστά περίπου και στη συνέχεια ανακλάται, στο σύνολό της, από την επιφάνεια του νερού. Αυτή η ανακλώμενη ενέργεια περιέχει πολύτιμη φασματική πληροφορία σχετικά με τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του υδάτινου σώματος. Εάν, όμως, η ζενίθεια γωνία του Ήλιου και η γωνία παρατήρησης του δέκτη τείνουν να συμπέσουν, ενδέχεται να λάβει κανείς μια αμιγώς κατοπτρική ανάκλαση (θάμβωση-Sunglint) από την επιφάνεια του υδάτινου σώματος, η οποία παρέχει ελάχιστες χρήσιμες φασματικές πληροφορίες. Τέτοιου τύπου ακτινοβολία που προέρχεται από θάμβωση,  $L_g$  ( $L_{glint}$ ), θα πρέπει να αποφεύγεται σε κάθε περίπτωση (Sunglint Correction).

$L_w$  είναι η ακτινοβολία ( $L_{water\ column}$ ), που προέρχεται από την κατερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και την ατμοσφαιρική ακτινοβολία, οι οποίες διαπερνούν τη διεπιφάνεια αέρα - νερού, αλληλεπιδρούν με το νερό και τα οργανικά/ανόργανα συστατικά του και στη συνέχεια εξέρχονται από την υδάτινη στήλη, χωρίς όμως να συναντήσουν τον πυθμένα. Στο σύνολό τους είναι γνωστές και ως «ακτινοβολία υδάτινου όγκου» (subsurface volumetric radiance ή water radiance). Αυτή η ανακλώμενη ενέργεια παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του όγκου της υδάτινης στήλης.

$L_b$  είναι η ποσότητα της καταγεγραμμένης ακτινοβολίας ( $L_{Bottom}$ ), που προέρχεται από την κατερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και την ακτινοβολία (διάχυσης) του ουρανού, από το άνω ημισφαίριο του παρατηρούμενο εικονοστοιχείου, η οποία διαπερνά τη διεπιφάνεια αέρα - νερού, φθάνει στον υδάτινο πυθμένα, ανακλάται από αυτόν, και αναδιαδίδεται μέσα από την υδάτινη στήλη και στη συνέχεια εξέρχεται από την επιφάνεια της θάλασσας, διαδίδεται προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και τελικώς καταγράφεται από τον αισθητήρα.

Έτσι λοιπόν, εάν μελετάμε πληροφορίες που σχετίζονται με την υδρογράφηση του πυθμένα, όπως γίνεται κατά τη βαθυμετρική χαρτογράφηση ή τη χαρτογράφηση κοραλλιογενών υφάλων, τότε αυτός ο τύπος της ακτινοβολίας ( $L_b$ ) που ανακλάται από τον πυθμένα έχει ιδιαίτερη σημασία (Mumby, *et al.*, 1997), τέλος όπου

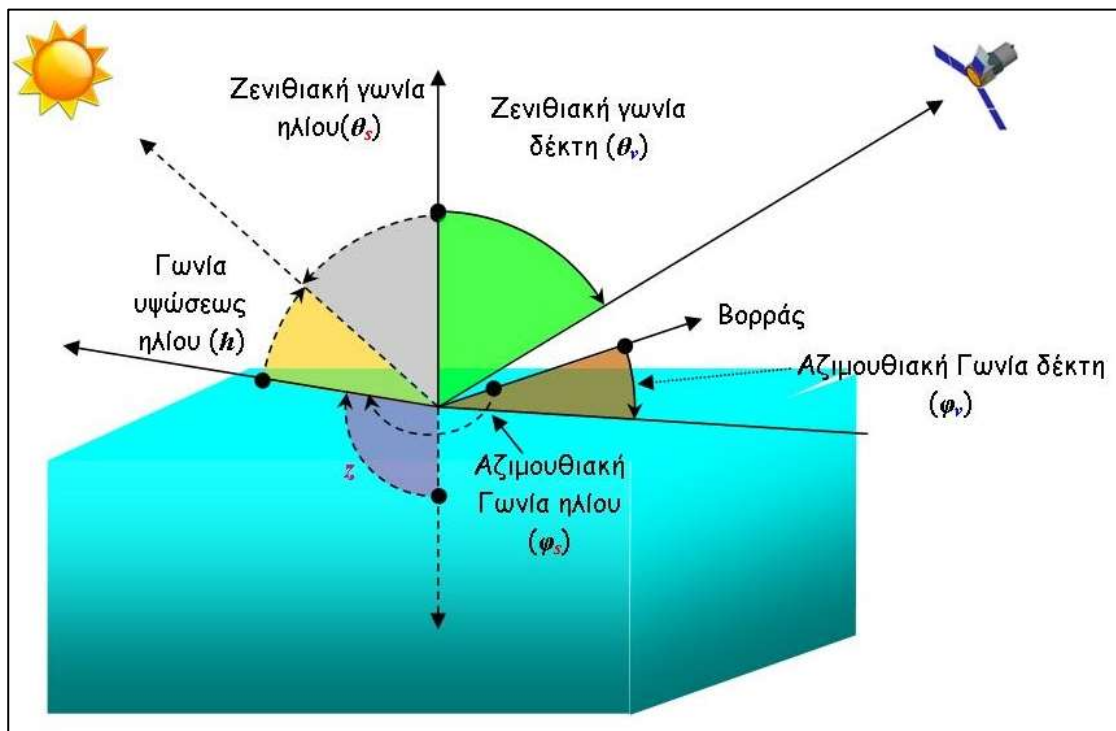
$L_n$  είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από τους τυχόν ηλεκτρονικούς «θορύβους» του αισθητήρα ( $L_{noise}$ ).

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η ποσότητα της ακτινοβολίας που εξέρχεται τελικώς από το θαλάσσιο ύδωρ είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια, αφού αποτελεί πολύ μικρό μέγεθος, συγκριτικά με την ποσότητα της ακτινοβολίας που ανακλάται από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας ή/και από την θαλάσσια επιφάνεια (water surface scattering) ή/και την θαλάσσια μάζα. Γενικά, ο ακριβής προσδιορισμός της  $L_w$ , από μετρήσεις πεδίου ή από τα μέσα τηλεανίχνευσης, αποτελεί έναν πολύ βασικό στόχο και πρόκληση για τις διαστημικές αποστολές, που σκοπό έχουν την μελέτη των θαλάσσιων περιοχών του πλανήτη μας.

Η ακτινοβολία ή το ηλιακό φως που «βγαίνει» από το νερό (water leaving radiance)  $L_w$ , ποικίλει όχι μόνο από το μήκος κύματος ( $\lambda$ -nm) και τα συστατικά που υπάρχουν μέσα στο θαλάσσιο ύδωρ, αλλά και από την γεωμετρία ( $\theta_s$ ,  $\theta_v$ ,  $\varphi$ ) σύμφωνα με την οποία προσλαμβάνεται η εν λόγω ενέργεια από τον αισθητήρα του δορυφόρου (Lee ZP, *et al.*, 2011). Πιο συγκεκριμένα, όπου  $\theta_s$ , είναι η ζενιθιακή γωνία του ήλιου, δηλ. η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο στον παρατηρητή (ή του εκάστοτε αντικειμένου που βρίσκεται σε κάθε εικονοστοιχείο) και της κατεύθυνσης του ήλιου (είναι ουσιαστικά η συμπληρωματική γωνία της γωνίας ύψωσης του ήλιου). Οι γωνίες  $\theta_v$ , και  $\varphi$ , ορίζουν την γωνιακή διεύθυνση της  $L_w$ , με την πρώτη ( $\theta_v$ ), να είναι η ζενιθιακή γωνία της εξερχόμενης

από το νερό ενέργειας  $L_w$  (sensor's view angle from nadir) που λαμβάνει ο αισθητήρας του δορυφόρου, και η δεύτερη ( $\varphi$ ), η γωνία αζιμούθιου (γωνία που ορίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, και σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του αισθητήρα και του επιπέδου του ηλίου) (Εικόνα 2.3).

Από τα παραπάνω συνάγεται, ότι η ατμοσφαιρική διόρθωση (Atmospheric correction) αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία κατά την φάση της προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων για εφαρμογές διαχείρισης της παράκτιας ζώνης και προφανώς και για την εξαγωγή της βαθυμετρίας. Από την άλλη πλευρά, η κατοπτρική ανάκλαση (specular reflection) της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επίπεδη θαλάσσια επιφάνεια αποτελεί έναν σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της βαθυμετρίας καθώς και τον προσδιορισμό της ανακλαστικότητας/λευκαύγειας του θαλασσιού πυθμένα (sea-bottom albedo) (Εικόνα 2.4).



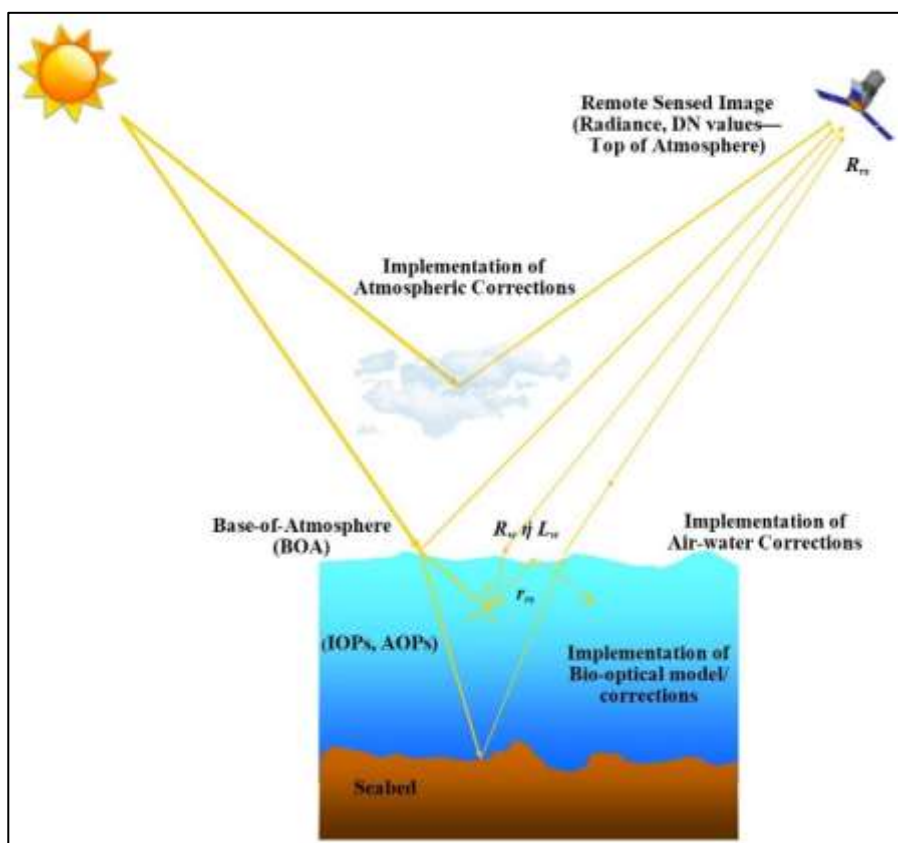
Εικόνα 2.3 : Γεωμετρία Ηλίου-Αισθητήρα ( $\theta_s$ ,  $\theta_v$ ,  $\varphi$ ).

Ουσιαστικά, η ενέργεια/ακτινοβολία, η οποία εξέρχεται από το νερό ( $L_w$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ]), είναι η ένταση του (ηλιακού) φωτός, ανά στερεά γωνία ( $sr^{-1}$ ), η οποία προκύπτει/διατηρείται μετά την επίδραση των φαινομένων της απορρόφησης, της διάθλασης και της σκέδασης του φωτός στην υδάτινη στήλη και τον θαλάσσιο πυθμένα. Η διακύμανση του φάσματος, δηλαδή



η μεταβολή του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της  $L_w$ , λόγω της διαφορετικής σύστασης των υδάτων και του είδους-σύστασης του πυθμένα, αλλά και λόγω των παραπάνω φαινομένων που συμβαίνουν στα μέσα διάδοσης (ατμόσφαιρα και νερό) παρέχει σημαντική πληροφορία για το βάθος πυθμένα, ή/και την ανακλαστικότητα του πυθμένα, σε παράκτιες και οπτικά διαφανείς θαλάσσιες περιοχές.

Γενικότερα, τα φυσικά ύδατα αποτελούν μία «μαγική συνταγή» από διαλυμένα και αιωρούμενα σωματίδια. Οι εν λόγω διαλυμένες ουσίες και τα αιωρούμενα σωματίδια στο νερό θεωρούνται εξίσου σημαντικές παράμετροι και παράλληλα σύνθετες, καθόσον διαφέρουν χωρικά και χρονικά σε είδος και συγκέντρωση. Κατά συνέπεια, οι οπτικές ιδιότητες των φυσικών νερών (natural waters) παρουσιάζουν μεγάλη χρονική και χωρική διαφοροποίηση και σπανίως μοιάζουν με εκείνες του γλυκού νερού (pure water).



**Εικόνα 2.4 :** Αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα, την επιφάνεια θάλασσας, την υδάτινη στήλη και το θαλάσσιο πυθμένα.

Η μεγάλη διαφορετικότητα που παρουσιάζουν οι οπτικές ιδιότητες των φυσικών νερών, από περιοχή σε περιοχή, αποτελεί «πρόκληση» για όσους επιστήμονες επιδιώκουν ακριβή και τυποποιημένα αποτελέσματα.

Τα φυσικά ύδατα κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Την «Κατηγορία 1 Υδάτων» (*Case 1 Waters*) και την «Κατηγορία 2 Υδάτων» (*Case 2 Waters*).

Η «Κατηγορία 1» αναφέρεται σε ύδατα πελάγιων/ανοικτών περιοχών/βαθιά ύδατα, συνήθως διαυγή ήτοι χωρίς την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ η κύρια παράμετρος που καθορίζει την φυσική σύστασή τους είναι η περιεκτικότητά τους σε χλωροφύλλη.

Η περίπτωση της «Κατηγορίας 2» αφορά σε παράκτια ή ποτάμια ύδατα, τα οποία οπτικά θεωρούνται πιο σύνθετα νερά, με σημαντικές συγκεντρώσεις σε χλωροφύλλη-α (*chl-a*), αιωρούμενα σωματίδια (*particles*) και διαλυμένες οργανικές ουσίες (CDOM). Η επίδραση των αιωρούμενων και διαλυμένων σωματιδίων, σε αυτά τα ύδατα περιγράφεται από τις οπτικές (βιο-οπτικές) ιδιότητες του νερού, οι οποίες καθιστούν τον ρόλο της φυσικής οπτικής ως πολύ σημαντικό για την θαλάσσια έρευνα (Smith and Baker, 1981).

#### 2.1.4 Οπτικές Ιδιότητες Νερού

Οι οπτικές ιδιότητες του νερού χωρίζονται σε δύο (2) κυρίως κατηγορίες τις Έμφυτες ή Εγγενείς (Inherent Optical Properties-IOPs) και τις Εμφανείς ή Φαινόμενες (Apparent Optical Properties-AOPs).

##### 2.1.4.1 Έμφυτες (Εγγενείς) Οπτικές Ιδιότητες Υδάτων (Inherent Optical Properties-IOPs)

Οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες (IOPs) εξαρτώνται αποκλειστικά από το μέσο διάδοσης (θαλάσσιο ύδωρ), οπότε είναι ανεξάρτητες από το διάχυτο φως (ανακλαστικότητα, κοκ.) του περιβάλλοντος στο μέσο διάδοσης (ύδωρ). Όταν ένα φωτόνιο (quantum-ποσότητα ενέργειας) έρχεται σε επαφή με την ύλη δύο (2) πράγματα συμβαίνουν. Το φωτόνιο μπορεί να «εξαφανιστεί» γεγονός που σημαίνει ότι η ενέργεια του μετατράπηκε σε μία άλλη μορφή ενέργειας π.χ. θερμική, ηλεκτρική, χημική, κτλ., οπότε αυτή η διαδικασία ονομάζεται απορρόφηση (absorption). Εναλλακτικά, το φωτόνιο δύναται να αλλάξει

κατεύθυνση/διεύθυνση διάδοσης ή/και μείωση της έντασης της ενέργειας του, οπότε αυτή η διαδικασία καλείται σκέδαση (scattering).

Η απορρόφηση και η σκέδαση του μέσου διάδοσης αποτελούν τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες αυτού (IOPs). Πρόκειται για ιδιότητες-φαινόμενα που σχετίζονται αποκλειστικά με το εξεταζόμενο μέσο διάδοσης και δεν εξαρτώνται από το προσπίπτον ηλιακό φως στο μέσον. Άρα, ένας δεδομένος όγκος νερού έχει συγκεκριμένες ιδιότητες απορρόφησης και σκέδασης, ανεξαρτήτως εάν προσπίπτει σ' αυτόν φως ή ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό συνεπάγεται ότι οι IOPs, μπορούν να μετρηθούν είτε στο εργαστήριο είτε στο πεδίο/θάλασσα. Οι δύο (2) θεμελιώδεις IOPs που περιγράφουν τα φαινόμενα απορρόφησης και σκέδασης στο νερό είναι ο Συντελεστής Απορρόφησης (Absorption Coefficient) και η Συνάρτηση Σκέδασης Όγκου (Volume Scattering Function).

Ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient -  $\alpha$ ) θεωρείται πολύ κρίσιμη οπτική ιδιότητα των υδάτων, καθόσον περιγράφει ουσιαστικά τον τρόπο απορρόφησης/εξασθένησης του φωτός από το μέσο διάδοσης. Αντίστοιχα, η Συνάρτηση Σκέδασης Όγκου (Volume Scattering Function – VSF) είναι η βασική ιδιότητα-παράμετρος, η οποία περιγράφει την διαδικασία σκέδασης του φωτός στο μέσο διάδοσης. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις αντί της Συνάρτησης Σκέδασης Όγκου (VSF) χρησιμοποιείται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b$ ) της υδάτινης μάζας.

Εάν γνωρίζουμε αυτές τις δύο (2) οπτικές ιδιότητες ( $\alpha$ , VSF), ή τους συντελεστές απορρόφησης ( $\alpha$ ) και σκέδασης ( $b_b$ ), τότε γνωρίζουμε σχεδόν τα πάντα για το πως το μέσο (νερό) αλληλεπιδρά με το ηλιακό φως που εισέρχεται σε αυτό, το οποίο σημειωτέων θεωρείται μη πολωμένη ακτινοβολία (Mobley, *et al.*, 2018). Οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες (IOPs) εξαρτώνται από την «σύνθεση», την «μορφή», και την «συγκέντρωση» των διαλυμένων ουσιών και σωματιδίων στο μέσο διάδοσης, δηλαδή τα ύδατα της μελετούμενης θαλάσσιας περιοχής.

Η «σύνθεση» αναφέρεται στο από ποια υλικά αποτελούνται-συνίστανται τα αιωρούμενα, στο μέσο, σωματίδια, ή οι διαλυμένες σ' αυτό ουσίες, γεγονός που σχετίζεται με τον δείκτη διαθλάσεως του αιωρούμενου υλικού, συγκριτικά με τον δείκτη διαθλάσεως του μέσου διάδοσης (ύδατος).

Η «μορφολογία» (μορφή) σχετίζεται με το μέγεθος και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων. Διαφορετικού μεγέθους και σχήματος σωματίδια σκεδάζουν διαφορετικά την ακτινοβολία που προέρχεται από το ηλιακό φως, γεγονός το οποίο εξαρτάται από το μήκος κύματος αυτής. Επίσης, σωματίδια διαφορετικού σχήματος σκεδάζουν την ακτινοβολία με διαφορετικό τρόπο, ακόμα και εάν πρόκειται για ιδίου όγκου σωματίδια. Αντίστοιχα, σωματίδια διαφορετικού όγκου σκεδάζουν την προσπίπτουσα σε αυτά ακτινοβολία διαφορετικά, ακόμα και στην περίπτωση που αυτά έχουν το ίδιο σχήμα.

Η «συγκέντρωση» αναφέρεται στην πυκνότητα/αριθμό των σωματιδίων σε δεδομένο όγκο του μέσου διάδοσης, η οποία περιγράφεται από την «κατανομή» του μεγέθους των αιωρούμενων στο νερό σωματιδίων (particle size distribution).

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των διαλυμένων ουσιών και σωματιδίων στο νερό διαφέρουν, πολλές φορές σε μεγάλο βαθμό, από περιοχή σε περιοχή, ή αναλόγως την εποχή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυναμικές μεταβολές στις εγγενείς οπτικές ιδιότητες (IOPs) του μέσου διάδοσης. Για παράδειγμα, ενώ στα «καθαρά νερά» οι συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης των υδάτων είναι της τάξης του  $0,01 \text{ m}^{-1}$  σε μήκος κύματος ακτινοβολίας 440 nm, σε θολά ή τυρβώδη νερά οι εν λόγω συντελεστές μπορεί να γίνουν 4 φορές μεγαλύτεροι.

Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής σκέδασης ( $b$ ) ή/και οπισθοσκέδασης ( $b_b$ ) τόσο μεγαλύτερη είναι η ανακλαστικότητα των υδάτων ( $R$ ), ενώ όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής απορρόφησης ( $a$ ) τόσο μικρότερη είναι η ανακλαστικότητα ( $R$ ) αυτών. Επίσης, φαινόμενα μη ελαστικής σκέδασης όπως για παράδειγμα η σκέδαση τύπου Raman (Raman scattering) ή ο φθορισμός των υδάτων επηρεάζουν το ποσοστό ανακλαστικότητας των υδάτων ( $R$ ) (Albert and Mobley, 2003) η οποία (ανακλαστικότητα-  $R$ ) αντιπροσωπεύει την ένταση του εξερχόμενου σήματος από το νερό.

Κατά το παρελθόν, η μέτρηση στο πεδίο των IOPs αποτελούσε πολύ δύσκολο έργο, ενώ αντίθετα ήταν σχετικά εύκολο να μετρηθούν οι Ραδιομετρικές μεταβλητές του ηλιακού φωτός, όπως για παράδειγμα οι κατερχόμενες (προσπίπτουσες) και ανερχόμενες στο νερό ακτινοβολήσεις (downwelling and upwelling irradiances). Αυτό οδήγησε τους ερευνητές στην χρήση των φαινομένων (AOPs) οπτικών ιδιοτήτων του νερού, προκειμένου περιγράψουν την φυσική κατάσταση μίας υδάτινης μάζας. Μία AOP θα δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την μελετώμενη θαλάσσια μάζα, π.χ. αναφορικά με το είδος και την συγκέντρωση των

σωματιδίων στο νερό, από μετρήσεις του οπτικού πεδίου (φωτός), οι οποίες λαμβάνονται σχετικά εύκολα.

#### 2.1.4.2 Εμφανείς (Φαινόμενες) Οπτικές Ιδιότητες (Apparent Optical Properties-AOPs)

Οι Φαινόμενες Οπτικές Ιδιότητες (AOPs) είναι εκείνες που εξαρτώνται αφενός από το μέσο διάδοσης (IOPs), αφετέρου από την γεωμετρία της διάδοσης και διάχυσής του, στο περιβάλλον του μέσου, και συνίστανται κυρίως από σταθερές παραμέτρους που περιγράφουν την κατάσταση του μέσου διάδοσης. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες AOPs είναι οι διάφορες ανακλαστικότητες ( $R$ -Reflectances), τα μέσα συνημίτονα (Average Cosines), και οι συντελεστές διάχυτης εξασθένησης του φωτός ( $K_d$ -Diffuse Attenuation Coefficients,  $m^{-1}$ ).

Οι διάφορες ραδιομετρικές παράμετροι, όπως η ακτινοβολία (radiance) και η προσπίπτουσα στο μέσο ακτινοβολία (irradiance) δεν είναι Φαινόμενες Οπτικές Ιδιότητες (AOPs). Οι AOPs εξαρτώνται μεν από την ακτινοβολία (radiance), και από τις IOPs του μέσου διάδοσης, αλλά δεν απαιτείται για το υπολογισμό τους οι προαναφερόμενες παράμετροι (προσπίπτουσα και εξερχόμενη των υδάτων ακτινοβολίες) να είναι σταθερές. Για παράδειγμα, εάν ο ήλιος βρίσκεται πίσω από νέφη οι προσπίπτουσες ( $E_d$ ) και ανερχόμενες ακτινοβολήσεις ( $E_u$ ) σε μία επιφάνεια (irradiances), μπορεί να αλλάξουν δραστικά μέσα σε δευτερόλεπτα, ωστόσο ο όγκος του μέσου που εξετάζεται δεν μεταβάλλεται αντίστοιχα απότομα, οπότε ο λόγος  $E_u/E_d$  παραμένει σχεδόν σταθερός. Έτσι λοιπόν, ο λόγος  $E_u/E_d$  περιέχει πολύ χρήσιμες πληροφορίες για το εξεταζόμενο μέσο διάδοσης, ανεξαρτήτως της ποσότητας του διάχυτου φωτός του περιβάλλοντός του. Άρα, ο λόγος  $E_u/E_d$  αποτελεί καλό και σταθερό στοιχείο αναφοράς και για αυτόν το λόγο είναι AOP.

Στην έρευνα της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν και αξιοποιήθηκαν οι κυριότερες οπτικές ιδιότητες (βιο-οπτικές παράμετροι)  $a$ ,  $b_b$ ,  $K_d$ , της θαλάσσιας μάζας, της εκάστοτε γεωγραφικής περιοχής, με χρήση αποκλειστικά των ανακλαστικοτήτων (ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της γης/θάλασσας) της δορυφορικής εικόνας, στις ζώνες του οπτικού φάσματος, προκειμένου διερευνηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης ενός μοντέλου βαθυμετρίας.

Οι Gordor και Clark (Gordon *et al.*, 1981), παρουσίασαν την δυνατότητα η ακτινοβολία ( $L_w(\lambda)$ ) που εξέρχεται του «καθαρού» νερού (Clear Waters) να υπολογίζεται από ανάλυση του οπτικού φάσματος (RGB), υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η ζενιθιακή γωνία του ηλίου (Solar Zenith Angle). Με τον όρο «καθαρά νερά» νοούνται τα ύδατα που εμφανίζουν μικρή περιεκτικότητα/συγκέντρωση σε χλωροφύλλη ( $C_{chl-\alpha} < 0,25 \text{ mg/m}^3$ ). Η προαναφερόμενη θεωρία επιβεβαιώνεται και ισχύει με αρκετή ακρίβεια (~10 %) για την περίπτωση των υδάτων «Κατηγορίας 1» (βαθέων υδάτων).

Επίσης, από πειράματα των ιδίων ερευνητών (Gordon, 1981)[p.p. 4179], διαπιστώθηκε ότι για τις περιπτώσεις υδάτων που παρουσιάζουν μικρές συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης- $\alpha$ , η τιμή της  $L_w(\lambda)$ , για τις φασματικές ζώνες του πράσινου/Green (520 nm) & κίτρινου/Yellow (670 nm) Bands παραμένει αρκετά «σταθερή», ενώ η υπόψη ακτινοβολία ( $L_w(\lambda)$ ) παρουσιάζεται αρκετά μεταβαλλόμενη στην περιοχή της μπλε/Blue Band (443 nm). Τα παραπάνω δεν ισχύουν για τις περιπτώσεις «παράκτιων υδάτων», στις οποίες η χλωροφύλλη και τα λοιπά αιωρούμενα στο νερό σωματίδια, παρουσιάζονται σε πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ( $> 0,35 \text{ mg/m}^3$ ) από ότι στις περιοχές βαθέων υδάτων.

Στην παραπάνω κατηγορία (Κατηγορία 1 υδάτων-Βαθιά ύδατα) ανήκει το σύνολο των πελάγιων (βαθέων) υδάτων του Αιγαίου και Κρητικού Πελάγους σύμφωνα με τους Karageorgis *et al.*, (2012) και Ignatiades (1998) με συντελεστή εξασθένησης  $K_d = 0,040$  και συγκεντρώσεις χλωροφύλλης ( $C_{chl-\alpha}$ )  $0,003-0,28 \text{ mg/l}^{-1}$  ( $0,003-0,28 \text{ mg/m}^3$ )[Ultra-oligotrophic waters]. Τα παραπάνω στοιχεία επιβεβαιώθηκαν με μετρήσεις πεδίου από θαλάσσια έρευνα που διενεργήθηκε κατά τα έτη 2006, 2007 στο πλαίσιο Ευρωπαϊκών προγραμμάτων, δεδομένα τα οποία διατέθηκαν στο συγγράφοντα την παρούσα διατριβή, από τον επιστημονικό υπεύθυνο (Zibordi, *et al.*, 2007) του εν λόγω προγράμματος.

Οι συντελεστές απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ) και οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ) του θαλάσσιου ύδατος και η αλληλεπίδρασή τους με την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προέρχεται είτε απευθείας από τον ήλιο (sun), είτε από την σκέδασή της στην ατμόσφαιρα (sky), όταν αυτή (ακτινοβολία) εισέρχεται στο νερό καθορίζουν το λεγόμενο «χρώμα της θάλασσας» (Ocean Color). Το γεγονός ότι οι συντελεστές  $a(\lambda)$  και  $b_b(\lambda)$  είναι εγγενείς οπτικές ιδιότητες του νερού σημαίνει ότι σχετίζονται άμεσα με τα συστατικά του νερού (οργανικά και μη). Οι δε τιμές τους θεωρούνται αντιπροσωπευτικές τόσο για τον καθορισμό της κατηγορίας των υδάτων (case-1, case-2, κτλ), όσο για την ένταση και κατανομή του οπτικού πεδίου κάτω από την

επιφάνεια της θάλασσας, για την περιγραφή του βαθμού θολότητας των υδάτων, και για την συγκέντρωση της χλωροφύλλης.

Η ακτινοβολία που «κωδικοποιημένα» μεταφέρει το «χρώμα των θαλασσών» ταυτίζεται ουσιαστικά με την «εξερχόμενη από το νερό ακτινοβολία» (water-leaving radiance), η οποία διερχόμενη της ατμόσφαιρας μετατρέπεται σε «ακτινοβολία τηλεπισκόπησης» (remote-sensing reflectance -  $R_{rs}$ ), καθόσον πρόκειται για την ακτινοβολία που καταγράφει ο εκάστοτε αισθητήρας τηλεπισκόπησης από την επιφάνεια της γης/θάλασσας. Αυτή είναι η κυριώτερη ραδιομετρική παράμετρος που αξιοποιείται στα μοντέλα βαθυμετρίας, ώστε από τις δορυφορικές εικόνες που συλλέγονται από παθητικούς αισθητήρες να εξαχθούν βάθη.

Τονίζεται ότι η διασύνδεση μεταξύ των IOPs και AOPs επιτυγχάνεται μέσω της «Θεωρίας Διάδοσης της Ακτινοβολίας» (Θ.Δ.Α.-Radiative Transfer Theory). Η φυσική και χημική σύσταση της θαλάσσιας μάζας, τα κύματα στην επιφάνειά της, το βάθος, η ποιότητα του πυθμένα του, η προσπίπτουσα ακτινοβολία από τον ουρανό, κτλ, καθιστούν την θεωρία διάδοσης της ακτινοβολίας, μέσω των οριακών συνθηκών της, χρήσιμο οδηγό για την επίλυση των προβλημάτων της οπτικής στο νερό. Μακροσκοπικά, η Θ.Δ.Α. περιγράφει το πεδίο ακτινοβολίας μέσα σε ένα μέσο διάδοσης (π.χ. θαλάσσιο ύδωρ), όπως αυτό διαμορφώνεται από τους συντελεστές σκέδασης ( $b(\lambda)$ ) και απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ), οι οποίοι συχνά αναφέρονται και ως βιο-οπτικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Τα προβλήματα που μελετά η Θ.Δ.Α. είναι δύο (2) κατηγοριών: τα «απευθείας» (direct) προβλήματα, στα οποία είναι γνωστές οι οπτικές ιδιότητες των υδάτων και οι πηγές ακτινοβολίας στο μέσο διάδοσης και ζητείται η διαμόρφωση/κατανομή του πεδίου ακτινοβολίας μέσα στο μέσο (ray-tracing) και στα «ανάστροφα» (inverse) προβλήματα, στα οποία είναι γνωστή η διακύμανση-διαμόρφωση του πεδίου διάδοσης της ακτινοβολίας και ζητούνται οι οπτικές ιδιότητες του μέσου (IOPs και AOPs). Στην περίπτωση της τηλεπισκόπησης των υδάτων, μελετώνται κυρίως τα διάφορα φαινόμενα, όπως ο υπολογισμός των διάφορων βιο-οπτικών παραμέτρων, το βάθος του πυθμένα, το είδος του ιζήματος του πυθμένα, κτλ, μέσω της «ανάστροφης» (inversion) διαδικασίας επίλυσης. Δηλαδή, είναι εφικτό να μετρηθεί από τους αισθητήρες η ανερχόμενη (καταγραφόμενη) από τα ύδατα ακτινοβολία ( $R_{rs}$ ), με σκοπό να προσδιοριστούν μέσω εξειδικευμένων αλγορίθμων οι οπτικές ιδιότητες ( $b(\lambda)$ ) και ( $a(\lambda)$ ) του νερού και εντέλει η βαθυμετρία. Οι διάφορες τεχνικές εξαγωγής της βαθυμετρίας με την διαδικασία της

«Αναστροφής» απαιτούν την ύπαρξη ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο αναλόγως της προσέγγισης επίλυσης διακρίνεται σε «αναλυτικό», «ημι-αναλυτικό» ή «εμπειρικό» (Gao, 2009).

Κατά το παρελθόν, αρχικά καταβλήθηκε από διάφορους ερευνητές προσπάθεια στην επινόηση και εφαρμογή εμπειρικών αλγορίθμων, οι οποίοι υιοθετούν στατιστικές συσχετίσεις (simple or multiple regressions), μεταξύ των τιμών της εξερχόμενης από το νερό ακτινοβολίας ( $R_{rs}$ ) και δεδομένων πεδίου (Field data). Οι εν λόγω αλγόριθμοι παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι για την εκτέλεσή τους δεν απαιτείται πολύς χρόνος ή διάθεση μεγάλων υπολογιστικών συστημάτων. Ωστόσο, οι εμπειρικοί αλγόριθμοι στηρίζονται αποκλειστικά σε εξισώσεις στατιστικής συσχέτισης (regression analysis), οι οποίες συσχετίζονται με την ακτινοβολία που καταγράφεται από τον εκάστοτε τύπο υδάτων, χωρίς να προϋποθέτουν πλήρη γνώση της φυσικής της διάδοσης του φωτός στο νερό και των φυσικών ή βιο-οπτικών χαρακτηριστικών του ύδατος. Για τον λόγο αυτό, οι εμπειρικοί αλγόριθμοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν και σε κάποια άλλη θαλάσσια-παράκτια περιοχή, καθόσον οι εξισώσεις συσχέτισης μίας περιοχής με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας δεν μπορεί να εφαρμοστούν σε κάποια άλλη περίπτωση υδάτων, με έτερα φασματικά χαρακτηριστικά, λόγω της διαφορετικής σύστασης, χλωροφύλλης, των αιωρούμενων σωματιδίων, κτλ. Η πιθανή προσπάθεια εφαρμογής των εμπειρικών αλγορίθμων τυποποιημένα και σε άλλη υδάτινη περιοχή θα επιφέρει εσφαλμένα αποτελέσματα βαθυμετρίας.

Στην συνέχεια, καταβλήθηκε προσπάθεια από τους επιστήμονες στο να προσδιοριστούν μέθοδοι, οι οποίες να υπολογίζουν τους δύο σημαντικούς συντελεστές ( $a(\lambda)$  και  $b_b(\lambda)$ ), οι οποίοι ευθύνονται για την απόχρωση των υδάτων (Ocean Color). Ο προαναφερόμενος υπολογισμός μέσω των δεκτών/αισθητήρων τηλεπισκόπησης, είναι εφικτός μετρώντας μόνο την ακτινοβολία που εξέρχεται των υδάτων, χωρίς να χρειάζονται κοστοβόρες και χρονοβόρες μετρήσεις πεδίου ή χρησιμοποιώντας τα ελάχιστα δυνατόν δεδομένα πεδίου. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι ονομάστηκαν «Ημι-αναλυτικοί» (*Quasi-Analytical Algorithms-QAA*). Οι ημι-αναλυτικοί αλγόριθμοι/μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε τύπο υδάτων ή/και σε δεδομένα που συλλέγονται από διαφορετικούς αισθητήρες τηλεπισκόπησης (πολυφασματικούς, υπερφασματικούς), βασίζονται δε στο φυσικό μοντέλο που περιγράφεται από τη Θεωρία Διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας/Ακτινοβολίας (Radiative Transfer Theory).



Πλέον των ανωτέρω, ορισμένοι ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη «Αναλυτικών Αλγορίθμων», με τους οποίους επιχειρείται η μελέτη και υπολογισμός του πεδίου του υποθαλάσσιου φωτός, υπό διάφορες συνθήκες βιο-οπτικών παραμέτρων. Ωστόσο, οι τελευταίοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν δυσχέρειες στην εφαρμογή τους, καθόσον απαιτούν την ύπαρξη σύνθετων μαθηματικών εξισώσεων, χρονοβόρες προσομοιώσεις, υιοθέτηση τεχνικών βελτιστοποίησης (optimization techniques), και μετρήσεις πεδίου της προσπίπτουσας και ανακλώμενης ακτινοβολίας στην εκάστοτε περιοχή μελέτης.

Για τους παραπάνω λόγους, στην παρούσα διατριβή, αφού μελετήθηκαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τύπου αλγορίθμων εξαγωγής βαθυμετρίας (εμπειρικών, ημι-αναλυτικών, αναλυτικών), ελήφθη τελικώς η απόφαση για την συγκεκριμένη έρευνα να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο, το οποίο αφενός να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των εμπειρικών και ημι-αναλυτικών μοντέλων και αφετέρου να αποφευχθούν οι σύνθετες και κοστοβόρες μέθοδοι επίλυσης των αναλυτικών αλγορίθμων. Το εν λόγω μοντέλο που επινοήθηκε/αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ονομάστηκε «Υβριδικό Μοντέλο Εξαγωγής Βαθυμετρίας» (Hybrid Model). Η μεθοδολογία του Υβριδικού μοντέλου εξαγωγής βαθυμετρίας (Hybrid Model) στηρίζεται στις αρχές της «Θεωρίας Διάδοσης της Ακτινοβολίας».

### **2.1.5 Ιστορική Εξέλιξη και Σημερινή Κατάσταση Μεθόδων Δορυφορικής Βαθυμετρίας**

Οι πρώτες προσπάθειες εξαγωγής βαθυμετρίας αξιοποιώντας τις αρχές της Οπτικής Ωκεανογραφίας άρχισαν την δεκαετία του 1970. Το 1977, το Υδρογραφικό Τμήμα της Αμερικάνικης Χαρτογραφικής Υπηρεσίας (Defence Mapping Agency, Hydrographic Center) διενεργεί τα πρώτα πειράματα αξιοποίησης των δορυφορικών δεδομένων του LandSat MSS, με σκοπό την ενημέρωση των ναυτικών χαρτών στις περιοχές Bahamas Isl., Virgin Isl. και Chagos Archipelagos του Ινδικού Ωκεανού. Τα πρώτα συμπεράσματα ήταν εντυπωσιακά, καθόσον αν και οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαμηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (60 m × 60 m), ωστόσο αμέσως διαπιστώθηκαν, αφενός οι σοβαρές αποκλίσεις στην τοπογραφία των υπόψη περιοχών λόγω σφαλμάτων γεωδαιτικής φύσεως, αφετέρου εντοπίστηκαν ύφαλοι αναβαθμοί πολύ μεγάλης έκτασης, οι οποίοι εγκυμονούσαν σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας των περιοχών αυτών. Από το 1970, οι μεγάλες εξελίξεις στη δορυφορική τεχνολογία, οι νέες τεχνικές ανάλυσης εικόνων που

εφαρμόστηκαν, οι περίπλοκοι αλγόριθμοι και τα εξειδικευμένα λογισμικά που επινοήθηκαν βελτίωσαν την δυνατότητα των Υδρογραφικών Υπηρεσιών και των επιστημόνων, στο να αποκτήσουν καλύτερη γνώση της θαλάσσιας μορφολογίας και να εφαρμόσουν αποτελεσματικότερα μέτρα προστασίας των παράκτιων περιοχών και των θαλάσσιων οικοτόπων.

Οι Bierwirthet, *et al.* (1992) διερεύνησαν την υιοθέτηση κάποιου αλγορίθμου, ο οποίος θα μπορούσε να ταξινομήσει τα διάφορα ιζήματα του πυθμένα, χωρίς να επηρεάζεται από την μεταβολή της βαθυμετρίας. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν την ανακλαστικότητα της υδάτινης επιφάνειας της θαλάσσιας περιοχής Hamelin Bay, Shark Bay, Western Australia, με δορυφορικά δεδομένα Landsat Thematic Mapper (TM). Η εν λόγω περιοχή επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει ομοιογενούς ποιότητας ρηχά θαλάσσια ύδατα και επειδή υπήρχαν από το παρελθόν εργασίες πεδίου, στο πλαίσιο των οποίων είχαν συλλεχθεί εκτός από βαθυμετρικά δεδομένα και λεπτομερή στοιχεία για το είδος των διαφορετικών βενθικών πληθυσμών, για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του εν λόγω αλγορίθμου. Το πραγματικό βάθος/βαθυμετρία ( $z$ ) υπολογίζεται μέσω της εξισ. 2.1:

$$z = \sum_{i=1}^N \frac{\ln R_i}{(-2 \cdot k_i \cdot N)} - \sum_{i=1}^N \frac{\ln R_{bi}}{(-2 \cdot k_i \cdot N)} \quad (\text{εξισ. 2.1})$$

όπου  $i$  είναι η εκάστοτε φασματική ζώνη,  $N$  είναι ο αριθμός των μελετούμενων φασματικών ζωνών του αισθητήρα, η παράμετρος  $R_i$  αντιπροσωπεύει την ανακλαστικότητα των υδάτων (BOA Reflectance), η  $R_{bi}$  είναι η ανακλαστικότητα του εκάστοτε επιμέρους ιζήματος του θαλάσσιου πυθμένα, και  $k_i$  ο συντελεστής εξασθένησης λόγω διάχυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο νερό, σε κάθε φασματική ζώνη ( $i$ ).

Κατά αντιστοιχία, μία εκτίμηση (modelling) της βαθυμετρίας ( $Z$ ) της περιοχής ενδιαφέροντος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$Z = \sum_{i=1}^N \frac{\ln R_i}{(-2 \cdot k_i \cdot N)} \quad (\text{εξισ. 2.2})$$

Οι συντελεστές εξασθένησης ( $k_i$ ) της εξισ. 2.2 εκτιμήθηκαν για τις τρεις πρώτες ( $N=3$ ) φασματικές ζώνες του Landsat TM, μέσω δημιουργίας των γραφημάτων (scatterplots) μεταξύ των δεδομένων βαθυμετρίας πεδίου ( $x$ -axis) και της ανακλαστικότητας των υδάτων ( $\ln(R_i)$ ) σε καθεμία από τις τρεις φασματικές ζώνες του αισθητήρα ( $y$ -axis). Ακολούθως,

υπολογίστηκε η ανακλαστικότητα των ιζημάτων ή των βενθικών πληθυσμών του πυθμένα από την εξίσ. 2.3:

$$R_{Bi} = R_i \cdot e^{2 \cdot k_i \cdot Z} \quad (\text{εξίσ. 2.3})$$

όπου,  $Z$  η υπολογιζόμενη (modelled), από το μοντέλο των Bierwirth and Burne (1992) βαθυμετρία, ενώ η ποσότητα  $\Delta z = Z - z$  αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ των υπολογιζόμενων ( $Z$ ) και πραγματικών βαθών ( $z$ ). Οπότε η σχέση που συνδέει την πραγματική ( $R_{bi}$ ) με την υπολογιζόμενη ( $R_{Bi}$ ) ανακλαστικότητα των ιζημάτων του πυθμένα δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{Bi} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot k_i} \right) = R_{bi} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot k_i} \right) \cdot e^{\Delta z} \quad (\text{εξίσ. 2.4})$$

Με τα πειράματα βαθυμετρίας και ταξινόμησης ιζημάτων πυθμένα των Bierwirth and Burne (1992) υπολογίστηκαν βάθη, που κυμαίνονταν από 0-10 m, τα οποία συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα δεδομένα πεδίου, απέδωσαν συντελεστή προσδιορισμού (στατιστικής συσχέτισης) της τάξης του  $R^2=0,615$ .

Οι Lee *et al.* (1999) επινόησαν έναν ημι-αναλυτικό αλγόριθμο, ο οποίος υπολογίζει την ανακλαστικότητα τηλεπισκόπησης των ρηχών υδάτων μέσω προσομοίωσης Η/Υ και μετρήσεις πεδίου. Οι περιοχές που μελετήθηκαν στο πλαίσιο των εν λόγω πειραμάτων ήταν η παράκτια περιοχή της West Florida και των Bahamas, η οποία συνίσταται από λεπτόκοκκη ομοιογενούς σύστασης άμμο. Από τις περιοχές αυτές λήφθηκαν και δεδομένα πεδίου, και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ανερχόμενης ακτινοβολίας ( $L_u(0^+, \theta_a, \varphi)$ ) και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $L_G$ ) από τον ουρανό στην επιφάνεια των υδάτων ( $L_{sky}(0^+, \theta', \varphi)$ ), με την χρήση φασματομέτρου (Spectron Model SE-590). Οι εν λόγω παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της συνολικής ακτινοβολίας τηλεπισκόπησης ( $T_{rs}$ ) και της ακτινοβολίας που συνεισφέρεται από το άνω ημισφαίριο ( $S_{rs}$ ) του ουρανού (Sky) στον αισθητήρα. Οι τιμές των  $T_{rs}$  και  $S_{rs}$  χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της  $R_{rs, raw}$ , που αντιπροσωπεύει την συνολική ανακλαστικότητα του πεδίου. Παράλληλα, υπολογίστηκε η ανακλαστικότητα με προσομοίωση με το λογισμικό HYDROLIGHT. Ουσιαστικά, σύμφωνα με τους Lee *et al.* (1999), η σχέση που συνδέει την υποθαλάσσια ( $r_{rs}$ ) με την υπερ-θαλάσσια ακτινοβολία/ανακλαστικότητα ( $R_{rs}$ ) είναι η ακόλουθη :

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{0,5 \cdot r_{rs}}{1 - 1,5 \cdot r_{rs}} \quad (\text{εξισ. 2.5})$$

όπου, ο συντελεστής  $0,5/(1-1,5 \cdot r_{rs})$  αντιπροσωπεύει την απόκλιση της ηλιακής ακτινοβολίας από την διεύθυνση της κατά την διέλευσή της από την διεπιφάνεια θάλασσα-ατμόσφαιρα (ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας) λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Παράλληλα, ο συντελεστής  $(1-1,5 \cdot r_{rs})$  αντιπροσωπεύει το ποσοστό της υπο-θαλάσσιας ακτινοβολίας που διέρχεται τελικά στο κάτω όριο της διεπιφάνειας νερού-αέρα, παράμετρος σημαντική για την περίπτωση των ρηχών ή τυρβωδών υδάτων.

Η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_{rs}$ ) συνίσταται από δύο (2) τμήματα, την ανακλαστικότητα ( $r_{rsC}$ ) που δημιουργείται λόγω του φαινομένου της οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ) στην στήλη (column-c) ύδατος και από την ακτινοβολία ( $r_{rsB}$ ) που ανακλάται από τον υδάτινο πυθμένα (Bottom-B). Το ποσοστό της ακτινοβολίας που επιστρέφει προς τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης από τον θαλάσσιο πυθμένα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την λευκαύγεια (albedo) του ιζήματος του βυθού. Οπότε, η υποθαλάσσια ακτινοβολία/ανακλαστικότητα ισούται με :

$$r_{rs} = r_{rs}^C + r_{rs}^B \quad (\text{εξισ. 2.6})$$

όπου,

$$r_{rs}^C = r_{rs}^\infty \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1}{\cos \theta_s} + D_u^C \right) \cdot k \cdot z \right] \right\} \quad (\text{εξισ. 2.7})$$

και

$$r_{rs}^B = \frac{1}{\pi} \cdot \rho_B \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{1}{\cos \theta_s} + D_u^B \right] \cdot k \cdot z \right\} \quad (\text{εξισ. 2.8})$$

με την υποθαλάσσια ακτινοβολία πάνω από τα βαθιά ύδατα (deep waters) να ισούται με :

$$r_{rs}^\infty = (0,084 + 0,170 \cdot u) \cdot u \quad (\text{εξισ. 2.9})$$

όπου  $u(\lambda)$  ο λόγος του συντελεστή οπισθοσκέδασης προς το άθροισμα του συνολικού συντελεστή απορρόφησης και του συντελεστή οπισθοσκέδασης:

$$\omega_b = u = \frac{b_b}{\alpha + b_b} \quad (\text{εξισ. 2.10})$$

και  $k$  είναι το άθροισμα των συντελεστών απορρόφησης ( $\alpha(\lambda)$ ) οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ) και ισούται με :

$$k = \alpha + b_b \quad (\text{εξισ. 2.11})$$

Οι συντελεστές  $D_u^c$  και  $D_u^B$  είναι οι οπτικοί συντελεστές επιμήκυνσης (επέκτασης) της διαδρομής των σκεδασμένων φωτονίων μετά από κάθε αλληλεπίδραση (σκέδαση) των (φωτονίων) με τα συστατικά του νερού (μέσου διάδοσης) και ισούνται αντίστοιχα με :

$$D_u^c = 1,03 \cdot (1 + 2,4 \cdot u)^{0,5} \quad (\text{εξισ. 2.12})$$

$$D_u^B = 1,04 \cdot (1 + 5,4 \cdot u)^{0,5} \quad (\text{εξισ. 2.13})$$

Η ποσότητα  $\rho_B$  αναφέρεται στην λευκαύγεια του υδάτινου πυθμένα και η παράμετρος και  $z$  αντιπροσωπεύει το βάθος της θάλασσας.

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η υποθαλάσσια ακτινοβολία ( $r_{rs}$ ) ορίζεται ως ο λόγος της (προς τον δέκτη/αισθητήρα) ανερχόμενης ακτινοβολίας (upwelling radiance) προς την κατερχόμενη (προσπίπτουσα στο ύδωρ ακτινοβολία), μετρούμενη σε επίπεδο λίγο κάτωθεν (0- m) της επιφάνειας της θάλασσας, και δίνεται από την εξισ. 2.14 :

$$r_{rs} = r_{rs}^{\infty} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1}{\cos \theta_s} + D_u^c \right) \cdot k \cdot z \right] \right\} + \frac{1}{\pi} \cdot \rho_B \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{1}{\cos \theta_s} + D_u^B \right] \cdot k \cdot z \right\} \quad (\text{εξισ. 2.14})$$

Στις περιπτώσεις που το πεδίο της ανερχόμενης ακτινοβολίας (upwelling radiance) προς τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης δεν είναι Λαμπερτιανό (Lambertian field), τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επαύξηση της διαδρομής των φωτονίων σε ορισμένες διευθύνσεις σύμφωνα με τον όρο  $1/\cos\theta$ , οπότε σε αυτή την περίπτωση το ημι-αναλυτικό μοντέλο μετασχηματίζεται ως ακολούθως :

$$r_{rs} = r_{rs}^{\infty} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1}{\cos \theta_s} + \frac{D_u^c}{\cos \theta_v} \right) \cdot k \cdot z \right] \right\} + \frac{1}{\pi} \cdot \rho_B \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{1}{\cos \theta_s} + \frac{D_u^B}{\cos \theta_v} \right] \cdot k \cdot z \right\} \quad (\text{εξισ. 2.15})$$

όπου,

$\theta_s$  είναι η υποθαλάσσια ζενιθιακή γωνία του ήλιου (subsurface solar zenith angle), ενώ

$\theta_v$  είναι η υποθαλάσσια γωνία θέασης (subsurface viewing angle) του αισθητήρα για τους αισθητήρες που καταγράφουν προς το ναδίρ (nadir-viewing sensors)

$\varphi$  είναι η αζιμουθιακή γωνία θέασης από το ηλιακό επίπεδο (viewing azimuth angle)

Ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης όταν η επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα δεν είναι Λαμπερτιανή, όπως είναι οι περισσότερες πραγματικές επιφάνειες υδάτινων πυθμένων, εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$b'_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + \varepsilon(\lambda) \cdot b_{bp}(\lambda) \quad (\text{εξισ. 2.16})$$

με :

$\varepsilon$  να είναι μία εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από την μεταβολή της έντασης της σκέδασης σε ορισμένες διευθύνσεις, στις οποίες παρατηρείται επαύξηση της διαδρομής των φωτονίων λόγω της μη ομοιογενούς σκέδασης (non-Lambertian field).

Η παράμετρος  $\varepsilon$  μεταβάλλεται αναλόγως της γωνίας μεταξύ προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Irradiance) και της ανερχόμενης (radiance) ακτινοβολίας. Για μετρήσεις της υποθαλάσσιας ακτινοβολίας ( $r_{rs}$ ) εντός  $90^\circ$  από το ηλιακό επίπεδο η οπτική παράμετρος  $\varepsilon$  προσεγγίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\varepsilon(\lambda) \approx 1,0 + \left[ 0,1 + 0,8 \cdot \frac{b_{bp}(\lambda)}{b_b(\lambda)} \right] \cdot \sin \theta_v \cdot \sin \theta_s \quad (\text{εξισ. 2.17})$$

Από αξιολογήσεις που έχουν γίνει με προσομοίωση χρησιμοποιώντας το λογισμικό HYDROLIGHT, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι το μέγιστο σφάλμα του προαναφερόμενου ημι-αναλυτικού μοντέλου δεν ξεπερνά το 15% και αυτό συμβαίνει στις περιπτώσεις τυρβωδών και θολών νερών και σε μεγάλες γωνίες θέασης (όχι πλησίον του ναδίου).

Η διαφορά μεταξύ της μετρηθείσας στο πεδίο ( $R_{rs, raw}$ ) και της υπολογισθείσας ( $R_{rs}$ ) ελαχιστοποιείται με την χρήση κάποιου αλγόριθμου βελτιστοποίησης (optimization technique). Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων της υπόψη έρευνας διαπιστώθηκε ότι για την περίπτωση πυθμένα ομοιόμορφης ανοιχτόχρωμης άμμου και για βάθη που κυμαίνονταν από 2-20 m, υπολογίστηκε η βαθυμετρία σύμφωνα με τον προαναφερόμενο αλγόριθμο με ακρίβεια  $\pm 5\%$ , ενώ οι μεγαλύτερες διαφορές παρουσιάστηκαν εκεί όπου το χρώμα του

πυθμένα ήταν πιο σκούρο, λόγω ύπαρξης υποθαλάσσιας βλάστησης ή ανάπτυξης βενθικών πληθυσμών.

Οι Vanderstraete *et al.* (2002) στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής, ερεύνησαν την δυνατότητα εξαγωγής βαθυμετρίας από μια περιοχή κοραλλιογενών υφάλων που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Ερυθράς θάλασσας, εγγύς της πόλης Hurghada (Egypt) με την μέθοδο του Jupp (1988). Επιπρόσθετα, με την χρήση ενός ηχοβολιστικού συστήματος χειρός συλλέχθηκαν από την περιοχή μελέτης και δεδομένα πεδίου (βάθη). Ως δεδομένα τηλεπισκόπησης για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκε μία πολυφασματική εικόνα του δορυφορικού συστήματος Landsat 7 ETM+, χωρικής διακριτικής ικανότητας 30 m × 30 m με ημερομηνία λήψης Σεπτέμβριος 2000. Ακολουθώντας την μεθοδολογία του Jupp κατηγοριοποιήθηκαν οι περιοχές σε ζώνες ομοιογενούς ανακλαστικότητας ιζήματος, υπολογίστηκε το μέγιστο βάθος διείσδυσης ανά φασματική ζώνη και έγινε η αναγκαία παρεμβολή για να προσδιοριστούν τα βάθη μεταξύ των διαφόρων υδάτινων ζωνών. Στο τελικό στάδιο επεξεργασίας της εικόνας βαθμονομήθηκαν τα βάθη κάθε ζώνης με βάση τα συλλεχθέντα από το πεδίο δεδομένα. Από τους παραπάνω υπολογισμούς προέκυψε βαθυμετρία μέχρι βάθους 10 m, με ορισμένες αβεβαιότητες, χωρίς να διευκρινίζεται το μέγεθος αυτών (αβεβαιοτήτων), οι οποίες οφείλονται, κατά την άποψη των ερευνητών, στο μικρό αριθμό δεδομένων πεδίου (116 βάθη) και στην μη διόρθωση ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά της εικόνας.

Οι Dierssen *et al.* (2003) δημιούργησαν ένα μοντέλο διάδοσης της ακτινοβολίας στο νερό, χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου και εικόνες υψηλής ανάλυσης από τον αισθητήρα "Ocean PHILS" (Portable Hyperspectral Imager for Low Light Spectroscopy) που ήταν εγκατεστημένος σε εναέρια πλατφόρμα. Τα δεδομένα πεδίου από τα υπό μελέτη ύδατα, συλλέχθηκαν μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου πλωτήρα (Hyperspectral Tethered Spectral Radiometer Buoy-HTSRB) από διάφορες θέσεις της παράκτιας περιοχής Lee Stocking Isl. (Bahamas). Ο υπόψη πλωτήρας μετρούσε την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $E_d$ ) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, την ανερχόμενη ( $L_u$ ) από τον πυθμένα και τον υδάτινο όγκο ακτινοβολία, κάτω από την ελεύθερη υδάτινη επιφάνεια σε βάθος -0,65 m, και το βάθος του πυθμένα με ηχοβολιστική συσκευή σε διάφορες θέσεις της περιοχής μελέτης. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον παραπάνω μετρητικό σταθμό χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του υποθαλάσσιου δείκτη βλάστησης (Leaf Area Index-LAI) της υποθαλάσσιας

χλωρίδας της υπόψη παράκτιας ζώνης. Επίσης, ο εν λόγω πλωτήρας ρυμουλκήθηκε σε προκαθορισμένες πορείες (γραμμές Υ/Γ) και τα συλλεχθέντα στοιχεία υδρογραφίας αξιοποιήθηκαν στην δημιουργία του μοντέλου βαθυμετρίας της περιοχής. Τα στοιχεία της ανερχόμενης ακτινοβολίας παρεμβλήθηκαν (extrapolated), με χρήση της εξίσωσης της θεωρίας της ακτινοβολίας, προκειμένου υπολογιστεί η εξερχόμενη των υδάτων ακτινοβολία (Water-leaving radiance -  $L_w$ ). Στην συνέχεια, υπολογίστηκε η ανακλαστικότητα τηλεπισκόπησης ( $R_{rs}$ ) ως ο λόγος της εξερχόμενης των υδάτων ακτινοβολίας ( $L_w$ ) πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο νερό ( $E_d$ ). Επιπρόσθετα, μετρήθηκε με την βοήθεια δύτη και η προσπίπτουσα ( $E_d$ ) και ανερχόμενη από τον πυθμένα ακτινοβολία ( $E_u$ ) σε θέση λίγο πάνω από την στάθμη του θαλάσσιου πυθμένα με την χρήση φασματόμετρου (spectrometer). Για τον υπολογισμό των συντελεστών εξασθένησης της κατερχόμενης ( $K_d$ ) και ανερχόμενης ακτινοβολίας ( $K_{Lu}$ ) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HYDROLIGHT (Mobley, 1994). Για να υπολογίσει το HYDROLIGHT τους συντελεστές εξασθένησης λόγω διάχυσης του ηλιακού φωτός  $K_d$  και  $K_{Lu}$ , απαιτήθηκε η εισαγωγή πληροφορίας σχετικά με τους μέσους συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης της συγκεκριμένης στήλης ύδατος, οι οποίοι μετρήθηκαν στο πεδίο κατά την διάρκεια των υπόψη πειραμάτων, μέσω υπολογισμού της μέσης συνάρτησης φάσης σκέδασης (Petzold Particle Scattering Phase Function) και στοιχεία της ταχύτητας του ανέμου [ $m \cdot s^{-1}$ ]. Για την εξαγωγή της βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Αναλογικού αλγόριθμου (ratio Transform), το οποίο εφαρμόστηκε μεταξύ των φασματικών ζωνών του PHILLS sensor του πράσινου και κόκκινου καναλιού. Από τα προαναφερθέντα πειράματα προέκυψε βαθυμετρία με ικανοποιητικά αποτελέσματα μέχρι βάθους 8 m περίπου.

Οι Mishra *et al.* (2005) αξιοποίησαν πολυφασματικά δεδομένα IKONOS για να δημιουργήσουν μία μεθοδολογία προκειμένου παράξουν έναν λεπτομερή χάρτη των βενθικών πληθυσμών της παράκτιας περιοχής της ν. Roatan στην Ονδούρα (Κεντρική Αμερική). Η τηρηθείσα μεθοδολογία διόρθωσε τις εικόνες IKONOS ως προς την επίδραση της ατμόσφαιρας και ως προς την επίδραση της θαλάσσιας μάζας/στήλης ύδατος, ενώ σε δεύτερο στάδιο εφάρμοσε αλγόριθμους επιβλεπόμενης ταξινόμησης (ISODATA) για την κατηγοριοποίηση των βενθικών πληθυσμών. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν και δεδομένα πεδίου για την βαθμονόμηση του μοντέλου βαθυμετρίας σε βάθη που κυμαίνονταν από 0-35 m, τα οποία συλλέγονταν μέσω ενός πλωτήρα (buoy) πάνω στον οποίο



είχαν εγκαταστήσει ένα δέκτη GPS, μία video-camera, και ένα ηχοβολιστικό μονής δέσμης. Με την χρήση του συγκεκριμένου πλωτήρα, ο οποίος μετακινείται με την βοήθεια ενός δύτε σε συγκεκριμένες θέσεις, είχαν την δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης του βάθους του πυθμένα, της γνώσης του είδους του ιζήματος ή της υποθαλάσσιας βλάστησης, ήτοι της ανακλαστικότητας του πυθμένα. Στην συνέχεια, διόρθωσαν το μοντέλο τους ως προς την επίδραση της υδάτινης στήλης (water column correction) υπολογίζοντας τις οπτικές ιδιότητες της συγκεκριμένης θαλάσσιας μάζας χρησιμοποιώντας τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο (QAA) και το βάθος του πυθμένα. Την βαθυμετρία την υπολόγισαν με χρήση του Αναλογικού αλγορίθμου, προσδιορίζοντας τον λόγο των λογαρίθμων των ανακλαστικότητων της μπλε (blue) προς την πράσινη (green) φασματική ζώνη. Στην συνέχεια συσχέτισαν στατιστικά (regression analysis) τα δεδομένα πεδίου με τα αποτελέσματα του Αναλογικού αλγορίθμου. Ακολούθως, εφάρμοσαν τον αλγόριθμο επιβλεπόμενης ταξινόμησης ISODATA, με βάση τα στοιχεία ιζήματος/βλάστησης/βένθους που είχαν συλλέξει με τις υποθαλάσσιες κάμερες, και με χρήση του ταξινομητή Maximum Likelihood Classifier κατέταξαν κάθε κλάση βένθους στις κατηγορίες τις οποίες αυτή παρουσίαζε την μεγαλύτερη πιθανότητα να ανήκει. Στο τέλος δημιούργησαν τον χάρτη με την κάλυψη των βενθικών κοινοτήτων της περιοχής ενδιαφέροντος. Στα συγκεκριμένα πειράματα αποδείχτηκε ότι η green φασματική ζώνη δίνει τις μεγαλύτερες τιμές υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας. Η στατιστική συσχέτιση μεταξύ των συλλεγομένων στο πεδίο βαθών και των υπολογισθέντων βαθών έδωσε συντελεστές προσδιορισμού  $R^2=0,942$  και μέσο τετραγωνικό σφάλμα  $RMSE=2,711$  m, ενώ για βάθη άνω των 18 m παρατηρήθηκαν αποκλίσεις άνω των 5 m, μεταξύ υπολογιζόμενων βαθών και των δεδομένων πεδίου.

Οι ίδιοι ερευνητές (Mishra *et al.*, 2006) δοκίμασαν την προαναφερθείσα διαδικασία στην ίδια γεωγραφική περιοχή (v. Roatan – Ονδούρα) και με πολυφασματικές εικόνες του δορυφορικού συστήματος QuickBird. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν δεδομένα πεδίου για την βαθμονόμηση (training dataset) του μοντέλου βαθυμετρίας σε βάθη που κυμαίνονταν από 0-25 m, τα οποία συλλέχθηκαν ξανά μέσω ενός πλωτήρα (buoy) πάνω στον οποίο είχαν εγκαταστήσει ένα δέκτη GPS, μία video-camera, και ένα ηχοβολιστικό μονής δέσμης. Με την χρήση του συγκεκριμένου πλωτήρα ο οποίος μετακινείται με την βοήθεια ενός δύτε σε συγκεκριμένες θέσεις, είχαν την δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης του βάθους του πυθμένα, της γνώσης του είδους του ιζήματος ή της υποθαλάσσιας βλάστησης,

ήτοι της ανακλαστικότητας του πυθμένα. Αντίστοιχα, συνέλεξαν και ένα άλλο σετ δεδομένων πεδίου, τα οποία χρησιμοποίησαν ως δεδομένα αξιολόγησης (validation dataset) του μοντέλου τους, με χρήση ενός ρυμουλκούμενου υποθαλασσίου οχήματος στο οποίο είχαν εγκαταστήσει μία mini-camera, ένα σύστημα DGPS, και ένα ηχοβολιστικό μονής δέσμης. Με την προαναφερόμενη πλατφόρμα συνέλεξαν δεδομένα βαθών, τα οποία τα χρησιμοποίησαν για να ελέγξουν την ακρίβεια του βαθυμετρικού τους μοντέλου όπως αυτό προέκυψε από ανάλυση των πολυφασματικών εικόνων QuickBird. Αξιοποίησαν τις λήψεις από τις κάμερες που είχαν εγκαταστήσει στις παραπάνω πλατφόρμες συλλογής των δεδομένων πεδίου, για προσδιορισμό του πεδίου ακτινοβολίας πάνω και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, προκειμένου να προσδιορίσουν την κάλυψη των βενθικών πληθυσμών στην περιοχή μελέτης. Στην συνέχεια, διόρθωσαν το μοντέλο τους ως προς την επίδραση της υδάτινης στήλης (water column correction) υπολογίζοντας τις οπτικές ιδιότητες της συγκεκριμένης θαλάσσιας μάζας χρησιμοποιώντας ημι-αναλυτικό αλγόριθμο (QAA) και το βάθος του πυθμένα. Ακολούθως, εφάρμοσαν τον αλγόριθμο επιβλεπόμενης ταξινόμησης ISODATA, με βάση τα στοιχεία ιζήματος/βλάστησης/βένθους που είχαν συλλέξει με τις υποθαλάσσιες κάμερες, και με χρήση του ταξινομητή Maximum Likelihood Classifier κατέταξαν κάθε κλάση βένθους στις κατηγορίες στις οποίες αυτή παρουσίαζε μεγαλύτερη πιθανότητα να ανήκει. Στο τέλος δημιούργησαν τον χάρτη με τις βενθικές κοινότητες της περιοχής ενδιαφέροντος. Στα συγκεκριμένα πειράματα αποδείχτηκε ότι η green φασματική ζώνη δίνει τις μεγαλύτερες τιμές υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας. Η στατιστική συσχέτιση μεταξύ των συλλεγομένων στο πεδίο βαθών και των υπολογισθέντων δεδομένων έδωσε συντελεστές προσδιορισμού  $R^2=0,845$  και μέσο τετραγωνικό σφάλμα  $RMSE=2,819$  m, ενώ για βάθη άνω των 18 m παρατηρήθηκαν αποκλίσεις άνω των 5 m, μεταξύ υπολογιζόμενων βαθών και των δεδομένων πεδίου. Όπως διαπιστώθηκε, τα παραπάνω αποτελέσματα είναι παρόμοια με τα πειράματα τους όταν χρησιμοποίησαν δορυφορικές εικόνες IKONOS (Mishra *et al.*, 2005), αντί για τις εικόνες QuickBird.

Επίσης, οι Mishra *et al.* (2007) διερεύνησαν την εφικτότητα χαρτογράφησης των διαφορετικών ιζημάτων του θαλάσσιου πυθμένα της παράκτιας περιοχής της Ονδούρα (Κεντρική Αμερική), κάνοντας χρήση υπερφασματικών (hyperspectral) δεδομένων τηλεπισκόπησης εναέριων φορέων και συγκεκριμένα με δεδομένα που συλλέγονται από τον αισθητήρα Airborne Imagine Spectroradiometer for Applications (AISA). Στο πλαίσιο του εν

λόγω πειράματος ελήφθησαν δεδομένα βαθυμετρίας και ανακλαστικότητας θαλασσίου πυθμένα (Bottom albedo –  $\rho(\lambda)$ ) με χρήση ενός υποθαλασσίου μη επανδρωμένου συστήματος/οχήματος (UUV), προκειμένου γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου βαθυμετρίας. Τα τηλεσκοπικά δεδομένα διορθώθηκαν ως προς την επίδραση της υδάτινης στήλης (water column correction), προκειμένου υποστηριχθεί ο εντοπισμός του είδους του πυθμένα σε μεγαλύτερα βάθη και ταξινομηθούν τα βενθικά χαρακτηριστικά του πυθμένα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το μοντέλο για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο λόγος μεταξύ των λογαρίθμων της blue και green φασματικής ζώνης (Αναλογικός αλγόριθμος), ο οποίος συσχετίστηκε στατιστικά με τα συλλεγόμενα, από το όχημα UUV, δεδομένα βαθών. Ακολούθως, τα υπολογιζόμενα βάθη, και τα φασματικά δεδομένα (Bottom albedo) από την ανακλαστικότητα των ιζημάτων του πυθμένα αξιοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των οπτικών ιδιοτήτων ( $a(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ ) του νερού (IOPs) σύμφωνα με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο (QAA). Η στατιστική συσχέτιση μεταξύ των συλλεγομένων στο πεδίο βαθών και των υπολογισθέντων βαθών έδωσε αντίστοιχους συντελεστές προσδιορισμού  $R^2=0,943$  και μέσο τετραγωνικό σφάλμα  $RMSE=2,873$  μ, ενώ για βάθη άνω των 18 m πάλι παρατηρήθηκαν αποκλίσεις άνω των 5 m, μεταξύ υπολογιζόμενων βαθών και των δεδομένων πεδίου. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι και στις τρεις προαναφερόμενες πειραματικές προσπάθειές τους οι εν λόγω ερευνητές με διαφορετικό εξοπλισμό και διαφορετικά τηλεσκοπικά δεδομένα κατέληξαν σε παρόμοια αποτελέσματα.

Οι Sagar *et al.* (2008) στο πλαίσιο προγράμματος αντιμετώπισης καταστροφών από θαλάσσια σεισμικά κύματα (Tsunamis) και προκειμένου προσομοιάσουν την ενέργεια που δημιουργείται από τέτοιας φύσεως κύματα, υπολόγισαν την βαθυμετρία από δορυφορικά δεδομένα σε περιοχές του νότιο-δυτικού Ειρηνικού ωκεανού, στις οποίες δεν υπήρχαν συλλεχθέντα υδρογραφικά δεδομένα. Τονίζεται ότι, το διαμορφούμενο τελικά ύψος κύματος των tsunamis σε μία παράκτια περιοχή εξαρτάται πολύ από την βαθυμετρία και γενικότερα την κλίση του πυθμένα στην υπόψη ζώνη (surf zone). Η συγκεκριμένη μελέτη εφάρμοσε μία τεχνική που βασίζεται στην φυσική προσέγγιση διάδοσης της ακτινοβολίας για την εξαγωγή της βαθυμετρίας από τηλεσκοπικά δεδομένα (Quickbird) στην περιοχή της ν. Tongatapu (Tonga). Οι εν λόγω ερευνητές στηρίχτηκαν στο ημι-αναλυτικό μοντέλο SAMBUCA για την επίλυση της βαθυμετρίας η οποία έχει επινοηθεί από τους Wettle M., and V.E. Brandt (2006). Ουσιαστικά, με το υπόψη μοντέλο υπολογίστηκαν οι βιο-οπτικές ιδιότητες των

υδάτων, με σκοπό να προσδιοριστεί η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα και στην συνέχεια συγκρίθηκαν οι τιμές αυτής με τις μετρηθείσες τιμές ανακλαστικότητας από την δορυφορική εικόνα. Στην συνέχεια με χρήση μίας τεχνικής βελτιστοποίησης (optimization routine) υπολογίστηκαν τα βάθη (modelled depths), τα οποία προκύπτουν από τα μικρότερα υπόλοιπα (residuals) σφάλματος μεταξύ της υπολογισθείσας (modelled) υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας και της μετρηθείσας (measured) από την δορυφορική εικόνα ανακλαστικότητας. Το μέτρο, με το οποίο εκτιμάται η ευαισθησία του συστήματος αισθητήρας-ατμόσφαιρα-παρατηρούμενο αντικείμενο, να αντιλαμβάνεται μεταβολές στην υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $R(0-)$ ) ορίζεται ως παράμετρος «NEΔR(0-)<sub>E</sub>» (Environmental Noise Equivalent Difference). Η «NEΔR(0-)<sub>E</sub>» είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τον λόγο σήματος/θόρυβο (signal-to-noise ratio/SNR) του αισθητήρα τηλεπισκόπησης, από την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας στην ακτινοβολία, την κατάσταση της επιφάνειας της θάλασσας, την διάθλαση της απευθείας ή την εκ διάχυση ακτινοβολίας του ουρανού. Η ποσότητα NEΔR(0-)<sub>E</sub> προσδιορίζεται από την εικόνα της υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας ( $R(0-)$ ) και ειδικότερα από την τυπική απόκλιση  $\sigma(R(0-))$  (standard deviation) της ανακλαστικότητας  $R(0-)$  σε κάθε φασματική ζώνη, πάνω από ομοιογενείς οπτικά θαλάσσιες περιοχές βαθέων υδάτων της δορυφορικής εικόνας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα βαθυμετρίας του SAMBUCA με τον ναυτικό χάρτη της περιοχής Tonga διαπιστώθηκαν συγκλίσεις της τάξης 1-2 m μέχρι βάθους 25 m.

Επίσης, οι Brando *et al.* (2009) διερεύνησαν την δυνατότητα προσδιορισμού της βαθυμετρίας από δεδομένα που συλλέγονται από τον υπερφασματικό αισθητήρα CASI-2 (Compact Airborne Spectrographic Imager). Στα υπόψη πειράματά τους έκαναν χρήση ενός μοντέλου το οποίο παραμετροποιείται με στοιχεία της ποιότητας/ανακλαστικότητας του θαλάσσιου πυθμένα και των συγκεντρώσεων των συστατικών του υδάτινου όγκου της παράκτιας περιοχής Moreton Bay, που βρίσκεται στις ανατολικές ακτές Αυστραλίας. Τα τηλεσκοπικά δεδομένα από τον CASI συλλέχθηκαν τον Ιούλιο 2004, με τέτοιο ύψος πτήσης ώστε η χωρική διακριτική ικανότητα της υπερφασματικής εικόνας να είναι διαστάσεων 4 m × 4 m. Η ατμοσφαιρική διόρθωση και η διόρθωση λόγω του φαινομένου γειννίασης στην υπόψη εικόνα έγινε με χρήση του λογισμικού WOMBAT. Το μοντέλο το οποίο υπολόγισε την βαθυμετρία καθώς και τις συγκεντρώσεις των διαφόρων συστατικών του ύδατος ήταν το SAMBUCA, που χρησιμοποιεί ουσιαστικά τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των Lee *et al.*, (2002).

Παράλληλα, συλλέχθηκαν και δεδομένα πεδίου, και συγκεκριμένα βαθών με χρήση ηχοβολιστικού συστήματος πολλαπλής δέσμης (Multibeam sonar), και των οπτικών ιδιοτήτων του ύδατος από την περιοχή μελέτης (Moreton Bay). Το υιοθετηθέν μοντέλο (SAMBUCA) στην συνέχεια επαναπαραμετροποιήθηκε στο πλαίσιο διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου, με βάση τις προκύπτουσες διαφορές μεταξύ των δεδομένων πεδίου και των υπολογισθέντων (modelled) από αυτό. Ως αποτέλεσμα της προαναφερθείσας μεθοδολογίας ήταν ο επιτυχής προσδιορισμός της βαθυμετρίας και των βιο-οπτικών ιδιοτήτων του νερού σε βάθη που κυμαίνονταν μεταξύ 4-13 m.

Οι Hedley *et al.* (2009) επινόησαν μία σχετικά απλή τεχνική με την οποία σε σύντομο χρονικό διάστημα, αναστρέφεται (inversion) ένα οποιοδήποτε μοντέλο περιγραφής του πεδίου διάδοσης-μεταφοράς της ακτινοβολίας (radiative transfer models). Η υπόψη τεχνική αξιοποιεί μία προσαρμοστική, δενδροειδούς τύπου, τεχνική αναζήτησης (Adaptive Look-up Tree-ALUT), προκειμένου ελαχιστοποιήσει τα σφάλματα κατά την μετατροπή των δεδομένων από το χώρο του διαστήματος στον φασματικό χώρο (inversion techniques). Η τεχνική αυτή δοκιμάστηκε με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των Lee *et al.* (1998) και απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τον χρόνο απόκρισης του μοντέλου συγκριτικά με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης (Levenberg-Marquardt) σε βάθη μέχρι 20 m σε μία περιοχή καθαρών υδάτων στην Αυστραλία (Heron Reef, Australia). Τα τηλεσκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, συλλέχθηκαν από τον εναέριο υπερφασματικό αισθητήρα CASI το 2002. Τα αποτελέσματα της αναστροφής με το συγκεκριμένο μοντέλο συσχετίστηκαν με δεδομένα πεδίου (5.057 βάθη). Τα πειράματα έδειξαν πολύ ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των υπολογιζόμενων βαθών και των δεδομένων πεδίου ( $R^2=0,91$ ) για βάθη έως 20,0 m, με ένα Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error) της τάξης των 0,90 m.

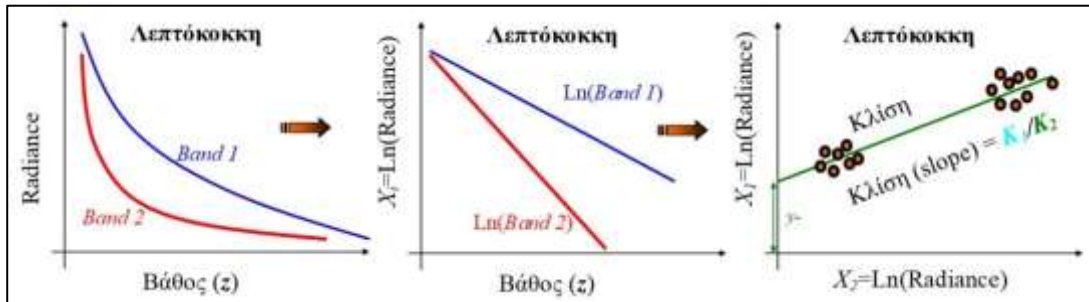
Οι Ohlendorf *et al.* (2011) μελέτησαν την βαθυμετρία που εξάγεται με χρήση του μοντέλου της ιδιωτικής εταιρείας παροχής υπηρεσιών τηλεπισκόπησης EOMAP με την ονομασία "MIP" (Modular Inversion and Processing System). Το συγκεκριμένο μοντέλο βαθυμετρίας εφαρμόζει τεχνικές διόρθωσης για την ατμοσφαιρική επίδραση, αλγόριθμους αντιμετώπισης των φαινομένων θάμβωσης (sun glint correction), διορθώσεις για το φαινόμενο γειτνίασης (adjacency effect), ενώ διορθώνει την εικόνα για την αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας-ακτινοβολίας (MODTRAN Code), την επίδραση της ελεύθερης υδάτινης επιφάνειας καθώς και για την επίδραση του υδάτινου όγκου (στήλη ύδατος). Επίσης, το εν

λόγω μοντέλο χρησιμοποιεί δεδομένα MODIS σε κοντινό χρόνο της ώρας λήψης της υπό επεξεργασία εικόνας για την απόκτηση δεδομένων ορατότητας (aerosol concentration) στην ατμόσφαιρα και ανακλαστικότητας της υδάτινης επιφάνειας της μελετώμενης περιοχής ενδιαφέροντος. Αφού οι τιμές ανακλαστικότητας της εικόνας διορθωθούν, στη συνέχεια υπολογίζεται η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα των υδάτων και αναστρέφοντας τον αναλυτικό αλγόριθμο των Albert και Mobley (2003) υπολογίζεται τελικά το βάθος του πυθμένα, κάνοντας κάποια στατιστική ανάλυση ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα υπόλοιπα (residuals) του σφάλματος της εξαγόμενης βαθυμετρίας. Ακολούθως, εφαρμόζονται στο εν λόγω μοντέλο αλγόριθμοι ταξινόμησης για την χωροθέτηση και χαρτογράφηση των διάφορων ιζημάτων του θαλάσσιου πυθμένα. Στο πλαίσιο αξιολόγησης του μοντέλου “MIP” πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δεδομένα WV-2 στην περιοχή της νήσου Rottnest Isl, Australia, και σε μία παράκτια περιοχή της Καραϊβικής στην νήσο Quintana Roo (Caribbean Coast, Puerto Morelos). Από τα συμπεράσματα της υπόψη έρευνας συνάγεται το γεγονός της επιτυχούς εξαγωγής βαθυμετρίας μέχρι βάθους 23,0 m περίπου, με μικρότερη ακρίβεια για τα βάθη που κυμαίνονται μεταξύ 15-23 m. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μεταξύ των δεδομένων πεδίου που συλλέχθηκαν με ηχοβολιστικό μονής δέσμης στις παραπάνω περιοχές ενδιαφέροντος και της εξαγόμενης βαθυμετρίας σ’ αυτές για το εύρος βαθών από 0,1 m – 20,0 m ήταν από 8%-20%.

Η Hamilton (2011) διερεύνησε την επίδραση του λόγου των λογαρίθμων ζεύγους φασματικών ζωνών στην διόρθωση της ακτινοβολίας κατά την διπλή διαδρομή της στην υδάτινη στήλη. Στα πειράματα που διενεργήθηκαν εξετάστηκε η απόδοση είκοσι οκτώ (28) διαφορετικών συνδυασμών ζευγαριών φασματικών ζωνών του υπερφασματικού αισθητήρα Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) σε παράκτιες περιοχές της ν. Alphonse Atoll στις Seychelles, με εύρος βαθών μεταξύ 0-30 m, με σκοπό να εντοπιστούν με επαρκή διαφορετικότητα (contrast) οι διάφοροι βενθικοί πληθυσμοί της περιοχής ή τα διαφορετικά ιζήματα του πυθμένα. Η χωρική ανάλυση των δεδομένων CASI ήταν της τάξης του 1 m × 1 m, και τα ζεύγη που μελετήθηκαν κάλυπταν το οπτικό H/M φάσμα από 434,5 nm έως 740,3 nm, ενώ ως μεθοδολογία διόρθωσης της επίδρασης της υδάτινης στήλης επιλέχθηκε το μοντέλο του Lyzenga (1978), το οποίο περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Depth - Invariant - Index = \ln(L_i) - \left[ \left( \frac{K_i}{K_j} \right) \cdot \ln(L_j) \right] \quad (\text{εξίσ. 2.18})$$

Η εν λόγω μεθοδολογία απαιτεί την προηγούμενη ατμοσφαιρική διόρθωση της εικόνας από το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής σκέδασης (path radiance), την γραμμικοποίηση (λογαριθμοποίηση) των φασματικών ζωνών και επιλογή εικονοστοιχείων από διαφορετικά βάθη αλλά ομοιογενούς ιζήματος, ήτοι παρόμοιας φασματικής υπογραφής (Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5 :** Μεθοδολογία Μοντέλου Διόρθωσης Θορύβου Στήλης Ύδατος κατά Lyzenga.

Άρα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο Lyzenga (1978) δημιουργούνται τα διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των διαφορετικών φασματικών ζωνών και διενεργείται η περαιτέρω διόρθωση για την φασματική επίδραση της στήλης ύδατος (θόρυβος) στο σήμα που καταγράφεται από τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης. Η αξιολόγηση των ζευγαριών των φασματικών ζωνών έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα κάθε λόγου με τα αποτελέσματα επιβλεπόμενης ταξινόμησης, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση γνωστών αλγορίθμων ταξινόμησης και δεδομένα από εργασίες πεδίου (δειγματοληψίες ιζημάτων από γνωστές περιοχές). Από την προαναφερόμενη αξιολόγηση διαπιστώθηκε ότι βέλτιστα αποτελέσματα προκύπτουν από την χρήση λόγου φασματικών ζωνών οι οποίες απέχουν φασματικά μεταξύ τους (κατά μήκος κύματος ( $\lambda$ )) τουλάχιστον 90 nm. Αυτό συμβαίνει καθόσον όσο αυξάνει η απόσταση (διαφορά) στο μήκος κύματος μεταξύ των μελετώμενων φασματικών ζωνών, τόσο μειώνεται η κλίση ( $\text{slope} = K_1/K_2$ ) της ευθείας του ανεξάρτητου από το βάθος δείκτη (Depth Invariant Index) συνόρθωσης της εικόνας. Κατά συνέπεια αυξάνεται η αντίθεση (contrast) της εικόνας που δημιουργείται από το μοντέλο Lyzenga. Οπότε, η επιλογή της μίας φασματικής ζώνης από το κεντρικό σημείο του οπτικού φάσματος και της άλλης παρά το όριο του οπτικού φάσματος, χωρίς ωστόσο να φθάνει τα ακραία μήκη κύματος των μεγάλων ή πολύ μικρών μηκών (π.χ. όχι μεγαλύτερη του  $\lambda = 600$  nm και μικρότερη του  $\lambda = 400$  nm) θεωρείται ο βέλτιστος συνδυασμός-λόγος μεταξύ φασματικών ζωνών.

Οι Kaimaris *et al.* (2012) διερεύνησαν τις δυνατότητες μοντέλων εξαγωγής βαθυμετρίας για την απόδοση βαθών από εικόνα WV-2, από την λίμνη Πραμόριτσα στην Δυτική Μακεδονία (Ελλάδα). Για την μελέτη της βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (RDdTM) της λίμνης, το οποίο το μετέτρεψαν σε σχετικά υψόμετρα με βάση την στάθμη αναφοράς της υπόψη τεχνητής λίμνης. Τα εν λόγω σχετικά υψόμετρα συγκρίθηκαν με τα σχετικά βάθη που υπολογίζει ο Αναλογικός αλγόριθμος (Stumpf *et al.* 2003), μέσω του λογισμικού ENVI. Αποδεκτά αποτελέσματα βαθυμετρίας εξήχθησαν όταν στην εικόνα δεν εφαρμόστηκε κάποια ατμοσφαιρική διόρθωση και χρησιμοποιήθηκε η τεχνική Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis) με δύο συνδυασμούς των φασματικών ζωνών του WV-2 (R,G,B,NIR=2,3,5,7 & R,G,B,NIR=2,3,5,8). Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι διαφορές μεταξύ των σχετικών βαθών/υψομέτρων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της λίμνης και των αποτελεσμάτων του Αναλογικού μοντέλου. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε η βαθυμετρία της λίμνης και με την χρήση του αλγορίθμων Simplified 1-D Classification και με χρήση τεχνικών πολυφασματικής ταξινόμησης με διαφορετικούς συνδυασμούς φασματικών ζωνών. Από την αξιολόγηση των προαναφερθέντων μοντέλων βαθυμετρίας διαπιστώθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα βαθυμετρίας προκύπτουν από την χρήση τεχνικών πολυφασματικής ταξινόμησης με τον συνδυασμό 1-Coastal, 2-Blue, 3-Green και 4-Yellow των φασματικών ζωνών WV-2, με τυπικά σφάλματα (standard errors) της τάξης των 2,0 m για τα βάθη από 0-10 m, των 2,7 m για βάθη από 10-20 m, των 2,6 m για βάθη από 20-30 m.

Οι Contreras-Silva *et al.* (2012) στο πλαίσιο προγράμματος αειφόρου διαχείρισης κοραλλιογενών οικοσυστημάτων της θαλάσσιας περιοχής του υφάλου Chinchorro στο Μεξικό, μελέτησαν την αξιοποίηση εικόνων Landsat 7-ETM+ στην χαρτογράφηση κοραλλιών και την κατηγοριοποίησή τους κάνοντας χρήση αλγορίθμων ταξινόμησης όπως ο Maximum Likelihood Classifier (MLC) και ο Iterative Self-organizing Data Analysis (ISODATA). Παράλληλα, διαπίστωσαν καλά αποτελέσματα στην απεικόνιση των δεδομένων του Landsat 7-ETM+ στην περίπτωση που είχε προηγηθεί ραδιομετρική διόρθωση, ατμοσφαιρική διόρθωση και διόρθωση της υδατινής στήλης. Υπολογισμός βαθυμετρίας δεν επιδιώχθηκε στην υπόψη έρευνα λόγω έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων (βαθών) πεδίου.

Οι Doxani *et al.* (2012) ερεύνησαν την δυνατότητα αξιοποίησης και των οκτώ (8) φασματικών ζωνών του αισθητήρα WV-2 για την εξαγωγή βαθυμετρίας από την παράκτια



περιοχή της Ν. Μηχανιώνας του Θερμαϊκού Κόλπου (Ελλάδα). Η προς μελέτη περιοχή (Ν. Μηχανιώνα) της εικόνας χωρίστηκε σε τρεις (3) υποπεριοχές ανάλογα με την ανακλαστικότητα του θαλάσσιου πυθμένα. Συγκεκριμένα η γεωγραφική περιοχή της εικόνας WV-2 υποδιαιρέθηκε σε μία υποπεριοχή με αμμώδη πυθμένα, με βάθη που κυμαίνονταν από 6,0 – 15,0 m, στην υποπεριοχή με πυθμένα που συνίστατο κυρίως αμμώδες ίζημα και κατά τόπους με θαλάσσια χλωρίδα, με βάθη εύρους από 2,5 m – 6,0 m, και στην υποπεριοχή που καλύπτονταν μόνο με θαλάσσια χλωρίδα (παράκτια ζώνη), με βάθη από 2,0 - 6,0 m. Μετά την πραγματοποίηση των απαραίτητων ραδιομετρικών και ατμοσφαιρικών διορθώσεων διενήργησαν αποθάμβωση της εικόνας, προκειμένου αφαιρεθεί ο θόρυβος λόγω της κατοπτρικής ανάκλασης. Για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω έρευνα ο αλγόριθμος-μοντέλο του Lyzenga (1978). Ο προσδιορισμός των βαθών έγινε χρησιμοποιώντας 250 μετρήσεις βαθών πεδίου, οι οποίες βαθμονόμησαν το χρησιμοποιούμενο βαθυμετρικό μοντέλο. Η ύπαρξη θαλάσσιας χλωρίδας (φυκιών, ποσειδωνίας, κτλ) που κάλυπτε τμήμα της περιοχής μελέτης έδειξε ότι η σχέση βαθών και φωτεινότητας *pixel* στις διάφορες φασματικές ζώνες ήταν μη γραμμική. Για τον σκοπό αυτό στις δύο (2) υποπεριοχές όπου δεν υπήρχε παρουσία υποθαλάσσιας βλάστησης ή αυτή ήταν αραιή, εφαρμόστηκε πολλαπλή παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας τα ήδη γνωστά βάθη (δεδομένα πεδίου) συγκρίνοντας τις τιμές φωτεινότητας των αντίστοιχων *pixels* στις φασματικές ζώνες 1, 2, 3, 4 και 5, καθόσον οι λοιπές ζώνες (band 6, NIR1 & NIR2) δεν θεωρήθηκαν σημαντικές από πλευράς υδρογραφίας/βαθυμετρίας. Στην περιοχή με τον αμμώδη πυθμένα συγκρίθηκαν οι τιμές των δεδομένων πεδίου με τις ανακλαστικότητες των φασματικών ζωνών 2, 3, 5 του WV-2, ενώ στην περιοχή με πυθμένα που συνίστατο κυρίως από αμμώδες ίζημα και κατά τόπους με θαλάσσια χλωρίδα συσχετίστηκαν τα δεδομένα πεδίου με τις τιμές που έδιναν οι ζώνες 1, 2, 3, και 4. Στην υποπεριοχή η οποία συνίσταται αποκλειστικά από πυθμένα με υποθαλάσσια βλάστηση (μη γραμμική σχέση μεταξύ δεδομένων πεδίου και ανακλαστικότητας πυθμένα) εφαρμόστηκε η μεθοδολογία των κυρίων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PC 1st). Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι η φασματική ζώνη του «πράσινου» (green band) στον δορυφόρο WorldView-2, έδειξε να είναι η καταλληλότερη για υδρογραφικές μελέτες/μετρήσεις.

Οι Leiper *et al.* (2014) εξέτασαν την δυνατότητα να χαρτογραφηθούν οι κοραλλιογενείς ύφαλοι της βορειο-δυτικής Αυστραλίας και συγκεκριμένα στην περιοχή Heron Reef του

Capricorn Bunker Group, Great Barrier Reef, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον εναέριο υπερφασματικό αισθητήρα Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI-2), χωρικής διακριτικής ικανότητας  $1\text{m} \times 1\text{m}$ . Στο πλαίσιο της εν λόγω έρευνας μελετήθηκε η ποιότητα και κάλυψη του ιζήματος, και η αντίστοιχη βαθυμετρία από τα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας του CASI, η οποία λήφθηκε τον Ιούλιο 2003, κάνοντας χρήση μίας ανάστροφης τεχνικής (HYDROLIGHT 4.2, Radiative Transfer Model). Το υπόψη λογισμικό παραμετροποιήθηκε και με δεδομένα πεδίου ανακλαστικότητας που συλλέχθηκαν μεταγενέστερα τον Ιούνιο 2006 από την περιοχή ενδιαφέροντος. Από τις μετρήσεις ανακλαστικότητας των κοραλλιογενών πυθμένων (2006) δημιουργήθηκε η φασματική βιβλιοθήκη των ιζημάτων της περιοχής μελέτης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διενέργεια επιβλεπόμενης ταξινόμησης με χρήση του αλγορίθμου SAM (Spectral Angle Mapper), ο οποίος εμπεριέχεται στο λογισμικό επεξεργασίας εικόνων ENVI. Η χαρτογράφηση των κοραλλιών και των λοιπών βενθικών πληθυσμών στην περιοχή μελέτης, κάνοντας χρήση της προαναφερόμενης μεθοδολογίας, επιτεύχθηκε σε ποσοστό 65% μέχρι βάθους 8 m. Επίσης, υπολογίστηκε και η βαθυμετρία της περιοχής από 0,5-10,0 m βάθος με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,93$ . Σε μεγαλύτερα των 10,0 m βάθη ο συντελεστής προσδιορισμού μειώνονταν με μεγάλο ρυθμό.

Οι Jagalingam *et al.* (2015) διερεύνησαν την δυνατότητα εξαγωγής βαθυμετρίας από την περιοχή New Mangalore Port που βρίσκεται στην νοτιοδυτική Ινδία από εικόνες Landsat 8 (OLI). Στην προσπάθειά τους αυτή χρησιμοποίησαν τον Αναλογικό αλγόριθμο (ratio Transform), του οποίου τα δεδομένα τα συσχέτισαν με χαρτογραφικά στοιχεία (βάθη) από τον ναυτικό χάρτη της υπόψη περιοχής. Από τα πειράματά τους διαπίστωσαν ότι προσδιόρισαν την βαθυμετρία της μελετούμενης παράκτιας ζώνης μέχρι βάθους 20 m περίπου, με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,878$ . Επίσης, οι εν λόγω ερευνητές πρότειναν να χρησιμοποιηθεί η υπόψη τιμή του συντελεστού προσδιορισμού ως τιμή αναφοράς ( $R^2=0,878$ ) ως κριτήριο σύγκρισης, ώστε στην περίπτωση κατά την οποία στο μέλλον αποδειχθεί από νεώτερες μετρήσεις πεδίου (νέες υδρογραφικές αποτυπώσεις πεδίου ή από ανάλυση άλλης δορυφορικής εικόνας) ότι ο συντελεστής  $R^2$  μειώνεται, τότε το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της μεταβολής/αλλαγής των βαθών στην εν λόγω παράκτια περιοχή.

Οι Eugenio *et al.* (2015) χρησιμοποίησαν δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης WorldView-2 (WV-2) και επινόησαν μία μεθοδολογία επεξεργασίας εικόνας WV-

2, για εξαγωγή βαθυμετρίας και χαρτογράφηση των βενθικών πληθυσμών της παράκτιας περιοχής των Καναρίων Νήσων. Ο υπολογισμός της βαθυμετρίας πραγματοποιήθηκε διά της μεθόδου της «Αναστροφής» της εξίσωσης της θεωρίας της διάδοσης της Ακτινοβολίας, με την οποία υπολογίζεται η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_{rs}$ ). Στην συνέχεια με χρήση του ημι-αναλυτικού αλγορίθμου, προσδιορίστηκαν οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες των υδάτων (IOPs) και του συντελεστού εξασθένησης λόγω διάχυσης ( $K_d$ ). Ακολούθως, κάνοντας μετρήσεις πεδίου για να προσδιορίσουν τις τιμές της προσπίπτουσας στα ύδατα ανακλαστικότητας και της ανακλώμενης προς τον δέκτη ακτινοβολίας επέλυσαν την εξίσωση της διάδοσης ακτινοβολίας στα ύδατα ( $r_{rs}$ ). Στο τέλος εφάρμοσαν μία τεχνική βελτιστοποίησης (Levenberg-Marquardt Method) του μοντέλου για τον προσδιορισμό του βάθους, δίνοντας ως αρχική τιμή (οριακή τιμή) το αποτέλεσμα των βαθών του Αναλογικού αλγορίθμου (ratio Algorithm). Το συγκεκριμένο μοντέλο δημιούργησε βαθυμετρία μέχρι μέγιστο βάθος 25 m περίπου. Αντίστοιχα, για την χαρτογράφηση των βενθικών πληθυσμών υιοθέτησαν τις τιμές των Δεικτών Βλάστησης Κανονικοποιημένων Διαφορών για κάθε κατηγορία ιζήματος πυθμένα, με βάση τις ανακλαστικότητες που αυτές παρουσιάζουν σε κάθε φασματικό κανάλι του WV-2, τις οποίες κατηγοριοποίησαν με επιβλεπόμενη ταξινόμηση κάνοντας χρήση αλγορίθμων ταξινόμησης Support Vector Machines (SVM) με το φίλτρο Gaussian RBF Kernel.

Οι Jegat *et al.* (2016) στην Υδρογραφική Συνδιάσκεψη του Καναδά (Canadian Hydrographic Conference, 2016) παρουσίασαν μία επισκόπηση των δυνατοτήτων της εξαγόμενης από τις δορυφορικές εικόνες Landsat 8 και Sentinel βαθυμετρίας και την ενδεχόμενη χρήση τους σε χαρτογραφικά προϊόντα. Επισημαίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της βαθυμετρίας που εξάγεται από δορυφορικά δεδομένα συγκρινόμενης με τις αντίστοιχες τεχνικές υδρογράφησης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα δεδομένα βαθυμετρίας από δορυφορικές εικόνες δύνανται να συνεισφέρουν στα αντικείμενα ασφάλειας της ναυσιπλοΐας σε περιοχές σύνθετων παράκτιων υδάτων, και μπορούν να ενσωματωθούν στις γραμμές παραγωγής χαρτογραφικών προϊόντων των υδρογραφικών υπηρεσιών.

Οι Wei-Tsun *et al.*, (2016) εξέτασαν την δυνατότητα της νέας γενιάς αισθητήρων, όπως είναι ο WorldView-2 (WV-2), να εξάγουν πληροφορία βαθυμετρίας από την θαλάσσια περιοχή της ατόλης Dongsha Atoll, που βρίσκεται 480 Km νοτιοδυτικά της Taiwan,

προκειμένου μελετήσουν την βιοποικιλότητα του οικοσυστήματος της εν λόγω περιοχής. Η επιλογή τους να κάνουν τα πειράματα υπολογισμού βαθυμετρίας με τον WV-2, κινητοποιήθηκε από το ενδιαφέρον να εξεταστεί η πληροφορία των υδάτων που εμπεριέχεται στις νέες φασματικές ζώνες (Coastal, Red Edge, Yellow and NIR-2) του υπόψη δορυφόρου υψηλής χωρικής ανάλυσης. Τα βάθη της περιοχής μελέτης είναι της τάξης των 20 m και συλλέχθηκαν με την χρήση τεχνικών οπτικής εναέριας υδρογράφησης (Airborne LIDAR Bathymetry). Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο διενέργειας των παραπάνω πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) πολυφασματικές εικόνες του αισθητήρα WV-2, με κανάλια στις ζώνες coastal, blue, green, yellow, red, red edge, NIR-1, NIR-2, χωρικής ανάλυσης 2 m × 2 m και μία παγχρωματική ζώνη με ανάλυση 0,5 m × 0,5 m, οι οποίες είχαν ληφθεί τον Οκτώβριο 2013, ενώ τα δεδομένα βαθυμετρίας-υδρογράφησης λήφθηκαν κατά την διάρκεια εργασιών πεδίου το 2010. Στο πλαίσιο προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ραδιομετρική διόρθωση και ατμοσφαιρική με χρήση του αλγορίθμου ATCOR, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό επεξεργασίας εικόνων PCI Geomatica. Από την μελέτη των εν λόγω ερευνητών διαπιστώθηκε ότι μεγαλύτερη διείσδυση στα ύδατα της περιοχής ενδιαφέροντος παρουσιάζουν οι φασματικές ζώνες coastal, blue, green, και yellow, οι οποίες μελετήθηκαν περαιτέρω. Ακολούθως, υιοθετήθηκε ο Αναλογικός αλγόριθμος (ratio Transform) για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας τόσο με τον συνδυασμό (λόγο) των φασματικών ζωνών (blue/green) όσο και με τον συνδυασμό (coastal/yellow). Για την βαθμονόμηση του μοντέλου βαθυμετρίας (ratio Transform) και καθορισμό των συντελεστών  $m_0$ ,  $m_1$  του αναλογικού αλγορίθμου, χρησιμοποιήθηκαν 1.247 βάθη που είχαν συλλεχθεί με την τεχνική υδρογράφησης LIDAR που κυμαίνονταν από 2,04 m έως 21,96 m. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψε συσχέτιση των υπολογισθέντων βαθών με χρήση του συνδυασμού (coastal/yellow) της τάξης του  $R^2=0,357$ , ενώ με τον συνδυασμό των φασματικών ζωνών (blue/green), ως προτείνεται από τους Stumpf *et al.*, (2003), η αντίστοιχη συσχέτιση με τα δεδομένα πεδίου ανήλθε σε  $R^2=0,7267$ . Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δεδομένων πεδίου (LIDAR depths) και των αποτελεσμάτων βαθυμετρίας του αναλογικού αλγορίθμου με χρήση του συνδυασμού (coastal/yellow) διαπιστώθηκαν στα βάθη μεγαλύτερα των 10 m, ενώ με την χρήση του συνδυασμού (blue/green), οι μεγαλύτερες αποκλίσεις άρχισαν να παρουσιάζονται σε βάθη μεγαλύτερα των 15 m.

Οι Manessa *et al.*, (2016) μελέτησαν την βαθυμετρία από δορυφορικές εικόνες WorldView-2 (WV-2), με χρήση μη γραμμικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα με την χρήση του Random Forest (RF) αλγόριθμου της κατηγορίας των αλγορίθμων αυτόματης εκμάθησης συστημάτων και του Πολλαπλής Γραμμικής Ανάλυσης (Multiple Linear Regression - MLR). Για την ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων WV-2 και την απαγωγή του θορύβου από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές των Lyzenga, *et al.* (2006). Οι περιοχές μελέτης αφορούσαν σε δύο (2) νήσους της Ινδονησίας το Gili Mantra και το Panggang Isl. Για την εξαγωγή της βαθυμετρίας αξιοποιήθηκαν οι όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί/λόγοι μεταξύ των φασματικών ζωνών των εικόνων του WV-2, ενώ τα αποτελέσματα της βαθυμετρίας συσχετίστηκαν μέσω των μη γραμμικών αλγορίθμων (MLR & RF), με δεδομένα πεδίου. Τα βάρη από το πεδίο είχαν συλλεχθεί με χρήση ηχοβολιστικού μονής δέσμης (singlebeam echosounder) και διαφορικού συστήματος προσδιορισμού θέσης (DGPS). Επίσης, η βαθυμετρία πεδίου διορθώθηκε ως προς το κατακόρυφο επίπεδο της Μέσης Στάθμη Θαλάσσης (MSL), με βάση τα στοιχεία του πλησιέστερου στις περιοχές μελέτης παλιρροιογράφου. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψε ότι η εξαγόμενη βαθυμετρία με την χρήση του αλγορίθμου RF είναι καλύτερης ακρίβειας από την υπολογιζόμενη με τον αλγόριθμο MLR. Η επίδοση του RF κυμάνθηκε για βάρη μέχρι 12,0 m, για τους διάφορους συνδυασμούς των φασματικών ζωνών του WV-2, μεταξύ  $R^2=0,350-0,897$  και  $RMSE=0,746-1,779$  m. Την καλύτερη συσχέτιση με τα δεδομένα πεδίου παρουσίασαν οι φασματικές ζώνες Green, Yellow και Red του WV-2.

Οι Tragapos *et al.*, (2017) ερεύνησαν την δυνατότητα χαρτογράφησης υποθαλασσίων λιβαδιών ποσειδωνίας στην θαλάσσια περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου (Ελλάδα) από δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2. Στο πλαίσιο της υπόψη έρευνας χρησιμοποιήθηκαν ειδικοί αλγόριθμοι ταξινόμησης του πυθμένα (random Forests (RF), Maximum Likelihood Classifier (MLC) and Support Vector Machines (SVM), ενώ υπολογίστηκε και το βάθος της θαλάσσιας περιοχής μέχρι τα 16,5 m. Ο υπολογισμός του βάθους διενεργήθηκε με χρήση του Αναλογικού αλγόριθμου βαθυμετρίας (ratio algorithm). Η χρήση των πολυφασματικών εικόνων SENTINEL-2 στην εν λόγω έρευνα κατέδειξε τις δυνατότητές τους στην παρατήρηση υδάτινων περιοχών.

Οι Eugenio *et al.*, (2017) μελέτησαν την επίδραση της ατμόσφαιρας στην εξαγωγή δεδομένων βαθυμετρίας και ταξινόμησης των βενθικών πληθυσμών, σε προστατευμένους

οικότοπους των Καναρίων Νήσων. Πιο συγκεκριμένα, διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα των διαφόρων αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στην διόρθωση της ακτινοβολίας που σκεδάζεται ή απορροφάται ή μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας στον ουρανό (path radiance). Οι ατμοσφαιρικοί αλγόριθμοι που εξετάστηκαν είναι οι “Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes” (FLAASH), ο “Atmospheric CORrection” (ATCOR), και ο “Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum” (6S). Στο παρελθόν διάφοροι επιστήμονες είχαν μελετήσει τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων αρκετά ανεπτυγμένων (sophisticated) αλγορίθμων σε δορυφορικά δεδομένα Landsat TM, Landsat ETM+, Quickbird, Hyperion κτλ. Οι εν λόγω ερευνητές μελέτησαν την αποτελεσματικότητα των υπόψη ατμοσφαιρικών αλγορίθμων σε δορυφορικά δεδομένα WorldView-2(WV-2), συγκρίνοντάς τα με μετρήσεις ανακλαστικότητας πεδίου. Κατ’ ουσίαν, μέτρησαν με φασματόμετρα την ανακλαστικότητα συγκεκριμένων αντικειμένων στο επίπεδο της επιφάνειας της γης και σύγκριναν τις ανακλαστικότητες τους με τις ανακλαστικότητες αυτών όπως απεικονίζονται επί της δορυφορικής εικόνας WV-2, αφού είχε αυτή διορθωθεί ως προς την επίδραση της ατμόσφαιρας με βάση τους προαναφερόμενους αλγορίθμους. Στο πλαίσιο των ερευνών αυτών διαπίστωσαν ότι ο αλγόριθμος 6S παρείχε τα καλύτερα αποτελέσματα σε παράκτιες θαλάσσιες περιοχές (coastal/shallow areas), ενώ ο ατμοσφαιρικός αλγόριθμος FLAASH παρείχε τα καλύτερα αποτελέσματα σε υδάτινες περιοχές εσωτερικών υδάτων (inner waters, lakes). Παράλληλα, εφάρμοσαν ένα φυσικό μοντέλο διάδοσης της ακτινοβολίας στο νερό (physics-based model), προκειμένου εξαγάγουν βαθυμετρία και ταξινομήσουν με ακρίβεια τους βενθικούς πληθυσμούς στους συγκεκριμένους οικότοπους. Το εν λόγω μοντέλο συνδυάζει την διαδικασία της διόρθωσης της υδάτινης στήλης, χρήση υποθαλασσιών δεικτών βλάστησης κανονικοποιημένων διαφορών, και τεχνικές επιβλεπόμενης ταξινόμησης με αλγορίθμους (SVM, K-Coefficient, etc) που διατίθενται στα λογισμικά επεξεργασίας εικόνας της αγοράς. Στο τέλος εφάρμοσαν μία τεχνική βελτιστοποίησης (Levenberg-Marquardt Algorithm) του μοντέλου για τον προσδιορισμό του βάθους, με αρχική τιμή εισαγωγής (οριακή τιμή) το αποτέλεσμα του Αναλογικού αλγορίθμου (ratio Algorithm). Στοιχεία για την ακρίβεια της υπολογισθείσας βαθυμετρίας δεν αναφέρονται στο συγκεκριμένο άρθρο.

Οι Favoretto *et al.*, (2017) μελέτησαν τις δυνατότητες εξαγωγής βαθυμετρίας από το μοντέλο 4SM (Shelf-calibrated Spectral Supervised Shallow Water Modeler). Οι εν λόγω

ερευνητές πραγματοποίησαν πειράματα εξαγωγής βαθυμετρίας από μία χρονοσειρά εννέα (9) εικόνων Landsat 8 (OLI) του στενού San Lorenzo Channel, που βρίσκεται στο κόλπο της Καλιφόρνιας (Μεξικό). Τα αποτελέσματα του μοντέλου 4SM συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του Αναλογικού αλγόριθμου (Stumpf *et al.*, 2003), όπως αυτός εκτελείται μέσω της πλατφόρμας ENVI/Harris με βαθμονόμησή του με δεδομένα πεδίου (5.004 singlebeam depths). Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι για το εύρος βαθών από 5-10 m το μοντέλο 4SM λειτουργεί με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον Αναλογικό αλγόριθμο για τις ρηχές περιοχές μεγάλης ανακλαστικότητας ιζήματος, ενώ για τις περιοχές χαμηλής ανακλαστικότητας π.χ. εκεί όπου υπάρχει υποθαλάσσια βλάστηση και οι δύο αλγόριθμοι αποδίδουν τα ίδια αποτελέσματα. Για την παράκτια ζώνη από 3-10 m, τα βάθη που υπολογίζονται από τον κώδικα 4SM υπερ-εκτιμώνται δηλαδή οι υπολογισθείσες τιμές είναι μεγαλύτερες των πραγματικών (δεδομένων πεδίου), ενώ για τα βάθη που κυμαίνονται από 10-20 m, η υπολογισθείσα από το 4SM βαθυμετρία υποεκτιμάται, ήτοι οι τιμές που υπολογίζονται είναι (σταθερά) μικρότερες των αντίστοιχων πραγματικών. Η μέγιστη βαθυμετρία που υπολογίστηκε στην συγκεκριμένη περιοχή έφθασε τα 20 m περίπου και με τους δύο προαναφερόμενους αλγόριθμους (4SM και Stumpf *et al.*, 2003), ενώ σε μεγαλύτερα βάθη παρουσιάστηκαν σημαντικά σφάλματα συσχέτισης και από τους δύο αλγόριθμους εξαγωγής βαθυμετρίας. Ωστόσο, ο αλγόριθμος 4SM παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι για να λειτουργήσει δεν απαιτείται η βαθμονόμησή του με δεδομένα πεδίου, ενώ δεν είναι απαραίτητη η προηγούμενη διόρθωσή του ατμοσφαιρικά και ραδιομετρικά καθώς οι τελευταίες διορθώσεις διενεργούνται στο πλαίσιο της ανάλυσης της εικόνας από τον ίδιο τον κώδικα (4SM).

Οι Najhan *et al.*, (2017) ανέλαβαν να μελετήσουν για λογαριασμό της Μαλαισιανής Υδρογραφικής Υπηρεσίας την δυνατότητα χρήσης και αξιοποίησης της βαθυμετρίας που εξάγεται από πολυφασματικούς αισθητήρες στην παράκτια περιοχή αρμοδιότητας της Eastern Sabah Security Zone (ESSZONE). Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε εικόνα πολύ υψηλής ανάλυσης από τον αισθητήρα Pleiades, η οποία λήφθηκε τον Ιούλιο 2016. Για την βαθμονόμηση της παραπάνω εικόνας (Pleiades) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα πεδίου με ηχοβολιστικό μονής δέσμης (single-beam echosounder), με μέγιστο βάθος τα 20 m περίπου, τα οποία χωρίστηκαν σε δύο ομάδες (set). Η μία ομάδα δεδομένων πεδίου (200 βάθη) χρησιμοποιήθηκε ως ομάδα δεδομένων (dataset) βαθμονόμησης του αλγορίθμου

βαθυμετρίας, ενώ τα υπόλοιπα (2.452 βάθη) χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων των αλγορίθμων βαθυμετρίας που μελετήθηκαν στην συγκεκριμένη περιοχή. Στο πλαίσιο της υπόψη μελέτης αξιολογήθηκαν δύο αλγόριθμοι βαθυμετρίας, ο Γραμμικός εμπειρικός αλγόριθμος του Lyzenga (1978) και ο Αναλογικός αλγόριθμος των Stumpf *et al.*, (2003). Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην εικόνα Pleiades κατέδειξαν πολύ καλή απόδοση και για τους δύο αλγόριθμους με καλύτερα αποτελέσματα για τον Αναλογικό αλγόριθμο. Πιο συγκεκριμένα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) για τον αλγόριθμο του Stumpf *et al.* (2003) ήταν της τάξης των 1,432 m, ενώ το αντίστοιχο σφάλμα για το μοντέλο του Lyzenga (1978) ήταν 1,728 m. Ακολούθως, οι εν λόγω ερευνητές πραγματοποίησαν αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων συγκρίνοντας τα με τις διεθνείς προδιαγραφές του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού (IHO) καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι 29,6% των εξαγόμενων δεδομένων βαθυμετρίας εμπίπτει εντός της κατηγορίας υδρογραφήσεων 1b (Order 1b), ενώ το 46,7% να ανήκει στην κατηγορία 2 (Order 2). Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι πολύ ενθαρρυντικά για την αξιοποίηση της εξαγόμενης από δορυφόρους βαθυμετρία στην υδρογραφία, προκειμένου καλύψουν χαρτογραφικούς σκοπούς σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλα κενά στα δεδομένα πεδίου.

Οι Pushparaj και Hegde (2017), μελέτησαν αντίστοιχα την δυνατότητα εξαγωγής βαθυμετρίας από την παράκτια περιοχή Dakshina Kannada της επαρχίας Karnataka της Ινδίας, με χρήση δορυφορικών δεδομένων Landsat-8 (OLI). Διερεύνησαν τόσο την πολυφασματική εικόνα του αισθητήρα Landsat-8 (OLI) στην χωρική της ανάλυση των 30 m × 30 m, όσο και στην επαυξημένη ανάλυσή της σε 15 m × 15 m, αξιοποιώντας την παγχρωματική φασματική ζώνη του εν λόγω δορυφόρου. Για την εξαγωγή βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκε ο Αναλογικός αλγόριθμος (Stumpf *et al.*, 2003), ενώ τα αποτελέσματα της βαθυμετρίας αξιολογήθηκαν με βάση τον ναυτικό χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος, ο οποίος είχε παραχθεί με δεδομένα συλλεχθέντα από ηχοβολιστικό σύστημα πολλαπλής δέσμης (Multibeam Sonar). Κατά το στάδιο προ-επεξεργασίας της εικόνας πραγματοποιήθηκε κάλυψη (masking) των χερσαίων περιοχών, αποθάμβωση (Glint correction) και κάλυψη των νεφών (cloud correction) της εικόνας. Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων εξαγωγής βαθυμετρίας προέκυψε ότι για την δορυφορική εικόνα με την αρχική χωρική ανάλυση των 30 m × 30 m υπάρχει ένας ικανοποιητικός βαθμός συσχέτισης



( $R^2=0,8503$ ) με τα δεδομένα του χάρτη μέχρι βάθους 5 m, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη απομειώνεται σταδιακά η συσχέτιση μεταξύ της υπολογισθείσας βαθυμετρίας και των βαθών του ναυτικού χάρτη. Πιο συγκεκριμένα, για τα βάθη από 5 m – 16 m ο συντελεστής συσχέτισης είναι  $R^2=0,5132$ , ενώ για τα βάθη από 16-25 m ο συντελεστής προσδιορισμού είναι  $R^2=0,3943$ . Αντίστοιχα, για την εικόνα της βελτιωμένης χωρικής ανάλυσης (15 m × 15 m) προέκυψε ότι για τα βάθη από 0 m – 10 m ο συντελεστής συσχέτισης είναι  $R^2=0,8951$ , ενώ για τα βάθη από 10-16 m ο συντελεστής προσδιορισμού είναι  $R^2=0,6214$ . Για τα μεγαλύτερα βάθη (16-25 m), ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει την τιμή  $R^2=0,4512$ . Οι εν λόγω ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ο Αναλογικός αλγόριθμος (ratio Transform), που χρησιμοποίησαν στην μελέτη τους, έχει την τάση να υπο-εκτιμά (underestimate) τα υπολογιζόμενα βάθη, για βάθη μεγαλύτερα των 10 m, για τον λόγο αυτό είναι καλύτερα να χρησιμοποιείται μέχρι βάθους 10 m στην βελτιωμένη χωρική ανάλυση, ήτοι εκείνη των εικονοστοιχείων της εικόνας Landsat-8 (OLI) με διάσταση 15 m × 15 m.

Οι Hodúl *et al.*, (2018) παρουσίασαν μία μέθοδο εξαγωγής βαθυμετρίας χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικές μεθόδους. Στην μεθοδολογία τους οι εν λόγω ερευνητές αξιοποίησαν στερεο-ζεύγη δορυφορικών εικόνων του συστήματος WorldView-2 και με γεωμετρικές τεχνικές (Photogrammetric Bathymetry Approach) εξήγαγαν βαθυμετρία από την περιοχή Coral Harbour του Καναδά που ανήκει στην Αρκτική Πολική Ζώνη. Τα φωτογραμμετρικώς εξαγόμενα βάθη τα διόρθωσαν ως προς την στάθμη της θάλασσας (παλίρροια) της περιοχής μελέτης. Τα αποτελέσματα της υπολογισθείσας με την εν λόγω μέθοδο βαθυμετρίας τα συσχέτισαν με δεδομένα πεδίου (βάθη) που είχαν συλλεχθεί από την Καναδική Υδρογραφική Υπηρεσία. Από την μέθοδο αυτή προέκυψαν βάθη τα οποία ήταν ανάλογης ακρίβειας των δεδομένων δορυφορικής βαθυμετρίας, μέχρι όμως βάθους 10,0 m, με RMSE=1,178 m. Σε μεγαλύτερα βάθη το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) αυξανόταν σε μεγάλο ποσοστό.

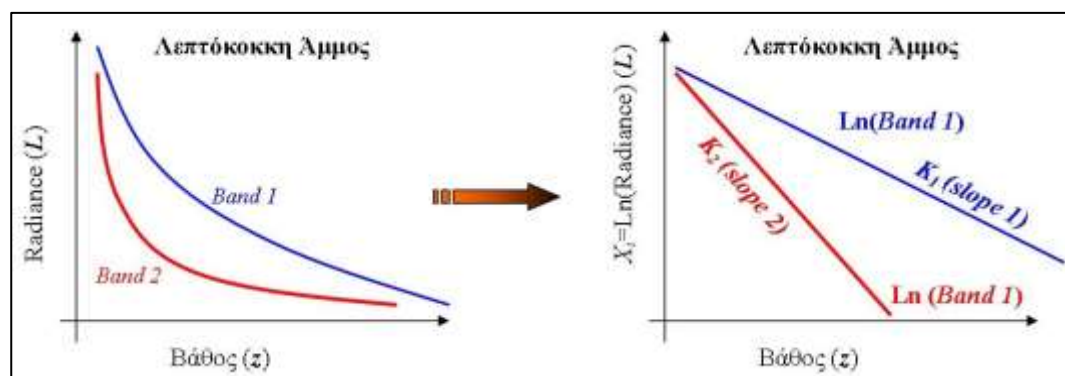
## 2.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ

### 2.2.1 Μοντέλο LYZENGA (ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ)

Πρώτος ο Lyzenga (1978) επινόησε μία τεχνική-αλγόριθμο που εφαρμόζεται σε θαλάσσιες περιοχές «καθαρών» σχετικά νερών, δηλαδή υδάτινων όγκων που δεν περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις σε αιωρούμενα σωματίδια, χλωροφύλλη, οργανική ύλη, κτλ. Η εν λόγω τεχνική κάνει την παραδοχή ότι οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης δεν μεταβάλλονται μέσα στην υδάτινη περιοχή που αποτυπώνεται στην δορυφορική εικόνα, οπότε ο λόγος των συντελεστών εξασθένησης λόγω της διάχυσης του φωτός  $K_i$  και  $K_j$  σε δύο (2) φασματικές ζώνες π.χ. ( $i$ ) και ( $j$ ), αντίστοιχα είναι σταθερός ( $K_i / K_j = \text{σταθερός}$ ), σε ολόκληρη την περιοχή που καλύπτει η εικόνα. Όμως, η εν λόγω παραδοχή δεν ισχύει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων των υδάτων, άρα και το γεγονός ότι επειδή ο λόγος  $K_i/K_j = \text{σταθερός}$ , οπότε και οι ανακλαστικότητες που προέρχονται από τον υδάτινο πυθμένα συνήθως δεν είναι σταθερές, δεδομένου ότι αυτές μεταβάλλονται σε κάθε περίπτωση διαφορετικής σύστασης του ιζήματος του πυθμένα.

Κρίσιμος παράγοντας πριν την εφαρμογή του εν λόγω αλγορίθμου, είναι η εφαρμογή της ατμοσφαιρικής διόρθωσης των τηλεσκοπικών δεδομένων. Η διαδικασία διόρθωσης των δορυφορικών εικόνων από την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας (αφαίρεση του «θορύβου» λόγω σκέδασης-Atmospheric path radiance) και της κατοπτρικής ανάκλασης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας βασίζονται κυρίως, στην αφαίρεση του πιο «σκοτεινού» pixel από τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία της δορυφορικής εικόνας για την συγκεκριμένη φασματική ζώνη. Η προαναφερόμενη τεχνική (path radiance correction) πραγματοποιείται υπολογίζοντας τον μέσο όρο της ανακλαστικότητας (reflectance/radiance/DN-values) των pixels σε μία περιοχή της εικόνας με βαθιά ύδατα. Η εν λόγω υπολογιζόμενη μέση τιμή αφαιρείται, στην συνέχεια, από όλα τα άλλα pixels της εικόνας σε κάθε φασματική ζώνη. Ο αλγόριθμος Lyzenga υιοθετεί, για τον υπολογισμό του βάθους μία τεχνική ανάλυσης της φασματικής μεταβλητότητας των pixels της εικόνας, χρησιμοποιώντας μία παράμετρο-δείκτη, που είναι ανεξάρτητη του βάθους (depth-invariant Bottom index), για κάθε ζεύγος φασματικών ζωνών.

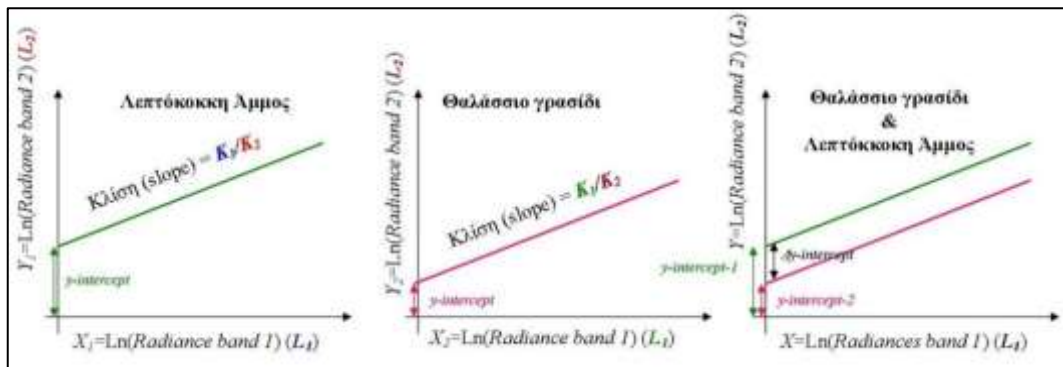
Σύμφωνα με την τεχνική του Lyzenga (1978), επιλέγονται δύο (2) φασματικές ζώνες της εικόνας (π.χ. Band 1 και Band 2), και δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα των ακτινοβολιών (radiance,  $W/m^2 \cdot sr^{-1}$ ) ή των ανακλαστικότητας (reflectances,  $sr^{-1}$ ) ή των ψηφιακών τιμών (DN-values) κάποιων εικονοστοιχείων, τα οποία αφορούν σε πυθμένες που έχουν ίδια ποιότητα ιζήματος, άρα παρόμοια ανακλαστικότητα, αλλά βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη. Στην περίπτωση αυτή, θεωρητικά, οι τιμές των «γραμμικοποιημένων» (λογαριθμημένων) ακτινοβολιών ή των ανακλαστικότητας ή των τιμών των ψηφιακών αριθμών των pixels), σε κάθε εικονοστοιχείο, θα μεταβάλλονται γραμμικά συναρτήσει της μεταβολής του βάθους. Η κλίση (slope) αντίστοιχα της ευθείας που δημιουργείται από την συσχέτιση των γραμμικοποιημένων ακτινοβολιών ( $\ln(\text{radiance})$ ) και βάθους ( $z$ ), στο εν λόγω διάγραμμα, αντιπροσωπεύει το συντελεστή εξασθένησης για κάθε φασματική ζώνη (π.χ.  $K_1$  ή  $K_2$ ). Στην προκειμένη περίπτωση (Εικόνα 2.6), διαπιστώνεται μείωση της ανακλαστικότητας των επιλεγμένων pixels, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση του βάθους από τα αριστερά προς τα δεξιά της ευθείας παλινδρόμησης/συσχέτισης.



**Εικόνα 2.6 :** Γραμμικοποίηση ακτινοβολιών ( $L$ ) φασματικών ζωνών (Lyzenga, 1978).

Στο τελικό στάδιο της ανάλυσης της εικόνας, γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού του «Ανεξάρτητου δείκτη ποιότητας πυθμένα» (depth-invariant Bottom index), που είναι μία ποσότητα μη εξαρτώμενη από το βάθος του πυθμένα. Αυτό επιτυγχάνεται εάν στην ανάλυση των τηλεσκοπικών δεδομένων, ληφθεί υπόψη και άλλη μία θαλάσσια-υδάτινη περιοχή, με διαφορετικό τύπο ιζήματος πυθμένα (π.χ. θαλάσσιο γρασίδι- seagrass). Εάν επαναληφθεί η προαναφερόμενη διαδικασία (γραμμικοποίηση) για τον νέο τύπο ιζήματος (Εικόνα 2.7), τότε θα προκύψει μία άλλη ευθεία, η οποία θα παρουσιάζει τον αντίστοιχο βαθμό συσχέτισης των φασματικών ζωνών 1 και 2 με το νέο τύπο ιζήματος. Η εν λόγω ευθεία θα τέμνει τον γ-

άξονα, σε διαφορετικό σημείο (y-intercept) από ότι το πρώτο ίζημα που ήταν η λεπτόκοκκη άμμος. Το γεγονός αυτό συμβαίνει, επειδή οι ανακλαστικότητες των εικονοστοιχείων στις δύο φασματικές ζώνες (Band 1 και Band 2), για τους δύο τύπους ιζημάτων (την λεπτόκοκκη άμμο και το θαλάσσιο γρασίδι), είναι διαφορετικές.



**Εικόνα 2.7 :** Προσδιορισμός Δείκτη Ποιότητας Πυθμένα (depth-invariant index of Bottom type), (Lyzenga D.R., 1978).

Ο Lyzenga (1978) απέδειξε ότι η σχέση μεταξύ παρατηρηθείσας ανακλαστικότητας ή της ηλιακής ακτινοβολίας ή του ψηφιακού αριθμού (reflectance/radiance/DN-value) κάθε υδάτινου pixel της εικόνας βάθους (depth-z) και της λευκαύγειας του πυθμένα (Bottom albedo -  $A_d$ ), μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_w = (A_d - R_\infty) \cdot \exp(-g \cdot z) + R_\infty \quad (\text{εξισ. 2.19})$$

όπου  $R_\infty$  είναι η ανακλαστικότητα (reflectance) της υδάτινης μάζας (όγκου νερού), όπως αυτή προκύπτει από τις περιοχές της δορυφορικής εικόνας, στις οποίες το νερό είναι οπτικά βαθύ.  $A_d$  είναι η ανακλαστικότητα/λευκαύγεια του θαλάσσιου πυθμένα (Bottom albedo),  $z$  το βάθος και  $g$  είναι μία συνάρτηση που περιγράφει τους συντελεστές εξασθένησης λόγω διάχυσης του φωτός (diffuse attenuation coefficients- $K_d$ ) για την κατερχόμενη και ανερχόμενη από τον πυθμένα ακτινοβολία (φως).

Η εξισ. 2.19 που υπολογίζει την τιμή της ανακλαστικότητας των υδάτων ( $R_w$ ), δύναται να ξαναγραφεί επιλύοντάς την ως προς το βάθος  $z$  συναρτήσει των ανακλαστικότητων του πυθμένα και των βαθέων υδάτων ως εξής :

$$z = g^{-1} \cdot [\ln(A_d - R_\infty) - \ln(R_w - R_\infty)] \quad (\text{εξισ. 2.20})$$

Ο προσδιορισμός/εκτίμηση του βάθους  $z$ , με βάση την παραπάνω εξίσωση από μία μόνο φασματική ζώνη εξαρτάται από την ανακλαστικότητα/λευκαύγεια του πυθμένα  $A_d$  (Albedo). Όπως προκύπτει αναλυτικά από την εν λόγω εξίσωση του μοντέλου Lyzenga, μία μείωση της ανακλαστικότητας του πυθμένα ( $A_d$ ) έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό του βάθους θαλάσσης πιο αυξημένου (overestimated depth) από ότι είναι το πραγματικό.

Λίγο αργότερα, ο ίδιος ερευνητής (Lyzenga, 1985) απέδειξε ότι η ανάλυση δύο (2) φασματικών ζωνών δύναται να παρέχει διορθώσεις για την περίπτωση της μεταβλητότητας της λευκαύγειας (Albedo) του ιζήματος του πυθμένα, με αποτέλεσμα το βάθος να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω της παρακάτω εξίσωσης :

$$z = a_o + a_i \cdot X_i + a_j \cdot X_j \quad (\text{εξισ. 2.21})$$

όπου,

$$X_i = \ln[R_w(\lambda_i) - R_\infty(\lambda_i)] \quad (\text{εξισ. 2.22})$$

Οι σταθερές  $a_o$ ,  $a_i$  και  $a_j$ , της εξισ. 2.21 προσδιορίζονται από επίλυση της εξίσωσης πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Multiple Linear Regression) ή μέσω κάποιας άλλης αντίστοιχης τεχνικής.

Ο Γραμμικός μετασχηματισμός του Lyzenga, προϋποθέτει την γνώση πέντε (5) συντελεστών ( $a_o$ ,  $a_i$ ,  $a_j$ ,  $R_w(\lambda_i)$ ,  $R_\infty(\lambda_j)$ ), προκειμένου προσδιοριστεί το βάθος ( $z$ ), γεγονός που προκαλεί προβλήματα ιδιαίτερα σε περιοχές μεγάλης έκτασης, με σχετικά μικρή φασματική διαφοροποίηση στην φασματική ποιότητα του πυθμένα. Επιπλέον, όταν η ανακλαστικότητα του ιζήματος ή της χλωρίδας του πυθμένα είναι μικρότερη της ανακλαστικότητας της ευρύτερης παράκτιας ζώνης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση που υπάρχουν στην παράκτια ζώνη φύκια ή «ποσειδωνία», τότε συμβαίνει η ανακλαστικότητα του πυθμένα ( $A_d$ ) στα ρηχά νερά να είναι μικρότερη της ανακλαστικότητας των «βαθέων υδάτων» ( $R_\infty$ ). Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι στα ρηχότερα ύδατα η διαφορά  $[R_w(\lambda_i) - R_\infty(\lambda_j)]$  να είναι μικρότερη του μηδενός, άρα ο λογάριθμος  $\ln[R_w(\lambda_i) - R_\infty(\lambda_j)]$  δεν ορίζεται. Συνεπώς, στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη τεχνική- αλγόριθμος υπολογισμού του βάθους ( $z$ ) της θάλασσας.

## 2.2.2 Μοντέλο Αναλογικού Αλγορίθμου (RATIO TRANSFORM)

Το πρόβλημα εξαγωγής της βαθυμετρίας, από μία παράκτια περιοχή, η οποία παρουσιάζει εικονοστοιχεία (pixels) με τιμή ανακλαστικότητας χαμηλότερη από ότι τα pixels των «βαθών νερών», λόγω ύπαρξης για παράδειγμα υποθαλάσσιας βλάστησης, ήταν η αφορμή για την έρευνα και χρήση/αξιοποίηση ενός εναλλακτικού εμπειρικού αλγορίθμου. Ο εν λόγω αλγόριθμος/μοντέλο έχει λιγότερες εξαρτημένες μεταβλητές από ότι ο αλγόριθμος Lyzenga (1978), ενώ απαιτούνται λιγότερες «εμπειρικές» ρυθμίσεις, προκειμένου να είναι πιο αποτελεσματικός και ακριβής σε συγκεκριμένες (ειδικές) περιοχές της δορυφορικής εικόνας, εκεί δηλαδή που υπάρχουν διάφορα είδη χλωρίδας και ποικιλομορφία στην ανακλαστικότητα των ιζημάτων του πυθμένα.

Κρίσιμη παράμετρος αποτελεί το γεγονός ότι οι διάφορες φασματικές ζώνες των παθητικών αισθητήρων παρουσιάζουν διαφορετικές φασματικές απορροφήσεις (εξασθενήσεις). Αφού οι τιμές του βάθους ( $z$ ) της εξίσωσης Lyzenga (εξισ. 2.20) μεταβάλλονται συναρτήσει του λογαρίθμου, τότε και η αναλογία/λόγος των λογαρίθμων, δηλαδή των «γραμμικοποιημένων» (λογαριθμημένων) τιμών ανακλαστικότητας, θα μεταβάλλεται αναλόγως του βάθους του πυθμένα. Καθόσον σταδιακά το βάθος ( $z$ ) αυξάνει, τόσο η μη γραμμικοποιημένη ανακλαστικότητα ( $(R_w(\lambda_j))$ ), όσο και η γραμμικοποιημένη ανακλαστικότητα ( $\ln(R_w(\lambda_j))$ ), της ζώνης με την μεγαλύτερη απορρόφηση (green) θα μειώνεται «αναλογικά» ταχύτερα από την ανακλαστικότητα της φασματικής ζώνης (band) με την μικρότερη απορρόφηση ( $\ln[R_w(\lambda_i)]$ ) (π.χ., blue band). Η τιμή του λόγου των «μη γραμμικοποιημένων» (μη λογαριθμημένων) ανακλαστικότητων ( $(R_w(\lambda_i))/R_w(\lambda_j)$ ) [blue/green] των αντίστοιχων pixels, θα αυξάνεται ταχύτερα όσο μειώνεται η ανακλαστικότητα ( $R$ ) με την αύξηση του βάθους ( $z$ ) της θάλασσας. Τονίζεται ότι ο γραμμικοποιημένος λόγος των ανακλαστικότητων ( $\ln(R_w(\lambda_i))/\ln(R_w(\lambda_j))$ ) παρουσιάζει πολύ μικρή μεταβολή με τη αύξηση του βάθους. Μία μεταβολή στην ανακλαστικότητα/λευκαύγεια του πυθμένα (Bottom Albedo), η οποία προκαλείται από αλλαγή της υποθαλάσσιας βλάστησης ή του ιζήματος του πυθμένα, επηρεάζει και τις δύο (2) φασματικές ζώνες παρόμοια (Philrot, 1989), ενώ αλλαγές στο βάθος επηρεάζουν την ζώνη με την μεγαλύτερη απορρόφηση περισσότερο. Άρα, η μεταβολή στον «λόγο» των ανακλαστικότητων των φασματικών ζωνών ένεκα του βάθους θα είναι πολύ

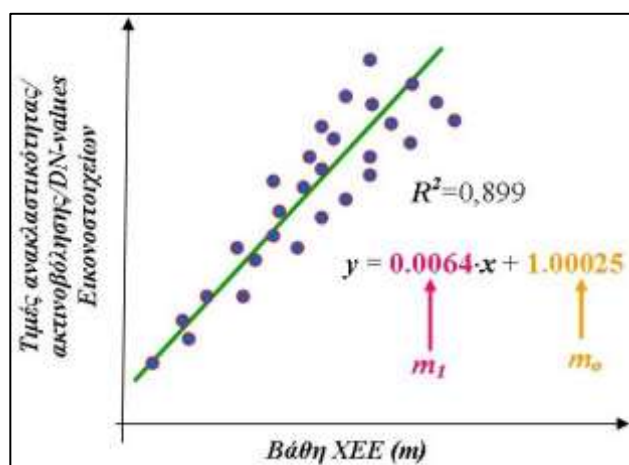
μεγαλύτερη από την μεταβολή που προκαλείται από την αλλαγή της ποιότητας του πυθμένα λόγω της διαφορετικότητας του ιζήματος ή της χλωρίδας.

Κατά συνέπεια, στην περίπτωση μίας παράκτιας περιοχής με σταθερό βάθος ( $z$ ), αλλά διαφορετικής σύστασης του πυθμένα, τα pixels της δορυφορικής εικόνας που παρουσιάζουν διαφορετική ανακλαστικότητα λόγω ιζήματος ή/και βλάστησης, θα παρουσιάζουν σχεδόν σταθερό «λόγο» λογαρίθμων ανακλαστικότητας στις δύο (2) φασματικές ζώνες (blue/green). Λαμβανομένων υπόψη των παραπάνω, οι Stumpf *et al.*, (2003), προκειμένου να αντιμετωπιστεί η δυσκολία στην εξαγωγή της βαθυμετρίας, η οποία προκαλείται από την διαφορετικότητα της ανακλαστικότητας του ιζήματος του πυθμένα, πρότειναν έναν Αναλογικό αλγόριθμο («Αναλογικός μετασχηματισμός»-Ratio Transform). Ο εν λόγω αλγόριθμος δύναται να προσδιορίζει το βάθος ( $z$ ), ανεξάρτητα από την ποιότητα ή το είδος της χλωρίδας του πυθμένα, και μπορεί να «ρυθμιστεί» ως προς τα πραγματικά βάθη, με την βοήθεια δεδομένων ενός ναυτικού χάρτη ή ενός βαθυμετρικού διαγράμματος ή μέσω μετρήσεων πεδίου, μέσω της ακόλουθης αναλυτικής σχέσης :

$$z = m_1 \cdot \frac{\ln(n \cdot R_w(\lambda_i))}{\ln(n \cdot R_w(\lambda_j))} - m_0 \quad (\text{εξισ. 2.23})$$

όπου  $m_1$  είναι μία «ρυθμιζόμενη» σταθερά, η οποία χρησιμεύει στο να προσαρμόζει/ρυθμίζει το «λόγο» στο «βάθος» ( $z$ ) του ΧΕΕ ή του πεδίου,  $n$  είναι μία σταθερά που σχετίζεται με την εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος, και  $m_0$  είναι μία σταθερά μετατόπισης (offset) για το βάθος που αντιστοιχεί σε «0» m ( $z=0$ ). Η σταθερά  $n$  επιλέγεται έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι ο λογάριθμος ( $\ln$ ) θα είναι πάντα «θετικός» και έτσι ο «λόγος» (ratio) παράγει γραμμικά/αναλογικά αποτελέσματα συναρτήσει της μεταβολής του βάθους.

Πιο συγκεκριμένα, οι σταθερές/συντελεστές  $m_1$  και  $m_0$  του Αναλογικού μοντέλου (ratio transform) εξαγωγής βαθυμετρίας δύναται να προσδιοριστούν με στατιστική συσχέτιση των τιμών ανακλαστικότητας /ακτινοβόλησης/ψηφιακών αριθμών και των τιμών των βαθών του ΧΕΕ στις αντίστοιχες θέσεις των pixels. Μέσω λογιστικών φύλλων, υπολογίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης/συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων πεδίου ( $x$ -άξονας) και των δεδομένων ακτινοβολίας των pixels ( $y$ -άξονας). Από την εξίσωση συσχέτισης προκύπτουν οι τιμές των συντελεστών «κέρδους» ( $m_1$ ) και «μετατόπισης» ( $m_0$ ) του Αναλογικού αλγορίθμου εξαγωγής βαθυμετρίας (Εικόνα 2.8).



**Εικόνα 2.8 :** Στατιστική συσχέτιση τιμών ανακλαστικότητας pixels και δεδομένων πεδίου ή χαρτογραφικών δεδομένων.

Σύμφωνα με τους Stumpf *et al.* (2003), η μέθοδος του «Αναλογικού μετασχηματισμού» (ratio transform) φαίνεται να αντιμετωπίζει σε ικανοποιητικό βαθμό σημαντικά θέματα-προβλήματα, που απορρέουν από τον προσδιορισμό βαθυμετρίας μέσω των παθητικών πολυφασματικών δορυφορικών αισθητήρων.

Παράλληλα, η εν λόγω τεχνική, για την διόρθωση της ατμοσφαιρικής επίδρασης, δεν απαιτεί αφαίρεση της ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων ( $L_{i,\infty}$ ), που αποτελεί μία διαδικασία σε μεγάλο βαθμό «υποκειμενική», η οποία αναλόγως του είδους της ποιότητας του πυθμένα στις διάφορες περιοχές της εικόνας, μπορεί να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα. Για παράδειγμα, στο Γραμμικό μετασχηματισμό, η διαδικασία εκτίμησης της ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων ( $R_{i,\infty}$ ) εισαγάγει μεγάλη αβεβαιότητα, ειδικά στις περιπτώσεις όπου σε παράκτιες περιοχές υπάρχουν ζώνες με χαμηλότερη ανακλαστικότητα/λευκαύγεια (lower albedo), λόγω έντονης χλωρίδας, από ότι στα βαθιά νερά. Επίσης, η ανακλαστικότητα των βαθέων υδάτων ( $R_{i,\infty}$ ), μεταβάλλεται σε κάθε φασματική ζώνη (blue, green) με την σκέδαση της ατμόσφαιρας (scattering), ενώ ειδικότερα η ακτινοβολία του μήκους κύματος του «μπλε» (blue band) μεταβάλλεται και αναλόγως της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα.

Η μέθοδος του «Αναλογικού μετασχηματισμού» είναι συνάρτηση λιγότερων εμπειρικών συντελεστών ( $m_0$ ,  $m_1$ ), συγκριτικά με τον Γραμμικό μετασχηματισμό του Lyzenga ( $R_\infty(\lambda_i)$ ,  $R_\infty(\lambda_j)$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_i$ , και  $\alpha_j$ ), γεγονός που την κάνει πιο «σταθερή», πιο «εύκολη», και εφικτή



να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος γεωγραφικών περιοχών με διαφορετική χλωρίδα και είδος πυθμένα. Η μέθοδος του «ratio Transform» απαιτεί μόνο την χρήση φασματικών ζωνών που παρουσιάζουν διαφορετική απορροφητικότητα από το θαλάσσιο ύδωρ. Ακόμα, διαπιστώθηκε ότι η εν λόγω μέθοδος μπορεί να ρυθμιστεί με σχετικά λίγα βάθη, τα οποία μπορεί να προέρχονται και από υπάρχοντες στην περιοχή ναυτικούς χάρτες.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκε, αξιοποιήθηκε και αναπτύχθηκε περαιτέρω η τεχνική του λόγου μεταξύ διαφορετικών φασματικών ζωνών και του λόγου των λογαρίθμων μεταξύ των φασματικών ζωνών. Παράλληλα, στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε και δοκιμάστηκε η εφαρμογή της τεχνικής του λόγου των λογαρίθμων των βιοοπτικών ιδιοτήτων των υδάτων, στις υπό έρευνα περιοχές, στο ημι-αναλυτικό μοντέλο ανάστροφης επίλυσης (Υβριδικό Μοντέλο Βαθυμετρίας).

### 2.2.3 Μοντέλο JUPP

Ο Jupp (1988), πρότεινε ένα μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας, το οποίο βασίζεται στην παραδοχή ότι κάθε μήκος κύματος ακτινοβολίας διεισδύει σε διαφορετικό βάθος μέσα στην εκάστοτε υδάτινη μάζα. Έτσι θεωρητικά ισχύει ότι, για κάθε φασματική ζώνη υπάρχει μία ζώνη (εύρος βαθών) διείσδυσης (Zone of Penetration), εντός της οποίας, η απομείωση της έντασης της ακτινοβολίας λόγω των φαινομένων της σκέδασης και της απορρόφησης, από τον όγκο του νερού, είναι παραπλήσια/ομοιογενής, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να διαθλάται και να διεισδύει μέσα στην εν λόγω ζώνη, μέχρι ένα μέγιστο βάθος (extinction depth). Επίσης, με βάση την θεώρηση του Jupp, η ακτινοβολία (ηλιακό φως) δύναται να φθάνει μέχρι τον πυθμένα να ανακλάται και να διαδίδεται προς πίσω (οπισθοσκεδάζεται), διερχόμενη πάλι από τις προαναφερθείσες «ζώνες διείσδυσης», και να ανιχνεύεται από τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης. Μέσα σε κάθε ζώνη διείσδυσης (Εικόνα 2.9), το εκάστοτε μήκος κύματος της ακτινοβολίας, παρουσιάζει μία ελάχιστη απομείωση, με αποτέλεσμα να διεισδύει μέχρι το μέγιστο βάθος αυτής και να μας δίδει την καλύτερη (ακριβέστερη) πληροφορία βάθους στην εκάστοτε ζώνη. Σύμφωνα λοιπόν, με την τεχνική εξαγωγής βαθυμετρίας του Jupp, καθορίζονται αρχικά στην περιοχή μελέτης οι ζώνες διείσδυσης της ακτινοβολίας για κάθε φασματική ζώνη και στην συνέχεια μέσα στην εκάστοτε φασματική ζώνη εφαρμόζεται η ακόλουθη εξισ. 2.24 εξαγωγής βαθυμετρίας :

$$L_s = L_b \cdot (e^{-2 \cdot K \cdot z}) + L_w \cdot (1 - e^{-2 \cdot K \cdot z}) \quad (\text{εξίσ. 2.24})$$

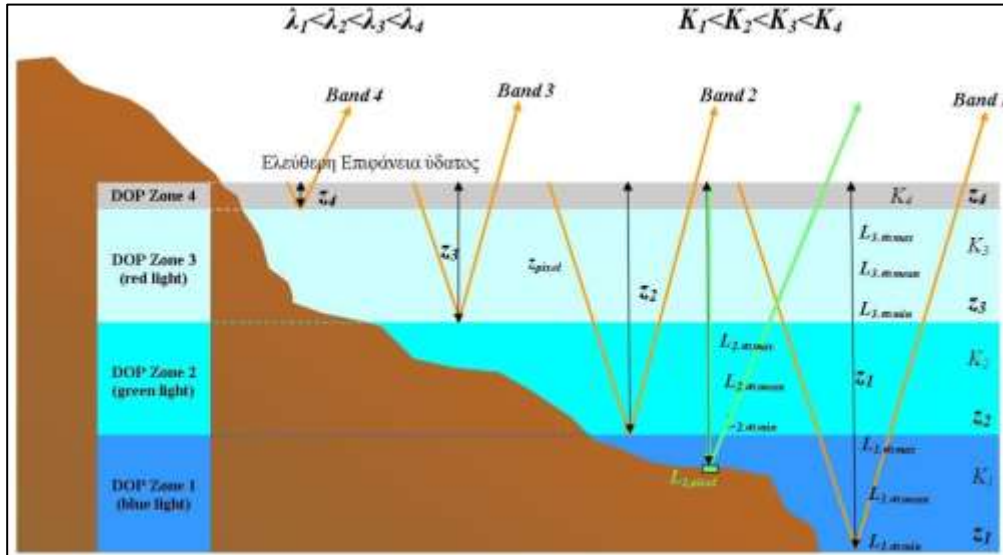
όπου,  $L_s$  είναι η μετρούμενη στον αισθητήρα (sensor) ακτινοβολία (radiance),  $L_b$  είναι η ακτινοβολήση που προέρχεται από τον υδάτινο πυθμένα (Bottom),  $L_w$  είναι η ακτινοβολήση που οφείλεται στον υδάτινο όγκο (water), και  $z$  το βάθος του υδάτινου πυθμένα ή το μέγιστο βάθος διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε ζώνη.

Η προαναφερόμενη εξίσωση μπορεί να γραφεί και ως ακολούθως :

$$L_s = L_b \cdot e^{-2 \cdot K \cdot z} + L_w - L_w \cdot e^{-2 \cdot K \cdot z} \quad (\text{εξίσ. 2.25})$$

Λογαριθμίζοντας (γραμμικοποιώντας) την παραπάνω εξίσωση και λύνοντας ως προς το βάθος της θάλασσας προκύπτει ότι :

$$z = \frac{\ln(L_s) - \ln L_w}{(-2 \cdot K) \cdot [\ln(L_b) - \ln(L_w)]} \quad (\text{εξίσ. 2.26})$$



Εικόνα 2.9 : Κατηγοριοποίηση βαθών εικονοστοιχείων με βάση την ανακλαστικότητα τους.

Εάν η ανάλυση αφορά σε πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα με  $N$  πλήθος φασματικών ζωνών, τότε η εξίσωση υπολογισμού του βάθους ( $z$ ) λαμβάνει την γενική της μορφή και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^N \ln(L_s) - \sum_{i=1}^N \ln(L_w)}{(-2) \cdot \sum_{i=1}^N K \cdot \left[ \sum_{i=1}^N \ln(L_b) - \sum_{i=1}^N \ln(L_w) \right]} \quad (\text{εξισ. 2.27})$$

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος του Jupp θα πρέπει να ισχύει ότι : α) η εξασθένηση της ακτινοβολίας συναρτήσει του βάθους είναι εκθετική συνάρτηση, β) η ποιότητα των υδάτων του υπό ανάλυση όγκου του νερού δεν μεταβάλλεται, δηλαδή ο συντελεστής εξασθένησης λόγω διάχυσης  $K_d$  είναι σταθερός και γ) η ανακλαστικότητα των ιζημάτων του υδάτινου πυθμένα είναι σταθερή. Οι δύο (2) τελευταίες παραδοχές αποτελούν και την αδυναμία του υπόψη μοντέλου, καθόσον εντός της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής που απεικονίζεται μέσα σε μία δορυφορική εικόνα, τόσο οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες (IOPs) του υδάτινου μέσου όσο και τα φασματικά χαρακτηριστικά των ιζημάτων του πυθμένα, συνήθως μεταβάλλονται. Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω μειονέκτημα της υπόψη μεθόδου, εκτελείται σε ένα αρχικό στάδιο ομαδοποίηση των περιοχών που εμφανίζουν παρόμοια ανακλαστικότητα ιζήματα πυθμένα και στην συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική Jupp, σε κάθε ταξινομημένη κλάση υποπεριοχών, ώστε τελικά αυτή να εφαρμόζεται σε υποπεριοχές με ομοιογενή φυσικά και οπτικά χαρακτηριστικά.

Η εφαρμογή του μοντέλου του Jupp διακρίνεται σε τρία (3) βασικά στάδια:

- i. Κατά το πρώτο στάδιο, προσδιορίζεται το βάθος ( $z$ ) της υδάτινης μάζας, μέχρι το οποίο διεισδύει κάθε φασματική ζώνη (Depth of Penetration Zone- DOP Zone) ή με άλλα λόγια, καθορίζονται οι ζώνες διείσδυσης κάθε μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας.
- ii. Κατά το δεύτερο στάδιο, γίνεται παρεμβολή των βαθών μέσα σε κάθε ζώνη διείσδυσης, και
- iii. Στο τρίτο στάδιο διενεργείται «ρύθμιση» (calibration) των βαθών εντός του εύρους κάθε ζώνης διείσδυσης.

Σύμφωνα με τους Green *et al*, (2000, σ. 222), τα μέγιστα βάθη διείσδυσης ανά μήκος κύματος δίδονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.1.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1 το «μπλε» ( $\lambda_1$ ) μήκος κύματος διεισδύει μέχρι το βάθος των 25 m, το «πράσινο» ( $\lambda_2$ ) μήκος κύματος φθάνει μέχρι τα 15 m, το «κόκκινο» ( $\lambda_3$ ) μήκος κύματος μέχρι 5 m, ενώ το «εγγύς υπέρυθρο» ( $\lambda_4$ ) φθάνει μόλις το 1 m βάθος. Τα προαναφερόμενα βάθη θεωρούνται ως προσεγγιστικά, δεδομένου ότι για ακριβέστερο προσδιορισμό των ζωνών διείσδυσης απαιτούνται και δεδομένα βαθών πεδίου, καθόσον τα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε pixel υδάτινης περιοχής διαφέρουν αναλόγως της σύστασης του πυθμένα, των έμφυτων/εγγενών (IOP's) ιδιοτήτων της υδάτινης μάζας της αλατότητας και της θερμοκρασίας του όγκου του νερού από τόπο σε τόπο.

**Πίνακας 2.1:** Βάθος Διείσδυσης ανά Φασματική Ζώνη (Green *et al.*, 2000)

| Φασματική Ζώνη ( $\lambda_i$ ) | Βάθος Διείσδυσης ( $P_i$ ) |
|--------------------------------|----------------------------|
| Band 1 ( $\lambda_1$ )         | 25 m (P1)                  |
| Band 2 ( $\lambda_2$ )         | 15 m (P2)                  |
| Band 3 ( $\lambda_3$ )         | 5 m (P3)                   |
| Band 4 ( $\lambda_4$ )         | 1 m (P4)                   |

Στη συνέχεια, υποδιαιρείται η παράκτια περιοχή της εικόνας σε υποπεριοχές/ζώνες, στις οποίες, σύμφωνα με το μοντέλο του Jupp, μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (και όχι κάποιο άλλο), θεωρητικά φθάνει στον πυθμένα κάθε υποπεριοχής, ανακλάται από αυτόν και στην συνέχεια λαμβάνεται κάποιο σήμα από τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης.

Το εν λόγω μοντέλο, δεν αποδίδει σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας μία μοναδιαία τιμή βάθους, αλλά ορίζει σε κάθε εικονοστοιχείο ένα εύρος βαθών, τα οποία δύναται αυτό να πάρει. Για τον προσδιορισμό των διάφορων ζωνών διείσδυσης ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία, η οποία εφαρμόζεται σε κάθε υποπεριοχή της εικόνας που παρουσιάζει ομοιογενή φασματικά χαρακτηριστικά πυθμένα.

Καταρχάς, προσδιορίζεται η ανακλαστικότητα (ή η ακτινοβολήση- $L$ ) που λαμβάνεται στον αισθητήρα από τα βαθιά νερά ( $L_{i,\infty}$ ), καθόσον η τιμή αυτή της ανακλαστικότητας ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που προέρχεται από τον όγκο του νερού (στήλη ύδατος), από την ακτινοβολία που οφείλεται στην ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας, και από την ακτινοβολία που προέρχεται από την συνεισφορά της ατμόσφαιρας (path radiance). Συνήθως, οι περιοχές των βαθέων υδάτων επιλέγονται σε

βάθη άνω των 50 m, όπως αυτά αναγράφονται στους ναυτικούς χάρτες που απεικονίζουν την περιοχή ενδιαφέροντος. Στην συγκεκριμένη μέθοδο αντί της ανακλαστικότητας του κάθε εικονοστοιχείου ( $R_w$ ) από τα ύδατα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η τιμή του αντίστοιχου ψηφιακού αριθμού (DN-value) αυτού.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή της ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων ( $L_{i,\infty,mean}$ ), η ελάχιστη ( $L_{i,\infty,min}$ ) και η μέγιστη ( $L_{i,\infty,max}$ ) για κάθε φασματική ζώνη της υπό μελέτης εικόνας. Γνωρίζοντας την μέση τιμή της ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων ( $L_{i,\infty,mean}$ ), μπορεί να διορθωθεί η δορυφορική εικόνα, ως προς τον «θόρυβο» που προκαλείται από την επίδραση της ατμόσφαιρας, και την επίδραση της υδάτινης στήλης.

Παράλληλα, η μέγιστη τιμή της ανακλαστικότητας από τα βαθιά νερά ( $L_{i,\infty,max}$ ) χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν οι διάφορες ζώνες διείσδυσης (DOP) εντός της δορυφορικής εικόνας. Έτσι λοιπόν, για κάθε εικόνα προσδιορίζονται σε κάθε φασματική ζώνη οι τιμές των Mean DN-value, Min. DN-value και Max. DN-value, ( $L_{i,\infty,mean}$ ), ( $L_{i,\infty,min}$ ), ( $L_{i,\infty,max}$ ) που μετρούνται πάνω από τα βαθιά νερά. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι κάποιο ή κάποια εικονοστοιχεία της εικόνας έχουν τιμή ανακλαστικότητας ή ψηφιακού αριθμού (DN-value) μεγαλύτερη από εκείνη της  $L_{i,\infty,max}$ , (μέγιστης ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων), τότε σημαίνει ότι η εν λόγω αύξηση της ανακλαστικότητας οφείλεται στην προστιθέμενη ακτινοβολία που προέρχεται από τον πυθμένα.

Ειδικότερα, σε κάθε φασματική ζώνη ( $i$ ) προσδιορίζεται το βαθύτερο σημείο (pixel) κάθε ζώνης διείσδυσης, δηλαδή το σημείο που έχει την χαμηλότερη τιμή (min DN-value) σε κάθε ζώνη (DOP zone), το οποίο όμως, έχει τιμή ψηφιακού αριθμού (DN-value) μεγαλύτερη από την μέγιστη τιμή της ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων για την συγκεκριμένη φασματική ζώνη/ κανάλι (min DN >  $L_{i,\infty,max}$  ή  $L_{i,min} > L_{i,\infty,max}$ ). Τονίζεται ότι η προαναφερόμενη μελέτη γίνεται πάντα σε υποπεριοχές της εικόνας με ομοιογενές ίζημα πυθμένα, δηλαδή με σταθερή ανακλαστικότητα πυθμένα.

Οι μέγιστες τιμές ανακλαστικότητας ( $L_{i,\infty,max}$ ) από την περιοχή των βαθέων υδάτων της εικόνας, σε κάθε φασματικό κανάλι, οριοθετούν (οριζοντιογραφικά) την έκταση της εκάστοτε ζώνης διείσδυσης. Για παράδειγμα, εάν σε κάποια φασματική ζώνη (π.χ. στην «μπλε»), ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης λαμβάνει κάποιο σήμα από κάποια περιοχή που βρίσκεται σε μία απόσταση  $x_1$ , από την ακτογραμμή, τα pixels της οποίας (περιοχής) εμφανίζουν τιμές

ψηφιακού αριθμού (DN-value) μεγαλύτερες από την μέγιστη τιμή της ανακλαστικότητας ( $L_{1,\infty,max}$ ) στην περιοχή των βαθέν υδάτων, τότε λαμβάνεται από τον δέκτη (αισθητήρα) κάποια επιπρόσθετη ανακλαστικότητα, η οποία προέρχεται από τον πυθμένα της περιοχής. Άρα, η πρώτη ζώνη διείσδυσης φθάνει μέχρι την απόσταση  $x_1$ , από την ακτογραμμή και περιλαμβάνει τα βάθη πεδίου, τα οποία οριοθετούνται μέσα στο εύρος (έκταση) της περιοχής αυτής. Το μεγαλύτερο (DOP1) από τα βάθη πεδίου, το οποίο περιλαμβάνεται στην ζώνη αυτή που απέχει απόσταση  $x_1$ , από την ακτογραμμή, προσδιορίζει και το μέγιστο βάθος της πρώτης ζώνης, το οποίο προέρχεται από το μήκος κύματος ( $\lambda_1 = \text{«μπλε»}$ ). Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η φασματική ζώνη του μπλε φάσματος καταφέρνει να διεισδύσει μέχρι του βάθους DOP1 να ανακλαστεί από τον υδάτινο πυθμένα και διαδοθεί στην ατμόσφαιρα και να φθάσει στον αισθητήρα τηλεπισκόπησης.

Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται και για την επόμενη φασματική ζώνη, έστω για παράδειγμα εκείνη του «πράσινου» φάσματος. Εκτιμάται, καταρχάς η μέγιστη τιμή της ανακλαστικότητας (DN-value ή  $L$ ) των βαθέν υδάτων στην φασματική ζώνη του «πράσινου», ήτοι η  $L_{2,\infty,max}$ . Στην συνέχεια προσδιορίζονται εικονοστοιχεία, πλησίον της περιοχής των βαθέν υδάτων, που δίνουν τιμές ανακλαστικότητας μεγαλύτερες της  $L_{2,\infty,max}$ . Αντίστοιχα, το εν λόγω γεγονός σημαίνει ότι ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης λαμβάνει κάποιο σήμα από τον πυθμένα σε περιοχή που βρίσκεται σε μία απόσταση  $x_2 < x_1$ , από την ακτογραμμή, δηλαδή πιο κοντά στην ακτή και σε πιο ρηχά ύδατα, τα pixels της οποίας εμφανίζουν τιμές ψηφιακού αριθμού (DN-value) μεγαλύτερες από την μέγιστη τιμή της ανακλαστικότητας ( $L_{2,\infty,max}$ ) στην περιοχή των βαθέν υδάτων. Η επιπλέον πληροφορία που λαμβάνεται από τον δέκτη (αισθητήρα) προέρχεται από τον πυθμένα της υπόψη περιοχής, η οποία οριζοντιογραφικά οριοθετείται σε απόσταση ( $x_2$ ) πιο κοντά στην ακτογραμμή από ότι η απόσταση  $x_1$ . Άρα, η δεύτερη ζώνη διείσδυσης φθάνει μέχρι την απόσταση  $x_2$  ( $x_2 < x_1$ ), από την ακτογραμμή και περιλαμβάνει τα βάθη πεδίου, τα οποία χωροθετούνται μέσα στο εύρος της περιοχής αυτής. Το μεγαλύτερο (DOP2) από τα μετρημένα βάθη πεδίου, το οποίο περιλαμβάνεται στην δεύτερη αυτή ζώνη που απέχει απόσταση  $x_2$ , από την ακτογραμμή, προσδιορίζει και το μέγιστο βάθος της δεύτερης ζώνης, το οποίο προέρχεται από το μήκος κύματος ( $\lambda_2 = \text{«πράσινο»}$ ). Οπότε, η φασματική ζώνη του «πράσινου» φάσματος καταφέρνει να διεισδύσει μέχρι του βάθους DOP2 να ανακλαστεί από τον υδάτινο πυθμένα και διαδοθεί στην ατμόσφαιρα και να φθάσει στον αισθητήρα τηλεπισκόπησης.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις υπόλοιπες φασματικές ζώνες μέχρι αφενός να οριοθετηθούν οι περιοχές διείσδυσης, αφετέρου να προσδιοριστούν τα μέγιστα βάθη διείσδυσης σε κάθε περιοχή.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε δεδομένο πεδίου (υδρογράφησης) αντιστοιχίζεται με την θέση του αντίστοιχου εικονοστοιχείου (pixel) και η τιμή του βάθους του συσχετίζεται με τον αντίστοιχο ψηφιακό αριθμό (DN-value) του pixel. Η εν λόγω διαδικασία γίνεται για κάθε φασματική ζώνη. Κατά την υπόψη διαδικασία αντιστοίχισης βαθών πεδίου με τους αντίστοιχους ψηφιακούς αριθμούς, απαιτείται η υπό ανάλυση δορυφορική εικόνα και τα υδρογραφικά δεδομένα πεδίου να αναφέρονται στο ίδιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Επίσης, οι τιμές των βαθών πεδίου θα πρέπει να έχουν διορθωθεί ως προς την στάθμη της θάλασσας (παλίρροια) που επικρατούσε κατά την ώρα λήψης της εικόνας.

Τα δεδομένα πεδίου κατηγοριοποιούνται με βάση την τιμή του ψηφιακού αριθμού (DN-value) που αντιστοιχεί στο pixel κάθε μετρηθέντος βάθους (Deidda *et al.*, 2016).

#### 2.2.4 Μοντέλο 4SM

Οι Morel and Lindell (1998) δημιούργησαν τον εμπειρικό αλγόριθμο-μοντέλο 4SM, (Self-calibrated Spectral Supervised Shallow-water Modeler), ή ελληνιστί «Αυτορυθμιζόμενος Φασματικά Επιβλεπόμενος Αλγόριθμος Ρηχών Υδάτων». Για την ρύθμιση του υπόψη οπτικού μοντέλου χρησιμοποιείται η «Απλουστευμένη Εξίσωση Διάδοσης της Ακτινοβολίας στο Νερό ή Radiative Transfer Equation –RTE». Ο αλγόριθμος 4SM, χρησιμοποιεί μόνο την πρωτογενή (μη επεξεργασμένη) «πληροφορία» (Digital Numbers - DNs), που προέρχεται από τα εικονοστοιχεία της ακτής και της θαλάσσιας/παράκτιας περιοχής που απεικονίζεται στα υπό μελέτη δεδομένα τηλεπισκόπησης, και σε συνδυασμό με τους πίνακες των συντελεστών Εξασθένησης Διάχυσης  $K$  του Jerlov, εξάγει δεδομένα βαθυμετρίας και στοιχεία ποιότητας θαλασσίου πυθμένα. Για τον υπολογισμό βαθυμετρίας με χρήση του 4SM, δεν είναι υποχρεωτική η χρησιμοποίηση δεδομένων πεδίου (field data) ούτε απαιτείται η χρήση αυτών για τη ρύθμιση του μοντέλου βαθυμετρίας (RTE). Επίσης, δεν απαιτείται εφαρμογή της διαδικασίας διόρθωσης για την επίδραση της ατμόσφαιρας. Ωστόσο, μερικοί ερευνητές χρησιμοποιούν ορισμένα δεδομένα πεδίου μόνο για έλεγχο και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του υπόψη αλγορίθμου. Το μοντέλο 4SM προκειμένου αποδώσει καλύτερα

αποτελέσματα βαθυμετρίας, κατά την ανάλυση του, απαιτεί (κυρίως) λήψεις εικόνων, κατά τη χρονική περίοδο που επικρατεί χαμηλή στάθμη θαλάσσης (Low Tide View). Το αποτέλεσμα που αποδίδει το εν λόγω μοντέλο είναι το Ψηφιακό Μοντέλο του Θαλασσίου Πυθμένα, ήτοι προσδίδει σε κάθε «ρηχό οπτικά» εικονοστοιχείο της εικόνας και ένα βάθος ( $z_i$ ).

Η μεθοδολογία που ακολουθείται από τον αλγόριθμο 4SM ομοιάζει με την τεχνική που αναπτύχθηκε από τους Malthus and Karrouzli (2003), η οποία (τεχνική) εξαρτάται πολύ από τα δεδομένα πεδίου, αλλά είναι πολύ πιο εμπειριστατωμένη, τόσο αναφορικά με την ρύθμιση του οπτικού μοντέλου όσο και σχετικά με την απαίτηση διόρθωσης των τηλεσκοπικών δεδομένων για την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας. Επίσης, θεωρείται αρκετά διαφορετική και πολύ πιο βελτιωμένη από την τεχνική των Stumpf and Holdereid, (2003), η οποία προαναφέρθηκε και έχει υιοθετηθεί από τη NOAA. Η τεχνική εξαγωγής βαθυμετρίας με το μοντέλο 4SM χρησιμοποιεί το ραδιομετρικό μοντέλο των εικονοστοιχείων βάθους  $z=0$  m (null depth = soils line) για την διόρθωση του θορύβου της ατμόσφαιρας.

Πιο συγκεκριμένα, σε συνέχεια των όσων είχαν επινοηθεί από τους Lyzenga and Maritorena, η μέθοδος του Morel *et al.*, (1998), είναι και αυτή μία αναλογική μέθοδος (Ratio Method), με βάση την οποία ακολουθούνται οι εξής φάσεις επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων:

Καταρχάς, εκτιμάται η ανερχόμενη στον αισθητήρα ακτινοβολία από τα βαθιά νερά, ήτοι εκτιμάται η  $L_{s,w}$  (deep water radiance at TOA).

Στην συνέχεια, προσδιορίζεται η ανερχόμενη ακτινοβολία (radiance) ενός «καθαρού» (δηλ. χωρίς φυτοκάλυψη και σκούρα πετρώματα-ιζήματα) εικονοστοιχείου, σε κάποια ακτή της εικόνας, ήτοι προσδιορίζεται η  $L_{s,M}$ .

Ακολούθως, επιλέγεται μία ομάδα Φασματικών Συντελεστών εξασθένησης λόγω διάχυσης, από μία περιοχή «καθαρών» και ομοιογενών υδάτων (spectral  $K$ ).

Γίνεται χρήση της Απλουστευμένης Εξίσωσης Μεταφοράς Ακτινοβολίας (Simplified Radiative Transfer Equation), με σκοπό να προσδιοριστεί η εκθετική απομείωση της  $L_{s,M}$ , (όπου  $L_{s,M}$  είναι ακτινοβολία που ανέρχεται από το έδαφος της ακτής), αυξανόμενου του βάθους ( $z$ ) σταδιακά από το 0 m (ανακλαστικότητα χωρίς φυτοκάλυψη ακτής), μέχρι την εξάλειψή της ( $L_{s,M}$ ), λόγω του μεγάλου βάθους.



Τέλος, δημιουργούνται τα δισδιάστατα διαγράμματα (ιστογράμματα-histograms) των ανερχόμενων στον αισθητήρα ( $L_s$ -TOA) γραμμικοποιημένων ακτινοβολιών, προκειμένου :

- α. Προσδιοριστεί-εκτιμηθεί η διακύμανση/μεταβολή της «Γραμμής των πιο φωτεινών εικονοστοιχείων» (spectral Brightest Pixels Line - BPL), καθόσον η κλίση (slope) της γραμμής BPL ισοδυναμεί με τον λόγο  $K_i/K_j$  για τις φασματικές ζώνες που εξετάζονται (bands  $i, j$ ).
- β. Προσδιοριστεί η πραγματική τιμή του συντελεστή εξασθένησης διάχυσης  $K$ , ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στην μελετώμενη παράκτια περιοχή.

Για να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική γίνονται οι εξής παραδοχές:

- α. Τόσο η υδάτινη μάζα όσο και η ατμόσφαιρα θεωρούνται ομοιογενή μέσα διάδοσης.
- β. Στην υπό ανάλυση εικόνα πρέπει να υπάρχει σε κάποιο (έστω μικρό) τμήμα της κάλυψη με βαθιά νερά.
- γ. Επίσης, πρέπει να υπάρχει κάλυψη από στεριά (dry land) χωρίς φυτοκάλυψη ή μη βρεχόμενη από τα ύδατα.

Το βάθος της θάλασσας σε [m], σύμφωνα με την τεχνική του αλγόριθμου 4SM δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$True\_z = bias(offset) + slope \cdot computed\_z(image) \quad (\text{εξισ. 2.28})$$

όπου, ο όρος «bias» (αβεβαιότητα) στην παραπάνω εξίσωση, αφορά στο ενδεχόμενο σφάλμα-αβεβαιότητα που εμφυλοχωρείται κατά τον προσδιορισμό του μέσου βάθους κάθε pixel. Για την ελαχιστοποίηση του προαναφερόμενου πιθανού σφάλματος συνίσταται η χρήση της φασματικής ζώνης του εγγύς υπέρυθρου (NIR), για τον προσδιορισμό της «Γραμμής Εδάφους».

Αντίστοιχα, ο όρος «slope» (κλίση), αφορά στον διορθωτικό παράγοντα (correcting factor), με τον οποίο θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί το τελικό υπολογιζόμενο βάθος, καθόσον το ενεργητικό μήκος κύματος (effective wavelength) δεν είναι ακριβώς γνωστό για τις φασματικές ζώνες  $i$  και  $j$ , ώστε να δύναται να προσδιοριστεί με ακρίβεια η φασματική

διακύμανση του συντελεστή εξασθένησης  $K$  συναρτήσει του βάθους. Για αυτό τον λόγο, όλα τα υπολογιζόμενα βάθη (computed depths) πρέπει να πολλαπλασιαστούν με αυτόν τον διορθωτικό παράγοντα (slope), χωρίς ωστόσο (θεωρητικά) να προκαλείται κάποια επίπτωση, στην υπολογιζόμενη ανακλαστικότητα του θαλασσιού πυθμένα. Ο εν λόγω διορθωτικός παράγοντας δύναται να προσδιοριστεί από δεδομένα πεδίου ή από υφιστάμενους ναυτικούς χάρτες και βαθυμετρικά διαγράμματα της περιοχής ενδιαφέροντος. Η κλίση ισούται με 1 (slope=1) για την αρχική τιμή/θέση (ακτή), ( $z=0$  m (null depth = soils line)).

Τα κυριότερα προβλήματα του μοντέλου 4SM είναι ότι η ακρίβεια των εξαγόμενων βαθών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την έντονη διακύμανση των τιμών της ακτινοβολίας (radiance) γεγονός που συμβαίνει ειδικά στα ρηχά-παράκτια ύδατα.

Επίσης, τα δεδομένα ακτινοβολίας θα πρέπει να έχουν προ-επεξεργαστεί από τον πάροχό τους, προκειμένου βελτιωθεί ο λόγος σήματος/θόρυβο (S/N ratio).

Τέλος, σε ότι αφορά την εκθετική απομείωση της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του βάθους, σημειώνεται ότι όσο πιο «σκούρος» φαίνεται ο πυθμένας των ρηχών υδάτων τόσο καλύτερα φαίνεται να λειτουργεί το υπόψη μοντέλο.

## 2.2.5 Ημι-αναλυτικός Αλγόριθμος QAA

Γενικά, η ακρίβεια των ημι-αναλυτικών αλγορίθμων θεωρείται καλύτερη από εκείνη των εμπειρικών, ωστόσο η ακρίβειά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά έχουν προσδιοριστεί οι οπτικές ιδιότητες του μέσου και κατά συνέπεια οι συντελεστές οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ) και απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ) για κάθε τύπο θαλάσσιου ύδατος. Οι Lee, *et al.*, (2002) ανέπτυξαν έναν ημι-αναλυτικό αλγόριθμο (Quasi-Analytical Algorithm-QAA), με σκοπό να υπολογίσουν τους συντελεστές οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ) και απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ) από μετρήσεις της υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας ( $r_{rs}$ ), των υδάτων σε περιοχές βαθέων υδάτων.

Με το συγκεκριμένο βιο-οπτικό μοντέλο δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστούν οι οπτικές ιδιότητες ( $a(\lambda)$ ,  $b_b(\lambda)$ ) των εξεταζόμενων υδάτων μέσω παρατήρησης- μέτρησης της ακτινοβολίας ( $R_{rs}(\lambda)$ ) πάνω από την επιφάνεια της υδάτινης μάζας από την υπό ανάλυση δορυφορική εικόνα  $R_{rs}(\lambda)$ . Η ακτινοβολία που καταγράφεται από τον δέκτη πάνω από την

θαλάσσια επιφάνεια  $R_{rs}(\lambda)$  συνδέεται με την ακτινοβολία υπό την επιφάνεια της θάλασσας ( $r_{rs}(\lambda)$ ) με την ακόλουθη σχέση :

$$R_{rs} = \frac{0,52 \cdot r_{rs}}{1 - 1,7 \cdot r_{rs}} \quad (\text{εξισ. 2.29})$$

εάν η παραπάνω εξίσωση λυθεί ως προς την υπο-θαλάσσια ακτινοβολία/ανακλαστικότητα που καταγράφεται από τον δέκτη τηλεπισκόπησης προκύπτει η εξισ. 2.30:

$$r_{rs} = \frac{R_{rs}}{0,52 + 1,7 \cdot R_{rs}} \quad (\text{εξισ. 2.30})$$

Γνωρίζοντας την τιμή της υπο-θαλάσσιας ανακλαστικότητας ( $r_{rs}(\lambda)$ ) στο οποιοδήποτε μήκος κύματος  $\lambda$ , δύναται να υπολογιστεί ο λόγος  $u(\lambda)$ :

$$u(\lambda) = u = \frac{b_b}{\alpha + b_b} = \frac{-0,084 + \sqrt{(0,084)^2 + 4 \cdot 0,17 \cdot r_{rs}}}{2 \cdot 0,17} \quad (\text{εξισ. 2.31})$$

Ακολουθως, υπολογίζεται ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $b_b(\lambda)$  μέσω της εξίσωσης των Gordon and Morel (1983) και Smith and Baker (1981), ως παρακάτω:

$$\begin{aligned} b_b(\lambda) &= b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^r \\ &= b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\text{Red\_Band}) \cdot \left(\frac{\text{Red\_Band}}{\lambda}\right)^r \end{aligned} \quad (\text{εξισ. 2.32})$$

Με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων (particles)  $b_{bp}(\text{Red\_Band})$  να ισούται με :

$$b_{bp}(\text{Red\_Band}) \approx \frac{\alpha_w(\text{Red\_Band})}{0,05} \cdot R_{rs}(\text{Red\_Band}) \quad (\text{εξισ. 2.33})$$

Η ανακλαστικότητα της φασματικής ζώνης του κόκκινου ( $R_{rs}(\text{Red\_Band})$ ) μπορεί να μετρηθεί από την δορυφορική εικόνα (red band), ενώ ο συντελεστής απορρόφησης του «καθαρού νερού» δίδεται από τους πίνακες των (Pope and Fry, 1997).

Ο εκθέτης  $Y$  (ή “ $\eta$ ”) σχετίζεται με το μέγεθος και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων, με τιμές από 0 έως 3, ενώ για την περίπτωση των ρηχών υδάτων ισούται με  $Y$

=0,50 (Mishra, *et al.*, 2007), ή εναλλακτικά σύμφωνα με τους (Lee, *et al.*, 2002) υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Y = 2,2 \cdot \left( 1 - 1,2 \cdot \exp \left( -0,9 \cdot \frac{r_{rs}(440)}{r_{rs}(640)} \right) \right) \quad (\text{εξισ. 2.34})$$

Αφού υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης  $b_b(\lambda)$  από τις προαναφερόμενες εξισώσεις αντικαθίσταται στην εξίσωση του λόγου  $u(\lambda)$  και τελικά υπολογίζεται ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης  $\alpha(\lambda)$  στο υπό μελέτη μήκος κύματος  $\lambda$  μέσω της σχέσης :

$$\alpha = \frac{(1 - u) \cdot b_b}{u} \quad (\text{εξισ. 2.35})$$

Η επόμενη φάση αφορά στον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένησης διάχυσης ( $K_d$ ) με ημι-αναλυτικό τρόπο μέσω της τροποποιημένης εξίσωσης των (Sathyendranath, *et al.*, 1989):

$$\bar{K}_d = m_o \cdot \alpha + m_1 \cdot (1 - m_2 \cdot e^{-m_3 \cdot \alpha}) \cdot b_b \quad (\text{εξισ. 2.36})$$

όπου,

$$m_o \approx 1 + 0,005 \cdot \theta_s \quad (\text{εξισ. 2.37})$$

με  $\theta_s$  να αντιπροσωπεύει τη ζενιθιακή γωνία του ηλίου, και οι συντελεστές  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  να παίρνουν σταθερές τιμές σύμφωνα με τους Lee *et al.* (2004b) για οποιοδήποτε μήκος κύματος και για οποιαδήποτε κατηγορία υδάτων  $m_1=4,18$ ,  $m_2=0,52$ ,  $m_3=10,8$ .

Άρα, από τα παραπάνω συνάγεται το γεγονός ότι εάν είναι γνωστή η ανακλαστικότητα/ακτινοβολία (μέσω της εικόνας) πάνω από την υδάτινη/θαλάσσια επιφάνεια ( $R_{rs}(\lambda)$ ), μπορεί να υπολογιστεί και ο συντελεστής εξασθένησης ( $K_d$ ) λόγω της διάχυσης του ηλιακού φωτός στην υπόψη υδάτινη μάζα.

## 2.2.6 Αναλυτικός Αλγόριθμος ALBERT-MOBLEY

Οι Albert and Mobley (2003) ασχολήθηκαν με την δημιουργία ενός αναλυτικού αλγορίθμου, ο οποίος υπολογίζει την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_{rs}$ ), και την αναμενόμενη ανακλαστικότητα τηλεπισκόπησης ( $R_{rs}$ ), βασιζόμενοι σε μετρήσεις πεδίου των βιο-οπτικών χαρακτηριστικών των υδάτων της λίμνης Constance που βρίσκεται στα σύνορα

Γερμανίας-Ελβετίας με προσομοιώσεις που έκαναν με το λογισμικό HYDROLIGHT. Η παραμετροποίηση του λογισμικού HYDROLIGHT έγινε με δεδομένα των οπτικών ιδιοτήτων του νερού της λίμνης ( $a(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ ), της ζενιθιακής γωνίας του ηλίου ( $\theta_s$ ), και της γωνίας του αισθητήρα ( $\theta_v$ ). Το αποτέλεσμα των πειραμάτων ήταν η εκπόνηση ενός Αναλυτικού αλγορίθμου, για τον προσδιορισμό του σήματος τηλεπισκόπησης ( $R_{rs}$ ) με πολύ καλή ακρίβεια, καλύτερη του 4%, ενώ είναι παράλληλα εφικτός ο προσδιορισμός των συντελεστών εξασθένησης της κατερχόμενης ( $K_d$ ) και ανερχόμενης ( $K_u$ ) υποθαλάσσιας ακτινοβολίας-ηλιακού φωτός και του βάθους( $z_B$ ).

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Albert (2004), ο συντελεστής διάχυτης εξασθένησης της διαδιδόμενης προς τον πυθμένα ηλιακής ακτινοβολίας (Downward Diffuse Attenuation Coefficient- $K_d$ ), δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$K_d = k_o \cdot \frac{\alpha + b_b}{\cos \theta_s} \quad (\text{εξισ. 2.38})$$

όπου,  $k_o = 1,0546 \pm 0,0001$ .

Αντίστοιχα, ο συντελεστής διάχυτης εξασθένησης για την ανερχόμενη, ήτοι προς την επιφάνεια της θάλασσας ηλιακή ακτινοβολία (Upward Diffuse Attenuation Coefficient -  $K_u$ ), αντιπροσωπεύει την εξασθένηση στα φωτόνια που σκεδάζονται στην στήλη ύδατος και την εξασθένηση αυτών λόγω της ανάκλασης των από τον θαλάσσιο πυθμένα :

$$K_u = (\alpha + b_b) \cdot (1 + \omega_b)^{k_1} \cdot \left(1 + k_2 \cdot \frac{1}{\cos \theta_s}\right) \quad (\text{εξισ. 2.39})$$

και

$$\omega_b = \frac{b_b}{\alpha + b_b} \quad (\text{εξισ. 2.40})$$

Εάν όπου,

$K_{u,w}$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης της ανερχόμενης ακτινοβολίας που οφείλεται στην στήλη ύδατος και

$K_{u,b}$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης της ανερχόμενης ακτινοβολίας που οφείλεται στο θαλάσσιο πυθμένα.

$k_{1,w}$  &  $k_{2,w}$  είναι οι συντελεστές εξασθένησης των φωτονίων στην στήλη ύδατος.

$k_{1,b}$  &  $k_{2,b}$  είναι οι συντελεστές εξασθένησης των φωτονίων που οφείλεται στην ποιότητα του θαλάσσιου πυθμένα, τότε:

$$K_u = (\alpha + b_b) \cdot (1 + \omega_b)^{k_{1,w}} \cdot \left(1 + k_{2,w} \cdot \frac{1}{\cos \theta_s}\right) + (\alpha + b_b) \cdot (1 + \omega_b)^{k_{1,b}} \cdot \left(1 + k_{2,b} \cdot \frac{1}{\cos \theta_s}\right) \quad (\text{εξισ. 2.41})$$

Και αντικαθιστώντας τον λόγο  $\omega_b$  του συντελεστή οπισθοσκέδασης προς το άθροισμα του συντελεστή οπισθοσκέδασης και του συντελεστού απορρόφησης με το ισοδύναμό του η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται στην :

$$K_u = (\alpha + b_b) \cdot \left(1 + \frac{b_b}{\alpha + b_b}\right)^{k_{1,w}} \cdot \left(1 + k_{2,w} \cdot \frac{1}{\cos \theta_s}\right) + (\alpha + b_b) \cdot \left(1 + \frac{b_b}{\alpha + b_b}\right)^{k_{1,b}} \cdot \left(1 + k_{2,b} \cdot \frac{1}{\cos \theta_s}\right) \quad (\text{εξισ. 2.42})$$

Η ανακλαστικότητα των ρηχών/παράκτιων υδάτων (shallow waters- $R_{rs}$ ), ως αυτή καταγράφεται στον αισθητήρα τηλεπισκόπησης δίνεται συναρτήσει και της υποθαλάσσιας γωνίας θέασης ( $\theta_s$ ) από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned}
R_{rs} = R_{rs,\infty} \cdot & \left[ 1 - A_{rs,1} \right. \\
& \cdot \exp \left\{ - \left( k_o \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_s} \right) \right. \\
& \left. + \left( \left( 1 + \frac{b_b}{\alpha + b_b} \right)^{k_{rs,1,w}} \cdot \left( 1 + \frac{k_{rs,2,w}}{\cos \theta_s} \right) \right) \right. \\
& \left. \cdot \left( \frac{\alpha + b_b}{\cos \theta_v} \right) \cdot z_B \right\} + A_{rs,2} \cdot \left( \frac{R_B}{\pi} \right) \\
& \cdot \exp \left\{ - \left( k_o \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_s} \right) \right. \\
& \left. + \left( \left( 1 + \frac{b_b}{\alpha + b_b} \right)^{k_{rs,1,B}} \cdot \left( 1 + \frac{k_{rs,2,B}}{\cos \theta_s} \right) \right) \right. \\
& \left. \cdot \left( \frac{\alpha + b_b}{\cos \theta_v} \right) \cdot z_B \right\}
\end{aligned} \tag{εξισ. 2.43}$$

με

$\theta_s$ , να αντιπροσωπεύει την υποθαλάσσια ζενιθιακή γωνία του ηλίου (sub-surface solar zenith angle), [°].

$\theta_v$ , να αντιπροσωπεύει την υποθαλάσσια γωνία θέασης του δέκτη (sub-surface viewing angle), [°].

$R_B$ , να αντιπροσωπεύει την ανακλαστικότητα (reflectance) του ιζήματος του θαλασσίου πυθμένα (seabed albedo).

Οι συντελεστές  $A_{rs,1}$ ,  $k_{rs,1,w}$ ,  $k_{rs,2,w}$ ,  $A_{rs,2}$ ,  $k_{rs,1,B}$ ,  $k_{rs,2,B}$ , σύμφωνα με τον Albert (2004), για τη περίπτωση των ρηχών-παράκτιων υδάτων (case-2 waters) παίρνουν τις τιμές του Πίνακα 2.2 και προκύπτουν ύστερα από ανάλυση στατιστικών συσχετίσεων (regression analysis).

**Πίνακας 2.2:** Συντελεστές Εξίσωσης  $R_{rs}$  ( $\lambda$ ) (Albert and Mobley, 2003)

| Coefficient  | Value $\pm$ Mean Relative Error |
|--------------|---------------------------------|
| $A_{rs,1}$   | 1,1576 $\pm$ 0,0014             |
| $k_{rs,1,w}$ | 3,5421 $\pm$ 0,0152             |
| $k_{rs,2,w}$ | -0,2786 $\pm$ 0,0030            |
| $A_{rs,2}$   | 1,0389 $\pm$ 0,0004             |
| $k_{rs,1,B}$ | 2,2658 $\pm$ 0,0076             |
| $k_{rs,2,B}$ | 0,0577 $\pm$ 0,0009             |

Επίσης, η ανακλαστικότητα των υδάτων που καταγράφεται από έναν αισθητήρα τηλεπισκόπησης από μία περιοχή βαθέων υδάτων (reflectance of deep water- $R_{rs,\infty}$ ) είναι συνάρτηση ( $f^{\wedge}$ ) των εξής παραμέτρων :

- Της ταχύτητας του ανέμου ( $u$ ), η οποία ευθύνεται για την ανομοιομορφία της ελεύθερης επιφάνειας του υδάτινου μέσου (roughness),
- Της υποθαλάσσιας ζενιθιακής γωνίας ( $\theta_s$ ), με την οποία η ηλιακή ακτινοβολία διαδίδεται προς το εσωτερικό ( $z > z=0$ ), της στήλης του ύδατος, δηλαδή προς τα μεγαλύτερα βάθη, και
- Των οπτικών ιδιοτήτων του νερού, οι οποίες αντιπροσωπεύονται μέσω των συντελεστών απορρόφησης ( $a$ ) και οπισθοσκέδασης ( $b_b$ ) ή του λόγου του συντελεστή απορρόφησης προς το άθροισμα των δύο συντελεστών ( $\omega_b$ ).

Η ακτινοβολία/ανακλαστικότητα που καταγράφεται από τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης στα βαθιά ύδατα δίδεται από την εξισ. 2.44 :



$$\begin{aligned}
R_{rs,\infty} &= f \uparrow (\omega_b, \theta_s, u, \theta_v) \cdot \omega_b = f \uparrow (\omega_b) \cdot f \\
&\quad \uparrow (\theta_s) \cdot f \uparrow (u) \cdot f \\
&\quad \uparrow (\theta_v) \cdot \omega_b \Leftrightarrow R_{rs,\infty} \\
&= p_{rs,1} \\
&\quad \cdot (1 + p_{rs,2} \cdot \omega_b + p_{rs,3} \cdot \omega_b^2 + p_{rs,4} \quad (\text{εξισ. 2.44}) \\
&\quad \cdot \omega_b^3) \cdot \left(1 + p_{rs,5} \cdot \frac{1}{\cos \theta_s}\right) \\
&\quad \cdot (1 + p_{rs,6} \cdot u) \cdot \left(1 + p_{rs,7} \cdot \frac{1}{\cos \theta_v}\right) \\
&\quad \cdot \omega_b
\end{aligned}$$

Ο όρος  $u$  αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (surface wind speed, (m/sec)).

Οι συντελεστές  $p_{rs,1}$ ,  $p_{rs,2}$ ,  $p_{rs,3}$ ,  $p_{rs,4}$ ,  $p_{rs,5}$ ,  $p_{rs,6}$ ,  $p_{rs,7}$ , σύμφωνα με τον Albert, (2004) παίρνουν τις τιμές του παρακάτω Πίνακα 2.3.

**Πίνακας 2.3:** Συντελεστές της Εξίσωσης  $R_{rs}$  ( $\lambda$ ), (Albert and Mobley, 2003).

| Coefficient                 | Value $\pm$ Mean Relative Error |
|-----------------------------|---------------------------------|
| $p_{rs,1} (sr^{-1})$        | 0,0512 $\pm$ 0,0001             |
| $p_{rs,2} (sr^{-1})$        | 4,6659 $\pm$ 0,0174             |
| $p_{rs,3} (sr^{-1})$        | -7,8387 $\pm$ 0,0434            |
| $p_{rs,4} (sr^{-1})$        | 5,4571 $\pm$ 0,0345             |
| $p_{rs,5} (sr^{-1})$        | 0,1098 $\pm$ 0,0018             |
| $p_{rs,6} (s \cdot m^{-1})$ | -0,0044 $\pm$ 0,0000            |
| $p_{rs,7} (sr^{-1})$        | 0,4021 $\pm$ 0,0020             |

Εάν λυθεί η εξίσωση της ανακλαστικότητας που καταγράφεται από τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης στα ρηχά ύδατα (εξισ. 2.43) ως προς το βάθος ( $z_B$ ) τότε έχουμε την ακόλουθη εξίσωση με την οποία υπολογίζεται το βάθος του υδάτινου πυθμένα με αναλυτικό τρόπο :

$$z_B = \frac{1}{K_d \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \theta_v}\right)} \cdot \ln \left( \frac{A_{rs,1} \cdot R_{rs,\infty} - A_{rs,2} \cdot \frac{R_B}{\pi}}{R_{rs,\infty} - R_{rs}} \right) \quad (\text{εξισ. 2.45})$$

Συνήθως, για λόγους απλοποίησης, θεωρείται ότι ο συντελεστής εξασθένησης της κατερχόμενης ακτινοβολίας ( $K_d$ ) είναι ίσος με τον συντελεστή της ανερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ( $K_u$ ), ήτοι  $K_d = K_u = K_{u,W} + K_{u,B}$ . Η υπόψη θεώρηση έχει ως συνέπεια μία υποεκτίμηση (underestimation) στον υπολογισμό των ανακλαστικότητων, άρα και του υπολογισμού και του βάθους κατά 15% (Maritorena *et al.*, 1994). Σημαντική ωστόσο παράμετρος, για τον υπολογισμό του βάθους του πυθμένα ( $z_B$ ) είναι η γνώση της ανακλαστικότητας του πυθμένα ( $R_B$ ) ή του συντελεστή λευκαύγειας αυτού σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας, δηλαδή ένα δεδομένο το οποίο απαιτεί εκτέλεση επίπονων και κοστοβόρων εργασιών πεδίου.

## 2.2.7 Ημι-αναλυτικός Αλγόριθμος SAMBUCA

Οι Wettle and Brando (2006), επινόησαν έναν ημι-αναλυτικό μοντέλο, το οποίο όπως και ο QAA, βασίζεται στην φυσική της διάδοσης του φωτός στο νερό (Radiative Transfer Method). Η αναλυτική μορφή του υπόψη αλγορίθμου τον καθιστά «σχετικά γρήγορο» στις επιλύσεις του, ειδικά στις περιπτώσεις ανάλυσης των υπερφασματικών παθητικών τηλεσκοπικών δεδομένων. Ο ημι-αναλυτικός αλγόριθμος SAMBUCA, δίνει την δυνατότητα στον αναλυτή να το χρησιμοποιήσει σε διαφορετικές γεωγραφικά περιοχές, διαφορετικές χρονικές περιόδους και σε ύδατα με ποικίλη φυσική και γεωλογική σύσταση πυθμένα. Σημαντικό είναι δε το γεγονός, ότι ο αλγόριθμος SAMBUCA έχει το πλεονέκτημα να εκτελεί και ταξινόμηση του ιζήματος του πυθμένα σε διάσταση υποπολλαπλάσια (un-mixing) της διάστασης του εικονοστοιχείου (pixel) της υπό ανάλυσης δορυφορικής εικόνας.

Ο εν λόγω αλγόριθμος, ουσιαστικά εκφράζει την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_{rs}$ ), ως συνάρτηση των φυσικών παραμέτρων-ιδιοτήτων του ύδατος. Η εν λόγω παραμετροποιημένη (modelled) υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_{rs}^{mod}$ ), συγκρίνεται με την αντίστοιχη που καταγράφεται/μετριέται (measured) από τον αισθητήρα τηλεπισκόπησης

$(r_{rs}^{msr})$ . Οι μεταβλητές-παράμετροι που ελαχιστοποιούν την διαφορά μεταξύ των  $(r_{rs}^{mod})$  και  $(r_{rs}^{msr})$ , χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης (optimization) του μοντέλου, προκειμένου προσδιοριστούν οι φυσικές/οπτικές ιδιότητες του ύδατος που μελετάται. Πιο αναλυτικά, ο αλγόριθμος θεωρεί ότι η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_{rs}^{mod}$ ) συνίσταται από δύο (2) μέρη (εξισ. 2.46), από την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα που προέρχεται από τον πυθμένα  $(r_{rs}^b)$  (Bottom) και από την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα που προέρχεται από την υδάτινη μάζα  $(r_{rs}^w)$  (water column) :

$$r_{rs}^{mod} = r_{rs}^w + r_{rs}^b \quad (\text{εξισ. 2.46})$$

Η αναλυτική έκφραση της παραπάνω εξίσωσης είναι η ακόλουθη :

$$r_{rs}^{mod} = r_{rs}^{dw} \cdot (1 - e)^{-\left(\frac{1}{\cos\theta_{subsun}} + \frac{D_{uw}}{\cos\theta_{subview}}\right) \cdot k \cdot H} + \frac{1}{\pi} \cdot \rho(\lambda) \cdot e^{-\left(\frac{1}{\cos\theta_{subsun}} + \frac{D_{ub}}{\cos\theta_{subview}}\right) \cdot k \cdot H} \quad (\text{εξισ. 2.47})$$

Οι δύο όροι της παραπάνω εξίσωσης αντιπροσωπεύουν ο πρώτος (εξισ. 2.48) την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα που προέρχεται από την υδάτινη μάζα  $(r_{rs}^w)$  και ο δεύτερος (εξισ. 2.49) την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα που προέρχεται από τον πυθμένα  $(r_{rs}^b)$  (Bottom) και ισούνται αντίστοιχα με :

$$r_{rs}^w = r_{rs}^{dw} \cdot (1 - e)^{-\left(\frac{1}{\cos\theta_{subsun}} + \frac{D_{uw}}{\cos\theta_{subview}}\right) \cdot k \cdot H} \quad (\text{εξισ. 2.48})$$

$$r_{rs}^b = \frac{1}{\pi} \cdot \rho(\lambda) \cdot e^{-\left(\frac{1}{\cos\theta_{subsun}} + \frac{D_{ub}}{\cos\theta_{subview}}\right) \cdot k \cdot H} \quad (\text{εξισ. 2.49})$$

όπου,

$r_{rs}^{dw}$  είναι η ανακλαστικότητα που καταγράφεται στον αισθητήρα τηλεπισκόπησης (Remote Sensing Reflectance), από τις περιοχές των βαθέων υδάτων (deep waters),

$D_{uw}$  και  $D_{ub}$  είναι οι παράμετροι οπτικής επιμήκυνσης (optical elongation factors) για τις ακτινοβολίες (ηλιακό φως) που προέρχεται από την θαλάσσια μάζα και τον πυθμένα αντίστοιχα,

$\cos\theta_{subsun}$ , αντιπροσωπεύει την υποθαλάσσια ζενιθιακή γωνία του ηλίου, και

$\cos\theta_{subview}$ , εκπροσωπεί την υποθαλάσσια γωνία θέασης για τον αισθητήρα,

$\rho$ , είναι η προσπίπτουσα στον πυθμένα ακτινοβολία (irradiance reflectance),

$k$ , είναι ο συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας, ο οποίος θεωρείται ότι ισοδυναμεί με την ακόλουθη αναλυτική έκφραση:

$$k = \alpha + b_b \quad (\text{εξισ. 2.50})$$

Σύμφωνα με τους Lee, *et al.* (1999), η ακτινοβολία που προέρχεται από τα βαθιά νερά, την οποία παρατηρεί ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης (Remote Sensing Reflectance) στο επίπεδο TOA ισούται με:

$$r_{rs}^{dw} = (0,084 + 0,17 \cdot u) \cdot u \quad (\text{εξισ. 2.51})$$

Οι οπτικοί συντελεστές επιμήκυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας ισούνται αντίστοιχα με :

$$D_{uw} = 1,03 \cdot (1 + 2,4 \cdot u)^{0,5} \quad (\text{εξισ. 2.52})$$

και

$$D_{ub} = 1,04 \cdot (1 + 5,4 \cdot u)^{0,5} \quad (\text{εξισ. 2.53})$$

όπου,

$$u = \frac{b_b}{(\alpha + b_b)} \quad (\text{εξισ. 2.54})$$

Εντέλει, οι εγγενείς οπτικά ιδιότητες του νερού (IOPs), ήτοι ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης ( $\alpha(\lambda)$ ) και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ), ορίζονται όπως και στην περίπτωση του QAA ως ακολούθως :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_w(\lambda) + \alpha_\phi(\lambda) + \alpha_g(\lambda) \quad (\text{εξισ. 2.55})$$

και

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (\text{εξισ. 2.56})$$

Δηλαδή, ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης (total absorption coefficient  $a(\lambda)$ ), της ηλιακής ακτινοβολίας στο νερό ισούται με το άθροισμα του συντελεστή απορρόφησης του καθαρού νερού ( $a_w$ ), του συντελεστή απορρόφησης λόγω του φυτοπλαγκτόν ( $a_\phi$ ), και του συντελεστή απορρόφησης της αιωρούμενης στο νερό οργανικής ύλης (CDOM/gelbstoff- ( $a_g$ )).

Αντίστοιχα, ο συνολικός συντελεστής (βαθμός/ποσοστό) οπισθοσκέδασης ( $b_b$ ) - total backscattering coefficient) ισοδυναμεί με το άθροισμα του συντελεστή οπισθοσκέδασης του καθαρού νερού ( $b_{bw}$ ) και του συντελεστή οπισθοσκέδασης που οφείλεται στα μη διαλυμένα αιωρούμενα σωματίδια ( $b_{bp}$  - suspended particles).

Άρα συνοψίζοντας, διαπιστώνεται από τις προαναφερθείσες εξισώσεις, ότι για συγκεκριμένες γωνίες θέασης του αισθητήρα και θέσης του ηλίου, η υπολογιζόμενη, από τον αλγόριθμο SAMBUCA, υποθαλάσσια ανακλαστικότητα (modeled subsurface remote sensing reflectance) εκφράζεται ως μία συνάρτηση του συνολικού συντελεστή απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ), του συνολικού συντελεστή οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ), της λευκαύγειας (φασματικής υπογραφής) του θαλασσίου πυθμένα ( $\rho(\lambda)$ ), και του βάθους ( $H$ ), ήτοι :

$$r_{rs}^{mod} = f(a(\lambda), b_b(\lambda), \rho(\lambda), H) \quad (\text{εξισ. 2.57})$$

Η διαφορά του αλγόριθμου SAMBUCA από τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο QAA, διαπιστώνεται στον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ). Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του αλγορίθμου QAA, ο  $a(\lambda)$  δεν λαμβάνει «σαφώς» υπόψη την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας που οφείλεται στα διαλυμένα οργανικά συστατικά του νερού (Coloured Dissolved Organic Matter-CDOM ή gelbstoff). Υπενθυμίζεται, ότι η διαλυμένη οργανική ύλη μέσα στο νερό (CDOM) απορροφά περισσότερο την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (π.χ. ultraviolet μέχρι blue light), ενώ το «καθαρό νερό» απορροφά κυρίως την ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος (π.χ. red, IR light, κλπ). Για το λόγο αυτό, το μη τυρβώδες και λιγότερο θολό νερό (non-turbid) με χαμηλή περιεκτικότητα σε CDOM, εμφανίζεται με την απόχρωση του «μπλε», ενώ όσο αυξάνει η συγκέντρωση του νερού σε οργανική ύλη, το νερό φαίνεται σταδιακά με τις αποχρώσεις του «πράσινου», «κίτρινου-πράσινου» και «καφέ» χρώματος. Η μείωση της διαθεσιμότητας του ηλιακού φωτός στο νερό, λόγω της απορρόφησης του από την διαλυμένη σε αυτό οργανική ύλη

CDOM, έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της φωτοσύνθεσης και κατά συνέπεια την αναστολή της ανάπτυξης των πληθυσμών του φυτοπλαγκτόν, το οποίο αποτελεί την βάση της τροφικής αλυσίδας των υδάτινων έμβιων οργανισμών. Ταυτόχρονα, το φυτοπλαγκτόν με την διεργασία της φωτοσύνθεσης που επιτελεί, δεσμεύει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και απελευθερώνει οξυγόνο στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να θεωρείται ως μία από τις σημαντικότερες πηγές οξυγόνου του πλανήτη μας.

Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με το μοντέλο SAMBUCA ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_w + \alpha_{ph} + \alpha_{CDOM} + \alpha_{TR} \quad (\text{εξισ. 2.58})$$

όπου,  $\alpha_w$ , είναι ο συντελεστής απορρόφησης λόγω των μορίων του «καθαρού νερού»,  $\alpha_{CDOM}$ , είναι ο συντελεστής απορρόφησης λόγω της διαλυμένης στο νερό οργανικής ύλης (CDOM) και  $\alpha_{TR}$ , είναι ο συντελεστής απορρόφησης λόγω των αιωρούμενων μη-οργανικών υπολειμμάτων (σωματίδια από πετρώματα/ορυκτά/έδαφος ή άλλα ανθρωπογενή βιομηχανικά υπολείμματα) του νερού (Tripton).

Τιμές για τον συντελεστή απορρόφησης του «καθαρού νερού» ( $\alpha_w(\lambda)$ ), δύνανται να ληφθούν από τους Pope and Fry, (1997), [Table 3, p. 8718].

Η εξασθένηση (απορρόφηση- $\alpha$ ) του ηλιακού φωτός στο νερό που συμβαίνει λόγω της ύπαρξης του φυτοπλαγκτόν, δίνεται από την παρακάτω σχέση σύμφωνα με τον αλγόριθμο SAMBUCA:

$$\alpha_{ph} = C_{chl} \cdot \alpha_{ph}^* \quad (\text{εξισ. 2.59})$$

όπου,

$C_{chl}$  είναι η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στο νερό, ενώ ο συντελεστής

$\alpha_{ph}^*$ , αντιπροσωπεύει την «ειδική απορρόφηση» του φυτοπλαγκτόν (specific absorption of phytoplankton).

Ο «συντελεστής ειδικής απορρόφησης» του φυτοπλαγκτόν  $\alpha_{ph}^*(\lambda)$  αντιπροσωπεύει την απορρόφηση που συμβαίνει (αποκλειστικά) λόγω των χρωστικών ουσιών του φυτοπλαγκτόν,

εφόσον αυτή προηγουμένως «κανονικοποιηθεί» (normalized) ως προς τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης (ήτοι,  $\alpha_{ph}^* = \alpha_{ph} / C_{chl}$ ).

Σημειώνεται, ότι η χλωροφύλλη-α αποτελεί ένα βασικό δείκτη μέτρησης της αφθονίας της βιομάζας του φυτοπλαγκτόν στις υδάτινες περιοχές. Η φασματική απόκριση (απόχρωση της χρωστικής της ουσίας) της χλωροφύλλης μετράται από τους αισθητήρες τηλεπισκόπησης και είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες προσδιορισμού των οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων. Ωστόσο, τόσο η χλωροφύλλη όσο και το CDOM απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία στις ίδιες φασματικές ζώνες, οπότε είναι δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ του βαθμού απορρόφησης της χλωροφύλλης και του ποσοστού απορρόφησης λόγω του CDOM. Ο  $\alpha_{ph}^*(\lambda)$  είναι μία παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος της απορρόφησης του ηλιακού φωτός αποκλειστικά από το φυτοπλαγκτόν. Επίσης, η εν λόγω παράμετρος προσδιορίζει την ποσότητα του φωτός που απαιτείται για την υλοποίηση της διεργασίας της φωτοσύνθεσης όποτε συνδέεται με την πρωταρχική παραγωγή της πυραμίδας της τροφικής αλυσίδας στους ωκεανούς. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου SAMBUCA έναντι του QAA, είναι η δυνατότητα άμεσου προσδιορισμού (αποκλειστικά) της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης. Τιμές για τον συντελεστή ειδικής απορρόφησης του φυτοπλαγκτόν  $\alpha_{ph}^*(\lambda)$  δύνανται να ληφθούν από την έρευνα των Suzuki *et al.*, (1998) (Fig. 4, p. 523).

Η εξασθένηση (απορρόφηση) λόγω της διαλυμένης στο νερό οργανικής ύλης (CDOM/gilvin), και των αιωρούμενων υπολειμμάτων/σωματιδίων (μη-διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης στο νερό) του νερού (Tripton), δηλαδή η απορρόφηση που δεν οφείλεται στο «καθαρό νερό» ή/και στο φυτοπλαγκτόν, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\alpha_{CDOM}(\lambda) = C_{CDOM} \cdot \alpha_{CDOM}^*(\lambda_0)^{(-S_{CDOM}(\lambda-\lambda_0))} \quad (\text{εξισ. 2.60})$$

όπου,

$C_{CDOM}$ , είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης στο νερό οργανικής ύλης (CDOM), όταν ο συντελεστής ειδικής απορρόφησης του φυτοπλαγκτόν  $\alpha_{ph}^*(\lambda_0) = 1$ .

$S_{CDOM}$  αντιπροσωπεύει την κλίση (slope) της καμπύλης απορρόφησης CDOM, δηλαδή σχετίζεται με το σχήμα της καμπύλης εκθετικής εξασθένησης του ηλιακού φωτός μέσα στο νερό, λόγω της απορρόφησης από την περιέχουσα σε αυτό οργανική ύλη.

Οι τιμές της  $S_C$  προσδιορίζονται μέσω δειγματοληψιών πεδίου, οι οποίες αναλύονται σε κατάλληλα εργαστήρια και αποτελούν παραμέτρους που σχετίζονται με τα τοπικά φυσικά (οπτικές ιδιότητες) χαρακτηριστικά τις εκάστοτε υδάτινης περιοχής (Carder, *et al.*, 1991).

Η απορρόφηση που συμβαίνει στο ηλιακό φως, λόγω των περιεχομένων στο νερό αιωρούμενων υπολειμμάτων/σωματιδίων (μη-διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης στο νερό) του νερού (Tripton), κατά αντιστοιχία, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\alpha_{TR}(\lambda) = C_{TR} \cdot \alpha_{TR}^*(\lambda_o)^{(-S_{TR}(\lambda-\lambda_o))} \quad (\text{εξισ. 2.61})$$

όπου,  $C_{TR}$ , είναι η συγκέντρωση της μη-διαλυμένης στο νερό οργανικής και ανόργανης ύλης (Tripton). Τόσο ο συντελεστής ειδικής απορρόφησης των αιωρούμενων υπολειμμάτων/σωματιδίων (μη διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης στο νερό) στο νερού (Tripton), όσο και η τιμή της κλίσης της καμπύλης απορρόφησης  $S_{TR}$ , αποτελούν παραμέτρους που σχετίζονται με τα τοπικά φυσικά και οπτικά χαρακτηριστικά της προς μελέτης υδάτινης περιοχής. Συνήθως, οι τιμές της κλίσης της καμπύλης απορρόφησης κυμαίνονται από 0,010 – 0,020 nm<sup>-1</sup> (Lee, *et al.*, 2002), [p. 5761], (Bricaud, *et al.*, 1981), [p. 51].

Στην περίπτωση του αλγορίθμου SAMBUCA, ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ), θεωρείται ότι συνίσταται από τρία (3) μέρη (εξισ. 2.62):

- Την οπισθοσκέδαση που οφείλεται στα μόρια του «καθαρού» νερού ( $b_{bw}(\lambda)$ ),
- Την οπισθοσκέδαση λόγω των σωματιδίων του φυτοπλαγκτόν ( $b_{bph}(\lambda)$ ) και
- Την οπισθοσκέδαση που δημιουργείται από τη μη διαλυμένη οργανική ή άλλη ύλη (Tripton), ( $b_{bTR}(\lambda)$ ) στο νερό.

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bph}(\lambda) + b_{bTR}(\lambda) \quad (\text{εξισ. 2.62})$$

όπου, η τιμή για τον συντελεστή οπισθοσκέδασης ( $b_{bw}(\lambda)$ ) για το «καθαρό» θαλάσσιο ύδωρ, στα διάφορα μήκη κύματος, δίδεται από τον Morel (1974), [Table 4., p. 17].



Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων/οργανισμών από το φυτοπλαγκτόν ( $b_{bph}(\lambda)$ ), δίνεται από την εξισ. 2.63:

$$b_{bph}(\lambda) = C_{ph} \cdot X_{ph} \cdot \left( \frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^Y \quad (\text{εξισ. 2.63})$$

όπου,  $C_{ph}$  είναι η συγκέντρωση (περιεκτικότητα) του φυτοπλαγκτόν στο νερό, ενώ η παράμετρος  $Y$  αντιπροσωπεύει της κλίση της φασματικής καμπύλης της οπισθοσκέδασης του φυτοπλαγκτόν (Bricaud *et al.*, 1981), [p. 20.602].

Αντίστοιχα, ο συντελεστής οπισθοσκέδασης λόγω της μη διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης, εκφράζεται από την σχέση :

$$b_{bTR}(\lambda) = C_{TR} \cdot X_{TR} \cdot \left( \frac{\lambda_o}{\lambda} \right)^Y \quad (\text{εξισ. 2.64})$$

όπου, με το  $C_{TR}$  να αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση (περιεκτικότητα) της μη διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης στο νερό, ενώ η παράμετρος  $Y$  αντιπροσωπεύει αντίστοιχα την κλίση της φασματικής καμπύλης της οπισθοσκέδασης που συμβαίνει στο υδάτινο μέσο διάδοσης του φωτός, λόγω της μη διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης σε αυτό.

Η παράμετρος  $X$ , η οποία χρησιμοποιείται στον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο QAA είναι μία μεταβλητή, που συνδυάζει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων στο νερό ( $b'_{pp}$ ) (Lee, *et al.*, 1998a), [Equation (19), p. 3834], την γωνία θέασης και την κατάσταση θαλάσσης. Η υπόψη παράμετρος ( $X$ ) του υπόψη ημι-αναλυτικού αλγορίθμου συσχετίζεται με τις αντίστοιχες ( $X_{ph}$ ) και ( $X_{TR}$ ) με την ακόλουθη σχέση :

$$X = C_{TR} \cdot X_{TR} + C_{ph} \cdot X_{ph} \quad (\text{εξισ. 2.65})$$

Μία άλλη διαφορά μεταξύ των ημι-αναλυτικών αλγορίθμων QAA και SAMBUCA είναι ότι στον πρώτο (QAA) μόνο μία τιμή της λευκαύγειας του ιζήματος πυθμένα προσδίδεται σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας, ενώ στην περίπτωση του δευτέρου (SAMBUCA), δύναται να δοθούν μέχρι  $n=3$  διαφορετικοί τύποι ιζήματος ανά pixel, γεγονός που τον κάνει πιο αποδοτικό, ειδικά στην περίπτωση των έντονα ετερογενών ιζημάτων πυθμένων, όπως είναι π.χ. η ταξινόμηση ιζημάτων θαλασσίου πυθμένα που συνίσταται από κοραλλιογενής

πληθυσμούς (Wettle and Brando, 2006). Πιο αναλυτικά, με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο SAMBUCA, η λευκαύγεια ( $\rho(\lambda)$ ) του πυθμένα παραμετροποιείται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\rho(\lambda) = q_1 \cdot \rho_1 + q_2 \cdot \rho_2 + \dots + q_n \cdot \rho_n \quad (\text{εξισ. 2.66})$$

όπου,  $q_i$  είναι το ποσοστό συμμετοχής κάθε διαφορετικού ιζήματος, μέσα σε κάθε pixel της δορυφορικής εικόνας. Οπότε, για παράδειγμα εάν έχουμε την περίπτωση δύο (2) διαφορετικών ιζημάτων ανά πυθμένα, τότε η προαναφερόμενη εξίσωση μετασχηματίζεται ως ακολούθως :

$$\rho(\lambda) = q_{1,2} \cdot \rho_1 + (1 - q_{1,2}) \cdot \rho_2 \quad (\text{εξισ. 2.67})$$

όπου  $q_{1,2}$  είναι το ποσοστό συμμετοχής κάθε διαφορετικού ιζήματος, μέσα σε κάθε pixel της δορυφορικής εικόνας (δηλαδή,  $q_1 + q_2 = 1$ ).

Τελικώς, η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα, έτσι όπως διατυπώθηκε με την γενική της μορφή μέσω της ακόλουθης εξισώσεως :

$$r_{rs}^{\text{mod}} = f(\alpha(\lambda), b(\lambda), \rho(\lambda), H) \quad (\text{εξισ. 2.68})$$

Για συγκεκριμένες γωνίες θέασης ( $\cos \theta_{\text{subview}}$ ) του αισθητήρα τηλεπισκόπησης και θέσης ( $\cos \theta_{\text{subsun}}$ ) της φωτεινής πηγής (ηλίου), η εξισ. 2.68 μετασχηματίζεται σε μία συνάρτηση των παρακάτω παραμέτρων :

$$r_{rs}^{\text{mod}} = f(C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, X_{chl}, X_{TR}, \rho_1, \rho_2, q_{1,2}, H, S_{CDOM}, S_{TR}, \alpha_{TR}^*(\lambda_0), \alpha_{ph}^*, Y) \quad (\text{εξισ. 2.69})$$

Στην εξισ. 2.69, οι παράμετροι  $S_{CDOM}, S_{TR}, \alpha_{TR}^*, \alpha_{ph}^*$ , and  $Y$ , οι οποίες σημειωτέων καλούνται και «ειδικές εγγενείς οπτικές ιδιότητες» του νερού (Specific Inherent Optical Properties-SIOPs), προσδιορίζονται μέσω μετρήσεων πεδίου και αναλύονται σε κατάλληλα για τον σκοπό αυτό εργαστήρια. Στην περίπτωση που διατίθενται και οι πληροφορίες της φασματικής υπογραφής (λευκαύγειας) του υδάτινου πυθμένα ( $\rho_1, \rho_2$ ), τότε η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται σε μία συνάρτηση των  $C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, q_{1,2}, H$  ως εξής:

$$r_{rs}^{mod} = f(C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, q_{1,2}, H) \quad (\text{εξισ. 2.70})$$

Η εξισ. 2.70 δεικνύει ότι η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα (sub-surface remote sensing reflectance -  $r_{rs}^{mod}(\lambda)$ ), που υπολογίζεται μέσω του ημι-αναλυτικού αλγορίθμου εξαγωγής βαθυμετρίας SAMBUCA, είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του φυτοπλαγκτόν στο νερό, της συγκέντρωσης της διαλυμένης οργανικής ύλης, της μη διαλυμένης και λοιπής ύλης, της ποσοστιαίας αναλογίας των ιζημάτων ανά pixel εικόνας, και του βάθους της υδάτινης περιοχής, δηλαδή είναι συνάρτηση των κυρότερων περιβαλλοντικών παραμέτρων της υπό μελέτης περιοχής.

Στις περιπτώσεις εφαρμογής ημι-αναλυτικών αλγορίθμων σε τηλεσκοπικά δεδομένα για εξαγωγή της βαθυμετρίας ή άλλων φυσικών ή οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων, απαιτείται η τήρηση μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης και βαθμονόμησης των μοντέλων (optimization technique). Σύμφωνα με αυτήν, υπολογίζονται μέσω των ημι-αναλυτικών αλγορίθμων οι τιμές των φυσικών ή οπτικών παραμέτρων του ύδατος, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές πεδίου. Στην συνέχεια, προσδιορίζονται οι διαφορές μεταξύ των τιμών που υπολογίζει ο αλγόριθμος και των αντίστοιχων τιμών πεδίου. Ακολούθως, ρυθμίζονται οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν μέσω του αλγορίθμου ( $C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, q_{1,2}, H$ ), έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ των υπολογιζόμενων τιμών και των μετρήσεων του πεδίου να ελαχιστοποιείται. Μόλις ελαχιστοποιείται το σφάλμα μεταξύ των υπολογιζόμενων από το εκάστοτε μοντέλο τιμών βάθους (optimization) και των δεδομένων πεδίου, τότε επί της ουσίας βελτιστοποιείται το μοντέλο. Το μοντέλο SAMBUCA χρησιμοποιεί σχετικά απλούς αλγόριθμους για την πραγματοποίηση της «διαδικασίας βελτιστοποίησης», όπως είναι για παράδειγμα ο αλγόριθμος «Amoeba» (Press *et al.*, 2003).

Προκειμένου επιλυθεί η εξισ. 2.70, με την οποία υπολογίζονται οι τιμές της υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας για συγκεκριμένες γωνίες θέασης του αισθητήρα τηλεπισκόπησης και θέσης του ηλίου, απαιτείται η γνώση δεκατεσσάρων (14) παραμέτρων (εξισ. 2.71) :

$$r_{rs}^{mod} = f(C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, X_{chl}, X_{TR}, \rho_1, \rho_2, q_{1,2}, H, S_{CDOM}, S_{TR}, \alpha_{TR}^*(\lambda_0), \alpha_{ph}^*, Y) \quad (\text{εξισ. 2.71})$$

Οι παράμετροι αυτοί δύνανται να προσδιοριστούν μόνο εάν ο δέκτης τηλεπισκόπησης διαθέτει ανάλογο αριθμό φασματικών ζωνών (spectral bands). Για τον λόγο αυτό, το υπόψη

μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας, χρησιμοποιείται σε υπερφασματικά (hyperspectral Imagery) τηλεσκοπικά δεδομένα. Ωστόσο, είναι προφανές ότι σε ένα σύστημα πολλών εξισώσεων, με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (εξαρτημένες μεταβλητές), υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να εμφιλοχωρεί κάποιο σφάλμα στους υπολογισμούς, με αρνητικές συνέπειες στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, συνιστάται να γίνονται κάποιες παραδοχές, όπως π.χ. θεωρούμε ότι ορισμένες από τις μεταβλητές της εξισ. 2.71 έχουν σταθερή ή/και τιμή που μπορεί να εκτιμηθεί με κάποιους τρόπους. Η απόφαση για το ποιες μεταβλητές θα θεωρηθεί ότι παραμένουν σταθερές, εξαρτάται από τον σκοπό της εφαρμογής του μοντέλου και τις κατηγορίες των μετρήσεων πεδίου που διατίθενται για τον σκοπό αυτό.

Για παράδειγμα, εάν από μετρήσεις πεδίου και ανάλυση εργαστηρίων έχουν προσδιοριστεί οι τιμές των ειδικών εγγενών οπτικών ιδιοτήτων του νερού ( $S_{CDOM}, S_{TR}, \alpha_{TR}^*, \alpha_{ph}^*$ , and  $Y$ ), τότε για τον υπολογισμό της υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας μέσω του SAMBUCA θα χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση:

$$r_{rs}^{mod} = f(C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, q_{1,2}, H) \quad (\text{εξισ. 2.72})$$

Στην περίπτωση που μελετώνται υδάτινες περιοχές οπτικά «βαθέων υδάτων», δεν υφίσταται η απαίτηση γνώσης των οπτικών (φασματικών) χαρακτηριστικών των ιζημάτων του πυθμένα ( $q_{i,j}$ ), καθόσον θεωρείται ότι αυτός (πυθμένας) δεν συνεισφέρει οπτικά στο σήμα ( $r_{rs}^{mod}(\lambda)$ ) που λαμβάνει ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης. Έτσι, μπορούν να υπολογιστούν ευκολότερα οι μεταβλητές του συστήματος που σχετίζονται με τις ειδικές εγγενείς οπτικές ιδιότητες του νερού (SIOPs), ως ακολούθως :

$$r_{rs}^{mod} = f(C_{chl}, C_{CDOM}, C_{TR}, S_{CDOM}, S_{TR}, Y) \quad (\text{εξισ. 2.73})$$

όπου,

η μεταβλητή  $S_{CDOM}$  αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης του συντελεστή απορρόφησης για την διαλυμένη στο νερό οργανική ύλη (CDOM),

η  $S_{TR}$  αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης του συντελεστή απορρόφησης λόγω των περιεχομένων στο νερό αιωρούμενων υπολειμμάτων/σωματιδίων (μη διαλυμένης οργανικής ή άλλης ύλης στο νερό) του νερού (Tripton),

η παράμετρος  $Y$  αντιπροσωπεύει αντίστοιχα την κλίση της φασματικής καμπύλης της επισθοσκέδασης που συμβαίνει στο υδάτινο μέσο διάδοσης του φωτός και

οι  $C_{chl}$ ,  $C_{CDOM}$ ,  $C_{TR}$  αντιπροσωπεύουν τις συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης- $a$ , της διαλυμένης οργανικής ύλης και της μη-διαλυμένης οργανικής και άλλης περιεχόμενης ύλης στο μέσο διάδοσης (νερό).

Όταν μελετώνται υδάτινες περιοχές οπτικά «ρηχών υδάτων», στις οποίες οι ειδικές εγγενείς οπτικές ιδιότητες του νερού (SIOPs) δεν είναι γνωστές, τότε εφαρμόζεται η εξισ. 2.73, στα πλησιέστερα των ρηχών οπτικά, «βαθιά ύδατα», με σκοπό να προσδιοριστούν σε πρώτο στάδιο οι SIOPs της περιοχής των βαθέων υδάτων, της περιοχής μελέτης. Στην συνέχεια, θεωρώντας ότι, οι γειτνιαζουσες, στα βαθιά νερά, περιοχές των ρηχών υδάτων, έχουν παραπλήσιες τιμές ειδικών οπτικών ιδιοτήτων (SIOPs), υπολογίζεται η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα μέσω της εξισ. 2.73.

Τελικά, από την εξισ. 2.73 προσδιορίζεται το βάθος ( $H$ ) και η ποιότητα του ιζήματος ( $q_{i,j}$ ) του πυθμένα της υπό μελέτη υδάτινης περιοχής.

## 2.3 ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ

### 2.3.1 Αποφάσεις Διεθνών Οργανισμών για την Τυποποίηση των Ναυτικών Χαρτών Επ' ωφελεία της Ασφάλειας της Ναυσιπλοΐας

#### 2.3.1.1 Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός και Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός

Ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός (International Hydrographic Organization-IHO) αποτελεί μετεξέλιξη του Διεθνούς Υδρογραφικού Γραφείου (International Hydrographic Bureau-IHB), το οποίο δημιουργήθηκε το έτος 1921, ένεκα της επιθυμίας των 24 ιδρυτικών χωρών μελών του, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, για την επίτευξη μεγαλύτερης τυποποίησης των ναυτικών χαρτών και των ναυτιλιακών εκδόσεων επ' ωφελεία της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας. Το έτος 1970 το Διεθνές Υδρογραφικό Γραφείο (IHB) αναβαθμίστηκε σε Διεθνή Οργανισμό (International Hydrographic Organization-IHO) και έκτοτε η ονομασία International Hydrographic Bureau (IHB) χρησιμοποιείται για την γραμματεία του οργανισμού IHO.

Μέχρι το έτος 1967 το IHB έκδοσε ορισμένες οδηγίες για την τυποποίηση των ναυτικών χαρτών που παράγονταν από διάφορες χώρες, αλλά μόλις κατά την Διεθνή Υδρογραφική Συνδιάσκεψη του έτους 1967 προτάθηκε η ανάγκη για τη δημιουργία παγκόσμιας σειράς Διεθνών Ναυτικών Χαρτών και για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε η Επιτροπή Τυποποίησης Ναυτικών Χαρτών, η οποία, μετά από μακροχρόνια εργασία μέσω αλληλογραφίας, εκπόνησε λεπτομερείς προδιαγραφές έκδοσης ναυτικών χαρτών (Chart Specifications of the IHO), οι οποίες εγκρίθηκαν κατά την Διεθνή Υδρογραφική Συνδιάσκεψη του έτους 1982.

Εκτός από τις προδιαγραφές έκδοσης έντυπων ναυτικών χαρτών, ο IHO από τα μέσα της δεκαετίας το 1980 δημιούργησε ειδικές επιτροπές και ομάδες εργασίας για την έκδοση τεχνικών προδιαγραφών έκδοσης Ηλεκτρονικών ναυτικών Χαρτών, οι οποίες εκδόθηκαν αρχικά το 1994. Οι τεχνικές προδιαγραφές του IHO για την έκδοση έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών αναθεωρούνται συνεχώς και εναρμονίζονται με σχετικές αποφάσεις άλλων διεθνών οργανισμών και φορέων, όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), ο Διεθνής οργανισμός Τυποποίησης (ISO) κ.α. Εκτός από τις προδιαγραφές έκδοσης ναυτικών χαρτών, ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός, εκδίδει προδιαγραφές εκτέλεσης Υδρογραφικών Εργασιών Πεδίου για την εκτέλεση βυθομετρήσεων κλπ., οι οποίες αναθεωρούνται και εναρμονίζονται με τις εξελίξεις των δυνατοτήτων των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και τεχνολογιών.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) ιδρύθηκε το έτος 1948 με βασική αποστολή την βελτίωση της ασφάλειας και προστασίας της διεθνούς ναυτιλίας και τη πρόληψη της προερχόμενης από τα πλοία ρύπανσης. Ο IMO εκδίδει Συμβάσεις (conventions), Αποφάσεις (resolutions) και προτείνει κανονισμούς (regulations), μετά την σύμφωνη γνώμη των κρατών-μελών (K-M), τους οποίους εφαρμόζουν, υιοθετώντας τους στη εθνική τους νομοθεσία. Από την στιγμή που οι Αποφάσεις, Συμβάσεις, Κανονισμοί και Συστάσεις του IMO ψηφιστούν με νόμους ή Προεδρικά Διατάγματα από τα κράτη μέλη, τότε καθίσταται η εφαρμογή τους υποχρεωτική από τους αντίστοιχους εμπλεκόμενους φορείς. Αρκετές από τις συμβάσεις, αποφάσεις και συστάσεις του IMO αναφέρονται άμεσα ή έμμεσα στις κατηγορίες και τις προδιαγραφές των ναυτικών χαρτών και των ναυτιλιακών εκδόσεων που πρέπει να χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά στη ναυσιπλοΐα. Επίσης, στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων του εκδίδει συστάσεις (recommendations) και οδηγίες (guidances) για την ορθή και αποτελεσματική εφαρμογή των προαναφερόμενων συμβάσεων και αποφάσεων.

Στις 23/12/2003 η Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών υιοθέτησε την απόφαση A/RES/58/240 για τους Ωκεανούς και το Δίκαιο της Θάλασσας. Η απόφαση αυτή που στο μεγαλύτερο μέρος της αναφέρεται στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας καλεί τον Διεθνή Υδρογραφικό Οργανισμό και τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό:

- α. Να συνεχίσουν τις προσπάθειες τους για την μετάπτωση από τους έντυπους στους ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες και να υιοθετήσουν από κοινού μέτρα, με έμφαση στην ενθάρρυνση μεγαλύτερης διεθνούς συνεργασίας και συντονισμού.
- β. Να αυξήσουν την κάλυψη της υδρογραφικής πληροφορίας σε βαθυμετρία σε παγκόσμια βάση, ειδικά σε περιοχές διεθνούς ναυτιλίας και λιμένων, όπου υπάρχουν ευαίσθητες ή προστατευόμενες θαλάσσιες περιοχές.

Η παραπάνω απόφαση του ΟΗΕ, ενίσχυσε σε μεγάλο βαθμό τον συντονισμό και επιτάχυνε την εφαρμογή των προγραμμάτων του ΙΗΟ και ΙΜΟ για την βελτίωση της αξιοπιστίας των ναυτικών χαρτών και τον εκσυγχρονισμό των μεθόδων ναυσιπλοΐας. Αντιπροσωπευτικά δείγματα των σχετικών ενεργειών των εν λόγω διεθνών οργανισμών είναι τα εξής:

- α. Η αναθεώρηση των τεχνικών προδιαγραφών του ΙΗΟ για την έκδοση και ενημέρωση έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών επ' ωφελεία της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας (ΙΗΟ 2006, ΙΗΟ 2012, ΙΗΟ 2014).
- β. Η κατά το έτος 2008 αναθεώρηση των αποφάσεων του ΙΜΟ για τις κατηγορίες ναυτικών χαρτών που πρέπει να χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά από τα πλοία διαφόρων κατηγοριών.
- γ. Η κατά το έτος 2008 έγκριση του σχεδίου στρατηγικής αναπτύξεως της ηλεκτρονικής ναυτιλίας του ΙΜΟ, "IMO Strategy for the development and implementation of e-NAVIGATION" (ΙΜΟ, 2008a). Το σχέδιο αυτό αποσκοπεί στην αναβάθμιση των μεθόδων ναυσιπλοΐας με τη σταδιακή αναθεώρηση των λειτουργικών και τεχνικών προδιαγραφών των συστημάτων ηλεκτρονικής ναυσιπλοΐας.

### 2.3.1.2 Αποφάσεις του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για την Υποχρεωτική Χρήση Επίσημων Ναυτικών Χαρτών επ' Ωφελεία της Ασφάλειας της Ναυσιπλοΐας

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.1.1. ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων του για την υποστήριξη της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας εκδίδει Συμβάσεις (conventions), Αποφάσεις (resolutions), κανονισμούς (regulations), καθώς και συστάσεις (recommendations) και οδηγίες (guidances) για την ορθή και αποτελεσματική εφαρμογή των συμβάσεων και αποφάσεων που αφορούν τις απαιτήσεις εξοπλισμού των πλοίων με επίσημους ναυτικούς χάρτες, ή/και με Συστήματα Απεικόνισης Ηλεκτρονικών Χαρτών και Πληροφοριών, γνωστά ως ECDIS (Electronic Charts Display and Information Systems).

Οι αποφάσεις του IMO που καθορίζουν τις κατηγορίες ναυτικών χαρτών, οι οποίες πρέπει να χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά από τα πλοία διαφόρων κατηγοριών εμπεριέχονται στην «Διεθνή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα» γνωστή ως SOLAS (Safety Of Life At Sea), που εκδόθηκε το 1974 και διορθώνεται συνεχώς ανάλογα με τις εξελίξεις των μεθόδων και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στη ναυσιπλοΐα. Με βάση τη σύμβαση SOLAS, ο IMO έχει εκδώσει και άλλες εξειδικευμένες αποφάσεις, συστάσεις και οδηγίες, οι οποίες εξειδικεύουν τις γενικές απαιτήσεις της σύμβασης SOLAS για τις κατηγορίες ναυτικών χαρτών που πρέπει να χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά από τα πλοία και για τις λειτουργικές και τεχνικές προδιαγραφές των συστημάτων ECDIS. Σύμφωνα με το κεφάλαιο V (κανονισμός-Regulation V/27) της σύμβασης SOLAS, όλα τα πλοία πρέπει να φέρουν «επαρκής και ενημερωμένους ναυτικούς χάρτες».

Ακολούθως, το 1983, ο IMO έλαβε αποφάσεις σχετικές με τη σπουδαιότητα της παροχής ακριβών και ενημερωμένων υδρογραφικών πληροφοριών για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, επισημαίνοντας παράλληλα το γεγονός ότι πολλές θαλάσσιες περιοχές δεν είχαν υδρογραφηθεί σύμφωνα με τα σύγχρονα πρότυπα. Με τις εν λόγω αποφάσεις ο IMO κάλεσε τα Κράτη Μέλη (K-M) του να πραγματοποιήσουν υδρογραφικές έρευνες και να συνεργαστούν με άλλες κυβερνήσεις, όπου αυτό ήταν απαραίτητο για τον σκοπό αυτό. Το 1985 ο IMO με απόφασή του κάλεσε τις κυβερνήσεις των K-M του να συγκροτήσουν Περιφερειακές Υδρογραφικές Επιτροπές ή ομάδες χαρτογράφησης, με σκοπό να υποστηρίξουν τις ομάδες εργασίας που είχαν ήδη συσταθεί από τον Διεθνή Οργανισμό



Υδρογραφίας (ΙΗΟ) για την προετοιμασία προδιαγραφών κατασκευής ναυτικών χαρτών υψηλής ακριβείας. Η παραπάνω απόφαση προκλήθηκε ύστερα από αίτημα του ΙΗΟ, ο οποίος είχε ενημερώσει τον ΙΜΟ για την ανεπάρκεια των υφιστάμενων (τότε) ναυτικών χαρτών σε πολλές θαλάσσιες περιοχές του πλανήτη μας, ως αποτέλεσμα της εξάρτησης των σε από παλαιές υδρογραφικές έρευνες και σημείωνε ότι, προκειμένου να παραχθούν ενημερωμένοι χάρτες για τις περιοχές αυτές, είναι απαραίτητη η τεχνική συνεργασία μεταξύ αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων παράκτιων κρατών σε περιφερειακή βάση.

Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν να προβλεφθεί στο κεφάλαιο V (Regulation V/27) της σύμβασης SOLAS ότι πρέπει:

- α. Τα συμβαλλόμενα κράτη να δεσμεύονται να μεριμνήσουν για τη συλλογή και σύνταξη υδρογραφικών δεδομένων και τη έκδοση, διάδοση και επικαιροποίηση όλων των ναυτικών πληροφοριών που είναι απαραίτητες για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Πιο συγκεκριμένα, τα συμβαλλόμενα κράτη δεσμεύονται να συνεργαστούν για τη διεξαγωγή, στο μέτρο του δυνατού, των ακόλουθων ναυτικών και υδρογραφικών υπηρεσιών, με τον πλέον κατάλληλο τρόπο για την βελτίωση της ναυσιπλοΐας, δίνοντας τις κάτωθι κατευθύνσεις προς τα Κ-Μ :
- β. Να εξασφαλίζεται ότι κάθε υδρογραφική έρευνα (αποτύπωση) πραγματοποιείται, με όσο το δυνατόν καλύτερη επάρκεια για τις απαιτήσεις της ασφαλούς ναυσιπλοΐας.
- γ. Τα Κ-Μ να αναλαμβάνουν τις απαραίτητες ενέργειες για την έκδοση κατάλληλων ναυτικών χαρτών, Πλοηγών, Φαροδεικτών, Πινάκων Παλιρροιών καθώς και άλλων ναυτικών εκδόσεων, κατά περίπτωση, οι οποίες θα ικανοποιούν τις ανάγκες της ασφάλειας ναυσιπλοΐας.
- δ. Να παρέχουν Αγγελίες προς του Ναυτιλλομένους, με σκοπό τη επικαιροποίηση και συνεχή ενημέρωση των ναυτικών χαρτών και των λοιπών ναυτιλιακών εκδόσεων και
- ε. Να παρέχουν κατάλληλες διαδικασίες διαχείρισης υδρογραφικών και άλλων δεδομένων – πληροφοριών για την υποστήριξη των παραπάνω υπηρεσιών.

Επίσης, τα συμβαλλόμενα κράτη είναι υποχρεωμένα να εξασφαλίζουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιομορφία στους ναυτικούς χάρτες και τις λοιπές ναυτιλιακές εκδόσεις και να λαμβάνουν υπόψη, όπου είναι δυνατόν, τις σχετικές αποφάσεις και συστάσεις των συναφών

Διεθνών Οργανισμών (π.χ. τις σχετικές αποφάσεις και συστάσεις που υιοθετήθηκαν από τον ΙΗΟ).

Επιπλέον, τα συμβαλλόμενα κράτη δεσμεύονται να συντονίζουν τις δραστηριότητές τους, στο μέγιστο δυνατό βαθμό, ώστε να διασφαλίζουν ότι οι υδρογραφικές και ναυτικές πληροφορίες διατίθενται σε παγκόσμια κλίμακα όσο το δυνατόν πιο έγκαιρα, αξιόπιστα και χωρίς αβεβαιότητες (σφάλματα).

Σύμφωνα με τη σύμβαση SOLAS, τα πλοία απαιτείται να φέρουν ναυτικούς χάρτες και ναυτικές εκδόσεις ώστε να δύνανται να σχεδιάσουν και να απεικονίζουν την πορεία του πλοίου για το εκάστοτε ταξίδι και να αποτυπώνουν την θέση τους καθόλη την διάρκεια του πλου, επί της εν λόγω πορείας. Η έλευση των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών τη δεκαετία του 1990 παρείχε στα πλοία πρόσθετες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες μπορούσαν να εμφανιστούν σε οθόνες ηλεκτρονικών συστημάτων απεικόνισης χαρτών και πληροφοριών (ECDIS). Ο ΙΜΟ υιοθέτησε πρότυπα λειτουργίας (performance standards) για ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες τη δεκαετία του 1990. Το 2000, ο ΙΜΟ υιοθέτησε έναν αναθεωρημένο κανονισμό στο κεφάλαιο V της σύμβασης SOLAS, ο οποίος αφορούσε στις απαιτήσεις διαθεσιμότητας από κάθε πλοίο σε ναυτιλιακά συστήματα και λοιπό εξοπλισμό πλοήγησης. Σύμφωνα, με τον υπόψη αναθεωρημένο κανονισμό επιτρέπεται η χρήση ενός πιστοποιημένου ECDIS, αντί της υποχρεωτικής χρήσης έντυπων ναυτικών χαρτών, εφόσον το συγκεκριμένο σύστημα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του κανονισμού για τους χρησιμοποιούμενους ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες. Αναγνωρίζοντας τα πλεονεκτήματα του ECDIS για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, ο ΙΜΟ ενέκρινε το 2009 περαιτέρω τροποποιήσεις στον κανονισμό V / 19 της SOLAS, προκειμένου να καταστεί υποχρεωτική η χρήση του ECDIS. Οι τροποποιήσεις τέθηκαν σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2011, καθιστώντας υποχρεωτικό το ECDIS για τα νέα πλοία που κατασκευάστηκαν μετά από συγκεκριμένες ημερομηνίες.

#### 2.3.1.3 *Αποφάσεις του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού για την Εκτέλεση Βαθυμετρήσεων και την Τυποποίηση των Ναυτικών Χαρτών επ' Ωφελεία της Ασφάλειας της Ναυσιπλοΐας*

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.1.1., ο ΙΗΟ στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων του εκδίδει προδιαγραφές, οδηγίες και τεχνικά εγχειρίδια για την τυποποίηση και

αποτελεσματική εκτέλεση των υδρογραφικών εργασιών πεδίου καθώς και για την έκδοση ναυτικών χαρτών για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Οι κυριότερες εκδόσεις του IHO για τις προδιαγραφές εκτέλεσης υδρογραφικών εργασιών πεδίου /βαθυμετρίας και έκδοσης έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών είναι:

- α. Προδιαγραφές εκτέλεσης Υδρογραφικών Εργασιών πεδίου (IHO, Standards for Hydrographic Surveys, IHO 2008).

Είναι μία από τις παλαιότερες σειρές προδιαγραφών/προτύπων που έχει αναπτύξει ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός (IHO) για την εκτέλεση αξιόπιστων υδρογραφικών εργασιών/αποτυπώσεων πεδίου επ' ωφελεία της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας και όχι μόνο. Εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1968 και έκτοτε αναθεωρείται συνεχώς ανάλογα με τις εξελίξεις των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και τεχνολογιών όπως, βαθυμετρία με μηχανική βολίδα (αρχαία εποχή-σήμερα), με ηχοβολιστικά μονής δέσμης (1928-σήμερα), και με ηχοβολιστικά πολλαπλής δέσμης (1995-σήμερα). Οι αρχικές επίσημες συζητήσεις σχετικά με τη θέσπιση προτύπων για τις υδρογραφικές έρευνες άρχισαν κατά το 7ο Διεθνές Υδρογραφικό Συνέδριο (IHC), το 1957. Το 1962, το IHC ίδρυσε μια ομάδα εργασίας (Ο.Ε.), η οποία διαμόρφωσε το πρώτο κείμενο για την ειδική έκδοση του IHO με αριθμό S-44. Η πρώτη έκδοση του S-44 με τίτλο «Προδιαγραφές ακρίβειας που συνιστώνται για υδρογραφικές έρευνες» δημοσιεύθηκε τον Ιανουάριο του 1968. Κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών, οι τεχνολογίες και οι διαδικασίες υδρογράφησης άλλαξαν, με αποτέλεσμα ο IHO να δημιουργήσει περαιτέρω ομάδες εργασίας για την ενημέρωση του S-44. Απόρρεια των συζητήσεων των υπόψη Ο.Ε. ήταν να εκδοθεί η 2η έκδοση του S-44 που δημοσιεύτηκε το 1982, η 3η το 1987 και η 4η το 1998. Σε όλες αυτές τις αναθεωρήσεις οι βασικοί στόχοι της έκδοσης παρέμειναν ουσιαστικά αμετάβλητοι και αυτό ισχύει και στην τελευταία 5η έκδοση (2008) των προδιαγραφών υδρογράφησης. Οι εν λόγω προδιαγραφές παρουσιάζονται στην ενότητα 2.3.3.2.

- β. Κανονισμοί του IHO για τους Διεθνείς Ναυτικούς Χάρτες και Προδιαγραφές Κατασκευής Έντυπων Ναυτικών Χαρτών του IHO (S-4).

Οι κανονισμοί και οι προδιαγραφές των Διεθνών Χαρτών του IHO συντάχθηκαν με βάση τις εκθέσεις, τις μελέτες και τις αποφάσεις της Επιτροπής Διεθνών Χαρτών της

Βόρειας Θάλασσας (North Sea International Chart Commission-NSICC). Οι εν λόγω κανονισμοί τροποποιήθηκαν και συμφωνήθηκαν από την Επιτροπή Προδιαγραφών Ναυτικών Χαρτών και την διάδοχό της, Επιτροπή Τυποποίησης Ναυτικών Χαρτών, και τελικά ολοκληρώθηκαν το 1984. Η Ομάδα Εργασίας Ναυτικής Χαρτογραφίας (Nautical Cartography Working Group-NCWG) της Επιτροπής Υδρογραφικών Υπηρεσιών και Προτύπων (Hydrographic Services and Standards Committee-HSSC), η οποία ήταν γνωστή ως Ομάδα Εργασιών Τυποποίησης και Χαρτογραφίας (Chart Standardization and Paper Chart Working Group-CSPCWG), αντικατέστησε την Επιτροπή Τυποποίησης Chart (Chart Standardization Committee-CSC) και είναι υπεύθυνη για την ενημέρωση των παραπάνω κανονισμών (προδιαγραφών). Όλες οι προτάσεις για τυχόν τροποποιήσεις των κανονισμών του IHO για την κατασκευή των ναυτικών χαρτών παραπέμπονται από τη Γραμματεία του IHO στην Ομάδα εργασίας NCWG για απόψεις-σχόλια (Απόφαση IHO υπ' αριθμ. 11/2002, όπως τροποποιήθηκε και ισχύει). Μετά από συζήτηση, η Ο.Ε. NCWG προτείνει τροποποιήσεις στην HSSC για έγκριση. Στη συνέχεια, η Γραμματεία του IHO κοινοποιεί σε όλα τα Κ-Μ του IHO της απόψεις της HSSC με σχετική επιστολή, ζητώντας οποιαδήποτε σχόλια από τα Κ-Μ εντός τριών μηνών. Μετά από τρεις μήνες, εάν δεν υπάρξουν αντιρρήσεις από ένα ή περισσότερα μέλη, η Γραμματεία του IHO ανακοινώνει, με δεύτερη επιστολή της, ότι οι τροποποιήσεις έχουν τεθεί σε ισχύ, και στη συνέχεια επικαιροποιείται ανάλογα η έκδοση του S-4 στην ιστοσελίδα του IHO παίρνοντας αντίστοιχο αριθμό τροποποιημένης έκδοσης. Οι εν λόγω προδιαγραφές ακρίβειας ναυτικών χαρτών παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην ενότητα 2.3.4.

- γ. Πρότυπο IHO για την Μετάδοση Ψηφιακών Υδρογραφικών Δεδομένων με αριθμό S-57, (IHO, 2000). Το πρότυπο αυτό περιγράφεται αναλυτικότερα στην ενότητα 2.3.2.3, στην οποία αναφέρεται εκτενώς το περιεχόμενο και η δομή των χαρτογραφικών πληροφοριών που περιλαμβάνονται σε έναν ηλεκτρονικό χάρτη (ENC) που απεικονίζεται σε ένα σύστημα απεικόνισης ECDIS.
- δ. Προδιαγραφές για το Περιεχόμενο του Ναυτικού Χάρτη και τον τρόπο απεικόνισής του σε συστήματα ECDIS, έκδοση με αριθμό S-52. Οι προδιαγραφές αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 2.3.2.3.

- ε. Προδιαγραφές IHO για το Παγκόσμιο Υδρογραφικό Μοντέλο Δεδομένων, έκδοση με αριθμό S-100, και προδιαγραφές IHO για την Κατασκευή Η/Ν Ναυτικών Χαρτών έκδοση με αριθμό S-101 (IHO, 2018). Οι προδιαγραφές αυτές παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην ενότητα 2.3.2.3.
- στ. Προδιαγραφές και Κατευθυντήριες Οδηγίες για την Παραγωγή και Ενημέρωση Διεθνών Ναυτικών Χαρτών, Χαρτογραφικών Σχεδίων Κάλυψης Η/Ν Ναυτικών Χαρτών (ENC) και Καταλόγων Διεθνών Ναυτικών Χαρτών (INT), έκδοση με αριθμό S-11. Η έκδοση αυτή παρουσιάζει τα σημαντικότερα αντικείμενα των προδιαγραφών των έντυπων και των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών, των προαναφερθέντων εκδόσεων του IHO, με αριθμούς S-4 και S-57, με οδηγίες εφαρμογής τους από τις Υδρογραφικές Υπηρεσίες των Κ-Μ του IHO.

#### 2.3.1.4 Άλλοι Συναφείς Διεθνείς Φορείς και Επιτροπές

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.1.1, οι προδιαγραφές του IHO για την εκτέλεση βαθυμετρήσεων με σκοπό την έκδοση αξιόπιστων ναυτικών χαρτών επ' ωφελεία της ναυσιπλοΐας αναθεωρούνται και εναρμονίζονται με τις εξελίξεις των δυνατοτήτων των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και τεχνολογιών και τις σχετικές αποφάσεις και προδιαγραφές άλλων διεθνών οργανισμών και φορέων, όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) κ.α.

Οι αποφάσεις και προδιαγραφές άλλων διεθνών οργανισμών και φορέων, οι οποίες υιοθετούνται από τον IMO αφορούν κατά κύριο λόγο σε θέματα προτυποποίησης (standardization) για την εκτέλεση βαθυμετρήσεων, την έκδοση ναυτικών χαρτών και τη δομή και διαλειτουργικότητα των ψηφιακών γεωχωρικών πληροφοριών, καθώς και τους απαιτούμενους για την πιστοποίηση των συστημάτων ECDIS ελέγχους.

Ο βασικός στόχος της προτυποποίησης των ψηφιακών γεωχωρικών πληροφοριών είναι η δυνατότητα προσπέλασης σε ψηφιακές γεωγραφικές πληροφορίες από διαφορετικούς χρήστες, εφαρμογές και συστήματα, καθώς και από διαφορετικές περιοχές. Αυτό προϋποθέτει ένα τυποποιημένο τρόπο ορισμού και περιγραφής αυτής της πληροφορίας, μια τυποποιημένη μέθοδο δόμησης και κωδικοποίησής της, καθώς και ένα τυποποιημένο τρόπο

πρόσβασης, μεταφοράς και ενημέρωσής της, μέσω λειτουργιών επεξεργασίας και επικοινωνίας, οι οποίες είναι ανεξάρτητες οποιουδήποτε συγκεκριμένου υπολογιστικού συστήματος (IHO, 2017). Με την τυποποίηση καθίσταται δυνατή η συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών και συστημάτων, ενώ επιτρέπεται η χρήση διαφορετικών τεχνολογιών για την αποθήκευση και εν γένει διαχείριση των γεωγραφικών δεδομένων στα υπολογιστικά συστήματα.

Ενδεικτικά πρότυπα μεταφοράς Γεωχωρικών Δεδομένων, τα οποία λαμβάνονται υπόψη στην έκδοση των προτύπων του IHO, για την ανταλλαγή υδρογραφικών δεδομένων και για την έκδοση και διάθεση των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών είναι τα εξής:

- α. ISO 8211: Specification for a data descriptive file for information interchange. Μορφότυπος που αφορά στα περιγραφικά αρχεία δεδομένων για ανταλλαγή πληροφοριών
- β. ISO 19100: Geographic Information Standards. Σειρά μορφοτύπων που αρχίζουν από το ISO 19101 έως το ISO19165.
- γ. DIGEST: Digital Geographic Information Exchange Standard. Μορφότυπος στρατιωτικών γεωγραφικών δεδομένων που βασίζονται στην σειρά προτύπων ISO/TC 211 19100.
- δ. ISO/IEC 8211:199: Specification for a data descriptive file for information interchange. Προδιαγραφή για ένα περιγραφικό αρχείο δεδομένων για την ανταλλαγή πληροφοριών.

Σύμφωνα με τον κανονισμό V/18 της SOLAS, τα συστήματα ECDIS που είναι εγκατεστημένα επί των πλοίων πρέπει να είναι εγκεκριμένα/πιστοποιημένα. Ο τύπος της πιστοποίησης αφορά στη διαδικασία έγκρισης που πρέπει να τηρηθεί ώστε το εκάστοτε σύστημα ECDIS να επιβεβαιωθεί ότι συμμορφώνεται με τα πρότυπα λειτουργίας (performance standards) του IMO. Η διαδικασία πιστοποίησης διεξάγεται από τους αρμόδιους κρατικούς οργανισμούς κάθε Κ-Μ ή από τους από ιδιωτικούς φορείς τυποποίησης σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα δοκιμών που ανέπτυξε, μεταξύ άλλων, και η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) (π.χ. IEC 61174).

## 2.3.2 Διεθνείς Προδιαγραφές Απεικόνισης Βαθυμετρίας στους Ναυτικούς Χάρτες

### 2.3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Ναυτικών Χαρτών

Παλαιότερα ο όρος «Ναυτικός Χάρτης» αναφερόταν, στους παραδοσιακούς έντυπους ναυτικούς χάρτες που κατασκευάζονταν κυρίως από τις Υδρογραφικές Υπηρεσίες ορισμένων παράκτιων χωρών, με σκοπό την ασφαλή σχεδίαση και εκτέλεση του πλου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IHO. Εν τούτοις, οι από τη δεκαετία του 1980 εξελίξεις των μεθόδων και τεχνολογιών ψηφιακών γεωχωρικών πληροφοριών, οδήγησαν τον Διεθνή Υδρογραφικό Οργανισμό (IHO), σε συνεργασία με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), να αναπτύξουν από το 1986 κανονισμούς και τεχνικές οδηγίες που εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ασφάλεια στη ναυσιπλοΐα, υιοθετώντας την χρήση των σύγχρονων συστημάτων Απεικόνισης Ηλεκτρονικού Χάρτη και Πληροφοριών ECDIS (Electronic Chart Display and Information System).

Σήμερα, ο όρος «Ναυτικός Χάρτης» αναφέρεται τόσο, στους παραδοσιακούς έντυπους ναυτικούς χάρτες, όσο και στους σύγχρονους ηλεκτρονικούς χάρτες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά συστήματα ναυσιπλοΐας. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον Κανονισμό (Regulation) 2 του Κεφαλαίου V (Ασφάλεια της ναυσιπλοΐας) της Διεθνούς Σύμβασης για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα του 1974 (SOLAS 1974), όπως αυτός τροποποιήθηκε το 2013 ορίζεται ότι:

«Ο ναυτικός πίνακας ή ναυτική έκδοση είναι ένας χάρτης ή βιβλίο ειδικού σκοπού ή μια εξειδικευμένη βάση δεδομένων από την οποία προέρχεται ένας τέτοιος χάρτης ή βιβλίο, ο οποίος εκδίδεται επισήμως από ή υπό την εξουσία ενός κρατικού, εξουσιοδοτημένου Υδρογραφικού γραφείου ή άλλου σχετικού κυβερνητικού φορέα και έχει σχεδιαστεί για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της θαλάσσιας ναυσιπλοΐας».

Επειδή, ο βασικός σκοπός των ναυτικών χαρτών (έντυπων ή ηλεκτρονικών) είναι να παράσχουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για να επιτρέψουν στον ναυτιλλόμενο να σχεδιάσει και να εκτελέσει ασφαλή πλοήγηση, κατά την κατασκευή των χαρτών είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν κατάλληλες, σχετικές, ακριβείς και σαφείς πληροφορίες που θα είναι χρήσιμες για την ασφαλή πλοήγηση. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα και συνθήκες, όπου ο ναυτιλλόμενος μπορεί να έρθει αντιμέτωπος

με πάρα πολλές πληροφορίες ή άσχετες πληροφορίες, οι οποίες θα του προκαλέσουν σύγχυση ή απόσπαση της προσοχής του.

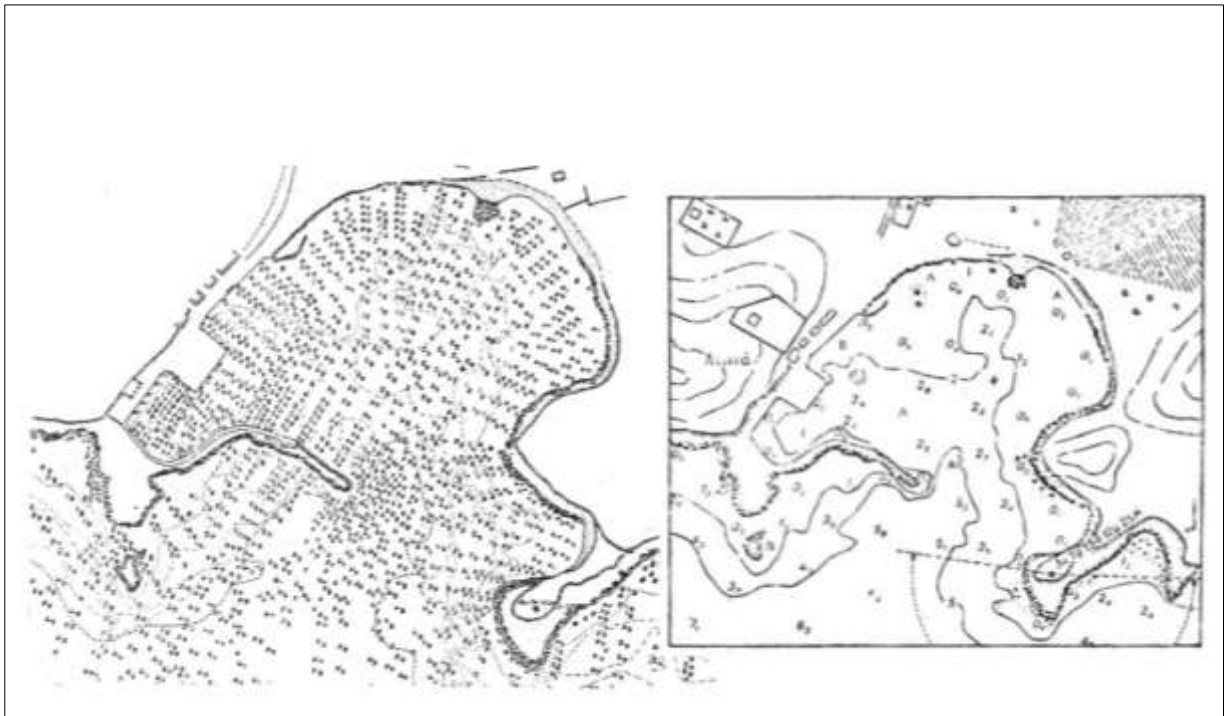
Σύμφωνα με τα επίσημα έγγραφα του IMO και του IHO (IMO 2013, IHO 2006) οι ναυτικοί χάρτες που χρησιμοποιούνται υποχρεωτικά στη ναυσιπλοΐα πρέπει να είναι οι επίσημοι (official) έντυποι, ή ηλεκτρονικοί ναυτικοί χάρτες. Επίσημοι (official) ναυτικοί χάρτες αυτοί που εκδίδονται επισήμως από ή υπό την εξουσία ενός κρατικού, εξουσιοδοτημένου Υδρογραφικού γραφείου ή άλλου σχετικού κυβερνητικού φορέα και έχει σχεδιαστεί για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της θαλάσσιας ναυσιπλοΐας.

Ένα πολύ βασικό και ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των επίσημων ναυτικών χαρτών (έντυπων και ηλεκτρονικών) είναι η διαρκής ενημέρωσή τους με όλες τις απαραίτητες διορθώσεις και συμπληρώσεις, που είναι κρίσιμες για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Οι ενημερώσεις αυτές εκτελούνται;

- Για τους έντυπους ναυτικούς χάρτες με τις εκδιδόμενες από τις επίσημες κρατικές Υδρογραφικές Υπηρεσίες «Αγγελίες για τους Ναυτιλλόμενους» ή «Notices to Mariners – NtM». Οι Αγγελίες για τους Ναυτιλλόμενους, εκδίδονται συνήθως ανά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, πχ., κάθε εβδομάδα από την Βρετανική Υδρογραφική Υπηρεσία και κάθε μήνα από την Ελληνική.
- Για τους ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες με τις εκδιδόμενες από τις επίσημες κρατικές Υδρογραφικές Υπηρεσίες ενημερώσεις (updates), οι οποίες συνήθως διαχέονται μέσω του μηχανισμού της «Παγκόσμιας Βάσης Δεδομένων Ηλεκτρονικών Ναυτιλιακών Χαρτών» (WEND -Worldwide Electronic Navigational Chart Data Base) (IHO, 2014)

Οι ναυτικοί χάρτες (έντυποι και ηλεκτρονικοί) κατηγοριοποιούνται σύμφωνα τον σκοπό/χρήση τους, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη κλίμακα απεικόνισης. Η επιλογή των κατάλληλων κλιμάκων των ναυτικών χαρτών εξαρτάται από τις απαιτήσεις πλοήγησης της διεθνούς ναυσιπλοΐας και την ανάγκη χρήσης των καταλληλοτέρων ναυτικών χαρτών που καλύπτουν μία θαλάσσια διαδρομή ή έναν πλου προσέγγισης σε ένα λιμένα. Η ακριβής επιλογή των ναυτικών χαρτών που απαιτούνται για την κάλυψη μίας περιοχής μπορεί να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, λόγω των διαφορετικών υδρογραφικών και ναυτιλιακών χαρακτηριστικών αυτής.





**Εικόνα 2.10 :** Αρχικό Βαθυμετρικό διάγραμμα (αριστερά) και γενικευμένο (δεξιά), (Παλληκάρης, 1988).

Ωστόσο, κοινό και κύριο χαρακτηριστικό όλων είναι ότι απεικονίζουν την βαθυμετρία που προέρχεται από τις βαθυμετρικές αποτυπώσεις πεδίου, αφού προηγουμένως έχουν γενικευθεί (αραιωθεί) τα δεδομένα τους, με τέτοια κριτήρια ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Ουσιαστικά, ο εκάστοτε ναυτικός χάρτης θα πρέπει να απεικονίζει τόσα δεδομένα βαθών, ώστε να μην προκαλείται σύγχυση στον ναυτιλλόμενο από την πυκνότητα της πληροφορίας και παράλληλα να απεικονίζονται τα ρηχότερα βάθη, δηλαδή τα πιο επικίνδυνα για την ασφάλεια του πλοίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10 .

#### 2.3.2.2 Κατηγορίες και Προδιαγραφές Έντυπων Ναυτικών Χαρτών

Ο Διεθνής Οργανισμός Υδρογραφίας (ΙΗΟ) δημιουργήθηκε το 1921 ως αποτέλεσμα της επιθυμίας των παράκτιων κρατών για μεγαλύτερη τυποποίηση των ναυτικών χαρτών και των συναφών δημοσιεύσεων και, κατά συνέπεια, για μεγαλύτερη ασφάλεια των ναυτιλλόμενων. Θεωρήθηκε ότι αυτή η τυποποίηση θα μπορούσε να επιτευχθεί με τέτοιο

τρόπο, ώστε οι διαφορές γλωσσών και συμβόλων να ελαχιστοποιηθούν και ότι ένα γράφημα που παράγεται από μια χώρα θα ήταν απολύτως κατανοητό για έναν ναυτιλλόμενο μίας άλλης χώρας. Παρόλο που έχουν ληφθεί μέτρα από τη σύσταση του IHO για την ανάπτυξη προτύπων που θα ακολουθηθούν σε εθνικό επίπεδο κατά την παραγωγή ναυτικών χαρτών και λοιπών ναυτιλιακών εκδόσεων, δεν προτάθηκε μέχρι το 1967 η έννοια ενός διεθνούς (INT) χάρτη. Αποφασίστηκε λοιπόν, ότι αντί για πολλά διαφορετικά υδρογραφικά γραφεία που παράγουν διαφορετικά διαγράμματα στην ίδια θαλάσσια περιοχή, συχνά με διαφορετικά δεδομένα, κλίμακες και όρια, θα ήταν πιο οικονομικό και ασφαλέστερο εάν μία Υδρογραφική Υπηρεσία συγκέντρωνε στοιχεία και παρήγαγε ένα ναυτικό χάρτη ο οποίος θα στηριζέτο σε διεθνώς συμφωνημένες προδιαγραφές. Οι λοιπές Υδρογραφικές Υπηρεσίες θα μπορούσαν στη συνέχεια να παράξουν τον εν λόγω χάρτη, χρησιμοποιώντας το βασικό υλικό αναπαραγωγής που παρείχε το αρχικό παράγων κράτος. Το πρώτο βήμα ήταν να συμφωνηθεί η τυποποίηση της μορφής και των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν στους διεθνείς ναυτικούς χάρτες. Η Διεθνής Υδρογραφική Διάσκεψη (IHC) του 1967 όρισε μια Επιτροπή, η οποία μέσω αλληλογραφίας, ανέπτυξε τις «Προδιαγραφές IHO για τους Ναυτικούς Χάρτες», οι οποίες εγκρίθηκαν στην IHC του 1982. Αυτές οι προδιαγραφές περιέχονται τώρα στη ειδική έκδοση S-4 του IHO. Οι υπόψη προδιαγραφές ισχύουν για όλους τους διεθνείς ναυτικούς χάρτες (INT) και συνιστώνται επίσης για όλες τις εθνικές σειρές ναυτικών χαρτών. Παράλληλα, κρίθηκε απαραίτητο να συμφωνηθεί ένα σχέδιο, παγκόσμιας κάλυψης με διεθνείς ναυτικούς χάρτες, σε συμφωνημένες κλίμακες. Στο πλαίσιο αυτό, συμφωνήθηκε η δημιουργία ενός συστήματος δύο σειρών έντυπων ναυτικών χαρτών μικρής κλίμακας, σε κλίμακες 1:10 εκατομμυρίων (19 χάρτες) και 1: 3,5 εκατομμυρίων (60 χάρτες). Οι δύο σειρές δημοσιεύθηκαν κατά τη διάρκεια μιας δεκαπενταετούς περιόδου που άρχισε το 1972. Αυτό παρείχε στη διεθνή ναυτιλία χάρτες με ομοιόμορφη και σύγχρονη κάλυψη για όλες τις σημαντικές θαλάσσιες διαδρομές. Οι προδιαγραφές για τους προαναφερόμενους χάρτες INT μικρής κλίμακας περιέχονται στο S-4 Part C. Το 1982, η επιτυχία της παραπάνω σειράς ναυτικών χαρτών INT μικρής κλίμακας, οδήγησε στην εξέταση της επέκτασης της ιδέας, ώστε να δημιουργηθούν χάρτες αντίστοιχων προδιαγραφών σε μεσαίες και μεγάλες κλίμακες. Η πιλοτική προσπάθεια άρχισε από την Υδρογραφική Επιτροπή της Βόρειας Θάλασσας, η οποία αξιολόγησε το ενδεχόμενο αυτό με τη διεξαγωγή πιλοτικής μελέτης κατασκευής διεθνών ναυτικών χαρτών για την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας. Ουσιαστικά, τα εμπλεκόμενα K-M του IHO έπρεπε να συμφωνήσουν σε ένα σχέδιο χάρτη που θα

ικανοποιούσε τις ανάγκες της διεθνούς ναυτιλίας για την περιοχή αρμοδιότητάς τους. Συμφωνήθηκε ότι αυτό θα περιλάμβανε ναυτικούς χάρτες μεσαίας κλίμακας παράκτιων και υπεράκτιων περιοχών σε κλίμακες μεταξύ 1: 150.000 και 1: 1,5 εκατομμυρίου και ναυτικούς χάρτες προσέγγισης λιμένων και λιμενοδεικτών σε κλίμακες μεγαλύτερες από 1: 150.000. Οι προδιαγραφές για αυτά τα διαγράμματα INT μεσαίας και μεγάλης κλίμακας περιλαμβάνονται στο S-4 Μέρος Β. Μετά την μελέτη των διαγραμμάτων INT σε μεσαίες και μεγάλες κλίμακες για τη Βόρειο Θάλασσα, δημιουργήθηκαν επιτροπές ή ομάδες περιφερειακών ομάδων, στο πλαίσιο των σχετικών Περιφερειακών Υδρογραφικών Επιτροπών (RHC), για ορισμένες άλλες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Η αρμοδιότητα των Περιφερειακών Ομάδων των Κ-Μ του ΙΗΟ, ήταν να αναπτύξουν και να επικαιροποιούν έντυπους διεθνείς ναυτικούς χάρτες για τις περιοχές αρμοδιότητάς τους, οδηγώντας τελικά σε πλήρη παγκόσμια κάλυψη των διεθνών χαρτών (INT Charts), σε μεσαίες και μεγάλες κλίμακες για τις κύριες ναυτιλιακές διαδρομές, τα κύρια λιμάνια και τις σημαντικότερες λιμενικές εγκαταστάσεις. Η χαρτογραφική κάλυψη των σειρών των διεθνών ναυτικών χαρτών μπορεί να συμπληρωθεί από εθνικούς χάρτες μεγάλης κλίμακας για τους ναυτιλλόμενους που απαιτούν λεπτομερέστερη γνώση των υδάτων μιας χώρας. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκαν υδρογραφικές περιφέρειες διεθνών κρατών, καλύπτοντας όλες τις θαλάσσιες περιοχές του πλανήτη.

Οι προδιαγραφές (IHO Charts Specifications) ενός έντυπου ναυτικού χάρτη αποσκοπούν στο να παράσχουν ένα πλαίσιο για την τυποποίηση από τα κράτη μέλη του ΙΗΟ όλων των ναυτικών χαρτών, τόσο στις εθνικές τους σειρές όσο και στις διεθνείς σειρές (INT). Η τυποποίηση των ναυτικών χαρτών θεωρείται πιο σοβαρό θέμα από την απλή υιοθέτηση ενός τυποποιημένου συνόλου συμβόλων ή/και τυποποιημένων συντομογραφιών. Οι προδιαγραφές του ΙΗΟ των ναυτικών χαρτών έχουν σκοπό να είναι όσο το δυνατόν πληρέστερες, καλύπτοντας κάθε πτυχή του περιεχομένου ενός χάρτη και να παράσχουν ένα λειτουργικό πλαίσιο στη βάση των αποφάσεων, κανονισμών και των συστάσεων του ΙΗΟ και ΙΜΟ, για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Οι βασικές κατηγορίες χαρτών με βάση την κλίμακά τους αναφέρονται στον Πίνακα 2.4 (IHO, 2018)).

**Πίνακας 2.4:** Κατηγορίες Έντυπων Ναυτικών Χαρτών

| Κατηγορία | Χρήση                                      | Κλίμακα                      |
|-----------|--|------------------------------|
| 1.        | Overview (Σχεδίασης Πλου)                  | < 1:2 000 000                |
| 2.        | General (Ναυσιπλοΐας<br>Ανοικτής Θαλάσσης) | 1:2 000 000 – 1:350 000.     |
| 3.        | Coastal (Ακτοπλοΐας)                       | 1:350 000 – 1:75 000.        |
| 4.        | Approach (Προσέγγισης<br>Ακτών)            | 1:75 000 – 1:30 000          |
| 5.        | Harbor (Λιμενοδεικτών)                     | > 1:30.000                   |
| 6.        | Berthing (Πρόσδεσης-<br>Αγκυροβολίων)      | Πολύ μεγάλης κλίμακας χάρτες |

Όλες οι σημαντικές για τη ναυσιπλοΐα πληροφορίες πρέπει να απεικονίζονται τόσο στους έντυπους όσο και στους ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες. Οι πληροφορίες αυτές πρέπει να παρουσιάζονται σε κάθε προϊόν κατά τρόπο που να διασφαλίζει ότι ο ναυτιλλόμενος αντιλαμβάνεται τις πληροφορίες με αξιόπιστο και σαφή τρόπο, ανεξάρτητα από τη διαφορετική δομή (format) και μορφή των προϊόντων. Για τον σκοπό αυτό, οι προδιαγραφές του IHO για την έκδοση των έντυπων ναυτικών χαρτών (έκδοση S-4) και οι αντίστοιχες για τους ηλεκτρονικούς, προβλέπουν διαφορετικά χαρτογραφικά σύμβολα, προσαρμοσμένα στην διαφορετική οπτική αντίληψη του ανθρώπινου οφθαλμού για τους έντυπους χάρτες ή στην οθόνη απεικόνισης των ηλεκτρονικών χαρτών. Επίσης, όταν ενημερώνεται ο έντυπος ναυτικός χάρτης με σημαντικές πληροφορίες για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, οι αλλαγές πρέπει να εφαρμόζονται και στον αντίστοιχο ηλεκτρονικό, όσο το δυνατόν ταυτόχρονα επιτρέπεται.

Πρόσθετες πληροφορίες για την κάλυψη των απαιτήσεων που δεν αφορούν τη ναυσιπλοΐα όπως για παράδειγμα όρια στρατιωτικών περιοχών, ή πεδίων βολής, περιοχών απαγόρευσης αλιείας, όρια εκμετάλλευσης φυσικών πόρων, όρια δραστηριοτήτων αναψυχής, περιοχές ανάπτυξης λιμένων, σχεδίαση διεθνών συνόρων ή/και εθνικά όρια, κτλ., μπορούν να συμπεριληφθούν σε έντυπους ναυτικούς χάρτες, εφόσον κριθούν αναγκαία από την αρμόδια υδρογραφική υπηρεσία παραγωγής των ναυτικών χαρτών.

Ο ναυτιλλόμενος έχει ανάγκη οι χάρτες που χρησιμοποιεί να είναι «ενημερωμένοι» (updated) σε όλες τις κλίμακες, τουλάχιστον σε ότι αφορά στο ουσιαστικό περιεχόμενο των δεδομένων τους. Για το σκοπό αυτό, μετά την συλλογή των υδρογραφικών δεδομένων διενεργείται η επικαιροποίηση των έντυπων ναυτικών χαρτών, η οποία γίνεται με τους εξής τρόπους :

- Με την έκδοση σχετικής προαγγελίας προς τους ναυτιλλόμενους, μία πολλή ταχεία διαδικασία ενημέρωσης των ναυτιλλομένων.
- Με την έκδοση αγγελίας προς τους ναυτιλλόμενους. Οι αγγελίες εκδίδονται ανά μήνα (συνήθως) από τις αρμόδιες υπηρεσίες.
- Με νέα έκδοση του ναυτικού χάρτη, η οποία γίνεται σε περίπτωση όπου προκύπτουν μετά την υδρογράφιση σημαντικές αλλαγές για ένα χάρτη ή όταν έχουν εκδοθεί πολλές αγγελίες σε μία περιοχή που απεικονίζεται στον ίδιο χάρτη.

Η προαναφερόμενη ενημέρωση-επικαιροποίηση ενός έντυπου ναυτικού χάρτη πρέπει να γίνεται από τη μεγαλύτερη κλίμακα χάρτου προς τη μικρότερη κλίμακα. Στην πράξη, αυτό επιτυγχάνεται με την παραγωγή, καταρχάς, από τα πρωτογενή δεδομένα (Υδρογραφικές εργασίες πεδίου), του χάρτη μεγαλύτερης κλίμακας (πορτολάνα) και στη συνέχεια ακολουθεί η κατασκευή του χάρτη της (επόμενης) μικρότερης κλίμακας, χρησιμοποιώντας ως πηγή τα δεδομένα του χάρτη μεγαλύτερης κλίμακας (πορτολάνας) και ούτω καθεξής, μέχρι τη παραγωγή του χάρτη με την μικρότερη κλίμακα, που είναι κατάλληλη για κάλυψη της εκάστοτε γεωγραφικής περιοχής.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ΙΗΟ για τους έντυπους ναυτικούς χάρτες πρέπει σε αυτούς να απεικονίζονται οι «χρησιμότερες» ισοβαθείς, οι οποίες είναι εκείνες των 0, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500 και 1000 m. Δεν είναι απαραίτητη η σχεδίαση όλων διαδοχικά των προαναφερόμενων ισοβαθών στις περιπτώσεις απότομης μεταβολής της βαθυμετρίας ή γύρωθεν μεμονομένων αβαθών (ΙΗΟ, S-4/B-411). Οι ισοβαθείς των 3, 8, 15, 25, 40, 75 m και πολλαπλάσια των 10 ή 100 m, δύνανται να σχεδιαστούν στους έντυπους ναυτικούς χάρτες, εάν υπάρχουν αντίστοιχα διαθέσιμα δεδομένα και εφόσον αυτά μπορούν επαρκώς να οριοθετήσουν συγκεκριμένα υποθαλάσσια αντικείμενα. Η ισοβαθής των 2500 m μπορεί να απαιτηθεί να σχεδιαστεί για την περιγραφή/απόδοση των ορίων της υφαλοκρηπίδας (βλ. Άρθρο 76 της UNCLOS).

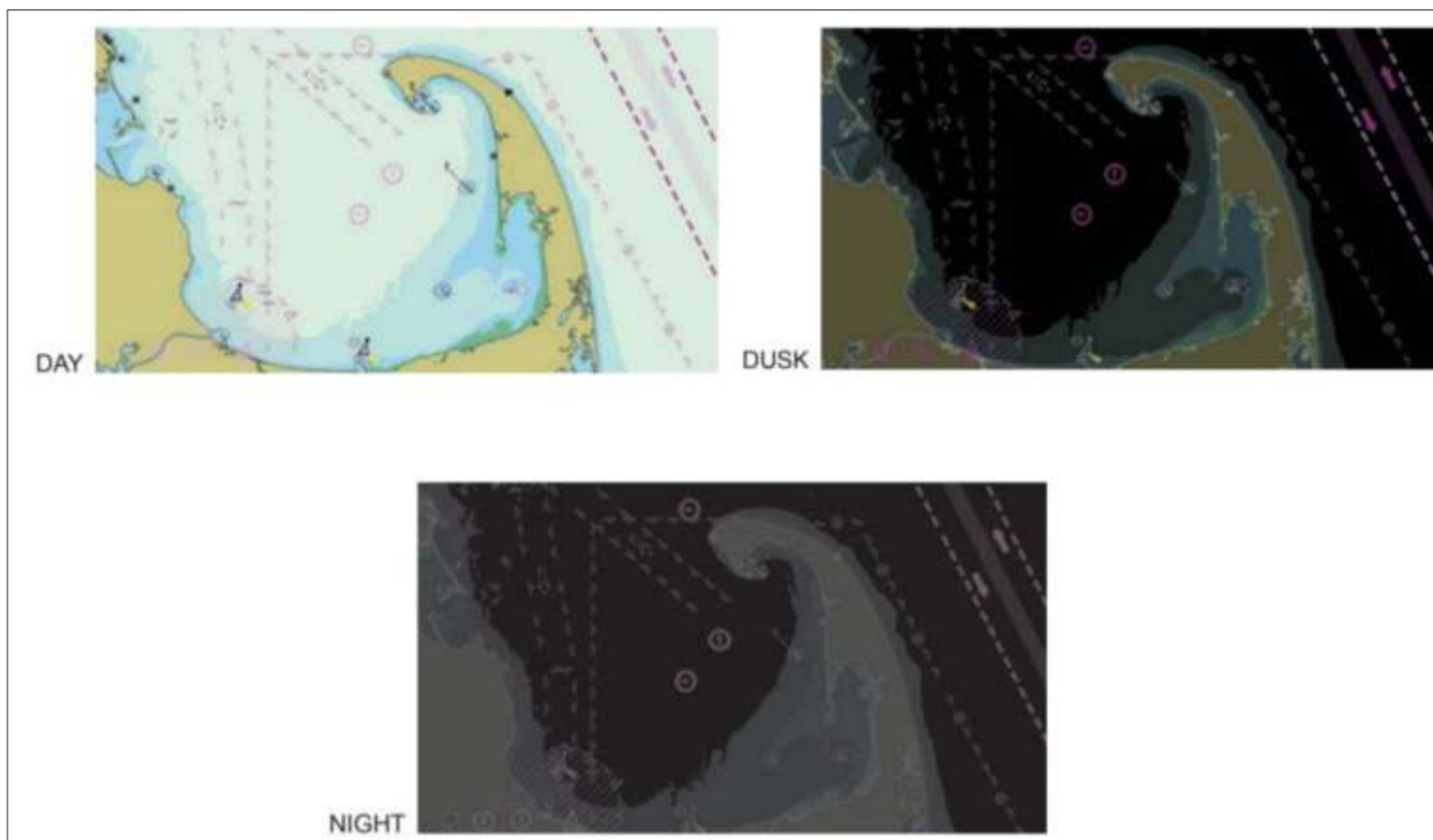
Επίσης, οι θαλάσσιες περιοχές των ρηχών υδάτων (<5 m) απεικονίζονται, στους μεγάλης κλίμακας έντυπους ναυτικούς χάρτες, με μία μπλε ενιαία απόχρωση, η οποία εκτείνεται από την ακτογραμμή μέχρι την ισοβαθή των 5 m. Στους μικρότερης κλίμακας χάρτες η εν λόγω απόχρωση ποικίλει ανάλογα με την κλίμακα του χάρτη και τα επικρατούντα στην περιοχή βάθη. Στις περιοχές μετά τα ρηχά ύδατα, οι ισοβαθείς συνοδεύονται από μία ανοικτού μπλε χρώματος ζώνη, πάχους 1 mm, η οποία τοποθετείται από την πλευρά της ισοβαθούς που κείνται τα ρηχότερα ύδατα. Αντίστοιχα, με μπλε απόχρωση απεικονίζονται όλα τα ρηχά ύδατα, οι περιοχές άνωθεν ναυαγίων, και υποθαλάσσια αντικείμενα/κίνδυνοι που βρίσκονται σε βάθη μικρότερα των 100 m, των οποίων όμως ελεύθερο βάθος άνωθεν αυτών είναι απροσδιόριστο.

Οι περιοχές με αβεβαιότητες ή με βαθυμετρία που προέρχεται από παλαιές βαθυμετρικές αποτυπώσεις, με στοιχεία που είχαν συλλεχθεί με υδρογραφική βολίδα, επισημαίνονται με αντίστοιχη σημείωση ή με ανάλογα τυποποιημένα χαρτογραφικά σύμβολα στους έντυπους ναυτικούς χάρτες, προκειμένου ο ναυτιλλόμενος να λαμβάνει τις κατάλληλες προφυλάξεις και προσοχή όταν διαπλέει αντίστοιχα ύδατα.

#### 2.3.2.3 Κατηγορίες και Προδιαγραφές Ηλεκτρονικών Ναυτικών Χαρτών

Οι ηλεκτρονικοί ναυτικοί χάρτες εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, τους ψηφιδωτούς (raster) και τους διανυσματικούς (vector).

Οι ψηφιακοί ναυτικοί χάρτες τύπου raster απεικονίζουν ακριβώς το περιεχόμενο ενός έντυπου ναυτικού χάρτη και ως εκ τούτου οι προδιαγραφές τους είναι ίδιες με εκείνες των έντυπων ναυτικών χαρτών, με μόνη διαφορά ότι απεικονίζουν το περιεχόμενο του χάρτη με διαφορετικές συνθήκες φωτισμού/θέασης κατά την ημέρα και κατά την νύκτα, για διευκόλυνση του ναυτιλλόμενου. Οι προδιαγραφές των ψηφιδωτών χαρτών (raster) περιγράφονται στην έκδοση IHO S-61 (Product Specification for Raster Navigational Charts - RNC)).



**Εικόνα 2.11 :** Ψηφιδωτός Η/Ν Χάρτης RNC, θέαση ημέρας-νύκτας (<https://nauticalcharts.noaa.gov/publications>).

Ένας ηλεκτρονικός ναυτικός χάρτης raster μορφής (Εικόνα 2.11 ), αποτελείται από επί μέρους στοιχειώδη τμήματα που λέγονται ψηφίδες ή εικονοστοιχεία (pixels: picture elements). Κάθε εικονοστοιχείο προσδιορίζεται με τις συντεταγμένες και το χρώμα της. Στους ναυτικούς χάρτες τα εικονοστοιχεία λαμβάνουν το κατάλληλο χρώμα. Η ευκρίνεια αποδόσεως των γραμμικών και σημειακών στοιχείων ενός χάρτη ψηφιδωτής μορφής εξαρτάται από το μέγεθος των εικονοστοιχείων (όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των εικονοστοιχείων τόσο ευκρινέστερη είναι η γραφική απεικόνιση του χάρτη). Ωστόσο, η ελάττωση του μεγέθους των εικονοστοιχείων ενός χάρτη ψηφιδωτής μορφής αυξάνει τον αριθμό τους με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολύ μεγάλου όγκου ψηφιακά αρχεία. Οι παραπάνω τεχνικές ιδιότητες-χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών ψηφιδωτής μορφής, αποτελούν κοινά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε ψηφιακού αρχείου εικόνας σε ψηφιδωτή μορφή όπως π.χ. εικόνες που προκύπτουν από ανάλυση εικόνων δορυφορικής βαθυμετρίας ή εικόνες που δημιουργούνται από τη σάρωση (scanning) έντυπων φωτογραφιών. Εν τούτοις, οι ναυτικοί χάρτες ψηφιδωτής μορφής διαφέρουν από τα συνηθισμένα αρχεία γραφικών ψηφιδωτής μορφής που δημιουργούνται με μία απλή σάρωση του πρωτοτύπου (όπως π.χ., τα γνωστά αρχεία τύπου tiff, jpeg κλπ.), γιατί τα ψηφιακά αρχεία των ναυτικών χαρτών ψηφιδωτής μορφής πρέπει να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Για παράδειγμα, οι θέσεις των εικονοστοιχείων πρέπει να δίνονται με τις γεωγραφικές τους συντεταγμένες (φ, λ) στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του πρωτότυπου χάρτη. Το αρχείο που προκύπτει από τη σάρωση πρέπει να συνορθωθεί με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού για την απαλοιφή σφαλμάτων που οφείλονται σε γεωμετρικής φύσεως παραμορφώσεις που δημιουργούνται τόσο κατά τη σάρωση, όσο και λόγω πιθανής μεταβολής των διαστάσεων του πρωτοτύπου χάρτη. Ένα εικονοστοιχείο δεν περιέχει πληροφορίες για τις ιδιότητες ή τα χαρακτηριστικά της απεικονιζόμενης πληροφορίας παρά μόνο την τοπολογική σχέση που το διέπει συγκριτικά με γειτονικά εικονοστοιχεία, καθώς και πληροφορίες συναφείς με το χρώμα και τη τιμή της ανακλαστικότητάς του. Δηλαδή, ένα εικονοστοιχείο μαύρου χρώματος μπορεί να είναι ένα σημείο της ακτογραμμής ή ένα σημείο ενός συμβόλου ή μίας επιγραφής (λεζάντας) στον έντυπο χάρτη. (Παλληκάρης, 2009).

Οι χάρτες ψηφιδωτής μορφής που παράγονται και διανέμονται από τις Υδρογραφικές Υπηρεσίες των διαφόρων χωρών, σύμφωνα με τις σχετικές αποφάσεις του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού, ονομάζονται Ναυτικοί χάρτες ψηφιδωτής μορφής RNCs (Raster



Nautical Charts). Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, οι χάρτες RNC αποτελούν την ψηφιακή αναπαραγωγή των έντυπων ναυτικών χαρτών και συνήθως δημιουργούνται σε ψηφιακά αρχεία τύπου HCRF ή BSB. Ειδικότερα, οι ηλεκτρονικοί ναυτικοί χάρτες ψηφιδωτής μορφής (raster charts) που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρονικού χάρτη ανήκουν στις επόμενες κατηγορίες:

Χάρτες σε δομή HCRF. Ο Τύπος (format) HCRF αναπτύχθηκε από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Βρετανικού Ναυαρχείου για την έκδοση των έντυπων Βρετανικών ναυτικών χαρτών σε ψηφιδωτή μορφή γνωστών ως ARCS (Admiralty Raster Chart Service).

Χάρτες σε δομή (format) BSB. Ο τύπος (format) BSB αναπτύχθηκε αρχικά για την έκδοση των ναυτικών χαρτών ψηφιδωτής μορφής της Υδρογραφικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (NOS) και στη συνέχεια υιοθετήθηκε και από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Καναδά. Παράλληλα, διάφορες εταιρείες έχουν προβεί για δική τους εμπορική εκμετάλλευση στην ψηφιακή αναπαραγωγή σε μορφή BSB των έντυπων ναυτικών χαρτών διαφόρων Υδρογραφικών Υπηρεσιών.

Χάρτες σε άλλες δομές (formats). Οι χάρτες αυτοί συνήθως εκδίδονται από διάφορες εταιρείες και συνήθως δημιουργούνται με σάρωση (scanning) των έντυπων ναυτικών χαρτών που έχουν εκδοθεί από διάφορες Υδρογραφικές Υπηρεσίες, ενώ δεν διορθώνονται αυτόματα με αγγελίες προς τους ναυτιλλόμενους. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του IHO, οι χάρτες RNC πρέπει απαραίτητα να έχουν την δυνατότητα αυτόματης ενημέρωσής τους με τις αγγελίες για τους ναυτιλλόμενους (με χρήση του κατάλληλου λογισμικού), ωστόσο οι εκδιδόμενοι χάρτες ψηφιδωτής μορφής που εκδίδονται από διάφορες εταιρείες, κατά κανόνα, δεν διορθώνονται με αγγελίες, όποτε και δεν επικαιροποιούνται όπως οι RNCs (Παλληκάρης, κ.α., 2016).

Οι διανυσματικοί Ηλεκτρονικοί Χάρτες ENCs είναι χαρτογραφικές βάσεις δεδομένων, που προορίζονται για «ειδικό σκοπό» (ναυτιλιακή χρήση), και κατασκευάζονται σύμφωνα με το πρότυπο S-57 του IHO. Επιπλέον οι προαναφερθείσες χαρτογραφικές βάσεις είναι τυποποιημένες ως προς το περιεχόμενο (content), τη δομή (structure) και τον μορφότυπο (format) για απεικόνισή τους από συστήματα ειδικών προδιαγραφών (ECDIS). Οι διανυσματικοί ναυτικοί χάρτες δεν αποτελούν πιστό ψηφιακό αντίγραφο των έντυπων ναυτικών χαρτών και για τον λόγο αυτό ο IHO έχει εκδόσει ειδικές προδιαγραφές, με τα

πρότυπα S-52 (Specifications for Chart Content and Display Aspects of ECDIS) και S-57 (IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data) αντίστοιχα. Η σταδιακά αυξημένη παραγωγή των διανυσματικών ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών (ENC) οδήγησε στην ανάγκη για υιοθέτηση παρόμοιων αρχών με εκείνες που ισχύουν ήδη για τους έντυπους ναυτικών χαρτών, όσον αφορά την ανάπτυξη, την δημιουργία και την επικαιροποίηση χαρτογραφικών σχεδίων ναυτικών χαρτών. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν ανά Περιφερειακή Υδρογραφική Επιτροπή, ομάδες εργασίας (WGs), για τον συντονισμό της παραγωγής των διεθνών ναυτικών χαρτών (ICCWG), έντυπων ή/και ηλεκτρονικών.

Οι βασικές κατηγορίες των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών με βάση την κλίμακά τους είναι αντίστοιχες εκείνων των έντυπων χαρτών, με μικρές όμως διαφοροποιήσεις ως προς το εύρος των κλιμάκων τους όπως αναφέρονται στον Πίνακα 2.5 (IHO, 2018).

**Πίνακας 2.5:** Κατηγορίες Ηλεκτρονικών Ναυτικών Χαρτών (ENCs)

| Κατηγορία | Χρήση                                      | Κλίμακα ENC             |
|-----------|--|-------------------------|
| 1.        | Overview<br>(Σχεδίασης Πλου)               | < 1:3 500 000           |
| 2.        | General<br>(Ναυσιπλοΐας Ανοικτής Θαλάσσης) | 1:1 499 999 – 1:350 000 |
| 3.        | Coastal<br>(Ακτοπλοΐας)                    | 1:349 999 – 1:90 000    |
| 4.        | Approach<br>(Προσέγγισης Ακτών)            | 1:89 999 – 1:22 000     |
| 5.        | Harbour<br>(Λιμενοδεικτών)                 | 1:21 999 – 1:4 000      |
| 6.        | Berthing<br>(Πρόσδεσης-Αγκυροβολίων)       | > 1:4.000               |

Οι εθνικές Υδρογραφικές Υπηρεσίες έχουν κατασκευάσει ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες (ENC) μικρής κλίμακας στηριζόμενοι στην σειρά των έντυπων διεθνών ναυτικών χαρτών (INT) στις κλίμακες 1:10 εκατομμύρια και 1: 3,5 εκατομμύρια. Οι προδιαγραφές και οδηγίες του IHO για την ανάπτυξη και τη επικαιροποίηση των χαρτογραφικών σχεδίων κάλυψης έντυπων διεθνών ναυτικών χαρτών (INT) περιλαμβάνονται στο τμήμα 100 της

έκδοσης S-11 (Μέρος Α). Οι προδιαγραφές και οδηγίες του IHO για την ανάπτυξη και τη επικαιροποίηση των σχεδίων κάλυψης των συστημάτων ENC περιλαμβάνονται στο τμήμα 200 του S-11 (Μέρος Α). Το ισχύον καθεστώς ανάπτυξης των προαναφερομένων χαρτογραφικών σχεδίων ναυτικών χαρτών περιγράφεται στην έκδοση S-11 (Μέρος Β).

Η ναυσιπλοΐα με ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες, η σχεδίαση, η εκτέλεση του πλου, η μέτρηση αποστάσεων και διευθύνσεων μεταξύ σημείων πλου και η επίλυση προβλημάτων ναυσιπλοΐας εκτελείται σε περιβάλλον Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS). Η απεικόνιση των Η/Ν Ναυτικών Χαρτών και η θέση του πλοίου στην οθόνη των Συστημάτων Απεικόνισης Ηλεκτρονικού Η/Ν Χάρτη και πληροφοριών (ECDIS-Electronic Chart Display and Information System), διενεργείται σύμφωνα με τις σχετικές τεχνικές και λειτουργικές προδιαγραφές του IMO και IHO. Σύμφωνα με τις διεθνείς αυτές προδιαγραφές:

«Ένα σύστημα ECDIS είναι ένα σύστημα πληροφοριών για την ναυσιπλοΐα, το οποίο, με επαρκείς εφεδρικές διατάξεις ασφαλείας, είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι καλύπτει τις απαιτήσεις χρήσεως ενημερωμένων έντυπων ναυτικών χαρτών που εκδίδονται από τις επίσημες κρατικές Υδρογραφικές Υπηρεσίες, παρέχοντας την δυνατότητα επιλεκτικής απεικόνισης πληροφοριών από τη βάση δεδομένων ηλεκτρονικών ναυτιλιακών χαρτών του συστήματος SENC (System Electronic Navigational Chart), σε συνδυασμό με την απεικόνιση της θέσεως του σκάφους από πληροφορίες που παρέχονται από διάφορους αισθητήρες, για υποβοήθηση του ναυτιλλόμενου στη σχεδίαση και υποτύπωση του πλου και, εφόσον απαιτείται, με την απεικόνιση επιπρόσθετων ναυτιλιακών πληροφοριών». (IMO Resolution MSC. 232 (82). “Revised Performance Standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS)”, adopted on 5 December 2006, MSC82/24/Add.2/Annex 24). Τα συστήματα ECDIS λειτουργούν έχοντας ως γεωγραφικό υπόβαθρο τους ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες (ENC), οι οποίοι αποτελούν διαδραστικά συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών για πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο (Hecht, *et al.*, 2017).

Σύμφωνα με τα επίσημα κείμενα του IMO και του IHO (IMO 2006, IHO 2000), ο ENC ορίζεται ως :

«Ο ηλεκτρονικός ναυτικός χάρτης (ENC) που είναι ένας διανυσματικός χάρτης με τη μορφή τυποποιημένης βάσης δεδομένων για χρήση του από το ECDIS (IMO, 2006). Οι ENCs εκδίδονται επισήμως από ή υπό την εξουσία ενός κυβερνητικού, εξουσιοδοτημένου Υδρογραφικού Γραφείου ή άλλου σχετικού ιδρύματος, σύμφωνα με τις αυστηρές τεχνικές

προδιαγραφές του IHO γνωστού ως πρότυπο IHO S-57 (IHO, 2000). Οποιαδήποτε άλλα δεδομένα διανυσματικών ναυτικών χαρτών είναι ανεπίσημα και συνεπώς δεν πληρούν τις απαιτήσεις του IMO για ασφαλή πλοήγηση».

Στο ECDIS, τα δεδομένα ENC πρέπει να είναι προσβάσιμα γρήγορα, ώστε να επιτρέπουν την ταχεία εμφάνιση στην οθόνη χωρίς καθυστέρηση. Ωστόσο, διαπιστώθηκε σταδιακά ότι ο αρχικά υιοθετημένος μορφότυπος μεταφοράς δεδομένων των ENC (S-57), δεν παρέχει γρήγορη πρόσβαση. Συνεπώς, για να διευκολυνθεί η γρήγορη απεικόνιση των δεδομένων ENC στην οθόνη, τα περισσότερα ECDIS μετατρέπουν κάθε ομάδα δεδομένων ENC, από το πρότυπο S-57, σε έναν εσωτερικό κώδικα του συστήματος που ονομάζεται «βάση δεδομένων ηλεκτρονικών ναυτιλιακών χαρτών» (SENC). Η SENC είναι η βάση δεδομένων που είναι προσβάσιμη από ένα ECDIS και είναι ισοδύναμη με ένα ενημερωμένο χάρτη (IMO, 2006). Η SENC μπορεί επίσης να περιέχει επιπλέον πληροφορίες που προστίθενται από τον ναυτιλλόμενο και πληροφορίες από άλλες πηγές (IHO, 1994). Κάθε κατασκευαστής λογισμικού ECDIS έχει τη δική του μορφή SENC. Κατά συνέπεια, η μορφή SENC ενδέχεται να διαφέρει μεταξύ των κατασκευαστών ECDIS. Η βάση δεδομένων ηλεκτρονικών ναυτιλιακών χαρτών (SENC) συνίσταται από τα υδρογραφικά και χαρτογραφικά δεδομένα του H/N χάρτη (ENC), από τις διορθώσεις (updates) αυτού, καθώς και από τυχόν άλλα δεδομένα ή πληροφορίες οι οποίες προέρχονται από ναυτιλιακές εκδόσεις, ή/και άλλες πληροφορίες ναυτιλιακού ενδιαφέροντος που εισάγονται χειρωνακτικά από τον ναυτιλλόμενο. Οι χαρτογραφικές και λοιπές ναυτιλιακές πληροφορίες απεικονίζονται επιλεκτικά στην οθόνη του ECDIS, μαζί με τη θέση (στίγμα) του σκάφους, η οποία παρέχεται από το δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης του πλοίου. Τα συστήματα ECDIS υποστηρίζονται από ειδικό λογισμικό σύστημα, με δυνατότητες πολλαπλής απεικόνισης και διασύνδεσης των λοιπών ναυτιλιακών συστημάτων. Η αδιάλειπτη χρήση του ECDIS με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, αφορά πολλούς ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων των ναυτιλλόμενων, των κατασκευαστών εξοπλισμού και συστημάτων πλοήγησης, των υπηρεσιών που εκδίδουν ναυτικούς χάρτες, των παρόχων συντήρησης υλισμικού και λογισμικού, και των πλοιοκτητών.

Εκτός από τους ENC, τα συστήματα ECDIS, ενσωματώνουν και άλλες πληροφορίες από διάφορα διασυνδεδεμένα συστήματα και αισθητήρες του πλοίου, όπως από το Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης (Automatic Identification System- AIS), το Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS), το σύστημα ραδιο-εντοπισμού στόχων (Radio Detection And

Ranging-RADAR/ARPA), το σύστημα προειδοποίησης ναυτιλλομένων (Navigational Telex-NAVTEX). Σύμφωνα με τις αρχικές Αποφάσεις του IMO, το ECDIS πρόσφερε μια εναλλακτική μέθοδο ναυσιπλοΐας για τα πλοία (IMO, 1996). Ωστόσο, τον Δεκέμβριο του 2008, ο IMO, σύμφωνα με ένα σχέδιο εφαρμογής που εκτείνεται από το 2012 έως το 2018, επέβαλε το ECDIS ως υποχρεωτικό εξοπλισμό των διαφόρων τύπων σκαφών (IHO, 2010). Πρέπει να τονιστεί ότι, λόγω του κόστους και της προσπάθειας που απαιτείται για τη συνεχή ενημέρωση των παραδοσιακών έντυπων χαρτών, σύμφωνα με τις σχετικές αγγελίες για τους ναυτιλλόμενους, η υποχρεωτική χρήση του ECDIS μειώνει την παραδοσιακή χρήση των έντυπων ναυτικών χαρτών στα περισσότερα πλοία (Gale, 2010).

Τα συστήματα απεικόνισης ηλεκτρονικού χάρτη (ECDIS) που είναι διαθέσιμα σήμερα στο ναυτιλλόμενο δεν παρέχουν όλα τις ίδιες δυνατότητες και λειτουργίες. Οι βασικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων συστημάτων απεικόνισης ηλεκτρονικού χάρτη σχετίζονται με την κατηγορία των ηλεκτρονικών χαρτών που χρησιμοποιεί το εκάστοτε σύστημα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού (hardware) του συστήματος, και τις δυνατότητες του λογισμικού (ναυτιλιακές λειτουργίες) του. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά και τις προβλεπόμενες προδιαγραφές του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), τα συστήματα απεικόνισης ηλεκτρονικού χάρτη κατατάσσονται στις επόμενες βασικές κατηγορίες:

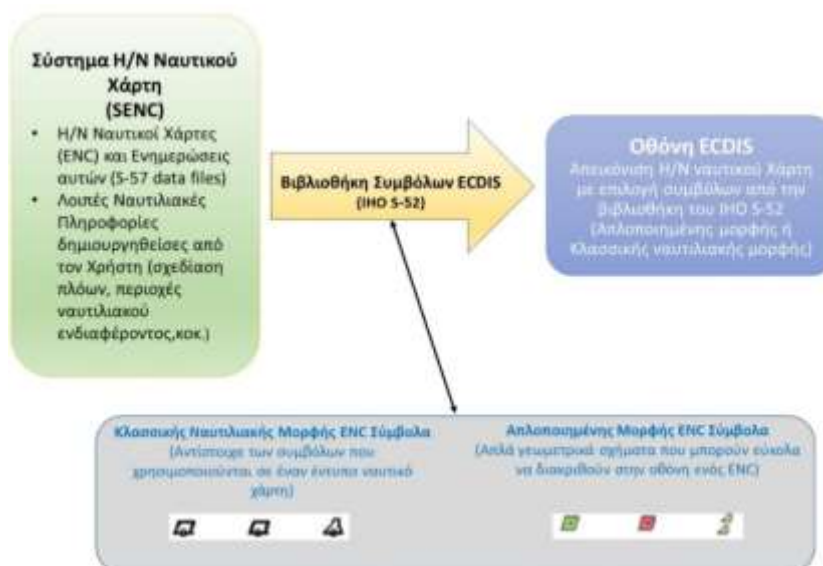
α. Συστήματα ECDIS (Electronic Chart Display and Information Systems - Συστήματα Απεικόνισης Ηλεκτρονικού Χάρτη και Πληροφοριών). Τα συστήματα ECDIS καλύπτουν πλήρως τις σχετικές προδιαγραφές του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), σχετικά με τον τύπο (κατηγορία) των ηλεκτρονικών χαρτών, τα τεχνικά χαρακτηριστικά υλικού (hardware) και τις ναυτιλιακές λειτουργίες (δυνατότητες λογισμικού).

β. Συστήματα RCDS (Raster Chart Display System). Περίπτωση κατά την οποία το σύστημα ECDIS λειτουργεί σαν σύστημα απεικόνισης χαρτών ψηφιδωτής μορφής (Raster Chart Display). Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας ο ναυτιλλόμενος οφείλει να τηρεί πλήρως ενημερωμένο αρχείο με τις αγγελίες για τους ναυτιλλόμενους και όλους τους προβλεπόμενους για τον πλου έντυπους ναυτικούς χάρτες.

γ. Συστήματα ECS (Electronic Chart Systems). Τα συστήματα ECS είναι εκείνα τα συστήματα ηλεκτρονικού χάρτη, τα οποία δεν καλύπτουν τις προδιαγραφές των συστημάτων ECDIS του IMO.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού και οι λειτουργικές δυνατότητες του λογισμικού του ECDIS πρέπει να καλύπτουν τις καθορισθείσες από τον IMO ελάχιστες απαιτήσεις. Σύμφωνα με τις σχετικές αποφάσεις του IMO, η χρήση των συστημάτων ECDIS με ηλεκτρονικούς χάρτες ENC θεωρείται ισοδύναμη με τη χρήση των παραδοσιακών έντυπων ναυτικών χαρτών και ως εκ τούτου απαλλάσσει τον ναυτιλλόμενο από την υποχρέωση τηρήσεως ενημερωμένης σειράς ναυτικών χαρτών. Εν τούτοις, επειδή επί του παρόντος δεν υπάρχει πλήρης κάλυψη όλων των θαλάσσιων περιοχών με ηλεκτρονικούς χάρτες ENC, για περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη ENC, το σύστημα ECDIS μπορεί να λειτουργεί και με ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες ψηφιδωτής μορφής RNCs (Raster Nautical Charts).

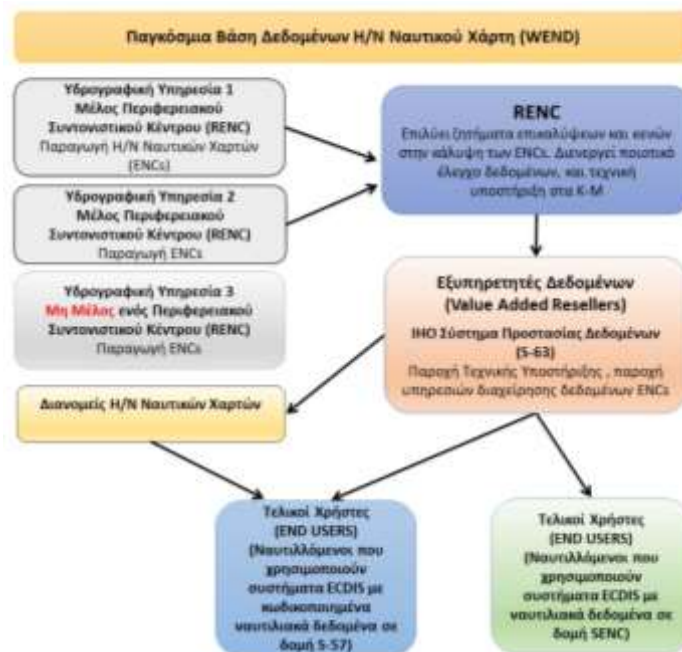
Τα δεδομένα ENC που περιέχονται στην SENC απεικονίζονται στην οθόνη ενός ECDIS με την τυποποιημένη συμβολογραφία του προτύπου S-52 του IHO γνωστού ως «Βιβλιοθήκη παρουσίασης ECDIS». Η τυποποιημένη συμβολολογία S-52 αποτελείται από δύο σύνολα συμβόλων τα «παραδοσιακά σύμβολα» και τα «απλοποιημένα σύμβολα». Ο χρήστης του ECDIS έχει την δυνατότητα επιλογής/εναλλαγής μεταξύ παραδοσιακών και τυποποιημένων συμβόλων (Εικόνα 2.12 ), αξιοποιώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας (Παλληκάρης, κ.α., 2016).



**Εικόνα 2.12 :** Τα δεδομένα ENC του SENC εμφανίζονται στην οθόνη ECDIS με την τυποποιημένη συμβολοσειρά S-52.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική και ασφαλής διάδοση των ENC στους τελικούς χρήστες (ναυτιλλόμενους), ο IHO έχει αναπτύξει την βάση δεδομένων WEND και του «Προγράμματος Προστασίας Δεδομένων» (DPS-Data Protection Scheme).

Η βάση δεδομένων WEND (Εικόνα 2.13 ) είναι ένα παγκόσμιο δίκτυο δεδομένων ENC, βασισμένο στα πρότυπα του IHO, σχεδιασμένο ειδικά για να καλύψει τις ανάγκες της θαλάσσιας πλοήγησης/ναυσιπλοΐας χρησιμοποιώντας το ECDIS (IHO-S32-A1). Η βάση δεδομένων WEND περιλαμβάνει δύο (2) συνιστώσες. Μία συνιστώσα/διαδικασία που διέπει τη διεθνή συνεργασία και τα «Περιφερειακά Κέντρα Συντονισμού» (RENCs-Regional Coordinating Chart Centers), τα οποία υποστηρίζουν τη διανομή των υψηλής ποιότητας δεδομένων ENC, σύμφωνα με το «Σχέδιο Προστασίας Δεδομένων IHO».



Εικόνα 2.13 : Η Οργάνωση της βάσης δεδομένων WEND.

Τα RENCs είναι διοικητικές οντότητες που δημιουργούνται από τα συνεργαζόμενα κράτη-μέλη της IHO για την επίλυση των αλληλεπικαλύψεων ή/και των κενών στην κάλυψη των ENC, είναι υπεύθυνα για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τις τεχνικές προδιαγραφές του IHO για την παραγωγή ENC και υποστηρίζουν την παροχή έγκαιρης, αξιόπιστης, παγκόσμιας και ομοιόμορφης υπηρεσίας διανομής δεδομένων ENC. Μέχρι σήμερα, λειτουργούν τρία (3) RENCs, τα οποία είναι η «Primar» με έδρα τη Νορβηγία, το IC-ENC, με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο και το RENCs της Αυστραλίας (IHO S-32, IHO S-66, Hecht, *et al.*, 2017, σελ. 288-294).

Οι χάρτες ENC παράγονται από ψηφιακά γεωγραφικά δεδομένα και πληροφορίες που απεικονίζονται στους έντυπους χάρτες, από υδρογραφικές εργασίες πεδίου, από άλλες ναυτιλιακής φύσεως στοιχεία και πληροφορίες. Τα εν λόγω γεωγραφικά δεδομένα μετά την ψηφιοποίηση τους μετατρέπονται σε γεωχωρικά αντικείμενα (objects). Οι βασικότερες κατηγορίες γεωχωρικών αντικειμένων είναι τα «Σημειακά αντικείμενα» (π.χ. θέσεις φανών, σημαντήρων, ναυαγίων, βολισμάτων, καταφανών σημείων επί της ακτής, κλπ.), τα «Γραμμικά αντικείμενα» (π.χ. ισοβαθείς, ακτογραμμή, υποβρύχια καλώδια, υποθαλάσσιοι αγωγοί, κτλ) και τα «Επιφανειακά αντικείμενα» (απαγορευμένες περιοχές, πεδία βολής, δίαυλοι ασφαλούς ναυσιπλοΐας, κλπ). Τα παραπάνω «σημειακά», «γραμμικά» και «επιφανειακά» αντικείμενα συνοδεύονται με ιδιότητες, οι οποίες περιγράφουν χαρακτηριστικά (attributes) του αντικειμένου όπως αυτό εμφανίζεται στην πραγματικότητα (πεδίο), όπως π.χ. μία σημειακή γεωγραφική πληροφορία που πρέπει να απεικονίζεται με συγκεκριμένο σύμβολο, απόχρωση και πληροφορία/χαρακτηρικά, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές του ΙΗΟ. Έτσι λοιπόν, στην περίπτωση απεικόνισης ενός ναυαγίου σε ένα διανυσματικό χάρτη, πρέπει στο σημείο (θέση) που έχει εντοπιστεί αυτό, από την υδρογραφική εργασία πεδίου, να απεικονίζεται το σύμβολο του σαν ναύαγιο, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (σύμβολο, ελεύθερο βάθος άνωθεν ναυαγίου, προσανατολισμός, κλπ.) (Παλληκάρης, κ.α. 2016)

Ο Η/Ν ναυτικός χάρτης (ENC) περιέχει όλες τις πληροφορίες (Εικόνα 2.14 ) που περιλαμβάνονται σε έναν έντυπο ναυτιλιακό χάρτη, ώστε να επιτυγχάνεται η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις περιλαμβάνει και επιπρόσθετες πληροφορίες από τους έντυπους ναυτικούς χάρτες, και πληροφορίες από άλλες ναυτιλιακές εκδόσεις (π.χ. πληροφορίες από τον πλοηγό, φαροδείκτη, κ.α.). Ο χάρτης ENC αποτελεί μια τυποποιημένη βάση δεδομένων για χρήση από το ECDIS. Συνεπώς ο χρήστης του ECDIS μπορεί να απεικονίσει στην οθόνη μερικά, ή όλα τα στοιχεία της βάσης δεδομένων, σύμφωνα με τις προτυποποιημένες λειτουργικές προδιαγραφές του ΙΜΟ για το ECDIS. Στο παράδειγμα της Εικόνα 2.14 φαίνεται η απεικόνιση του ιδίου ENC με διαφορετική επιλογή της γενίκευσης της βαθυμετρίας.

Οι διανυσματικοί ηλεκτρονικοί ναυτικοί χάρτες κατασκευάζονται σύμφωνα με το πρότυπο S-57 του ΙΗΟ. Το εν λόγω πρότυπο αφορά στον τρόπο και μορφότυπο μεταφοράς ψηφιακών υδρογραφικών δεδομένων μεταξύ των υδρογραφικών υπηρεσιών των διαφόρων κρατών και περιγράφει την διαδικασία που πρέπει να τηρείται για τη διανομή τους σε κατασκευαστές ναυτιλιακών συστημάτων, ναυτιλλόμενους και άλλους χρήστες



ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών. Το πρότυπο αυτό έχει δημιουργηθεί για χρήση κυρίως από τα ECDIS. Η μετάδοση της γεωγραφικής πληροφορίας που απεικονίζεται σε ένα διανυσματικό χάρτη και η διανομή της, πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην έχει χαθεί καμία πληροφορία σημαντική για τους ναυτιλλόμενους από την βάση δεδομένων του ECDIS. Το πρότυπο S-57 έχει τεθεί σε εφαρμογή από τον Μάιο 1992, τον Νοέμβριο 1996 κυκλοφόρησε η έκδοση 3.0 και τον Νοέμβριο 2000 η έκδοση 3.1. Το εν λόγω πρότυπο (IHO/S-57) μπορεί να αποθηκεύει πληροφορίες περιγραφικού περιεχομένου, οι οποίες δύνανται να συνδεθούν με άλλα χωρικά αντικείμενα της βάσης δεδομένων του H/N χάρτη, με περισσότερες της μίας τοπολογικές σχέσης μεταξύ τους. Παράλληλα με το S-57, όπως προαναφέρθηκε, ο IHO επέλεξε ένα πρότυπο για την παρουσίαση του περιεχομένου ENC στο ECDIS που δημοσιεύτηκε στην ειδική έκδοση με αριθμ. 52 ή S-52. Τον Νοέμβριο του 1988 ιδρύθηκε μία ομάδα εργασίας υπό την αιγίδα του IHO για την ανάπτυξη χρωμάτων και συμβόλων (Colours and Symbols Maintenance Working Group – CSMWG). Μετά από δύο χρόνια έρευνας και δοκιμών τον Ιούνιο του 1990 παρουσιάστηκε το S-52, Ed. 1.0.

Ο στόχος του S-52 ήταν να συμβάλει στην ασφαλή λειτουργία των συστημάτων ECDIS με την κατάλληλη χρήση μιας βάσης γεωχωρικών δεδομένων καθώς και συμπληρωματικών επιπέδων απεικόνισης για τα δεδομένα ENC, τα πρότυπα συμβόλων, τα χρώματα και την τυποποιημένη συσχέτιση τους με τα αντικείμενα και τα χαρακτηριστικά τους, την κατάλληλη συμβατότητα με τα σύμβολα των έντυπων χαρτών, όπως τυποποιείται στις προδιαγραφές του IHO, διασφαλίζοντας ότι:

- Η οθόνη του εκάστοτε συστήματος απεικόνισης είναι καθαρή και σαφής,
- Δεν υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με την διάκριση των χρωμάτων και των συμβόλων στην οθόνη,
- Πρόκειται για ένα πρότυπο για την παρουσίαση των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών στο ECDIS φιλικό στην χρήση από τους ναυτιλλόμενους και το οποίο μπορεί να αναγνωριστεί αμέσως χωρίς να δημιουργήσει σύγχυση.

Η έκδοση 3.1 του προτύπου μετάδοσης/μεταφοράς για τα ψηφιακά υδρογραφικά δεδομένα, με ειδικό αριθμό S-57, αντικαθιστά την προηγούμενη έκδοση 3.0 με ημερομηνία έκδοσης Νοέμβριος 1996. Η έκδοση 3.1 έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Εργασίας Μεταφοράς Συντήρησης και Ανάπτυξης Εφαρμογών (Transfer Standard Maintenance and Application Development - TSMAD), της επιτροπής σύνταξης των Απαιτήσεων για

Υδρογραφικά Στοιχεία των Πληροφοριακών Συστημάτων (Committee on Hydrographic Requirements for Information Systems - CHRIS) του IHO. Το S-57 Edition 3.1 κυκλοφόρησε επισήμως τον Νοέμβριο του 2000.

Ο IHO από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 αναγνώρισε τις αδυναμίες του προτύπου S-57. Παρόλο που αποδείχθηκε ότι είναι ένα καλό πρότυπο το οποίο επέτρεψε σημαντική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών, ωστόσο παρατηρήθηκαν σημαντικοί περιορισμοί καθώς:

- Αναπτύχθηκε κυρίως για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών για εγκατάσταση σε συστήματα ECDIS.
- Παρουσιάζει ένα δύσκαμπτο σύστημα συντήρησης, ενώ το επαναλαμβανόμενο πάγωμα των προτύπων για μακρές περιόδους είναι αντιπαραγωγικό.
- Η τρέχουσα δομή του προτύπου δεν υποστηρίζει μελλοντικές τεχνικές απαιτήσεις (βαθυμετρία με πλέγμα - grid bathymetry) και χρονικά μεταβαλλόμενες πληροφορίες.
- Η επαγωγή του μοντέλου δεδομένων εντός του μορφότυπου περιορίζει την ευελιξία και τη δυνατότητα χρήσης και άλλων μηχανισμών για τη μεταφορά δεδομένων.

Για τους παραπάνω λόγους και για άλλες ελλείψεις, η επιτροπή του IHO για τις υδρογραφικές απαιτήσεις για τα πληροφοριακά συστήματα (CHRIS) προγραμμάτισε μια ενδεδειγμένη αναθεώρηση του S-57 που άρχισε από τον Νοέμβριο του 2000. Με την πάροδο των ετών και τη εμπειρία που αποκτήθηκε από την χρήση του S-57, πολλοί υιοθέτησαν την υπόψη προδιαγραφή προϊόντος ENC. Αρχικά, αν και δεν ήταν η πρόθεση του IHO, ο οργανισμός αντικατέστησε το όνομα του σχεδιαζόμενου S-57 4.0 το 2005, σε S-100.

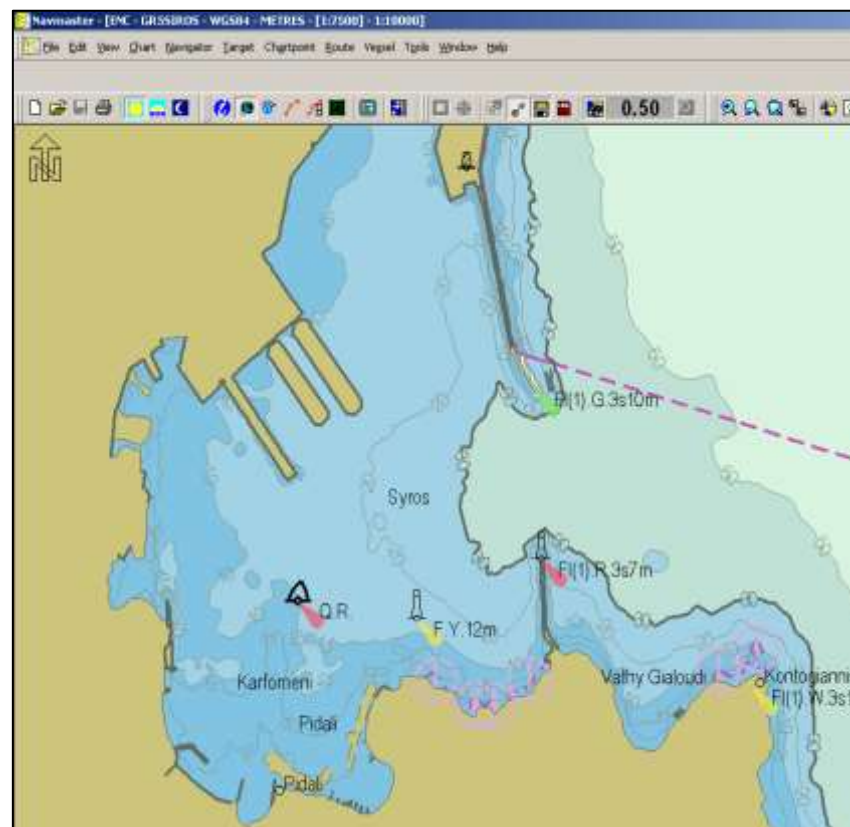
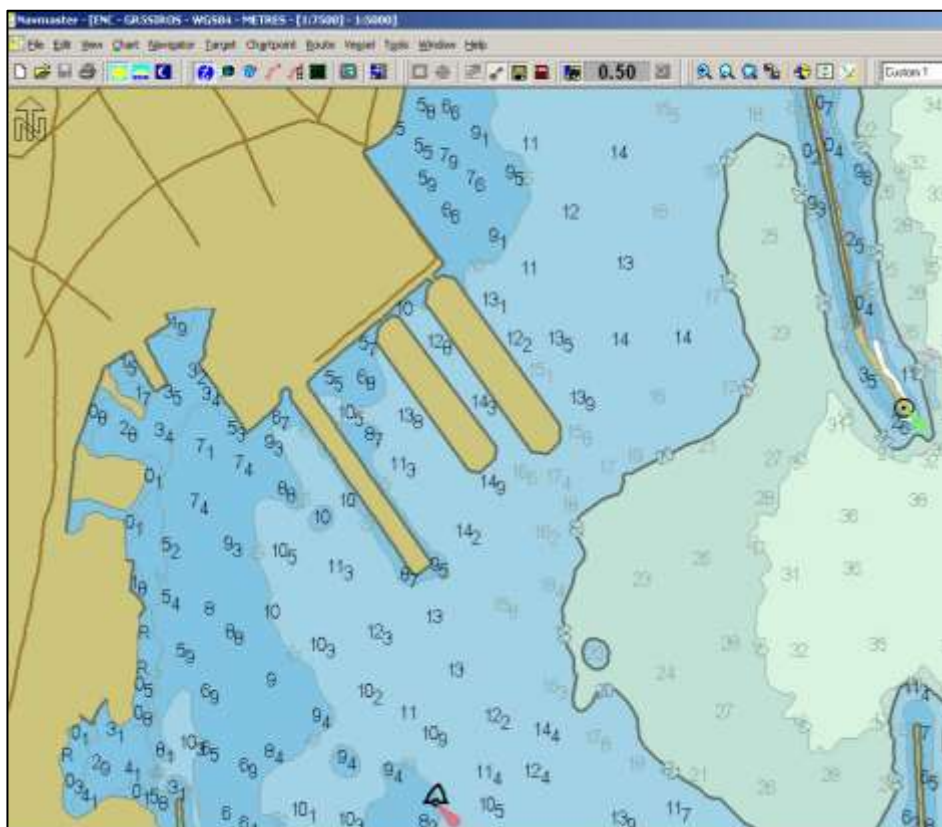
Το πρότυπο S-100 (Universal Hydrographic Data Model) κυκλοφόρησε επισήμως τον Ιανουάριο του 2010, και επί της ουσίας υποστηρίζει ένα πολύ ευρύτερο φάσμα υδρογραφικών πηγών δεδομένων, προϊόντων και πελατών. Είναι πλήρως συμβατό με τα διεθνή πρότυπα γεωχωρικών δεδομένων, ειδικά με τη σειρά γεωγραφικών προτύπων ISO 19100, με αποτέλεσμα να επιτρέπει την ευκολότερη ενσωμάτωση υδρογραφικών δεδομένων και εφαρμογών σε ποικίλες γεωχωρικές εφαρμογές [Ward, 2011].

Το S-100 υποστηρίζει μεγαλύτερο αριθμό πηγών ψηφιακών δεδομένων και προϊόντων που σχετίζονται με την υδρογραφία. Περιλαμβάνει νέα χωρικά μοντέλα για την υποστήριξη των εικόνων και των δεδομένων με πλέγμα, 3D και χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα (x, y, z και χρόνος) και νέες εφαρμογές που ξεπερνούν το πεδίο εφαρμογής της παραδοσιακής υδρογραφίας (π.χ. βαθυμετρία υψηλής πυκνότητας, θαλάσσια ταξινόμηση, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, κλπ.). Το S-100 επιτρέπει τη δυναμική ενημέρωση των δεδομένων, συμβόλων και κώδικα, καθώς και την αποτελεσματικότερη χρήση πρόσθετων δεδομένων που συλλέχθηκαν, σύμφωνα με το μοντέλο πλαισίου S-100 και άλλες γεωγραφικές δομές δεδομένων συμβατές με το ISO 19100. Το S-100 ουσιαστικά, επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής του υπάρχοντος προτύπου κατασκευής ηλεκτρονικών χαρτών S-57. Το S-100 είναι εγγενώς πιο «ευέλικτο» πρότυπο από το S-57. Το νέο πρότυπο προβλέπει τη χρήση εικόνων και δεδομένων πλέγματος, βελτιωμένων μεταδεδομένων και πολλαπλών δομών κωδικοποίησης. Μια ιδιαίτερα σημαντική πτυχή του S-100 είναι ότι παρέχει το πλαίσιο για την ανάπτυξη της επόμενης γενιάς ENC, καθώς και άλλα συναφή ψηφιακά προϊόντα που απαιτούνται από τις υδρογραφικές, ναυτιλιακές και GIS κοινότητες. Επί του παρόντος, ο IHO έχει εγκρίνει τις προδιαγραφές προϊόντων S-100 για βαθυμετρία υψηλής ανάλυσης και για τις λοιπές ναυτιλιακές εκδόσεις, πλην των ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών. Άλλες πιθανές προδιαγραφές προϊόντος που βασίζονται στο πρότυπο S-100 ενδέχεται να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την στάθμη της θάλασσας (παλίρροια) σε πραγματικό χρόνο και πληροφορίες για τις διαδικασίες αναταλλαγής πληροφοριών με λιμένες. Στο μέλλον, η χρήση ενός ECDIS ικανού να διαχειρίζεται πολλαπλά προϊόντα S-100, αναμένεται ότι θα προσφέρει περισσότερες και καλύτερες δυνατότητες λήψης απόφασης από τον ναυτιλλόμενο για την ασφαλή πλοήγηση του πλοίου, συμπεριλαμβάνοντας πληροφορίες παλίρροιας σε πραγματικό χρόνο και ναυτιλιακές πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε εκδόσεις πλοηγών (Sailing Directions).

Το S-101 αποτελεί μια νέα προδιαγραφή προϊόντος για τον ηλεκτρονικό ναυτικό χάρτη (ENC). Σήμερα βρίσκεται σε εξέλιξη από την Ομάδα Εργασίας για την Μεταφορά, Ανάπτυξη και Συντήρηση Εφαρμογών του IHO (TSMAD). Οι ENC δομής S-101 αναμένεται να παραμείνουν, το βασικό εργαλείο πλοήγησης στα ECDIS με αποτέλεσμα τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του προτύπου S-57 να διατηρούνται. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τις εμπειρίες και τα σχόλια των ενδιαφερομένων χρηστών που έχουν αποκτηθεί εδώ και αρκετά

χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πολλές νέες ιδέες και εφαρμογές, με στόχο τη βελτίωση της διαχείρισης των δεδομένων και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των χρηστών. Πολλές από τις αλλαγές μπορεί να φαίνονται ήσσονος σημασίας, αλλά στο σύνολό τους θα διασφαλίσουν ότι το S-101, σε μεγάλο βαθμό, θα επικρατήσει στο μέλλον, έναντι του S-57. Το S-101 αντλεί αρκετά στοιχεία από τις τοπολογικές οντότητες του S-100, όπως για παράδειγμα από τους καταλόγους ανταλλαγής και δυναμικών χαρακτηριστικών και απεικόνισης, τα ακριβέστερα γεωμετρικά μοντέλα, τους τύπους πληροφοριών και άλλα σύνθετα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η βελτιωμένη λειτουργικότητα θα οδηγήσει σε αποτελεσματικότερη διαχείριση των ναυτιλιακών πληροφοριών/δεδομένων και καλύτερη απεικόνιση τους στα συστήματα ECDIS, εξαλείφοντας ή μειώνοντας τον αριθμό των συμβατικών διαδικασιών.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του S-101 θα είναι η δυνατότητα εισαγωγής πρόσθετων λειτουργιών που δεν είναι διαθέσιμες στα ENCs δομής S-57. Τα S-101 ENC θα αποτελέσουν τελικά το βασικό επίπεδο ναυτιλιακών πληροφοριών σε ένα ECDIS.



Ο χάρτης ENC αποτελεί μια τυποποιημένη βάση δεδομένων για χρήση από το ECDIS. Συνεπώς ο χρήστης του ECDIS μπορεί να απεικονίσει στην οθόνη μερικά, ή όλα τα στοιχεία της βάσης δεδομένων, σύμφωνα με τις προτυποποιημένες λειτουργικές προδιαγραφές του IMO για το ECDIS. Στο παράδειγμα αυτό φαίνεται η απεικόνιση του ίδιου ENC με διαφορετική επιλογή της γενίκευσης της βαθυμετρίας.

**Εικόνα 2.14 :** Ηλεκτρονικός Ναυτιλιακός Χάρτης ENC λιμένα Σύρου.

### 2.3.3 Μέθοδοι και Προδιαγραφές Εκτέλεσης Βαθυμετρήσεων για την Έκδοση και Ενημέρωση των Ναυτικών Χαρτών

#### 2.3.3.1 Ιστορική Εξέλιξη, Σημερινή Κατάσταση και Προοπτικές Μεθόδων Υδρογράφησης-Βαθυμετρίας

Σύμφωνα με τον Διεθνή Υδρογραφικό Οργανισμό (Ι.Η.Ο.) η επιστήμη της Υδρογραφίας ορίζεται ως :

*«Ο κλάδος των εφαρμοσμένων επιστημών που ασχολείται με τη μέτρηση και την περιγραφή των χαρακτηριστικών των θαλασσών και των παράκτιων περιοχών, με πρωταρχικό σκοπό τη ναυσιπλοΐα συμπεριλαμβανομένων και όλων των άλλων θαλάσσιων σκοπών και δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, των υπεράκτιων ρευνητικών δραστηριοτήτων, της προστασίας του περιβάλλοντος καθώς και Υπηρεσίες πρόγνωσης» (IHB, 2005).*

Άρα, η Υδρογραφία είναι εκείνος ο κλάδος των εφαρμοσμένων Γεωεπιστημών, που αφορά στην εκτέλεση μετρήσεων στο πεδίο, ήτοι σε παράκτιες και πελάγιες περιοχές, που σκοπό έχουν την περιγραφή του ανάγλυφου του θαλασσίου πυθμένα και των αντικειμένων που βρίσκονται επί αυτού, με πρωταρχικό σκοπό την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας καθώς και άλλων δραστηριοτήτων, όπως είναι η θαλάσσια έρευνα, η έρευνα υδρογονανθράκων, δραστηριότητες προστασίας του θαλασσίου περιβάλλοντος και διαχείρισης της παράκτιας ζώνης. Επίσης, η Υδρογραφία ως επιστήμη δραστηριοποιείται και με υπηρεσίες πρόγνωσης θαλασσίων φαινομένων. Ωστόσο, οι εφαρμογές της Υδρογραφίας δεν περιορίζονται μόνο σε μετρήσεις στις θαλάσσιες περιοχές αλλά και σε μετρήσεις σε ποτάμια, πλωτά ποτάμια Δέλτα και λίμνες.

Στην ουσία, η εκτέλεση των μετρήσεων στην Υδρογραφία, στις περισσότερες των περιπτώσεων, γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της Τηλεανίχνευσης/Τηλεπισκόπησης. Δηλαδή, οι μετρήσεις που αφορούν στην απόδοση του θαλασσίου ανάγλυφου, γίνονται χωρίς το εκάστοτε σύστημα μέτρησης (π.χ. ηχοβολιστικό (H/B)) να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του υδάτινου πυθμένα. Τα ακουστικά ή άλλα συμβατικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στις υδρογραφικές αποτυπώσεις, βρίσκονται σε κάποιο σκάφος, στην στάθμη της εκάστοτε

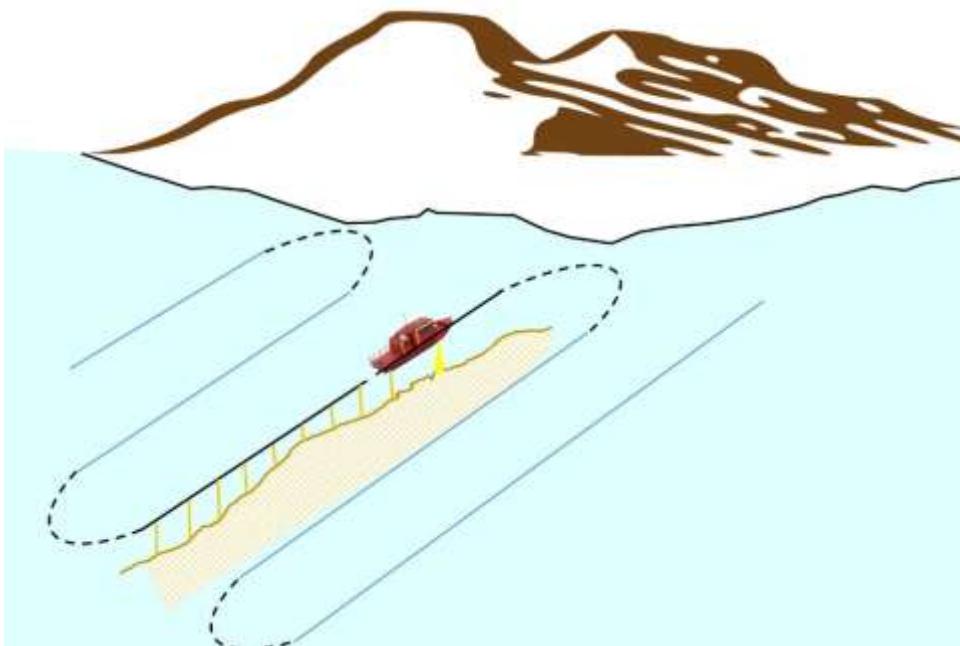
επιφάνειας της θάλασσας, ήτοι σε αποστάσεις, πολλές φορές, αρκετών εκατοντάδων μέτρων, μακριά από την επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα, η οποία τελικά μετράται.

Οι προδιαγραφές εκτέλεσης βαθυμετρικών αποτυπώσεων (υδρογραφήσεων/ερευνών), έχουν καθοριστεί υπό την αιγίδα του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού (I.H.O.) και περιγράφονται στην ειδική έκδοση του Οργανισμού με τίτλο «IHO Standards for Hydrographic Surveys-Special Publication No. 44» (IHO, Standards for Hydrographic Surveys, 2008). Οι πρώτες προσπάθειες του IHO να συνταχθούν κάποιες προδιαγραφές λήφθηκαν κατά την διάρκεια της 12ης Διεθνούς Υδρογραφικής Σύσκεψης το 1957. Ακολούθως, το 1962 σχηματίστηκε μία ομάδα εργασίας από τρία (3) κράτη-μέλη του Οργανισμού και συγκεκριμένα από τις Η.Π.Α., την Φιλανδία και την Βραζιλία, με σκοπό την προετοιμασία του πρώτου σχεδίου έκδοσης των προδιαγραφών υδρογράφησης το 1968. Το 2008 εκδόθηκε η 5η Έκδοση των Διεθνών Προδιαγραφών, η οποία βρίσκεται μέχρι σήμερα σε ισχύ.

Σύμφωνα με τις παλαιότερες προδιαγραφές του IHO, βασικό κριτήριο για τον τρόπο συλλογής των δεδομένων πεδίου, αποτελούσε η κλίμακα της υδρογραφικής αποτύπωσης. Η τελευταία (κλίμακα υδρογράφησης) καθόριζε ουσιαστικά την πυκνότητα των βαθών και συνδεόταν κυρίως από την κλίμακα του ναυτικού χάρτη που επρόκειτο να εκδοθεί. Η γενική αρχή που ίσχυε ήταν ότι η κλίμακα υδρογράφησης έπρεπε να είναι μεγαλύτερη και τουλάχιστον διπλάσια από την κλίμακα του χάρτη, ενώ σε καμία περίπτωση η κλίμακα αποτύπωσης δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την κλίμακα του υπό έκδοση ναυτικού χάρτη. Πρέπει να τονιστεί, ότι μία υδρογραφική εργασία (αποτύπωση) που γίνεται για να καλύψει την συλλογή δεδομένων από μία ευρύτερη θαλάσσια περιοχή για την έκδοση του αντίστοιχου ναυτικού χάρτη, συνήθως περιλαμβάνει αποτύπωση διαφόρων παράκτιων και πελάγιων περιοχών σε διαφορετικές κλίμακες, αναλόγως των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε υποπεριοχής (π.χ. βάθη, μορφολογία βυθού, ναυτιλιακή κίνηση κλπ). Η κλίμακα της υδρογράφησης ήταν, και συνεχίζει σε κάποιες περιπτώσεις να είναι, συνάρτηση της απόστασης των γραμμών υδρογράφησης (βολιστικών γραμμών). Οι βολιστικές γραμμές έχουν συνήθως κατεύθυνση κάθετη στην ακτογραμμή (Εικόνα 2.15 ) ή στη περίπτωση που η ακτογραμμή είναι πολυσχιδής κατευθύνονται σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία της ακτής. Οι αποστάσεις μεταξύ των βολιστικών γραμμών εξαρτώνται από την κλίμακα

υδρογραφήσεως (αποτυπώσεως) και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής (βάθη, μορφολογία βυθού, ναυτιλιακή κίνηση, κ.λ.π).

Σύμφωνα με τις (τότε) προδιαγραφές του Ι.Η.Ο, το μέγιστο επιτρεπόμενο διάστημα μεταξύ των βολιστικών γραμμών είναι 10 mm στην κλίμακα της αποτυπώσεως, ενώ οι βολιστικές γραμμές ελέγχου, που τέμνουν συνήθως κάθετα τις κύριες βολιστικές γραμμές, δεν πρέπει να υπερβούν το 10% της απόστασης των κυρίων γραμμών υδρογράφησης.



**Εικόνα 2.15 :** Βολιστικές Γραμμές Υδρογράφησης.

#### 2.3.3.2 Διεθνείς Προδιαγραφές Εκτέλεσης Υδρογραφικών Εργασιών /Βαθυμετρίας

Σύμφωνα με το πλέον πρόσφατο πρότυπο του ΙΗΟ (ΙΗΟ, 2008) η πυκνότητα συλλογής των υδρογραφικών/βαθυμετρικών δεδομένων εξαρτάται από την σημαντικότητα της περιοχής ερεύνης με κριτήριο την ασφάλεια της ασφάλειας ναυσιπλοΐας. Με βάση τις εν ισχύ διεθνείς προδιαγραφές, οι υδρογραφικές εργασίες κατηγοριοποιούνται με κύριο στόχο την αξιοποίησή τους στην σύνθεση ναυτιλιακών χαρτών. Σύμφωνα με τον Ι.Η.Ο. τα «ελάχιστα» πρότυπα (minimum standards) για τη διεξαγωγή υδρογραφικών εργασιών (αποτυπώσεων) ταξινομούνται σε τέσσερις (4) κατηγορίες, με βάση την σπουδαιότητα των περιοχών ερεύνης. Τα πρότυπα αυτά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από κρατικούς



οργανισμούς ή άλλους ερευνητικούς οργανισμούς που δραστηριοποιούνται στη συλλογή δεδομένων από θαλάσσιες περιοχές, εφόσον παράγουν προϊόντα (π.χ. χάρτες, ναυτιλιακές εκδόσεις, κτλ) που προορίζονται για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Συγκεκριμένα, οι προτεινόμενες από τον ΙΗΟ κατηγορίες υδρογραφικών εργασιών είναι οι «Special Order surveys» (Ειδικής Κατηγορίας Έρευνες), η «Order 1a» (Κατηγορίας 1α), η «Order 1b» (Κατηγορίας 1β) και η «Order 2» (Κατηγορίας 2) .

Πίνακας 2.6: Προδιαγραφές εκτέλεσης Υ/Ε ΙΗΟ (ΙΗΟ, Standards for Hydrographic Surveys, 2008)

| Κατηγορία Υδρογράφησης  | Ειδική Κατηγορία  | Κατηγορία 1a   | Κατηγορία 1b   | Κατηγορία 2   |
|---|---|--|--|---|
| Περιοχές  | Περιοχές όπου η ναυσιπλοΐα με ελάχιστο ελεύθερο βύθισμα κάτω από την τρόπιδα είναι κρίσιμη. | Περιοχές με βάθη ρηχότερα των 100 m, στις οποίες η ναυσιπλοΐα με τήρηση ελεύθερου βύθισματος κάτω από την τρόπιδα είναι λιγότερο κρίσιμη, αλλά πιθανόν να υπάρχουν υποθαλάσσια αντικείμενα ενδιαφέροντος της πλοήγησης επιφανείας. | Περιοχές με βάθη ρηχότερα των 100 m, στις οποίες η ναυσιπλοΐα με τήρηση ελάχιστου ελεύθερου βύθισματος δεν είναι κρίσιμος παράγοντας για τον τύπο των πλοίων επιφανείας που αναμένονται να διαπλεύσουν τις εν λόγω περιοχές. | Περιοχές με βάθη γενικά μεγαλύτερα των 100 m, στις οποίες μία γενική αποτύπωση της μορφολογίας του πυθμένα θεωρείται επαρκής. |
| Μέγιστη Επιτρεπόμενη Οριζοντιογραφική Ακρίβεια (THU) (95% C.L.) | 2 m   | 5 m + 5% του βάθους  | 5 m + 5% του βάθους  | 20 m + 10% του βάθους   |
| Μέγιστη Επιτρεπόμενη Κατακόρυφη Ακρίβεια (TVU) (95% C.L.)       | a=0,25 m<br>b=0,0075  | a=0,5 m<br>b=0,013   | a=0,5 m<br>b=0,013   | a=1,0 m<br>b=0,023  |

| 100% Κάλυψη Πυθμένα   | Υποχρεωτική  | Υποχρεωτική   | Δεν είναι υποχρεωτική  | Δεν είναι υποχρεωτική               |
|---|--|---|--|-------------------------------------|
| Ικανότητα εντοπισμού αντικειμένων του συστήματος  | Να εντοπίζονται αντικείμενα όγκου μεγαλύτερου του 1 m <sup>3</sup>               | Να εντοπίζονται αντικείμενα όγκου μεγαλύτερου των 2 m <sup>3</sup> σε βάθη μέχρι 40 m, ή σε βάθη μεγαλύτερα των 40 m να εντοπίζονται αντικείμενα με διαστάσεις ίσες με το 10% του βάρους. | Δεν εφαρμόζεται  | Δεν εφαρμόζεται                     |
| Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των γραμμών υδρογράφησης   | Δεν εφαρμόζεται η εν λόγω προδιαγραφή, καθώς απαιτείται 100% κάλυψη του πυθμένα. | Δεν εφαρμόζεται η εν λόγω προδιαγραφή, καθώς απαιτείται 100% κάλυψη του πυθμένα.  | 3 x μέσο βάθος της περιοχής ή 25 m οποιαδήποτε είναι μεγαλύτερη. Για LIDAR η διάσταση των φατνίων μέτρησης να είναι 5 x 5 m. | 4 x μέσο βάθος της περιοχής ερεύνης |
| Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης ναυτιλιακών βοηθημάτων και άλλων τοπογραφικών οντοτήτων σημαντικών για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας (95% C.L.) | 2 m  | 2 m   | 2 m  | 5 m                                 |

---

|  |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|
| Ακρίβεια<br>προσδιορισμού θέσης<br>της ακτογραμμής και<br>άλλων τοπογραφικών<br>οντοτήτων λιγότερο<br>σημαντικών για την<br>ασφάλεια της<br>ναυσιπλοΐας (95% C.L.) | 10 m | 20 m | 20 m | 20 m |
| Ακρίβεια<br>προσδιορισμού της<br>μέσης θέσης<br>επιπλεόντων<br>βοηθημάτων για την<br>ασφάλεια της<br>ναυσιπλοΐας (95% C.L.)  | 10 m | 10 m | 10 m | 20 m |

---

Ουσιαστικά, με τον όρο «αβεβαιότητα μιας θέσης» νοείται η αβεβαιότητα στη θέση ενός μετρούμενου βάθους ή του χαρακτηριστικού υποθαλασσίου αντικειμένου που ερευνάται μέσα σε ένα συγκεκριμένο γεωδαιτικό πλαίσιο αναφοράς. Όλες οι θέσεις αναφέρονται σε ένα γεωκεντρικό πλαίσιο αναφοράς που βασίζεται στο Διεθνές Γεωδαιτικό Πλαίσιο Αναφοράς (ITRS) π.χ. WGS84. Εάν, κατ' εξαίρεση, οι θέσεις αναφέρονται με το τοπικό οριζόντιο δεδομένο, αυτό το σημείο πρέπει να συνδέεται με ένα γεωκεντρικό πλαίσιο αναφοράς βασισμένο στο εν ισχύ ITRF. Η αβεβαιότητα μιας θέσης στην περίπτωση της υδρογραφίας επηρεάζεται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους. Επισημαίνεται ότι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνεισφορές όλων των παραμέτρων που προκαλούν σφάλματα στον υπολογισμό της συνολικής οριζόντιας αβεβαιότητας (THU), (IHO, 2008).

Σε κάθε περίπτωση υδρογραφικής έρευνας πρέπει να υιοθετείται μια στατιστική μέθοδος, η οποία να συνδυάζει όλες τις πηγές σφάλματος, για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας ως προς τη θέση. Η αβεβαιότητα θέσης στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95% πρέπει να καταγράφεται μαζί με τα στοιχεία της έρευνας. Η ικανότητα του συστήματος έρευνας πρέπει να αποδεικνύεται στο πεδίο και όχι θεωρητικά, με τον υπολογισμό της Συνολικής Οριζόντιας Αβεβαιότητας (Total Horizontal Uncertainty-THU).

Η θέση των βαθών, των κινδύνων για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, άλλων σημαντικών υποθαλάσσιων χαρακτηριστικών, των καταφανών σημείων της ακτής που είναι σημαντικά για τη ναυσιπλοΐα, πρέπει να προσδιορίζεται έτσι ώστε η οριζόντια αβεβαιότητα να πληροί τις απαιτήσεις που καθορίζονται στον . Η εν λόγω τιμή αβεβαιότητας περιλαμβάνει όλες τις αιτίες σφαλμάτων, όχι μόνο αυτές που σχετίζονται με το χρησιμοποιούμενο σύστημα προσδιορισμού θέσης.

Τονίζεται ότι η ασφαλής πλοήγηση των πλοίων απαιτεί ακριβή γνώση του βάθους του νερού για την ασφαλή εκμετάλλευση της μέγιστης χωρητικότητας φορτίου και του μέγιστου επιτρεπόμενου βάθους ασφαλούς πλοήγησης (βάθος ασφαλείας-underkeel clearance). Όπου το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος ασφαλούς πλοήγησης κάτω από το την τροπίδα είναι ένα σημαντικό ζήτημα, οι αβεβαιότητες ως προς το βάθος πρέπει να ελέγχονται καλύτερα και να κατανοούνται καλύτερα. Αντίστοιχα, θα πρέπει επίσης να καθοριστούν και να κατανοηθούν, οι διαστάσεις των υποθαλασσίων αντικειμένων που εντοπίζονται κατά την διάρκεια μίας υποθαλάσσιας έρευνας ή το μέγεθος του σφάλματος που εμφυλοχωρείται

στην περίπτωση που πιθανόν στην περιοχή να υπάρχουν επικίνδυνα για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας υποθαλάσσια αντικείμενα, τα οποία όμως δεν κατέσται δυνατόν να εντοπιστούν (IHO, 2008).

Όλα τα μετρούμενα βάθη και τα ύψη πάνω από το επίπεδο της μέσης στάθμης θαλάσσης πρέπει να αναφέρονται σε ένα κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς, το οποίο είναι συμβατό με τα αντίστοιχα προϊόντα (π.χ. ναυτικούς χάρτες) που πρέπει να παραχθούν ή να επικαιροποιηθούν από την έρευνα, π.χ. να αναφέρονται ως προς το επίπεδο της Κατωτάτης Ρηχίας. Στην ιδανική περίπτωση, αυτό το επίπεδο αναφοράς θα πρέπει επίσης να είναι συνδεδεμένο με ένα γεωκεντρικό πλαίσιο αναφοράς βασισμένο σε ITRS ή άλλο γεωδαιτικό επίπεδο αναφοράς. Με τον όρο «κατακόρυφη» αβεβαιότητα νοείται η αβεβαιότητα-σφάλμα των διορθωμένων βαθών ως το αντίστοιχο κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς τους (vertical datum). Κατά τον καθορισμό της κατακόρυφης αβεβαιότητας πρέπει να ποσοτικοποιηθούν οι πηγές των μεμονομένων αβεβαιοτήτων. Στην συνέχεια, όλες οι επιμέρους αβεβαιότητες πρέπει να συνδυάζονται στατιστικά για να επιτευχθεί μια συνολική κατακόρυφη αβεβαιότητα (Total Vertical Uncertainty-TVU). Η μέγιστη επιτρεπόμενη κατακόρυφη αβεβαιότητα για τα ανηγμένα (διορθωμένα), στο κατακόρυφο επίπεδο αναφοράς, βάθη, ορίζεται στον , η οποία περιγράφει τις μέγιστες αβεβαιότητες που πρέπει να επιτευχθούν για την κάλυψη κάθε κατηγορίας υδρογράφησης. Η υπόψη αβεβαιότητα αναφέρεται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και περιλαμβάνει τόσο στην εκτίμηση τυχαίων σφαλμάτων αλλά και των υπολοίπων (residuals) που απαιτούνται για τη διόρθωση των τυχόν συστηματικών λαθών. Η ικανότητα του συστήματος έρευνας-υδρογράφησης αναφορικά με τον ορθό υπολογισμό της TVU πρέπει να αποδεικνύεται στο πεδίο, και όχι να αφορά σε μία θεωρητική εκτίμηση.

Κατά τις υδρογραφικές εργασίες πεδίου διαπιστώνονται σφάλματα που εξαρτώνται από το βάθος αλλά και σφάλματα τα οποία δεν εξαρτώνται από αυτό. Για τον λόγο αυτό, η μέγιστη κατακόρυφη επιτρεπόμενη αβεβαιότητα (TVU - Total Vertical Uncertainty), σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, είναι συνάρτηση των παραμέτρων "α" και "b", για κάθε περίπτωση/κατηγορία υδρογράφησης, η τιμή των οποίων εξαρτάται από το μετρούμενο κάθε φορά βάθος και την κατηγορία της περιοχής προς υδρογράφηση.

Για όλα τα υποθαλάσσια επικίνδυνα αντικείμενα που αφορούν στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και έχουν αναφερθεί στο παρελθόν στην περιοχή υδρογράφησης θα πρέπει να επιβεβαιωθεί η ύπαρξή τους. Επιπλέον, όσα νέα αβαθή ή άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά του πυθμένα εντοπιστούν κατά την διάρκεια μίας υδρογραφικής έρευνας πρέπει να χαρτογραφηθούν λεπτομερώς και να καθοριστεί με ακρίβεια η θέση και το ελάχιστο βάθος τους. Η Υπηρεσία ή ο φορέας που είναι υπεύθυνος για την ποιότητα και επάρκεια της υποθαλάσσιας έρευνας μπορεί να ορίσει ένα όριο βάθους, πέραν του οποίου δεν απαιτείται λεπτομερής έρευνα του θαλάσσιου πυθμένα και επομένως αναλυτική εξέταση και μέτρηση των ανώμαλων χαρακτηριστικών αυτού. Αναφορικά με τα ναυάγια και τα υποθαλάσσια εμπόδια, τα οποία έχουν ελεύθερο βάθος άνωθεν αυτών μικρότερο των 40 μέτρων και ενδέχεται να είναι επικίνδυνα για την ναυσιπλοΐα επιφανείας, η θέση τους και το ελάχιστο βάθος άνωθεν τους πρέπει να καθορίζονται με την καλύτερη διαθέσιμη μέθοδο, ενώ παράλληλα πρέπει να πληρούν την ακρίβεια βάθους της αντίστοιχης κατηγορίας υδρογράφησης του .

Στις περιπτώσεις κατηγοριών υδρογράφησης που απαιτείται πλήρης κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή της αντίστοιχης έρευνας πρέπει να είναι αποδεδειγμένα ικανός να εντοπίζει χαρακτηριστικά των διαστάσεων που καθορίζονται στον . Επιπλέον, ο εξοπλισμός πρέπει να θεωρείται μέρος ενός συστήματος, το οποίο μεταξύ άλλων περιλαμβάνει τον απαραίτητο εξοπλισμό έρευνας, το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων πεδίου, τις διαδικασίες ελέγχου και εκείνο το εκπαιδευμένο και έμπειρο προσωπικό, που θα διασφαλίσει την υψηλότερη πιθανότητα ανίχνευσης και εντοπισμού των επικίνδυνων για την ασφάλεια της πλοήγησης των σκαφών χαρακτηριστικών του πυθμένα. Αποτελεί ευθύνη του υδρογραφικού γραφείου / οργανισμού που είναι αρμόδιο να συλλέγει τα υπόψη βαθυμετρικά δεδομένα για να εκτιμήσει την επάρκεια του οποιουδήποτε συστήματος πρόκειται να χρησιμοποιήσει για τον σκοπό αυτό, ούτως ώστε να είναι σε θέση να ανιχνεύσει με μία μεγάλη πιθανότητα τέτοια υποθαλάσσια αντικείμενα.

Επίσης, στις περιπτώσεις περιοχών υδρογράφησης που απαιτείται πλήρης κάλυψη του υδάτινου πυθμένα, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή της έρευνας πρέπει να έχει αποδεδειγμένα την δυνατότητα να εντοπίζει υποθαλάσσια αντικείμενα που κείνται επί του βυθού των διαστάσεων που καθορίζονται στον . Και στην περίπτωση αυτή, ο

διατιθέμενος εξοπλισμός που θεωρείται μέρος ενός συστήματος το οποίο περιλαμβάνει τον εξοπλισμό έρευνας το λογισμικό επεξεργασίας, τις αναγκαίες διαδικασίες και το κατάλληλο προσωπικό, παράμετροι οι οποίες πρέπει να διασφαλίζουν υψηλή πιθανότητα εντοπισμού των αντικειμένων αυτών επί του πυθμένα. Αποτελεί ευθύνη του υδρογραφικού γραφείου/οργανισμού που συλλέγει τα αντίστοιχα δεδομένα να προσδιορίσει την ικανότητα του οποιουδήποτε συστήματος που πρόκειται να χρησιμοποιήσει, ώστε να είναι σε θέση να εντοπίσει, με μεγάλη πιθανότητα, τέτοια υποθαλάσσια αντικείμενα.

Η «Ειδική Κατηγορία» και η «Κατηγορία 1α», είναι οι περιπτώσεις περιοχών υδρογράφησης, που πρέπει ερευνώνται με τις πιο αυστηρές απαιτήσεις. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IHO προβλέπεται ότι στις παράκτιες περιοχές, οι οποίες αποφασίζεται να ερευνηθούν με τα κριτήρια των παραπάνω κατηγοριών πρέπει το διατιθέμενο «σύστημα» έρευνας να μπορεί να εντοπίζει αντικείμενα με διαστάσεις 1 m<sup>3</sup> για την «Ειδική Κατηγορία» και 2 m<sup>3</sup> για την «Κατηγορία 1α» αντίστοιχα. Στην περίπτωση που από τον αρμόδιο φορέα συλλογής υδρογραφικών δεδομένων εκτιμηθεί ότι ενδεχομένως να υπάρχουν αντικείμενα στον πυθμένα που είναι μικρότερα από το μέγεθος που έχει οριστεί για τις παραπάνω κατηγορίες, τα οποία αποτελούν κίνδυνο για την πλοήγηση των πλοίων επιφανείας, τότε θα πρέπει να αναλαμβάνονται δράσεις για τον εντοπισμό των υπόψη υποθαλάσσιων αντικειμένων μικρότερων διαστάσεων, προκειμένου ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος πρόκλησης ναυτικού ατυχήματος. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ακόμη και στην περίπτωση χρησιμοποίησης του καταλληλότερου διατιθέμενου συστήματος έρευνας, ποτέ δεν μπορεί να εξασφαλιστεί ότι έχει ανιχνευθεί και εντοπιστεί το 100% των αντικειμένων (φυσικών ή τεχνητών) επί του πυθμένα. Στην περίπτωση που υπάρχει ένδειξη ότι πιθανόν να υπάρχουν αντικείμενα επί του βυθού μιας παράκτιας περιοχής, τα οποία δεν μπορούν να ανιχνευθούν από το χρησιμοποιούμενο σύστημα έρευνας, τότε πρέπει να εξετάζεται η χρήση ενός εναλλακτικού συστήματος (π.χ. μηχανικής σάρωσης) για να αυξηθεί η εμπιστοσύνη εντοπισμού, τουλάχιστον στο ελάχιστο ασφαλές βάθος για την αναμενόμενη στην περιοχή ναυσιπλοΐα. Στις περιπτώσεις των περιοχών υδρογράφησης «Κατηγορίας 1b» και της «Κατηγορίας 2» δεν απαιτείται η πλήρης έρευνα του υδάτινου πυθμένα. Για το λόγο αυτό, οι προδιαγραφές προβλέπουν στις περιπτώσεις αυτές ότι πρέπει να τηρείται ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γραμμών υδρογράφησης/ερεύνης.



Όταν μία παράκτια περιοχή πρόκειται να υδρογραφηθεί για πρώτη φορά, ή όταν πρόκειται να ερευνηθεί μία περιοχή ύστερα από μεγάλο χρονικό διάστημα, απαιτείται μία προκαταρκτική εκτίμηση της γεωμορφολογίας του πυθμένα αυτής, προκειμένου αποφασιστεί η «κατηγορία Υδρογράφησης και κατ' επέκταση οι προδιαγραφές συλλογής των βαθυμετρικών δεδομένων και των λοιπών στοιχείων περιβάλλοντος. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σκόπιμη η εκτέλεση μίας ταχείας αναγνωριστικής έρευνας (reconnaissance survey), είτε με χρήση ενός συστήματος LIDAR, είτε αξιοποιώντας τεχνικές δορυφορικής βαθυμετρίας (SDB). Η τελευταία περίπτωση (SDB) θεωρείται η πιο αποδοτική και η πιο τεχνοοικονομικά συμφέρουσα. Ήδη, οι Υδρογραφικές Υπηρεσίες των ΗΠΑ της Γαλλίας και του Η.Β., χρησιμοποιούν σε επίπεδο προκαταρκτικής έρευνας μεθόδους εξαγωγής βαθυμετρίας από δορυφορικές εικόνες.

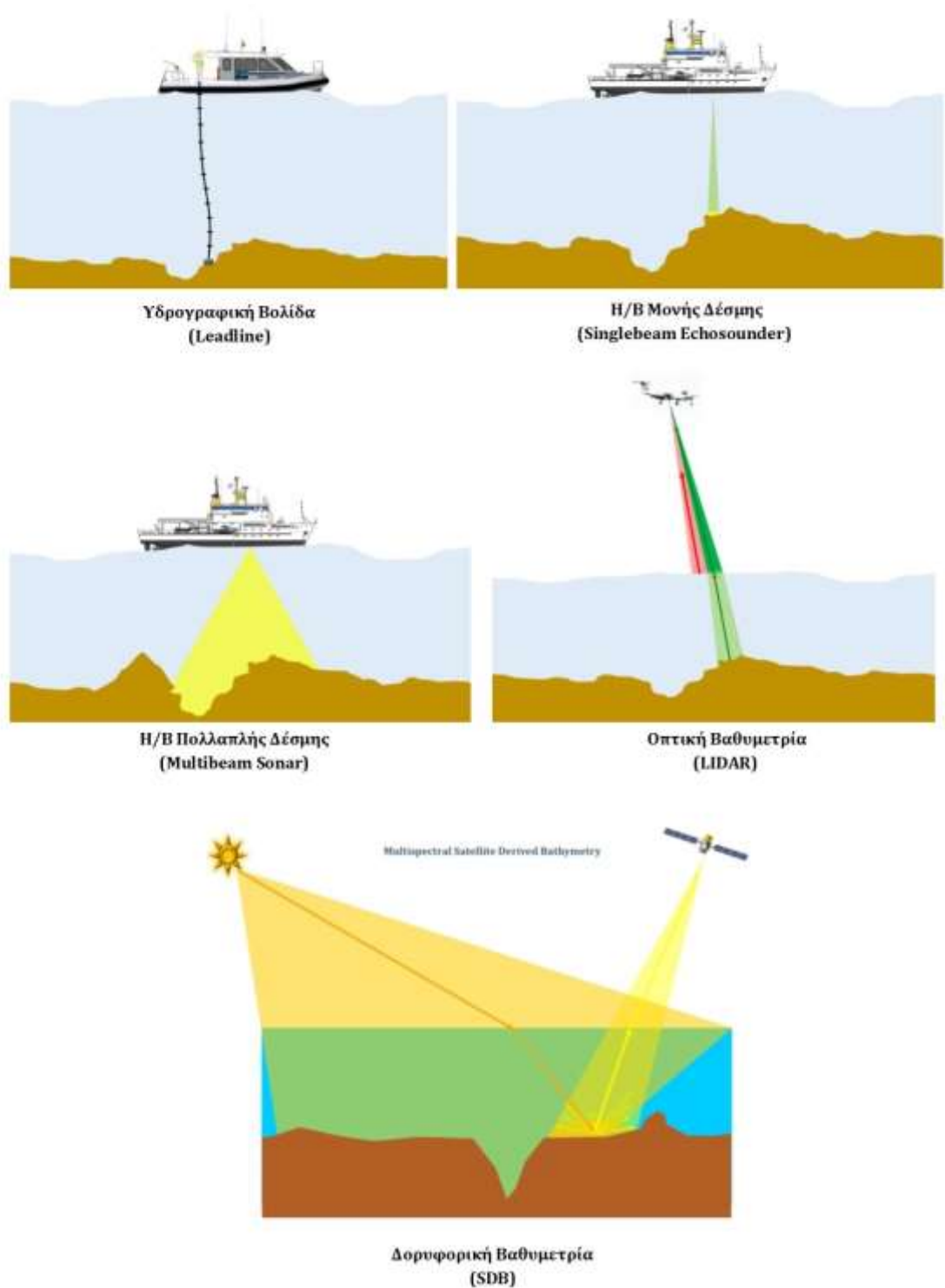
Είναι σύνηθες το γεγονός πολλοί ναυτικοί χάρτες, είτε αυτοί είναι έντυποι είτε ηλεκτρονικοί, να αποτυπώνουν υποθαλάσσια αντικείμενα, τα οποία δεν έχουν ερευνηθεί στο παρελθόν με τις εν ισχύ προδιαγραφές του IHO. Προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, είναι επιθυμητό να εξαλειφθούν τα εν λόγω «αμφίβολα» δεδομένα, δηλαδή τα δεδομένα που συνήθως συμβολίζονται στους ναυτικούς χάρτες με τις συντμήσεις από την PA (προσεγγίζουσα θέση), PD (Θέση αμφίβολη), ED (ύπαρξη αντικειμένου αμφίβολη), SD (βάθος αμφίβολο) ή ως «κίνδυνος». Για να απαλοιφθούν οι ενδείξεις αυτές από τους χάρτες ή να επιβεβαιωθεί το πραγματικό ελεύθερο βάθος άνωθεν των υπόψη επικίνδυνων αντικειμένων επί του βυθού, είναι απαραίτητη η εκτέλεση υδρογράφησης (έρευνας) σύμφωνα με τα πρότυπα που περιγράφονται στον παραπάνω . Αξίζει να σημειωθεί, ότι και σε αυτήν την περίπτωση η προκαταρκτική έρευνα με τις μεθόδους της δορυφορικής βαθυμετρίας δύναται να αποδώσει κρίσιμα συμπεράσματα για την πιθανή ύπαρξη ή όχι τέτοιων αντικειμένων σε μία παράκτια περιοχή, εκεί δηλαδή που ο πυθμένας είναι φασματικά ορατός.

Πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση συλλογής βαθυμετρικών δεδομένων με ακουστικά συστήματα απλής (singlebeam echosounders) ή πολλαπλής δέσμης (Multibeam Sonars), προβλέπεται από τις διεθνείς προδιαγραφές η εκτέλεση επιπρόσθετων γραμμών υδρογράφησης κάθετα στις κύριες γραμμές, που σκοπό έχουν τον ποιοτικό έλεγχο και επιβεβαίωση της ακρίβειας των μετρήσεων πεδίου. Αντίστοιχη δυνατότητα ελέγχου υπάρχει και στην περίπτωση της οπτικής υδρογράφησης με χρήση συστημάτων LIDARs. Ωστόσο,

ανάλογη διαδικασία ποιοτικού ελέγχου δεν υφίσταται στην περίπτωση υπολογισμού της βαθυμετρίας με τηλεσκοπικές μεθόδους με χρήση δορυφορικών εικόνων. Ενδεχομένως, ένα μέτρο ελέγχου των αποτελεσμάτων βαθυμετρίας που εξάγονται από την επεξεργασία πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων, θα ήταν να εκτελεστεί ο ίδιος αλγόριθμος (μοντέλο) βαθυμετρίας με άλλης ημερομηνίας, αλλά σύγχρονης σχετικά, εικόνας ή να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά δεδομένα (βάθη) βαθμονόμησης από την περιοχή ενδιαφέροντος ή να γίνει συνδυασμός των προαναφερομένων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία προσπάθεια του ΙΗΟ να προσαρμόσει τις προδιαγραφές εκτέλεσης των υδρογραφικών ερευνών στις νέες τεχνολογίες και δυνατότητες των συστημάτων υδρογραφικής έρευνας. Για τον λόγο αυτό εκτός από τις προδιαγραφές που σχετίζονται με τα συμβατικά συστήματα υδρογράφησης όπως τις υδρογραφικές βολίδες (Leadlines), και τα ηχοβολιστικά μονής δέσμης (single-beam echosounders), στην εν ισχύ έκδοση του προτύπου S-44/ΙΗΟ (Ed. 5), έχουν προταθεί προδιαγραφές και για τα ηχοβολιστικά συστήματα πολλαπλής δέσμης (Εικόνα 2.16 ) ή τα ενεργητικά συστήματα οπτικής τηλεπισκόπησης LIDARs.

Οι υπόψη προδιαγραφές δεν είναι υποχρεωτικές για τους μη κρατικούς φορείς, όπως για παράδειγμα τεχνικές εταιρείες, επιστημονικούς φορείς ή άλλους μη κυβερνητικούς οργανισμούς, ωστόσο κάνοντας χρήση αυτών εξασφαλίζεται η πιστοποίηση της εκτέλεσης των βαθυμετρικών αποτυπώσεων σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα του ΙΗΟ. Οι προδιαγραφές συλλογής των υπόψη βαθυμετρικών-υδρογραφικών δεδομένων εκδίδονται και επικαιροποιούνται αποκλειστικά με μέριμνα και υπό την ευθύνη του Διεθνή Υδρογραφικού Οργανισμού (ΙΗΟ). Πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι σήμερα ο ΙΗΟ δεν έχει εκπονήσει πρότυπο ή τεχνικές κατευθύνσεις-προδιαγραφές για τα δεδομένα βαθυμετρίας που εξάγονται από την ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στο ότι το συγκεκριμένο αντικείμενο (εξαγωγή βαθυμετρίας από δορυφορικές εικόνες), αφορά σε ζητήματα υψηλού τεχνολογικού και επιστημονικού ενδιαφέροντος, τα οποία βρίσκονται ακόμα σε φάση έρευνας.



Εικόνα 2.16 : Μέθοδοι Συλλογής δεδομένων Βαθυμετρίας.

Ερμηνεύοντας τις προδιαγραφές του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού για την εκτέλεση βαθυμετρήσεων, με σκοπό την έκδοση και ενημέρωση των έντυπων και

ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, προκύπτει ότι η κύρια προσπάθεια εστιάζεται στις παράκτιες περιοχές, δηλαδή σε περιοχές με ρηχά ή σχετικά ρηχά ύδατα, βάθους έως και 40 μέτρων. Στις εν λόγω παράκτιες περιοχές υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να συμβεί κάποιο ναυτικό ατύχημα, το οποίο μπορεί να προκαλέσει καταστροφή του θαλάσσιου και παράκτιου περιβάλλοντος, με αρνητικό αντίκτυπο στην οικονομία του παράκτιου κράτους. Για τους λόγους αυτούς, η πιο απαιτητική κατηγορία από πλευράς βαθυμετρικής και οριζοντιογραφικής ακρίβειας είναι η «Ειδική Κατηγορία» και η Κατηγορία 1α υδρογραφικών ερευνών. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι οι παράκτιες περιοχές της Κατηγορίας 1α, οι οποίες αποτελούνταν από περιοχές με βάθη μικρότερα των 100 m, καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό των υδάτων που απεικονίζονται σε ένα ναυτικό χάρτη, δεδομένου ότι σχετίζονται με τις περιοχές προσέγγισης των πλοίων σε λιμένες και διαύλους ή των παρακείμενων σε αυτές υδάτων μεγάλης σημασίας για την ναυσιπλοΐα. Για αυτό το λόγο και στις δύο περιπτώσεις («Ειδική Κατηγορία» και «Κατηγορία 1α»), είναι απαραίτητη μια πλήρης έρευνα (100%) του θαλάσσιου πυθμένα.

Ωστόσο, παρά την παραπάνω κατεύθυνση του Ι.Η.Ο. αναφορικά με την αυστηρότητα στις προδιαγραφές, με τις οποίες πρέπει να συλλέγονται τα βαθυμετρικά δεδομένα, που χρησιμοποιούνται ως πρωτογενείς πηγές για την παραγωγή των έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών, τα προϊόντα οποία διατίθενται σήμερα στην αγορά, δεν απεικονίζουν (πάντα) τα βάθη σύμφωνα με τα εν λόγω πρότυπα. Αμφότερα τα προϊόντα (έντυποι ναυτικοί χάρτες και ENC), που σκοπό έχουν την ασφαλή πλοήγηση των πλοίων, παράγονται με δεδομένα προερχόμενα από πολλαπλές πηγές, από διαφορετικά συστήματα (αισθητήρες) και τα περισσότερα από αυτά έχουν ενσωματώσει στοιχεία που έχουν συλλεχθεί με παλαιές διαδικασίες και όργανα. Έτσι τίθενται τα ερωτήματα πώς οι Υδρογραφικές Υπηρεσίες, σε παγκόσμιο επίπεδο, πιστοποιούν την ικανότητά τους να παράγουν ναυτιλιακά προϊόντα σύμφωνα με τα πρότυπα του ΙΗΟ με τέτοιους περιορισμούς; Πώς είναι εφικτό να επικαιροποιηθεί γρήγορα το σύνολο των ναυτικών χαρτών μίας γεωγραφικής περιοχής και οι έντυποι και οι ηλεκτρονικοί ναυτικοί χάρτες σε διάφορες κλίμακες, μέσα σε ένα πλαίσιο μειωμένης οικονομικής και επιχειρησιακής επάρκειας (Mavraeidopoulos, *et al.*, 2017).

### 2.3.4 Διεθνείς Προδιαγραφές Ακρίβειας Ναυτικών Χαρτών

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο IHO έχει υιοθετήσει ελαφρώς διαφορετικά πρότυπα ακρίβειας για τα χαρτογραφικά προϊόντα, τα οποία κατηγοριοποιεί ποιοτικά σε «Ζώνες Εμπιστοσύνης» (Zones of Confidence-ZOC). Οι «Ζώνες Εμπιστοσύνης» (ZOC) αποτελούν πληροφορία της ποιότητας των υδρογραφικών/βαθυμετρικών δεδομένων, με τα οποία εκπονήθηκε ένας ναυτικός χάρτης. Η χρήση των διαγραμμάτων ZOC παρέχει την απαραίτητη πληροφορία ακρίβειας των δεδομένων και πληροφοριών που απεικονίζονται στους ψηφιακούς ναυτικούς χάρτες, καθώς οι ορισμοί της κατηγορίας Ζώνες εμπιστοσύνης (CATZOC) προέρχονται απευθείας από το πρότυπο S-57.

Πιο συγκεκριμένα, για τους έντυπους και ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες οι προδιαγραφές για κάθε ζώνη εμπιστοσύνης παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακας 2.7. Η κατηγοριοποίηση των θαλάσσιων περιοχών κατά Ζώνες Εμπιστοσύνης (ZOC) ουσιαστικά ενημερώνει τον ναυτιλλόμενο εάν οι αναγραφόμενες στην περιοχή βαθυμετρικές πληροφορίες ικανοποιούν τις ελάχιστες προδιαγραφές ακρίβειας (95% CI, 2,45 sigma) θέσης και βάθους, καθώς και την προδιαγραφή πλήρους κάλυψης του θαλάσσιου πυθμένα. Τονίζεται ότι οι ακρίβειες ή οι αβεβαιότητες στην θέση και το βάθος για κάθε περίπτωση περιοχής Εμπιστοσύνης αναφέρονται στα συνολικά σφάλματα των τελικώς αποδιδόμενων βαθών στους χάρτες. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι ακρίβειες του Πίνακας 2.7 περιλαμβάνουν όχι μόνο τις αβεβαιότητες /σφάλματα του πεδίου, αλλά και τα τυχόν σφάλματα που εμφυλοχωρούνται κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των χαρτογραφικών δεδομένων κατά το στάδιο της παραγωγής των.

Η αναγραφόμενη ακρίβεια για τις Ζώνες εμπιστοσύνης B, C και D δεν είναι (πάντα) απαραίτητο να υπολογιστεί αλλά μπορεί και να εκτιμηθεί με βάση τις πληροφορίες ποιοτικού ελέγχου των πρωτογενών δεδομένων, από τα οποία παρήχθη ο εκάστοτε ναυτικός χάρτης. Η εν λόγω εκτίμηση ακρίβειας πιθανόν να περιλαμβάνει υποκειμενικού τύπου σφάλματα, τα οποία εξαρτώνται από την εμπειρία του κάθε χαρτογράφου.

Διευκρινίζεται, ότι ως «Σημαντικά αντικείμενα/χαρακτηριστικά» θαλάσσιου πυθμένα ορίζονται εκείνα που διαφέρουν από τα απεικονιζόμενα βάθη κατά περισσότερο από 2 m για βάθη έως 40 m, και σε ποσοστό 10% του βάθους για τα βάθη μεγαλύτερα των 40 m.

Επίσης, ο όρος «πλήρης κάλυψη» του θαλάσσιου πυθμένα σημαίνει ότι έχει διεξαχθεί συστηματική έρευνα βυθού χρησιμοποιώντας συστήματα ανίχνευσης, ή συστήματα μέτρησης βάθους, ή διαδικασίες, ή έμπειρο και πιστοποιημένο κατάλληλα προσωπικό, το οποίο δύναται να εντοπίζει και να μετρά αξιόπιστα το υπερκείμενο ελεύθερο βάθος σε σημαντικά υποθαλάσσια χαρακτηριστικά/αντικείμενα.

**Πίνακας 2.7:** Κατηγορίες Ζωνών Εμπιστοσύνης (ZOC) Έντυπων και Ηλεκτρονικών Ναυτικών Χαρτών.

| 1   | 2                            | 3                             |              | 4   | 5   |
|-----|------------------------------|-------------------------------|--------------|---|---|
| ZOC | Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης | Ακρίβεια Προσδιορισμού Βάθους |              | Κάλυψη Πυθμένα  | Τυπικά Χαρακτηριστικά Υδρογράφησης  |
|     | ± 5 m + 5% του βάθους        | 0,5 m + 1%×d                  |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα. Σημαντικά χαρακτηριστικά στο θαλάσσιο πυθμένα έχουν εντοπιστεί και έχει μετρηθεί το ελεύθερο βάθος άνωθεν αυτών. | Συστηματική Υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην εν λόγω περιοχή, με υψηλές ακρίβειες στον προσδιορισμό θέσης και βάθους με χρήση DGPS ή τουλάχιστον με 3 γραμμές θέσεως και με χρήση ηχοβολιστικού πολλαπλής δέσμης ή μηχανικού συστήματος γρίπησης. |
|     |                              | Βάθος (m)                     | Ακρίβεια (m) |   |   |
|     |                              | 10                            | ±0,6         |   |   |
|     |                              | 30                            | ±0,8         |   |   |
|     |                              | 100                           | ±1,5         |   |   |
|     |                              | 1000                          | ±10,5        |   |   |
| A2  | ± 20 m                       | 1,0 m + 2%×d                  |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα. Σημαντικά χαρακτηριστικά στο θαλάσσιο πυθμένα  | Συστηματική Υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην εν λόγω περιοχή, με υψηλές   |
|     |                              | Βάθος (m)                     | Ακρίβεια (m) |   |   |

|          |         |              |              |   |  |
|----------|---------|--------------|--------------|---|--|
|          |         | 10           | ±1,2         | έχουν εντοπιστεί και έχει μετρηθεί το ελεύθερο βάθος άνωθεν αυτών.  | ακρίβειες στον προσδιορισμό θέσης και βάθους, μικρότερες όμως εκείνων της ZOC A1, με χρήση σύγχρονου ηχοβολιστικού μονής δέσμης ή μηχανικού συστήματος γρίπησης.   |
|          |         | 30           | ±1,6         |   |  |
|          |         | 100          | ±3,0         |   |  |
|          |         | 1000         | ±21,0        |   |  |
| <b>B</b> | ± 50 m  | 1,0 m + 2%×d |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα δεν έχει επιτευχθεί. Μη χαρτογραφημένα υποθαλάσσια αντικείμενα, επικίνδυνα για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, δεν αναμένονται, αλλά πιθανόν να υπάρχουν. | Συστηματική Υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην εν λόγω περιοχή, με παρόμοιες ακρίβειες στον προσδιορισμό βάθους αλλά με μικρότερες ακρίβειες στον προσδιορισμό θέσης από εκείνες της ZOC A2 με χρήση σύγχρονου ηχοβολιστικού μονής δέσμης αλλά όχι με μηχανικό σύστημα γρίπησης. |
|          |         | Βάθος (m)    | Ακρίβεια (m) |   |  |
|          |         | 10           | ±1,2         |   |  |
|          |         | 30           | ±1,6         |   |  |
|          |         | 100          | ±3,0         |   |  |
|          |         | 1000         | ±21,0        |   |  |
| <b>C</b> | ± 500 m | 2,0 m + 5%×d |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα δεν έχει επιτευχθεί. Ανωμαλίες στον πυθμένα πιθανόν να υπάρχουν.  | Χαμηλής ακρίβειας υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην περιοχή ή έχουν συλλεχθεί δεδομένα σε   |
|          |         | Βάθος (m)    | Ακρίβεια (m) |   |  |
|          |         | 10           | ±2,5         |   |  |

|   |   |                             |            |   |  |
|---|---|-----------------------------|------------|---|--|
|   |   | 30                          | $\pm 3,5$  |   | ευκαιριακή βάση, όπως για παράδειγμα κατά την διάρκεια πλου πλοίων.  |
|   |   | 100                         | $\pm 7,0$  |   |  |
|   |   | 1000                        | $\pm 52,0$ |   |  |
| D | Χειρότερη εκείνης της ZOC C   | Χειρότερη εκείνης της ZOC C |            | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα δεν έχει επιτευχθεί. Μεγάλες ανωμαλίες στον πυθμένα πιθανόν να αναμένονται. | Δεδομένα χαμηλής ακρίβειας ή δεδομένα των οποίων η ποιότητα δεν μπορεί να αξιολογηθεί λόγω ελλείψεις σχετικών πληροφοριών. |
| U | Δεδομένα των οποίων η βαθυμετρική ακρίβεια δεν έχει εισέτι αξιολογηθεί. |                             |            |   |  |



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την ικανοποίηση των βασικών στόχων της παρούσας έρευνας αποφασίστηκε να ελεγχθεί η δημιουργηθείσα στην παρούσα έρευνα μεθοδολογία (Hybrid Model) όχι μόνο σε μία περιοχή αλλά σε τρεις (3) διαφορετικές γεωγραφικά και γεωμορφολογικά παράκτιες περιοχές. Η έρευνα σε παραπάνω από μία περιοχή στοχεύει στην βελτίωση του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί η υπόψη μεθοδολογία, στην βελτίωση του τρόπου επεξεργασίας των δεδομένων, και στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό, τυποποίηση της επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων. Επίσης, η εφαρμογή του υπόψη μοντέλου σε περισσότερες περιοχές αποσκοπεί και στον έλεγχο της ικανότητας του μοντέλου αναφορικά με την εξαγωγή ικανοποιητικής ακρίβειας βαθυμετρίας από πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες, ανεξαρτήτου ποιότητας ιζήματος, γεωμορφολογίας πυθμένα και ακτής, και βιο-οπτικών ιδιοτήτων υδάτων.

Για τους παραπάνω λόγους αυτούς επιλέχτηκε :

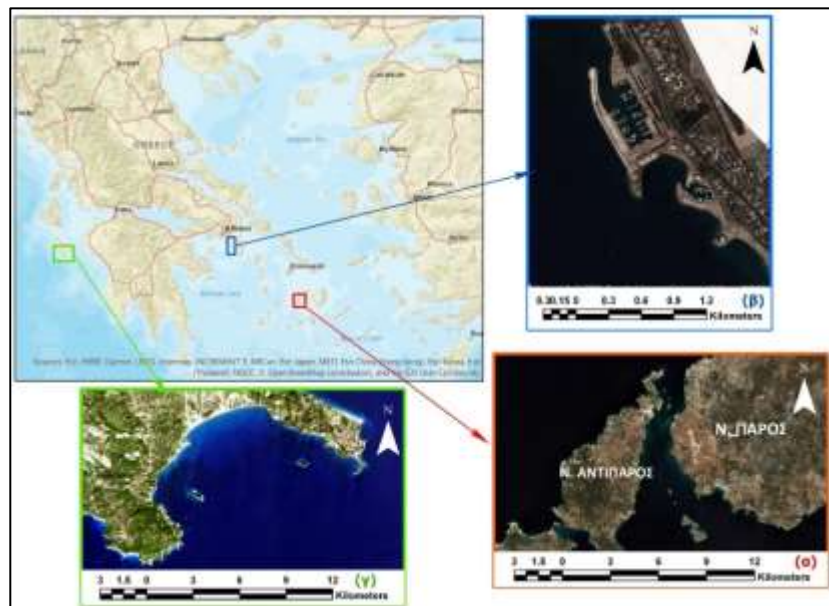
- Μία θαλάσσια περιοχή από το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων νήσων και συγκεκριμένα η θαλάσσια περιοχή του στενού μεταξύ των νήσων Πάρου-Αντιπάρου.
- Μία παράκτια αστική περιοχή από την περιοχή του Σαρωνικού κόλπου που είναι η ευρύτερη παράκτια ζώνη της μαρίνας του Αγ. Κοσμά και
- Μία παράκτια ζώνη στην περιοχή του Ιονίου πελάγους που είναι ο κόλπος Λαγανά, ν. Ζακύνθου.

Προκειμένου υλοποιηθούν οι παραπάνω έλεγχοι σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος, σε κάθε περίπτωση περιοχής ερεύνης (case study) το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε/εκτελέστηκε με διαφορετικά δορυφορικά δεδομένα, διαφορετικής χωρικής ανάλυσης και διαφορετικής φασματικής ανάλυσης. Ειδικότερα στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορική διατριβής χρησιμοποιήθηκε :

- Για την περιοχή του Στενού ν. Πάρου-ν. Αντίπαρου πολυφασματική δορυφορική εικόνα υψηλής ανάλυσης (High Resolution-HR) από το σύστημα SENTINEL-2.

- Για την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή μαρίνας του Αγ. Κοσμά πολυφασματική δορυφορική εικόνα πολύ υψηλής ανάλυσης (Very High Resolution-VHR) του συστήματος PLEIADES.
- Για την περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου πολυφασματική δορυφορική εικόνα μεσαίας ανάλυσης (Medium Resolution-MR) του συστήματος LANDSAT-8 (OLI).

Πιο λεπτομερή στοιχεία για την εκάστοτε δορυφορική εικόνα και λοιπά γεωχωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην υπόψη διδακτορική έρευνα αναφέρονται στις επόμενες ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου. Οι συγκεκριμένες περιοχές μελέτης (Εικόνα 3.5) επιλέχθηκαν γιατί παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες και δυσκολίες στην συλλογή βαθυμετρικών δεδομένων πεδίου με τους κλασικούς τρόπους υδρογράφησης για τους λόγους που αναφέρονται σε κάθε περίπτωση αντίστοιχα.



**Εικόνα 3.1:** Περιοχές Ερεύνης Διατριβής (α) Στενό ν. Πάρου-Αντίπαρου, (β) Περιοχή Μαρίνας Αγ. Κοσμά-Ελληνικού, (γ) Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

### 3.1.1 Περιοχή Στενού Ν. Πάρου-Αντιπάρου (Case Study 1)

Πρόκειται για μία περιοχή που ανήκει διοικητικά στην Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου. Η εν λόγω Περιφέρεια περιλαμβάνει τα νησιωτικά συμπλέγματα των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων και είναι μία από τις 13 διοικητικές Περιφέρειες της Ελλάδας. Υποδιαιρείται σε 13 Περιφερειακές Ενότητες, περισσότερες από οποιαδήποτε Περιφέρεια στη χώρα, στις

οποίες υπάγονται οι 33 δήμοι της. Αποτελείται από 79 νησιά, από τα οποία κατοικούνται τα 55, και αρκετές ακατοίκητες βραχονησίδες. Η συνολική έκταση του Νοτίου Αιγαίου είναι 5.286 km<sup>2</sup> και καλύπτει το 4 % της συνολικής έκτασης της χώρας. Ο πληθυσμός των νησιών ανέρχεται σε 308.610 κατοίκους, βάσει της Απογραφής 2011. Μεταξύ της Πελοποννήσου και της Δωδεκανήσου, βρίσκεται ένα νησιωτικό συγκρότημα από 30 μεγάλα, κατοικημένα νησιά και 190 περίπου νησάκια. Οι αρχαίοι Έλληνες ονόμαζαν τα νησιά αυτά «Κυκλάδες» και πίστευαν ότι η Δήλος, το μεγάλο θρησκευτικό κέντρο της αρχαιότητας, αποτελούσε το κέντρο τους. Στο κέντρο των Κυκλάδων, ανάμεσα στη Νάξο και τη Σίφνο, βρίσκεται το νησιωτικό συγκρότημα Πάρου - Αντιπάρου, δύο νησιών με εντυπωσιακά τοπία και πλούσια ιστορία.

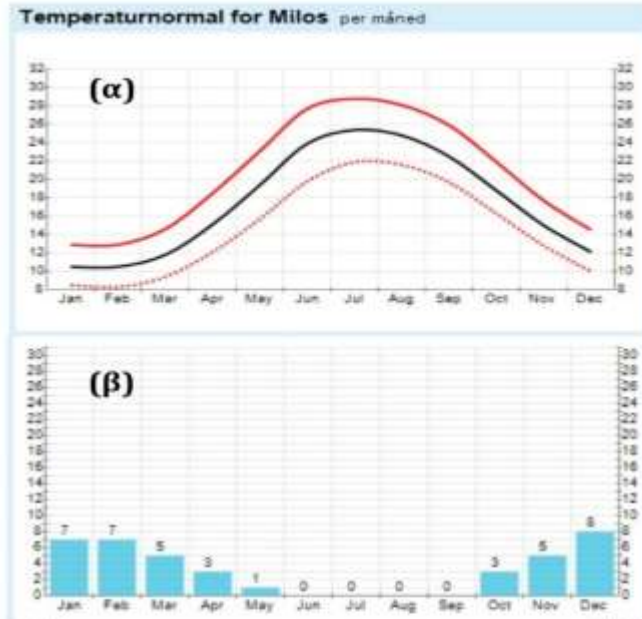
Παρά την αρχαία ονομασία της Αντιπάρου «Ωλίαρος» που σημαίνει «δασώδης», σήμερα η Αντίπαρος είναι ουσιαστικά γυμνή και η φυσική βλάστησή της αποτελείται από αγριολούλουδα και φρύγανα, όπως θυμάρια και θαμνώδη κυπαρισσοειδή. Μόνο σε μερικά σημεία συναντώνται λίγα κέδρα και σκίνα, καθώς και λίγα μικρά θαλασσόπευκα, υπολείμματα της πυκνής βλάστησης που κάλυπτε κατά το παρελθόν το νησί. Ο ορυκτός πλούτος της Αντιπάρου ήταν κατά το παρελθόν σημαντικός. Αρχικά ανακαλύφθηκε, στις δυτικές πλαγιές του Προφήτη Ηλία, κοίτασμα λειμονίτη, από τον οποίο εξαγόταν σίδηρος, με θύλακες σμιθσονίτη, από τον οποίο εξαγόταν ψευδάργυρος. Οι μεταλλευτικές εργασίες στο νησί άρχισαν το 1873, όταν το κράτος παραχώρησε τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων στην Ελληνική Μεταλλευτική Εταιρεία, η οποία άρχισε την εξόρυξη μεταλλεύματος ψευδαργύρου (καλαμίνα) στη θέση «Κακή Σκάλα». Το 1890 ανέλαβε την λειτουργία των μεταλλείων η Γαλλική Εταιρεία Λαυρίου, που δημιούργησε στην Αντίπαρο σημαντικές εγκαταστάσεις με κτίρια, γραφεία, μηχανήματα, καθώς και σιδηρόδρομο για τη μεταφορά των μεταλλευμάτων μέχρι τη θάλασσα. Από το 1902 έως το 1920, από τα μεταλλεία της Αντιπάρου εξορύχτηκαν 45.894 τόνοι μεταλλευμάτων. Οι τελευταίες μεταλλευτικές εργασίες στο νησί - εξόρυξη μολύβδου - διεξήχθησαν την περίοδο 1952 - 1956 (ΔΗΜΟΣ ΑΝΤΙΠΑΡΟΥ, 2018). Η έκταση της ν. Αντιπάρου είναι 35,1 km<sup>2</sup> συμπεριλαμβάνοντας τη νήσο της Αντιπάρου, το Δεσποτικό και το Στρογγυλό. Αριθμεί, σύμφωνα με την απογραφή του 2011, 1.037 μόνιμους κατοίκους και έχει πυκνότητα 29,5 κατοίκους ανά km<sup>2</sup>. Η οικονομία του νησιού βασίζεται κυρίως στον τουρισμό, την αλιεία και την κτηνοτροφία. Η νήσος της Αντιπάρου περιβάλλεται από πληθώρα μικρών ακατοίκητων νησιών με μεγάλο ιστορικό και

αρχαιολογικό ενδιαφέρον, όπως το «Κοιμητήρι», το «Στρογγυλό», το «Διπλό», τον «Κάβουρα», το «Ρευματονήσι», τον «Κόκκινο» και «Μαύρο Τούρλο». (ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ, 2018).

Η Πάρος είναι το τρίτο σε μέγεθος νησί των Κυκλάδων και βρίσκεται δυτικά της Νάξου, από την οποία τη χωρίζει ένας στενός δίαυλος πλάτους 3 περίπου μιλίων, ενώ από τον Πειραιά απέχει 90 ναυτικά μίλια. Έχει έκταση 193.308 km<sup>2</sup> και το μήκος των ακτών της είναι 118,5 km. Ο πληθυσμός του νησιού, κατά την απογραφή του 2011 ήταν 13.710 κάτοικοι. Η καίρια γεωγραφική θέση της Πάρου στο κεντρικό Αιγαίο, που αποτελεί το σταυροδρόμι των θαλάσσιων οδών που συνδέουν την ηπειρωτική Ελλάδα με τα νησιά του Αρχιπελάγους, τα μικρασιατικά παράλια και ευρύτερα τη Μεσόγειο, αποτέλεσε τη διαχρονική βάση για την ανάπτυξη του νησιού. Το κλίμα του νησιού είναι ήπιο, όπως και στα περισσότερα νησιά των Κυκλάδων, δηλαδή εύκρατο, ξηρό, με ήπιους χειμώνες και λίγες βροχοπτώσεις. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι περίπου 18 βαθμούς Κελσίου, ενώ, από το Μάιο ως το Σεπτέμβριο, η θερμοκρασία αυξάνεται αρκετά. Κατά τη διάρκεια του Αυγούστου, για 20-30 μέρες περίπου, τη ζέση του καλοκαιριού μετριάζουν τα μελτέμια, ή οι «ετησίες» όπως αναφέρονταν από τους αρχαίους Έλληνες, που φυσούν με ένταση 5-7, πολλές φορές φτάνουν και τα 8-9 μποφόρ, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ το βράδυ μειώνεται η έντασή τους (Wikipedia, 2018). Τα βασικά κλιματολογικά στοιχεία της εν λόγω περιοχής μελέτης αποτυπώνονται στην Εικόνα 3.2 (ΥΡ, 2018), (Windguru, 2018), (Meteo, 2018). Στις Εικόνα 3.2 έως 3.5 που ακολουθούν απεικονίζονται αντίστοιχα σε κάθε περιοχή μελέτης, στο διάγραμμα υπό στοιχεία (α) οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες (°C), στο γράφημα υπό στοιχεία (β) ο μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών βροχόπτωσης, στον πίνακα (γ) αναγράφονται τα στατιστικά στοιχεία θερμοκρασιών (°C), ύψος βροχόπτωσης (mm), ατμοσφαιρικής πίεσης (hpa), υγρασίας (%), έντασης ανέμου (m·s<sup>-1</sup>), ενώ στο ιστόγραμμα υπό στοιχεία (δ) απεικονίζονται στοιχεία ανέμου, όπως είναι η ένταση σε Beaufort, το ποσοστό ημερών ανά κλίμακα έντασης ανέμου και οι μέσες τιμές θερμοκρασιών ημέρας και νύκτας. Τα νησιά των Κυκλάδων είναι από τις περιοχές όπου πολύπλοκες γεωλογικές διεργασίες ευθύνονται για τη γένεση, την εξέλιξή τους αλλά και τη διαμόρφωση του μοναδικού κάλλους περιβάλλοντος τους καθώς και την κοινωνική, οικονομική και ιστορική εξέλιξη τους από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Βασικές αλλαγές και σημαντικά γεωλογικά γεγονότα συνέβαλαν στη διαμόρφωση των λεκανών και της παλαιογεωγραφικής τους εξέλιξης, που άρχισαν πριν από 23 εκατομ. χρόνια περίπου, και συνεχίζονται μέχρι σήμερα, όπως τεκτονικές δράσεις, αποσύρσεις, επικλύσεις

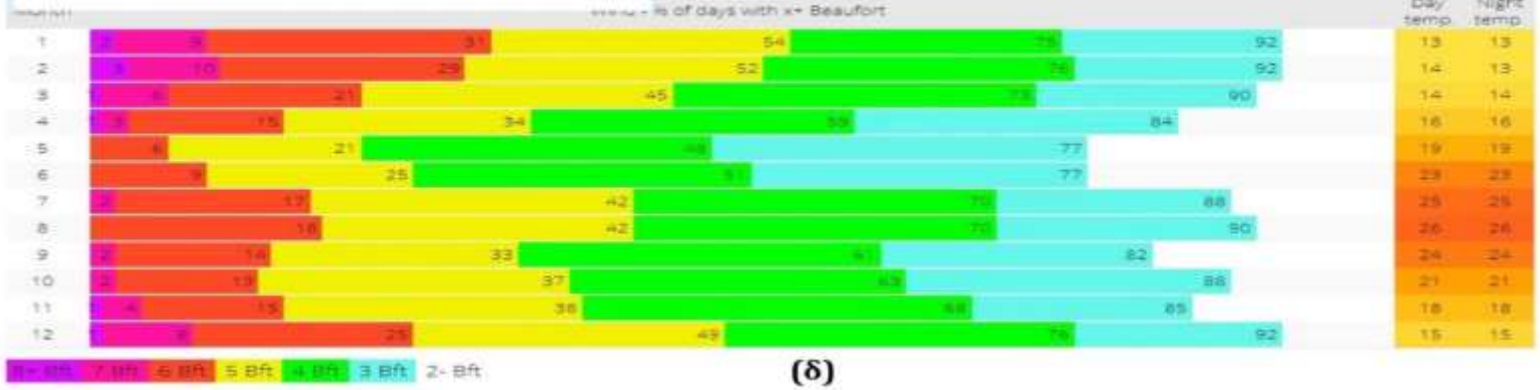
της θάλασσας κ.α. Η Πάρος γεωλογικά δομείται από 4 τεκτονικές ενότητες, οι οποίες από Νότια προς τα Βόρεια είναι η ενότητα Παροικίας που αποτελείται από γνευσίους, η ενότητα Μαράθι που αποτελείται από αμφιβολίτες και μάρμαρα με λεπτές ενδιαστρώσεις σχιστολίθων, το τεκτονικό κάλυμμα του Δρυού με φυλλίτες και κρυσταλλικούς ασβεστολίθους και το τεκτονικό κάλυμμα Μάρμαρα που αποτελείται από οφιολίθους, ασβεστολίθους και μολάσσα (Ματαράγκας και Βαρτή-Ματαράγκα, 2017).

Η περιοχή του Στενού Πάρου-Αντιπάρου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από ναυτιλιακή άποψη καθόσον πρόκειται για μία θαλάσσια περιοχή μεταξύ κοντινών ακτών, στην οποία βρίσκονται αρκετά αβαθή επικίνδυνα για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε εντός της εν λόγω θαλάσσιας ζώνης βρίσκονται αρκετές βραχονησίδες με απόκρημνες ακτές και πυθμένα που παρουσιάζει έντονη κλίση.



| ΜΑΕΘΣ   | ΙΑΝ    | ΦΕΒ    | ΜΑΡ    | ΑΠΡ    | ΜΑΙ    | ΙΟΥΝ   | ΙΟΥΛ   | ΑΥΓ  | ΣΕΠ    | ΟΚΤ    | ΝΟΕ    | ΔΕΚ    | ΕΤΟΣ   |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Αιτιοκρατική πίεση (hPa)                          | 1016.5 | 1015.1 | 1014.6 | 1012.9 | 1013.3 | 1012.3 | 1010.7 | 1011 | 1014.3 | 1016.7 | 1017.4 | 1016.4 | 1014.3 |
| Μέση θερμοκρασία (°C)                             | 12     | 12.1   | 13.3   | 16.1   | 19.4   | 23.2   | 24.7   | 24.4 | 22.6   | 19.3   | 16.2   | 13.7   | 18.1   |
| Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)                     | 14.3   | 14.4   | 15.7   | 18.6   | 21.9   | 25.7   | 26.6   | 26.2 | 24.6   | 21.4   | 18.6   | 15.8   | 20.3   |
| Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)                    | 9.3    | 9.3    | 10.2   | 12.5   | 15.4   | 19.2   | 21.7   | 21.7 | 19.8   | 16.6   | 13.4   | 10.9   | 15     |
| Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°C)                  | 22.2   | 22.3   | 25.4   | 30.5   | 33.6   | 36.2   | 37.4   | 34   | 33     | 30.8   | 28.8   | 24     |        |
| Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (°C)                 | 0.4    | -1     | 2      | 5.1    | 7.1    | 12     | 14.8   | 13.6 | 11.2   | 7.2    | 4.5    | 2      |        |
| Μέση σχετική υγρασία (%)                          | 72     | 71     | 72     | 70     | 71     | 68     | 69     | 70   | 71     | 73     | 74     | 73     | 71     |
| Μέση βροχόπτωση (mm)                              | 71     | 59     | 50     | 18     | 10     | 3      | 1      | 3    | 6      | 39     | 47     | 69     | 37%    |
| Μέσος αριθμός ημερών με βροχή μεγαλύτερη από 1 mm | 8      | 8      | 6      | 3      | 1      | 1      | 0      | 0    | 1      | 3      | 5      | 9      | 45     |
| Μέση ένταση ανέμων (m/s)                          | 3.9    | 4      | 3.6    | 2.8    | 2.4    | 2.3    | 3.2    | 3.4  | 3.4    | 3.7    | 3.2    | 3.7    | 3.3    |

(γ)



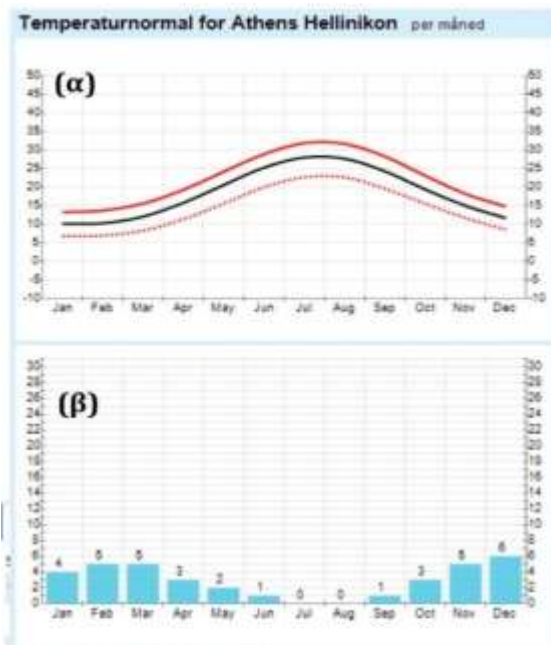
(δ)

(archive available: 16.03.2003 - 13.12.2018)

Εικόνα 3.2: Κλιματολογικά Στοιχεία Περιοχής Ερεύνης Στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου.

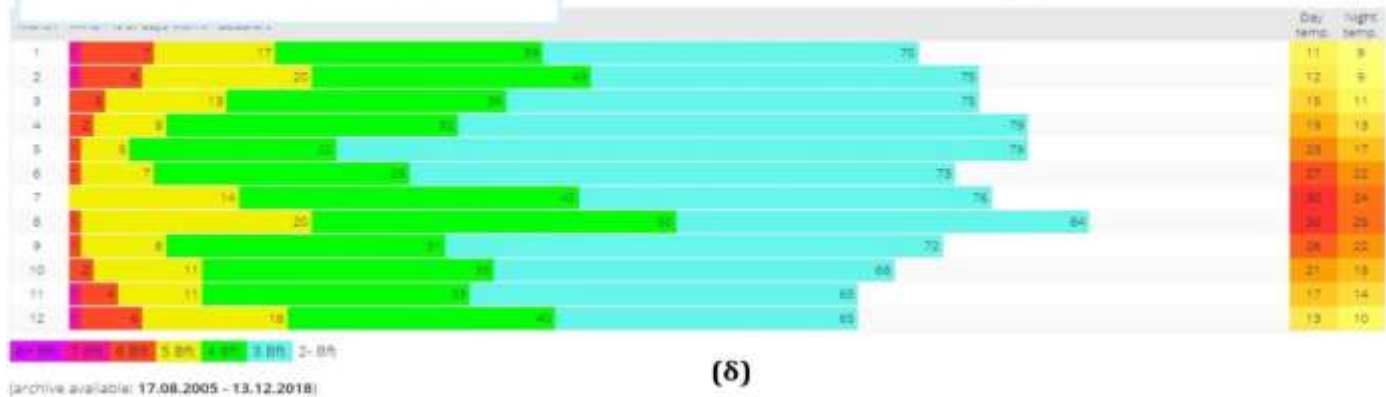
### 3.1.2 Περιοχή Μαρίνας Αγ. Κοσμά, Σαρωνικού Κόλπου (Case Study 2)

Πρόκειται για μία περιοχή στην οποία η Γεωμορφολογία της έχει επηρεαστεί από τις έντονες ανθρωπογενείς επιδράσεις που έχουν αναπτυχθεί στην περιοχή και οι οποίες στο μέλλον αναμένεται να αυξηθούν ακόμη περισσότερο. Η Μαρίνα του Αγίου Κοσμά υπάγεται διοικητικά στο Δήμο Ελληνικού. Χωροθετείται σε μία δημόσια έκταση επιφανείας 450.000 m<sup>2</sup> μεταξύ του ακρωτηρίου του Αγίου Κοσμά και του Όρμου της Γλυφάδας και νότια της Λεωφόρου Ποσειδώνος μπροστά στο θαλάσσιο μέτωπο των ορίων του Δήμου Ελληνικού και του Δήμου Γλυφάδας. Η θαλάσσια περιοχή της μαρίνας έχει έκταση περίπου 3,0-3,5 km<sup>2</sup>. Το μήκος της, παράλληλα προς την ακτογραμμή, είναι 3 km και το μέγιστο πλάτος της κάθετα προς την ακτογραμμή είναι 1,2 km περίπου. Ο προσανατολισμός της ακτής είναι ΒΔ-ΝΑ. Η Μαρίνα Αγίου Κοσμά δημιουργήθηκε για να φιλοξενήσει αρχικά τους αγώνες ιστιοπλοΐας των Ολυμπιακών Αγώνων «Αθήνα 2004». Μετά τους ολυμπιακούς αγώνες, αναπτύχθηκε ως ιδιωτική Μαρίνα, προσφέροντας στα ελλιμενίζοντα σκάφη πολύ καλές συνθήκες προστασίας από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες κυρίως λόγω του εξαιρετικού σχεδιασμού της. Στις εγκαταστάσεις της μπορούν να φιλοξενηθούν 337 σκάφη με ελάχιστο μήκος 15 m (49,21 πόδια) και μέγιστο συνολικό μήκος 80 m (262,47 πόδια). Η μαρίνα διαθέτει υπηρεσίες πρόσδεσης σκαφών με φουσκωτό-πilotο και παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (220/380 V) και πόσιμου νερού. Επίσης, για τους επισκέπτες και πληρώματα διαθέτει τουαλέτες & ντουζιέρες. Υπάρχει 24ωρη υπηρεσία ασφαλείας (security) (Φράχτης ασφαλείας, έλεγχος κατά την είσοδο οχημάτων) και χώρος προσγείωσης ελικοπτέρων (σημείο TLOF). Τέλος, διαθέτει υπηρεσία ανεφοδιασμού καυσίμων (με ειδοποίηση μιας ημέρας). Η χρήση, διοίκηση, διαχείριση και εκμετάλλευση της Μαρίνας διενεργείται σήμερα από ιδιωτική εταιρεία (ΕΛΛΗΝΙΚΟ Α.Ε., 2018). Τα κυριότερα κλιματολογικά στοιχεία της εν λόγω περιοχής μελέτης αποτυπώνονται στην Εικόνα 3.3 (YR, 2018), (Windguru, 2018), (Meteo, 2018).



| ΑΘΗΝΑ   | ΙΑΝ    | ΦΕΒ  | ΜΑΡ    | ΑΠΡ    | ΜΑΙ  | ΙΟΥΝ   | ΙΟΥΛ  | ΑΥΓ  | ΣΕΠ    | ΟΚΤ    | ΝΟΕ    | ΔΕΚ    | ΕΤΟΣ   |
|---|--------|------|--------|--------|------|--------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ατμοσφαιρική πίεση (hPa)                          | 1004.5 | 1003 | 1002.5 | 1000.5 | 1001 | 1000.4 | 999.7 | 1000 | 1002.9 | 1005.2 | 1005.2 | 1004.2 | 1002.4 |
| Μέση θερμοκρασία (OC)                             | 9.3    | 9.8  | 11.7   | 15.5   | 20.2 | 24.6   | 27    | 26.6 | 23.3   | 18.3   | 14.4   | 11.1   | 17.7   |
| Μέση μέγιστη θερμοκρασία (OC)                     | 12.9   | 13.6 | 16     | 20.3   | 25.3 | 29.8   | 32.6  | 32.3 | 28.9   | 23.1   | 18.6   | 14.7   | 22.3   |
| Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (OC)                    | 6.5    | 6.9  | 8.4    | 11.8   | 15.4 | 20.1   | 22.5  | 22.3 | 19.2   | 14.9   | 11.4   | 8.3    | 14     |
| Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (OC)                  | 22.6   | 25.3 | 26.9   | 29.9   | 35.5 | 41.7   | 42.8  | 40.7 | 38.6   | 33.5   | 27.3   | 22.1   |        |
| Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (OC)                 | -4.5   | -4   | -2     | -0.3   | 7.7  | 11.8   | 16    | 16.1 | 11.8   | 5.9    | 0.9    | -2.7   |        |
| Μέση σχετική υγρασία (%)                          | 72     | 71   | 68     | 61.2   | 58   | 52     | 48    | 49   | 56     | 66     | 73     | 73     | 62     |
| Μέση βροχόπτωση (mm)                              | 45     | 48   | 43     | 28     | 17   | 10     | 4     | 5    | 12     | 48     | 51     | 67     | 378    |
| Μέσος αριθμός ημερών με βροχή μεγαλύτερη από 1 mm | 5      | 6    | 6      | 4      | 2    | 1      | 1     | 1    | 1      | 4      | 5      | 7      | 43     |
| Μέση ένταση ανέμων (km/h)                         | 2.1    | 2.1  | 2      | 1.8    | 1.6  | 1.8    | 2.1   | 2.2  | 1.9    | 2      | 1.8    | 2      | 2      |

(γ)



Εικόνα 3.3: Κλιματολογικά Στοιχεία Περιοχής Ερεύνης Ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής Μαρίνας Αγ. Κοσμά.



Η μαρίνα του Αγ. Κοσμά θεωρείται σήμερα ως η «κορωνίδα» της ανάπτυξης του νότιου παραλιακού μετώπου της Αττικής, καθόσον θα αποτελέσει τμήμα του Σχεδίου Ολοκληρωμένης Ανάπτυξης (ΣΟΑ) της έκτασης του παλαιού Αεροδρομίου Ελληνικού και είναι η μεγαλύτερη σε μέγεθος μαρίνα της νότιας παράκτιας ζώνης της Αττικής της αποκαλούμενης και ως «Αθηναϊκή Ριβιέρα». Το ΣΟΑ αφορά στη συνδυασμένη ανάπτυξη των περιοχών του πρώην αεροδρομίου του Ελληνικού, του πρώην Ολυμπιακού Κέντρου Ιστιοπλοΐας και του Εθνικού Αθλητικού Κέντρου Νεότητας Αγίου Κοσμά, οι οποίες από κοινού απαρτίζουν τον Μητροπολιτικό Πόλο Ελληνικού – Αγίου Κοσμά. Το έργο ανάπλασης των εγκαταστάσεων του πρώην αεροδρομίου Ελληνικού θα ακολουθεί τις σύγχρονες πρακτικές ανάπτυξης και θα ενσωματώνεται στο ευρύτερο σχέδιο ανάπλασης του παράκτιου μετώπου. Στην πραγματικότητα εντάσσεται στο γενικότερο σχεδιασμό για την ανάπτυξη της οικονομίας της Αττικής την επόμενη περίοδο. Ο εν λόγω σχεδιασμός, αποφασίστηκε πριν από την τρέχουσα οικονομική κρίση, εστιάζει στην αξιοποίηση της θέσης της χώρας ως κόμβου μεταφοράς εμπορευμάτων και στη σημαντική αύξηση του τουρισμού απ' το εξωτερικό, αξιοποιώντας την Αττική ως κεντρικό τουριστικό προορισμό. Σ' αυτόν τον άξονα κινούνται οι αναπτυξιακές προτεραιότητες του Ελληνικού Δημοσίου για την Αττική, μέσω της τουριστικής αξιοποίησης του θαλάσσιου μετώπου, του λιμανιού κρουαζιέρας, τις αστικές αναπλάσεις στο εσωτερικό του αστικού ιστού. Πράγματι στη πρόταση που έχει εκπονηθεί, ο βασικός σχεδιασμός περιλαμβάνει, «αναβάθμιση της παραλίας, οικιστικές αναπτύξεις, υπερ-τοπικό και τοπικό εμπόριο, ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και χώρους αναψυχής κοινού, αξιοποίηση των ολυμπιακών εγκαταστάσεων και κατασκευή νέων χώρων άθλησης, νέο γήπεδο γκολφ, χώρους ανάδειξης της πολιτιστικής μας κληρονομιάς, εκπαιδευτικές εγκαταστάσεις και ερευνητικά κέντρα, κλπ.

Επιπλέον, στα πλαίσια του έργου, το επενδυτικό σχήμα αναλαμβάνει τη δημιουργία, χρηματοδότηση και συντήρηση του μεγαλύτερου στην Ελλάδα και ενός εκ των μεγαλύτερων στον κόσμο Μητροπολιτικού Πάρκου Πρασίνου και Αναψυχής, που συνδυαστικά με τους κοινόχρηστους χώρους πρασίνου του ακινήτου θα καλύπτουν έκταση 2.600.000 m<sup>2</sup>, ήτοι 42% της συνολικής επιφάνειας της έκτασης. Ο σχεδιασμός είναι υψηλών προδιαγραφών και περιλαμβάνει την αναβάθμιση και ανάδειξη του παραλιακού μετώπου μέσω της πραγματοποίησης σημαντικών λιμενικών έργων για τη δημιουργία μιας νέας παραλίας

ελεύθερης πρόσβασης, μήκους μεγαλύτερης του 1 km, που στη μια άκρη της θα έχει τη μαρίνα και στην άλλη ένα διεθνούς εμβέλειας τοπόσημο, ένα ενυδρείο (Χρηστίδη, 2017).

Οπότε, είναι προφανές ότι λόγω της σημαντικής ανάπτυξης και της πολύ έντονης ναυτιλιακής κίνησης από τουριστικά, ιστιοπλοϊκά ή άλλα σκάφη πολύ κοντά στον θαλάσσιο δίαυλο του Σαρωνικού η εν λόγω θαλάσσια περιοχή παρουσιάζει έντονο μελετητικό ενδιαφέρον.

### 3.1.3 Περιοχή Κόλπου Λαγανά Ν. Ζακύνθου (Case Study 3)

Ο Κόλπος Λαγανά βρίσκεται 9 km από την πόλη της Ζακύνθου και αποτελεί το δημοφιλέστερο και πιο πολυσύχναστο τουριστικό θέρετρο του νησιού. Το χωριό πήρε το όνομά του από τις «λαγίνες» που κατασκεύαζαν παλαιότερα στην περιοχή (πήλινα δοχεία που χρησιμοποιούσαν για νερό). Το χωριό «Λαγανάς» είναι παραθαλάσσιο και καταλήγει στην μεγαλύτερη παραλία του νησιού που ανήκει στον ομώνυμο κόλπο. Ο κόλπος του Λαγανά θεωρείται από τους μεγαλύτερους στην Ελλάδα με μήκος ακτής 20 km. Πέριξ αυτού υπάρχουν αρκετοί ελαιώνες, ενώ ένα πευκόφυτο παραθαλάσσιο δάσος αποτελεί το φυσικό όριο του Λαγανά με τον οικισμό Καλαμάκι. Η τουριστική κίνηση είναι έντονη στην περιοχή κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών. Τα θαλάσσια σπορ δεν επιτρέπονται στην εν λόγω παράκτια περιοχή γιατί ο κόλπος είναι τόπος αναπαραγωγής της θαλάσσιας χελώνας. Για την προστασία των χελωνών, ο κόλπος του Λαγανά και οι περιοχές που έγκειται σε αυτόν, ανακηρύχθηκαν σε Εθνικό Θαλάσσιο Πάρκο και από τότε η ανοικοδόμηση ελαττώθηκε ενώ η κίνηση των μηχανοκίνητων θαλάσσιων σκαφών απαγορεύθηκε. Οπότε, είναι προφανές ότι σύμφωνα με τους προαναφερόμενους περιορισμούς η εν λόγω περιοχή αποτελεί μία θαλάσσια έκταση, η οποία πολύ δύσκολα υδρογραφείται με τους συμβατικούς τρόπους βαθυμετρίας (χρήση μηχανοκίνητου σκάφους, ακουστικά συστήματα μέτρησης του βάθους, κτλ.). Το θαλάσσιο πάρκο της Ζακύνθου βρίσκεται κατά μήκος της νότιας ακτής, περιλαμβάνοντας την θαλάσσια περιοχή (Εικόνα 3.4) που εκτείνεται από το Ακρωτήριο «Μαραθιά» μέχρι την παραλία του «Γέρακα», περιλαμβάνει τόσο τις παραλίες Λίμνη Κερί,

Λαγανάς και Καλαμάκι, όσο και τις Στροφάδες που είναι δύο νησίδες σε απόσταση πενήντα (50) ναυτικών μιλίων νότια της ν. Ζακύνθου.



**Εικόνα 3.4:** Χάρτης Περιοχής Θαλασσίου Πάρκου Ζακύνθου (<https://www.zanteisland.com>)

Όλη η προστατευόμενη ζώνη παρουσιάζει βασικά χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος της Μεσογείου, με αμμουδιές, μεμονωμένα βράχια, ενώ πλησίον των ακτών υπάρχουν πυκνά πευκοδάση, εύφορες αγροτικές περιοχές και εκτάσεις καλυμμένες από αυτοφυή Μεσογειακή βλάστηση. Το εθνικό θαλάσσιο Πάρκο Ζακύνθου ιδρύθηκε το 1999 με Π.Δ. (ΦΕΚ 906/Δ' τευχ./22 Δεκ 1999) και έχει σκοπό την αποτελεσματική προστασία της ιδιαίτερης πανίδας που υπάρχει στο νότιο τμήμα του νησιού και την ένταξή της στην τοπική κοινωνία. Τα πιο σημαντικά είδη ζώων που γίνεται προσπάθεια να διασωθούν είναι οι θαλάσσιες χελώνες *Caretta caretta* και οι Μεσογειακές φώκιες *Monachus monachus* (ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΑΡΚΟ ΖΑΚΥΝΘΟΥ, 2018). Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις πηγές της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) η Ζακύνθος εμφανίζει αρκετά χαμηλά ποσοστά ανεργίας, χαμηλότερα ακόμα και από εκείνα της Κέρκυρας και είναι ο τέταρτος νομός με τη

χαμηλότερη ανεργία πανελλαδικά. Το βασικό χαρακτηριστικό της οικονομίας της ν. Ζακύνθου αποτελεί η υψηλή συγκέντρωση δραστηριοτήτων (89%) στον τριτογενή τομέα (τουρισμός - εμπόριο). Τα κύρια κλιματολογικά στοιχεία της εν λόγω περιοχής μελέτης αποτυπώνονται στην Εικόνα 3.5 (YR, 2018), (Windguru, 2018), (Meteo, 2018).

Η Ζάκυνθος στο μεγαλύτερο μέρος της είναι ορεινή, με χαμηλά πευκόφυτα δάση και εύφορους κάμπους. Στα βόρεια, ανατολικά και νότια χαρακτηρίζεται από πολλές παραλίες, ενώ στα δυτικά στις επιβλητικές βραχώδεις ακτές της, σχηματίζονται πολλές θαλάσσιες σπηλιές. Το συνολικό μήκος των ακτών της είναι 154,0 km<sup>2</sup>. Ο κόλπος του Λαγανά αποτελεί την μεγαλύτερη βιολογική ποικιλότητα που οφείλεται στην ύπαρξη πολύ σημαντικών οικοτόπων, όπως οι αμμώδεις παραλίες και οι βραχώδεις ακτές. Στους οικοτόπους αυτούς αναπτύσσονται, όπως προαναφέρθηκε χαρακτηριστικές και συχνά μοναδικές φυτικές και ζωικές κοινότητες. Επίσης στον συγκεκριμένο κόλπο έχουν εντοπιστεί εκτεταμένα λιβάδια ποσειδωνίας. Τα οικοσυστήματα της ποσειδωνίας αποτελούν τα θαλάσσια τροπικά δάση της Μεσογείου. Αποτελούν περιοχές υψηλής παραγωγικότητας που φιλοξενούν έναν πολύ μεγάλο αριθμό ασπόνδυλων ειδών και ψαριών. Η Ζάκυνθος δεν έχει ψηλά βουνά. Το βόρειο και δυτικό τμήμα της θεωρούνται τα πιο ορεινά. Το ανατολικό τμήμα είναι πεδινό. Στο κέντρο περίπου του νησιού υψώνεται το όρος Βραχίωνας με τρεις κορυφές, η υψηλότερη που φθάνει τα 758 μέτρα.

Επίσης, μεγάλα ποτάμια δεν έχει η Ζάκυνθος. Υπάρχει μόνο ένας χείμαρρος, του Αγίου Χαραλάμπη. Το ανατολικό τμήμα του νησιού διαιρείται σε δύο, κυρίως, μεγάλα και εύφορα λεκανοπέδια. Η μορφολογία και η σύσταση του εδάφους επιτρέπουν την διάκριση του σε δύο γενικές κατηγορίες:

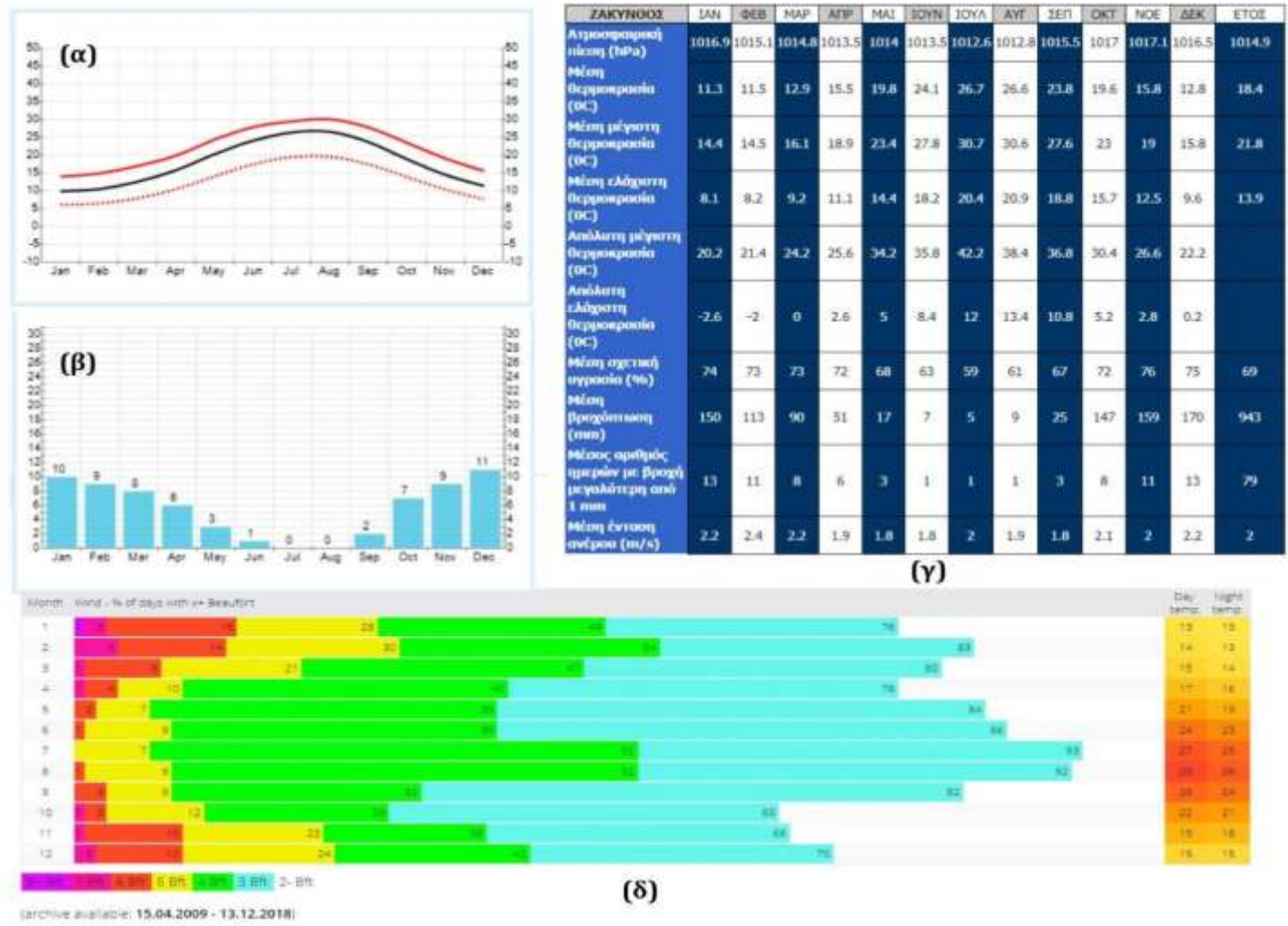
α) Εδάφη πεδινά: Σχετικά βαθιά εδάφη και από μηχανικής άποψης μπορούν να χαρακτηριστούν σαν μέτρια μέχρι λίγο βαριά, πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο και γόνιμα.

β) Εδάφη Ορεινά: Διαφόρων κλίσεων (5-20%) από αβαθή μέχρι μετρίου βάθους και από χαλικιώδη ελαφρά μέχρι μέτρια. Τα εδάφη αυτά είναι αλκαλικής αντίδρασης, φτωχά σε οργανική ουσία και άζωτο και λιγότερο φτωχά σε φωσφόρο και κάλλιο (Το Περιβάλλον στην Ζάκυνθο, 2019)

Η περιοχή των Κόλπων Λαγανά και Γέρακα ν. Ζακύνθου εκτείνεται κατά μήκος της παραλίας των ομώνυμων κόλπων και διακρίνεται σε τρεις σχηματισμούς

διαχωριζόμενους από δύο ασυμφωνίες. Ο κυριώτερος σχηματισμός, εκτείνεται στο δυτικό άκρο της παραλίας Γέρακα και αποτελείται από αργίλους κυανόφαιου χρώματος, πάχους μεγαλύτερου των 30 m, με διάσπαρτα μεγαλοαπολιθώματα (*Glycymeris bimaculata*) και συχνές ενδιαστρώσεις φυλλώδους μάργας πάχους 50 cm – 1,5 m.

Αντιπροσωπεύει απόθεση σε ένα χαμηλής ενέργειας, αβαθών υδάτων θαλάσσιο περιβάλλον, όπου επικρατεί απόθεση αργιλομαργαϊκού υλικού. Η παρουσία ασπόνδυλων απολιθωμένων οργανισμών και ιχνοαπολιθωμάτων καθώς και οι ομοιογεντοποιημένες μάργες υποδηλώνουν απόθεση σε ένα σταθερό, πολύ ήσυχο θαλάσσιο περιβάλλον.



Εικόνα 3.5: Κλιματολογικά Στοιχεία Περιοχής Ερεΐνης Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 4.1.1 Εφαρμοζόμενη Τεχνολογία Αιχμής (State-Of-The Art)

Η παρουσία εργασία ασχολήθηκε με την μελέτη των υδάτων με σκοπό την υποστήριξη της ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής στην θάλασσα και στην προστασία του παράκτιου περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα αποσκοπούσε στην εξέταση δυνατότητας εξαγωγής βαθυμετρίας, από δορυφορικές πολυφασματικές εικόνες από ύδατα της κατηγορίας 2 (Case 2 waters) και διερεύνηση αξιοποίησή της σε προϊόντα ναυτικής χαρτογραφίας. Τα εν λόγω ύδατα θεωρούνται ιδιαίτερως σύνθετα λόγω των συστατικών τους, καθόσον δεν περιέχουν μόνο χλωροφύλλη αλλά συνίστανται και από ανόργανα αιωρούμενα σωματίδια (SM) και διαλυμένη οργανική ύλη (CDOM /gilvin /gelbstoff /yellow substance) (Sathyendranath, *et al.*, 1989), (Carder, *et al.*, 1991). Η δυσκολία στην μελέτη της εν λόγω κατηγορίας υδάτων (Case-2) αυξάνεται στην περίπτωση εξαγωγής βαθυμετρίας, ενώ γίνεται ακόμα πιο σύνθετη η κατάσταση εκεί που ο υδάτινος πυθμένας παρουσιάζει ποικιλομορφία στα ιζήματά του ή παρουσιάζει υποθαλάσσια χλωρίδα, λόγω της διαφορετικότητας της φασματικής απόκρισης κάθε ιζήματος-χλωρίδας.

Η αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με την γήινη ατμόσφαιρα αποτελεί σημαντικό ζήτημα το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς στην διεθνή βιβλιογραφία. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα έρευνα δεν εστιάζεται στην ατμοσφαιρική επεξεργασία και διόρθωση των δορυφορικών δεδομένων, αλλά στην ανάλυση της ακτινοβολίας όσο το φως διαδίδεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και αλληλεπιδρά με τον θαλάσσιο πυθμένα και την υδάτινη στήλη (Albert, *et al.*, 2003), (Gordon, *et al.*, 1983). Οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας υποθαλασσίως, καθιστούν το αντικείμενο εξαγωγής βαθυμετρίας πολύ σύνθετο ζήτημα, καθόσον η προσπάθεια ανάλυσης αφορά στον εντοπισμό ενός πολύ μικρού ποσοστού του Η/Μ σήματος λόγω των φαινομένων απορρόφησης και σκέδασης που συμβαίνουν μέσα στην υδάτινη στήλη. Αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ύδατος και των φωτονίων (ηλιακής ακτινοβολίας), είναι ο αισθητήρας τηλεπισκόπησης να λαμβάνει ένα πολύ μικρό ποσοστό της αρχικά προσπίπτουσας ακτινοβολίας (sea surface reflectance) στην υδάτινη επιφάνεια. Ακόμα και

στην περίπτωση που υπάρχει 0% νεφοκάλυψη στην ατμόσφαιρα η ανερχόμενη από το ύδωρ ακτινοβολήση (subsurface irradiance reflectance) από μία παράκτια οπτικά ρηχή περιοχή κυμαίνεται από 1%-15% της προσπίπτουσας ενέργειας στην υπόψη υδάτινη επιφάνεια (downwelling irradiance) (Dekker and Bukata, 2002).

Η καινοτομία (*State-of-the-Art*) της παρούσας διατριβής αφορά στην ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας (Model), η οποία δύναται να εξάγει βαθυμετρία, με ικανοποιητική ακρίβεια, από οπτικά ρηχά ύδατα, δηλαδή ύδατα από τα οποία καταγράφεται από τους αισθητήρες τηλεπισκόπησης κάποιο, έστω και το ελάχιστο σήμα από τον θαλάσσιο πυθμένα. Το συγκεκριμένο μοντέλο αξιοποιεί τους λόγους μεταξύ των βιο-οπτικών ιδιοτήτων ύδατος με σκοπό την διενέργεια μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, προκειμένου να καθοριστούν οι φασματικές ιδιότητες και κατηγορίες των υποθαλασσίων ιζημάτων-χλωρίδας κάθε περιοχής μελέτης. Η εν λόγω μεθοδολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις υφιστάμενες σήμερα και αναφερόμενες στην παγκόσμια βιβλιογραφία τεχνικές, δεδομένου ότι δεν απαιτεί χρονοβόρους και σύνθετους υπολογισμούς, δεν απαιτεί τη χρήση συστημάτων μεγάλης υπολογιστικής επάρκειας, δεν χρησιμοποιεί σύνθετους μαθηματικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, ενώ από τα πειράματα και δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν εκτιμάται ως ικανοποιητικής ακριβείας, καθώς στηρίζεται στις μετρήσεις των εγγενών και φαινομένων βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Επιπρόσθετα, από τα πειράματα που διεξήχθησαν στην παρούσα έρευνα, διαπιστώθηκε ότι η μεθοδολογία που επινοήθηκε είναι αρκετά σταθερή σε ότι αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (βαθών και ταξινόμησης), δεδομένου ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς σε θαλάσσιους πυθμένες 3 διαφορετικών θαλασσίων περιοχών δεν επηρρέαστηκαν λόγω της διαφορετικής σύστασης των ιζημάτων και του τύπου της υποθαλάσσιας βλάστησης. Το υπόψη μοντέλο αποδείχθηκε ότι λειτουργεί και με ελεύθερα στο διαδίκτυο δορυφορικά δεδομένα αλλά και με δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης, τα οποία διατίθενται μόνον κατόπιν αμοιβής. Δεν είναι μία αμιγώς εμπειρική μεθοδολογία, ούτε αποκλειστικά ένα ημι-αναλυτικό μοντέλο εξαγωγής βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτεί μετρήσεις πεδίου φάσματος από ιζήματα, βένθος ή ανακλαστικότητας της ελεύθερης επιφανείας της θάλασσας όπως τα αναλυτικά μοντέλα εξαγωγής βαθυμετρίας. Για το λόγο αυτό η επινοηθείσα στην παρούσα έρευνα μέθοδος (model) ονομάστηκε «**Υβριδικό Μοντέλο Εξαγωγής Βαθυμετρίας**» (**Hybrid Model**).



Το υπόψη μοντέλο απαιτείται να προσαρμόζεται ως προς την διαμόρφωσή του αναλόγως της χωρικής ανάλυσης της εικόνας, του βαθμού θορύβου (sunglint, atmospheric, κλπ) που εμπεριέχει, της ποιότητας και της συγκέντρωσης των διαλυμένων και μη, σωματιδίων και ουσιών στα θαλάσσια ύδατα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύνολο των απαιτούμενων βιο-οπτικών παραμέτρων (IOPs & AOPs) των υδάτων υπολογίζεται από ανάλυση της εκάστοτε δορυφορικής εικόνας χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση δεδομένων-παρατηρήσεων πεδίου για τον προσδιορισμό αυτών.

Τέλος, επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν έχει εξεταστεί-μελετηθεί-αναφερθεί μέχρι σήμερα διεθνώς.

#### 4.1.2 Τύποι Δεδομένων

Για κάθε περιοχή μελέτης που εξετάστηκε την παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε διαφορετική ομάδα γεωχωρικών δεδομένων (dataset). Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες από διαφορετικούς αισθητήρες τηλεπισκόπησης, εικόνες διαφορετικής χωρικής ανάλυσης, φασματικές ζώνες που καλύπτουν διαφορετικό εύρος του Η/Μ φάσματος, όπως επίσης και δεδομένα από ναυτικούς χάρτες διαφορετικών κλιμάκων. Ο εν λόγω σχεδιασμός επιλέχτηκε προκειμένου ελεγχτεί σε βάθος η δυνατότητα του υιοθετημένου μοντέλου (Hybrid Model) στην εξαγωγή βαθυμετρίας όχι μόνο από ένα τύπο δορυφορικών ή άλλων δεδομένων αλλά και με χρήση διαφορετικού τύπου στοιχείων αναφοράς για την βαθμονόμησή του. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε διαφορετική ομάδα γεωχωρικών δεδομένων για την βαθμονόμηση των δορυφορικών δεδομένων ως εκάστη περιγράφεται αναλυτικά στις ακόλουθες ενότητες.

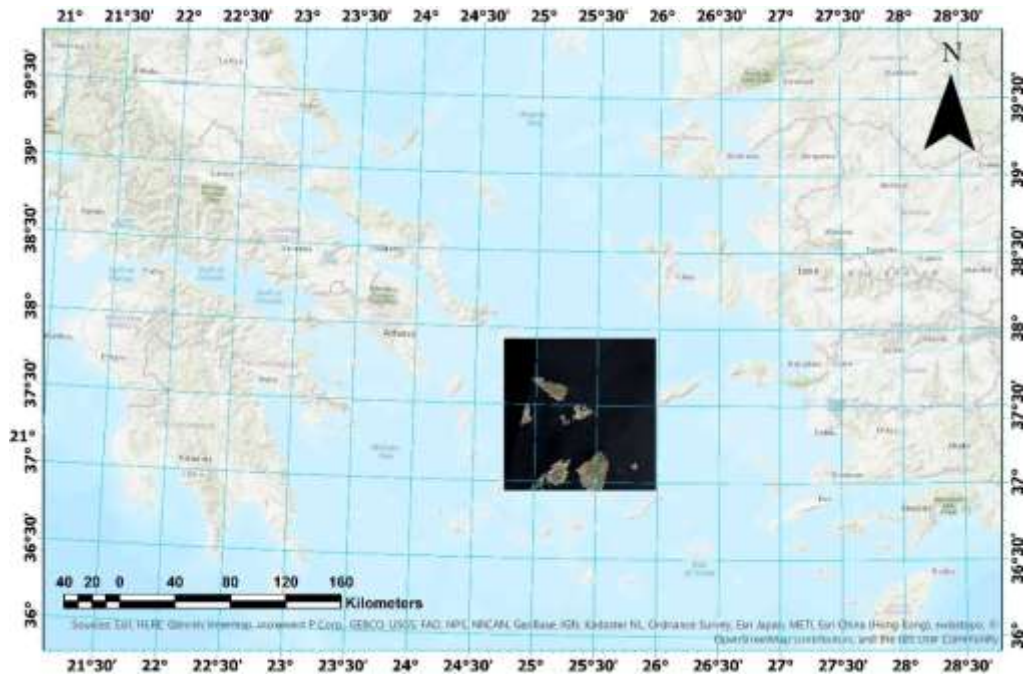
##### 2.3.4.1 Δορυφορικά Δεδομένα Sentinel-2 στο Στενό των Νήσων Πάρου-Αντιπάρου

Για την υποστήριξη της καινοτομίας (*State-of-the-Art*) που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές πλατφόρμες εξοπλισμένες με πολυφασματικούς αισθητήρες μεσαίας και υψηλής χωρικής ανάλυσης.

Πιο συγκεκριμένα για την θαλάσσια περιοχή του στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου επιλέχθηκε εικόνα του δορυφόρου Sentinel-2 (Εικόνα 4.1), με ημερομηνία λήψης την 12.07.2017 (ώρα 09:00:21.026 Z). Η αποστολή της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA) με την ονομασία “Copernicus Sentinel-2” περιλαμβάνει έναν αστερισμό που αποτελείται από δύο (2) δορυφόρους (Sentinel-2A, Sentinel-2B), οι οποίοι βρίσκονται στην ίδια ηλιο-σύγχρονη τροχιά και κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με μία διαφορά φάσης 180°. Ο Sentinel-2A εκτοξεύθηκε την 23.06.2015, ενώ ο δίδυμός του Sentinel-2B την 07.03.2017 και έχουν τοποθετηθεί σε τροχιά μέσου υψομέτρου 786 km. Στόχος του εν λόγω προγράμματος είναι η παρακολούθηση της μεταβολής της γήινης επιφάνειας με μεγάλη σάρωση (wide swath width) εύρους 290 km και μέγιστο χρόνο επανεπίσκεψης 10 ημέρες (Ισημερινός) με ένα δορυφόρο και 5 ημέρες με δύο δορυφόρους. Σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη ο χρόνος διέλευσης από το ίδιο σημείο μειώνεται στις 2-3 ημέρες με δύο δορυφόρους.



**Εικόνα 4.1 :** Δορυφόρος Sentinel-2A. (Image Copyright © ESA and Airbus Defence and Space).



**Εικόνα 4.2 :** Δορυφορική Εικόνα Sentinel-2 Περιοχής Στενού Πάρου-Αντιπάρου (Χρόνος Λήψης: 12.07.2017 (09:00:21 Z)).

Αφορά σε σύστημα τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης, ευρωπαϊκής προέλευσης και τεχνολογίας. Το δορυφορικό σύστημα τηλεπισκόπησης Sentinel-2 αποτελείται από δορυφόρους πολικής τροχιάς με γεωγραφική κάλυψη από 56° S μέχρι 84° N, με τους δύο δορυφόρους. Το σύστημα χρησιμοποιεί αισθητήρα (MultiSpectral Instrument-MSI) πλευρικής σάρωσης (push-broomsensor), ο οποίος σαρώνει/καταγράφει δεδομένα κάθετα στο ίχνος της τροχιάς, ενώ με την κίνηση του δορυφόρου κατά μήκος της τροχιάς (along track) συμπληρώνεται η κάθε επόμενη γραμμή εικονοστοιχείων της εκάστοτε λήψης εικόνων. Ο υψηλής ανάλυσης οπτικός αισθητήρας (MultiSpectral Instrument-MSI) του Sentinel-2 χρησιμοποιεί τρία (3) τηλεσκόπια, τα οποία δύνανται να καταγράφουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε δεκατρείς (13) φασματικές ζώνες. Πιο συγκεκριμένα σε τέσσερις (4) ζώνες σε χωρική ανάλυση των 10 m, έξι (6) φασματικές ζώνες σε ανάλυση 20 m, και τρεις (3) φασματικές ζώνες σε ανάλυση των 60 m. Οι 13 φασματικές ζώνες του υπόψη αισθητήρα χαρακτηρίζονται υπό τα στοιχεία B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B9, B10, B11, B12 και έχουν χωρική ανάλυση και μήκος κύματος ανά φασματική ζώνη όπως αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 4.1.

**Πίνακας 4.1:** Μήκος κύματος Sentinel-2 ανά φασματική ζώνη

| Φασματική Ζώνη<br>Sentinel-2 | Μήκος Κύματος (nm) | Χωρική Ανάλυση (μ) |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
| B1                           | 443,9              | 60                 |
| B2                           | 496,6              | 10                 |
| B3                           | 560,0              | 10                 |
| B4                           | 664,5              | 10                 |
| B5                           | 703,9              | 20                 |
| B6                           | 740,2              | 20                 |
| B7                           | 782,5              | 20                 |
| B8                           | 835,1              | 10                 |
| B8A                          | 864,8              | 20                 |
| B9                           | 945,0              | 60                 |
| B10                          | 1373,5             | 60                 |
| B11                          | 1613,7             | 20                 |
| B12                          | 2202,4             | 20                 |

Το ευρωπαϊκό σύστημα τηλεπισκόπησης Sentinel-2 διαθέτει φασματικές ζώνες με μικρότερο εύρος φάσματος ανά ζώνη, με σκοπό να παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις επιδράσεις της ατμόσφαιρας. Τα διαθέσιμα στους χρήστες προϊόντα ανήκουν σε τρεις (3) κυρίως κατηγορίες, την Level-1B, Level-1C, Level-2A.

Πιο αναλυτικά, τα προϊόντα της κατηγορίας Level-1B αφορούν στις ραδιομετρικά διορθωμένες εικόνες/σκηνές (granules) διαστάσεων 25 km × 23 km, με στοιχεία ακτινοβολίας (radiance) στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (Top-of-Atmosphere Radiance values in Sensor geometry). Τα διορθωμένα (ortho-rectified Level-1C & Level-2A) προϊόντα του συστήματος παραδίδονται σε λήψεις (granules) με συντεταγμένες στο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς WGS 84/UTMProjection, που καλύπτουν γήινη επιφάνεια 100 km × 100 km (Εικόνα 4.2). Τα προϊόντα της κατηγορίας Level-1C αφορούν σε ορθοδιορθωμένες εικόνες/σκηνές (granules), με χρήση ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Digital Elevation Models-DEM) διαστάσεων 100 km × 100 km, έχοντας ενσωματώσει πληροφορίες διόρθωσης των ανακλαστικότητων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (Top-of-

Atmosphere reflectance in Cartographic geometry). Αντίστοιχα, τα προϊόντα της κατηγορίας Level-2A αφορούν σε σκηνές (granules) διαστάσεων 100 km × 100 km, με στοιχεία ανακλαστικότητας στη βάση της ατμόσφαιρας (Bottom-of-Atmosphere reflectance in Cartographic geometry), τα οποία προέρχονται από την επεξεργασία των προϊόντων Level-1C. Επίσης, τα προϊόντα της κατηγορίας Level-2A μπορούν να δημιουργηθούν και από τους χρήστες επεξεργάζοντας τα δεδομένα της κατηγορίας Level-1C, μέσω του ειδικού λογισμικού ατμοσφαιρικής διόρθωσης Sen2Cor Processor (Sentinel-2 Toolbox).

Το επεξεργασμένο προϊόν Level-2A περιλαμβάνει εκτός των φασματικών ζωνών ως αυτές περιγράφονται παρακάτω και μία ταξινομημένη εικόνα με την συγκέντρωση των αερολυμάτων της ατμόσφαιρας (Aerosol Optical Thickness - AOT) σε χωρική ανάλυση 10 m καθώς και ένα χάρτη κατανομής των υδρατμών της ατμόσφαιρας (Water Vapour map- WVP) σε χωρική ανάλυση 20 m. Η φασματική ζώνη 10 περιλαμβάνει πληροφορίες επικίνδυνων νεφών (cirrus), ενώ περιλαμβάνεται και ένας χάρτης ταξινόμησης της σκηνής (Scene Classification Map-SCM).

Η εικόνα Sentinel-2 που αναλύθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής (Εικόνα 4.2) είναι προϊόν της κατηγορίας Level-2A (Surface Reflectance values ή Bottom-of-Atmosphere reflectance in Cartographic geometry), δηλαδή ατμοσφαιρικά διορθωμένο προϊόν. Η χρησιμοποιηθείσα εικόνα του δορυφόρου Sentinel-2A, παραλήφθηκε χωρίς χρέωση από τον ιστότοπο του προγράμματος Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>) δεν έχει νεφοκάλυψη και καταλαμβάνει το κεντρικό κα βορειο-δυτικό τμήμα των ν. Κυκλάδων, εντός της οποίας βρίσκεται η περιοχή ενδιαφέροντος (Στενό ν. Πάρου-Αντίπαρου). Η εν λόγω ατμοσφαιρική διόρθωση γίνεται από την ESA, με την χρήση ειδικών πινάκων κατάστασης ατμόσφαιρας (Look-up Tables), τιμές της συγκέντρωσης των αερολυμάτων (aerosol), ποσοστό νεφοκάλυψης κοκ., οι οποίοι δημιουργούνται από το λογισμικό libRadtran.

#### 2.1.1.1 Δορυφορικά Δεδομένα (Pleiades) Θαλάσσιας Περιοχής Μαρίνας Αγ. Κοσμά, Δήμου Ελληνικού

Για την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά επιλέχθηκε χρήση εικόνας από το δορυφορικό σύστημα Pleiades (Εικόνα 4.3). Το δορυφορικό σύστημα Pleiades ελέγχεται από την Γαλλική Υπηρεσία Διαστήματος (CNES), ενώ οι δορυφορικές εικόνες Pleiades παρέχονται κατόπιν αμοιβής από την εταιρεία AIRBUS Defence and Space

(<https://www.intelligence-airbusds.com/en/4871-browse-and-order>). Η πληροφορία παρατήρησης του συστήματος αποθηκεύεται σε δομές των 12-bits, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να πάρει μέχρι και 4.096 διαφορετικές τιμές αποχρώσεων του γκρι με συνέπεια την αύξηση της ταχύτητας στην επεξεργασία των εν λόγω δορυφορικών δεδομένων και την καλύτερη ποιότητα στις ταξινομήσεις.

Τα προϊόντα του συστήματος Pleiades διαχειρίζονται από ιδιωτικό φορέα και παρέχονται επί πληρωμή σε τρεις (3) τύπους/κατηγορίες αναλόγως των απαιτήσεων των χρηστών, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

Τα «Βασικά προϊόντα» («Primary Products»/1A), που έχουν υποστεί το μικρότερο βαθμό επεξεργασίας και βρίσκονται πλησιέστερα στην φυσική εικόνα, έτσι όπως αυτή καταγράφεται από τον αισθητήρα του συστήματος. Έχουν υποστεί όλες τις ραδιομετρικές διορθώσεις και παρέχεται σε ζώνες με γεωαναφορά σε WGS84 συντεταγμένες.

Τα «Πρότυπα Ορθο-ανηγμένα προϊόντα» («Standard Ortho») που αφορούν σε εικόνες με γεωαναφορά (WGS84/UTM Projection), οι οποίες έχουν διορθωθεί και για τις επιδράσεις του ανάγλυφου εδάφους, οπότε πρόκειται για ένα προϊόν το οποίο μπορεί να επιτεθεί απευθείας πάνω σε έναν χάρτη. Επίσης, έχουν εφαρμοστεί όλες οι απαραίτητες ραδιομετρικές διορθώσεις. Άρα, πρόκειται για ένα προϊόν το οποίο δίνει πληροφορίες ακτινοβολίας φάσματος (TOA Radiance) στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, το οποίο θα πρέπει να επεξεργαστεί κατάλληλα προκειμένου η εν λόγω φασματική πληροφορία να μετατραπεί σε τιμές ανακλαστικότητας στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (TOA Reflectance) και στην συνέχεια σε φασματική πληροφορία της επιφανείας της γης (BOA Reflectance).

Τα «Προσαρμοσμένα Ορθο-ανηγμένα προϊόντα» («Tailored Ortho»), τα οποία αφορούν σε εικόνες αντίστοιχων διορθώσεων των «Standard Ortho» αλλά είναι προσαρμοσμένα στις ειδικές ανάγκες των χρηστών με ακριβέστερες ορθο-αναγωγές με χρήση καλύτερων τρισδιάστατων μοντέλων εδάφους (DEMs) αναδεικνύοντας τις κατάλληλες κάθε φορά πληροφορίες σύμφωνα με τις απαιτήσεις (on-DEMAND) των χρηστών/αναλυτών (Services, 2012).

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής είναι της κατηγορίας “Pleiades Standard Ortho”, στις οποίες οι χαμηλότερης ανάλυσης

πολυφασματικές ζώνες έχουν ενσωματωθεί με την υψηλότερης ανάλυσης παγχρωματική ζώνη (Pan-sharpened «PMS»), με αποτέλεσμα να μετατραπούν και οι πολυφασματικές ζώνες σε ζώνες υψηλής ανάλυσης με χωρική διάσταση εικονοστοιχείου 0,5 m. Τα εν λόγω δεδομένα χορηγήθηκαν, στον υποψήφιο διδάκτορα ατελώς, ύστερα από αίτηση/πρόταση που υπέβαλε στην Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency - ESA).

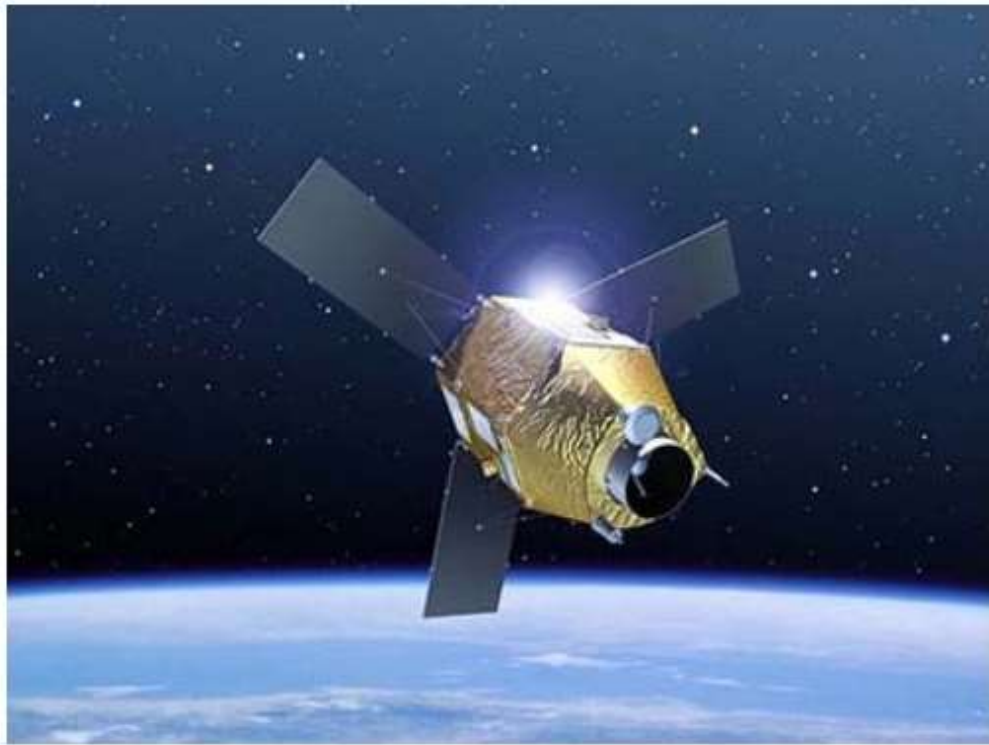
*"Pleiades Data used in this research provided free of charge by the European Space Agency" in the framework of the acceptance of proposal of Mr. A. Mavraeidopoulos Nr. 40867 titled "Bathymetry/Hydrography Extraction from Imagery", (ESA Cat-1/EO Data User Project ID: 40867).*

Οι τηλεσκοπικές σκηνές (tiles) καταβιβάστηκαν μέσω του ιστότοπου <https://www.geostore.com>. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το Αμερικάνικο Σύστημα Βαθμονόμησης Ερμηνευτικότητας Εικόνων-Α/Φ (National Image Interpretability Rating Scales System- NIIRS), (ιστότοπος Αμερικάνικης Επιστημονικής Κοινότητας (Federation of American Scientists (FAS): <http://www.fas.org/irp/imint/niirs.hTM>), το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας ερμηνείας εικόνων από τα διάφορα συστήματα παρατήρησης γης, τα προϊόντα/εικόνες των δορυφορικών συστημάτων Pleiades ανήκουν στην κατηγορία (class) 6 (0,40 – 0,75 m Ground Resolution Distance) κατηγοριοποίησης, σε κλίμακα από 0-10.

Οπότε, στην παρούσα διατριβή αναλύθηκαν πολυφασματικές εικόνες, οι οποίες έχουν χωρική ανάλυση που ικανοποιούν την Συνολική Οριζόντια Αβεβαιότητα προσδιορισμού θέσης (Total Horizontal Uncertainty - THU) όλων των κατηγοριών Υδρογράφησης σύμφωνα με τα πρότυπα του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού (IHO, 2008).

Η ομάδα των δορυφόρων Pleiades αποτελείται από δύο δορυφόρους, οι οποίοι εκτοξεύθηκαν την 17.12.2011 (Pleiades-HR 1A) και 02.12.2012 (Pleiades-HR 1B) αντίστοιχα και είναι τοποθετημένοι σε τροχιά μέσου ύψους πτήσης 694 km Το σύστημα παρέχει ορθοδιορθωμένες εικόνες σε πέντε (5) φασματικές ζώνες (blue, green, red, NIR, Pan) όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.





**Εικόνα 4.3 :** Δορυφόρος Pleiades 1A (Image Copyright © ESA and Airbus Defence and Space).

Η τοπογραφική ακρίβεια κάθε εικόνας είναι της τάξης  $\pm 3$  m, η οποία μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο με χρήση σημείων αναφοράς από το έδαφος (Ground Control Points). Ο δορυφόρος Pleiades-1A έχει χρόνο επανεπίσκεψης στο ίδιο σημείο 1 ημέρα, γεγονός που σημαίνει ότι ο εν λόγω αστερισμός καλύπτει ημερησίως  $1.000.000 \text{ m}^2$ . Το εύρος καταγραφής επί του εδάφους του αισθητήρα (swath width) είναι 20 km.

**Πίνακας 4.2:** Μήκος κύματος Pleiades-1A ανά φασματική ζώνη

| Φασματική Ζώνη<br>Pleiades HR – 1A | Μήκος Κύματος (nm) | Χωρική Ανάλυση (μ) |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Blue                               | 430-550            | 0,5                |
| Green                              | 500-620            | 0,5                |
| Red                                | 590-710            | 0,5                |
| Near-Infrared                      | 740-940            | 0,5                |
| Pan                                | 470-830            | 0,5                |



Η εικόνα (Εικόνα 4.4 ) που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της περιοχής 2 είναι του τύπου «Standard Ortho», λήφθηκε από την δορυφορική πλατφόρμα Pleiades-HR 1A την 17.07.2016 (ώρα 09:19:44.906 Z), δεν έχει νεφοκάλυψη και δεν είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένη από τον πάροχό της.



**Εικόνα 4.4 :** Δορυφορική Εικόνα Pleiades-1A ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής μαρίνας Αγ. Κοσμά. (Χρόνος Λήψης: 17.07.2016 (09:19:44 Z))

#### 2.1.1.2 Δορυφορικά Δεδομένα Landsat 8 Θαλάσσιας Περιοχής Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου

Στην περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου αποφασίστηκε η χρήση εικόνας του αισθητήρα του δορυφορικού συστήματος Landsat 8 OLI (Operational Land Imager). Το πρόγραμμα Landsat διαχειρίζεται από την Γεωλογική Υπηρεσία των Η.Π.Α. (U.S. Geological Survey) και της Υπηρεσίας Διαστήματος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (NASA). Το εν λόγω πρόγραμμα άρχισε τον Ιούλιο 1972 με την εκτόξευση και λειτουργία του Landsat 1, ενώ ο νεώτερος δορυφόρος του προγράμματος (Landsat 8 (OLI)) εκτοξεύθηκε τον Φεβρουάριο 2013 (11.02.2013) και έχει τοποθετηθεί σε τροχιακό επίπεδο ύψους 705 km.

Το εύρος σάρωσης του Landsat 8 (OLI) είναι 185 km, κινούμενος από Βορρά προς Νότο σε ηλιο-σύγχρονη τροχιά. Η διάρκεια επανεπίσκεψης στο ίδιο σημείο της γης είναι 8 ημέρες, ενώ καθημερινά συλλέγονται πάνω από 1000 εικόνες Landsat από διάφορες περιοχές του πλανήτη μας. Ο κύριος εξοπλισμός του δορυφόρου Landsat 8 είναι ένας αισθητήρας που συλλέγει πληροφορία φάσματος από το οπτικό και υπέρυθρο τμήμα της Η/Μ ακτινοβολίας (Operational Land Imager - OLI), ενώ ένας δεύτερος αισθητήρας συλλέγει πληροφορίες από το θερμικό τμήμα (Thermal Infrared Sensor - TIRS) αυτής. Ο αισθητήρας OLI συλλέγει δεδομένα από το οπτικό (coastal-aerosol, blue, green, red), το εγγύς υπέρυθρο (NIR) και το μικροκυμματικό υπέρυθρο (SWIR), με μία χωρική ανάλυση της τάξης των 30 m, ενώ διαθέτει και μία παγχρωματική ζώνη (panchromatic) με χωρική ανάλυση εικονοστοιχείου 15 m. Αντίστοιχα, ο αισθητήρας TIRS του Landsat 8 συλλέγει φασματική πληροφορία από το θερμικό Η/Μ φάσμα σε χωρική ανάλυση 100 m, το οποίο μέσω διαδικασίας επαναδειγματοληψίας (resampling) το μετατρέπει-βελτιώνει σε 30 m. Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται από τον Landsat 8 για την παρατήρηση της γης ανά φασματική ζώνη αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακας 4.3.

**Πίνακας 4.3:** Μήκος κύματος και χωρική ανάλυση συστήματος Landsat-8 (OLI) ανά φασματική ζώνη

| Φασματική Ζώνη<br>Landsat-8 (OLI) | Μήκος Κύματος (nm) | Χωρική Ανάλυση (μ) |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Coastal-Aerosol                   | 430-450            | 30                 |
| blue                              | 450-510            | 30                 |
| green                             | 530-590            | 30                 |
| Panchromatic                      | 500-680            | 15                 |
| red                               | 640-670            | 30                 |
| Near-Infrared                     | 850-880            | 30                 |
| Cirrus                            | 1.360-1.380        | 30                 |
| Shortwave Infrared-1<br>(SWIR-1)  | 1.570-1.650        | 30                 |
| SWIR-2                            | 2.110-2.290        | 30                 |
| Thermal-1                         | 10.600-11.190      | 100                |
| Thermal-2                         | 11.500-12.510      | 100                |

Τα εν λόγω δορυφορικά δεδομένα παρέχονται, χωρίς χρέωση, από την Αμερικάνικη Γεωλογική Υπηρεσία (USGS) από τον ιστότοπο (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).



**Εικόνα 4.5 :** Δορυφόρος Landsat-8 (Image Copyright © NASA).

Ο δορυφόρος Landsat 8 (Εικόνα 4.5) αποτελεί ένα τεχνολογικά πιο εξελιγμένο δορυφορικό σύστημα τηλεπισκόπησης από τους προηγούμενους ομοίου τύπου δορυφόρους (Landsat) χρησιμοποιώντας ένα αισθητήρα πλευρικής σάρωσης (push-broom sensor) που φέρει τέσσερα (4) τηλεσκόπια. Συλλέγει 725 δορυφορικές εικόνες ανά ημέρα, με αποτέλεσμα να καταγράφει με μεγαλύτερη συχνότητα περιοχές της γης χωρίς νέφη (Landsat 8, 2016).

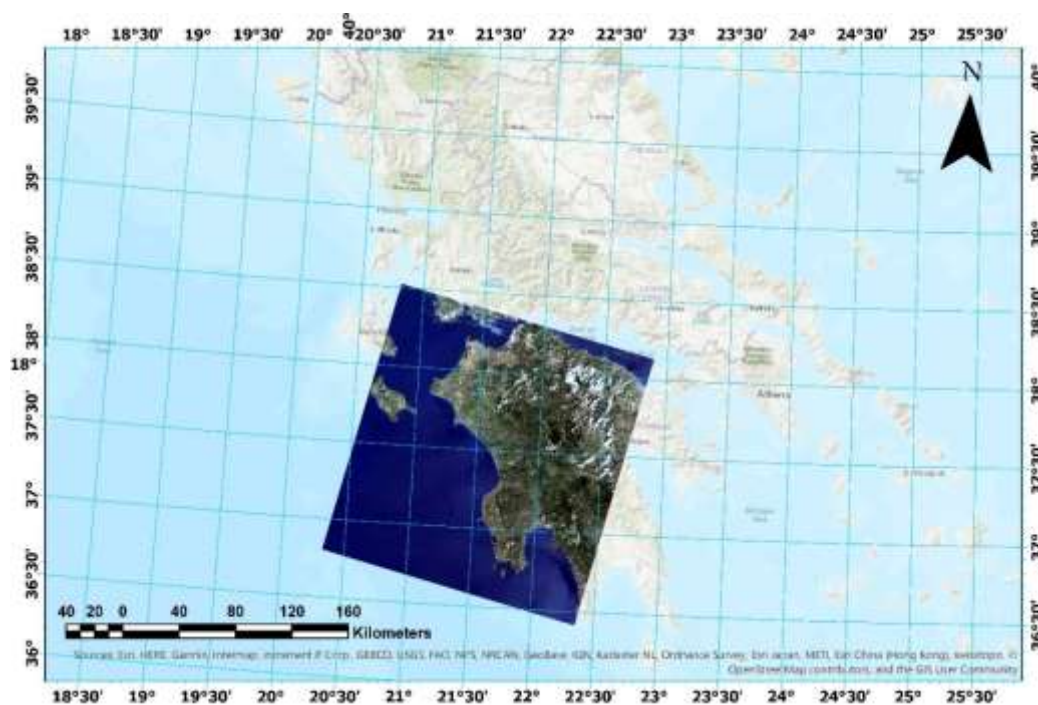
Ο Landsat 8 παρουσιάζει επιστημονικό ενδιαφέρον καθόσον είναι ο μόνος δορυφόρος που βαθμονομεί διαρκώς (1 φορά κάθε μήνα) ραδιομετρικά τους αισθητήρες του παρατηρώντας την Σελήνη, ενώ διαθέτει την φασματική ζώνη “Coastal/Aerosol”. Η εν λόγω φασματική ζώνη (Coastal/Aerosol) έχει σχεδιαστεί για ακριβέστερες φασματικά παρατηρήσεις των παράκτιων ζωνών και για μετρήσεις πολύ μικρών αιωρούμενων στην ατμόσφαιρα σωματιδίων όπως κόκκοι σκόνης, υδρατμούς και καπνό. Θεωρητικά η φασματική ζώνη (band 1) του Landsat 8 ενδείκνυται για τηλεανίχνευση των παράκτιων και πελάγιων υδάτων, αφού δύναται να καταγράφει την ιώδη (violet) και μπλε (blue) ακτινοβολία, τα μήκη κύματος των οποίων δύναται να εξέρχονται των υδάτων και να

μεταφέρουν πληροφορίες σχετικές με την συγκέντρωση της χλωροφύλλης, τα τυχόν αιωρούμενα σωματίδια στο νερό καθώς και πληροφορίες για πιθανές διανθίσεις του φυτοπλαγκτόν και των άλγεων (phytoplankton and algae blooms). Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος αισθητήρας για διερεύνηση εξαγωγής βαθυμετρίας στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Οι συλλεγόμενες από τον δορυφόρο εικόνες μετά από επεξεργασίας τους με ειδικά λογισμικά και διαδικασίες από την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία χορηγούνται στους χρήστες με την μορφή προϊόντων (Products). Τα παραγόμενα προϊόντα επιπέδου Level 0R αφορούν σε μη επεξεργασμένα δεδομένα (raw), τα προϊόντα επιπέδου Level 1R αφορούν σε διορθωμένα ραδιομετρικά δεδομένα (radiometrically corrected), ενώ τα προϊόντα επιπέδου Level 1T αφορούν σε διορθωμένα ραδιομετρικά και γεωμετρικά δεδομένα (radiometrically and geometrically corrected). Από το 2013 και μετά, η Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία παρέχει κατόπιν αιτήσεως στους χρήστες προϊόντα της κατηγορίας Level-2 που αφορούν σε δεδομένα ανακλαστικότητας επιφανείας (Surface Reflectance) σε χωρική ανάλυση 30 m x 30 m.

Οι εικόνες Landsat 8 (OLI/TIRS) χορηγούνται στους χρήστες με την μορφή τιμών ψηφιακών αριθμών (DNs) ανά εικονοστοιχείο, οι οποίες εν συνεχεία δύνανται να μετατραπούν σε τμές φασματικής ακτινοβολίας (spectral radiance) ή ανακλαστικότητας στο ύψος πτήσης του αισθητήρα (TOA Reflectance).

Οι δορυφορικές εικόνες που συλλέγονται από το σύστημα Landsat 8 δύνανται να παρέχονται στους ενδιαφερόμενους χρήστες, κατόπιν παραγγελίας, και ως διορθωμένες ατμοσφαιρικά (Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2). Έτσι λοιπόν, επειδή ο σκοπός της παρούσας έρευνας δεν εστιάζεται στην ατμοσφαιρική ή ραδιομετρική διόρθωση της εικόνας της εκάστοτε περιοχής μελέτης, η εικόνα Landsat 8 (OLI) που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή βαθυμετρίας στον κόλπο του Λαγανά είναι ατμοσφαιρικά διορθωμένη από τον πάροχός της, με τις τιμές των εικονοστοιχείων της να αντιπροσωπεύουν τις τιμές ανακλαστικότητας στην γήινη επιφάνεια (Base-of-Atmosphere/Surface Reflectance). Η υπόψη εικόνα (Εικόνα 4.6) καταβιβάστηκε, άνευ κόστους, από τον ιστότοπο της Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας (USGS): <https://earthexplorer.usgs.gov/> και είναι προϊόν Landsat 8 (OLI/TIRS) Collection 1, Level-2 (Surface Reflectance values), δηλαδή ατμοσφαιρικά διορθωμένο προϊόν.



**Εικόνα 4.6 :** Δορυφορική Εικόνα Landsat-8 θαλάσσιας περιοχής Ν. Ζακύνθου (Χρόνος Λήψης: 09.08.2018 (09:10:41 Z)).

#### 4.1.3 Κριτήρια Επιλογής Θαλασσιών Περιοχών Πειραμάτων

Η καθεμία από τις επιλεγείσες περιοχές μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από γεωγραφική, οικονομική, κοινωνική και τεχνική άποψη. Καταρχήν πρόκειται για περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν πρόσφατα υδρογραφικά και χαρτογραφικά προϊόντα. Από έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αλλά και από τις πληροφορίες που απεικονίζονται στους αντίστοιχους έντυπους ΧΕΕ, διαπιστώθηκε ότι οι υδρογραφικές πληροφορίες οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί για την σύνταξή τους είναι αφενός παλαιές (πλέον των 20 ετών), αφετέρου έχουν συλλεχθεί με μέσα συμβατικά ή ακουστικά κατατάσσοντας αυτές στην κατηγορία CATZOC Β όπως αναλυθηκε ήδη στο κεφάλαιο 2 της παρούσης διατριβής.

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή του στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου ανήκει σε μία διοικητική Περιφέρεια η οποία αποτελείται από 24 κατοικημένα νησιά και 178 ακατοίκητες βραχονησίδες. Το ιδιαίτερο τοπογραφικό ανάγλυφο των ν. Κυκλάδων συνίσταται από ορεινό

και άγονο έδαφος με απόκρημνες ακτές με συνέπεια να δυσχεραίνεται στο μέγιστο βαθμό η δυνατότητα προσέγγισης και προσβασιμότητας στις ακτές των παραπάνω νήσων και βράχων.

Η μεταφορά προσωπικού και μέσων, ο εφοδιασμός με καύσιμα και αναλώσιμα, η τεχνική υποστήριξη σε περίπτωση βλαβών του εξοπλισμού/σκαφών και οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες (ισχυροί βόρειοι άνεμοι κατά την διάρκεια του θέρους), όπως αυτές αναλύθηκαν στην ενότητα 4.2 της παρούσας έρευνας, καθιστούν την εν λόγω περιοχή μελέτης πολύ δύσκολη τεχνικά να υδρογραφηθεί, ενώ απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την συλλογή των αναγκαίων δεδομένων βαθυμετρίας. Προφανές είναι ότι για κάθε ημέρα καθυστέρησης στο πεδίο, λόγω απρόβλεπτων καταστάσεων (βλάβες, καιρικές συνθήκες, κτλ), το ημερήσιο κόστος συλλογής δεδομένων βαθυμετρίας αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό.

Από την άλλη πλευρά οι Κυκλάδες είναι μία αρκετά ανεπτυγμένη τουριστικά περιοχή και δημοφιλές μέρος διακοπών, με πολύ αυξημένη ναυτιλιακή κίνηση τους θερινούς μήνες, ιδιαίτερα στις νήσους Μύκονο, Θήρα, Πάρο, Σύρο, Τήνο, Μήλο, Σέριφο. Αξίζει να σημειωθεί, ότι με βάση στοιχεία Μελέτης του Ινστιτούτου Συνδέσμου Ελληνικών Τουριστικών Επιχειρήσεων (ΙΝΣΕΤΕ), μόνο κατά το έτος 2014 η τουριστική κίνηση των Κυκλάδων αυξήθηκε σε ποσοστό 109%, ενώ το 75,7% του ΑΕΠ της περιοχής προέρχεται από υπηρεσίες στο μεγαλύτερο τμήμα τους από τουριστικές δραστηριότητες (ΑΤΡΙΑ Α.Ε., 2015). Είναι λοιπόν προφανές, ότι το οποιοδήποτε ατύχημα στην περιοχή θα επηρεάσει αρνητικά την τουριστική κίνηση της περιοχής άρα και τις προσόδους του τοπικού πληθυσμού. Παράδειγμα αποτελεί το ναυτικό ατύχημα του κρουαζιερόπλοιου “Sea Diamond” στην ν. Θήρα την 05.04.2007. Οι νήσοι Πάρος-Αντίπαρος συνδυάζουν όλα τα προαναφερόμενα τοπογραφικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά των Κυκλάδων και παράλληλα αποτελούν πόλο έλξης τουριστών και σκαφών αναψυχής λόγω του φυσικού παράκτιου περιβάλλοντος της περιοχής. Η ν. Αντίπαρος συνδέεται ακτοπλοϊκώς μόνο με τον λιμένα Πούντα της ν. Πάρου, ενώ οι οικισμοί που δύναται να εξυπηρετήσουν βασικές ανάγκες διοικητικής μέριμνας είναι ο Αγ. Γεώργιος και η Χώρα (Αντίπαρος). Από ναυτιλιακής απόψεως το στενό ν. Πάρου – Αντίπαρου παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς παρουσιάζει μεγάλο αριθμό αβαθών και επικίνδυνων σημείων για την ασφάλεια ναυσιπλοΐας. Επιπρόσθετα, στο στενό υπάρχει και ένα πλήθος ακατοίκητων βραχονησίδων (Δεσποτικό, Στρογγυλό, Σαλιαγκός, Τσιμιντήρι, Ρευματονήσι, Πρέζα, Τηγάνι, Γλαροπούντα, κτλ), οι οποίες λόγω των αβαθών και υποθαλάσσιων βράχων που υπάρχουν πέριξ αυτών περιορίζουν την ελευθερία κινήσεων των

διαπλεόντων σκαφών σε ολόκληρο το ανάπτυγμα της εν λόγω θαλάσσιας περιοχής. Τα ύδατα του στενού Πάρου-Αντίπαρου είναι διαυγή και καθαρά κάτι που συνδέεται με χαμηλή παρουσία φυτοπλαγκτόν, ενώ δεν επηρεάζονται από την απορροή ρυπαντικών φορτίων των κύριων θρεπτικών συστατικών αζώτου και φωσφόρου, τα οποία συμβάλλουν στην ανάπτυξη αλγών και ευνοούν την εξέλιξη φαινομένων ευτροφισμού.

Η θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά, ανήκει σε μία περιοχή, η οποία αποτελεί τουριστικό προορισμό καθόλη την διάρκεια του έτους λόγω των ιστορικών και πολιτιστικών μνημείων που διαθέτουν οι πέριξ περιοχές. Συγκεντρώνει τον πληθυσμό με το μεγαλύτερο ΑΕΠ της χώρας, ενώ το ανεπτυγμένο δίκτυο μεταφορών που διαθέτει την καθιστούν ως τον κατεξοχήν πρώτο προορισμό τουριστών (αλλοδαπής και ημεδαπής). Παράλληλα, στην ευρύτερη περιοχή βρίσκεται συγκεντρωμένος ο πιο εξειδικευμένος και κατηρτισμένος επιστημονικά πληθυσμός, ενώ τα τουριστικά καταλύματα απευθύνονται σε επισκέπτες υψηλού εισοδήματος και κατόχους σκαφών αναψυχής (Μελέτη Εξειδίκευσης των Τουριστικών Προϊόντων και Υπηρεσιών ανά Κατηγορία Προορισμού στην Περιφέρεια Αττικής, 2015). Αντίθετα με τον νησιωτικό χαρακτήρα των λοιπών περιοχών μελέτης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, η ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της μαρίνας του Αγ. Κοσμά ανήκει σε αστική περιοχή και αποτελεί τμήμα του παραθαλάσσιου αστικού μετώπου της Αθήνας. Η υπόψη περιοχή εκτείνεται σε μήκος 40 km περίπου, ακολουθεί παράλληλα την Λεωφ. Ποσειδώνος και περιλαμβάνεται μεταξύ του Φαλήρου και της Βούλας. Το ισχυρό πλεονέκτημα της υπόψη περιοχής είναι ότι προστατεύεται σε μεγάλο βαθμό από τους ισχυρούς βόρειους ανέμους που πνέουν καθόλη την διάρκεια τους έτους, ενώ παρουσιάζει εύκολη σύνδεση με τα νησιά των Κυκλάδων και του Αργοσαρωνικού. Η Μαρίνα του Αγ. Κοσμά βρίσκεται περίπου 6 km από το κέντρο της Αθήνας, στην παράκτια ζώνη και αποτέλεσε το Ολυμπιακό Κέντρο Ιστιοπλοΐας Αγίου Κοσμά, το οποίο λειτούργησε επισήμως την 02.08.2004, λίγες εβδομάδες πριν από την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας. Η περιοχή της Μαρίνας εκτείνεται σε μία Χερσαία Ζώνη Λιμένος μήκους 800 m, περίπου και επιφανείας 450 στρ., και περιλαμβάνει κτηριακές εγκαταστάσεις (Διοίκησης και εξυπηρέτησης των ελλιμενιζόμενων σκαφών) επιφανείας άνω των 13.500 m<sup>2</sup>, με χώρους στάθμευσης οχημάτων χωρητικότητας 1.200 θέσεων. Άρα, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα χαρακτηριστικά της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής της μαρίνας του Αγ. Κοσμά, είναι διαφορετικά από εκείνα του νησιωτικού συμπλέγματος Πάρου-Αντίπαρου, και παράλληλα



είναι διαφορετική και η ποιότητα των αντίστοιχων υδάτων, καθόσον η υπόψη περιοχή γειτνιάζει με τους υποθαλάσσιους αγωγούς λυμάτων του Κέντρου Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυτάλλειας (2004). Σε ότι αφορά στα θέματα της ναυσιπλοΐας πρόκειται για μία περιοχή με ένα εκτεταμένο αβαθές τμήμα του πυθμένα στο ΒΔ τμήμα της μαρίνας, εγγύς της εισόδου της. Λόγω της επικινδυνότητας που παρουσιάζει το σημείο αυτό για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας οριοθετείται με φωτοσημαντήρες σύμφωνα με το σύστημα «IALA A» προς τις τέσσερις βασικές διευθύνσεις του ορίζοντα, ώστε να αποφεύγεται η διέλευση των παραπλεόντων σκαφών από αυτό.

Η θαλάσσια περιοχή του Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου αποτελεί παράκτια ζώνη με έντονες ανθρωπογενείς πιέσεις λόγω των επισκεπτών του νησιού και των τουριστικών δραστηριοτήτων της περιοχής. Το 2013 είχαν επισκεφθεί το νησί 34 κρουαζιερόπλοια, παρά τις ανεπαρκείς λιμενικές υποδομές του νησιού να φιλοξενήσει τέτοιου εκτοπίσματος σκάφη. Παρόλο του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν επαρκείς μαρίνες στην περιοχή της ν. Ζακύνθου, ο ναυτικός τουρισμός (yachting, cruising) σημειώνει συνεχή αύξηση. Μέσω του Αεροδρομίου που υπάρχει στο νησί υπάρχει σύνδεση με 59 ευρωπαϊκά αεροδρόμια και 45 αεροπορικές εταιρείες (ΑΤΡΙΑ Α.Ε., 2015). Ο Λαγανάς βρίσκεται σε απόσταση 9 χλμ από την πόλη της Ζακύνθου και είναι μία από τις 3 περιοχές της ν. Ζακύνθου που δέχονται το μεγαλύτερο όγκο τουριστών, το 45% των οποίων προέρχονται από το Ηνωμένο Βασίλειο. Η παραλία του κόλπου Λαγανά θεωρείται μία από τις μεγαλύτερες παραλίες της χώρας και είναι ένα από τα μέρη ωτοκίας της χελώνας *Caretta-Caretta*. Για τον λόγο αυτό η περιοχή έχει ενταχθεί μέσα στα όρια προστασίας του Εθνικού Θαλάσσιου Πάρκου Ζακύνθου. Το γεγονός αυτό απαγορεύει την κίνηση μηχανοκίνητων σκαφών εντός της ζώνης προστασίας, άρα και την μη δυνατότητα συλλογής δεδομένων βαθυμετρίας με μηχανοκίνητα πλωτά μέσα. Επίσης, η περιοχή παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα (7.2 R (1953), 6.0 R (2014), 6.8 R (26.10.18)), γεγονός που υποδηλώνει μεταβολές στην γεωλογία και γεωμορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα.

Συνοψίζοντας, επισημαίνεται ότι στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επιλέχθηκαν θαλάσσιες περιοχές μελέτης τόσο νησιωτικού (remote) όσο και αστικού χαρακτήρα, οι οποίες παρουσιάζουν σημεία επικίνδυνα για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Πρόκειται για περιοχές οι οποίες εξαρτώνται από τις θαλάσσιες μεταφορές, τον ναυτικό τουρισμό, και την διερχόμενη ναυτιλιακή κίνηση σε οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο. Είναι περιοχές οι



οποίες παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες και δυσκολίες στην εκτέλεση υδρογραφικών εργασιών πεδίου με τους κλασικούς τρόπους βαθυμετρίας για τους λόγους που αναφέρονται σε κάθε περίπτωση, ενώ χαρτογραφικά απαιτείται η επικαιροποίηση των βαθυμετρικών τους μετρήσεων και εν γένει ναυτιλιακών πληροφοριών τους.

#### 4.1.4 Πηγές Πρόσκτησης Ψηφιακών Γεωχωρικών Δεδομένων

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν γεωχωρικά δεδομένα ποικίλων μορφοτύπων (formats), τα περισσότερα εκ των οποίων ήταν ελεύθερα (χωρίς χρέωση). Άλλωστε ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η επάρκεια των ελεύθερα προσβάσιμων στο διαδίκτυο πόρων στην εξαγωγή βαθυμετρίας αξιοποιώντας τεχνολογίες αιχμής (*State-of-the-Art*), όπως είναι οι τεχνικές και τα συστήματα τηλεπισκόπησης. Επίσης, διερευνήθηκε η δημιουργία κάποιου μοντέλου, το οποίο θα αξιοποιεί τα ελεύθερα προσβάσιμα δεδομένα, αφού αυτά, ως επί το πλείστον, προέρχονται-δημιουργούνται από την υφιστάμενη οικονομική συνεισφορά των κρατών μελών της Ε.Ε. προς τις υπηρεσίες που τα διαχειρίζονται. Στο ίδιο πνεύμα άλλωστε κινείται και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα με την οδηγία «Inspire» (Επίσημη Εφημερίδα Ε.Ε. L108/1/25.04.2007) αναφορικά με την δημιουργία Υποδομής Γεωχωρικών Πληροφοριών στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα.

Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή μελέτης 1 (Case Study 1) που αφορά στο Στενό ν. Πάρου-Αντιπάρου χρησιμοποιήθηκε ο έντυπος Χάρτης Ελληνικής Έκδοσης (ΧΕΕ) υπ' αριθμ 423/2, με τίτλο «Στενό Αντιπάρου – Όρμος Παροικιάς», κλίμακας 1:20.000, που εκδόθηκε από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (Υ.Υ./ΠΝ) το έτος 1989 (Εικόνα 4.7). Ο εν λόγω ΧΕΕ έχει συνταχθεί με βάση την ορθή μερκαντορική προβολή, στο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΓΣΑ) ED 50, και χρησιμοποιεί το Διεθνές Ελλειψοειδές (International Ellipsoid) και το Γεωγραφικό Σύστημα Συντεταγμένων (Geographic Coordinate System-GCS). Τα αναγραφόμενα βάθη του Στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου είναι διορθωμένα ως προς την κατωτάτη ρηχία της ευρύτερης περιοχής των ν. Κυκλάδων και προέρχονται από υδρογραφικές εργασίες της Υ.Υ./ΠΝ που εκτελέστηκαν μέχρι το έτος 1986.

Η ακτογραμμή και η εν γένει τοπογραφία που έχει χρησιμοποιηθεί για την σύνταξη του εν λόγω ναυτικού χάρτη έχει προέλθει από πηγές της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ).

Το κόστος του υπόψη ΧΕΕ δεν υπερβαίνει τα 20,00 € περίπου.

Από τον εν λόγω χάρτη επιλέγηκαν 2 ομάδες δεδομένων (dataset). Πρόκειται για σημειακά βάθη, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε μία ομάδα που χρησιμοποιείται για την «εκπαίδευση» (training) του μοντέλου (Hybrid Model) και σε μία έτερη που χρησιμεύει για την αξιολόγηση (validation) των τελικών αποτελεσμάτων αυτού.



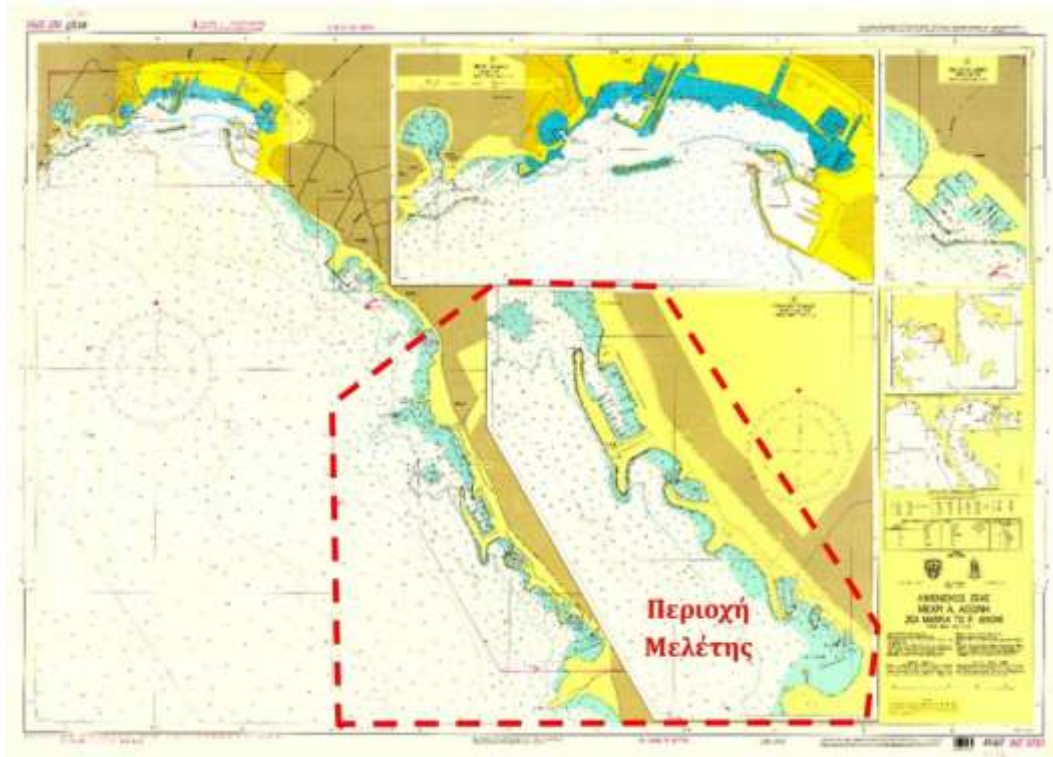
**Εικόνα 4.7 :** Ναυτικός Χάρτης Στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου.

Ο παραπάνω ΧΕΕ κρίθηκε ως καταλληλότερος, καθόσον είναι της μεγαλύτερης κλίμακας χάρτης που έχει παραχθεί και καλύπτει την εν λόγω περιοχή ενδιαφέροντος (case study 1) και αποτυπώνει με ικανοποιητική ακρίβεια την μεταβολή του ανάγλυφου του θαλάσσιου πυθμένα, μέσω της απόδοσης των αντίστοιχων ισοβαθών.

Επίσης, για την εν λόγω περιοχή χρησιμοποιήθηκε τμήμα από την εικόνα Sentinel-2 ως αυτή περιγράφηκε στην παραπάνω ενότητα 4.1.2.1. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω δορυφορική εικόνα περιορίστηκε (subset) χωρικά στη γεωγραφική περιοχή του Στενού ν. Πάρου Αντίπαρου, ενώ αξιοποιήθηκε το τμήμα του Η/Μ φάσμα που καταγράφηκε στις φασματικές ζώνες B2 (496,6 nm), B3 (560 nm), B4 (664,5 nm) και B8A (864,8 nm), χωρικής ανάλυσης 10 m, 10 m, 10m, και 20 m, αντίστοιχα. Η πηγή προέλευσης της εν λόγω εικόνας είναι ο ιστότοπος (<https://scihub.copernicus.eu/>), από τον οποίο τα συγκεκριμένα δορυφορικά δεδομένα λήφθηκαν χωρίς χρέωση. Η εικόνα λήφθηκε συμπυκνωμένη σε δομή JPEG2000 (\*.jp2) και έχει γεωαναφορά στις γεωδαιτικές παραμέτρους του συστήματος EPSG v.1 (European Petroleum Survey Group), το οποίο αναφέρεται σε αναθεωρημένη έκδοση των γεωδαιτικών παραμέτρων του παγκόσμιου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς WGS84.

Για την περιοχή μελέτης 2 (Case Study 2) που αφορά στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά (Ολυμπιακό Κέντρο Ιστιοπλοΐας Αγίου Κοσμά), χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχα ο έντυπος Χάρτης Ελληνικής Έκδοσης (ΧΕΕ) υπ' αριθμ 412/7, με τίτλο «Λιμενίσκος Ζέας Μέχρι Α. Αιξωνή», κλίμακας 1:15.000, που εκδόθηκε από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (Υ.Υ./ΠΝ) το έτος 2004 (Εικόνα 4.8). Ο εν λόγω ΧΕΕ έχει συνταχθεί με βάση την ορθή μερκαντορική προβολή, στο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (Γ.Σ.Α.) ED 50, και χρησιμοποιεί το Διεθνές Ελλειψοειδές (International Ellipsoid) και το Γεωγραφικό Σύστημα Συντεταγμένων (Geographic Coordinate System-GCS). Τα βάθη στον εν λόγω ΧΕΕ είναι διορθωμένα ως προς την κατωτάτη ρηχία, με βάση τα στοιχεία στάθμης θάλασσας του παλλοιογράφου Πειραιά, και προέρχονται από υδρογραφικές εργασίες της Υ.Υ./ΠΝ που εκτελέστηκαν, σύμφωνα με το σχετικό διάγραμμα πηγών, κατά τα έτη 1979, 1982, 2000 και 2003. Και σε αυτήν την περίπτωση ναυτικού χάρτη, η ακτογραμμή και η εν γένει τοπογραφία που έχει χρησιμοποιηθεί για την σύνταξη του έχει προέλθει από πηγές της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ). Το κόστος του υπόψη ΧΕΕ δεν υπερβαίνει τα 20,00 € περίπου.

Από τον χάρτη επιλέχτηκαν 2 ομάδες δεδομένων (dataset). Πρόκειται για σημειακά βάθη, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε μία ομάδα που χρησιμοποιείται για την «εκπαίδευση» (training) του μοντέλου (Hybrid Model) και σε μία έτερη που χρησιμεύει για την αξιολόγηση (validation) των τελικών αποτελεσμάτων αυτού.



**Εικόνα 4.8 :** Ναυτικός Χάρτης Θαλάσσιας Περιοχής Μαρίνας Αγ. Κοσμά.

Ο παραπάνω ΧΕΕ κρίθηκε ως καταλληλότερος καθόσον είναι ο πιο πρόσφατος, της μεγαλύτερης κλίμακας χάρτης που καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος 2 (case study 2) και αποτυπώνει με ικανοποιητική ακρίβεια την μεταβολή του ανάγλυφου του θαλάσσιου πυθμένα, μέσω της απόδοσης των αντίστοιχων ισοβαθών.

Για την έρευνα εξαγωγής βαθυμετρίας από εν λόγω περιοχή χρησιμοποιήθηκε εικόνα από τον δορυφόρο Pleiades-HR 1A, ως αυτή περιγράφηκε στην παραπάνω ενότητα 4.1.2.2. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι φασματικές ζώνες blue (430-550 nm), green (500-620 nm), red (590-710 nm) και NIR (740-940 nm), χωρικής ανάλυσης 0,5 m. Η πηγή προέλευσης της εν λόγω εικόνας είναι ο γεω-ιστότοπος της εταιρείας AIRBUS Defence and Space (<https://www.intelligence-airbusds.com/en/4871-browse-and-order>), από τον οποίο τα συγκεκριμένα δορυφορικά δεδομένα λαμβάνονται με χρέωση.

Ωστόσο, η χρησιμοποιηθείσα στην παρούσα διατριβή δορυφορική εικόνα Pleiades-HR 1A παρασχέθηκε δωρεάν, στο πλαίσιο έγκρισης σχετικής ερευνητικής πρότασης που υποβλήθηκε από τον συγγράφοντα την παρούσα διατριβή στην ESA, με αριθμό έγκρισης ID:40867 (“Bathymetry/Hydrography Extraction from Imagery”). Η εικόνα λήφθηκε συμπυκνωμένη σε δομή JPEG2000 (\*.jp2) και έχει γεωαναφορά με τις γεωδαιτικές παραμέτρους του συστήματος EPSG v.6.3 (European Petroleum Survey Group), το οποίο αναφέρεται στην πιο πρόσφατα αναθεωρημένη έκδοση των γεωδαιτικών παραμέτρων του παγκόσμιου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς WGS84.

Στην 3<sup>η</sup> κατά σειρά περιοχή μελέτης (case study 3), η οποία είναι η θαλάσσια περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου. Στην εν λόγω περιοχή αντί για δεδομένα που απεικονίζονται στον αντίστοιχο ναυτικό χάρτη, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα πεδίου (βαθυμετρίας) που συλλέχτηκαν από την περιοχή του όρμου Γέρακα, ο οποίος βρίσκεται παρά την ανατολική πλευρά του Κόλπου Λαγανά. Τα υπόψη δεδομένα πεδίου συλλέχτηκαν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Πανεπιστημίου Αιγαίου την 10.05.2015 και αφορούν σε δεδομένα τύπου ASCII files. Πρόκειται για σημειακά βάθη, τα οποία αντίστοιχα κατηγοριοποιήθηκαν σε μία ομάδα που χρησιμοποιείται για την «εκπαίδευση» (training) του μοντέλου (Hybrid Model) και σε μία άλλη ομάδα που αποσκοπεί στην αξιολόγηση (validation) των τελικών αποτελεσμάτων αυτού. Επιπρόσθετα, τα εξαγόμενα δεδομένα βαθυμετρίας αξιολογήθηκαν και με βάση τα αναγραφόμενα βάθη στον ισχύοντα ΧΕΕ που καλύπτει την εν λόγω περιοχή. Ο έντυπος Χάρτης Ελληνικής Έκδοσης (ΧΕΕ) που καλύπτει την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης είναι ο υπ’ αριθμό 22, με τίτλο «Ιόνιο Πέλαγος – Νότιο Τμήμα, Ν. Ζάκυνθος Μέχρι Α. Ταίναρο», κλίμακας 1:250.000, που εκδόθηκε από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (Υ.Υ./ΠΝ) το έτος 1986 (Εικόνα 4.9). Ο εν λόγω ΧΕΕ έχει συνταχθεί με βάση την ορθή μερκαντορική προβολή, στο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΓΣΑ) ED 50, και χρησιμοποιεί το Διεθνές Ελλειψοειδές (International Ellipsoid) και το Γεωγραφικό Σύστημα Συντεταγμένων (Geographic Coordinate System-GCS). Τα βάθη στον εν λόγω ΧΕΕ είναι διορθωμένα ως προς την κατωτάτη ρηχία, και προέρχονται από υδρογραφικές εργασίες της Υ.Υ./ΠΝ που εκτελέστηκαν, σύμφωνα με το σχετικό διάγραμμα πηγών, μέχρι το έτος 1981 και από χαρτογραφικά δεδομένα που αποτυπώνονται σε χάρτες του Βρετανικού Ναυαρχείου.



**Εικόνα 4.9 :** Ναυτικός Χάρτης Θαλάσσιας Περιοχής Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

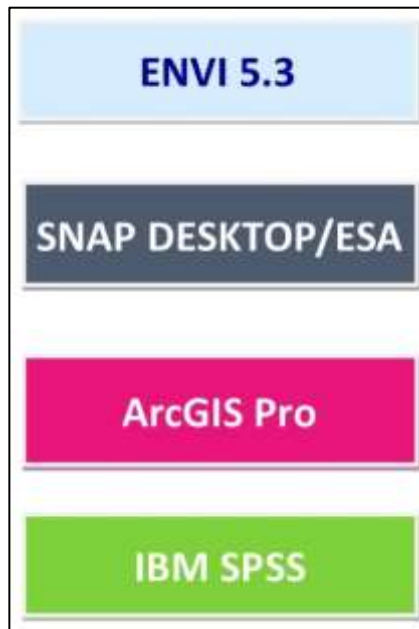
#### 4.1.5 Λογισμικά Επεξεργασίας-Ανάλυσης Δεδομένων

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή (Εικόνα 4.10) σχετίζονται με τον τρόπο και τις διαδικασίες που επιλέχθηκαν στην παρούσα έρευνα. Στην εν λόγω διδακτορική διατριβή αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τα πλέον δημοφιλή λογισμικά επεξεργασίας εικόνων και διαχείρισης γεωγραφικών δεδομένων και πληροφοριών.

Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα στάδια της προεπεξεργασίας των εικόνων εκτελέστηκαν με συνδυασμένη χρήση του λογισμικού ENVI (Environment for Visualizing Images), ArcGIS Pro και SNAP Desktop/ESA (Sentinel Application



Platform). Οι φάσεις επεξεργασίας και ανάλυσης των εικόνων πραγματοποιήθηκαν μέσω του SNAP Desktop/ESA και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του ArcGIS Pro. Τέλος, η στατιστική ανάλυση των εξαγομένων δεδομένων με χρήση του SNAP Desktop/ESA και του IBM SPSS (Statistical Package for Social Sciences).



**Εικόνα 4.10 :** Λογισμικά Παρούσας Έρευνας.

Πρέπει να τονιστεί, ότι ο προαναφερόμενος συνδυασμός χρήσης λογισμικών δεν είναι αποκλειστικός, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο μοντέλο (Hybrid Model) δύναται να εκτελεστεί και με διαφορετικά εμπορικά ή τυχόν άλλα διαθέσιμα λογισμικά.

Πιο αναλυτικά, ο κύριος όγκος επεξεργασίας και ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων στην παρούσα εργασία αποφασίστηκε να διενεργηθεί μέσω του ελεύθερου λογισμικού Sentinel Application Platform (SNAP), το οποίο έχει αναπτυχθεί από ιδιωτικούς φορείς για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος και μπορεί να καταβιβαστεί από τον ιστότοπο (<http://step.esa.int/main/download/>). Επίσης, εξετάστηκε μέσω των πειραμάτων που διενεργήθηκαν στην παρούσα διατριβή, κατά ποσό το συγκεκριμένο λογισμικό (SNAP), δύναται να επεξεργαστεί και εικόνες από διαφορετικές πλατφόρμες όπως εκείνες του Landsat 8 και Pleiades, παρόλο που έχει σχεδιαστεί για επεξεργασία εικόνων Sentinel-2. Επιπρόσθετα, σε περιβάλλον SNAP Desktop συντάχθηκαν όλες οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο υιοθετηθέν ημι-αναλυτικό μοντέλο βαθυμετρίας (Hybrid Model) και

υπολογίστηκαν οι διάφορες κατηγορίες (κλάσεις) ιζημάτων θαλασσίου πυθμένα. Επιπλέον, μέσω του υπόψη λογισμικού βαθμονομήθηκε το μοντέλο και εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις στατιστικής συσχέτισης (regression analysis), ώστε να εξαχθεί η βέλτιστη δυνατή βαθυμετρία από την δορυφορική εικόνα κάθε περιοχής μελέτης. Τέλος, με το εν λόγω λογισμικό έγινε η συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ του επινοηθέντος στην παρούσα διατριβή μοντέλου (Hybrid Model) και του μοντέλου των Stumpf *et al.*, (2003), όπως αυτό εκτελείται μέσω του λογισμικού ENVI.

Με το λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ArcGIS Pro της εταιρείας ESRI, πραγματοποιήθηκε το μεγαλύτερο μέρος διαχείρισης των ψηφιακών γεωχωρικών δεδομένων της υπόψη εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, διενεργήθηκαν οι απαιτούμενοι μετασχηματισμοί μεταξύ των διαφορετικών Γεωδαιτικών Συστημάτων Αναφοράς, υλοποιήθηκε η γεωαναφορά των σαρωμένων ψηφιακά (scanned) ναυτικών χαρτών, έγιναν οι απαραίτητες μετατροπές μεταξύ προβολικών συστημάτων, και δημιουργήθηκαν τα αναγκαία αρχεία σημειακών βαθμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του μοντέλου βαθυμετρίας. Επιπρόσθετα, σε περιβάλλον ArcGIS Pro πραγματοποιήθηκαν όλες οι χαρτογραφικές αποδόσεις των αποτελεσμάτων βαθυμετρίας, οι αποδόσεις των ταξινομήσεων των ιζημάτων του πυθμένα και των εικόνων που ενσωματώθηκαν στην παρούσα εργασία. Επίσης, μέσω του εν λόγω λογισμικού διαχείρισης γεωγραφικών πληροφοριών διενεργήθηκαν οι απαραίτητες μετατροπές των γεωχωρικών δεδομένων στους διάφορους μορφότυπους, προκειμένου αυτά (γεωχωρικά/γεωγραφικά δεδομένα) να παρουσιάζουν την αναγκαία συμβατότητα για την εισαγωγή, επεξεργασία, ανάλυση, απόδοση, ανταλλαγή και θέασή τους μεταξύ των διαφόρων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Το λογισμικό επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων ENVI χρησιμοποιήθηκε περιοριστικά και μόνο για την ατμοσφαιρική διόρθωση της εικόνας Pleiades που καλύπτει την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της μαρίνας του Αγ. Κοσμά. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό και εξαγωγή βαθυμετρίας μέσω του Αναλογικού αλγορίθμου-μοντέλου βαθυμετρίας (ratio Transform) των (Stumpf R.P., *et al.*, 2003), το οποίο είναι ενσωματωμένο (SPEAR Relative Water Depth) στο υπόψη λογισμικό. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει την δυνατότητα εξαγωγής και της «Απόλυτης βαθυμετρίας» (Absolute Bathymetry) με την προϋπόθεση ότι η αντίστοιχη σχετική βαθυμετρία θα βαθμονομηθεί με κατάλληλα δεδομένα



πεδίου (βάθη). Τέλος, η εξαγόμενη βαθυμετρία από τον Αναλογικό αλγόριθμο (ratio Transform) μέσω του λογισμικού ENVI μετατρέπεται σε κατάλληλο μορφότυπο (\*.hdr) προκειμένου να δύναται να εισαχθεί στο SNAP Desktop/ESA για την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση εικόνας.

Τέλος, με το λογισμικό IBM SPSS (Statistical Package for Social Sciences), πραγματοποιήθηκαν όλες οι στατιστικές αναλύσεις μεταξύ των γεωχωρικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων της δορυφορικής βαθυμετρίας κάθε περιοχής. Πιο αναλυτικά, διερευνήθηκε το είδος της καταλληλότερης στατιστικής συσχέτισης, προκειμένου επιλεγούν οι βέλτιστες εξισώσεις ανά περίπτωση. Υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα σφάλματα σε κάθε περίπτωση περιοχής μελέτης. Επίσης, διερευνήθηκε η στατιστική συμπεριφορά των αποκλίσεων-υπολοίπων (residuals) μεταξύ των δεδομένων πεδίου και της εξαγόμενης βαθυμετρίας από κάθε περιοχή μελέτης, προκειμένου προκύψουν συμπεράσματα για τα πιθανά σενάρια βελτίωσης του επινοηθέντος αλγορίθμου (Hybrid Model). Σχεδιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα και γραφήματα, τα οποία περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία.

## 4.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ (HYBRID MODEL) - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

### 4.2.1 Αναλυτική Περιγραφή του Προτεινομένου Υβριδικού Μοντέλου

Από θεωρητικής πλευράς, η ανακλαστικότητα που καταγράφει ένας αισθητήρας τηλεπισκόπησης από τα ύδατα ισούται με τον λόγο της εξερχόμενης από τα ύδατα ακτινοβολίας ( $L_w$ ) προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $E_d$ ), ήτοι :

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} \quad (\text{εξισ. 4.1})$$

Η  $R_{rs}$  ως «φαινόμενη» οπτική ιδιότητα (Apparent Optical Property - AOP) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων στο νερό σωματιδίων για κάθε τύπο υδάτων, ήτοι από τις ιδιότητες απορρόφησης και οπισθοσκέδασης τους, από την λευκαύγεια (albedo) του υδάτινου πυθμένα, το βάθος θάλασσας, από τον φθορισμό που προκαλείται από την χλωροφύλλη (fluorescence), και από την μη-ελαστική σκέδαση των φωτονίων λόγω του φαινομένου Raman (Raman Emission). Επίσης, η  $R_{rs}$  εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης

της ηλιακής ενέργειας στο μέσο διάδοσης και την γωνία αναχώρησης της ακτινοβολίας από το υδάτινο μέσο (γωνία θέασης), (Lee, *et al.*, 1999), (Morel, 1974).

Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι πολύ σημαντικό να προσδιοριστεί με ακρίβεια, η τιμή της ακτινοβολίας ( $L_w(\lambda)$ ) που εξέρχεται των υδάτων, δεδομένου ότι με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια αυτή προσδιοριστεί, τόσο μεγαλύτερης ακρίβειας θα είναι τα εξαγόμενα βαθυμετρικά δεδομένα, γεγονός που αποτελεί στόχο της παρούσας διατριβής. Υπενθυμίζεται, ότι από την ακρίβεια των εξαγόμενων δορυφορικών βαθυμετρικών δεδομένων θα εκτιμηθεί κατά πόσο αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν στα αντικείμενα της ασφάλειας ναυσιπλοΐας.

Οι Gordon και Clark (Gordon, 1981), παρουσίασαν για πρώτη φορά την δυνατότητα η εγγενής ακτινοβολία ( $L_w(\lambda)$  -Inherent sea surface radiance or Water-leaving radiance) που εξέρχεται του «καθαρού» νερού (Clear Waters) να υπολογίζεται μέσω της ανάλυσης του οπτικού φάσματος (RGB) υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η ζενιθιακή γωνία του ηλίου (Solar Zenith Angle). Με τον όρο «καθαρά νερά» νοούνται τα ύδατα που εμφανίζουν μικρή περιεκτικότητα/συγκέντρωση σε χλωροφύλλη ( $C_{chl-\alpha} < 0,25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Η προαναφερόμενη θεωρία επιβεβαιώνεται και ισχύει με αρκετή ακρίβεια (~10%) για την περίπτωση των υδάτων Κατηγορίας I (βαθέων υδάτων). Η  $L_w$  είναι δυνατόν να μετρηθεί στο πεδίο με ειδικά όργανα, ή μπορεί να εκτιμηθεί από τα συστήματα που φέρει ο δορυφόρος για συγκεκριμένες γωνίες, ενώ η  $E_d(0+)$  μπορεί να μετρηθεί από παρατηρήσεις πεδίου ή να εκτιμηθεί αξιοποιώντας τις εκάστοτε επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες και ιδιότητες της ατμόσφαιρας.

Από πειράματα των Gordon και Clark, διαπιστώθηκε ότι για τις περιπτώσεις υδάτων που παρουσιάζουν μικρές συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης- $\alpha$  ( $C_{chl-\alpha} < 0,25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), («καθαρά» ή «βαθιά» ύδατα), η τιμή της  $L_w(\lambda)$ , για τις Green (520 nm) & Yellow (670 nm) φασματικές ζώνες, παραμένει αρκετά «σταθερή», ενώ παρουσιάζεται αρκετά μεταβαλλόμενη στην περιοχή της Blue ζώνης (443 nm). Τα παραπάνω δεν ισχύουν για τις περιπτώσεις «παράκτιων υδάτων», στις οποίες η χλωροφύλλη και τα λοιπά αιωρούμενα στο νερό σωματίδια, παρουσιάζονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ( $> 0,35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) από ότι στις περιοχές των βαθέων υδάτων.

Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 2.1.3.2. της παρούσας διδακτορικής διατριβής, στην παραπάνω κατηγορία (Κατηγορία I Υδάτων-Βαθιά ύδατα) ανήκει το σύνολο των

πελάγιων υδάτων του Αιγαίου και Κρητικού Πελάγους σύμφωνα με τους Karageorgis, *et al*, (2012) και Ignatiades, L., (1998), τα οποία παρουσιάζουν συντελεστή εξασθένησης  $K_d = 0,040$  και συγκεντρώσεις χλωροφύλλης ( $C_{chl-a}$ )  $0,003-0,28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $0,003-0,28 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [Ultra-oligotrophic waters]. Τα παραπάνω στοιχεία επιβεβαιώθηκαν και με μετρήσεις πεδίου από θαλάσσια έρευνα που διενεργήθηκε κατά τα έτη 2006-2007, στο πλαίσιο αντίστοιχων Ευρωπαϊκών προγραμμάτων. Ωστόσο, αντίστοιχες μετρήσεις των φαινόμενων οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων ( $K_d$ ) στα παράκτια ύδατα δεν έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα σε ελληνικές περιοχές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός και εν γένει αξιοποίηση της ανερχόμενης από τα ύδατα ακτινοβολίας στις παράκτιες περιοχές, δεν είναι εύκολη υπόθεση, δεδομένου ότι η κατηγορία αυτή των υδάτων συνίσταται από ύδατα (Case 2 Waters) με σύνθετες συγκεντρώσεις ουσιών, αφού εκτός από το θαλασσινό νερό περιέχουν και άλλες διαλυμένες οργανικές ή ανόργανες ενώσεις και σωματίδια.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας εστιάζεται στην μελέτη των παράκτιων υδάτων (Case 2 Waters) σε 3 θαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, στις οποίες δεν έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν μετρήσεις ποιότητας παράκτιων υδάτων, και των οπτικών ιδιοτήτων ή της εξερχόμενης από τα ύδατα αυτά ακτινοβολίας. Άρα, το ζητούμενο στην παρούσα μελέτη είναι να προσδιοριστεί η εξερχόμενη των υδάτων ανακλαστικότητα, με μεθόδους ανάλυσης δορυφορικών εικόνων και μέσω αυτής να υπολογιστεί στην συνέχεια η βαθυμετρία στην εκάστοτε παράκτια περιοχή ενδιαφέροντος.

Πρόκειται για μία διαδικασία, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τύπο υδάτων ή/και σε δεδομένα που συλλέγονται από διαφορετικούς αισθητήρες τηλεπισκόπησης (πολυφασματικούς, υπερφασματικούς) και βασίζεται στην επινοήση κατάλληλου «ημι-αναλυτικού αλγορίθμου» (Quasi-analytical Algorithms), ο οποίος υιοθετεί τις αρχές της θεωρίας Διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας/Ακτινοβολίας (Radiative Transfer Theory). Η υπόψη θεωρία περιγράφει το πεδίο ακτινοβολίας μέσα σε ένα μέσο διάδοσης (π.χ. θαλάσσιο ύδωρ), όπως αυτό διαμορφώνεται από τους συντελεστές σκέδασης ( $b(\lambda)$ ) και απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ), οι οποίοι συχνά αναφέρονται ως οπτικές ιδιότητες ή βιο-οπτικές παράμετροι του μέσου διάδοσης.

Η μεθοδολογία που επινοήθηκε και αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή εφαρμόζει τεχνική αναστροφής (inversion) και χρησιμοποιεί τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των (Lee, *et*

al., 2002), με σκοπό να υπολογιστούν οι βασικές εγγενείς οπτικές ιδιότητες (IOPs) των υδάτων υπό μελέτη, δηλαδή ο συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda)$ ) και ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης ( $a(\lambda)$ ). Ακολούθως, υπολογίζεται η φαινόμενη οπτική ιδιότητα (AOP) των υδάτων, και συγκεκριμένα εκείνη που περιγράφει το πόσο γρήγορα εξασθενεί η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάδοσή της μέσα στο θαλάσσιο ύδωρ, ήτοι ο συντελεστής Εξασθένησης λόγω Διάχυσης ( $K_d(\lambda)$ ). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος για να λειτουργήσει δεν προϋποθέτει την γνώση της λευκαύγειας του εκάστοτε ιζήματος του θαλάσσιου πυθμένα (Bottom albedo). Στην συνέχεια, ο συγκεκριμένος ημι-αναλυτικός αλγόριθμος βαθμονομείται («ρυθμίζεται») με χρήση εμπειρικών τεχνικών, προκειμένου εξάγει δεδομένα βαθυμετρίας από την δορυφορική εικόνα. Επεδή η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιεί ημι-αναλυτικούς αλγορίθμους αλλά και εμπειρικά μοντέλα επίλυσης ονομάστηκε «Υβριδικός Αλγόριθμος» ή «Υβριδικό Μοντέλο» (Hybrid Model) βαθυμετρίας και αναπτύσσεται σε διακριτές φάσεις ως περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.

#### 4.2.1.1 Βήμα 1: Προ-επεξεργασία Εικόνας

Η εκάστοτε δορυφορική εικόνα απαιτείται πριν την οποιαδήποτε επεξεργασία και ανάλυσή της, σχετικά με την εξαγωγή βαθυμετρίας, να διορθωθεί ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά, έτσι ώστε οι τιμές των εικονοστοιχείων από την επιφάνεια των υδάτων να αναφέρονται σε τιμές ανακλαστικότητας της γήινης επιφάνειας  $R_{BOA}$ . Στην συνέχεια, η εικόνα απαιτείται να διορθωθεί ως προς την θάμβωση (sunglint) που προκαλείται λόγω της κατοπτρικής ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ελεύθερη επιφάνεια της θαλάσσης και λόγω της ύπαρξης του αφρού-φυσάλιδων στις κορυφές των κυμάτων. Άρα, όπου στην συνέχεια αναφέρεται ο όρος « $R_{rs}$ » νοείται το τμήμα εκείνο της ακτινοβολίας που εξέρχεται της επιφάνειας των υδάτων, και το οποίο είναι διορθωμένο αφενός ως προς την επίδραση της ατμόσφαιρας (path radiance) και αφετέρου ως προς την επίδραση της θάμβωσης (sunglint corrected). Ακολούθως, διορθώνεται η εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος αναφορικά με την επίδραση της υδάτινης στήλης (water column correction), δηλαδή αφαιρείται από την ανακλώμενη από τον πυθμένα ακτινοβολία το τμήμα της εκείνο, το οποίο προκαλείται/δημιουργείται από την σκέδαση των μορίων του ύδατος και την σκέδαση λόγω των αιωρούμενων στο νερό σωματιδίων. Στην συνέχεια εφαρμόζονται τεχνικές

κάλυψης της ξηράς (masking), προκειμένου αποφευχθούν έντονα φαινόμενα «γειτνίασης» (neighbouring effects), λόγω της ύπαρξης ακτών πλησίον της παράκτιας περιοχής μελέτης, οι οποίες συνίστανται από ιζήματα με υψηλές τιμές ανακλαστικότητας, έτσι ώστε να βελτιωθεί περαιτέρω η διαδικασία της επεξεργασίας των εικονοστοιχείων από αυτό τον τύπο του φασματικού θορύβου.

#### 4.2.1.2 Βήμα 2: Υπολογισμός $r_{rs}(\lambda)$ και $u(\lambda)$

Η ακριβώς κάτω από την επιφάνεια των υδάτων υποθαλάσσια ανακλαστικότητα (below-surface remote sensing reflectance -  $r_{rs}$ ), δίνεται συναρτήσει της υπερκείμενης των υδάτων ακτινοβολίας (above-surface remote sensing reflectance -  $R_{rs}$ ) από την σχέση :

$$r_{rs} = \frac{R_{rs}}{0,52+1,7 \cdot R_{rs}} \quad [sr^{-1}] \quad (\text{εξισ. 4.2})$$

Όπου  $R_{rs}$  είναι το τμήμα αυτό της ακτινοβολίας τηλεπισκόπησης, το οποίο είναι διορθωμένο ως προς την επίδραση της ατμόσφαιρας και ως προς την επίδραση της θάμβωσης που προκαλείται από την κατάσταση της ελεύθερης επιφάνειας θαλάσσης και είναι συνάρτηση της σχετικής γωνίας θέσης μεταξύ ηλίου-αισθητήρα, την χρονική στιγμή λήψης της εκάστοτε δορυφορικής εικόνας. Παράλληλα, η ακτινοβολία ( $r_{rs}$ ) κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, σύμφωνα με τους Gordon *et al.*, (1988) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$r_{rs} = g_0 \cdot u(\lambda) + g_1 \cdot [u(\lambda)]^2 \quad (\text{εξισ. 4.3})$$

με

$$u(\lambda) = u = \frac{b_b}{\alpha + b_b} \quad (\text{εξισ. 4.4})$$

Ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b$ ) ισούται με το άθροισμα του συντελεστού οπισθοσκέδασης λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων ( $b_{bp}$ ) στο νερό (μικρόβια, βακτήρια, φυσαλίδες, κ.α.), και του συντελεστού οπισθοσκέδασης λόγω της σκέδασης/οπισθοσκέδασης της ακτινοβολίας στα μόρια του νερού ( $b_{bw}$ ):

$$b_b = b_{bp} + b_{bw} \quad (\text{εξισ. 4.5})$$

Οι τιμές των παραμέτρων  $g_0$  και  $g_1$  εξαρτώνται από το σχήμα και το μέγεθος των αιωρούμενων στο μέσο διάδοσης σωματιδίων και δίνονται στον Πίνακα 4.4, για κάθε περίπτωση υδάτων.

**Πίνακας 4.4:** Τιμές Παραμέτρων  $g_0$  και  $g_1$  του ημι-αναλυτικού αλγορίθμου QAA.

| $\alpha/\alpha$ | Πελάγια Ύδατα (Oceanic Waters) | Παράκτια Ύδατα (Coastal Waters) |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| $g_0$           | 0,0949                         | 0,084                           |
| $g_1$           | 0,0794                         | 0,17                            |

Αν στις παραπάνω εξισώσεις γίνουν οι απαραίτητες αντικαταστάσεις προκύπτει ότι :

$$u(\lambda) = \frac{-g_0 + [(g_0^2 + 4 \cdot g_1 \cdot r_{rs}(\lambda))]^{1/2}}{2 \cdot g_1} \quad (\text{εξισ. 4.6})$$

Οπότε εάν υπολογιστεί η τιμή του  $u(\lambda)$  από την εξισ. 4.6 και είναι γνωστός ο ένας εκ των δύο συντελεστών ( $b(\lambda)$ ) ή ( $\alpha(\lambda)$ ), τότε δύναται να υπολογιστεί ο έτερος εκ των συντελεστών (εξισ. 4.7 και εξισ. 4.8).

$$u = \frac{b_b}{\alpha + b_b} \Leftrightarrow b_b = \frac{u \cdot \alpha}{1 - u} \quad (\text{εξισ. 4.7})$$

ή αντίστοιχα

$$u = \frac{b_b}{\alpha + b_b} \Leftrightarrow \alpha = \frac{(1 - u) \cdot b_b}{u} \quad (\text{εξισ. 4.8})$$

#### 4.2.1.3 Βήμα 3: Υπολογισμός Συντελεστών $b_b(\lambda)$ και $\alpha(\lambda)$

Η υπόψη φάση αφορά στον υπολογισμό του συνολικού συντελεστού απορρόφησης (Total Absorption Coefficient). Πειραματικά έχει αποδεικτεί ότι ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης  $\alpha(\lambda)$  ισούται με το άθροισμα του συντελεστή απορρόφησης του «καθαρού νερού» (clear open ocean waters), του συντελεστή απορρόφησης που προκαλείται από τα

αιωρούμενα μη διαλυμένα (particulate matter) στο νερό σωματίδια και του συντελεστή απορρόφησης λόγω των υφιστάμενων στο νερό διαλυμένων οργανικών ουσιών (dissolved organic matter). Οι τελευταίες κυριαρχούν στην απορρόφηση του μπλε (Blue) και του πράσινου (Green) τμήματος του Η/Μ φάσματος. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται, ότι εάν προσδιοριστεί ένα μήκος κύματος αναφοράς ( $\lambda_o$ ), στο οποίο μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα ( $r_s(\lambda_o)$ ), τότε δύναται να υπολογιστεί και ο αντίστοιχος συντελεστής απορρόφησης στο μήκος κύματος αναφοράς ( $\alpha(\lambda_o)$ ), άρα στην συνέχεια είναι εφικτό να υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda_o)$ ) στο ίδιο μήκος κύματος.

Ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b$ ) είναι το άθροισμα του συντελεστή οπισθοσκέδασης του καθαρού νερού ( $b_{bw}$ ) και του συντελεστή οπισθοσκέδασης των αιωρούμενων σωματιδίων ( $b_{bp}$ ). Λαμβανομένου υπόψη ότι ο  $b_{bw}$  για το εκάστοτε μήκος κύματος αναφοράς ( $\lambda_o$ ) δίνεται από τους πίνακες του Morel, A., (1974), μπορεί να υπολογιστεί ο  $b_{bp}(\lambda_o)$  στο μήκος κύματος αναφοράς ( $\lambda_o$ ). Η σχέση που συνδέει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης λόγω των αιωρούμενων στο νερό σωματιδίων ( $b_{bp}(\lambda)$ ) σε κάποιο μήκος κύματος ( $\lambda$ ), με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης αιωρούμενων σωματιδίων στο μήκος κύματος αναφοράς ( $\lambda_o$ ) δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_o) \cdot \left(\frac{\lambda_o}{\lambda}\right)^Y \quad (\text{εξισ. 4.9})$$

Οπότε, έχοντας υπολογίσει τον συντελεστή οπισθοσκέδασης λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στο νερό, σε οποιοδήποτε μήκος κύματος ( $b_{bp}(\lambda)$ ) και γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης του «καθαρού» νερού ( $b_{bw}(\lambda)$ ) για το ίδιο μήκος κύματος ( $\lambda$ ) από τους πίνακες του Morel, (1974), δύναται να υπολογιστεί ακολούθως ο συνολικός συντελεστής οπισθοσκέδασης ( $b_b(\lambda) = b_{bp}(\lambda) + b_{bw}(\lambda)$ ). Στην συνέχεια από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\alpha = \frac{(1 - u) \cdot b_b}{u} \quad (\text{εξισ. 4.10})$$

υπολογίζεται και ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης ( $\alpha(\lambda)$ ).

#### 4.2.1.4 Βήμα 4: Προσδιορισμός Συντελεστή Εξασθένησης ( $K_d$ )

Το επόμενο στάδιο ανάλυσης της δορυφορικής εικόνας αφορά στον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένησης διάχυσης ( $K_d$ ) με ημι-αναλυτικό τρόπο μέσω της τροποποιημένης εξίσωσης των (Sathyendranath, *et al.*, 1989):

$$\bar{K}_d = m_0 \cdot \alpha + m_1 \cdot (1 - m_2 \cdot e^{-m_3 \cdot \alpha}) \cdot b_b \quad (\text{εξισ. 4.11})$$

όπου,

$$m_0 \approx 1 + 0,005 \cdot \theta_\alpha \quad (\text{εξισ. 4.12})$$

με  $\theta_\alpha$  να αντιπροσωπεύει τη ζενιθιακή γωνία του ηλίου, ενώ οι συντελεστές  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  παίρνουν σταθερές τιμές σύμφωνα με τους (Lee *et al.*, 2004b) για οποιοδήποτε μήκος κύματος και για οποιαδήποτε κατηγορία υδάτων ως ακολούθως  $m_1=4,18$ ,  $m_2=0,52$ ,  $m_3=10,8$ .

Από τα παραπάνω συνάγεται το γεγονός ότι εάν είναι γνωστή η ανακλαστικότητα  $R_{rs}(\lambda)$  (μέσω της διαδικασίας προ-επεξεργασίας της δορυφορικής εικόνας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής εξασθένησης ( $K_d$ ) λόγω της διάχυσης του ηλιακού φωτός κατά την διάδοση του στην υδάτινη μάζα.

Για λόγους απλοποίησης, θεωρείται ότι ο συντελεστής εξασθένησης της κατερχόμενης ακτινοβολίας ( $K_d$ ) είναι ίσος με τον συντελεστή της ανερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ( $K_u$ ), ήτοι  $K_d = K_u$ , η υπόψη θεώρηση έχει ως συνέπεια μία υποεκτίμηση (underestimation) στον υπολογισμό των ανακλαστικότητων, άρα και του υπολογισμού και του βάθους κατά 15% (Maritorena, *et al.*, 1994).

#### 4.2.1.5 Βήμα 5: Ταξινόμηση Υδάτων

Στο στάδιο αυτό της ανάλυσης της δορυφορικής εικόνας διερευνώνται οι σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων που έχουν υπολογιστεί σε κάθε φασματική ζώνη της εκάστοτε περιοχής ερεύνης. Από τα εν λόγω πειράματα προσδιορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων σε διάφορες θέσεις της εικόνας και επιλέγεται ο πιο χαρακτηριστικός συνδυασμός (σχέση μεταβολής) αυτών. Δηλαδή, προσδιορίζεται η σχέση που αντιπροσωπεύει την διαφοροποίηση (ταξινόμηση) της μίας περιοχής έναντι μίας άλλης. Οι καταλληλότερες θέσεις για την μελέτη της μεταβολής των βιο-οπτικών παραμέτρων



επιλέγονται κυρίως με την χρήση του σύνθετου της διορθωμένης εικόνας ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος.

Στην συνέχεια εφαρμόζεται, κάποια λογική συνάρτηση η οποία αντιπροσωπεύει τη σχέση της μεταβολής ή του συνδυασμού των σχέσεων της μεταβολής βιο-οπτικών ιδιοτήτων/παραμέτρων στην εικόνα, προκειμένου δημιουργηθούν οι περιοχές που παρουσιάζουν παρόμοιες οπτικές ιδιότητες υδάτων. Οι εν λόγω περιοχές παρόμοιων βιο-οπτικών ιδιοτήτων υδάτων αποτελούν τις διαφορετικές κλάσεις υδάτων στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Πρόκειται ουσιαστικά για μία τεχνική μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, η οποία ελέγχεται από τον αναλυτή με βάση την διακύμανση των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων που παρουσιάζονται στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Στην συνέχεια, εφαρμόζονται τεχνικές επικάλυψης (masking) για την οριοθέτηση κάθε κλάσης ξεχωριστά, ώστε να δημιουργηθεί τελικά το σύνθετο όλων των κλάσεων που προσδιοριστεί στην περιοχή μελέτης. Τέλος, σε κάθε καθορισθείσα περιοχή ταξινόμησης υπολογίζονται οι τιμές των λόγων των βιο-οπτικών και άλλων παραμέτρων που υπολογίστηκαν στη παρούσα ενότητα.

#### 4.2.1.6 Βήμα 6: Υπολογισμός Λόγων (Ratios) Βιο-οπτικών Παραμέτρων

Με βάση τις προσδιορισθείσες εγγενείς και φαινόμενες βιο-οπτικές παραμέτρους ( $\alpha$ ,  $b_b$ ,  $K_d$ ) των υδάτων της εκάστοτε περιοχής μελέτης, όπως περιγράφηκαν στις παραπάνω παρ. 4.2.1.1 έως 4.2.1.3, υπολογίζονται σε κάθε κλάση υδάτων όπως αυτές δημιουργήθηκαν σύμφωνα με την ενότητα 4.2.1.5, οι λόγοι (ratios) μεταξύ όλων των διορθωμένων ως προς την θάμβωση (sunglint correction) φασματικών ζωνών, καθώς και οι λόγοι των λογαρίθμων αυτών. Επιπρόσθετα, υπολογίζονται οι λόγοι μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων και των λογαρίθμων των υπόψη οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων σε κάθε παράκτια περιοχή μελέτης. Επιπλέον, υπολογίζονται και οι λόγοι μεταξύ των συνδυασμών των φασματικών ζωνών που έχουν προκύψει από την διαδικασία διόρθωσης της εικόνας ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος.

#### 4.2.1.7 Βήμα 7: Υπολογισμός Βαθυμετρίας

Στην φάση αυτή, επιλέγονται από τον αντίστοιχο ναυτικό χάρτη βάθη, ή χρησιμοποιούνται δεδομένα βαθυμετρίας πεδίου, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την «εκπαίδευση» (training) του μοντέλου σε κάθε υποπεριοχή-κλάση υδάτων χωριστά. Τα βάθη

αυτά (δεδομένα αναφοράς) αποσκοπούν στην βαθμονόμηση/εκπαίδευση του υβριδικού μοντέλου ανά κλάση, και επιλέγονται έτσι ώστε να είναι μικρού αριθμού (λιγότερα από 10 βάθη). Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται μικρός αριθμός βαθμών εκπαίδευσης/βαθμονόμησης του μοντέλου είναι αφενός να ελεγχθεί η επάρκεια του μοντέλου στην εξαγωγή αποτελεσμάτων βαθυμετρίας ικανοποιητικής ακρίβειας, έστω και με ορισμένα βάθη βαθμονόμησης, αφετέρου να προσδιοριστεί η βέλτιστη εξίσωση συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων αναφοράς και υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας κάθε κλάσης υδάτων.

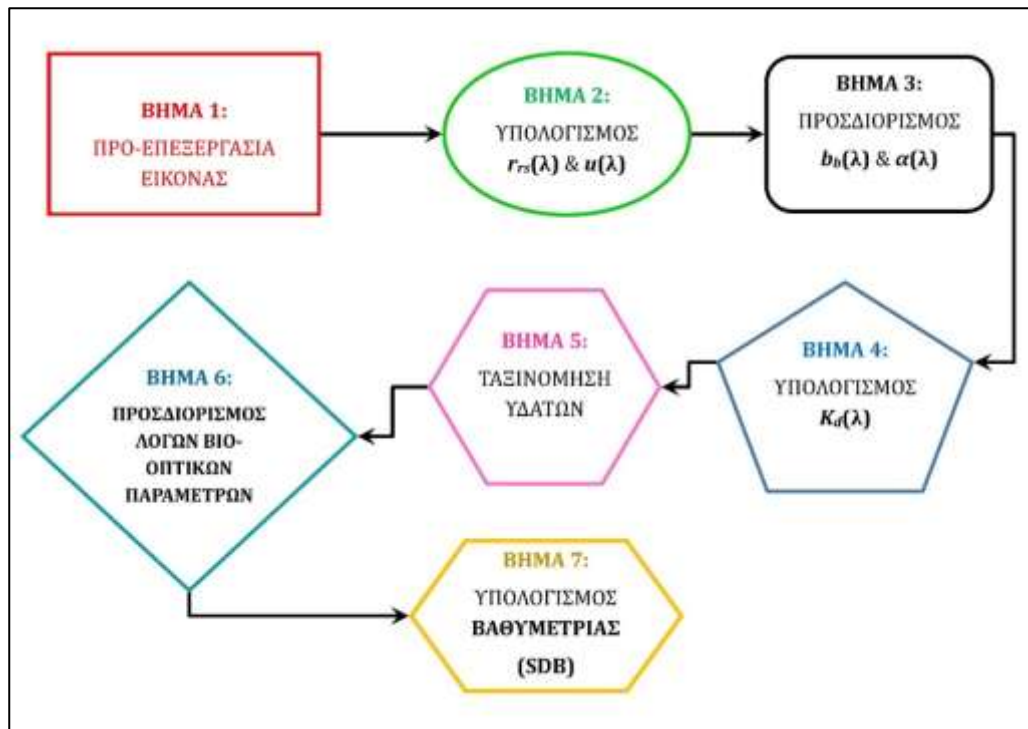
Ακολούθως, εφαρμόζονται τεχνικές στατιστικής συσχέτισης προκειμένου προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός (λόγος) των βιο-οπτικών παραμέτρων, από εκείνους που υπολογίστηκαν στην ενότητα 4.2.1.6, ο οποίος παρουσιάζει τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) με τα επιλεχθέντα βάθη βαθμονόμησης/εκπαίδευσης. Εξετάζονται όλοι οι λόγοι (ratios) βιο-οπτικών παραμέτρων καθώς και των λογαρίθμων αυτών. Η εν λόγω εργασία-διερεύνηση επαναλαμβάνεται για κάθε κλάση υδάτων. Στην συνέχεια, επιλέγεται ο λόγος που δίνει την καλύτερη στατιστική συσχέτιση (λόγος αναφοράς) με βάση την τιμή του αντίστοιχου συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ -Coefficient of Determination) σε κάθε κλάση, όπως προκύπτει από την συσχέτιση του με τα βάθη βαθμονόμησης (πεδίου ή ΧΕΕ) σε κάθε κλάση υδάτων. Η εξίσωση γραμμικής συσχέτισης που προκύπτει από την καλύτερη δυνατή συσχέτιση με τα βάθη κάθε κλάσης, εφαρμόζεται με ανεξάρτητη μεταβλητή ( $x$ -independant) τον «λόγο (ratio) αναφοράς» κάθε κλάσης υδάτων και εξαρτημένη ( $y$ -dependant) την εξαγόμενη βαθυμετρία από το υβριδικό μοντέλο για κάθε περιοχή (κλάση) ταξινόμησης. Εφαρμόζονται τεχνικές επικάλυψης (masking), προκειμένου η εξαγόμενη (modelled) βαθυμετρία περιοριστεί αποκλειστικά στη περιοχή της εκάστοτε κλάσης υδάτων και όχι σε ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος.

Αθροίζονται οι επιμέρους (ανά κλάση) βαθυμετρίες και δημιουργείται το τελικό βαθυμετρικό μοντέλο ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος. Συνήθως είναι σκόπιμο να εφαρμόζεται φίλτρο Αριθμητικού Μέσου για την καλύτερη χαρτογραφική απόδοση των βαθμών σε αυτό.

Η παραπάνω περιγραφείσα μέθοδος δύναται να διαφέρει σε μικρό βαθμό ανά περιοχή μελέτης και ανά τύπο δορυφορικού προϊόντος/εικόνας κατά το στάδιο προ-επεξεργασίας της εκάστοτε εικόνας. Το γεγονός αυτό εξαρτάται από το εάν η υπό ανάλυση εικόνα είναι ατμοσφαιρικά και ραδιομετρικά διορθωμένη ή όχι, και από εάν οι υπό ανάλυση φασματικές

ζώνες είναι ίδιας χωρικής ανάλυσης ή όχι, ή από το εάν εάν επεξεργάζεται ολόκληρη η εικόνα ή ένα τμήμα αυτής κοκ.

Οι παραπάνω περιγραφείσες φάσεις ανάλυσης της δορυφορικής εικόνας με βάση το υβριδικό μοντέλο που επινοήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης περιγράφεται διαγραμματικά στην παρακάτω Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11 : Μέθοδος Υβριδικού Μοντέλου (Hybrid Model) Εξαγωγής Βαθυμετρίας.

#### 4.2.2 Δυσχέρειες – Προβλήματα

Η τηλεπισκόπηση των θαλασσίων υδάτων βασίζεται πρωτίστως στον τρόπο διάδοσης του φωτός, στην ατμόσφαιρα και το νερό. Η σύσταση, οι φυσικές, χημικές, οπτικές και λοιπές ιδιότητες του μέσου διάδοσης, εν προκειμένου της ατμόσφαιρας και του νερού, επηρεάζουν την διαθεσιμότητα και εν γένει τον τρόπο διάδοσης του φωτός σε αυτά. Το πρόβλημα θεωρείται αρκετά σύνθετο, αν αναλογιστεί κανείς ότι η σύσταση του μέσου (π.χ., ατμόσφαιρας και υδάτινης μάζας) μπορεί να διαφέρει, είτε χωρικά (τοπικά), είτε χρονικά.

Επιπρόσθετα, η ποσότητα της ακτινοβολίας που εξέρχεται από το θαλάσσιο ύδωρ είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια, αφού αποτελεί ένα πολύ μικρό μέγεθος συγκριτικά με την ποσότητα της ακτινοβολίας που ανακλάται από τα διάφορα στρώματα της

ατμόσφαιρας ή/και από την θαλάσσια επιφάνεια (water surface scattering). Αυτό συμβαίνει λόγω του χαμηλού λόγου σήματος/θόρυβο του αισθητήρα στα μικρά μήκη κυμάτων (blue, green bands). Ωστόσο, αυτή η πολύ μικρή ποσότητα ακτινοβολίας είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί προκειμένου να δύναται να υπολογιστεί η βαθυμετρία της εκάστοτε υδάτινης περιοχής (Eugenio, *et al.*, 2015). Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει τους υπολογισμούς του μοντέλου, καθόσον το μικρό ποσοστό του σήματος που προέρχεται από τον θαλάσσιο πυθμένα, αποτελεί μόνο ένα κλάσμα της εξερχόμενης των υδάτων ακτινοβολίας, και για αυτό τον λόγο είναι δύσκολο να διαχωριστεί από τον θόρυβο του υδάτινου περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας. Στην πραγματικότητα η ανακλαστικότητα των αντικειμένων του θαλάσσιου πυθμένα που ανιχνεύονται από τους δορυφόρους είναι πολύ χαμηλή και επηρεάζεται-απομειώνεται από την ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση, την γεωμετρία (σχετική θέση) αντικειμένου-αισθητήρα και τις ρυθμίσεις του αισθητήρα (sensor calibration).

Παράλληλα, η ανάκλαση (specular reflection) της ηλιακής ακτινοβολίας στην ελεύθερη θαλάσσια επιφάνεια αποτελεί έναν επίσης σημαντικό παράγοντα σύγχυσης για τον προσδιορισμό της βαθυμετρίας και τον προσδιορισμό της ανακλαστικότητας/λευκαύγειας του θαλασσίου πυθμένα (seafloor albedo) (Kay *et al.*, 2009).

Η τηλεπισκόπηση των θαλασσιών υδάτων γίνεται ακόμα πιο δύσκολη υπόθεση στην περίπτωση μελέτης των παράκτιων υδάτων (Case 2 Waters). Τα παράκτια ύδατα αποτελούν σύνθετα οικοσυστήματα, ευαίσθητα στις αποθέσεις ιζημάτων και ουσιών, από τις γειτνιάζουσες σε αυτά, χερσαίες περιοχές. Σε αυτή την περίπτωση λόγω της πολλαπλής σκέδασης το σήμα τηλεπισκόπησης που λαμβάνεται στον αισθητήρα είναι η συνισταμένη του σήματος από την προαναφερόμενη σκέδαση λόγω των πολλών αιωρούμενων σωματιδίων στην υδάτινη στήλη και του σήματος από τον πυθμένα (ανακλαστικότητα πυθμένα). Ειδικά, στην περίπτωση υψηλής θολότητας των παρακτίων υδάτων το σήμα/ακτινοβολία που προέρχεται από τον παράκτιο πυθμένα επισκιάζεται από την σκέδαση που προκαλείται λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων, με συνέπεια να είναι αδύνατος ο υπολογισμός της βαθυμετρίας σε μεγάλα βάθη.

Επίσης, τα αποτελέσματα ταξινόμησης των βενθικών πληθυσμών με χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης επηρεάζονται από την σύσταση της υδάτινης στήλης. Τα συστατικά και οι ιδιότητες (φυσικές & χημικές) της υδάτινης στήλης (Inherent Optical Properties - IOPs) μεταβάλλουν δυναμικά (χρονικά και χωρικά) τις διαδικασίες

απορρόφησης και διάχυσης του ηλιακού φωτός, με αποτέλεσμα να μεταβάλλουν, με την σειρά τους, δυναμικά και την φασματική απόκριση των αντικειμένων του πυθμένα προκαλώντας δυσκολίες στην χαρτογράφηση των βενθικών ενδιαιτημάτων (Lee ZP, *et al.*, 2007).

Αναφορικά με την επεξεργασία και ανάλυση των δορυφορικών εικόνων σύμφωνα με το Υβριδικό μοντέλο, που υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή, διαπιστώθηκαν προβλήματα και καθυστερήσεις στην πολυφασματική ανάλυση της εικόνας Pleiades. Οι εν λόγω δυσχέρειες προέκυψαν στο στάδιο εφαρμογής της διαδικασίας αποθάμβωσης, φαινόμενο το οποίο ήταν αρκετά έντονο στην προκειμένη περίπτωση λόγω της μικρής χωρικής διάστασης των εικονοστοιχείων της συγκεκριμένης εικόνας.

Τέλος, δυσχέρειες διαπιστώθηκαν κατά τα διάφορα στάδια επεξεργασίας των γεωχωρικών δεδομένων λόγω των διαφορετικών μορφότυπων (formats), των διαφορετικών γεωδαιτικών συστημάτων αναφοράς, και των διαφορετικών πηγών προέλευσης καθώς και του μεγάλου όγκου πληροφορίας που τα χρησιμοποιηθέντα δεδομένα περιείχαν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

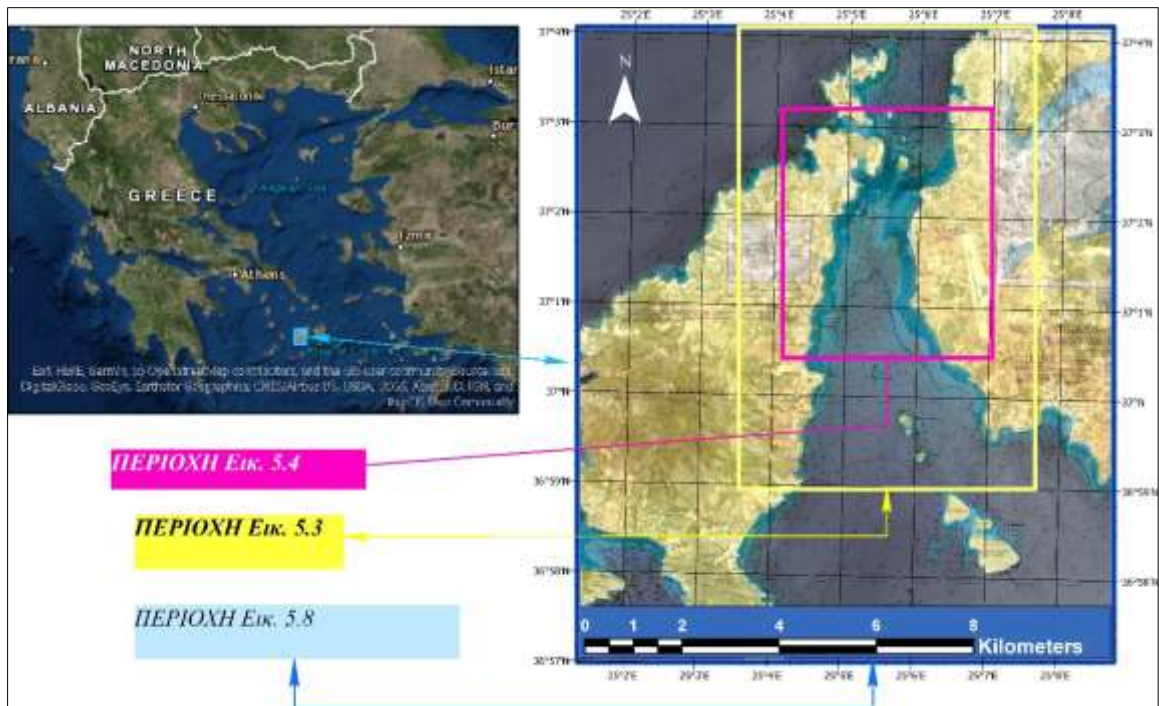
### 5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΥΙΟΘΕΤΗΘΕΙΣΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 5.1.1 Περιγραφή Αποτελεσμάτων Βαθυμετρίας Περιπτωσιολογικών Περιοχών

Το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας, το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής εφαρμόστηκε στις 3 περιοχές μελέτης, ως αυτές επιλέχθηκαν και περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Επειδή η μεθοδολογία ατμοσφαιρικής διόρθωσης δεν αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας της παρούσας διατριβής, στις 2 από τις 3 περιπτώσεις των περιοχών μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες που είχαν ήδη διορθωθεί ως την επίδραση της ατμόσφαιρας από τους παρόχους τους. Μόνο στην περίπτωση της εικόνας Pleiades που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά-Ελληνικού διενεργήθηκε ατμοσφαιρική διόρθωση. Στις υπόλοιπες περιοχές η ατμοσφαιρική διόρθωση που πραγματοποιήθηκε εκ μέρους των παρόχων των δορυφορικών εικόνων (ESA, USGS/NASA) κρίθηκε ως αντιπροσωπευτική για τις αντίστοιχες περιοχές μελέτης, ήτοι εκείνων της περιοχής του Στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου και της παράκτιας περιοχής του Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου. Από τα πειράματα που πραγματοποιηθήκαν με τη χρήση του επινοηθέντος Υβριδικού μοντέλου σε κάθε περιοχή μελέτης προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς στις ενότητες που ακολουθούν.

##### 5.1.1.1 Εξαγωγή Βαθυμετρίας στην Περιοχή Στενού Ν. Πάρου-Αντιπάρου (Case Study 1)

Οι φασματικές ζώνες που χρησιμοποιήθηκαν από τον αισθητήρα MSI του δορυφόρου Sentinel-2A για την παράκτια περιοχή του Στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου ήταν οι B2 (blue), B3 (green), B4 (red) και η B8 (NIR). Επειδή οι παραπάνω ζώνες έχουν διαφορετική χωρική ανάλυση (resolution) εφαρμόστηκε αρχικά επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία (resampling) στην εικόνα, έτσι ώστε όλες οι υπό ανάλυση φασματικές ζώνες να έχουν κοινή χωρική διακριτική ικανότητα, ήτοι 10 m Στην συνέχεια, η εικόνα περιορίστηκε (subset), ώστε να περιλαμβάνει μόνο την περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα 5.1), προκειμένου γίνει εφικτή η ταχύτερη διαχείριση των αντίστοιχων γεωχωρικών δεδομένων.

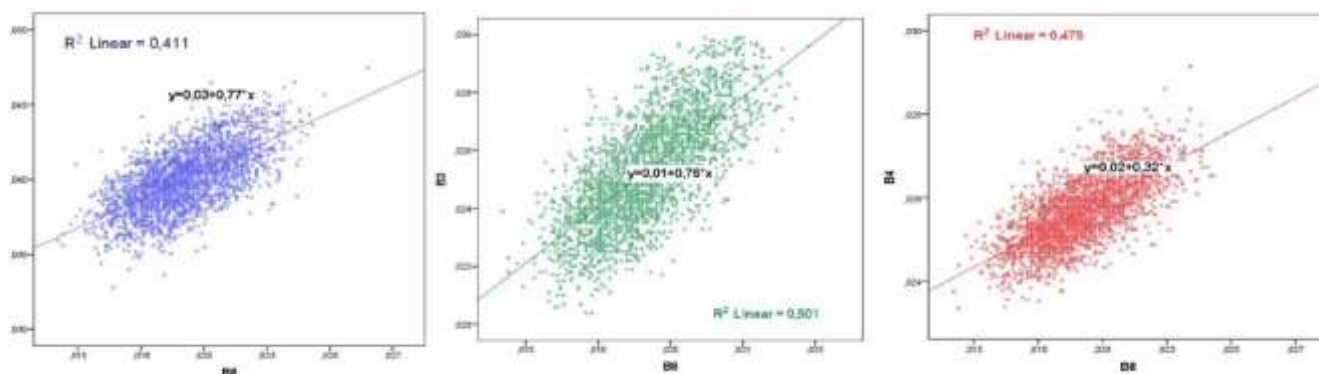


**Εικόνα 5.1 :** Περιοχή Μελέτης Στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου από τον δορυφόρο Sentinel-2.

Ακολούθως, στις συγκεκριμένες ζώνες εφαρμόστηκε η τεχνική αποθάμβωσης (sunglint correction) σύμφωνα με την τεχνική των Hedley, *et al.*, (2005) και Kay, *et al.*, (2009) (εξισ. 5.1). Η υπόψη τεχνική εφαρμόστηκε σε μία περιοχή βαθέων υδάτων, δηλαδή σε μία περιοχή με βάθη μεγαλύτερα των 50 m. Με την χρήση της περιοχής των βαθέων υδάτων εξασφαλίζεται η προϋπόθεση που απαιτεί το καταγραφόμενο από το δορυφόρο σήμα που εξέρχεται από τα ύδατα, να μην περιλαμβάνει ακτινοβολία που να προέρχεται από το ίζημα του θαλάσσιου πυθμένα.

$$Deg(R_{Bi}) = R_{Bi} - slope_{Bi} \times (R_{NIR} - minNIR) \quad (\text{εξισ. 5.1})$$

Όπου  $Degl(R_{Bi})$  είναι η διορθωμένη ως προς την θάμβωση ακτινοβολία ως αυτή εξέρχεται των υδάτων παρατηρούμενη πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο όρος  $R_{Bi}$  αντιπροσωπεύει την εκάστοτε εξεταζόμενη φασματική ζώνη, δηλαδή για την περίπτωση της εικόνας Sentinel-2A όπου  $R_{Bi}$  είναι οι ατμοσφαιρικά διορθωμένες ζώνες B2 (blue), B3(green), B4 (red) και  $R_{NIR}$  η B8 (NIR) ζώνη. Ο όρος  $minNIR$  εκφράζει την ελάχιστη τιμή της ζώνης του εγγύς υπέρυθρου, στην περιοχή των βαθέν υδάτων. Η μεταβλητή  $slope\_Bi$  αντιπροσωπεύει την κλίση της εξίσωσης γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της εκάστοτε φασματικής ζώνης στο οπτικό φάσμα (κατακόρυφος άξονας) και της ζώνης του εγγύς υπέρυθρου (οριζόντιος άξονας). Προκειμένου λοιπόν, δύναται να επιλυθεί η εξισ. 5.1 δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (scatterplots) μεταξύ των φασματικών ζωνών του οπτικού φάσματος (B2, B3, B4,  $y$ -axis) (B8,  $x$ -axis) (Εικόνα 5.2).



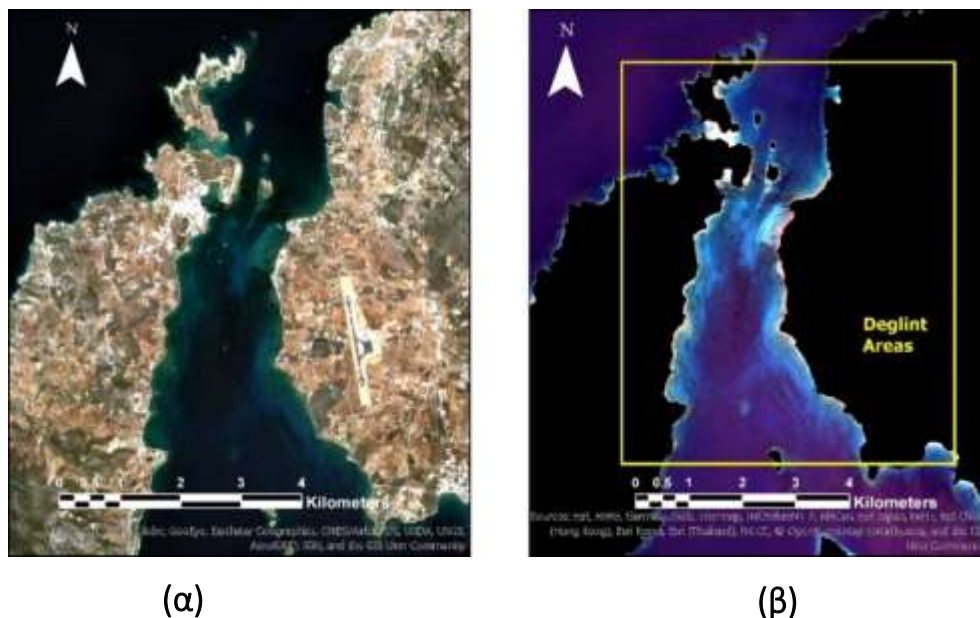
**Εικόνα 5.2 :** Διαγράμματα Διασποράς που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία αποθάμβωσης της Εικόνας Sentinel-2 του Στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου.

Εφαρμόζοντας τις κλίσεις ( $slope\_Bi$ ) της εκάστοτε εξίσωσης γραμμικής συσχέτισης ως αυτές υπολογίζονται από τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (0.77, 0.76, 0.32) στην εξισ. 5.1, προκύπτει ως αποτέλεσμα η διορθωμένη εικόνα (sunglint corrected) του Στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου ως προς την θάμβωση (Εικόνα 5.3 (β)).

Επισημαίνεται, ότι πριν την εφαρμογή της προαναφερθείσας διαδικασίας διόρθωσης, ως προς την κατοπτρική ανάκλαση (sunglint) της ηλιακής ακτινοβολίας στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας, είναι σκόπιμο να διενεργείται επικάλυψη (masking) της ξηράς που περιλαμβάνεται στην εικόνα. Η εν λόγω τεχνική εφαρμόζεται προκειμένου αποφευχθεί ο



τυχόν «θόρυβος γειτνίασης» (neighbouring effect), λόγω των υψηλών τιμών ανακλαστικότητας των εικονοστοιχείων της ακτής (Εικόνα 5.3).



**Εικόνα 5.3 :** (α) Μη διορθωμένη ως προς την Θάμβωση Εικόνα και (β) Αποθαμβωμένη Εικόνα.

Στην συνέχεια, εφαρμόζεται η διόρθωση ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος (water column correction) σύμφωνα με την μεθοδολογία του Lyzenga (Lyzenga, 1981). Η εν λόγω διόρθωση (*Depth-Invariant Index*) εφαρμόζεται σε περιοχές ιζήματος θαλάσσιου πυθμένα παρόμοιας ανακλαστικότητας, οι οποίες (περιοχές) περιλαμβάνουν βάθη διαφόρων τιμών. Οι περιοχές που επιλέγησαν κατά το στάδιο εφαρμογής της διόρθωσης για την αλληλεπίδραση της στήλης ύδατος απεικονίζονται στην Εικόνα 5.4 (β), υπό στοιχεία (Π-1), (Π-2), (Π-3). Στις εν λόγω περιοχές υπολογίζεται ο μέσος όρος του συντελεστή εξασθένησης λόγω διάχυσης ( $K_d(B_i)$ ) μεταξύ ζευγών των φασματικών ζωνών. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, ελέχθησαν οι λόγοι των λογαρίθμων των φασματικών ζωνών B2/B3, B2/B4 και B3/B4. Οι λόγοι των αντίστοιχων ζευγών υπολογίζονται με βάση την παρακάτω εξισ. 5.2., ενώ ο συντελεστής  $\alpha$  δίνεται από την εξισ. 5.3.

$$\frac{K_{Bi}}{K_{Bj}} = a + \sqrt{(a^2 + 1)} \quad (\text{εξισ. 5.2})$$

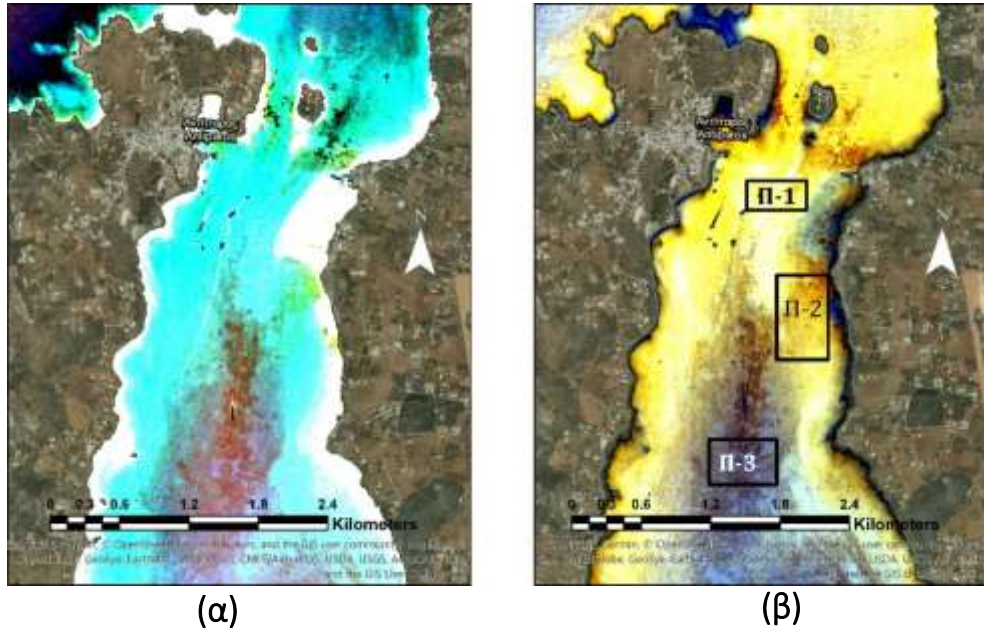
$$a = \frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2 \times \sigma_{ij}} \quad (\text{εξισ. 5.3})$$

όπου  $\sigma_{ii}$  και  $\sigma_{jj}$  είναι οι στατιστικές διακυμάνσεις (variances) των τιμών των αποθαμβωμένων ανακλαστικότητων των εκάστοτε φασματικών ζωνών ( $B_i$ ,  $B_j$ , κοκ.), ενώ η  $\sigma_{ij}$  αντιπροσωπεύει την στατιστική συνδιακύμανση (covariance) του αντίστοιχου ζεύγους φασματικών ζωνών ( $B_i$ ,  $B_j$ ).

Η διόρθωση ως προς την επίδραση της υδάτινης στήλης δίδεται από τον συντελεστή (DII- *Depth-Invariant Index*) της παρακάτω εξισ. 5.4.

$$DII = \ln(\text{Degl}(B_i)) - \left[ \left( \frac{K_{Bi}}{K_{Bj}} \right) \times \ln(\text{Degl}(B_j)) \right] \quad (\text{εξισ. 5.4})$$

Το αποτέλεσμα της διορθωμένης εικόνας Sentinel-2A (L2A product), ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος, παρουσιάζεται στο σύνθετο της Εικόνα 5.4 (β). Στην συνέχεια, με βάση τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των Lee, *et al.* (1998a) όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.1 της παρούσας εργασίας, υπολογίζονται οι βιο-οπτικές παράμετροι ( $r_{rs}$ ,  $u$ ,  $Y$ ,  $b_{bp}$ ,  $b_b$ ,  $\alpha$ ,  $K_d$ ) των υπό μελέτη υδάτων. Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των προαναφερομένων παραμέτρων προσδιορίζονται οι σχέσεις, οι οποίες «ταξινομούν» την περιοχή ενδιαφέροντος σε υποπεριοχές υδάτων ομοίων οπτικών ιδιοτήτων υδάτων.



**Εικόνα 5.4:** (α) Μη διορθωμένη ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος εικόνα και (β) η διορθωμένη ως προς την στήλη ύδατος εικόνα. Π-1, Π-2, Π-3, είναι περιοχές πυθμένα με ίζημα παρόμοιας ανακλαστικότητας

Από την αξιολόγηση και ανάλυση των σχέσεων μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων ( $Deq(Bi)$ ,  $b_b$ ,  $\alpha$ ,  $K_d$ ) προκύπτουν πέντε (5) κλάσεις περιοχών, οι οποίες κατηγοριοποιούνται με βάση τα βιο-οπτικά χαρακτηριστικά των υδάτων τους. Κάθε εικονοστοιχείο κατηγοριοποιείται σε μία και μοναδική κλάση, καθόσον σε κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί ένας συγκεκριμένος συνδυασμός (σχέση) βιο-οπτικών χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης ως αυτή προκύπτει από τις σχέσεις/σύγκριση των τιμών των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων σε συγκεκριμένες περιοχές, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 5.1.

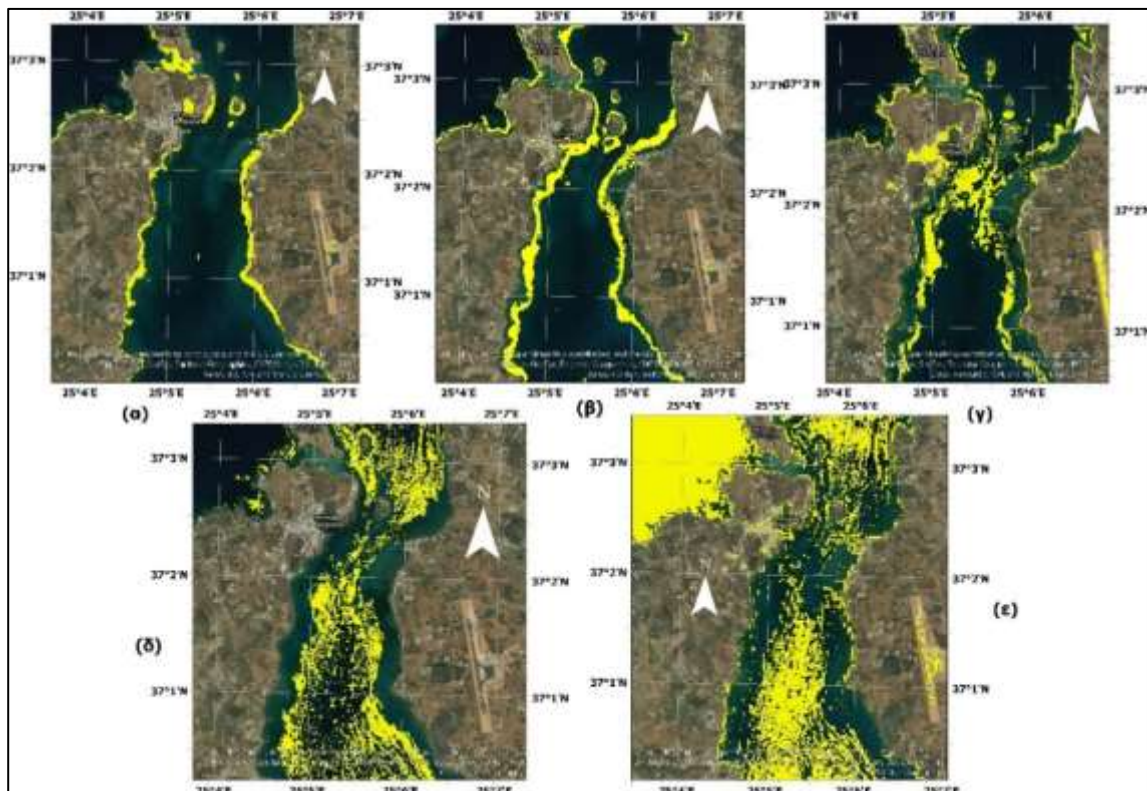
**Πίνακας 5.1 :** Σχέσεις μεταξύ Βιο-οπτικών Παραμέτρων για την περιοχή του Στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου.

| <b>α/α</b> | <b>Κλάση Υδάτος</b>                                   | <b>Βιο-οπτικά Χαρακτηριστικά</b>   |
|------------|---|--|
|            | <b>Αιωρούμενα Σωματίδια<br/>(Suspended Particles)</b> | $Degl(B3) > Degl(B2) > Degl(B1) > Degl(B4)$<br>$b_b(B1) > b_b(B2) > b_b(B3) > b_b(B4)$<br>$\alpha(B1) > \alpha(B4) > \alpha(B2) > \alpha(B3)$<br>$K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B3) > K_d(B4)$ |
|            | <b>Πυκνά λιβάδια<br/>(Dense Meadows)</b>              | $Degl(B3) > Degl(B2) > Degl(B1) > Degl(B4)$<br>$b_b(B1) > b_b(B2) > b_b(B3) > b_b(B4)$<br>$\alpha(B4) > \alpha(B1) > \alpha(B2) > \alpha(B3)$<br>$K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B4) > K_d(B3)$ |
|            | <b>Αραιά λιβάδια<br/>(Sparse Meadows)</b>             | $Degl(B3) > Degl(B1) > Degl(B2) > Degl(B4)$<br>$b_b(1) > b_b(B2) > b_b(B3) > b_b(B4)$<br>$\alpha(B4) > \alpha(B1) > \alpha(B2) > \alpha(B3)$<br>$K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B3) > K_d(B4)$  |
|            | <b>Ρηχά Υδάτα<br/>(shallow Waters)</b>                | $Degl(B1) > Degl(B2) > Degl(B3) > Degl(B4)$<br>$b_b(B1) > b_b(B2) > b_b(B3) > b_b(B4)$<br>$\alpha(B4) > \alpha(B1) > \alpha(B2) > \alpha(B3)$<br>$K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B4) > K_d(B3)$ |
|            | <b>Βαθιά Υδάτα<br/>(Deep Waters)</b>                  | $Degl(B2) > Degl(B1) > Degl(B3) > Degl(B4)$<br>$b_b(1) > b_b(B2) > b_b(B3) > b_b(B4)$<br>$\alpha(B4) > \alpha(B1) > \alpha(B2) > \alpha(B3)$<br>$K_d(B1) > K_d(B4) > K_d(B2) > K_d(B3)$  |

Από μελέτη των σχέσεων των οπτικών παραμέτρων των υδάτων σε κάθε υποπεριοχή-κλάση εξάγονται χρήσιμες εκτιμήσεις και συμπεράσματα αναφορικά με την έκταση της υποθαλάσσιας βλάστησης ή/και τον τύπο αυτής, ή για τον τύπο ιζήματος του πυθμένα, ή την συγκέντρωση σε αιωρούμενα σωματίδια σε κάθε κλάση υδάτων, όπως είναι οι κατηγορίες των περιοχών που αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακας 5.1. Στο επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας του Υβριδικού μοντέλου, διενεργείται διαχωρισμός (διαφορετικά επίπεδα πληροφορίας) των παραπάνω υποπεριοχών (Εικόνα 5.5) με χρήση τεχνικών επικάλυψης (masking).

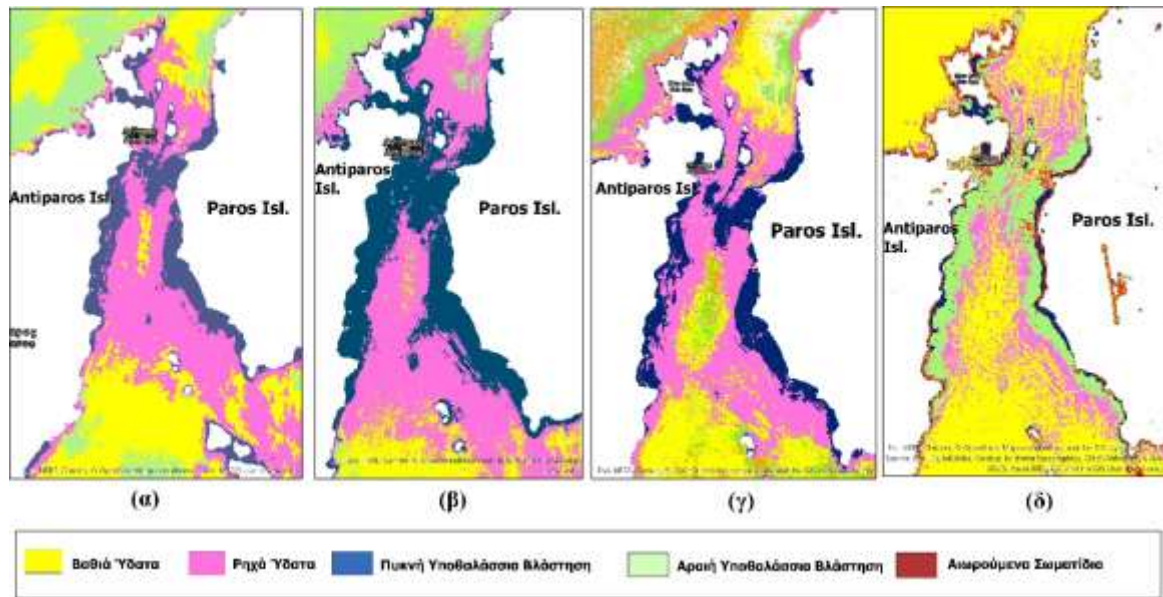
Στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, τα αποτελέσματα της μεθόδου ταξινόμησης όπως προέκυψαν από το Υβριδικό μοντέλο ελέγχθησαν, με τα αποτελέσματα άλλων αλγορίθμων ταξινόμησης. Αναλυτικότερα, πλέον της ταξινόμησης του Υβριδικού μοντέλου βαθυμετρίας διενεργήθηκε και ταξινόμηση σύμφωνα με τους αλγορίθμους μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης ( $\alpha$ ) ISODATA Analysis ( $\beta$ ), EM Cluster Analysis, και ( $\gamma$ ) K-Means Cluster Analysis. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν να είναι αντίστοιχα των αποτελεσμάτων του

Υβριδικού μοντέλου (δ) (Εικόνα 5.6). Δηλαδή, με τους προαναφερόμενους αλγόριθμους, μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, δημιουργούνται τέσσερις (4) κλάσεις περιοχών αντί για 5, με την αραιή και πυκνή υποθαλάσσια βλάστηση του Υβριδικού μοντέλου να απεικονίζεται/ταυτίζεται σε αυτούς σαν μία ενιαία περιοχή. Οι 4 κλάσεις περιοχών απεικονίζονται με αντίστοιχη περίπου κάλυψη στην θαλάσσια περιοχή του στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου με εκείνη που υπολογίζεται από το Υβριδικό μοντέλο.



**Εικόνα 5.5 :** Κλάσεις Υδάτων με βάση τις Σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών Παραμέτρων των Υδάτων (α) Suspended Particles, (β) Dense Meadows, (γ) Sparse Meadows, (δ) Shallow Waters, (ε) Deep Waters.





**Εικόνα 5.6 :** Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση ιζημάτων πυθμένα σύμφωνα με (α) ISODATA Analysis, (β) EM Cluster Analysis, (γ) K-Means Cluster Analysis, (δ) Hybrid Model Analysis.

Ακολούθως, προσδιορίζονται οι λόγοι μεταξύ των αποθραυσμένων φασματικών ζωνών, οι λόγοι των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων, καθώς και οι λόγοι των λογαρίθμων αυτών σε κάθε κλάση.

Σε κάθε υποπεριοχή-κατηγορία υδάτων-κλάση επιλέγονται βάθη από τον αντίστοιχο ναυτικό χάρτη (ΧΕΕ 423/2), τα οποία διακρίνονται σε 2 ομάδες, ήτοι τα βάθη βαθμονόμησης-εκπαίδευσης (training depths) του μοντέλου και τα βάθη αξιολόγησης (validation depths). Στην πρώτη ομάδα (εκπαίδευσης) λαμβάνεται ένας μικρός αριθμός δεδομένων (< 10 βάθη) για την βαθμονόμηση κάθε κλάσης χωριστά, προκειμένου αφενός ελέγχει η αποτελεσματικότητα του Υβριδικού μοντέλου να εξάγει βαθυμετρία με περιορισμένο αριθμό δεδομένων βαθμονόμησης, αφετέρου να υπολογιστεί η εξίσωση στατιστικής παλινδρόμησης, η οποία περιγράφει την καλύτερη δυνατή συσχέτιση μεταξύ των βαθών αναφοράς (training depths) και των λόγων σε κάθε περιοχή ταξινόμησης. Η δεύτερη ομάδα (ομάδα αξιολόγησης) αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό βαθών (20 βάθη/σημεία), τα οποία έχουν επιλεγεί από όλες τις περιοχές ταξινόμησης (κλάσεις) και κυμαίνονται από -0,5 έως -28,0 m βάθος.

Αφού επιλεγούν τα βάθη εκπαίδευσης για κάθε περιοχή ταξινόμησης και τα βάθη αξιολόγησης του συνόλου της περιοχής ενδιαφέροντος, ελέγχεται η στατιστική συμπεριφορά των βαθών εκπαίδευσης με κάθε λόγο ή λόγο λογαρίθμων των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων. Από τον παραπάνω έλεγχο επιλέγεται ο λόγος ή ο λόγος των λογαρίθμων, εκείνων των βιο-οπτικών παραμέτρων που παρουσιάζουν την καλύτερη στατιστική συσχέτιση με τα επιλεχθέντα βάθη εκπαίδευσης ανά κατηγορία/κλάση υδάτων. Η καλύτερη στατιστική συσχέτιση αντιπροσωπεύεται από τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ -Coefficient of Determination) ως αυτός προκύπτει από την στατιστική συσχέτιση μεταξύ των βαθών εκπαίδευσης σε κάθε κλάση και του αντίστοιχου λόγου των βιο-οπτικών παραμέτρων (Πίνακας 5.2).

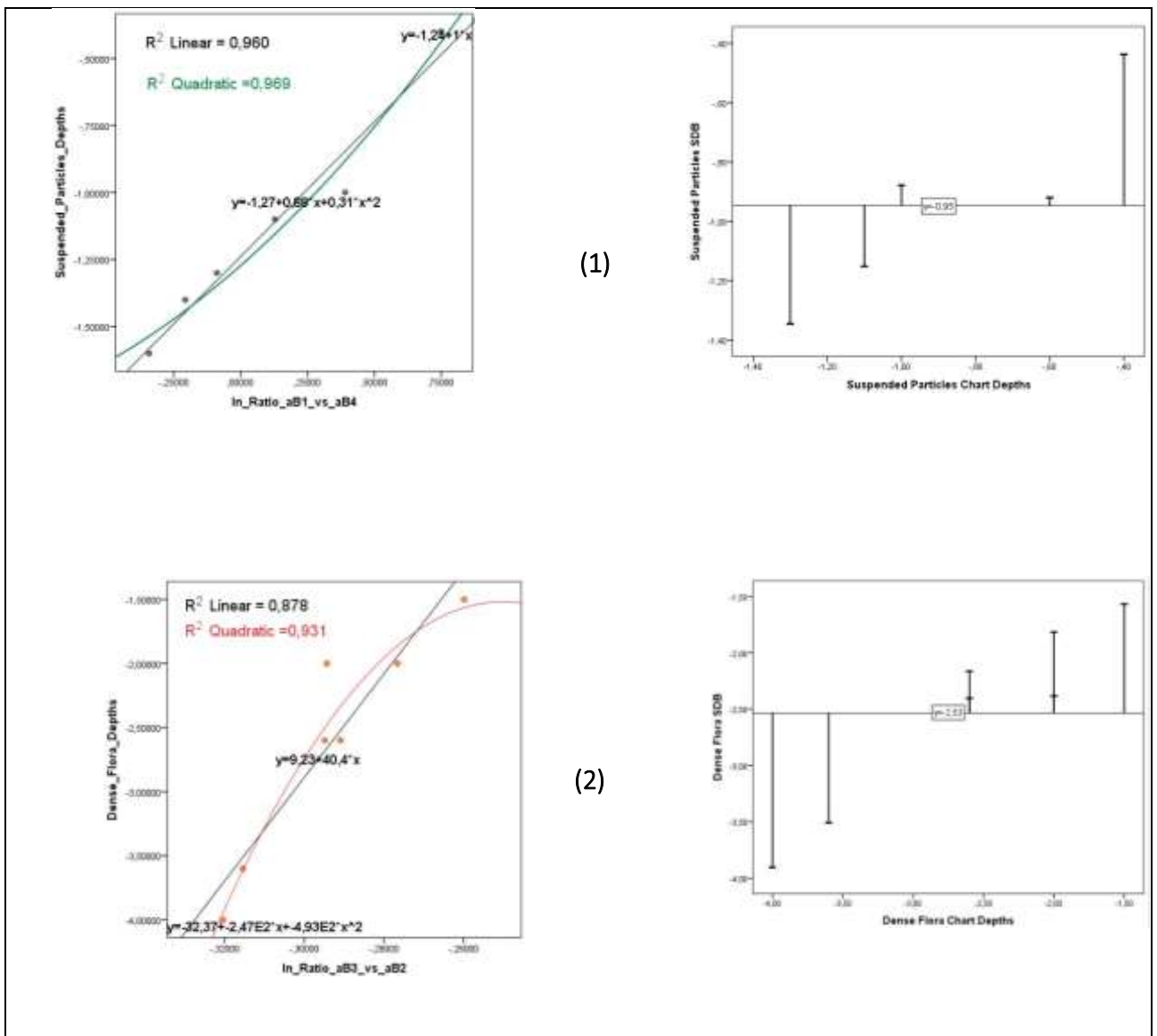
**Πίνακας 5.2 :** Λόγοι με την καλύτερη Στατιστική Συσχέτιση ανά κλάση Υδάτων για την περιοχή του Στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου.

| α/α | Κλάση Υδατος                               | Λογαριθμικός Λόγος                              | Γραμμικός Συντελεστής Συσχέτισης ( $R^2$ ) | Τετραγωνικός Συντελεστής Συσχέτισης ( $R^2$ ) |
|-----|--|---|--|---|
| 1.  | Αιωρούμενα Σωματίδια (Suspended Particles) | $\ln\left(\frac{\alpha(B1)}{\alpha(B4)}\right)$ | 0,960                                      | 0,969   |
| 2.  | Πυκνά Λιβάδια Φυκιών (Dense Flora)         | $\ln\left(\frac{\alpha(B3)}{\alpha(B2)}\right)$ | 0,878                                      | 0,931   |
| 3.  | Αραιά Λιβάδια Φυκιών (Sparse Flora)        | $\ln\left(\frac{\alpha(B3)}{\alpha(B4)}\right)$ | 0,903                                      | 0,908   |
| 4.  | Ρηχά Υδατα (Offshore Shallow waters)       | $\ln\left(\frac{Degl(B2)}{Degl(B3)}\right)$     | 0,880                                      | 0,935   |
| 5.  | Βαθιά Υδατα (Offshore Deep waters )        | $\ln\left(\frac{Degl(B1)}{Degl(B2)}\right)$     | 0,909                                      | 0,973   |

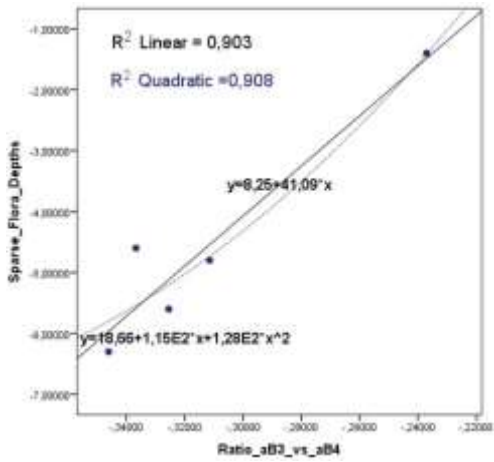
Η εξίσωση της βέλτιστης γραμμικής συσχέτισης (Εικόνα 5.7, αριστερά) μεταξύ των βαθών εκπαίδευσης και του αντίστοιχου λογαριθμικού λόγου (Πίνακας 5.2) εφαρμόζεται σε κάθε κλάση (1) έως (5), σύμφωνα με την αντίστοιχη αρίθμηση τους στον Πίνακας 5.2, θέτοντας στην αντίστοιχη εξίσωση, ως ανεξάρτητη μεταβλητή ( $x$ ) τον λόγο (συνδυασμό φασματικών ζωνών ή βιο-οπτικών παραμέτρων) που παρουσιάζει την καλύτερη στατιστική

συσχέτιση με τα βάθη εκπαίδευσης ( $R^2$ ), (Πίνακας 5.2), και εξαρτημένη μεταβλητή ( $y$ ) την υπολογισθείσα δορυφορική βαθυμετρία. Τα αποτελέσματα της εξαγόμενης βαθυμετρίας ανά κλάση ελέγχονται στις θέσεις των βαθών εκπαίδευσης (training dataset) και δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα σφαλμάτων (residuals) (Εικόνα 5.7, Δεξιά).

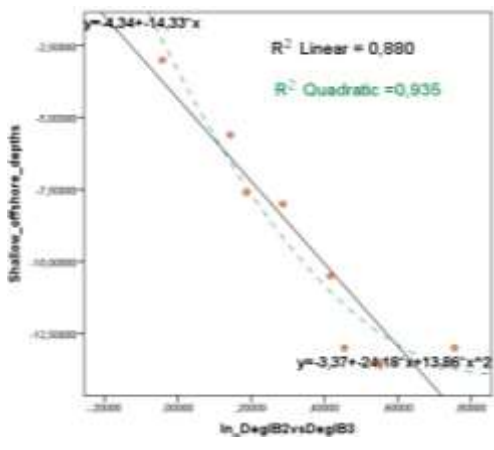
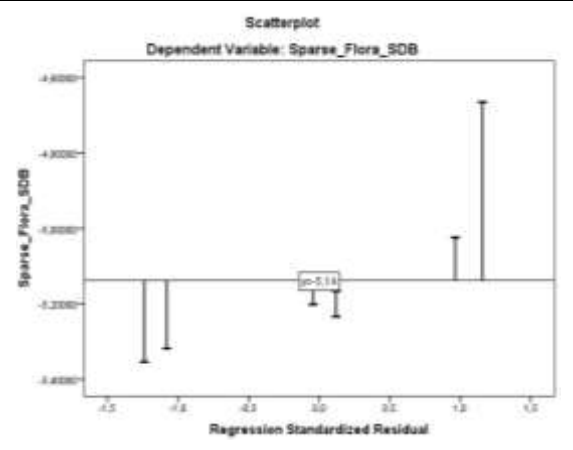
Το αποτέλεσμα της προαναφερθείσας τεχνικής εξάγει/υπολογίζει την βαθυμετρία, η οποία δημιουργείται με χρήση του βέλτιστου λόγου/συνδυασμού βιο-οπτικών παραμέτρων ανά κλάση υδάτων για ολόκληρη την περιοχή μελέτης.



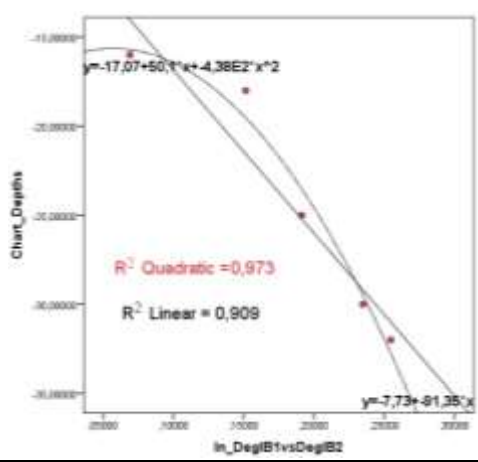
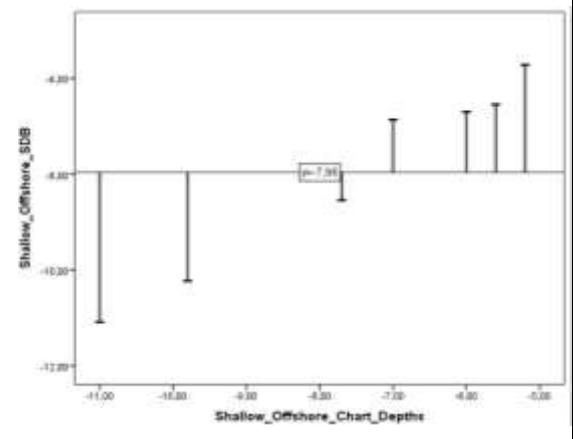




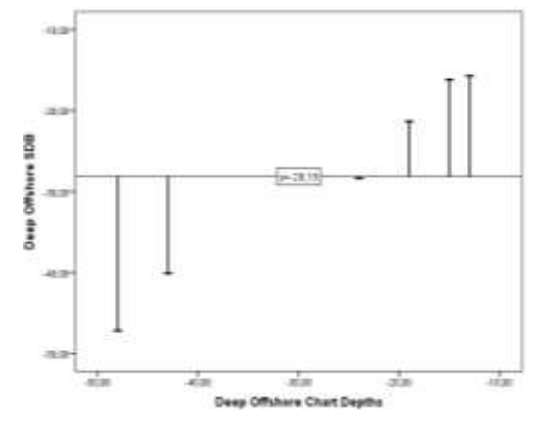
(3)



(4)

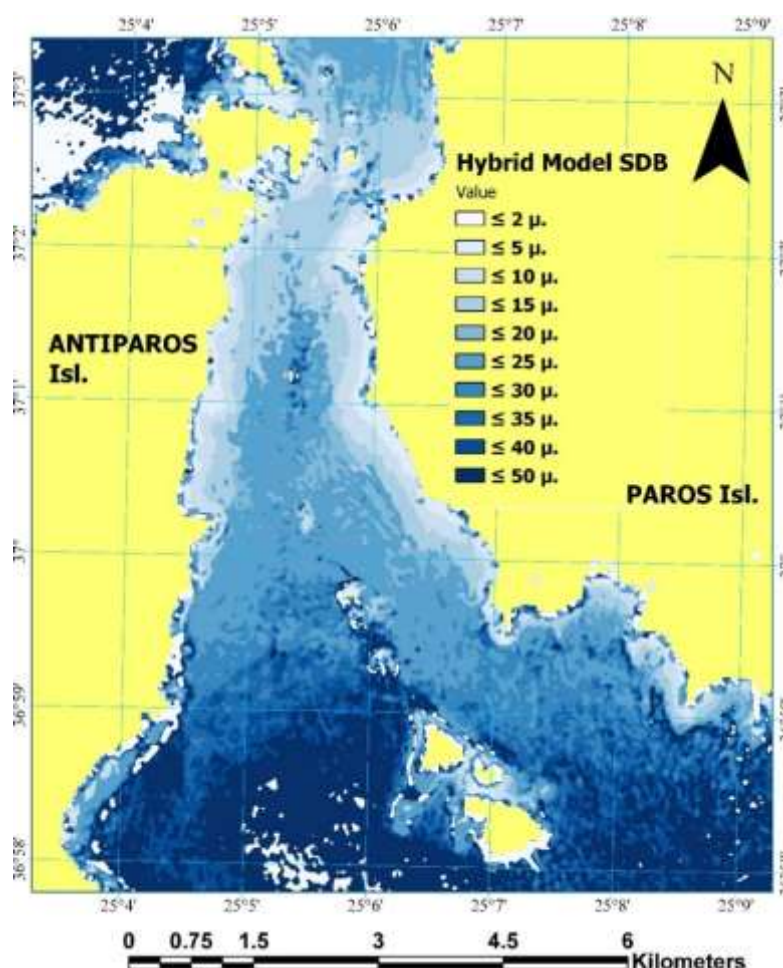


(5)



**Εικόνα 5.7 :** Στατιστική Συσχέτιση μεταξύ βαθών εκπαίδευσης/βαθμονόμησης και του λόγου αναφοράς σε κάθε κλάση (αριστερά). Διαφορές (residuals) μεταξύ βαθών εκπαίδευσης/βαθμονόμησης και εξαγομένων βαθών (modelled depths) με χρήση της αντίστοιχης εξίσωση συσχέτισης ανά κλάση υδάτων (δεξιά).

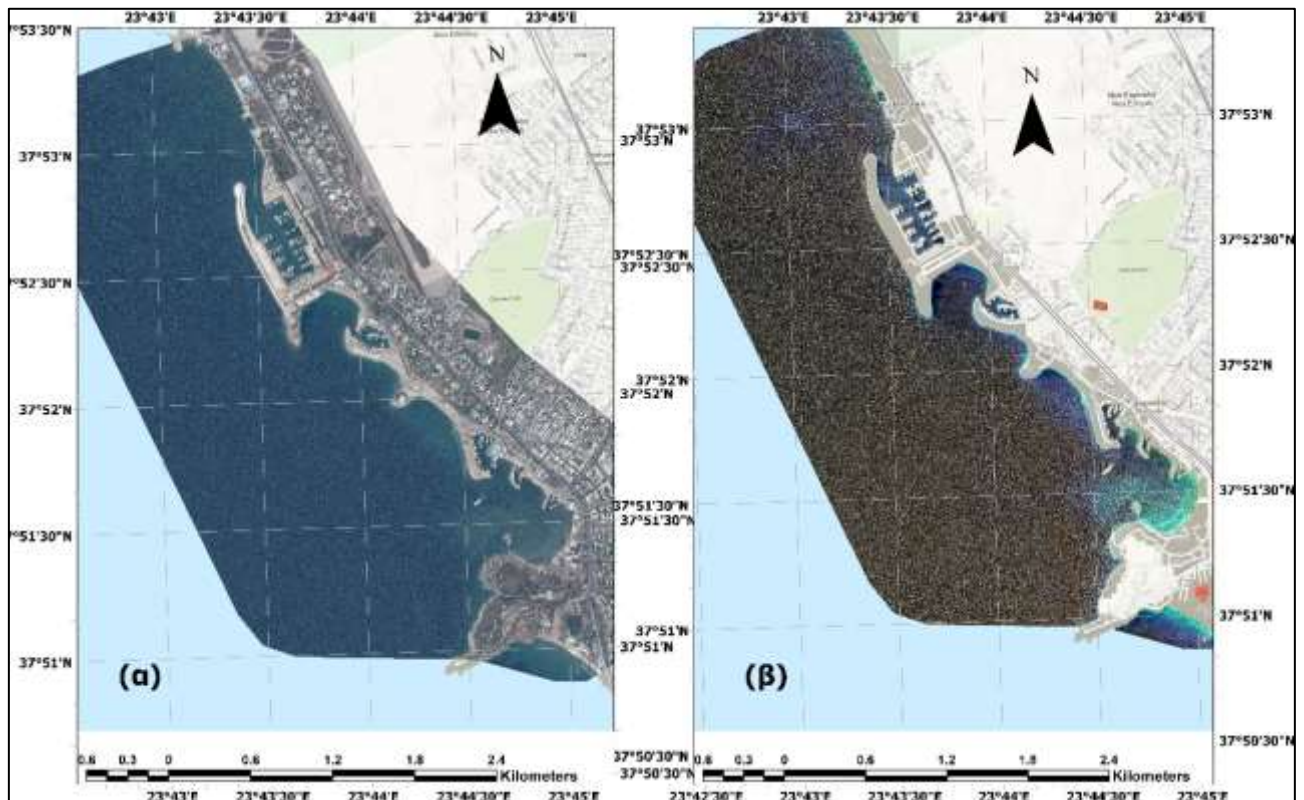
Με χρήση τεχνικών επικάλυψης (masking) περιορίζουμε την εξαχθείσα βαθυμετρία από κάθε κλάση, αποκλειστικά στις αντίστοιχες περιοχές κάθε κλάσης υδάτων. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η εξαγόμενη δορυφορική βαθυμετρία για κάθε περίπτωση (κατηγορία) υδάτων. Αθροίζοντας τις επιμέρους βαθυμετρίες, από κάθε κλάση υδάτων, προκύπτει το τελικό μοντέλο βαθυμετρίας για ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος/μελέτης (Εικόνα 5.8), το οποίο παρουσιάζει ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) =1,55 m, συγκρινόμενο με τα δεδομένα αξιολόγησης (validation dataset) του χάρτη.



**Εικόνα 5.8 :** Αποτέλεσμα Εξαγόμενης Δορυφορικής Βαθυμετρίας από το Υβριδικό Μοντέλο στο Στενό Πάρου-Αντιπάρου (Χρόνος λήψης Εικόνας 12.07.2017, ώρα 09:00:21.026 Z).

### 5.1.1.2 Εξαγωγή Βαθυμετρίας στην Περιοχή Μαρίνας Αγ. Κοσμά, Σαρωνικού Κόλπου (Case Study 2)

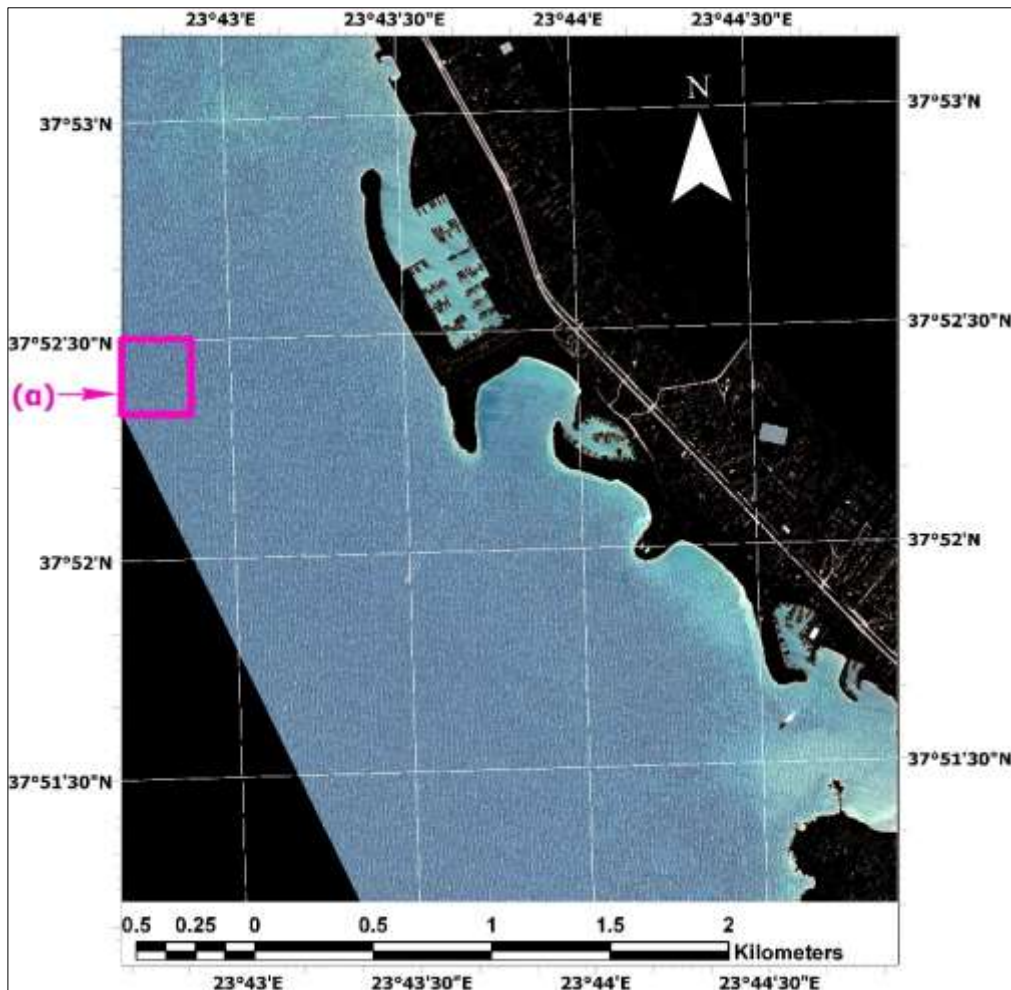
Η προαναφερόμενη διαδικασία επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας εφαρμόστηκε/δοκιμάστηκε, με ορισμένες διαφοροποιήσεις, και στα δορυφορικά δεδομένα Pleiades από την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της μαρίνας του Αγίου Κοσμά, Δήμου Ελληνικού Αττικής. Επειδή η δορυφορική εικόνα του συστήματος Pleiades, που χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω περιοχή, δεν ήταν διορθωμένη ως προς την επίδραση/θόρυβο της ατμόσφαιρας διενεργήθηκε η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διόρθωση (Εικόνα 5.9). Στην συγκεκριμένη περίπτωση υιοθετήθηκε η τεχνική διόρθωσης της ατμόσφαιρας (path radiance) με χρήση του «πιο σκοτεινού εικονοστοιχείου» της χρησιμοποιηθείσας εικόνας (Dark Object Correction). Σύμφωνα με την υπόψη τεχνική, αξιοποιούνται εικονοστοιχεία που υπάρχουν στην υπό ανάλυση εικόνα, και τα οποία είναι εντελώς «σκοτεινά». Δηλαδή από αυτά δεν αναμένεται ο δορυφόρος να καταγράψει κάποια ακτινοβολία (zero reflectance).



Εικόνα 5.9 : (α) Μη ατμοσφαιρικά διορθωμένη εικόνα και (β) Ατμοσφαιρικά διορθωμένη εικόνα Pleiades.

Στην μη διορθωμένη ατμοσφαιρικά εικόνα παρατηρείται το φαινόμενο τα πιο σκοτεινά pixels αντί να έχουν μηδενικές τιμές ακτινοβολίας/ανακλαστικότητα, να εμφανίζουν κάποιες τιμές ακτινοβολίας, μικρές μεν αλλά διάφορες του μηδενός. Οι τιμές ακτινοβολίας που παρουσιάζονται στα «πιο σκοτεινά» εικονοστοιχεία της εικόνας προκαλούνται από την σκέδαση της ακτινοβολίας κατά την διάδοσή της στην ατμόσφαιρα (path radiance). Η τεχνική «Dark Object Correction» αφαιρεί τον θόρυβο που προκαλείται λόγω της σκέδασης (ανάκλασης) μέρους της κατερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τους υδρατμούς (water vapour), αερολύματα (aerosol), μόρια αερίων ατμόσφαιρας (gas molecules), και άλλων μικρών σωματιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα (small particles). Το φαινόμενο της σκέδασης επηρεάζει περισσότερο τα μικρά μήκη κύματος της ακτινοβολίας (short wavelengths) όπως για παράδειγμα αυτά του οπτικού φάσματος της εικόνας Pleiades της εν λόγω περιοχής μελέτης.

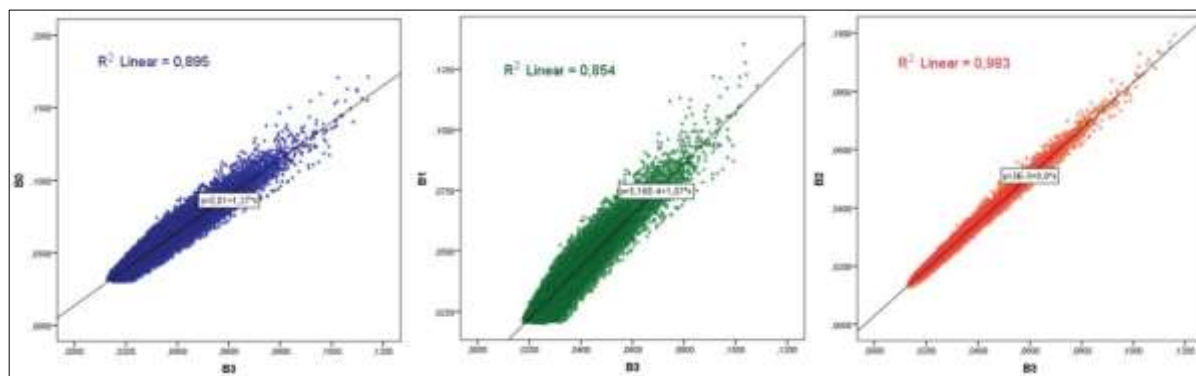
Στην συνέχεια, εφαρμόστηκε η τεχνική αποθάμβωσης (sunglint correction) στις φασματικές ζώνες B0/blue (430-550 nm), B1/green (500-620 nm), B2/red (590-710 nm) και B3/NIR (740-940 nm) της εικόνας Pleiades, σύμφωνα με την τεχνική των Hedley, *et al.*, (2005) και Kay, *et al.*, (2009) (εξισ. 5.1). Η εν λόγω τεχνική εφαρμόστηκε λαμβάνοντας υπόψη την φασματική απόκριση μίας περιοχής βαθέων υδάτων, και συγκεκριμένα επιλέχθηκε η (ιώδης) περιοχή υπό στοιχεία (α) όπως αυτή απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10 : Διορθωμένη ως προς την θάμβωση εικόνα.

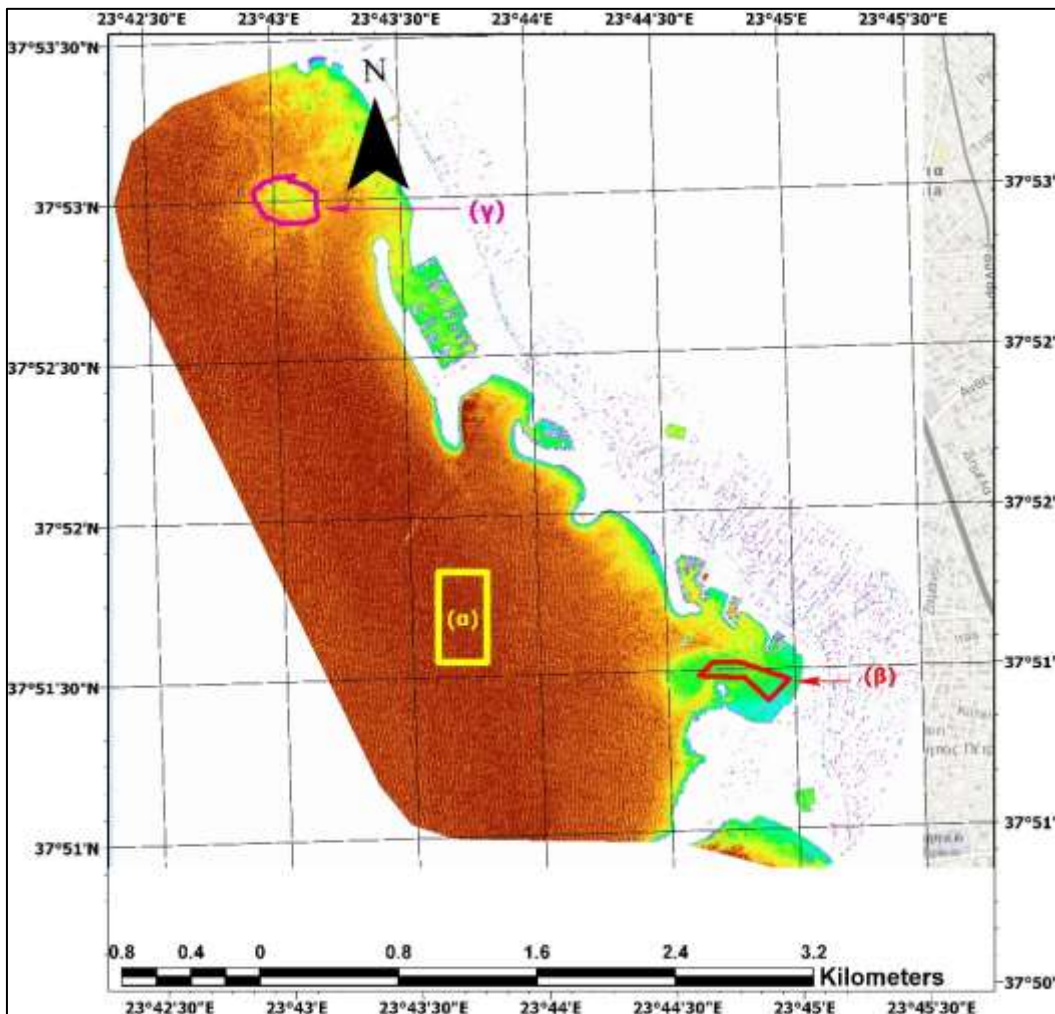
Με την επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής βαθέων υδάτων εξασφαλίζεται η παραδοχή που απαιτεί το καταγραμμένο από το δορυφόρο σήμα που εξέρχεται από τα ύδατα, να μην περιλαμβάνει ακτινοβολία που να προέρχεται από το ίζημα του θαλάσσιου πυθμένα. Προκειμένου δύναται να επιλυθεί η εξισ. 5.1 δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (scatterplots) μεταξύ των φασματικών ζωνών του οπτικού φάσματος (B0, B1, B2, *y-axis*) της εικόνας των Pleiades και της φασματικής ζώνης του κοντινού υπέρυθρου (B3, *x-axis*) (Εικόνα 5.11).





**Εικόνα 5.11 :** Διαγράμματα Διασποράς που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αποθάμβωσης της Εικόνας Pleiades.

Ακολούθως, εφαρμόζεται η διόρθωση για την επίδραση των μορίων του νερού στην εισερχόμενη ακτινοβολία στο θαλάσσιο ύδωρ (water column correction) σύμφωνα με την τεχνική Lyzenga (Lyzenga, 1981). Η εν λόγω διόρθωση (*Depth-Invariant Index*) εφαρμόζεται σε περιοχές ιζήματος θαλάσσιου πυθμένα παρόμοιας ανακλαστικότητας, οι οποίες (περιοχές) όμως παρουσιάζουν μεταβολές στα βάθη. Οι περιοχές αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 5.12 υπό στοιχεία (α), (β) και (γ). Στις εν λόγω περιοχές υπολογίζεται ο μέσος όρος του συντελεστή εξασθένησης λόγω διάχυσης ( $K_d(B_i)$ ) μεταξύ ζευγών των φασματικών ζωνών. Για τον υπολογισμό των συντελεστών εξασθένησης λόγω διάχυσης ( $K_d(B_i)$ ) χρησιμοποιήθηκαν τα ζεύγη των λογαρίθμων των φασματικών ζωνών B0/B1, B0/B2 και B1/B2. Οι λόγοι των αντίστοιχων ζευγών των συντελεστών εξασθένησης υπολογίζονται μέσω των εξισ. 5.2 και εξισ. 5.3, ενώ η διόρθωση της εικόνας ως προς την στήλη ύδατος γίνεται μέσω της εξισ. 5.4. Το αποτέλεσμα της διορθωμένης εικόνας Pleiades (Standard Ortho product) ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος παρουσιάζεται στο σύνθετο της Εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12 : Διορθωμένη Εικόνα Pleiades ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος (Water column correction).

Ακολούθως, υπολογίζονται οι βιο-οπτικές παράμετροι ( $r_{rs}$ ,  $u$ ,  $Y$ ,  $b_{bp}$ ,  $b_b$ ,  $\alpha$ ,  $K_d$ ) των υπόψη υδάτων σύμφωνα με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των Lee, *et al.*, (1998a), όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2 παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με την μεθοδολογία του Υβριδικού μοντέλου, που επινοήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των προαναφερομένων παραμέτρων προσδιορίζονται οι σχέσεις, οι οποίες κατηγοριοποιούν (ταξινομούν) την περιοχή ενδιαφέροντος σε υποπεριοχές υδάτων ομοίων οπτικών χαρακτηριστικών.

Οι σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων, οι οποίες καθορίζουν τις διάφορες κλάσεις υδάτων στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της μαρίνας του Αγ. Κοσμά

παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 5.3. Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι λόγοι μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων και των αποθραμβωμένων ( $Degl(B_i)$ ) φασματικών ζωνών, καθώς και οι λόγοι των λογαρίθμων αυτών σε κάθε κλάση υδάτων.

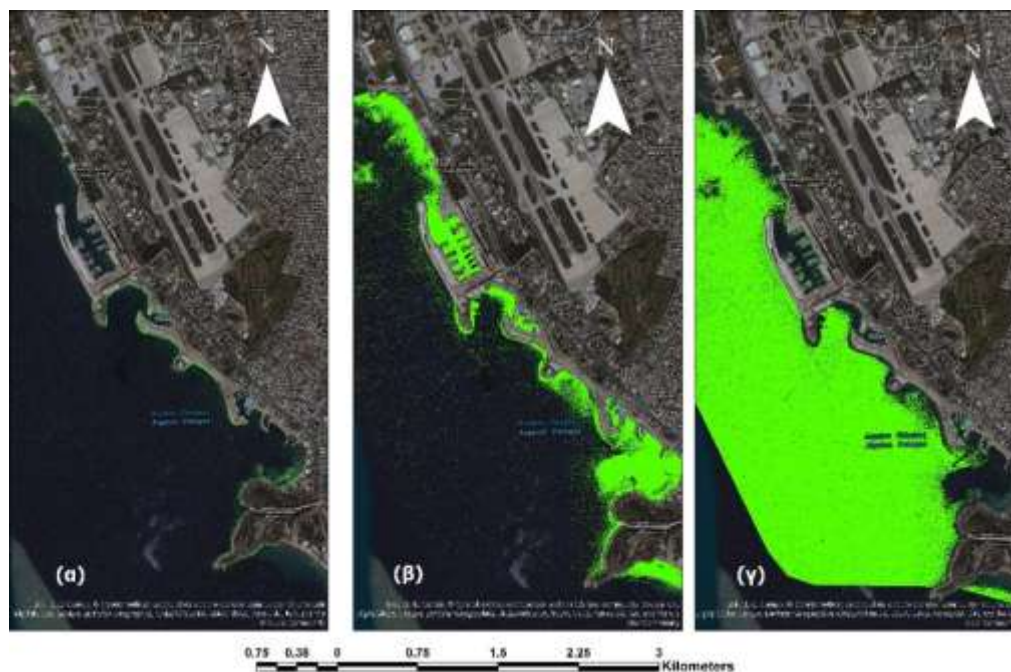
**Πίνακας 5.3 :** Σχέσεις μεταξύ Βιο-οπτικών Παραμέτρων για την περιοχή του Μαρίνας του Αγ. Κοσμά.

| <b>α/α</b> | <b>Κλάση Ύδατος</b>    | <b>Βιο-οπτικά Χαρακτηριστικά</b>  |
|------------|------------------------|---|
| 1.         | <b>ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ</b>  | $Degl(B0) > Degl(B1) > Degl(B2)$<br>$K_d(B0) > K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B3)$<br>$\alpha(B3) > \alpha(B2) > \alpha(B0) > \alpha(B1)$<br>$b_b(B0) > b_b(B1) > b_b(B2) > b_b(B3)$ |
| 2.         | <b>ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΥΔΑΤΑ</b> | $Degl(B0) > Degl(B1) > Degl(B2)$<br>$K_d(B0) > K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B3)$<br>$\alpha(B3) > \alpha(B2) > \alpha(B1) > \alpha(B0)$<br>$b_b(B0) > b_b(B1) > b_b(B2) > b_b(B3)$ |
| 3.         | <b>ΒΑΘΙΑ ΥΔΑΤΑ</b>     | $Degl(B0) > Degl(B1) > Degl(B2)$<br>$K_d(B0) > K_d(B1) > K_d(B2) > K_d(B3)$<br>$\alpha(B2) > \alpha(B3) > \alpha(B1) > \alpha(B0)$<br>$b_b(B0) > b_b(B1) > b_b(B2) > b_b(B3)$ |

Από την συσχέτιση των βιο-οπτικών παραμέτρων στην εν λόγω περιοχή ενδιαφέροντος προκύπτουν μόνο τρεις (3) κλάσεις περιοχών υδάτων. Οι 3 κλάσεις των υδάτων που δημιουργούνται στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της μαρίνας Αγ. Κοσμά, σύμφωνα με το Υβριδικό μοντέλο και με βάση τις σχέσεις του Πίνακας 5.3 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.13.

Στην προκειμένη περίπτωση επιβεβαιώνεται η φυσική της θεωρίας διάδοσης της ακτινοβολίας (Θ.Δ.Α.) στα ύδατα, καθόσον από τις σχέσεις του Πίνακας 5.3, διαπιστώνεται ότι στα «Παράκτια Ύδατα» παρατηρείται μικρότερη απορρόφηση της ακτινοβολίας του πράσινου (green) μήκους κύματος, γεγονός που δηλώνει την παρουσία υποθαλάσσιας χλωρίδας στην εν λόγω περιοχή, ενώ στα «Ενδιάμεσα Ύδατα» διαπιστώνεται μικρότερη απορρόφηση της ακτινοβολίας του μπλε (blue), άρα μεγαλύτερη διεισδυτικότητα της υπόψη ακτινοβολίας. Τέλος, στα «Βαθιά» και «καθαρότερα» ύδατα, η μπλε (blue) ακτινοβολία παρουσιάζει την μεγαλύτερη διείσδυση, ήτοι την μικρότερη απορροφητικότητα.





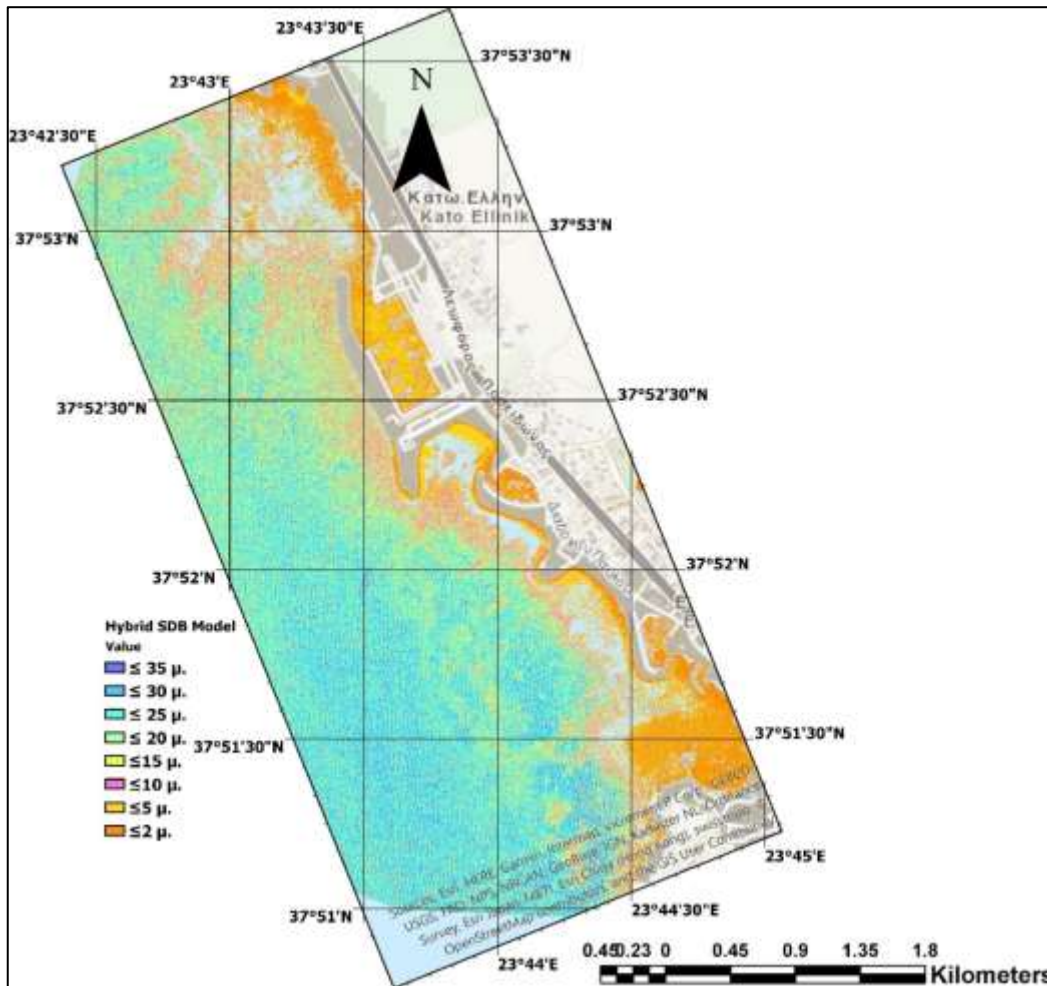
**Εικόνα 5.13 :** Κλάσεις Υδάτων (α) Παράκτια Ύδατα, (β) Ενδιάμεσα Ύδατα, (γ) Περιοχή Βαθέων Υδάτων.

Εν συνεχεία, ελέγχεται ποιος είναι ο λόγος/συνδυασμός βιο-οπτικών παραμέτρων που παρουσιάζει την καλύτερη δυνατή συσχέτιση σε κάθε περιοχή (κλάση) ταξινόμησης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι συνδυασμοί/λόγοι των φασματικών ζωνών που παρουσιάζουν την βέλτιστη συσχέτιση ( $R^2$ ) ανά περίπτωση υδάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4 :** Λόγοι που παρουσιάζουν την καλύτερη Στατιστική Συσχέτιση ανά κλάση Υδάτων για την περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά.

| α/α | Κλάση Υδατος    | Λογαριθμικός Λόγος                  | Γραμμικός Συντελεστής Συσχέτισης ( $R^2$ ) |
|-----|-----------------|-------------------------------------|--|
| 1.  | ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ  | $\ln \frac{\alpha(B0)}{\alpha(B2)}$ | 0,85                                       |
| 2.  | ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΥΔΑΤΑ | $\ln \frac{Degl(B1)}{Degl(B2)}$     | 0,95                                       |
| 3.  | ΒΑΘΙΑ ΥΔΑΤΑ     | $\ln \frac{K_d(B1)}{K_d(B2)}$       | 0,86                                       |

Για τον υπολογισμό της δορυφορικής βαθυμετρίας επιλέγονται 29 βάθη από τον έντυπο ναυτικό χάρτη που καλύπτει την περιοχή ενδιαφέροντος (ΧΕΕ 412/7) για την βαθμονόμηση του Υβριδικού μοντέλου. Τα εν λόγω βάθη αποτελούν την ομάδα εκπαίδευσης (training dataset) του Υβριδικού μοντέλου και κατανέμονται ισάριθμα και από τις 3 περιοχές κλάσεων. Ο εν λόγω ΧΕΕ έχει σαρωθεί ψηφιακά και έχει εφαρμοστεί σε αυτόν μετασχηματισμός για την γεωαναφορά του στο ίδιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς με αυτό που είναι και η εικόνα Pleiades. Από την στατιστική ανάλυση (regression analysis) μεταξύ των καλύτερων λόγων ( $x$ -axis) σε κάθε κλάση και των βαθών εκπαίδευσης ανά περιοχή ( $y$ -axis), προκύπτουν οι εξισώσεις συσχέτισης σε κάθε κλάση υδάτων. Οι εν λόγω εξισώσεις καλύτερης στατιστικής συσχέτισης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας σε κάθε κατηγορία/κλάση υδάτων (Παράκτια, Ενδιάμεσα & Βαθιά Ύδατα). Αφού υπολογιστούν οι επιμέρους βαθυμετρίες σε κάθε κλάση υδάτων, αθροίζονται αυτές ώστε να προκύψει το συνολικό/τελικό βαθυμετρικό μοντέλο της περιοχής μελέτης (Εικόνα 5.14), το οποίο παρουσιάζει ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 1,85 m συγκρινόμενο με τα δεδομένα βαθών πεδίου όπως αυτά αναγράφονται στο ναυτικό χάρτη (ΧΕΕ 412/7).



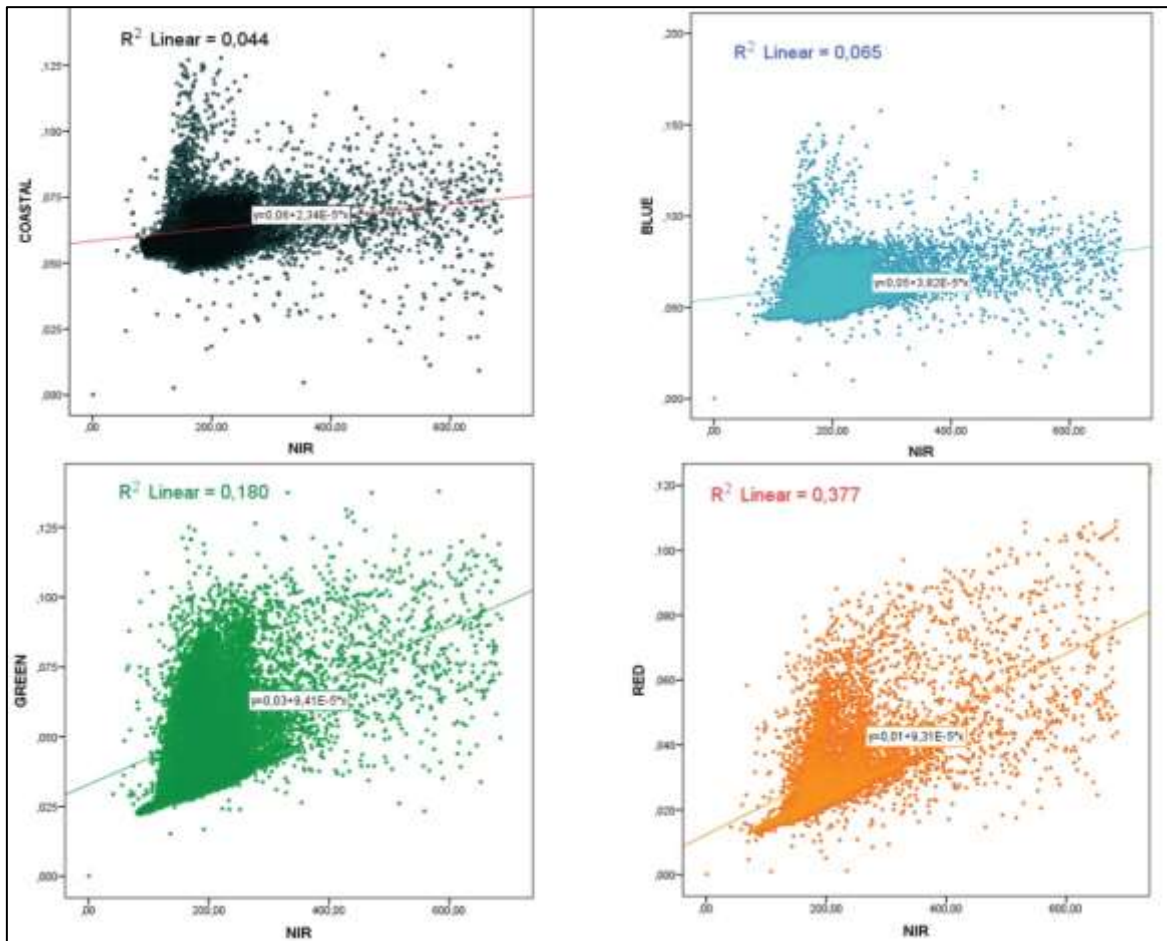
**Εικόνα 5.14 :** Αποτελέσματα Δορυφορικής Βαθυμετρίας από το Υβριδικό μοντέλο στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά (Χρόνος λήψης Εικόνας 17.07.2016, ώρα 09:19:44.906 Z).

### 5.1.1.3 Εξαγωγή Βαθυμετρίας στην Περιοχή Κόλπου Λαγανά Ν. Ζακύνθου (Case Study 3)

Η εικόνα του δορυφόρου Landsat 8 (OLI) περιλαμβάνει την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της ν. Ζακύνθου και λήφθηκε από τον αντίστοιχο πάροχο (USGS/NASA) ως διορθωμένο ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά προϊόν (surface reflectance). Στην συγκεκριμένη εικόνα εφαρμόστηκε τεχνική περιορισμού/περικοπής (subset), ώστε να περιλαμβάνεται σε αυτήν αποκλειστικά η περιοχή μελέτης (Κόλπος Λαγανά) για ταχύτερη διαχείριση και επεξεργασία των αντίστοιχων δορυφορικών γεωχωρικών δεδομένων. Επίσης, στο στάδιο της προεπεξεργασίας πραγματοποιήθηκε αναδειγματοληψία (resampling) της εικόνας, ώστε η διάσταση των εικονοστοιχείων της εικόνας για όλες τις φασματικές ζώνες

από διάσταση 30 × 30 m να μεταπέσει σε διάσταση εικονοστοιχείου 10 × 10 m. Επιπλέον, έγινε αναίρεση (rescaling) της εικόνας, έτσι ώστε οι τιμές της ανακλαστικότητας επιφανείας (surface reflectance) να κυμαίνονται στο διάστημα [0,1]. Ακολούθως, με αξιοποίηση της φασματικής ζώνης του εγγύς υπέρυθρου (NIR band) εφαρμόστηκε επικάλυψη (masking) στα εικονοστοιχεία της ξηράς προκειμένου να αναιρεθεί ο θόρυβος λόγω του φαινομένου γειτνίασης, στα εικονοστοιχεία των υδάτων, από τα υψηλής ανακλαστικότητας pixels της ακτογραμμής.

Κατά το στάδιο της επεξεργασίας της εν λόγω εικόνας εφαρμόστηκε η διαδικασία αποθάμβωσης (sunglint correction), αντίστοιχα με την διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στις δύο προηγούμενες περιοχές μελέτης. Και σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκε μία υποπεριοχή σε βαθιά ύδατα (>50 m), από την οποία δεν αναμενόταν να περιλαμβάνεται σήμα από τον θαλάσσιο πυθμένα. Η περιοχή βαθέων υδάτων που επιλέχθηκε στην προκειμένη περίπτωση για την εφαρμογή της διαδικασίας αποθάμβωσης απεικονίζεται υπό στοιχείο (α) με ιώδες τετράπλευρο στην Εικόνα 5.16. Συνήθως, η διόρθωση αποθάμβωσης της εικόνας (sunglint correction) υλοποιείται πριν την διόρθωση λόγω της επίδρασης της στήλης ύδατος (water column correction). Έτσι έγινε και στην περίπτωση της εικόνας του Landsat 8 (OLI), στην οποία υπολογίστηκαν τα διαγράμματα διασποράς (scatterplots) μεταξύ των ανακλαστικότητων (Surface Reflectances) των φασματικών ζωνών Coastal/NIR, Blue/NIR, Green/NIR, Red/NIR (Εικόνα 5.15). Από τις εξισώσεις της γραμμικής συσχέτισης των προαναφερομένων ζευγών φασματικών ζωνών, προσδιορίστηκαν οι κλίσεις (slopes) των ευθειών συσχέτισης και η ελάχιστη τιμή της NIR φασματικής ζώνης. Η διόρθωση έγινε με βάση την τεχνική των Hedley *et al.*, (2005) και Kay *et al.*, (2009), χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.1 του παρόντος Κεφαλαίου.

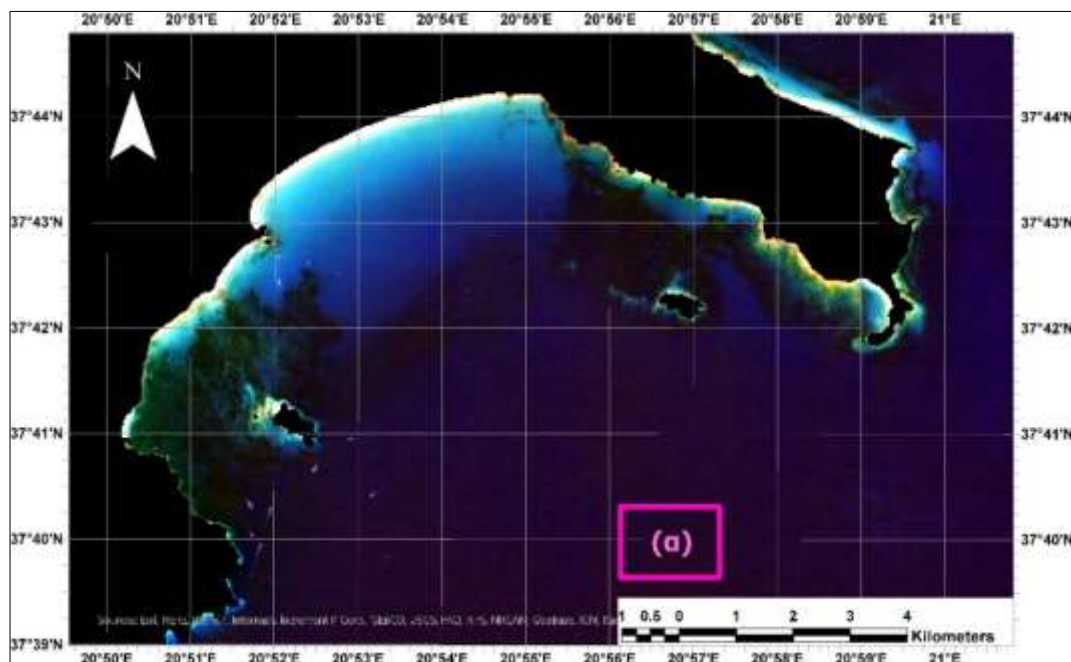


**Εικόνα 5.15 :** Διαγράμματα Διασποράς που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αποθάμβωσης της Εικόνας Landsat 8.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας αποθάμβωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.16. Στην συνέχεια, έγινε διόρθωση των εικονοστοιχείων των υδάτων της εικόνας για την επίδραση της στήλης ύδατος (water column correction), με βάση την τεχνική Lyzenga (Lyzenga, 1981). Η εν λόγω διόρθωση (*Depth-Invariant Index*) εφαρμόστηκε υιοθετώντας τιμές αναφοράς από περιοχές ιζήματος θαλάσσιου πυθμένα παρόμοιας ανακλαστικότητας, οι οποίες (περιοχές) περιλαμβάνουν βάθη διαφόρων τιμών, ως αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 5.17, υπό στοιχεία (α), (β), (γ). Στις εν λόγω περιοχές υπολογίστηκε ο μέσος όρος του συντελεστή εξασθένησης λόγω διάχυσης ( $K_d(B_i)$ ) μεταξύ των ζευγών των φασματικών ζωνών. Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι λόγοι μεταξύ των λογαρίθμων των αποθαμβωμένων φασματικών ζωνών Blue/Green, Blue/Red, Green/Red. Οι λόγοι των συντελεστών εξασθένησης λόγω διάχυσης των αντίστοιχων ζευγών υπολογίζονται μέσω των

εξισ. 5.2 και εξισ. 5.3, ενώ η διορθωμένη ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος εικόνας γίνεται με χρήση του συντελεστή DII (*Depth-Invariant Index*) της εξισ. 5.4.

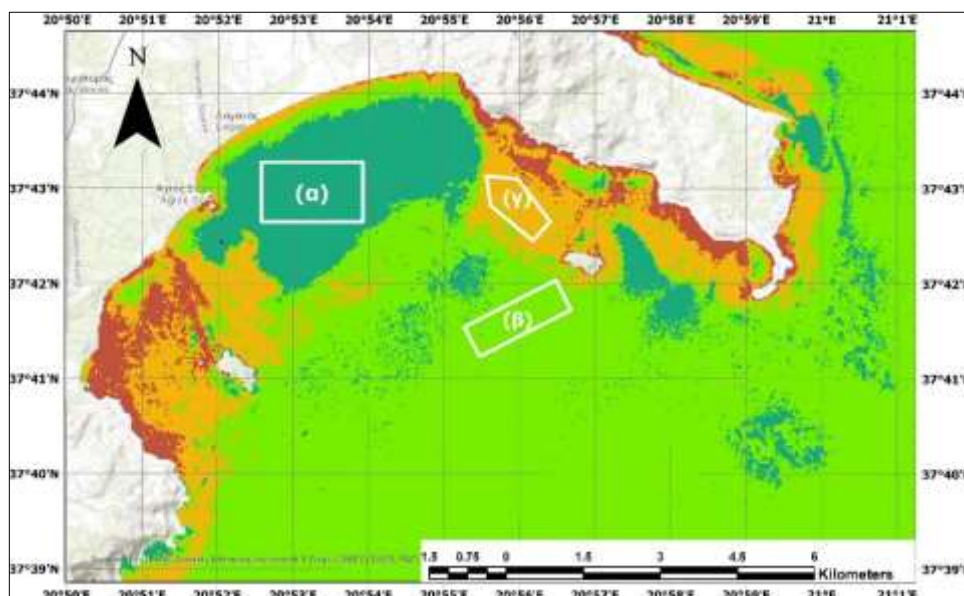
Το αποτέλεσμα της διορθωμένης εικόνας Landsat 8 (Surface Reflectance product) ως προς την επίδραση της στήλης ύδατος παρουσιάζεται στο σύνθετο της Εικόνα 5.17.



**Εικόνα 5.16 :** Αποθαμβωμένη Εικόνα Landsat 8 περιοχής κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.



Εν συνεχεία, υπολογίστηκαν οι βιο-οπτικοί παράμετροι ( $r_{rs}$ ,  $u$ ,  $Y$ ,  $b_{bp}$ ,  $b_b$ ,  $\alpha$ ,  $K_d$ ) των υδάτων της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης, σύμφωνα με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των Lee, *et al.*, (1998a), όπως αναλύθηκε στην ενότητα 6.1. παρούσας εργασίας. Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών των βιο-οπτικών παραμέτρων προσδιορίστηκαν οι σχέσεις, οι οποίες διαφοροποιούν (ταξινομούν) την περιοχή ενδιαφέροντος σε υποπεριοχές υδάτων ομοίων οπτικών χαρακτηριστικών. Οι σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων καθορίζουν τις ταξινομημένες κλάσεις υδάτων στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή του κόλπου Λαγανά Ζακύνθου, ως αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.5.



Εικόνα 5.17 : Διορθωμένη ως προς την στήλη ύδατος Εικόνα Landsat 8 περιοχής κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

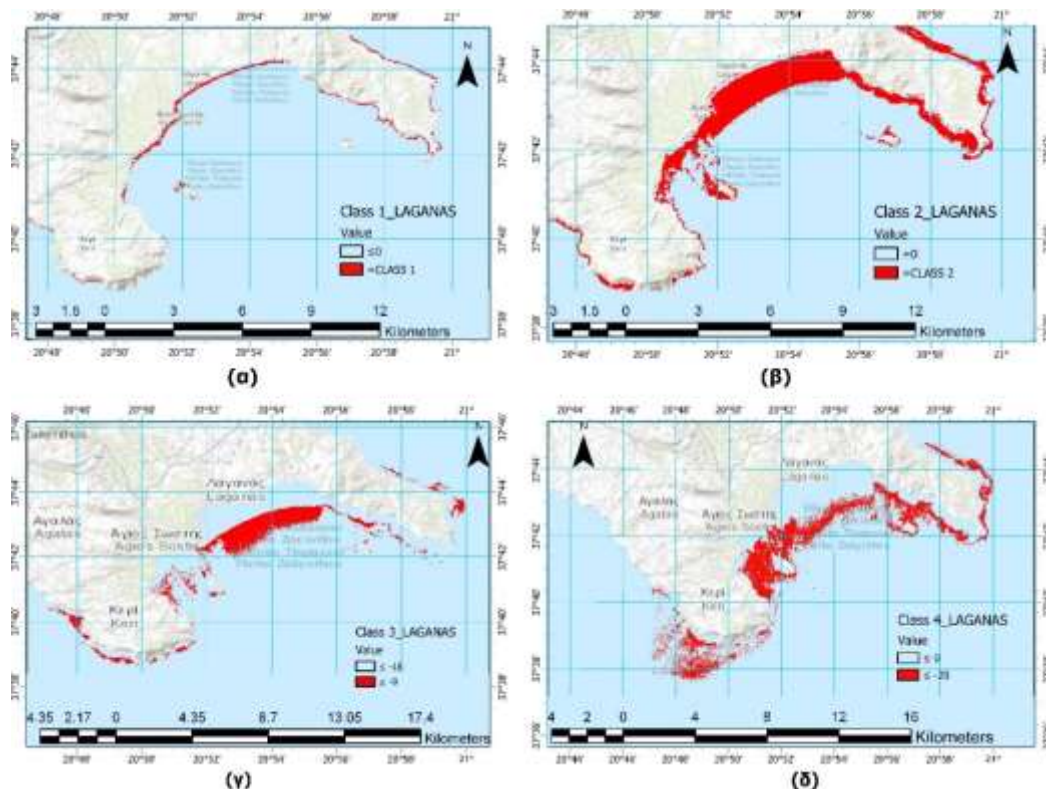
Πίνακας 5.5 : Σχέσεις μεταξύ Βιο-οπτικών Παραμέτρων για την περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

| α/α | Κλάση Ύδατος      | Βιο-οπτικά Χαρακτηριστικά   |
|-----|-------------------|---|
| 1.  | ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ I  | $K_d(\text{Coastal}) > K_d(\text{Blue}) > K_d(\text{Green})$<br>$\alpha(\text{Green}) > \alpha(\text{Coastal}) > \alpha(\text{Blue})$ |
| 2.  | ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ II | $K_d(\text{Coastal}) > K_d(\text{Blue}) > K_d(\text{Green})$<br>$\alpha(\text{Coastal}) > \alpha(\text{Green}) > \alpha(\text{Blue})$ |
| 3.  | ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΥΔΑΤΑ I | $K_d(\text{Coastal}) > K_d(\text{Green}) > K_d(\text{Blue})$<br>$\alpha(\text{Green}) > \alpha(\text{Coastal}) > \alpha(\text{Blue})$ |

Οπότε, στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης (case study 3) διαπιστώνεται η ύπαρξη 4 κατηγοριών (κλάσεων υδάτων), οι οποίες απεικονίζονται με στοιχεία ( $\alpha$ ) έως ( $\delta$ ) με κόκκινο χρώμα στην Error! Reference source not found..

Σύμφωνα με την τεχνική του Υβριδικού μοντέλου, διενεργείται ο υπολογισμός των λόγων μεταξύ των βιο-οπτικών παραμέτρων ( $b_b$ ,  $\alpha$ ,  $K_d$ ) και των αποθραμβωμένων ( $DegI(B_i)$ ) φασματικών ζωνών καθώς και των λογάριθμων αυτών.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση περιοχής μελέτης το Υβριδικό μοντέλο συσχετίστηκε στατιστικά με βαθυμετρικά στοιχεία, τα οποία είχαν συλλεχθεί κατά την διάρκεια υδρογραφικής αποτύπωσης. Ακολούθως, ελέγχθηκε η συσχέτιση που παρουσιάζουν οι λόγοι των βιο-οπτικών παραμέτρων και των βαθυμετρικών δεδομένων πεδίου (δεδομένα εκπαίδευσης).



Εικόνα 5.18 : Κλάσεις Υδάτων: (α) Παράκτια Ύδατα I, (β) Παράκτια Ύδατα II, (γ) Ενδιάμεσα Ύδατα I, (δ) Ενδιάμεσα Ύδατα II.



Από τα αποτελέσματα των εν λόγω πειραμάτων διαπιστώνεται ότι οι λόγοι που εμφανίζουν τις καλύτερες συσχετίσεις με τα βαθυμετρικά δεδομένα πεδίου ανά κλάση υδάτινης περιοχής είναι αυτοί που αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 5.6.

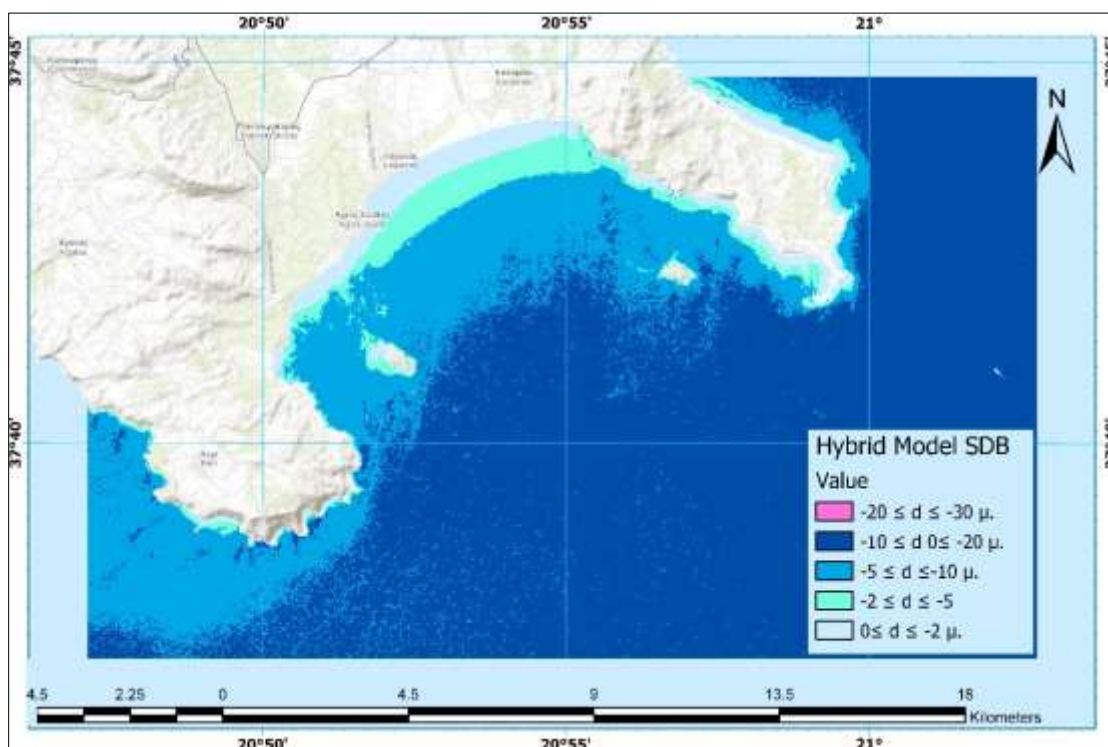
**Πίνακας 5.6 :** Λόγοι που παρουσιάζουν την καλύτερη Στατιστική Συσχέτιση ανά κλάση Υδάτων για την περιοχή του Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

| α/α | Κλάση Υδατος       | Λογαριθμικός Λόγος                    | Γραμμικός Συντελεστής Συσχέτισης (R <sup>2</sup> ) |
|-----|--------------------|---------------------------------------|--|
| 1.  | ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ I   | $\ln \frac{K_d(Coastal)}{K_d(Green)}$ | 0,44   |
| 2.  | ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ II  | $\ln \frac{K_d(Coastal)}{K_d(Green)}$ | 0,76   |
| 3.  | ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΥΔΑΤΑ I  | $\ln \frac{K_d(Coastal)}{K_d(Green)}$ | 0,73   |
| 4.  | ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΥΔΑΤΑ II | $\ln \frac{K_d(Coastal)}{K_d(Green)}$ | 0,64   |

Από τις εξισώσεις στατιστικής συσχέτισης (regression analysis) για κάθε κλάση υδάτων του Πίνακα 5.6 υπολογίστηκαν οι εξαγόμενες βαθυμετρικές σε κάθε υποπεριοχή μελέτης, οι οποίες εντέλει αθροίστηκαν ώστε να εξαχθεί το συνολικό βαθυμετρικό μοντέλο της περιοχής ενδιαφέροντος.

Τα δεδομένα βαθυμετρίας από τις εργασίες πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της εν λόγω περιοχής συλλέχθηκαν την 10.05.2015, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος που συμμετείχε το Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Τα εν λόγω βαθυμετρικά στοιχεία ήταν πρωτογενούς μορφής (raw data), σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες περιοχές μελέτης, οι οποίες βαθμονομήθηκαν με ήδη επεξεργασμένα δεδομένα (processed) από τους αντίστοιχους ναυτικούς χάρτες. Από τα πειράματα που διενεργήθηκαν στην υπόψη περιοχή μελέτης διαπιστώθηκε ότι εάν διορθωθούν τα προαναφερθέντα δεδομένα πεδίου (raw data), δηλαδή αφαιρεθούν από αυτά τα χονδροειδή ή άλλα σφάλματα συστηματικής

μορφής, βελτιώνεται η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων (modelled SDB) του Υβριδικού μοντέλου, όπως αυτή τελικώς παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη (γ) του Πίνακα 5.6. Πιο συγκεκριμένα, μετά την διενέργεια της διόρθωσης, από τα χονδροειδή και συστηματικά σφάλματα, των δεδομένων πεδίου, τα διορθωμένα δεδομένα πεδίου (processed data) συσχετίστηκαν με τους λόγους του Πίνακα 5.6, (β) στήλη. Οι εξισώσεις που προέκυψαν σε κάθε περιοχή χωριστά αλλά και αυτή που αναφερόταν σε ολόκληρη (ενιαία) την περιοχή χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του βαθυμετρικού μοντέλου της περιοχής μελέτης (Εικόνα 5.19). Η σύγκριση (στατιστική συσχέτιση) του Υβριδικού μοντέλου με τα διορθωμένα βαθυμετρικά στοιχεία πεδίου παρουσιάζει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση με τον αντίστοιχο συντελεστή προσδιορισμού να ισούται με  $R^2= 0,95$ , με ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) =1,31 m συγκρινόμενο με τα δεδομένα αξιολόγησης (validation dataset) όπως αυτά συλλέχτηκαν στο πεδίο.



**Εικόνα 5.19 :** Αποτελέσματα Βαθυμετρίας από το Υβριδικό μοντέλο στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή του Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου (Χρόνος Λήψης Εικόνας 09.08.2018, ώρα 09:10:41.489 Z).

### 5.1.2 Στατιστική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Για να εκτιμηθούν οι δυνατότητες εξαγωγής βαθυμετρίας, με την μεθοδολογία του «Υβριδικού μοντέλου», το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, καταβλήθηκε προσπάθεια αξιολόγησης του και προσδιορισμού της ακρίβειας των παραμέτρων και των μεθόδων που υιοθετούνται σε αυτό. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των αποτελεσμάτων του Υβριδικού μοντέλου βαθυμετρίας και του μοντέλου του Αναλογικού Μετασχηματισμού (Stumpf *et al.*, 2003). Ο Αναλογικός αλγόριθμος (ratio Transform) θεωρείται το πιο δημοφιλές σήμερα μοντέλο εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας (εξισ. 5.5), όπως προκύπτει από την ευρεία εφαρμογή και τη χρήση του από διάφορους ερευνητές όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.4. της παρούσας διατριβής, ενώ φέρεται να έχει δοκιμαστεί αρκετά σε παγκόσμιο επίπεδο. Παράλληλα, είναι το μόνο το οποίο έχει υιοθετηθεί και χρησιμοποιείται (μέχρι σήμερα) από την Αμερικανική Υδρογραφική Υπηρεσία (NOAA) και σε εμπορική χρήση από εταιρείες εκπόνησης λογισμικών επεξεργασίας εικόνων (Harris Geospatial Solutions, 2019). Οι αρχές λειτουργίας του συγκεκριμένου μοντέλου/αλγορίθμου υπολογισμού βαθυμετρίας έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 2.2 της παρούσας εργασίας.

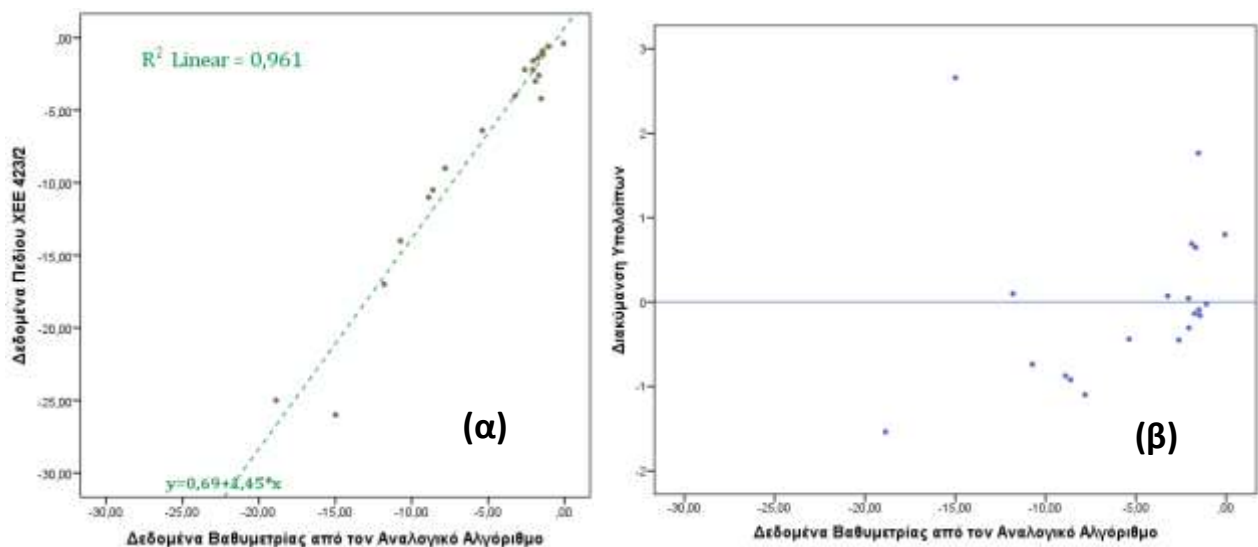
$$z = m_1 \times \frac{\ln(n \times R_i)}{\ln(n \times R_j)} - m_0 \quad (\text{εξισ. 5.5})$$

Το συγκεκριμένο μοντέλο (ratio Transform) αν και παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα καθόσον για να λειτουργήσει απαιτείται η βαθμονόμησή του με λιγότερες παραμέτρους από ότι τα υπόλοιπα (Lyzenga, Jupp, 4SM, SAMBUCA, κτλ.), ωστόσο δεν είναι εύκολος ο προσδιορισμός της παραμέτρου “*n*”, η οποία υπάρχει τόσο στον αριθμητή όσο και τον παρονομαστή της εξισ. 5.5. Η αδιάστατη παράμετρος *n* σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία παίρνει τιμές από 500-1500 και ρυθμίζεται έτσι ώστε ο λογάριθμος να παραμένει αφενός θετικός για κάθε περίπτωση ανακλαστικότητας πυθμένα, αφετέρου να δημιουργεί γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ του λόγου 2 φασματικών ζωνών και των δεδομένων (εκπαίδευσης/βαθμονόμησης) πεδίου βαθυμετρίας. Γενικώς, διαπιστώνεται ότι δεν είναι απολύτως σαφής ο τρόπος προσδιορισμού της παραμέτρου *n* και ποια πρέπει να είναι η βέλτιστη τιμή της σε κάθε περίπτωση βαθμονόμησης του μοντέλου με τα αντίστοιχα δεδομένα πεδίου.

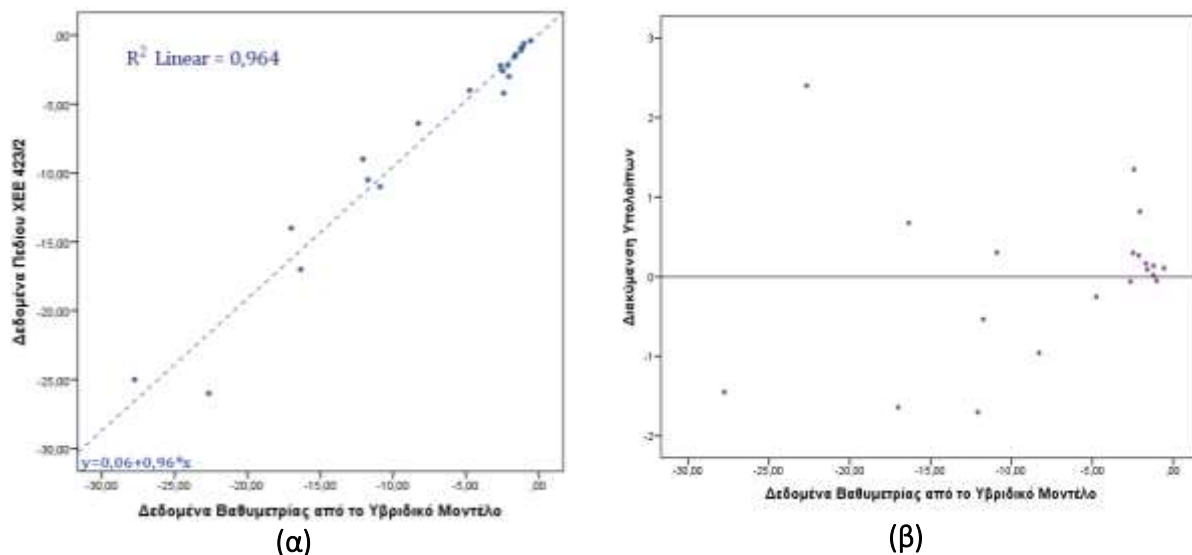
Επιπρόσθετα, αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα βαθυμετρίας του Υβριδικού μοντέλου τόσο με τα αναγραφόμενα βάθη στους αντίστοιχους ΧΕΕ που καλύπτουν και τις 3 περιοχές μελέτης όσο και με δεδομένα βαθυμετρίας πεδίου (περιοχή όρμου Γέρακα, ν. Ζακύνθου).

#### 5.1.2.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Περιοχής Στενού Ν. Πάρου-Αντιπάρου (Case Study 1)

Για την αξιολόγηση των μοντέλων (Hybrid Model & Ratio Transform) στην περιοχή του Στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου χρησιμοποιήθηκε μία ομάδα δεδομένων αξιολόγησης (validation dataset), η οποία περιελάμβανε 20 βάθη, τα οποία ελήφθησαν από τον ΧΕΕ 423/2. Το μοντέλο του Αναλογικού αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή δορυφορικής βαθυμετρίας, μέσω του λογισμικού επεξεργασίας και ανάλυσης δορυφορικών εικόνων ENVI. Ο Αναλογικός αλγόριθμος βαθμονομήθηκε με τα ίδια δεδομένα που βαθμονομήθηκε και το Υβριδικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα βαθυμετρίας τόσο από το Υβριδικό μοντέλο (Hybrid Model) όσο και από τον Αναλογικό αλγόριθμο (Stumpf Model) συσχετίστηκαν στατιστικά με την ομάδα αξιολόγησης (validation dataset) των δεδομένων πεδίου. Τα βάθη αξιολόγησης και για τις δύο περιπτώσεις αξιολόγησης των μοντέλων ήταν κοινά.



Εικόνα 5.200 Στατιστική Συσχέτιση του Αναλογικού Μοντέλου (Stumpf *et al.*, 2003) στο Στενό ν. Πάρου-Αντιπάρου



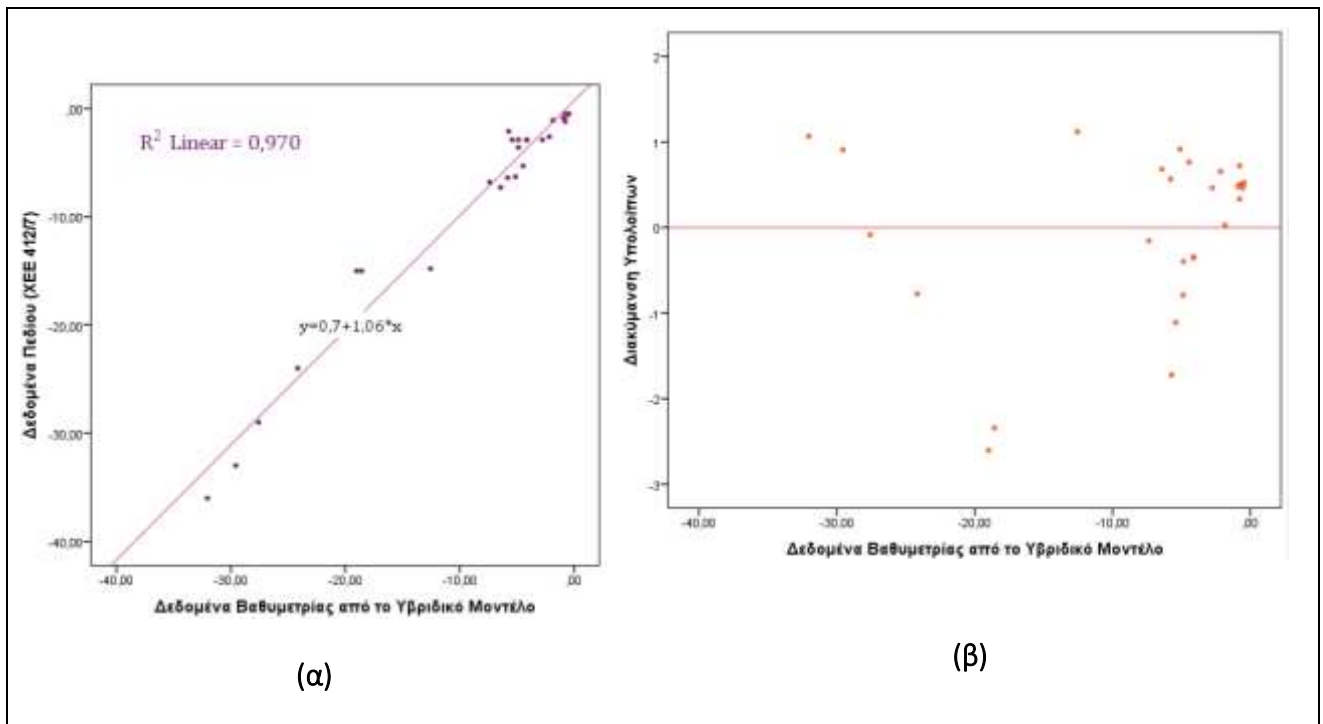
Εικόνα 5.21 : Στατιστική Συσχέτιση Υβριδικού Μοντέλου στο Στενό ν. Πάρου- Αντιπάρου.

Από την αξιολόγηση των μοντέλων μέσω της στατιστικής συσχέτισης (regression analysis) διαπιστώθηκε ότι το Υβριδικό μοντέλο παρουσιάζει γενικώς μεγαλύτερους συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2(\text{Linear})=0,964$  (Εικόνα 5.21 (α)), ήτοι οριακά καλύτερη συσχέτιση με τα δεδομένα πεδίου απ' ότι ο Αναλογικός αλγόριθμος ( $R^2(\text{Linear})=0,961$  Εικ. 5.20(α)).

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι την παραπάνω ικανοποιητική στατιστική συσχέτιση (υψηλός γραμμικός συντελεστής συσχέτισης σε συνδυασμό με μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 1,55 m) του Υβριδικού μοντέλου με τα δεδομένα πεδίου-ναυτικού χάρτη, την διατηρεί μέχρι το βάθος αξιολόγησης 28 m, ενώ ο Αναλογικός αλγόριθμος συσχετίζει με τους προαναφερθέντες συντελεστές προσδιορισμού ( $R^2$ ) μέχρι το βάθος των 19,6 m (**Error! Reference source not found.**0). Το Αναλογικό μοντέλο (Stumpf *et al.*, 2003) παρουσιάζει σφάλματα άνω των 5,0 m για βάθη μεγαλύτερα των 20 m, ενώ παρουσιάζει ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 3,30 m, με τα ίδια δεδομένα πεδίου αξιολόγησης, δηλαδή σφάλμα διπλάσιο από εκείνο του Υβριδικού μοντέλου.

### 5.1.2.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Περιοχής Μαρίνας Αγ. Κοσμά, Σαρωνικού Κόλπου (Case Study 2)

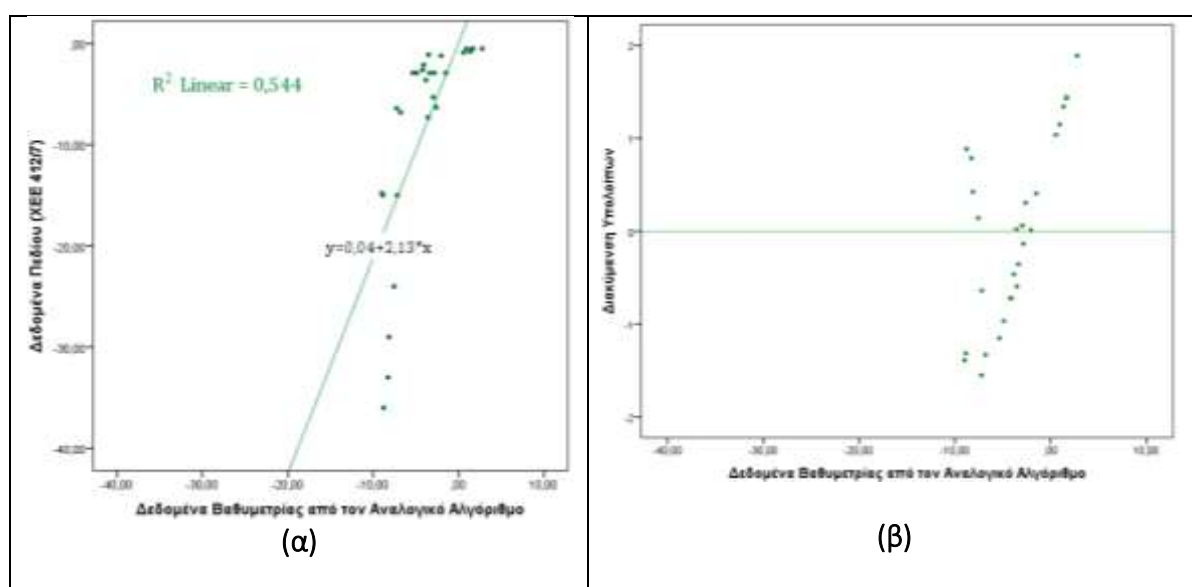
Για την αξιολόγηση των μοντέλων (Hybrid Model & Ratio Transform) στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά χρησιμοποιήθηκε μία ομάδα δεδομένων αξιολόγησης (validation dataset), η οποία περιελάμβανε 28 βάθη από τον αντίστοιχο ναυτικό χάρτη (ΧΕΕ 412/7) που καλύπτει την εν λόγω περιοχή. Το μοντέλο του Αναλογικού αλγορίθμου (Stumpf *et al.*, 2003) εκτελέστηκε και σε αυτή την περίπτωση μέσω του λογισμικού επεξεργασίας εικόνων ENVI και βαθμονομήθηκε με τα ίδια δεδομένα αναφοράς που είχε βαθμονομηθεί και το Υβριδικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα βαθυμετρίας τόσο από το Υβριδικό μοντέλο (Hybrid Model) όσο και από τον Αναλογικό αλγόριθμο (Stumpf Model) συσχετίστηκαν στατιστικά με την ομάδα αξιολόγησης (validation dataset) των δεδομένων πεδίου. Τα βάθη αξιολόγησης (validation dataset) και για τις δύο περιπτώσεις αξιολόγησης των μοντέλων ήταν κοινά.



Εικόνα 5.212 : Στατιστική Συσχέτιση Υβριδικού Μοντέλου στην θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά.

Από την αξιολόγηση των μοντέλων μέσω της στατιστικής συσχέτισης (regression analysis) διαπιστώθηκε ότι και σε αυτή την περίπτωση των πειραμάτων τα βάθη που υπολογίστηκαν από το Υβριδικό μοντέλο παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2(\text{Linear})=0,970$ ) (Εικόνα 5.212 (α)), με ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 1,85 m, συγκρινόμενο με τα δεδομένα αξιολόγησης από τον ναυτικό χάρτη (ΧΕΕ 412/7). Αντίστοιχα, ο Αναλογικός αλγόριθμος όταν συσχετίζεται με τα ίδια δεδομένα πεδίου παρουσιάζει ένα συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2(\text{Linear})=0,544$ , με ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 9,02 m, (Εικόνα 5.22 (α)).

Επιβεβαιώνεται, και στην περίπτωση αυτής της περιοχής μελέτης, ότι το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας παρουσιάζει καλύτερη στατιστική (γραμμική) συσχέτιση με τα δεδομένα πεδίου (ΧΕΕ 412/7), η οποία διατηρείται μέχρι την μέγιστη τιμή του βάθους (32 m) αξιολόγησης, ενώ η εξαγόμενη βαθυμετρία από τον Αναλογικό αλγόριθμο συσχετίζεται, με τον προαναφερθέν συντελεστή γραμμικού προσδιορισμού ( $R^2$ ) μέχρι το βάθος των 10,0 m (Εικόνα 5.223 (α)).



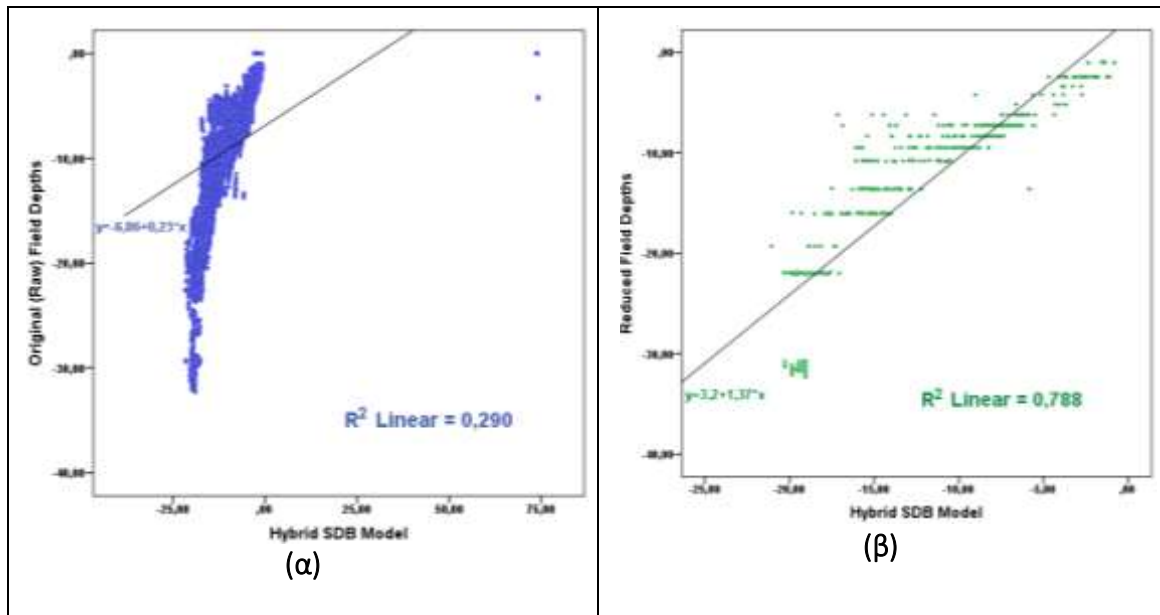
**Εικόνα 5.223 :** Στατιστική Συσχέτιση του Αναλογικού Μοντέλου στην θαλάσσια περιοχή της Μαρίνας του Αγ. Κοσμά.

### 5.1.2.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Περιοχής Κόλπου Λαγανά Ν. Ζακύνθου (Case Study 3)

Στην θαλάσσια περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τόσο ως δεδομένα βαθμονόμησης (training dataset) όσο και ως δεδομένα αξιολόγησης (validation dataset) βάθη που προερχόταν από δεδομένα βαθυμετρίας πεδίου. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το αρχικό αρχείο (raw data) βαθυμετρίας, που περιλάμβανε τα μη επεξεργασμένα στοιχεία, αποτελείτο από 19.122 βάθη. Τα εν λόγω δεδομένα επεξεργάστηκαν και διορθώθηκαν ως προς τα χονδροειδή και συστηματικού τύπου σφάλματα που περιείχαν. Τελικά, το διορθωμένο αρχείο δεδομένων βαθυμετρίας (processed) το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην υπόψη περιοχή μελέτης αποτελείτο από 9.173 βάθη. Η ομάδα των δεδομένων βαθμονόμησης (εκπαίδευσης) των μοντέλων (Hybrid & Stumpf et al.) περιελάμβανε 1.100 μετρήσεις/βάθη, ενώ η ομάδα των δεδομένων αξιολόγησης (validation dataset), περιελάμβανε 2.500 βάθη από το επεξεργασμένο αρχείο (processed) βαθυμετρίας. Τόσο, τα δεδομένα αξιολόγησης του μοντέλου, όσο και τα δεδομένα εκπαίδευσης επιλέκθηκαν τυχαία περιλαμβάνοντας επεξεργασμένα δεδομένα από ολόκληρο το εύρος των μετρηθέντων βαθών στην θαλάσσια περιοχή του κόλπου Γέρακα. Άρα, στην περίπτωση των πειραμάτων στον κόλπο Λαγανά τα μοντέλα (Υβριδικό και Αναλογικός Αλγόριθμος) αξιολογήθηκαν με ένα σημαντικό μεγάλο αριθμό στοιχείων/βαθών, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις περιοχών μελέτης. Το μοντέλο του Αναλογικού αλγορίθμου εκτελέστηκε για την περιοχή του κόλπου Λαγανά πάλι μέσω του λογισμικού επεξεργασίας εικόνων ENVI. Τα αποτελέσματα βαθυμετρίας τόσο από το Υβριδικό μοντέλο (Hybrid Model) όσο και από τον Αναλογικό αλγόριθμο (Stumpf Model) συσχετίστηκαν στατιστικά με την ομάδα αξιολόγησης (validation dataset) των δεδομένων πεδίου. Τα βάθη αξιολόγησης και για τις δύο περιπτώσεις αξιολόγησης των μοντέλων ήταν κοινά.

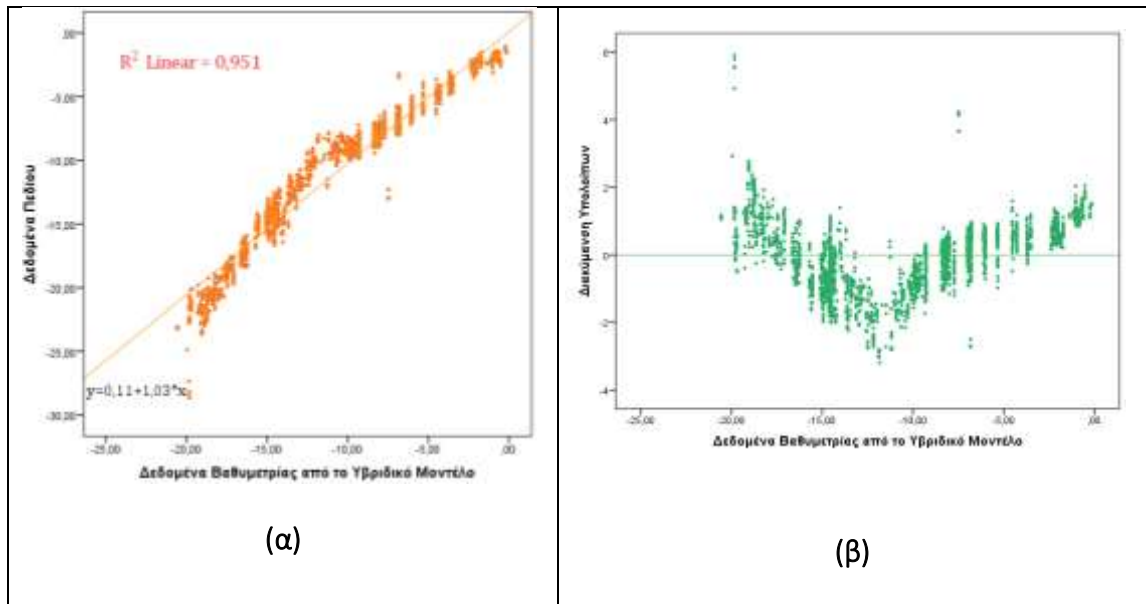
Τα πειράματα συσχέτισης και οι αντίστοιχοι έλεγχοι του Υβριδικού μοντέλου πραγματοποιήθηκαν και με τις 3 προαναφερόμενες κατηγορίες δεδομένων, δηλαδή με τα αρχικά (raw data), (Εικόνα 5.234 (α)), με τα αρχικά αφαιρουμένων των χονδροειδών σφαλμάτων (μη διορθωμένων όμως ως προς τα συστηματικά σφάλματα των δεδομένων) (Εικόνα 5.234 (β)), και με τα τελικώς επεξεργασμένα (processed/9.173) βάθη (Εικόνα 5.5 (α) και Εικόνα 5.6 (α)).





**Εικόνα 5.234 :** Στατιστική Συσχέτιση του Υβριδικού Μοντέλου στην θαλάσσια περιοχή Κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου (α) με τα αρχικά (raw data) δεδομένα, (β) αφαιρώντας τα χονδροειδή σφάλματα (περιλαμβανομένων όμως των συστηματικών).

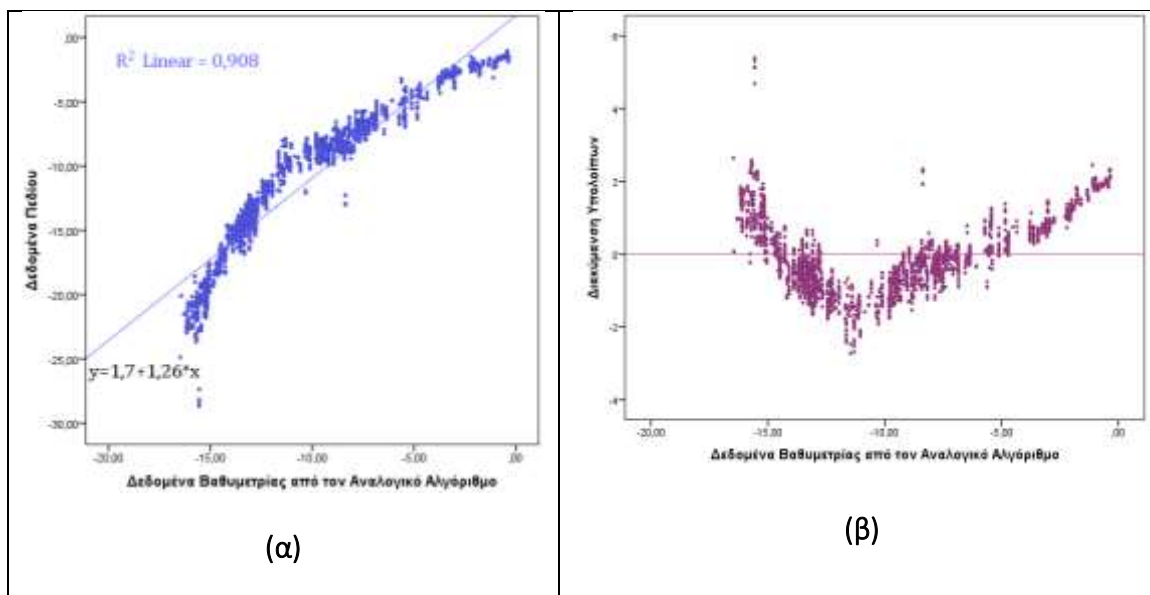
Από την στατιστική συσχέτιση (regression analysis) των δύο μοντέλων, με τα τελικώς διορθωμένα βαθυμετρικά δεδομένα πεδίου (processed depths), διαπιστώθηκε ότι και σε αυτή την περίπτωση των πειραμάτων το Υβριδικό μοντέλο παρουσιάζει καλύτερο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2(\text{Linear})=0,951$ ) (Εικόνα 5. (α)). Οπότε, επιβεβαιώνεται το γεγονός της καλύτερης συσχέτισης του υβριδικού μοντέλου εξαγωγής βαθυμετρίας με τα δεδομένα πεδίου, απ' ότι ο Αναλογικός αλγόριθμος ( $R^2(\text{Linear})=0,908$ ) (Εικόνα 5.24 (α)).



**Εικόνα 5.25 :** Στατιστική Συσχέτιση του Υβριδικού Μοντέλου στην θαλάσσια περιοχή του κόλπου Λαγονά ν. Ζακύνθου.

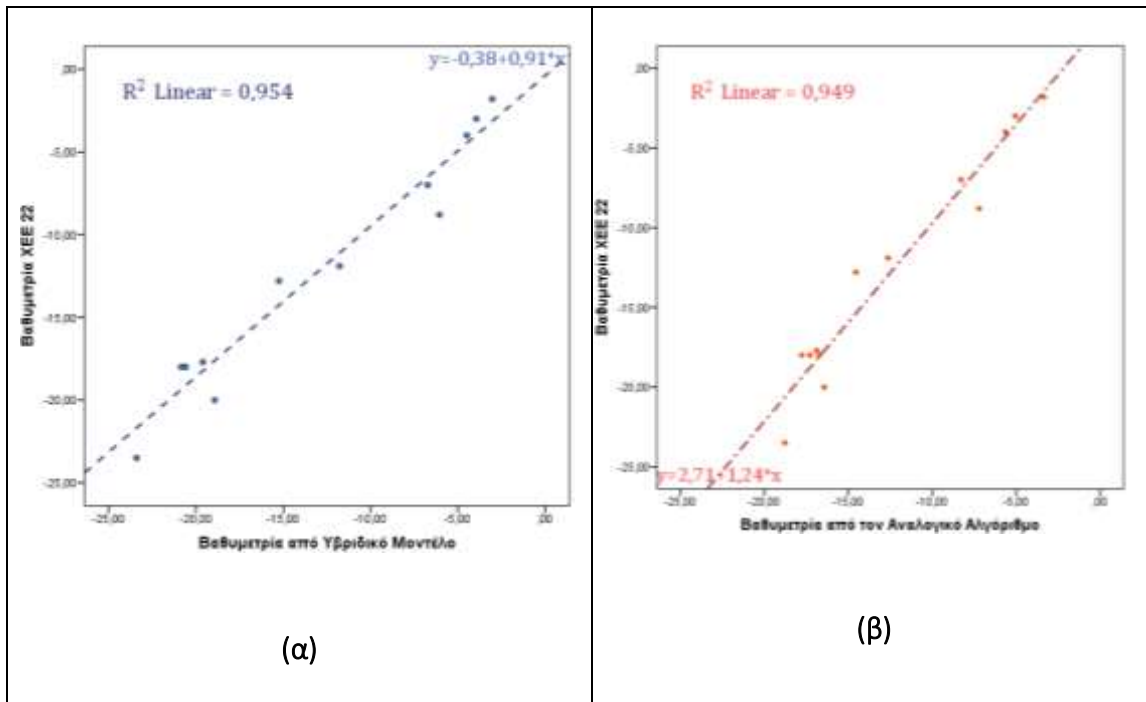
Η προαναφερθείσα καλύτερη στατιστική συσχέτιση του Υβριδικού μοντέλου με τα δεδομένα πεδίου διατηρείται μέχρι την τιμή του βάθους των 20 m (Εικόνα 5.5 (α)), ενώ ο Αναλογικός αλγόριθμος (Stumpf *et al.*, 2003) συσχετίζεται με τα δεδομένα αξιολόγησης (validation dataset) με τον αντίστοιχο γραμμικό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2$ )=0,908) μέχρι το βάθος των 16,0 m (Εικόνα 5.24 (α)).

Τέλος, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) για την περίπτωση του Υβριδικού μοντέλου είναι της τάξης του 1,31 m, ενώ η αντίστοιχη τιμή σφάλματος (RMSE) για τον Αναλογικό αλγόριθμο ανέρχεται σε 2,24 m.



**Εικόνα 5.246 :** Στατιστική Συσχέτιση του Αναλογικού Μοντέλου στην θαλάσσια περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρμος του Γέρακα από τον οποίο συλλέχθηκαν τα βαθυμετρικά δεδομένα, που βαθμονομήθηκαν τα δύο μοντέλα, αποτελεί μόνο ένα μικρό τμήμα της συνολικής επιφάνειας του κόλπου Λαγανά, το οποίο δεν υπερβαίνει σε ποσοστό το 5% της συνολικής έκτασης του κόλπου Λαγανά. Παρόλα αυτά και τα δύο μοντέλα εξήγαγαν στοιχεία δορυφορικής βαθυμετρίας για ολόκληρη την έκταση του εν λόγω κόλπου. Επιπρόσθετα, στο πλαίσιο αξιολόγησης της δορυφορικά εξαγόμενης βαθυμετρίας από τα δύο μοντέλα (Υβριδικό & Stumpf *et al*, 2003), διενεργήθηκαν έλεγχοι αξιολόγησης της βαθυμετρίας της θαλάσσιας περιοχής εκτός του όρμου Γέρακα, αλλά εντός του κόλπου Λαγανά, δηλαδή εκεί όπου δεν είχαν συλλεχθεί δεδομένα πεδίου και κατά συνέπεια δεν είχαν βαθμονομηθεί τα δύο μοντέλα.



**Εικόνα 5.25 :** Στατιστική Συσχέτιση (α) του Υβριδικού και του (β) Αναλογικού Μοντέλου στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου, εκτός της περιοχής του όρμου Γέρακα.

Από τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι στις ευρύτερης έκτασης περιοχές, εκτός του όμου Γέρακα, το Υβριδικό μοντέλο παρουσιάζει οριακά καλύτερη συσχέτιση ( $R^2(\text{Linear})=0,954$ , (Εικόνα 5.25 (α)) συγκριτικά με τον Αναλογικό αλγόριθμο ( $R^2(\text{Linear})=0,949$ ), (Εικόνα 5.25 (β)), ενώ τα βάθη που εξήχθησαν από το Υβριδικό μοντέλο παρουσιάζουν μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα ( $RMSE=1,82$  m) από τα βάθη που υπολογίζονται από το Αναλογικό μοντέλο ( $RMSE=2,06$  m) (Stumpf, *et al.*, 2003). Κατά την παραπάνω στατιστική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν 13 βάθη που απεικονίζονται στον ναυτικό χάρτη με αριθμό ΧΕΕ 22 που κυμαίνονταν από 1,80 m έως 23,50 m.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι και τα δύο μοντέλα εξαγωγής βαθυμετρίας παρουσιάζουν την μικρότερη συσχέτιση σε βάθος 12,0 m. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στην πιθανή ύπαρξη υποθαλάσσιας βλάστησης, η οποία συνήθως παρατηρείται σε αυτά τα βάθη. Όπως επίσης αναφέρεται και στην ενότητα 3.1.3 της παρούσας διατριβής στον συγκεκριμένο κόλπο έχουν εντοπιστεί εκτεταμένα λιβάδια ποσειδωνίας.

### 5.1.3 Σύγκριση με άλλα Μοντέλα Εξαγωγής Βαθυμετρίας από Δορυφορικά Δεδομένα

Οι δυνατότητες του εκπονηθέντος στην παρούσα έρευνα Υβριδικού μοντέλου, εξαγωγής βαθυμετρίας, ως αυτές προέκυψαν κατά τα πειραματικά στάδια του παρόντος Κεφαλαίου, συγκρίθηκαν με άλλα μοντέλα βαθυμετρίας. Με βάση λοιπόν τα αναφερόμενα μοντέλα βαθυμετρίας ως αυτά παρατέθηκαν στο στάδιο της εκτενούς βιβλιογραφικής έρευνας («Ιστορική Εξέλιξη και Σημερινή Κατάσταση Μεθόδων Δορυφορικής Βαθυμετρίας») της παρούσας διατριβής, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα, τα οποία θα πρέπει να επιβεβαιωθούν-δοκιμαστούν πειραματικά και σε μελλοντικές αντίστοιχες ερευνητικές προσπάθειες.

1. Καταρχήν ο Αναλογικός αλγόριθμος (ratio Transform) παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι εξαρτάται από λιγότερους εμπειρικούς συντελεστές ( $m_0$ ,  $m_1$ ), συγκριτικά με τον γραμμικό μετασχηματισμό του Lyzenga ( $R_\infty(\lambda_i)$ ,  $R_\infty(\lambda_j)$ ,  $a_0$ ,  $a_i$ , και  $a_j$ ), γεγονός που τον κάνει πιο «σταθερό», πιο «γρήγορο» και πιο «εύκολο» κατά τους υπολογισμούς. Το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δεν είναι συνάρτηση κάποιου αντίστοιχου εμπειρικού συντελεστή, ενώ διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος εκτέλεσής του είναι αρκετά ικανοποιητικός, ενώ εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των κλάσεων που θα διαπιστωθούν σε κάθε περιοχής ερεύνης.
2. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων βαθυμετρίας του Αναλογικού αλγόριθμου εξαρτάται από τις τιμές των εμπειρικών συντελεστών ( $m_0$ ,  $m_1$ ), οι οποίοι παίρνουν τιμές από 500-2.000, χωρίς όμως να προκύπτει από την διεθνή βιβλιογραφία ποιος είναι ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού τους. Από την άλλη πλευρά, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Υβριδικού μοντέλου δεν εξαρτάται από κάποιους εμπειρικούς συντελεστές.
3. Η μέθοδος του «ratio transform» απαιτεί μόνο την χρήση των φασματικών ζωνών, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετική απορροφητικότητα στο θαλάσσιο ύδωρ, ήτοι της blue και της green φασματικής ζώνης. Το γεγονός της χρήσης/αξιοποίησης δύο ή περισσότερων φασματικών ζωνών απεδείχθη από πειράματα ότι επιτρέπει τον προσδιορισμό του βάθους σε ένα μεγάλο εύρος γεωγραφικών περιοχών με διαφορετική χλωρίδα και είδος πυθμένα. Το ίδιο πλεονέκτημα παρουσιάζει και το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας, καθόσον αξιοποιεί τους λόγους μεταξύ των

φασματικών ζωνών και τους λόγους των βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2 της παρούσας εργασίας. Επίσης, το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας φαίνεται να είναι πιο «σταθερό» στην αποτελεσματικότητά του, δεδομένου ότι όλη η ανάλυση του εφαρμόζεται κάθε φορά σε μία κλάση/κατηγορία υδάτων, η οποία παρουσιάζει ομοιογενή φυσικά και φασματικά χαρακτηριστικά πυθμένα.

4. Σε πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν (Stumpf, *et al.*, 2003) διαπιστώθηκε ότι ο Αναλογικός μετασχηματισμός ρυθμίστηκε (βαθμονομήθηκε) με ορισμένα μόνο βάθη από τους αντίστοιχους ναυτικούς χάρτες, ενώ ο Γραμμικός μετασχηματισμός από πολλά βαθυμετρικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από το Lidar, και παρόλα αυτά δεν ήταν τόσο αποτελεσματικός όσο ο Αναλογικός σε βάθη μεγαλύτερα των 15,00 m. Αντίστοιχο πλεονέκτημα αποδείχθηκε (πειραματικά) ότι ισχύει και με τον Υβριδικό αλγόριθμο της παρούσας διατριβής, δεδομένου ότι για την βαθμονόμηση του υπόψη μοντέλου χρησιμοποιείται μικρός αριθμός δεδομένων βαθών (<10).
5. Ο Αναλογικός μετασχηματισμός (ratio transformation) παρουσιάζει κανονικοποιημένο σφάλμα (normalized rms error) μέχρι βάθος < 25,00 m, της τάξης < 0,3 (30 %), ενώ ο Γραμμικός μετασχηματισμός ενώ λειτουργεί ικανοποιητικά μέχρι βάθους 15,00 m στην συνέχεια (σε βαθύτερα ύδατα) το σφάλμα (rms error) του αυξάνει δραματικά. Το Υβριδικό μοντέλο όπως αποδεικνύεται πειραματικά στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζει μικρότερο μέγεθος σφαλμάτων (RMSE) για βάθη μέχρι 30 m. Επισημαίνεται το γεγονός, ότι η μέθοδος του Αναλογικού αλγορίθμου (ratio Transform) δίνει καλύτερα αποτελέσματα βαθυμετρίας σε μεγαλύτερα βάθη από ότι ο γραμμικός μετασχηματισμός (Lyzenega, 1978), σε σχετικά καθαρά/διαυγή ύδατα (Stumpf, *et al.*, 2003). Στην παρούσα ερευνητική εργασία αποδείχθηκε πειραματικά, και επεξηγείται αναλυτικά στο παρόν Κεφάλαιο, ότι το Υβριδικό μοντέλο βαθυμετρίας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε βάθη μεγαλύτερα από εκείνα του Αναλογικού αλγορίθμου.
6. Το μοντέλο του Γραμμικού μετασχηματισμού (Lyzenega, 1985) αποδέχεται ότι η ανακλαστικότητα των εικονοστοιχείων του θαλάσσιου πυθμένα (σε κάθε φασματική

ζώνη) είναι κατά μεγάλη προσέγγιση γραμμική συνάρτηση της ανάκλασης του ιζήματος (ποιότητας πυθμένα), της επιφάνειας του πυθμένα και είναι εκθετική συνάρτηση του βάθους. Στο Υβριδικό μοντέλο της παρούσας μελέτης αποδεικνύεται ότι η φασματική απόκριση του λόγου των φασματικών ζωνών της εικόνας ή/και των λόγων μεταξύ των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων, με την καλύτερη δυνατή συσχέτιση με τα βάθη /δεδομένα αναφοράς, είναι κατά μεγάλη προσέγγιση γραμμική συνάρτηση του βάθους.

7. Στην εξίσωση του Γραμμικού μετασχηματισμού (Lyzenga, 1978) η χρήση της ανακλαστικότητας των βαθέων υδάτων  $R_{rs,\infty}$  εισαγάγει μεγάλη αβεβαιότητα στους υπολογισμούς εξαγωγής βαθυμετρίας, δεδομένου ότι η επιλογή (χωροθέτηση) της περιοχής των βαθέων υδάτων προσδιορίζεται-οριοθετείται εμπειρικά από τον εκάστοτε χρήστη. Η υπόψη αβεβαιότητα αυξάνεται περισσότερο στις περιπτώσεις παράκτιων περιοχών που υπάρχουν ζώνες με χαμηλότερη ανακλαστικότητα/λευκαύγεια (lower albedo) από ότι στα βαθιά νερά, λόγω της έντονης υποθαλάσσιας χλωρίδας. Επίσης, η  $R_{rs,\infty}$  μεταβάλλεται σε καθεμία φασματική ζώνη (blue, green) αναλόγως της σκέδασης της ατμόσφαιρας (scattering), ενώ αλλάζει στην blue band αναλόγως της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των αερολυμάτων (aerzols) αυτής. Στην περίπτωση του Υβριδικού μοντέλου βαθυμετρίας δεν τίθεται τέτοιο ζήτημα καθόσον στην όλη διαδικασία υπολογισμών δεν εισάγεται ως μεταβλητή η ανακλαστικότητα των βαθέων υδάτων ( $R_{rs,\infty}$ ), ενώ τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι διορθωμένα ως προς την επίδραση της ατμόσφαιρας και του θορύβου της στήλης ύδατος.
8. Σε περιοχές υψηλής θολότητας υδάτων (high turbidity areas) και οι δύο αλγόριθμοι (Αναλογικός και Γραμμικός) δεν δίνουν αποτελέσματα ακριβείας και συγκεκριμένα δεν μπορούν να εξάγουν βαθυμετρία σε βάθη > 15,00 m (Stumpf, *et al.*, 2003). Η θολότητα των υδάτων δημιουργεί αβεβαιότητα υπολογισμών και στο Υβριδικό μοντέλο, όπως διαπιστώνεται (πειραματικά) σε ορισμένες πολύ ρηχές περιοχές ειδικά εκεί που ο κυματισμός επηρεάζει/μετακινεί το ίζημα του πυθμένα (surf zone).

9. Αναφορικά με το μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας 4SM η ακρίβεια των εξαγόμενων βαθών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την έντονη διακύμανση των τιμών της ακτινοβολίας (radiance), γεγονός που συμβαίνει ειδικά στα πολύ ρηχά-παράκτια ύδατα. Το γεγονός αυτό, όπως διαπιστώθηκε από τα πειράματα που διενεργήθηκαν και στις 3 περιοχές μελέτης, δεν αποτελεί πρόβλημα στην μέθοδο του Υβριδικού μοντέλου εξαγωγής βαθυμετρίας. Επίσης, στο μοντέλο 4SM τα δεδομένα ακτινοβολίας θα πρέπει να έχουν προ-επεξεργαστεί από τον πάροχό τους, προκειμένου βελτιωθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N ratio), προκειμένου τα αποτελέσματά του να έχουν την αναμενόμενη ακρίβεια (Favoretto, *et al.*, 2017). Στην περίπτωση του Υβριδικού μοντέλου, η τιμή του λόγου σήματος/θόρυβο των εικονοστοιχείων της εικόνας δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της βαθυμετρίας. Επιπλέον, σε ότι αφορά την εκθετική απομείωση της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του βάθους, σημειώνεται ότι όσο πιο «σκούρος» φαίνεται ο πυθμένας των ρηχών υδάτων τόσο καλύτερα φαίνεται να λειτουργεί το μοντέλο 4SM (Favoretto, *et al.*, 2017). Στο Υβριδικό μοντέλο της παρούσας διατριβής, η «σκουρότητα» του πυθμένα δεν σχετίζεται με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των βαθών, μέχρι το μέγιστο εύρος εξαγωγής βαθυμετρίας του (extinction depth).
10. Η χαρτογράφηση (κατανομή/ταξινόμηση) των βενθικών ενδαιτημάτων μίας περιοχής αποτελεί ένα πολύ σύνθετο και δύσκολο αντικείμενο. Τούτο διότι η φασματική πληροφορία που καταγράφεται από τον πυθμένα και αποτυπώνεται σε μία πολυφασματική δορυφορική εικόνα, είναι αφενός πολύ περιορισμένη, αφετέρου εμπεριέχει αρκετό «θόρυβο». Η συνήθης ερευνητική τακτική χαρτογράφησης των βενθικών πλυθησμών είναι να υλοποιείται μία διαδικασία ταξινόμησης με την χρήση «κανονικοποιημένων πινάκων θαλασσίου πυθμένα» (seafloor normalized indexes). Οι υπόψη δείκτες λαμβάνουν υπόψη τους και την βαθυμετρία της περιοχής, προκειμένου αυξηθεί η επιτυχία και ακρίβεια στην ταξινόμηση (Eugenio, *et al.*, 2017), (Eugenio, *et al.*, 2015). Οι κλασσικές μεθόδους ταξινόμησης λαμβάνουν υπόψη τους την ανακλαστικότητα/λευκαύγεια του πυθμένα (seafloor albedo) ως αυτή καταγράφεται από μετρήσεις πεδίου (Mishra, *et al.*, 2006) ή εξάγεται/προσδιορίζεται από τις φασματικές ζώνες (spectral bands) της εικόνας με όλο τον «θόρυβο» που πιθανόν αυτές περιέχουν. Στην περίπτωση του Υβριδικού μοντέλου η ταξινόμηση



επιτυγχάνεται, αποκλειστικά, προσδιορίζοντας τις σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων και δεν απαιτείται η προηγούμενη γνώση ή η εκπόνηση «κανονικοποιημένων πινάκων θαλασσίου πυθμένα» (seafloor normalized indexes) ή μετρήσεων πεδίου του φάσματος του πυθμένα για την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι ότι με την διαδικασία της ταξινόμησης που υιοθετεί το Υβριδικό μοντέλο, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, ακόμα και στην περίπτωση μικρής φασματικής διαφορετικότητας των διαφόρων κλάσεων, αυτές δύνανται να διαχωριστούν με σαφήνεια, όποτε και να προσδιοριστεί αντίστοιχα με ακρίβεια η κατηγορία κάθε παράκτιας περιοχής.

Πρέπει να επισημανθεί ότι, εφαρμόζοντας την μεθοδολογία ταξινόμησης με βάση το Υβριδικό μοντέλο, η ακρίβεια στην ταξινόμηση δεν εξαρτάται από την ακρίβεια υπολογισμού των IOPs και AOPs αλλά από τις σχέσεις μεταξύ των βιο-οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων σε κάθε περιοχή/κλάση ταξινόμησης. Για αυτό το λόγο το Υβριδικό μοντέλο θεωρείται πιο «σταθερό» σε ότι αφορά τα αποτελέσματα ταξινόμησης από ότι οι υπόλοιποι αλγόριθμοι ταξινόμησης.

11. Σχετικά με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο (QAA) που χρησιμοποιείται από το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας, πρέπει να τονιστεί ότι για την επίλυση του ανάστροφου προβλήματος, με σκοπό τον υπολογισμό των εγγενών και φαινόμενων οπτικών ιδιοτήτων των υδάτων, δεν απαιτείται η γνώση της λευκαύγειας του πυθμένα όπως σε άλλες ανάλογες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί κατά το παρελθόν (Eugenio, *et al.*, 2015) (Mishra, *et al.*, 2006), (Mishra, *et al.*, 2007), (Gordon, *et al.*, 1988). Το γεγονός τούτο αποτελεί πολύ σημαντικό πλεονέκτημα καθόσον δεν απαιτούνται κοστοβόρες και χρονοβόρες διαδικασίες πεδίου για την συλλογή φασματικών δεδομένων λευκαύγειας των ιζημάτων του θαλασσίου πυθμένα.
12. Το παραπάνω πλεονέκτημα του Υβριδικού αλγόριθμου διαπιστώνεται και με την σύγκρισή του με τους αναλυτικούς αλγόριθμους (Albert, *et al.*, 2003), (Sathyendranath, *et al.*, 1989), (Brandt, *et al.*, 2009), (Mobley, *et al.*, 2018). Οι τελευταίοι (Αναλυτικοί αλγόριθμοι) για να εκτελεστούν απαιτούν πληροφορίες (δεδομένα πεδίου) λευκαύγειας του θαλάσσιου πυθμένα ( $\rho$ ) ή/και ανακλαστικότητας ιζήματος αυτού ( $R_b$ ) ή/και τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $E_d$ ). Η δε ακρίβειά τους αυξάνει εάν υπάρχουν διαθέσιμες και μετρήσεις για τα φαινόμενα του φθορισμού που προκαλείται

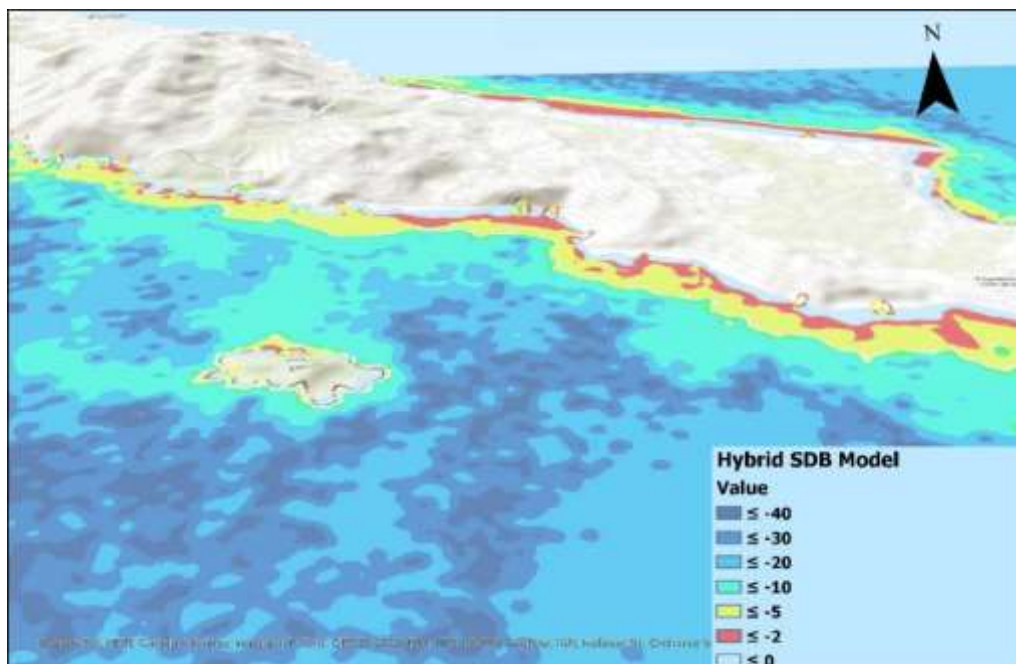
από την χλωροφύλλη (fluorescence), και την μη-ελαστική σκέδαση των φωτονίων λόγω του φαινομένου Raman (Raman Emission), και της ταχύτητας του ανέμου στην παράκτια περιοχή μελέτης κατά την χρονική στιγμή λήψης της δορυφορικής εικόνας.

- 13.** Εκτιμάται, δε ως ουσιώδους σημασίας το γεγονός ότι το Υβριδικό μοντέλο λειτούργησε με ικανοποιητική ακρίβεια και στην περίπτωση βαθμονόμησής του μόνο σε μία πολύ περιορισμένη έκταση (τοπικά) της όλης περιοχής μελέτης. Σχετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας στην περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου (Case Study 3), απέδειξαν ότι ενώ η βαθμονόμηση (εκπαίδευση) του μοντέλου έγινε χρησιμοποιώντας βάθη προερχόμενα μόνο από τον όρμο Γέρακα, το Υβριδικό μοντέλο υπολόγισε, τη βαθυμετρία σε ολόκληρη την παράκτια περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου, με μικρότερα σφάλματα (RMSE) από ότι ο Αναλογικός αλγόριθμος. Αντίστοιχες δοκιμές, δηλαδή υπολογισμός της βαθυμετρίας και στατιστική αξιολόγησή της σε μία ευρύτερη παράκτια ζώνη, χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου μόνο από ένα μικρό τμήμα αυτής, δεν έχουν διενεργηθεί στο παρελθόν από ότι προκύπτει από μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας. Επίσης, σχετικά πειράματα δεν έχουν πραγματοποιηθεί με τα μοντέλα εξαγωγής βαθυμετρίας που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.1 της παρούσας διατριβής ώστε να αξιολογηθεί η επάρκεια των υπόψη μοντέλων βαθυμετρίας στην προαναφερόμενη δυνατότητα.
- 14.** Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημα του Υβριδικού μοντέλου είναι ότι για την εκτέλεσή του απαιτούνται ελάχιστα μέσα, ενώ δύναται να λειτουργήσει και με ελεύθερα λογισμικά. Αντιθέτως, τα Αναλυτικά μοντέλα εξαγωγής βαθυμετρίας απαιτούν εκτεταμένους υπολογισμούς και παράλληλα προϋποθέτουν την διάθεση πολύ ακριβών πόρων (υπολογιστικών συστημάτων, λογισμικών βελτιστοποίησης, χρόνο), και ταυτόχρονα συλλογή κοστοβόρων δεδομένων πεδίου.

## 5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΕΝΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ

### 5.2.1 Σύγκριση της Ακρίβειας του Δημιουργηθέντος Μοντέλου με τις Διεθνείς Προδιαγραφές Εκτέλεσης Υδρογραφικών Εργασιών

Επισημάνθηκε στις προηγούμενες ενότητες, ότι η διερεύνηση και εξαγωγή της βαθυμετρίας από παράκτιες θαλάσσιες περιοχές, με χρήση ψηφιακών δορυφορικών εικόνων (Εικόνα 5.26) υψηλής χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας, αποτελεί ένα πεδίο υψηλού επιστημονικού ενδιαφέροντος μέχρι σήμερα. Παρόλο που η εξαγόμενη από τους δορυφόρους Βαθυμετρία (SDB) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι για παράδειγμα η ταχεία κάλυψη δεδομένων σε μεγάλης έκτασης περιοχές, ο υπολογισμός βαθών σε απομακρυσμένες περιοχές, ή η καλύτερη ικανότητα ανίχνευσης αντικειμένων στα ρηχά ύδατα από ότι στην περίπτωση της παραδοσιακής βυθομετρικής βολίδας (Leadline) ή τα ακουστικά συστήματα μονής δέσμης (Single-beam Echosounders), ωστόσο δεν έχει



Εικόνα 5.26 : Εξαγώμενη Βαθυμετρία (3D όψη) από το Υβριδικό μοντέλο για την περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζάκυνθος.

αξιοποιηθεί στα αντικείμενα που αφορούν στην ασφάλεια της πλοήγησης σκαφών όσο θα αναμενόταν.

Η βαθυμετρία σχετίζεται με την τρίτη διάσταση (συντεταγμένη) περιγραφής του υποθαλάσσιου χώρου, δηλαδή του βάθους ( $z$ ). Οι άλλες δύο συντεταγμένες ( $x$ ,  $y$ ) περιγράφουν την οριζοντιογραφική ακρίβεια της τρίτης, δηλαδή εκείνης του βάθους. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια ενός βάθους που εξάγεται από μία δορυφορική εικόνα εξαρτάται από την χωρική ανάλυση αυτής, ήτοι το μέγεθος του εικονοστοιχείου της και την ακρίβεια με την οποία έχει γίνει η γεωαναφορά της εκάστοτε εικόνας στο επιθυμητό Γεωδαιτικό και Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς. Η κατακόρυφη ακρίβεια του βάθους που προέρχεται από την ανάλυση της δορυφορικής εικόνας εξαρτάται, όπως προαναφέρθηκε, από διάφορους παράγοντες όπως την ατμοσφαιρική διόρθωση που έχει πραγματοποιηθεί στην εικόνα, εάν έχει γίνει διόρθωση ως προς τον θόρυβο που προέρχεται από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας και της ελεύθερης επιφάνειας των υδάτων, εάν έχει γίνει διόρθωση ως προς τον θόρυβο που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας (ηλιακού φωτός) και της υδάτινης στήλης, από τον τύπο του μοντέλου-αλγορίθμου υπολογισμού της βαθυμετρίας ( $z$ ).

Από την άλλη πλευρά, η (κατακόρυφη) ακρίβεια μέτρησης του βάθους με τα ακουστικά συστήματα, στα οποία αναφέρονται (κυρίως) οι Διεθνείς προδιαγραφές (IHO, S-44), εξαρτάται από το μέγεθος του «αποτυπώματος» (footprint) της ακουστικής (ηχητικής) δέσμης του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου ηχοβολιστικού συστήματος μέτρησης (Echosounder), το οποίο εξαρτάται από την γωνία εκπομπής του ηχητικού σήματος (beamwidth) και το βάθος της θαλάσσιας περιοχής μελέτης. Όσο μικρότερο είναι το «αποτύπωμα» στον πυθμένα της ηχητικής δέσμης τόσο καλύτερη η ανάλυση του συστήματος. Ωστόσο, μικρά αποτυπώματα στο θαλάσσιο πυθμένα δεν εξασφαλίζουν (συνήθως) την απαίτηση του προτύπου S-44 για 100% κάλυψη πυθμένα που αποτελεί υποχρεωτική προϋπόθεση των περιοχών υδρογράφησης της Ειδικής Κατηγορίας και της Κατηγορίας 1<sup>α</sup> (Πίνακας 2.6).

Σημαντικό δε, είναι το γεγονός ότι με τις μεθόδους εξαγωγής βαθυμετρίας από δορυφορικές εικόνες (Satellite Derived Bathymetry), το βάθος μετριέται με βάση την φασματική απόκριση του ιζήματος του πυθμένα, ενώ στην περίπτωση των ακουστικών αισθητήρων το βάθος, που μετριέται, προέρχεται από το ρηχότερο σημείο του πυθμένα, που θα συναντήσει η ηχητική δέσμη κατά την διάδοσή της προς αυτόν.

Και στις δύο περιπτώσεις υπολογισμού βαθυμετρίας, εκτός των περιπτώσεων που χρησιμοποιούνται υψηλής ανάλυσης ηχοβολιστικά συστήματα πολλαπλής δέσμης, το τελικό αποτέλεσμα είναι μία «γενικευμένη» απόδοση της γεωμορφολογίας/ανάγλυφου του πυθμένα. Η ανάλυση της υπόψη γεωμορφολογίας στην μεν περίπτωση των ηχητικών συστημάτων εξαρτάται από την ακρίβεια του συστήματος προσδιορισμού θέσης και το μέγεθος του αποτυπώματος της δέσμης στον πυθμένα στη δε περίπτωση της δορυφορικής βαθυμετρίας από την χωρική και φασματική διακριτική ικανότητα (resolution) της εικόνας.

Σύμφωνα με τον IHO, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή κατακόρυφης αβεβαιότητας ή σφάλματος (TVU), σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, είναι συνάρτηση του τελικώς διορθωμένου βάθους (reduced depth- $d$ ) και δύο (2) άλλων παραμέτρων ( $a$ ) και ( $b$ ), και δίνεται από την εξισ. 5.6.

$$TVU = \pm\sqrt{a^2 + (b \times d)^2} \quad (\text{εξισ. 5.6})$$

όπου,

όπου η παράμετρος  $a$  αντιπροσωπεύει το τμήμα της αβεβαιότητας που δεν μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος, αλλά συνήθως σχετίζεται με τον ηλεκτρονικό θόρυβο του συστήματος και

$b$  είναι ένας συντελεστής που αντιπροσωπεύει το τμήμα της αβεβαιότητας που ποικίλει ανάλογα με το βάθος, που συνδέεται κυρίως με τη φυσική της αλληλεπίδρασης της ακουστικής ενέργειας με το νερό κατά την διάδοσή της στο υδάτινο μέσο.

$d$  είναι το βάθος,

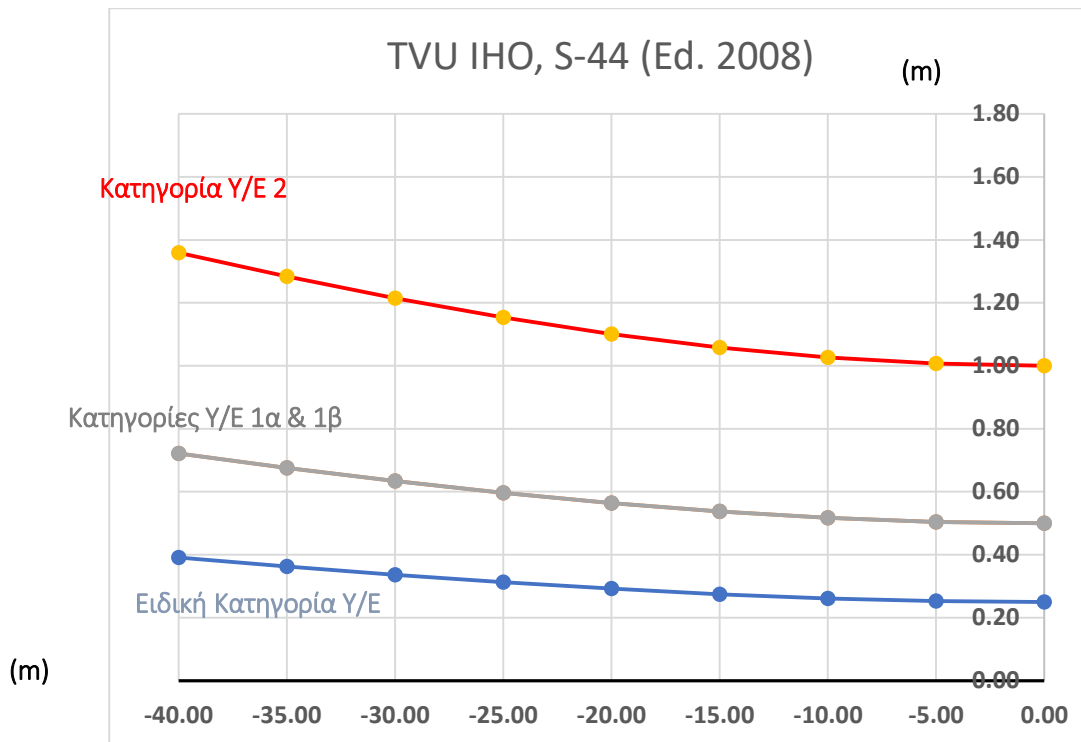
$b \times d$  αντιπροσωπεύει το ποσοστό της αβεβαιότητας/σφάλματος το οποίο εξαρτάται από την μεταβολή του βάθους.

Επιλύοντας την εξισ. 5.6 προκύπτει ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη αβεβαιότητα βάθους (Total Vertical Uncertainty -TVU) για τα τελικώς επεξεργασμένα βάθη (reduced depths), για το εύρος βαθών από 0-40 m, κυμαίνεται μεταξύ 0,25 m - 0,391 m, για την Ειδική Κατηγορία Υδρογράφησης (Special Order), μεταξύ 0,50 m - 0,72 m, για την Κατηγορία 1α και 1β (Order 1a & Order 1b), και από 1,00 m έως 1,359 m για την Κατηγορία Υδρογράφησης 2 (Order 2), αντίστοιχα (Εικόνα 5.27). Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ικανότητα μέτρησης του ηχοβολιστικού συστήματος έρευνας, με την προαναφερόμενη ακρίβεια, πρέπει να

αποδεικνύεται στο πεδίο και όχι να είναι η θεωρητική που ανεφέρει ο εκάστοτε κατασκευαστής του συστήματος.

Τονίζεται ότι η συγκεκριμένη κατακόρυφη ακρίβεια στην περίπτωση των ηχοβολιστικών συστημάτων μέτρησης εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, οι οποίοι τις περισσότερες φορές δεν λαμβάνονται υπόψη με την δέουσα σημασία κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου. Για παράδειγμα με πόση ακρίβεια μετρώνται οι αποκλίσεις (vertical offsets) μεταξύ του συστήματος προσδιορισμού θέσης και του αισθητήρα μέτρησης του βάθους, ή της θέσης του κέντρου εκπομπής της δέσμης του εκάστοτε sonar, ή με πόση ακρίβεια προσδιορίζεται το ύψος της κεραίας του συστήματος προσδιορισμού θέσης; Οι εν λόγω παράγοντες δημιουργίας αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις του βάθους (z) δεν υφίστανται στην περίπτωση του υπολογισμού της βαθυμετρίας από δορυφορικές εικόνες.

Ένα επίσης κρίσιμο ζήτημα για τις κατηγορίες Special Order και Order 1a είναι ότι το χρησιμοποιούμενο σύστημα συλλογής βαθυμετρικών δεδομένων πρέπει να έχει την ικανότητα να επιτυγχάνει 100% βαθυμετρική κάλυψη. Ως εκ τούτου, τίθεται το ερώτημα πόσο συχνά οι υδρογραφικές έρευνες με χρήση συμβατικών ακουστικών συστημάτων, μπορούν να ικανοποιήσουν αυτή την εξειδικευμένη προδιαγραφή στον πραγματικό κόσμο, ιδιαίτερα σε περιοχές με απότομη και πολύ ανομοιόμορφη τοπογραφία του θαλάσσιου βυθού. Από την άλλη πλευρά τα εξαγόμενα αποτελέσματα της δορυφορικής βαθυμετρίας όπως αποδείχτηκε στο παρόν κεφάλαιο, καλύπτουν το 100% της επιφάνειας του υδάτινου πυθμένα.



**Εικόνα 5.27 :** Συνολική Κατακόρυφη Αβεβαιότητα (Total Vertical Uncertainty-TVU) για την Ειδική Κατηγορία (μπλε χρώμα), τις Κατηγορίες 1α & 1β (πράσινο χρώμα) και για την Κατηγορία 2 (κόκκινο χρώμα) Υδρογραφικών Ερευνών κατά ΙΗΟ.

Επιπρόσθετα, τα πρότυπα του ΙΗΟ απαιτούν ότι το χρησιμοποιούμενο ηχοβολιστικό σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να εντοπίζει (πιστοποιημένα) υποθαλάσσια αντικείμενα με διαστάσεις μεγαλύτερες από 1 m, στις παράκτιες περιοχές της «Ειδικής Κατηγορίας», ενώ για τις περιοχές της «Κατηγορίας 1α» το βαθυμετρικό σύστημα θα πρέπει να εντοπίζει αντικείμενα με διαστάσεις μεγαλύτερα από 2 m. Το ερώτημα που τίθεται είναι πόσα συμμετρικά υποθαλάσσια χαρακτηριστικά ή αντικείμενα «κυβικού σχήματος» υπάρχουν σε έναν πραγματικό βυθό;

Συνοψίζοντας, τονίζεται ότι συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του δημιουργηθέντος μοντέλου δορυφορικής βαθυμετρίας (Hybrid Model), με τις διεθνείς προδιαγραφές εκτέλεσης υδρογραφικών εργασιών/βαθυμετρίας διαπιστώνεται ότι :

α. Ειδική Κατηγορία Υ/Ε (Special Order)

- Η οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των 2,0 m, σε ποσοστό εμπιστοσύνης 95%, καλύπτεται από τους πολυφασματικούς αισθητήρες πολύ υψηλής ανάλυσης με διάσταση εικονοστοιχείου τουλάχιστον 2,0 m.
- Η ακρίβεια βάθους 0,25 m - 0,391 m, δύναται να ικανοποιηθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις/συνθήκες (πολύ καλή αμοσφαιρική διόρθωση, γνώση της λευκαύγειας του υδάτινου πυθμένα μελέτης κοκ.) στα ρηχά ύδατα μέχρι βάθους 10,0 m περίπου. Σε μεγαλύτερα βάθη η εν λόγω απαίτηση δεν δύναται να ικανοποιηθεί.
- Η δυνατότητα εντοπισμού υποθαλασσίων στόχων με διάσταση 1×1×1 m, δύναται να ικανοποιηθεί από τους αισθητήρες πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (π.χ. PLEIADES).
- Ικανοποιείται η απαίτηση για κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα σε ποσοστό 100 %.

β. Κατηγορία Υ/Ε 1α & 1β (Order 1a & Order 1b)

- Η οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των  $5\text{ m} + 5\% \times d$ , σε ποσοστό εμπιστοσύνης 95%, καλύπτεται από τους πολυφασματικούς αισθητήρες υψηλής ανάλυσης με διάσταση εικονοστοιχείου τουλάχιστον 5,0 m.
- Η ακρίβεια βάθους 0,50 m - 0,72 m, δύναται να ικανοποιηθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις/συνθήκες (πολύ καλή αμοσφαιρική διόρθωση, γνώση της λευκαύγειας του υδάτινου πυθμένα μελέτης κοκ.) στα ρηχά ύδατα μέχρι βάθους 10,0 m περίπου. Σε μεγαλύτερα βάθη η εν λόγω απαίτηση δεν δύναται να ικανοποιηθεί.
- Η δυνατότητα εντοπισμού υποθαλασσίων στόχων με διάσταση 2×2×2 m, δύναται να ικανοποιηθεί από τους αισθητήρες πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (π.χ. PLEIADES).
- Ικανοποιείται η απαίτηση για κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα σε ποσοστό 100 %.



γ. Κατηγορία Υ/Ε 2 (Order 2)

- Η οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των  $20 \text{ m} + 5\% \times d$ , σε ποσοστό εμπιστοσύνης 95%, καλύπτεται από όλους τους πολυφασματικούς αισθητήρες υψηλής και μεσαίας ανάλυσης.
- Η ακρίβεια βάθους 1,00 έως 1,359 m, δύναται να ικανοποιηθεί στα ρηχά προς μεσαίου βάθους ύδατα, ήτοι μέχρι βάθους 20,0 m περίπου. Ενώ σε μεγαλύτερα βάθη η εν λόγω απαίτηση δύναται να ικανοποιηθεί με συγκεκριμένες συνθήκες (πολύ καλή αμοσφαιρική διόρθωση, γνώση της λευκαύγειας του υδάτινου πυθμένα μελέτης, κοκ).
- Η δυνατότητα εντοπισμού υποθαλασσίων στόχων με διάσταση  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}$  δύναται να ικανοποιηθεί από τους αισθητήρες πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης.
- Ικανοποιείται η απαίτηση για κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα σε ποσοστό 100 %.

Λαμβανομένων υπόψη των παραπάνω, συμπεραίνεται ότι τα εξαγόμενα δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας, από το Υβριδικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, δύναται να καλύψουν τις ακόλουθες υδρογραφικές προδιαγραφές (Πίνακας 5.7).

**Πίνακας 5.7 :** Προδιαγραφές Υδρογραφικών Εργασιών στις οποίες δύνανται να αξιοποιηθούν δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας (SDB).

| Survey Order                                  | Special Order    |         | 1a                      |         | 1b                                  |         |
|---|------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
| Total Horizontal Uncertainty (THU)            | 2,0 m            |         | 5 m + 5% × <i>d</i>     |         | 20 m + 5% × <i>d</i>                |         |
| Survey Order                                  | Special Order    |         | 1a                      |         | 1b                                  |         |
| Total Vertical Uncertainty (TVU) <sup>1</sup> | 5 m              | 0,253 m | 5 m                     | 0,504 m | 5 m                                 | 1,007 m |
|   | 10 m             | 0,261 m | 10 m                    | 0,517 m | 10 m                                | 1,026 m |
|   | 15 m             | 0,274 m | 15 m                    | 0,537 m | 15 m                                | 1,058 m |
|   | 20 m             | 0,292 m | 20 m                    | 0,564 m | 20 m                                | 1,101 m |
|   | 25 m             | 0,313 m | 25 m                    | 0,596 m | 25 m                                | 1,154 m |
|   | 30 m             | 0,336 m | 30 m                    | 0,634 m | 30 m                                | 1,215 m |
|   | 35 m             | 0,363 m | 35 m                    | 0,676 m | 35 m                                | 1,284 m |
| Feature Detection                             | 1 m <sup>3</sup> |         | 2 m <sup>3</sup>        |         | 2 m <sup>3</sup>                    |         |
| Full Seafloor Coverage                        | Mandatory        |         | Needed in certain areas |         | Maybe is necessary in certain areas |         |

- Οι τιμές της TVU αναφέρονται στις μέσες τιμές σφάλματος ανά κατηγορία περιοχής υδρογράφησης για το εύρος βαθών από 0-40 m.
- Τα πράσινα φαντρία (cells) αφορούν σε προδιαγραφές οι οποίες ικανοποιούνται από τα δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας (SDB).
- Τα ιώδη (μωβ) φαντρία αφορούν σε προδιαγραφές οι οποίες ικανοποιούνται με συγκεκριμένες συνθήκες διάδοσης της ακτινοβολίας.
- Τα κόκκινα φαντρία αφορούν σε προδιαγραφές οι οποίες δεν ικανοποιούνται από τα δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας.

## **5.2.2 Δυνατότητες Αξιοποίησης των Αποτελεσμάτων της Διδακτορικής Έρευνας για την Έκδοση και Ενημέρωση Ναυτικών Χαρτών**

Το ζήτημα που τίθεται συνήθως είναι το κατά πόσο η ακρίβεια των μετρήσεων βάθους- θέσης που προκύπτει από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, είναι εντός των προδιαγραφών για την κατασκευή των ναυτικών χαρτών που προορίζονται για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, την οποία αποδέχεται ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός (International Hydrographic Organization), και ικανοποιείται μέχρι σήμερα, εν μέρει, από τα ακουστικά συστήματα μέτρησης τους βάθους ή τα ενεργητικά οπτικά (laser) συστήματα τηλεανίχνευσης (LIDAR). Δηλαδή, είναι συγκρίσιμο ένα βάθος που συλλέγεται από έναν ακουστικό αισθητήρα με ένα βάθος που εξάγεται από την φασματική ανάλυση μίας δορυφορικής εικόνας; Μπορεί να φαίνεται «φιλοσοφικού τύπου» ερώτημα/ζήτημα, ωστόσο στην παρούσα διατριβή γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης και απάντησης του, με σκοπό να προκύψουν κάποιες προτάσεις που θα συνεισφέρουν στο μέλλον στην καλύτερη αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων βαθυμετρίας για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας.

Για να απαντηθούν τα παραπάνω θέματα, θα πρέπει προηγουμένως να καταγραφούν κάποιες κρίσιμες παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν την λύση του προβλήματος της χρήσης των δορυφορικών δεδομένων στους ναυτικούς χάρτες και στις άλλες ναυτιλιακές εκδόσεις.

Καταρχάς, είναι αυτονόητο το γεγονός ότι η βαθυμετρία αποτελεί την βασική πληροφορία, η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή ναυτικών χαρτών (έντυπων και Η/Ν). Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο ΙΗΟ έχει υιοθετήσει ελαφρώς διαφορετικά πρότυπα ακρίβειας για τα χαρτογραφικά προϊόντα, από τα πρότυπα εκτέλεσης των υδρογραφικών ερευνών/εργασιών πεδίου, τα οποία κατηγοριοποιεί ποιοτικά σε «Ζώνες Εμπιστοσύνης» (Zones of Confidence-ZOC).

Οι «Ζώνες Εμπιστοσύνης» (ZOC) αποτελούν πληροφορία αξιολόγησης της ποιότητας των υδρογραφικών/βαθυμετρικών δεδομένων, με τα οποία εκπονήθηκε ένας ναυτικός χάρτης. Η χρήση των διαγραμμάτων ZOC παρέχει την σχετική συνεκτικότητα που απαιτείται στην εμφάνιση των πηγών δεδομένων μεταξύ ψηφιακών και έντυπων ναυτικών χαρτών, καθώς οι ορισμοί της κατηγορίας Ζώνες εμπιστοσύνης (CATZOC) προέρχονται απευθείας από το πρότυπο S-57.

Πιο συγκεκριμένα, για τους έντυπους και ηλεκτρονικούς ναυτικούς χάρτες οι προδιαγραφές για κάθε ζώνη εμπιστοσύνης παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακας 5.8. Ο χαρακτηρισμός των θαλάσσιων περιοχών σύμφωνα με τις Ζώνες Εμπιστοσύνης (ZOC) ουσιαστικά ενημερώνει τον ναυτιλλόμενο εάν οι αναγραφόμενες στην περιοχή βαθυμετρικές πληροφορίες ικανοποιούν τις ελάχιστες προδιαγραφές ακρίβειας (95% CI, 2.45 sigma) θέσης και βάθους, καθώς και την προδιαγραφή κάλυψης του θαλάσσιου πυθμένα. Τονίζεται ότι οι ακρίβειες ή αβεβαιότητες στην θέση και το βάθος για κάθε περίπτωση περιοχής Εμπιστοσύνης αναφέρονται στα σφάλματα των τελικώς αποδιδόμενων βαθών στους χάρτες. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι ακρίβειες του Πίνακα 5.8 περιλαμβάνουν όχι μόνο τις αβεβαιότητες/σφάλματα του πεδίου αλλά και τα τυχόν σφάλματα που εμφυλοχωρούνται κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των χαρτογραφικών δεδομένων κατά το στάδιο της παραγωγής των.

Η αναγραφόμενη ακρίβεια για τις Ζώνες εμπιστοσύνης B, C και D δεν είναι (πάντα) απαραίτητο να υπολογιστεί, αλλά μπορεί και να εκτιμηθεί με βάση τις πληροφορίες ποιοτικού ελέγχου των πρωτογενών δεδομένων, από τα οποία παρήχθη ο εκάστοτε ναυτικός χάρτης. Η εν λόγω εκτίμηση ακρίβειας πιθανόν να περιλαμβάνει υποκειμενικού τύπου σφάλματα τα οποία εξαρτώνται από την εμπειρία του κάθε χαρτογράφου.

Διευκρινίζεται ότι ως «Σημαντικά αντικείμενα/χαρακτηριστικά» θαλάσσιου πυθμένα ορίζονται εκείνα που διαφέρουν από τα απεικονιζόμενα βάθη κατά περισσότερο από 2 m για βάθη έως 40 m και σε ποσοστό 10% του βάθους για τα βάθη μεγαλύτερα των 40 m.

Επίσης, ο όρος «πλήρης κάλυψη» του θαλάσσιου πυθμένα σημαίνει ότι έχει διεξαχθεί συστηματική έρευνα βυθού χρησιμοποιώντας συστήματα ανίχνευσης, ή συστήματα μέτρησης βάθους, ή κατάλληλες διαδικασίες, ή έμπειρο και εκπαιδευμένο προσωπικό, το οποίο δύναται να εντοπίζει και να μετρά αξιόπιστα το υπερκείμενο ελεύθερο βάθος σε σημαντικά υποθαλάσσια χαρακτηριστικά/αντικείμενα.

**Πίνακας 5.8 :** Κατηγορίες Ζωνών Εμπιστοσύνης (ZOC) Έντυπων και Ηλεκτρονικών Ναυτικών Χαρτών.

| 1    | 2                            | 3                             |              | 4   | 5  |
|------|------------------------------|-------------------------------|--------------|---|--|
| ZOC  | Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης | Ακρίβεια Προσδιορισμού Βάθους |              | Κάλυψη Πυθμένα  | Τυπικά Χαρακτηριστικά Υδρογράφησης   |
| A1   | ± 5 m + 5% του βάθους        | 0,5 m + 1%×d                  |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα. Σημαντικά χαρακτηριστικά στο θαλάσσιο πυθμένα έχουν εντοπιστεί και έχει μετρηθεί το ελεύθερο βάθος άνωθεν αυτών. | Συστηματική Υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην εν λόγω περιοχή, με υψηλές ακρίβειες στον προσδιορισμό θέσης και βάθους με χρήση DGPS ή τουλάχιστον 3 γραμμές θέσεως και με χρήση ηχοβολιστικού πολλαπλής δέσμης ή μηχανικού συστήματος γρίψισης. |
|      |                              | Βάθος (m)                     | Ακρίβεια (m) |   |  |
|      |                              | 10                            | ±0,6         |   |  |
|      |                              | 30                            | ±0,8         |   |  |
|      |                              | 100                           | ±1,5         |   |  |
| 1000 | ±10,5                        |                               |              |   |  |
| A2   | ± 20 m                       | 1,0 m + 2%×d                  |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα. Σημαντικά χαρακτηριστικά στο θαλάσσιο πυθμένα έχουν εντοπιστεί και έχει μετρηθεί το ελεύθερο βάθος άνωθεν αυτών. | Συστηματική Υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην εν λόγω περιοχή, με υψηλές ακρίβειες στον προσδιορισμό θέσης και βάθους μικρότερες όμως εκείνων της ZOC A1 με χρήση σύγχρονου ηχοβολιστικού μονής δέσμης ή μηχανικού συστήματος γρίψισης.         |
|      |                              | Βάθος (m)                     | Ακρίβεια (m) |   |  |
|      |                              | 10                            | ±1,2         |   |  |
|      |                              | 30                            | ±1,6         |   |  |
|      |                              | 100                           | ±3,0         |   |  |
| 1000 | ±21,0                        |                               |              |   |  |

| 1   | 2                            | 3                             |              | 4   | 5  |
|-----|------------------------------|-------------------------------|--------------|---|--|
| ZOC | Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης | Ακρίβεια Προσδιορισμού Βάθους |              | Κάλυψη Πυθμένα  | Τυπικά Χαρακτηριστικά Υδρογράφησης   |
| B   | ± 50 m                       | 1,0 m + 2%×d                  |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα δεν έχει επιτευχθεί. Μη χαρτογραφημένα υποθαλάσσια αντικείμενα, επικίνδυνα για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας δεν αναμένονται αλλά πιθανόν να υπάρχουν. | Συστηματική Υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην εν λόγω περιοχή, με παρόμοιες ακρίβειες στον προσδιορισμό βάθους αλλά με μικρότερες ακρίβειες στον προσδιορισμό θέσης από εκείνες της ZOC A2 με χρήση σύγχρονου ηχοβολιστικού μονής δέσμης αλλά όχι με μηχανικό σύστημα γρίπησης. |
|     |                              | Βάθος (m)                     | Ακρίβεια (m) |   |  |
|     |                              | 10                            | ±1,2         |   |  |
|     |                              | 30                            | ±1,6         |   |  |
|     |                              | 100                           | ±3,0         |   |  |
|     |                              | 1000                          | ±21,0        |   |  |
| C   | ± 500 m                      | 2,0 m + 5%×d                  |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα δεν έχει επιτευχθεί. Ανωμαλίες στον πυθμένα πιθανόν να υπάρχουν.  | Χαμηλής ακρίβειας υδρογράφηση έχει εκτελεστεί στην περιοχή ή έχουν συλλεχθεί δεδομένα σε ευκαιριακή βάση, όπως για παράδειγμα κατά την διάρκεια πλου πλοίων.   |
|     |                              | Βάθος (m)                     | Ακρίβεια (m) |   |  |
|     |                              | 10                            | ±2,5         |   |  |
|     |                              | 30                            | ±3,5         |   |  |
|     |                              | 100                           | ±7,0         |   |  |
|     |                              | 1000                          | ±52,0        |   |  |
| D   | Χειρότερη εκείνης της ZOC C  | Χειρότερη εκείνης της ZOC C   |              | Πλήρης έρευνα του θαλασσίου πυθμένα δεν έχει επιτευχθεί. Μεγάλες ανωμαλίες στον πυθμένα πιθανόν να αναμένονται.   | Δεδομένα χαμηλής ακρίβειας ή δεδομένα των οποίων η ποιότητα δεν μπορεί να αξιολογηθεί λόγω ελλείψεις σχετικών πληροφοριών.   |

| 1   | 2   | 3                                   | 4              | 5                                     |
|-----|---|-------------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| ZOC | Ακρίβεια<br>Προσδιορισμού<br>Θέσης                                      | Ακρίβεια<br>Προσδιορισμού<br>Βάθους | Κάλυψη Πυθμένα | Τυπικά Χαρακτηριστικά<br>Υδρογράφησης |
| U   | Δεδομένα των οποίων η βαθυμετρική ακρίβεια δεν έχει εισέτι αξιολογηθεί. |                                     |                |                                       |

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα του εκπονηθέντος μοντέλου εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας (Hybrid Model) της παρούσας διατριβής με τις απαιτήσεις ακρίβειας των ναυτικών χαρτών προκύπτει ότι:

α. CATZOC A1

- Η οριζοντιογραφική ακρίβεια των  $\pm 5 \text{ m} + 5\% \times d$ , σε ποσοστό εμπιστοσύνης 95%, καλύπτεται από όλους τους πολυφασματικούς αισθητήρες υψηλής ανάλυσης (π.χ. PLEIADES).
- Η ακρίβεια βάθους  $\pm 0,6 \text{ m}$ , δύναται να ικανοποιηθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις/συνθήκες (πολύ καλή αμοσφαιρική διόρθωση, γνώση της λευκαύγειας του υδάτινου πυθμένα μελέτης, κοκ.) στα ρηχά ύδατα μέχρι βάθους 10,0 m περίπου. Σε μεγαλύτερα βάθη η εν λόγω απαίτηση δεν δύναται να ικανοποιηθεί.
- Ικανοποιείται η απαίτηση για κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα σε ποσοστό 100 %.

β. CATZOC A2

- Η οριζοντιογραφική ακρίβεια των  $\pm 20 \text{ m}$ , σε ποσοστό εμπιστοσύνης 95%, καλύπτεται από όλους τους πολυφασματικούς αισθητήρες υψηλής και μεσαίας ανάλυσης (π.χ. PLEIADES, SENTINEL-2).
- Η ακρίβεια βάθους  $\pm 1,2 \text{ m}$ , ικανοποιείται στα ρηχά ύδατα μέχρι βάθους 10,0 m περίπου, ενώ σε βάθη έως 30,0 m η ακρίβεια των  $\pm 1,6 \text{ m}$  δύναται να ικανοποιηθεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις όπως για παράδειγμα πολύ καλής αμοσφαιρικής διόρθωσης, γνώση της λευκαύγειας του υδάτινου πυθμένα μελέτης, κοκ.

- Ικανοποιείται η απαίτηση για κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα σε ποσοστό 100 %.

γ. CATZOC B

- Η οριζοντιογραφική ακρίβεια των  $\pm 50$  m, σε ποσοστό εμπιστοσύνης 95%, καλύπτεται από όλους τους πολυφασματικούς αισθητήρες υψηλής και μεσαίας ανάλυσης (π.χ. PLEIADES, SENTINEL-2, LANDSAT 8).
- Η ακρίβεια βάθους  $\pm 1,2$  m, ικανοποιείται στα ρηχά ύδατα μέχρι βάθους 10,0 m περίπου, ενώ σε βάθη έως 30,0 m η ακρίβεια των  $\pm 1,6$  m δύναται να ικανοποιηθεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις όπως για παράδειγμα πολύ καλής αμοσφαιρικής διόρθωσης, γνώση της λευκαύγειας του υδάτινου πυθμένα μελέτης, κοκ.
- Ικανοποιείται η απαίτηση για κάλυψη του θαλάσσιου πυθμένα σε ποσοστό 100 %.

Λαμβανομένων υπόψη των παραπάνω, συμπεραίνεται ότι τα εξαγόμενα δεδομένα, δορυφορικής βαθυμετρίας με το Υβριδικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, δύναται να καλύψουν τις ακόλουθες χαρτογραφικές προδιαγραφές (Πίνακας 5.9).

**Πίνακας 5.9 :** Προδιαγραφές Ζωνών Εμπιστοσύνης (ZOC) στις οποίες δύναται να αξιοποιηθούν δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας (SDB).

| CATZOC                             | A1                               |            | A2                 |            | B                  |            |
|------------------------------------|----------------------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
| Total Horizontal Uncertainty (THU) | $\pm 5 \text{ m} + 5\% \times d$ |            | $\pm 20 \text{ m}$ |            | $\pm 50 \text{ m}$ |            |
| Total Vertical Uncertainty (TVU)   | 10                               | $\pm 0,6$  | 10                 | $\pm 1,2$  | 10                 | $\pm 1,2$  |
|                                    | 30                               | $\pm 0,8$  | 30                 | $\pm 1,6$  | 30                 | $\pm 1,6$  |
|                                    | 100                              | $\pm 1,5$  | 100                | $\pm 3,0$  | 100                | $\pm 3,0$  |
|                                    | 1000                             | $\pm 10,5$ | 1000               | $\pm 21,0$ | 1000               | $\pm 21,0$ |



| CATZOC                 | A1   | A2   | B            |
|------------------------|------|------|--------------|
| Full Seafloor Coverage | 100% | 100% | not achieved |

- Οι τιμές της TVU αναφέρονται στις μέσες τιμές σφάλματος ανά κατηγορία περιοχής υδρογράφησης για το εύρος βαθών από 0-40 m.
- Τα πράσινα φατνία (cells) αφορούν σε προδιαγραφές οι οποίες ικανοποιούνται από τα δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας (SDB).
- Τα ιώδη φατνία αφορούν σε προδιαγραφές οι οποίες οριακά δεν ικανοποιούνται από τα δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας.
- Τα κόκκινα φατνία αφορούν σε προδιαγραφές οι οποίες δεν ικανοποιούνται από τα δεδομένα δορυφορικής βαθυμετρίας.
- Τα κίτρινα φατνία (cells) αφορούν σε τιμές προδιαγραφών μη συγκρίσιμες με τα αποτελέσματα της δορυφορικής βαθυμετρίας λόγω του πολύ μεγάλου βάθους.

Επιπρόσθετα, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι στα αποτελέσματα των πειραμάτων της παρούσας εργασίας εμφυλοχώρησαν σφάλματα, τα οποία προκάλεσαν επιπρόσθετες αβεβαιότητες στα αποτελέσματα του υβριδικού μοντέλου βαθυμετρίας, τα οποία οφείλονται στα ακόλουθα γεγονότα:

- α. Στη μη γνώση της στάθμης της θάλασσας (παλίρροιας) κατά τον χρόνο λήψης των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν και στις 3 περιπτώσεις των περιοχών μελέτης.
- β. Στη παλαιότητα των χαρτογραφικών-βαθυμετρικών δεδομένων του ΧΕΕ 423/2 που καλύπτει την περιοχή του στενού ν. Πάρου-Αντιπάρου.
- γ. Στον αναγκαστικό αποκλεισμό μεγάλου αριθμού εικονοστοιχείων λόγω του θορύβου της θάμβωσης, από την εικόνα Pleiades που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα για την μελέτη της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής της μαρίνας του Αγ. Κοσμά.
- δ. Στη μη γνώση της στάθμης της θάλασσας (παλίρροιας) κατά τον χρόνο εκτέλεσης της βαθυμετρικής εργασίας πεδίου, στοιχεία της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου στην περιοχή του κόλπου Λαγανά ν. Ζακύνθου.

ε. Στη πολύ μικρή σχετικά κλίμακα (1:250 000) του ναυτικού χάρτη ΧΕΕ 22 που καλύπτει την ν. Ζάκυνθο, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συγκριτικά στοιχεία.

Όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, τα δεδομένα βαθυμετρίας που προέρχονται από την δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορούν να καλύψουν ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας/κάλυψης των εν ισχύ ναυτικών χαρτών έντυπων και ηλεκτρονικών, αφού δύνανται να αξιοποιηθούν στις προαναφερόμενες κατηγορίες περιοχών.

Σύμφωνα με τους Sagar and Damlamian (2008), τα βαθυμετρικά δεδομένα που εξάγονται από τις δορυφορικές εικόνες πρέπει να χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικά εκείνων των υδρογραφικών δεδομένων που συλλέγονται από τα ηχοβολιστικά συστήματα πολλαπλής δέσμης (Multibeam Sonars), καθόσον οι δύο αυτές τεχνολογίες σπανίως συναντώνται – επικαλύπτονται σε θαλάσσιες περιοχές και ως εκ τούτου δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μεταξύ τους εφάμιλλες ή συγκρίσιμες.

Επίσης, σύμφωνα με το Εγχειρίδιο Παραγωγής Ναυτικών Χαρτών της NOAA (NOAA Nautical Chart Manual) συστήνεται ότι:

*“The use of SDB data is especially useful where vessel traffic or the deployment of aids to navigation indicate that charted data is misleading and there are no recent surveys to update the chart. However, SDB is not considered as a hydrographic survey but rather a reconnaissance survey. Thus, SDB data should be used for only generating depth curves and not to extract smooth-sheet soundings and should be considered as CATZOC C.”*

Ωστόσο, όπως αναλύθηκε στο παρόν Κεφάλαιο, τα αποτελέσματα της βαθυμετρίας, όπως αυτά υπολογίστηκαν με το Υβριδικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, είναι αρκετά ενθαρρυντικά. Για τον λόγο αυτό, είναι σκόπιμο να αξιοποιηθούν στο μέλλον τα συμπεράσματα της εν λόγω έρευνας, όπως αυτά συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 6, με περαιτέρω δοκιμές και ελέγχους, προς όφελος της ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής στην θάλασσα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ο βασικός σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η «διερεύνηση και η μελέτη ακρίβειας και αξιοπιστίας της εφαρμογής μεθοδολογιών για την εξαγωγή βαθυμετρίας από την επεξεργασία πολυφασματικών εικόνων, σε παράκτια ύδατα, για την υποστήριξη της ασφάλειας ναυσιπλοΐας». Ωστόσο, κατά την εκτελεσθείσα διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση των αλγορίθμων (μοντέλων) εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας, διαπιστώθηκε ότι οι υπάρχοντες αλγόριθμοι δεν κάλυπταν ικανοποιητικά τις απαιτήσεις έκδοσης και ενημέρωσης έντυπων και ηλεκτρονικών χαρτών επ' ωφελεία της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού (ΙΗΟ). Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε στην παρούσα έρευνα ένα νέο μοντέλο-διαδικασία εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας από ανάλυση πολυφασματικών δορυφορικών δεδομένων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του δημιουργηθέντος μοντέλου (Υβριδικό μοντέλο) εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας είναι τα ακόλουθα :

- Προ-επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων (Αναδειγματοληψία Ατμοσφαιρική διόρθωση, ραδιομετρική διόρθωση, αποθάμβωση, διόρθωση της επίδρασης υδάτινης στήλης, επικάλυψη περιοχών μη ενδιαφέροντος).
- Υπολογισμός της υποθαλάσσιας ανακλαστικότητας ( $r_{rs}(\lambda)$ ) και των λοιπών βιο-οπτικών χαρακτηριστικών ( $b_b(\lambda)$ ,  $\alpha(\lambda)$ ,  $K_d(\lambda)$ ) των υδάτων της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με τον ημι-αναλυτικό αλγόριθμο των Lee, *et al.*, (1999).
- Ταξινόμηση των υπό μελέτη υδάτων σε κλάσεις, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα βιο-οπτικά χαρακτηριστικά. Διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε υποπεριοχές/κλάσεις με ομοιογενή βιο-οπτικά χαρακτηριστικά.
- Υπολογισμός των λόγων (ratios) των προ-επεξεργασμένων φασματικών ζωνών, των βιο-οπτικών παραμέτρων των υδάτων και των λογαρίθμων αυτών.
- Βαθμονόμηση του μοντέλου με μικρό αριθμό δεδομένων πεδίου (βαθών), τα οποία προέρχονται είτε από βάρη που απεικονίζονται στους ναυτικούς χάρτες είτε από βάρη που συλλέγονται κατά την διάρκεια εργασιών πεδίου.

- Υπολογισμός (εξαγωγή) βαθυμετρίας, με χρήση της εξίσωσης παλινδρόμησης που παρουσιάζει τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού/γραμμικής συσχέτισης ( $R^2$ ), ως αυτή προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου.

- Εκτέλεση εκτενών δοκιμών-πειραμάτων αξιολόγησης του μοντέλου.

Η εκτέλεση των δοκιμών-πειραμάτων αξιολόγησης του μοντέλου έγινε ως εξής:

- Διενεργήθηκαν έλεγχοι-δοκιμές του μοντέλου με τρεις (3) διαφορετικούς δορυφορικούς αισθητήρες (Sentinel-2, Pleiades-1A, Landsat 8(OLI)), οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετική χωρική και φασματική ανάλυση, ενώ προέρχονται από διαφορετικές υπηρεσίες-παρόχους.
  - Έγιναν δοκιμές σε τρεις (3) διαφορετικές γεωγραφικά περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετική γεωμορφολογία πυθμένα και ακτής και διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες υδάτων.
  - Το υπόψη μοντέλο ελέγχθηκε και με δεδομένα πεδίου (όρμος Γέρακα, ν. Ζακύνθου) και με δεδομένα που αποτυπώνονται στους ναυτικούς χάρτες (περιοχές Στενού ν. Πάρου-Αντίπαρου και Αγ. Κοσμά-Ελληνικού).
  - Πραγματοποιήθηκε στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Υβριδικού μοντέλου με τα αποτελέσματα άλλου αλγορίθμου (Stumpf, *et al.*, 2003), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως διεθνώς.
  - Δοκιμάστηκε και αξιολογήθηκε η λειτουργία και η αποτελεσματικότητά του σε περιβάλλον λογισμικού ελεύθερο στο διαδίκτυο (ESA/SNAP Desktop).

Τα αποτελέσματα των εκτελεσθεισών δοκιμών αξιολόγησης του Υβριδικού μοντέλου εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής κατέδειξαν τα εξής :

- Το εν λόγω μοντέλο βαθμονομείται με πολύ μικρό αριθμό δεδομένων πεδίου (< 10 βάθη).
- Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε 3 παράκτιες διαφορετικές περιοχές, με τον εν λόγω αλγόριθμο (Hybrid Model) διαπιστώθηκε ότι εξάγεται με ικανοποιητική ακρίβεια η βαθυμετρία σε βάθη από 0-30 m, σε εκτεταμένες περιοχές, με ελάχιστο

οικονομικό κόστος και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, συγκριτικά με τον χρόνο και το κόστος που απαιτείται για την εκτέλεση των αντίστοιχων εργασιών πεδίου.

- Το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή δεν εξαρτάται από την ρύθμιση κάποιων παραμέτρων, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των πιο δημοφιλών αλγορίθμων βαθυμετρίας (Stumpf, *et al.*, 4SM, Lyzenga).
- Η ακρίβεια της εν λόγω μεθόδου διαπιστώνεται να είναι καλύτερη από τους υφιστάμενους σήμερα ημι-αναλυτικούς αλγορίθμους, ενώ φαίνεται ότι υπολογίζει τιμές σε μεγαλύτερα βάθη από τα υπάρχοντα μοντέλα εξαγωγής βαθυμετρίας από δορυφορικές πολυφασματικές εικόνες, με μικρότερα σφάλματα (Πίνακας 6.1).
- Η υπόψη τεχνική παρουσιάζει αυξημένη ακρίβεια και αξιοπιστία σε συνθήκες μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης (unsupervised classification), με βάση τις επικρατούσες βιο-οπτικές ιδιότητες των υδάτων της εκάστοτε περιοχής ενδιαφέροντος.
- Το εν λόγω μοντέλο αξιοποιεί στο μέγιστο βαθμό τους ήδη διατειθέμενους πόρους διαστήματος, ενώ εξάγει βαθυμετρία ικανοποιητικής ακρίβειας για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, με ελάχιστο οικονομικό κόστος και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, συγκριτικά με τον χρόνο και το κόστος που απαιτείται για την εκτέλεση των αντίστοιχων εργασιών πεδίου.

**Πίνακας 6.1 :** Υπολογισθέντα σφάλματα σε κάθε περιοχή μελέτης

| ΠΕΡΙΟΧΗ                                      | RMSE (m) |
|--|----------|
| Στενό ν. Πάρου-Αντίπαρου                     | 1,55     |
| Παράκτια περιοχή Μαρίνας Αγ. Κοσμά-Ελληνικού | 1,85     |
| Κ. Λαγανά ν. Ζακύνθου                        | 1,31     |

Με βάση τα προαναφερθέντα, εκτιμάται ότι η εξαγόμενη βαθυμετρική πληροφορία από το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή:

- ❖ Δύναται να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά με τα υπόλοιπα υδρογραφικά δεδομένα στην χαρτογραφική διαδικασία παραγωγής των έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών.
- ❖ Πρόκειται για μία τεχνική, η οποία μπορεί να αντιμετωπίσει τις δυσχέρειες που παρουσιάζονται σήμερα στην τακτή και ταχεία συλλογή βαθυμετρικών στοιχείων, καθόσον δύναται να συνεισφέρει στην σύντομη συμπλήρωση, παραγωγή και επικαιροποίηση των ναυτικών χαρτών.
- ❖ Η χαρτογραφική χρήση της μεθόδου της παρούσας εργασίας δύναται να εξοικονομήσει πόρους (ανθρώπινο δυναμικό, χρόνο, οικονομική δαπάνη), ώστε αυτά να διατεθούν από τους αρμόδιους φορείς σε άλλα έργα-δράσεις ή να εκτελεστούν εργασίες πεδίου σε άλλες περιοχές, εκεί δηλαδή που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην συλλογή των βαθυμετρικών δεδομένων.

Ταυτόχρονα, το Υβριδικό μοντέλο εξαγωγής βαθυμετρίας μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για την περαιτέρω υποστήριξη άλλων δραστηριοτήτων και προγραμμάτων, όπως η δημιουργία υποδομών θαλάσσιων γεωχωρικών δεδομένων MSDI (Marine Spatial data Infrastructure) σύμφωνα με τις συστάσεις και τις οδηγίες του IHO (IHO, 2017) και της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Ναυτιλιακής Ασφάλειας EMSA (EMSA, 2018).

Κατόπιν των ανωτέρω, παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα στα αντικείμενα εξαγωγής δορυφορικής βαθυμετρίας με χρήση του Υβριδικού μοντέλου:

- Αξιολόγηση του μοντέλου σε συνδυασμό με δεδομένα στάθμης θάλασσας (παλίρροιας) της περιοχής μελέτης και βαθυμετρικά δεδομένα πεδίου συλλεχθέντα με πιο σύγχρονα ακουστικά συστήματα (Multibeam sonars) ή οπτικά συστήματα τ. LIDAR.
- Έλεγχος του «Υβριδικού μοντέλου με πληροφορίες βιο-οπτικών παραμέτρων υδάτων (IOPs & AOPs) που προέρχονται από εξειδικευμένους για το σκοπό αυτό τηλεσκοπικούς αισθητήρες παρατήρησης υδάτων.
- Εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης (optimization techniques), κατά το στάδιο της βαθμονόμησης/εκπαίδευσής του μοντέλου, σε συνδυασμό με τεχνικές ταξινόμησης εκμάθησης μηχανής ή αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης. Στην συνέχεια θα πρέπει να συγκριθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τις διεθνείς προδιαγραφές του IHO.

- Επινόηση κατάλληλων χαρτογραφικών συμβόλων και επιτιμήσεων για τα δεδομένα βαθυμετρίας που υπολογίζονται μέσω των μοντέλων εξαγωγής βαθυμετρίας και τα οποία πιθανόν μελλοντικά να περιλαμβάνονται στους ναυτικούς χάρτες (έντυπους ή ηλεκτρονικούς).
- Επεξεργασία και ανάλυση εικόνων SAR με σκοπό την εξαγωγή βαθυμετρίας και έλεγχος της βαθυμετρίας από συνδυασμένα δορυφορικά δεδομένα ραντάρ (SAR) και πολυφασματικές (multispectral) εικόνες. Έλεγχος της ακρίβειας της εξαγόμενης βαθυμετρίας και μελέτη αξιοποίησης της στην κατασκευή ναυτιλιακών χαρτογραφικών προϊόντων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξενόγλωσση

- Albert, A., and C.D. Mobley C.D., 2003. An Analytical Model for Subsurface Irradiance and Remote Sensing Reflectance in Deep and Shallow Case-2 Waters. *Optics Express*, 11(22), 2873-2890.
- Albert, A., 2004. Inversion Technique for Optical Remote Sensing in Shallow Water. Hamburg, Germany, Phd Thesis.
- Bierwirth P.N., Lee, T.J., Burne R.V., 1992. Shallow Seafloor Reflectance and Water Depth Derived by Unmixing Multispectral Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1161-1175.
- Brando, V.E., Anstee, J.M., Wettle, M., Dekker, A.G., 2009. A Physics-based Retrieval and Quality Assessment of Bathymetry from Suboptimal Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 755-770, doi:10.1016/j.rse.2008.12.003.
- Bricaud A., Morel, A., Prieur L., 1981. Absorption by Dissolved Organic Matter of the Sea(yellow substance) in the UV and Visible Domains. *Limnology Oceanography*, 26(1), 43-53.
- Cahalane C., Hanafin J., Monteys X., 2016. Improving Satellite Derived Bathymetry using Spatial Regression Algorithms. Ανάκτηση May 20, 2017, από Hydro International: <https://www.hydro-international.com/content/article/improving-satellite-derived-bathymetry>.
- Carder, K.L., Hawes, S.K., Baker, K.A., Smith, R.C., Steward, R.G., Mitchell, B.G., 1991. Reflectance Model for Quantifying Chlorophyll-a in the Presence of Productivity Degradation Products. *Journal of Geophysical Research*, 96(C11), 20599-20611.
- CIA, USA (2018, November 10). Central Intelligence Agency, USA. Ανάκτηση από The World Factbook: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/gr.html>.
- Contreras-Silva, A.I., Lopez-Caloca, A.A., Tapia-Silva, F.O., Cerdeira-Estrada, S. 2012. Satellite Remote Sensing of Coral Reef Habitats Mapping in Shallow Waters at Banco Chinchorro Reefs, Mexico: A Classification Approach. *Remote Sensing - Applications. InTech*. doi:10.5772/36210.
- Deidda, M., Pala, A., Sanna, G., 2016. A New IDL Implementation of the JUPP Method for Bathymetry Extraction in Shallow Waters. XXIII ISPRS Congress. XLI-B7, 467-474. Prague, Czech Republic: The International Archives of the Photogrammetry.
- Dekker, A.G. and Bukata, R.P., 2002. Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. *Review of Radio Signals, 1999-2002*, 530-532, California, USA: John Wiley & Sons.



- Dekker, A.G., Peters, S.W.M., 1993. The Use of the Thematic Mapper for the Analysis of Eutrophic Lakes: A Case Study in The Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*, 14(5), 799-822.
- Dierssen, H.M., Zimmerman, R.C., Leathers, R.A., Downes, T.V., Davis, C.O., 2003. Ocean Color Remote Sensing of Seagrass and Bathymetry in the Bahamas Banks by High-resolution Airborne Imagery. *Limnology and Oceanography*, 48, 444-455.
- Doxani, G., Papadopoulou, M., Lafasani, P., Pikridas, C., Tsakiri-Strati, M., 2012. Shallow Water Bathymetry over Variable Bottom Types using Multispectral WorldView-2 Image. XXII ISPRS Congress, XXXIX-B8. Melbourne, Australia.
- EMSA., 2018. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2018. European Maritime Safety Agency.
- Eugenio, F., Marcello, J., Martin, J., 2015. High-Resolution Maps of Bathymetry and Benthic Habitats in Shallow-Water Environments using Multispectral Remote Sensing Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(7), 3539-3549.
- Eugenio, F., Marcello, J., Martin, J., Rodriguez-Esparragon, D., 2017. Benthic Habitat Mapping using Multispectral High-Resolution Imagery: Evaluation of Shallow Water Atmospheric Correction Techniques. *Sensors*, 17(11). doi:10.3390/s17112639.
- European Environment Agency, 2018. Ανάκτηση από Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος: <https://www.eea.europa.eu>.
- Favoretto, F., Morel, Y., Waddington, A., Lopez-Calderon, J., Cadena-Roa, M., Blanco-Jarvio, A., 2017. Testing of the 4SM Method in the Gulf of California Suggests Field Data are not Needed to Derive Satellite Bathymetry. *Sensors*, 1-23. doi:10.3390/s17102248.
- Gao, J., 2009. Bathymetric Mapping by means of Remote Sensing: Methods, Accuracy and Limitations. *Progress in Physical Geography*, 33(1), 103-116.
- Gomarasca, M., 2009. Basics of Geomatics (1st ed.). Milano: Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Gordon, H.R., and Morel A., 1983. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review. New York: Springer-Verlag.
- Gordon, H.R., 1981. Clear Water Radiances for Atmospheric Correction of Coastal Zone Color Scanner Imagery. *Applied Optics*, 20(24), 4175-4180.

- Gordon, H.R., Brown, O.B., Evans, R.H., Brown, J.W., Smith, R.C., Baker, K.S., Clark, D.K., 1988. A Semi-analytic Radiance Model of Ocean Color. *Journal of Geophysical Research*, 93(D9), 10909-10924.
- Green, E.P., Mumby, P.J., Edwards, A.J., Clark, C.D., 2000. *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Paris: United Nations Educational.
- Hamilton, S., 2011. An Evaluation of Waveband Pairs for Water Column Correction using Band Ratio Methods for Seabed Mapping in thw Seychelles. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24), 9185-9195.
- Hammack, J.C., 1977. LandSat Goes to Sea. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(6), 683-691.
- Harris Geospatial Solutions, 2019. SPEAR Relative Water Depth. Ανάκτηση από Harris Geospatial Solutions: <https://www.harrisgeospatial.com>.
- Hedley, J., Roelfsema, C., Phinn, S.R., 2009. Efficient Radiative Transfer Model Inversion for Remote Sensing Applications. *Remote Sensing of Environment*. doi:10.1016/j.rse.2009.07.008.
- Hedley, J., Harborne, A., Mumby, P., 2005. Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow-Water Benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 2107-2112.
- Hodul, M., Bird, S., Knudby, A., Chenier, R., 2018. Satellite Derived Photogrammetric Bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 268-277.
- Ignatiades, L., 1998. The Productive and Optical Status of the Oligotrophic Waters of the Southern Aegean Sea (Cretan Sea), Eastern Mediterranean. *Journal of Plankton Research*, 985-995.
- IHO, 2000. *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data (S-57)*. Monaco, IHB.
- IHO, 2012. *Manual on Hydrography (C-13)*. Monaco, IHB.
- IHO, 2008. *Standards for Hydrographic Surveys (S-44)*. Monaco, IHB.
- IHO, 2014. *Specifications For Chart Content and Display Aspects of ECDIS (S-52)*. Monaco, IHB
- IHO, 2017. *Spatial Data Infrastructures: The Marine Dimension (C-17)*. Monaco, IHB.
- IHO, 2018. *IHO Electronic Navigational Chart - Product Specification (S-101)*. Monaco, IHB.
- IHO, 2018. *Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO (S-4)*. Monaco, IHB.
- IHO, 2018. *Universal Hydrographic Data Model (S-100)*. Monaco, IHB.

- IHO, 2018. Guidance For the Preparation and Management of International (INT) Chart and ENC Schemes (S-11). Monaco, IHB.
- IMO, 2010. Basic Documents (Vol. I). London, IMO.
- Jagalingam, P., Akshaya, B.J., Hegde, A.V., 2015. Bathymetry Mapping using Landsat 8 Satellite Imagery. *Procedia Engineering*, 116, 560-566. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.326
- Jegat, V., Shachak, P., Freire, R., Klemm, A., Nyberg, J., 2016. Satellite-Derived Bathymetry: Performance and Production. Canadian Hydrographic Conference. Halifax.
- Jupp, D.L.B., 1988. Background and Extensions to Depth of Penetration (DOP) Mapping in Shallow Coastal Waters. Symposium on Remote Sensing of Coastal Zone, (σσ. IV2(1)-IV(19)). Gold Coast, Queensland.
- Kaimaris, D., Patias, P., Stylianidis, E., 2012. Evaluation of Methodologies for the Determination of Bathymetry using WorldView-2 Imagery: A Case Study at Lake Pramoritza, Greece. *Applied Remote Sensing Journal*, 2(2), 57-64.
- Karageorgis, A., 2012. Spatial and Seasonal Variability of Particulate Matter Optical and Size Properties in the Eastern Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, 123-134.
- Kay, S., Hedley, J.D., Lavender, S., 2009. Sun Glint Correction of High and Low Spatial Resolution. *Remote Sensing*, 1, 697-730. doi:10.3390/rs1040697.
- Landsat 8 Data Users Handbook (v.2.0 ed.), 2016. South Dakota, USGS.
- Lee, Z-P., Keping, D., Voss, K. J., Zibordi, G., Lubac, B., Arnone, R., Weidemann, A., 2011. An Inherent-Optical-Property-Centered Approach to Correct the Angular Effects in Water Leaving Radiance. *Applied Optics*, 50(19), 3155-3167.
- Lee, Z-P., Carder, K.L., Mobley, C.D., 1998a. Hyperspectral Remote Sensing for Shallow Waters I: A Semi-analytical Model. *Applied Optics*, 37(27), 6329-6338.
- Lee, Z-P., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., Patch, J.S., 1999. Hyperspectral Remote Sensing for Shallow Waters 2 : Deriving Bottom Depths and Water Properties by Optimization. *Applied Optics*, 38(18), 3831-3843.
- Lee, Z-P., K.L. Carder, R.A. Arnone. (2002). Deriving Inherent Optical Properties from Water Color: A Multiband Quasi-analytical Algorithm for Optically Deep Waters. *Applied Optics*, 41(27), 5755-5772.
- Lee, Z-P., 2007. Water and Bottom Properties of a Coastal Environment Derived from Hyperion Data Measured from EO-1 Spacecraft Platform. *J. Appl. Remote Sensing*, 1(1).

- Lee, Z-P., Du, K.P., Arnone, R., 2004b. A Model for the Diffuse Attenuation Coefficient of Downwelling Irradiance. *Journal of Geophysical Research*.
- Leiper, I.A., Phinn, S.R., Roelfsema, C.M., Joyce, K.E., Dekker, A.G., 2014. Mapping Coral Reef Benthos, Substrates and Bathymetry using Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) Data. *Remote Sensing*, 6, 6423-6445. doi:10.3390/rs6076423.
- Loisel, H., Vantrepotte, V., Jamet, C., Dat, D.N., 2018. Challenges and New Advances in Ocean Color Remote Sensing of Coastal Waters. Ανάκτηση από Intech: <https://www.intechopen.com/books/topics-in-oceanography>.
- Lyzenga, D.R., 1978. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. *Applied Optics*, 17, 379-383.
- Lyzenga, D.R., 1981. Remote Sensing of Bottom Reflectance and Water Attenuation Parameters in Shallow Water using Aircraft and Landsat Data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(1), 71-82.
- Lyzenga, D.R., 1985. Shallow-Water Bathymetry using Combined Lidar and Passive Multispectral Scanner Data. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 115-125. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/01431168508948428>.
- Manessa, M.D.M., Kanno, A., Sekine, M., Haidar, M., Yamamoto, K., Imai, T., Huguchi, T., 2016. Satellite-Derived Bathymetry using Random Forest Algorithm and WorldView Imagery. *Geopanning Journal of Geomatics and Planning*, 3(2), 117-126. doi:10.14710/geopanning.3.2.117-126.
- Maritorena, S., Morel, A., Gentili, B., 1994. Diffuse Reflectance of Oceanic Shallow Waters: Influence of Water Depth and Bottom Albedo. *Limnology and Oceanography*, 39(7), 1689-1703.
- Mavraeidopoulos, A.K., Pallikaris, A., Oikonomou, E., 2017. Satellite Derived Bathymetry (SDB) and Safety of Navigation. *The International Hydrographic Review*, 17, 7-19.
- Mavraeidopoulos, A.K., 2019. Hydrographic surveying methods and their contribution to harbour construction and coastal zone management. 1<sup>st</sup> International Conference in Design and Management of Port, Coastal and Offshore Works, 8-11 May 2019, Athens, Greece.
- Meteo, 2018. Ανάκτηση από Meteo: <http://www.meteo.gr>.
- Mishra, D., Narumalani, S., Rundquist, D., Lawson, M., 2006. Benthic Habitat Mapping in Tropical Marine Environments using QuickBird Multispectral Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(9), 1037-1048.

- Mishra, D., Narumalani, S., Rundquist, D., Lawson, M., Perk, R., 2007. Enhancing the Detection and Classification of Coral Reef and Associated Benthic Habitats: A Hyperspectral Remote Sensing Approach. *Journal of Geophysical Research*, 112, C08014. doi:10.1029/2006JC003892.
- Mishra, D., Narumalani, S., Rundquist, D.C., Lawson, M., 2005. High-Resolution Ocean Color Remote Sensing of Benthic Habitats: A case Study at the Roatan Island, Honduras. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 43(7).
- Mobley, C., Boss, E., Roesler, C., 2018. *Ocean Optics Web Book*. Ανάκτηση από *Ocean Optics*: <http://www.oceanopticsbook.info/>
- Morel, Y.G., and Lindell L. T., 1998. Passive Multispectral Bathymetry Mapping of Negril Shores, Jamaica. Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, San Diego, California.
- Morel, A., 1974. Optical Properties of Pure Water and Pure Seawater. *Optical Aspects of Oceanography*, 1-24, New York.
- Morel, M.Y., 2016. Ανάκτηση November 17, 2016, από [www.watercolumncorrection.com](http://www.watercolumncorrection.com)
- Mumby, P.J., Edwards, A.J., Green, E.P., Anderson, C.W., Ellis, A.C., Clark, C.D., 1997. A Visual Assessment Technique for Estimating Seagrass Standing Crop. *Acquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 7, 239-251.
- Najhan, M.S., Razali, M., Hasan, R.C., 2017. Satellite-Derived Bathymetry: Accuracy Assessment on Depths Derivation Algorithm for Shallow Water Area. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W5, 159-164. doi:10.5194.
- Ohlendorf, S., Muller, A., Heege, T., Cerdeira-Estrada, S., Kobryn, H.T., 2011. Bathymetry Mapping and Seafloor Classification using Multispectral Satellite Data and Standardized Physics-based Data Processing. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 8175. Prague: SPIE. doi:10.1117/12.898652.
- Pe'eri, S., Parrish, C., Azuike, C., Alexander, L., Armstrong, A., 2014. Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness. *Marine Geodesy*(37), 293-314. doi:10.1080/01490419.2014.902880.
- Philpot, D.W., 1989. Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery. *Applied Optics*, 28(8), 1569-1578.

- Pleiades, 2018. Ανάκτηση από Earth Observation Portal: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/p/pleiades>.
- Polcyn, F.C., Brown, W. L., Sattinger, I. J., 1970. The Measurement of Water Depth by Remote Sensing Techniques.
- Pope, R., and Fry, E., 1997. Absorption Spectrum (380-700 nm) of Pure Waters :II. Integrating Cavity Measurements. *Applied Optics*, 36(33), 8710-8723.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., 2003. *Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing* (2nd εκδ.). Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
- Pushparaj, J., and Hegde, A.V., 2017. Estimation of Bathymetry along the Coast of Mangaluru using Landsat-8 Imagery. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(2), 71-83. doi:10.1177/1759313116679672.
- Quadros, D. N., 2016. Technology in Focus : Bathymetric Lidar. *GIM International*, 46-47.
- Sagar, S., Wettle, M., Damlamian, H., 2008. Shallow water bathymetry mapping using a physics based remote sensing approach for tsunami inundation modelling in the south-west Pacific. 14th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference.
- Sathyendranath, S., Platt, T., Caverhill, C.M., Warnock, R.E., Lewis, M.R., 1989. Remote Sensing of Oceanic Primary Production: Computations using a Spectral Model. *Deep-Sea Research*, 36, 431-453.
- Services, A.G.I., 2012. *Pleiades Imagery User Guide*. Toulouse, France: ASTRIUM Geo-Information Services,.
- Smith, R.C., and Baker, K.S., 1981. Optical Properties of the Clearest Natural Waters. *Applied Optics*, 20, 177-184.
- Stumpf, R.P., and Singlair, M., 2003. Determination of Water Depth with High-Resolution Satellite Imagery over Variable Bottom Types. *Limnology and Oceanography*, 48(1), 547-556.
- Suzuki, K., Kishino, M., Sasaoka, K., Saitoh, S., Saino, T., 1998. Chlorophyll-Specific Absorption Coefficients and Pigments of Phytoplankton off Sanriku, Northwestern North Pacific. *Journal of Oceanography*, 54, 517-526.
- Traganos, D., and Reinartz, P., 2017. Mapping Mediterranean Seagrasses with Sentinel-2 Imagery. *Marine Pollution Bulletin*. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.06.075.
- USA/CIA, 2005. *The World FactBook*. Ανάκτηση May 14, 2017, από Central Intelligence Agency: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>

- Vanderstraete, T., Goossens, R., Ghabour, T.K., 2002. Bathymetric Mapping of Coral Reefs in the Red Sea (Hurghada-Egypt) using Landsat 7 ETM+ Data. 7th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. Miami, Florida.
- Vivero, J., 2007. The European vision for oceans and seas—Social and political dimensions of the Green Paper on Maritime Policy for the EU. *Marine Policy*, 31(4), 409-414.
- Vogelzang, J., Wensink, G.J., De Loor G.P., Peters, H.C., Pouwels, H., 1990. Sea Bottom Topography with X-band SLAR: The Relation between Radar Imagery and Bathymetry. *International Journal Of Remote Sensing*, 13(10), 1943-1958.
- Ward, R., 2011. Annual report of the IHO (Part I - GENERAL). 9<sup>th</sup> Meeting of IALA Committee on e-Navigation, 14-18 March, Copenhagen, Denmark.
- Wei-Tsun, L., Tian-Yuan S., Huang, J-F., Chen, J-C., 2016. <https://scholar.google.gr>. Ανάκτηση από Estimation of Water Depth with Multispectral Satellite Image: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.741.8176&rep=rep1&type=pdf>.
- Welcome to ESA, 2018. Ανάκτηση από European Space Agency: [https://www.esa.int/About\\_Us/Welcome\\_to\\_ESA/Funding](https://www.esa.int/About_Us/Welcome_to_ESA/Funding).
- Wettle M., and Brando, V.E., 2006. SAMBUCA- Semi-analytical Model for Bathymetry, Un-mixing and Concentration Assessment. CSIRO Land and Water Science Report no. 22.
- Wikipedia, 2018. Ανάκτηση από v. ΠΑΡΟΣ: <https://el.wikipedia.org>
- Windguru, 2018. Ανάκτηση από Windguru: <https://www.windguru.cz>
- YR, 2018. Ανάκτηση από Weather Statistics: <https://www.yr.no/place/Greece>
- Zibordi, G., 2007. Data From Cruises in Ionian and Aegean Seas.

## Ελληνόγλωσση

- ΕΛΛΗΝΙΚΟ, A.E., 2018. ΜΑΡΙΝΑ ΑΓΙΟΥ ΚΟΣΜΑ. Ανάκτηση από ΜΑΡΙΝΑ ΑΓΙΟΥ ΚΟΣΜΑ: <https://marinaagioskosmas.com/>
- ΑΝΤΙΠΑΡΟΣ, 2018. Ανάκτηση από Αντίπαρος: <https://el.wikipedia.org>
- ΑΤΡΙΑ, A.E., 2015. Έρευνα, Ανάλυση και Χαρτογράφηση Τουριστικού Περιβάλλοντος Περιφέρειας Ιονίων Νήσων, ΙΝΣΕΤΕ.
- ΑΤΡΙΑ, A.E., 2015. Έρευνα, Ανάλυση και Χαρτογράφηση Τουριστικού Περιβάλλοντος Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, ΙΝΣΕΤΕ.

ΔΗΜΟΣ ΑΝΤΙΠΑΡΟΥ, 2018. Ανάκτηση από ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ: <http://www.antiparos.gr>

ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΑΡΚΟ ΖΑΚΥΝΘΟΥ, 2018. Ανάκτηση από ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΑΡΚΟ ΖΑΚΥΝΘΟΥ:  
<http://www.zanteisland.com>

Ινστιτούτο Θαλάσσιας Προστασίας, 2018. Ανάκτηση από Archipelagos: <http://archipelago.gr>

Ματαράγκας Δ., Μ. Βαρτή-Ματαράγκα. (n.d.). Γεωλογική Παλαιογεωγραφική Εξέλιξη του Αιγαίου Πελάγους και Γεωλογική Δομή της Νήσου Πάρου. Ανάκτηση από Docplayer:  
<https://docplayer.gr>.

Παλληκάρης, Α., 1988. Υδρογραφία. Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Β' Έκδοση, Πειραιάς.

Παλληκάρης, Α., 2009. Ηλεκτρονικοί Χάρτες και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στην Ναυσιπλοΐα. Αθήνα.

Παλληκάρης, Α., Κατσούλης, Θ.Γ., Δαλακλής, Α.Δ., 2008. Ναυτικά Ηλεκτρονικά Όργανα. Ίδρυμα Ευγενίδου, ISBN: 978-960-337-086-4.

Το Περιβάλλον στην Ζάκυνθο, 2019. Ανάκτηση από <http://www.gozakynthos.gr>

Χρησιδίδη, Ν.Α., 2017. Πόλη και Παραλιακό Μέτωπο - Διαλακτικές Συνδέσεις και Εγγενείς Αντιθέσεις στις Σύγχρονες Πρακτικές- Βαρκελώνη-Ρότερνταμ-Αθήνα. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : Κατάλογος Δημοσιεύσεων του Υπ. Διδάκτορα  
Α. Κ. Μαυραειδόπουλου**

1. **Mavraeidopoulos, A.**, and A., Nikolaidis. “Hellenic ESEAS Web Pages Design and Implementation”, Workshop on “SEA LEVEL VARIATIONS TOWARDS AN OPERATIONAL EUROPEAN SEA LEVEL SERVICE”, Split, Croatia, 5-6 Oct. 2005.

After 10 years as a service of the International Association of Geodesy, the International GPS Service IGS is preparing for the future use of multiple integrated global navigation satellite systems: GPS and its modernization, Galileo and GLONASS. Since 1994, the IGS produces GPS data and products at the highest level of precision and accuracy available anywhere: it provides GPS orbits with 3–5 cm accuracy, sub-centimeter station positions and velocities, and station and satellite clocks at the sub-nanosecond level for users world-wide. A similar suite of data and products is available for GLONASS, demonstrating the ability of the IGS to incorporate observations from other GNSSs, such as Galileo. IGS affirms its interest to contribute to the development and applications of the Galileo program and other GNSS. IGS currently consists of over 200 actively contributing organizations in more than 80 countries and a global network of more than 350 stations. The working groups and pilot projects of the IGS demonstrate IGS involvement in applications related to the precise global reference frame, timing, ionosphere, atmospheric water vapor, low Earth orbiter precise orbit determination (LEO POD), sea level change measurements, real-time GPS applications, and GNSS developments.

2. **Mavraeidopoulos, A.** “Data Management, a Crucial Factor for Reliable Mapping”, International Conference on Marine Data and Information Systems (IMDIS), Athens, Hellas, 31 Mar - 2 Apr., 2008.

The aim of this paper is to discuss a number of issues related to the use of spatial information for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment. The paper centers around the types of spatial data needed for each of these components, and the methods for obtaining them. A number of concepts are illustrated using an extensive spatial data set for the city of Tegucigalpa in Honduras. The paper intends to supplement the information given in the “Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning” by the Joint ISSMGE, ISRM and IAEG Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (JTC-1). The last few

decades have shown a very fast development in the application of digital tools such as Geographic Information Systems, Digital Image Processing, Digital Photogrammetry and Global Positioning Systems. Landslide inventory databases are becoming available to more countries and several are now also available through the internet. A comprehensive landslide inventory is a must in order to be able to quantify both landslide hazard and risk. With respect to the environmental factors used in landslide hazard assessment, there is a tendency to utilize those data layers that are easily obtainable from Digital Elevation Models and satellite imagery, whereas less emphasis is on those data layers that require detailed field investigations. A review is given of the trends in collecting spatial information on environmental factors with a focus on Digital Elevation Models, geology and soils, geomorphology, land use and elements at risk.

3. Tziavos, I. N., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos A.**, Mertikas, S. P., A., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Vergos, G. S. "Recent Developments in the Calibration-Validation Site of Gavdos, Greece", Jason-1/TOPEX/Poseidon, Science Working Team (SWT) Meeting, New Orleans, Louisiana, USA, 21-23 October 2002.

An absolute sea-level monitoring and altimeter calibration permanent facility has been established on the isle of Gavdos, 50 km south of the island of Crete, Greece. This calibration/validation facility has been chosen because Gavdos is under a crossing point of the ground-tracks of Jason-1 satellite, and adjacent to an Envisat pass. Satellite altimeter missions are evaluated at that site using external measurements from tide gauges, GPS, a DORIS beacon, meteorological sensors, wave-height sensors, airborne campaigns for gravity and sea-surface topography, water-vapour radiometry, solar atmospheric spectrometry, GPS buoys, altimeter transponder, Satellite Laser Ranging, etc. The mean sea level and the earth's tectonic deformation field in the region have also been determined accurately. Comparison over the cycles 70 to 77 of the Jason-1 satellite indicate that its absolute mean bias for the sea-surface heights is 134 mm. 20 mm. The GAVDOS project has started in December 2001 and has been in the context of an international calibration/validation effort of the Jason-1 Science Working Team Permanent facility for calibration/validation of satellite altimetry.

4. Tziavos, I. N., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos,

A., **Mavraeidopoulos A.**, Mertikas, S. P., A., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Vergos, G. S., (2004). "The GAVDOS Mean Sea Level and Altimeter Calibration Facility. Results for Jason-1", *Marine Geodesy*, 27, 631-655.

The location of the GAVDOS facility is under a crossing point of the original ground-tracks of TOPEX/Poseidon and the present ones for Jason-1, and adjacent to an ENVISAT pass, about 50 km south of Crete, Greece. Ground observations and altimetry comparisons over cycles 70 to 90, indicate that a preliminary estimate of the absolute measurement bias for the Jason-1 altimeter is  $144.7 \pm 15$  mm. Comparison of Jason microwave radiometer data from cycles 37 and 62, with locally collected water vapor radiometer and solar spectrometer observations indicate a 1–2 mm agreement.

5. Tziavos, I. N., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos A.**, Mertikas, S. P., A., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Vergos, G. S. "Absolute Sea Level Monitoring and Altimeter Calibration at Gavdos, Crete, Greece", *Geophysical Research Abstracts* 4, 27<sup>th</sup> European Geophysical Society General Assembly, Nice, France, 22-26 April 2002.

We introduce the recently instrumented mean sea level (MSL) monitoring facility on western Crete and the isle of Gavdos. We will focus on the altimeter calibration aspect of the facility, in particular, its application to the JASON mission. The Eastern Mediterranean area is one of great interest for its intense tectonic activity as well as for its regional oceanography. Recent observations have convincingly demonstrated the importance of that area for the regional meteorological and climatologic changes. Tide-gauge monitoring with continuous GPS has gained importance lately since tectonics contaminate the inferred sea level variations, and a global network of tide-gauges with long historical records can be used as satellite altimeter calibration sites (e.g. TOPEX/POSEIDON, GFO, JASON-1, ENVISAT, etc.). This is at present a common IOC-GLOSS-IGS effort, already underway (TIGA), and our facility is part of it. Crete hosts two of the oldest tide-gauges in the regional network and our project will further expand it to the south with a new site on the isle of Gavdos, the southernmost European parcel of land. One component of our "GAVDOS" project is the repeated occupation of two already in existence tide-gauge sites at Souda Bay and Heraklion,

and their tie to the new facility. We show here initial results from positioning of these sites and some of the available tidal records. Gavdos is situated under a ground-track crossing point of the original T/P and present JASON-1 orbits. It is an ideal calibration site if the tectonic motions are monitored precisely and continuously. The facility hosts in addition to the tide gauges: GPS and DORIS beacons for positioning, transponders for direct calibration, water vapor radiometers and solar spectrometers, GPS-loaded buoys, airborne surveys with gravimeters and laser profiling LIDAR's, transportable laser ranging systems, etc., to ensure the best possible and most reliable results.

6. Tziavos, I. N., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos A.**, Mertikas, S. P., A., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Vergos, G. S. "GAVDOS : A European Radar Altimeter Calibration and Sea-level Monitoring Site for Jason-1, ENVISAT, and EuroGloss", Geophysical Research Abstracts 4, 27<sup>th</sup> European Geophysical Society General Assembly, Nice, France, 22-26 April 2002.

An absolute sea level monitoring and altimeter calibration permanent facility is being established on the isle of Gavdos, south of the island of Crete, Greece. The location of the calibration facility has been selected because it is under a crossing point of the ground tracks of TOPEX/POSEIDON (T/P) and JASON-1, and adjacent to an ENVISAT pass. This site has been chosen because (1) the small island is far from the main land, with relatively small topography, and rather simple sea current circulation; (2) the surrounding geoid is known from in situ measurements and the local tides are small; (3) calibration measurements can be made from the isle, twice per cycle, on ascending and descending tracks, and (4) the cross-over information can be used to remove possible biases dependent on the direction of the pass. The GAVDOS project commenced on December 2001 and will determine consistently and reliably (1) the altimeter biases and drifts for these missions, (2) the bias among different missions and (3) the local mean sea level. As a by-product, we will also monitor the regional tectonic deformation field of Western Crete, Greece.

Gavdos: A European Radar Altimeter Calibration and Sea-level Monitoring Site for Jason1, Envisat and Euro-gloss - ResearchGate.

7. Tziavos, I. N., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos A.**, Mertikas, S. P., A., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Vergos, G. S.: "Airborne Laser and Gravity Project for the Altimeter Calibration Site Gavdos", Geophysical Research Abstracts 4, 27<sup>th</sup> European Geophysical Society General Assembly, Nice, France, 22-26 April 2002.

The isle of Gavdos, situated south of the island of Crete, Greece, has been selected in the framework of the EU project GAVDOS to host absolute sea level monitoring and altimeter calibration facilities due to its offshore location under a crossover point of the Topex/Poseidon and Jason-1. Detailed regional geoid and sea surface topography (SST) models are required for referencing the satellite altimeter measurements over the calibration facility and for studying the regional sea current circulation. This objective will be achieved by carrying out a regional airborne survey, combining gravimetric and laser profiling. We will derive a high resolution geoid from the gravimetric data thus allowing to separate the SST as measured by the laser profiler from the geoid. For both applications the quality of the trajectory of the airplane determined by DGPS and its attitude determined by a DGPS array and by INS are of utmost importance. Some initial airborne gravity measurements over the region were done in February 2001 as part of an EU CAATER project, showing a region with a rough gravity field and large geoid changes. Results from previous airborne laser campaigns over the Ionian and the Aegean Seas are presented and discussed in the light of an enhanced instrumentation, planned for the new campaign.

8. Tziavos, I. N., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos A.**, Mertikas, S. P., A., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Vergos, G. S. "A Survey of Marine Geoid Estimation using Satellite Altimetry and Shipborne Gravity Data in Gavdos", Geophysical Research Abstracts 4, 27<sup>th</sup> European Geophysical Society General Assembly, Nice, France, 22-26 April 2002.

The possibility of improving the determination of the marine geoid is investigated in the area of the isle of Gavdos, Greece. In the frame of the GAVDOS project, the need of a new high-resolution and high-accuracy geoid model for the calibration of the satellite's (JASON-1, ENVISAT and EURO-GLOSS) altimeters and for sea level monitoring has become apparent. This is mainly due to the fact that the already available solutions are determined using outdated datasets and fail to meet the wanted, cm-level, accuracy requirements. To meet our goal, multi-satellite (ERS1, GEOSAT, TOPEX/POSEIDON (T/P)) altimetry and shipborne gravity data have been used in an attempt to improve the estimation of the marine geoid. The altimetry data come from the latest releases of the satellite's Geophysical Data Records (GDRs), based on the improved JGM-3 model and the T/P orbits, while the gravity information has been derived from available marine and land databases. Altimetric, gravimetric and combined solutions, using the Fast Fourier Transform (FFT) based Input Output System Theory (IOST) for the efficient combination of heterogeneous data, are determined. Data from the T/P mission, known for their high precision, are used to provide an estimate of the achievable accuracy. Geoid models from previous research works for the Mediterranean are also implemented in the validation procedures. The results show that altimetric geoid modeling with an accuracy close to 5 cm is feasible, while the satellite altimetry data contribute to an improvement of the gravimetric geoid determination by 15-20 cm.

9. Mertikas, S. P., Banks, A., Cocard, M., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Geiger, A., Gidskehaug, A., Kahle, H.-G., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos, A.**, Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Peseç, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Tziavos, I. N., Vergos, G. S. "Installation Procedures of Establishing an Altimeter Calibration and Sea-Level Monitoring Facility on the Isle of Gavdos, Crete, Greece», The Eleventh General Assembly of the WEGENER Project, WEGENER 2002, Athens, Greece, 12-14 June 2002.

An absolute sea-level monitoring and altimeter calibration permanent facility has been established on the isle of Gavdos, 50 km south of the island of Crete, Greece. This calibration/validation facility has been chosen because Gavdos is under a crossing

point of the ground-tracks of Jason-1 satellites, and adjacent to an Envisat pass. Satellite altimeter missions are evaluated at that site using external measurements from tide gauges, GPS, a DORIS beacon, meteorological sensors, wave-height sensors, airborne campaigns for gravity and sea-surface topography, water-vapour radiometry, solar atmospheric spectrometry, GPS buoys, altimeter transponder, Satellite Laser Ranging, etc. The mean sea level and the earth's tectonic deformation field in the region have also been determined accurately. Comparison over the cycles 70 to 77 of the Jason-1 satellite indicate that its absolute mean bias for the sea-surface heights is  $134 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ . The GAVDOS project has started in December 2001 and has been in the context of an international calibration/validation effort of the Jason-1 Science Working Team.

10. Cocard, M., Papafitsorou-Marti, A., Kahle, H. -G., Geiger, A., Banks, A., A., Damianidis, K., Drakopoulos, P., Exertier, P., Forsberg, R., Frantzis, X., Gidskehaug, A., Koutroulis, E., Maratos, A., **Mavraeidopoulos, A.**, Mertikas, S. P., Olesen, A. V., Pantazoglou, F., Papadopoulos, A., Pavlis, E. C., Pesec, P., Spyridakis, N., Suenkel, H., Tziavos, I. N., Vergos, G. S. (2002). "Past and Future Airborne Laser Surveys over Greece", The Eleventh General Assembly of the WEGENER Project - WEGENER 2002, Athens, Greece, 12-14 June, 2002.

Linking quantitative measurements of lava flow surface morphology with historical observations of eruptions is an important, but underexploited, route to understanding eruptions of silicic magma. We present here a new, high-resolution digital elevation model (DEM) for the intra caldera Kameni Islands, Santorini, Greece, which reveals the potential of high-resolution imaging (at  $\sim 1 \text{ m}$  per pixel) of lava-flow fields by airborne light detection and ranging laser radar (LiDAR). The new DEM has an order-of-magnitude better resolution than earlier models, and reveals a wealth of surface morphological information on the dacite lava flows of the Kameni Islands. In turn, this provides quantitative constraints on the bulk rheology of the emplaced lava flows. When combined with a reanalysis of contemporary eruption accounts, these data yield important insights into the behavior of dacite magma during slow effusive eruptions on Santorini and elsewhere, and allow the development of forecasts for the

style and duration of future eruptions. Kameni Island lava flows exhibit classic surface morphologies associated with viscous magma: levees and compression folds. Levee heights and flow widths are consistent with a Bingham rheology, and lava yield strengths of  $3-7 \times 10^4$  Pa. Compression folds have long wavelengths (15–25 m), and change only a little downstream; this is consistent with observations of other terrestrial silicic lava flows. The blocky dacite lava-flow margins show a scale-invariant morphology with a typical fractal dimension that is indistinguishable from basaltic Hawaiian a'a, confirming that the fractal dimension is insensitive to the composition of the flow. Dome-growth rates during eruptions of the Kameni Islands in 1866 and 1939 are consistent with a model of slow inflation of a dome with a strong crust. Lava domes on the Kameni Islands have a crustal yield strength ( $4 \times 10^7$  Pa) that is lower by a factor of 2–4 than the domes at Pinatubo and Mount St. Helens. The dome-height model combined with the apparent time-predictable nature of volcanic eruptions of the Kameni Islands allow us to suggest that should an eruption occur during 2006, it will last for more than 2.7 yr and produce a dome 115–125 m high.

11. **A. Μαυραειδόπουλος**,(2010). «Η Υδρογραφία και η Συνεισφορά της στην Ναυτική Χαρτογραφία της Ελλάδας», 11<sup>ο</sup> Εθνικό Χαρτογραφικό Συνέδριο Χαρτογραφίας,ΧΕΕΕ 8-10 Δεκ. 2010, Ναύπλιο.

Αναφορά στην διαχρονική συνεισφορά της Υ.Υ./Π.Ν. στην χαρτογράφηση των θαλασσιών περιοχών εθνικού ενδιαφέροντος. Περιγραφή των προδιαγραφών κατασκευής των εθνικών έντυπων και ηλεκτρονικών ναυτικών χαρτών, καθώς και των διεθνών χαρτών ελληνικής παραγωγής, κάλυψη και διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν με τους αντίστοιχους τοπογραφικούς χάρτες.

12. **A. Mavraeidopoulos, A., Pallikaris, A., Oikonomou, E.**,(2017). "*Satellite Derived Bathymetry and Safety of Navigation*", International Hydrographic Review, June, 2017.

A review takes place as well as a validation of the most crucial aspects of the safety of navigation internationally, related to the bathymetry extraction from remote sensing (RS) data. The bathymetry estimation using optical RS techniques has advantages and disadvantages. However, it is a challenge the fact that using techniques of imagery,



depths can be depicted over large remote coastal areas, consisted of dangerous hazards, submerged objects and steep morphology of seabed, a process which introduces new perspectives to the safety of navigation. In order to be feasible to use the bathymetry extracted from remote sensing, the accuracy of such data should be evaluated even in some specific cases and an assessment to be undertaken about how this can be useful in nautical chart production. Also, the parameters which associated with the capabilities of SDB to contribute to the cartographic production discussed, while an effort of evaluation is done in conjunction with the current I.H.O Standards.

13. **Mavraeidopoulos, A.K.**, (2016). *"Παθητική Τηλεπισκόπηση και Υδρογραφία: Μία Διερεύνηση των Αλγορίθμων Εξαγωγής Βαθυμετρίας"*, NAFSIVIOS CHORA, November, 2016.

A review takes place as well as a presentation and assessment of the most crucial algorithms-models used internationally for bathymetry extraction from remote sensing data. The bathymetry estimation using optical techniques has advantages and disadvantages, however it is a challenge the fact that depths can depicted over large coastal areas, which introduce specific issues to the safety of navigation due to the dangerous hazards, submerged objects and the steep morphology of seabed. In order to be feasible the use of bathymetry extracted from remote sensing, the accuracy of such data should be evaluated even in some special cases and how these can be useful in chart production. Also, the parameters which associated with erroneous results in the abovementioned models discussed, while an effort of evaluation is done of various bathymetric models from the aspect of safety of navigation.

14. **Μαυραειδόπουλος, Α. Κ.**, (2019), «Περιγραφή Μεθόδων Υδρογραφίας-Βαθυμετρίας και η Συνεισφορά της στην Κατασκευή Λιμενικών Έργων και Διαχείριση της παράκτιας ζώνης», 1<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο Λιμενικών Έργων (Design and Management of Port, Coastal and Offshore Works), 08-11 Μαΐου 2019, Αθήνα.

Μελέτη με την οποία περιγράφεται η συνεισφορά της Υδρογραφίας αφενός στα αντικείμενα της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας αφετέρου σε άλλες θαλάσσιες

δραστηριότητες, όπως είναι η υποστήριξη της στην κατασκευή λιμενικών έργων, η θαλάσσια έρευνα, η έρευνα υδρογονανθράκων, δραστηριότητες που σχετίζονται με την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και την διαχείριση της παράκτιας ζώνης. Ειδικότερα, τονίζεται η συνεισφορά της Υδρογραφίας-βαθυμετρίας στην κατασκευή των λιμενικών έργων η οποία θεωρείται κρίσιμος παράγοντας στην οικονομοτεχνική ολοκλήρωση μίας θαλάσσιας κατασκευής, στην ορθολογική διαχείριση της παράκτιας ζώνης, στην αειφόρο διαχείριση ενός παράκτιου οικοσυστήματος και γενικότερα στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μίας παράκτιας περιοχής.