



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Γεωχωρικές Τεχνολογίες

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επεξεργασία Δεδομένων Βαθυμετρίας «MBES, SSS & SVP» και
Πολυφασματικών Δορυφορικών Εικόνων στις Παράκτιες Περιοχές
Σενεγάλης και Ακτής Ελεφαντοστού, για Εξαγωγή και Βαθμονόμηση
Δορυφορικής Βαθυμετρίας & Ταξινόμησης.

Βασίλειος Καστανίδης

ΑΜ: 2106

Επιβλέπων Καθηγητής:

Εμμανουήλ Οικονόμου

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Γεωχωρικές Τεχνολογίες»

Επεξεργασία Δεδομένων Βαθυμετρίας «MBES, SSS & SVP» και Πολυφασματικών Δορυφορικών Εικόνων στις Παράκτιες Περιοχές Σενεγάλης και Ακτής Ελεφαντοστού, για Εξαγωγή και Βαθμονόμηση Δορυφορικής Βαθυμετρίας & Ταξινόμησης.

Βασίλειος Καστανίδης

Επιβλέπων Εμμανουήλ Οικονόμου

Η επιτροπή αξιολόγησης

Μιχαήλ Γιαννίου

Λάζαρος Γραμματικόπουλος

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βασίλειος Καστανίδης του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 2106 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωχωρικές Τεχνολογίες» του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Βασίλειος Καστανίδης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέλαβαν στην ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αφιερώνονται στον Δρ. Μαυραειδόπουλο Αθανάσιο, όπου η παρουσία του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας. Πέρα από τις πολύτιμες γνώσεις που μου πρόσφερε, η συνεργασία μας ήταν άψογη από κάθε άποψη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις εταιρείες BeamworX και Xylem, που μου παρείχαν άδεια χρήση για τα εμπορικά λογισμικά AutoClean και Hyrack.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως κύριο στόχο, τη σύγκριση και την αξιολόγηση δύο διαφορετικών μεθόδων βαθυμετρίας, σε δύο διαφορετικές παράκτιες περιοχές. Η πρώτη περιοχή λαμβάνει χώρα στο Ντακάρ, όπου είναι η πρωτεύουσα της Σενεγάλης. Η δεύτερη περιοχή εντοπίζεται στον παράκτιο οικισμό Γκραν-Μπασάμ, όπου βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Ακτής Ελεφαντοστού. Η επιλογή αυτών των περιοχών, βασίστηκε στο ολοκληρωμένο υποθαλάσσιο δίκτυο οπτικής ίνας, όπου το έργο φέρει τίτλο MainOne.

Η συλλογή βαθυμετρικών δεδομένων MBES, SSS & SVP, πραγματοποιήθηκαν τα έτη 2018-2019 από την Ελληνική εταιρεία Power Sub Link. Τα συλλεχθέντα δεδομένα προεξεργάστηκαν και επεξεργάστηκαν από τον εκπονητή της εργασίας, ώστε να προκύψουν οι τελικές βαθυμετρίες και ταξινομήσεις του βυθού. Τόσο για τη συλλογή των δεδομένων, όσο και για την επεξεργασία τους, χρησιμοποιήθηκε σύγχρονος εξοπλισμός.

Η διαδικασία βαθυμετρίας και ταξινόμησης του πυθμένα της θάλασσας, πραγματοποιείται επιπρόσθετα με μεθόδους Τηλεπισκόπησης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται αφορά τη διόρθωση δεδομένων Sentinel 2, όπου περιλαμβάνεται η διαδικασία αποθάμβωσης και διόρθωσης υδάτινης στήλης. Έπειτα, υλοποιούνται υπολογισμοί δεικτών και βιο-οπτικών παραμέτρων, ώστε να προκύψει η τελική βαθυμετρία και ταξινόμηση του βυθού, για τις δύο περιοχές μελέτης.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας, συγκρίνονται αυτές οι δύο μέθοδοι και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ενδελεχώς και αξιολογούνται τα αποτελέσματα, ερμηνεύοντας την αξιοπιστία και την πιστότητα τους.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to compare and evaluate two different bathymetry methods in two distinct coastal areas. The first area is Dakar, the capital of Senegal. The second area is the coastal settlement of Grand-Bassam, located in the southeastern part of Côte d'Ivoire. These areas were selected based on the integrated submarine optical fiber network project titled MainOne.

The collection of bathymetric data using MBES, SSS, and SVP was carried out in 2018-2019 by the Greek company Power Sub Link. The collected data were pre-processed and processed by the author of this thesis to produce the final bathymetries and seabed classifications. Both the data collection and processing utilized modern equipment.

The process of bathymetry and seabed classification is additionally conducted using Remote Sensing methods. The methodology includes the correction of Sentinel 2 data, which encompasses the Deglint and Water Column Correction processes. Subsequently, calculations of indices and bio-optical parameters are performed to derive the final bathymetry and seabed classification for the two study areas.

For the completion of this thesis, these two methods are compared and useful conclusions are drawn. Specifically, the results are thoroughly analyzed and evaluated, interpreting their reliability and accuracy.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του θέματος.	1
1.1.1 Γεωφυσικά δεδομένα περιοχής μελέτης	3
1.1.2 Γεωτεχνικά δεδομένα.....	6
1.2 Στόχος της εργασίας.....	8
1.3 Σημασία της Εργασίας.....	10
1.4 Διάταξη της Διπλωματικής Εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 2 – Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο	13
2.1 Αρχές της υδρογραφίας.....	13
2.2 Βαθυμετρικά δεδομένα	14
2.3 Μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων	15
2.4 Προκλήσεις και περιορισμοί.....	16
2.5 Δορυφόροι και οι Χρήσεις τους στη Γεωεπιστήμη	18
2.5.1 Τύποι Δορυφόρων.....	18
2.5.2 Αρχές Λειτουργίας Δορυφόρων.....	18
2.5.3 Εφαρμογές των Δορυφόρων στη Γεωεπιστήμη.....	19
2.6 Δορυφορική Βαθυμετρία	20
2.6.1 Μέθοδοι Δορυφορικής Βαθυμετρίας.....	20
2.6.2 Πλεονεκτήματα της Δορυφορικής Βαθυμετρίας	21
2.6.3 Περιορισμοί της Δορυφορικής Βαθυμετρίας.....	21
2.6.4 Εφαρμογές της Δορυφορικής Βαθυμετρίας.....	22
Κεφάλαιο 3 – Περιοχή Μελέτης, Μετρήσεις Πεδίου και Εξοπλισμός.....	23
3.1. Περιγραφή και Χαρακτηριστικά Περιοχής Μελέτης	23
3.2. Χρονοδιάγραμμα αποτύπωσης βυθού	25
3.3. Ερευνητικός εξοπλισμός.....	26
3.3.1 Ερευνητικά πλοία.....	26
3.3.2 Ηχοβολιστικός εξοπλισμός.....	29
Κεφάλαιο 4 – Μεθοδολογία.....	33
4.1 Επεξεργασία ηχοβολιστικών δεδομένων	33
4.1.1 Εισαγωγή στην επεξεργασία των δεδομένων MBES, SSS και SVP	33
4.1.2 Συλλεχθέντα βαθυμετρικά δεδομένα	34
4.1.3 Προ-επεξεργασία δεδομένων MBES και SVP	35

4.1.4 Επεξεργασία βαθυμετρικής πληροφορίας	39
4.1.5. Προ-επεξεργασία δεδομένων SSS	42
Κεφάλαιο 5 – Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων	48
5.1. Δορυφορικά δεδομένα	48
5.2 Επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών δεδομένων	50
5.2.1 Ταξινόμηση βυθού	51
5.2.2. Ατμοσφαιρική διόρθωση (Level-2)	55
5.2.3. Απομάκρυνση Νεφών	57
5.2.4. Διαδικασία αποθάμβωσης (Sunglint Correction)	58
5.2.5. Διαδικασία διόρθωσης υδάτινης στήλης (Water Colum Correction)	61
5.3. Ταξινόμηση του βυθού, με την χρήση βιο-οπτικών παραμέτρων	64
5.4. Δορυφορική Βαθυμετρία	67
5.4.1. Υπολογισμός λόγων/αλγοριθμικών λόγων βιο-οπτικών παραμέτρων.	67
5.4.2. Δειγματοληψία βαθών	68
5.4.3. Υπολογισμός Δορυφορικής Βαθυμετρίας	69
5.4.4. Στατιστική αξιολόγηση αποτελεσμάτων Βαθυμετρίας «RMSE».....	70
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και Παρουσίαση αποτελεσμάτων	72
6.1 – Δημιουργία χαρτοσυνθέσεων	72
6.2 – Σύγκριση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	72
6.3 – Σύνοψη και Προτάσεις.....	77
Βιβλιογραφία	80
Παράρτημα 1 – Χαρτοσυνθέσεις της περιοχής Ντακάρ, Σενεγάλης.....	83
Παράρτημα 2 – Χαρτοσυνθέσεις της περιοχής Γκραν-Μπασάμ, Ακτή Ελεφαντοστού	87

Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων

Εικόνα 1.1. Υποθαλάσσιο Καλώδιο Οπτικής Ίνας MainOne.....	1
Εικόνα 1.2. Εφαρμογή SSS.....	3
Εικόνα 1.3. Εφαρμογή μαγνητομέτρου	4
Εικόνα 1.4. Εφαρμογή MBES	4
Εικόνα 1.5. Εφαρμογή SBP	5
Εικόνα 1.6. Εφαρμογή CPT	6
Εικόνα 1.7. Εφαρμογή Gravity Core	7
Εικόνα 1.8. Εφαρμογή Piston Coring	8
Εικόνα 3.1. Ερευνητικό σκάφος Hermes.....	27
Εικόνα 3.2. Ερευνητικό σκάφος CDI Diver	28
Εικόνα 3.3. Ερευνητικό σκάφος CDI Diver	28
Εικόνα 3.4. Ερευνητικό πλοίο Med Surveyor	29
Εικόνα 3.5. SVP – Inshore Survey	30
Εικόνα 3.6. MBES – Inshore Survey	30
Εικόνα 3.7. SSS – Inshore Survey	31
Εικόνα 3.8. MBES – Deep Water	31
Εικόνα 3.9. SVP – Deep Water.....	32
Εικόνα 3.10. SSS – Deep Water	32
Εικόνα 4.1. Μετατροπή δεδομένων στο Hypack.....	34
Εικόνα 4.2. Προφίλ ήχου	35
Εικόνα 4.3. Περιβάλλον εργασίας στο AutoClean – Chart View	36
Εικόνα 4.4. Περιβάλλον εργασίας στο AutoClean – Slice View	37
Εικόνα 4.5. Περιβάλλον εργασίας στο AutoClean – 3D View	37
Εικόνα 4.6. Φίλτρα λογισμικού AutoClean.....	38
Εικόνα 4.7. Οπτικοποίηση βαθυμετρίας σε περιβάλλον QGIS	39
Εικόνα 4.8. Μετατροπή βαθυμετρίας σε DTM.....	40
Εικόνα 4.9. Δημιουργία ισοϋψών καμπυλών	41
Εικόνα 4.10. Δεδομένα SSS.....	43
Εικόνα 4.11. Bottom Track.....	43
Εικόνα 4.12. Μωσαϊκό SSS για βραχώδη περιοχή «μπλε περίγραμμα»	45
Εικόνα 4.13. Μωσαϊκό SSS για αμμώδη περιοχή «κόκκινο περίγραμμα» και περιοχές αργίλου.....	45
Εικόνα 4.14. Seabed Classification Manager	46

Εικόνα 4.15. Οπτικοποίηση ταξινόμησης βυθού στο Ντακάρ	47
Εικόνα 4.16. Οπτικοποίηση ταξινόμησης βυθού στο Γκραν Μπασάμ.....	47
Εικόνα 5.1. Φασματική υπογραφή νερού	52
Εικόνα 5.2. (Αριστερά) Level-1C, (Δεξιά) Level-2A	56
Εικόνα 5.3. Κατανομή γραμμικής συσχέτισης, μορφής Scatter Plot.....	59
Εικόνα 5.4. Διάγραμμα επεξήγησης αποθάμβωσης «Regression Analysis».....	59
Εικόνα 5.5. Αποθαμβωμένη εικόνα RGB ορατού φάσματος στην περιοχή Γκραν-Μπασάμ της Ακτής Ελεφαντοστού.....	60
Εικόνες 5.6. Αποθαμβωμένη εικόνα RGB ορατού φάσματος, στην περιοχή Ντακάρ της Σενεγάλης.....	60
Εικόνα 5.7. Αποτελέσματα ψευδοχρωματική εικόνας διόρθωσης της υδάτινης στήλης DII, στην περιοχή Ντακάρ Σενεγάλης	63
Εικόνα 5.8. Αποτελέσματα ψευδοχρωματικής εικόνας διόρθωσης της υδάτινης στήλης DII, στην περιοχή Γκραν-Μπασάμ της Ακτής Ελεφαντοστού	65
Εικόνα 5.9. Βιο-οπτικοί παράμετροι	66
Εικόνα 5.10. Λόγοι και αλγοριθμικοί λόγοι βιο-οπτικών παραμέτρων.....	68
Πίνακας 5.1. Μαθηματικές εξισώσεις βαθυμετρίας	69
Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα RMSE	71
Εικόνα 6.1. Ενδεικτική φασματική ανάλυση πολυφασματικών και υπερ-φασματικών δορυφόρων.....	76

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του θέματος.

Η παρούσα μελέτη αφορά την ανάλυση βυθομετρικών μετρήσεων πεδίου και την σύγκριση τους με βαθυμετρία εξαγόμενη από δορυφορικά δεδομένα στο παράκτιο τμήμα της Σενεγάλης και της Ακτής Ελεφαντοστού στην Δυτική Αφρική. Αυτές οι δύο περιοχές, έχουν δικτυωθεί με την τοποθέτηση του υποθαλάσσιου καλωδίου «οπτικής ίνας» MainOne, το οποίο χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων και επικοινωνιών στον χώρο των υποθαλάσσιων καλωδίων. Το συγκεκριμένο καλώδιο, τοποθετήθηκε το 2010 και μέχρι σήμερα συνεχίζει να επεκτείνεται και να εξυπηρετεί περισσότερες χώρες.

Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο εξυπηρετούσε αρχικά μονό την Πορτογαλία, την Νιγηρία και την Γκάνα. Πλέον έχει επεκταθεί και εξυπηρετεί την Σενεγάλη και την Ακτή Ελεφαντοστού, όπου το συνολικό μήκος του καλωδίου είναι περίπου 7.000 χιλιόμετρα (Εικόνα 1.1). Η επέκταση αυτή ξεκίνησε το 2018, όπου ο ανάδοχος του έργου ήταν η εταιρεία SubCom, η οποία συνεργάστηκε με την Power Sub Link για την αποτύπωση του βυθού.



Εικόνα 1.1. Υποθαλάσσιο Καλώδιο Οπτικής Ίνας MainOne, Πηγή: <https://www.submarinecablemap.com/submarine-cable/mainone>

Η SubCom (Submarine Communications) αντιπροσωπεύει μια αξιοσημείωτη διεθνή εταιρεία που ειδικεύεται στον χώρο των υποθαλάσσιων καλωδίων επικοινωνίας. Παρουσιάζει ενδιαφέρουσα ιστορία και αξιοσημείωτη εμπειρία στην ανάπτυξη, εγκατάσταση και συντήρηση των υποθαλάσσιων καλωδίων. Με την παρουσία της στον χώρο αυτό, η SubCom έχει εκτελέσει πολυάριθμα σημαντικά έργα που αποτελούν την πλατφόρμα για την σύνδεση του παγκόσμιου δικτύου, διευκολύνοντας την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών ηπείρων και περιοχών (Seacoast Online, 2023).

Επιπλέον, η SubCom επενδύει συστηματικά στην τεχνολογική καινοτομία, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των υποθαλάσσιων καλωδίων, ανταποκρινόμενη έτσι στις αυξανόμενες απαιτήσεις των επικοινωνιών και της παγκόσμιας συνδεσιμότητας. Συνολικά, η SubCom αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στον χώρο της υποθαλάσσιας επικοινωνίας.

Όπως προαναφέρθηκε, η εταιρεία που ανέλαβε την βαθυμετρική αποτύπωση, για την επέκταση του καλωδίου, ήταν η Power Sub Link (PSL). Η PSL είναι μια Ελληνική εταιρεία που εξειδικεύεται στην παροχή ολοκληρωμένων υπηρεσιών στον χώρο των υποθαλάσσιων καλωδίων, προσφέροντας υπηρεσίες βαθυμετρίας που καλύπτουν όλο το φάσμα, από την μηχανική και την διαχείριση έργων έως την εγκατάσταση και την συντήρηση των υποθαλάσσιων καλωδίων. Διαθέτει δικό της εξοπλισμό και εξειδικευμένο προσωπικό.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για το θαλάσσιο τμήμα της Ακτής Ελεφαντοστού και της Σενεγάλης, αναφέρονται σε γεωτεχνικά και γεωφυσικά δεδομένα. Γενικά, η γεωφυσική είναι ένας τομέας της επιστήμης που ασχολείται με την μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων και των διεργασιών της Γης, καθώς και την εφαρμογή μεθόδων για την μελέτη του υπόγειου και υποθαλάσσιου χώρου. Συνήθως, η συλλογή γεωφυσικών δεδομένων αναφέρεται σε φυσικές μεθόδους, όπως η ακουστική, η ηλεκτρομαγνητική, το γεωραντάρ, και άλλες, για να μελετήσει τις ιδιότητες του υπεδάφους και του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος (Sundararajan κ.α., 2019).

Αντίθετα, η επιστήμη της γεωτεχνικής ασχολείται με την μελέτη και την εφαρμογή μεθοδολογιών για την μηχανική και γεωλογική ανάλυση του εδάφους και του υπεδάφους, καθώς και την κατασκευή εργοστασίων, οδοστρωμάτων, γεφυρών και άλλων κατασκευών. Συνήθως, η γεωτεχνική χρησιμοποιεί γεωλογικές και μηχανικές αρχές για την μελέτη και την κατασκευή των έργων στο έδαφος. Οι γεωτεχνικοί χρησιμοποιούν συχνά γεωλογικά δεδομένα και μηχανικές ανάλυσης για την κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους και την ασφαλή και αποτελεσματική κατασκευή υποδομών. Σαφέστατα, πρέπει να παρθεί δείγμα του πυθμένα, ώστε να αναλυθεί και να προκύψουν χρήσιμα αποτελέσματα από εργαστηριακές μελέτες (Samui κ.α., 2021).

1.1.1 Γεωφυσικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Στο συγκεκριμένο έργο συλλέχθηκαν γεωφυσικά και γεωτεχνικά δεδομένα, αλλά η παρούσα εργασία εστιάζει μόνο στη συλλογή και την επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων. Για την συλλογή ηχοβολιστικών γεωφυσικών δεδομένων βαθυμετρίας, χρησιμοποιήθηκε MBES (Multibeam Echo Sounder), SSS (Side Scan Sonar), SBP (Sub-Bottom Profiler) «σεισμικά δεδομένα» και Μαγνητόμετρο.

Σχετικά με τον εξοπλισμό, το MBES χρησιμοποιείται για την πυκνή συλλογή βαθυμετρικών δεδομένων στον πυθμένα της θάλασσας. Αποτελείται από πολλαπλούς ηχοβολιστές και δέκτες που εκπέμπουν ήχο και λαμβάνουν τις αντηχήσεις, επιτρέποντας την δημιουργία λεπτομερών χαρτών του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος, όπως βάθη, υποθαλάσσιες δομές και τοπογραφία (Lurton, 2010). Από την άλλη, τα ηχοβολιστικά συστήματα SSS είναι σχεδιασμένα για την ανίχνευση αντικειμένων και της τοπογραφίας του πυθμένα. Χρησιμοποιούνται για αναλύσεις πυθμένα όπου απαιτείται υψηλή ανάλυση και λεπτομερής απεικόνιση. Ένα σύστημα SBP χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των στρωμάτων του υποθαλάσσιου εδάφους, και ειδικότερα παρέχει πληροφορίες για την πυκνότητα, την σύνθεση και την δομή του υποθαλάσσιου εδάφους (Kordella, 2020).

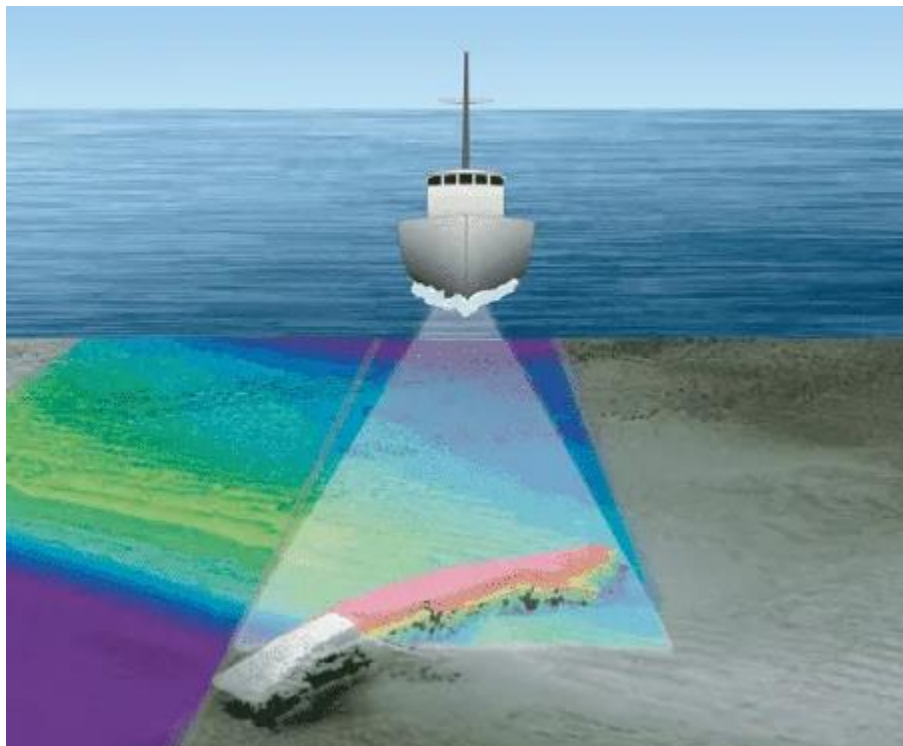


Εικόνα 1.2. Εφαρμογή SSS, Πηγή: <https://www.linkedin.com/pulse/seabed-imaging-using-side-scan-sonar-bishoy-boshra/>

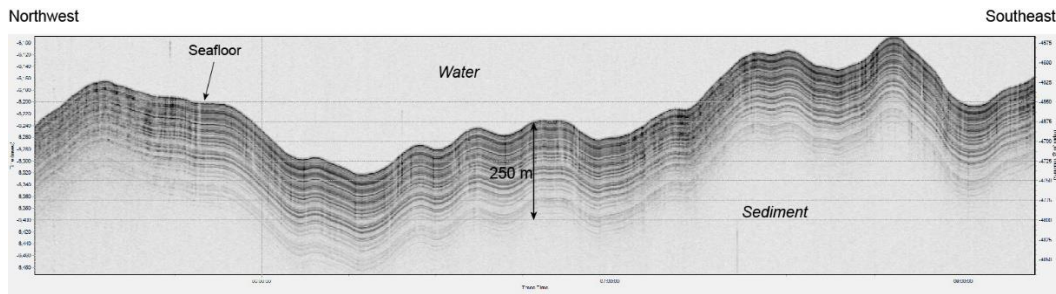


Εικόνα 1.3. Εφαρμογή μαγνητομέτρου, Πηγή:

<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/magnetometer/magnetometer.html>



Εικόνα 1.4. Εφαρμογή MBES, Πηγή: <https://southwest.coastalmonitoring.org/data/bathymetry/>



Εικόνα 1.5. Εφαρμογή SBP, Πηγή: <https://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex2104/features/sub-bottom/media/sediment-hires.jpg>

Το μαγνητόμετρο χρησιμοποιείται για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου στον πυθμένα της θάλασσας. Αυτό μπορεί να αποκαλύψει μαγνητικές ανωμαλίες που οφείλονται σε υποθαλάσσιες δομές, όπως μαγνητικά ορυκτά και θαμμένα καλώδια, και μπορεί να βοηθήσει στην μελέτη της υποθαλάσσιας γεωλογίας και των αρχαιολογικών ευρημάτων (NOAA, 2023). Στις τοπογραφικές έρευνες για την τοποθέτηση υποθαλάσσιων καλωδίων, χρησιμοποιούνται τα μαγνητόμετρα ώστε να εντοπίσουν ήδη τοποθετημένα καλώδια. Ο εντοπισμός των θαμμένων ενεργών και ανενεργών καλωδίων είναι ένα κρίσιμο σημείο, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή κάπου άλλου καλωδίου.

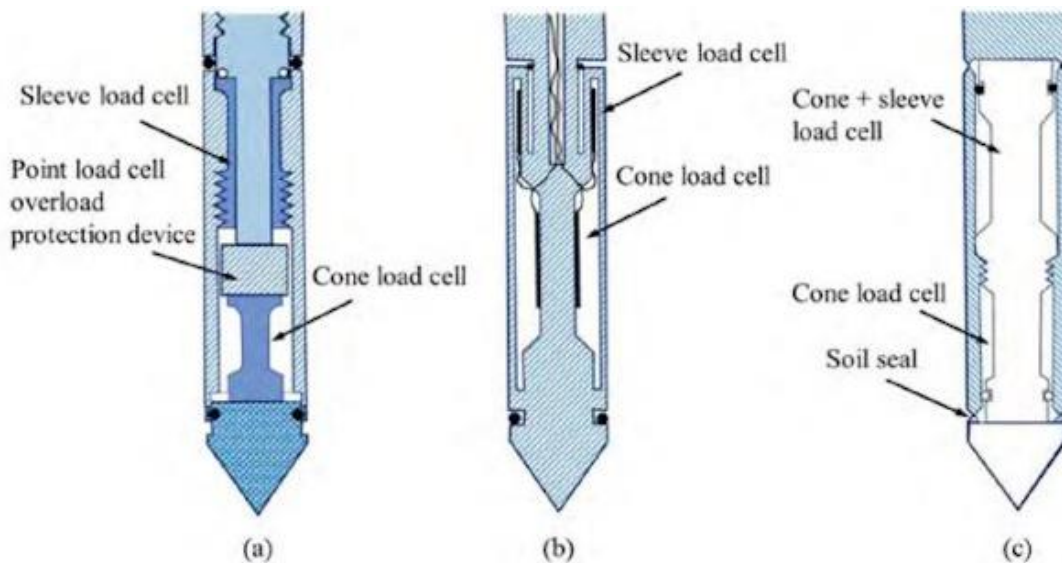
Κατά την διάρκεια των μετρήσεων πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν συστήματα μέτρησης ταχύτητας ήχου στο νερό. Τα ηχοβολιστικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Sound Velocity Sensor και το Sound Velocity Profiler (SVP). Το SVS είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό, η οποία είναι σημαντική για την ακριβή ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται από τις υποθαλάσσιες ακουστικές συσκευές, όπως τα MBES και SSS. Αυτή η μέτρηση βοηθά στον υπολογισμό του βάθους και της τοπογραφίας του πυθμένα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα SVS είναι αναγκαία για την σωστή επεξεργασία των δεδομένων από τις υποθαλάσσιες συσκευές. Ένα σύστημα SVP είναι μια κινητή συσκευή για την μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό σε διάφορα βάθη. Επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των μεταβολών της ταχύτητας του ήχου σε βάθος, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της ακρίβειας των δεδομένων που συλλέγονται από υποβρύχιες μελέτες. Το SVP χρησιμοποιείται συνήθως σε πλοία για την μέτρηση των μεταβολών της ταχύτητας του ήχου στο νερό σε όλα τα βάθη της θάλασσας, προκειμένου να διορθώνονται τα δεδομένα που συλλέγονται από άλλες υποβρύχιες ηχοβολιστικές συσκευές (IHO, 2015).

Επιπροσθέτως, υπάρχουν και τα συστήματα μέτρησης ταχύτητας του ήχου, τα οποία ονομάζονται SVS (Sound Velocity System), τα οποία διαφέρουν με τα SVP. Η κύρια τους διαφορά, είναι πως τα συστήματα SVS μετρούν την ταχύτητα του ήχου στο νερό σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, όπως όταν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ταχύτητα του ήχου σε ένα συγκεκριμένο σημείο του ωκεανού (IEEE, 2023). Μάλιστα, πολλές φορές χρησιμοποιούνται και τα δύο συστήματα, ώστε το ένα να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα του άλλου και να εξαλειφθεί το ενδεχόμενο λανθασμένης μέτρησης.

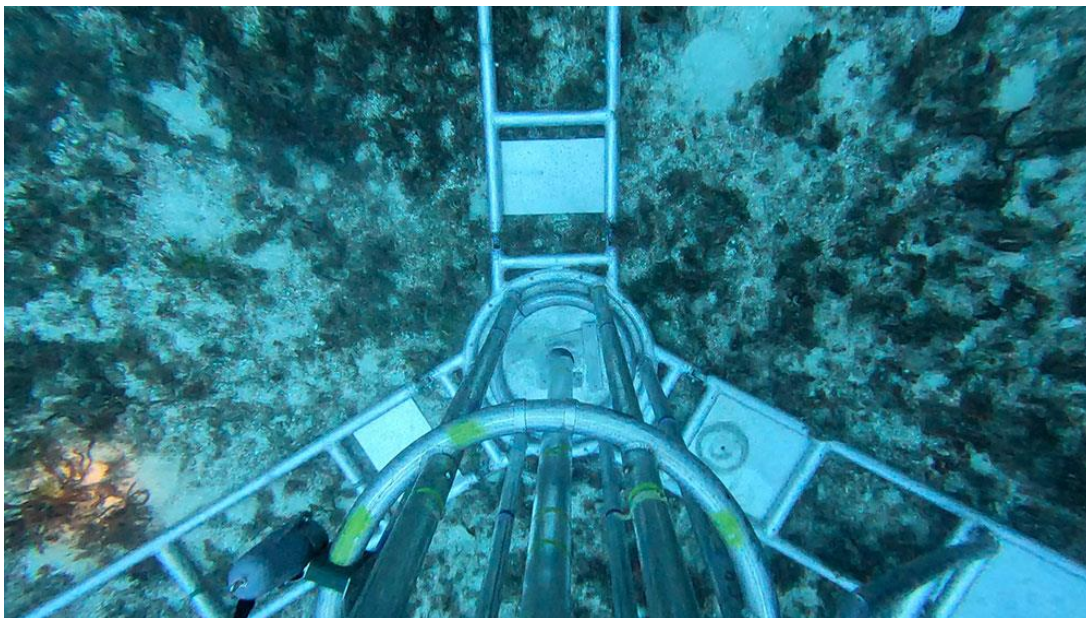
1.1.2 Γεωτεχνικά δεδομένα

Για την συλλογή δείγματος του πυθμένα και την κατανόηση των υπογείων συνθηκών, του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος και των ιδιοτήτων του εδάφους, χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι. Μια γνωστή μεθοδολογία ονομάζεται Cone Penetration Test (CPT) και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του υποθαλάσσιου εδάφους, όπως η συμπίεση, η πυκνότητα και η στρώση του. Επίσης, εξυπηρετεί στον κατασκευαστικό σχεδιασμό, όπως γέφυρες, ανεμογεννήτριες και άλλες υποθαλάσσιες κατασκευές (Samui κ.α., 2021).

Η μέθοδος Gravity Core χρησιμοποιείται για την συλλογή δείγματος από τον υποθαλάσσιο πυθμένα, βοηθώντας στην ανάλυση των ιζημάτων και την κατανόηση της γεωλογίας του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος, καθώς και στην μελέτη της σύστασης του υποθαλάσσιου εδάφους. Επιπροσθέτως, η τεχνική Vibrocoring χρησιμοποιείται για την συλλογή «πυρήνων» από τον υποθαλάσσιο πυθμένα, και συγκεκριμένα από ιζήματα, άμμο, λάσπη και άλλα υποθαλάσσια υλικά. Η μέθοδος περιλαμβάνει την χρήση ενός ειδικού εργαλείου που ονομάζεται "vibrocorer", το οποίο δημιουργεί δονήσεις ή κραδασμούς για να διεισδύσει στον πυθμένα και να συλλέξει δείγματα (Geoscience Australia, 2022).



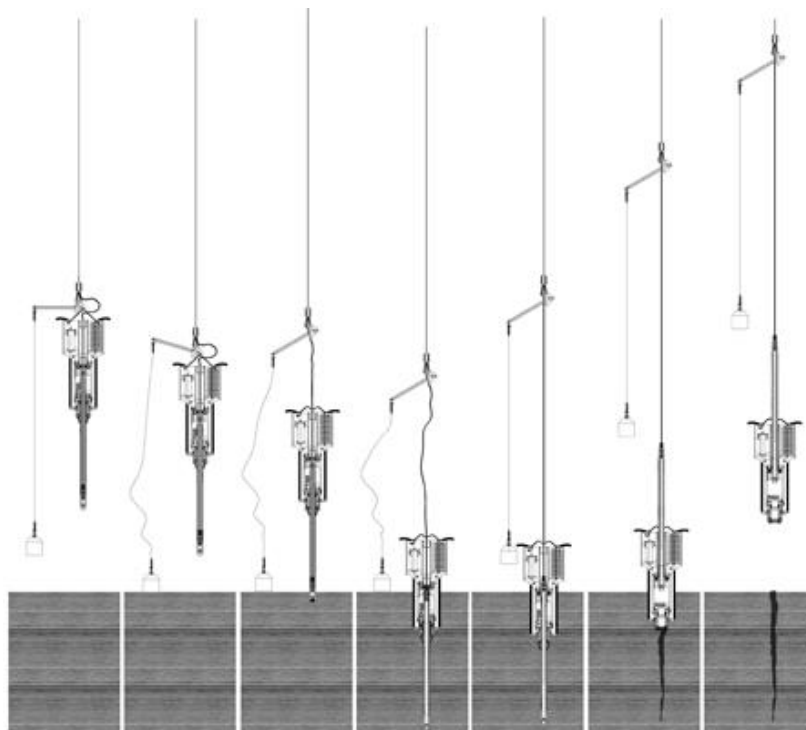
Εικόνα 1.6. Εφαρμογή CPT, Πηγή: <https://www.geoengineer.org/education/site-characterization-in-situ-testing-general/cone-penetration-testing-cpt>



Εικόνα 1.7. Εφαρμογή Gravity Core, Πηγή: <https://www.ga.gov.au/news-events/news/latest-news-archive/marine-geoscience-in-action-a-search-for-green-doughnuts>

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, πως υπάρχει και η μέθοδος Piston Coring η οποία αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο συλλογής δειγμάτων από τον πυθμένα των υδάτων και του υποθαλάσσιου εδάφους. Χρησιμοποιώντας πιστόνια και κυλίνδρους, αυτή η τεχνική επιτρέπει την αξιόπιστη και ποιοτική συλλογή δειγμάτων σε βάθη των υδάτων. Μάλιστα, λειτουργούν με μεγάλη ακρίβεια, κρατώντας τα δείγματα αδιατάρακτα κατά την διάρκεια της ανάκτησης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως στην επιστημονική έρευνα, επιτρέποντας την συλλογή ποικίλων δειγμάτων που παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την γεωλογία και το υποθαλάσσιο περιβάλλον. Η συγκεκριμένη μέθοδος συμβάλλει στην κατανόηση των υποθαλάσσιων οικοσυστημάτων και της γεωλογίας του πυθμένα, προσφέροντας ενισχυμένη επιστημονική πληροφoρία (Jahnke, 1997).

Στο συγκεκριμένο έργο, πάρθηκαν δείγματα και από το παράκτιο κομμάτι, όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Grab Sampling, όπου ένα μικρό δείγμα λαμβάνεται από το έδαφος με την χρήση ειδικού εργαλείου. Αυτή η μέθοδος είναι γρήγορη και εύκολη, αλλά παρέχει περιορισμένες πληροφορίες για την εδαφική σύσταση (Kim UJ, 2014). Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα δείγματα αυτά είναι περιορισμένα και αντιπροσωπεύουν μόνο την συγκεκριμένη τοποθεσία και την στιγμή της συλλογής. Λόγω αυτού του περιορισμού, δεν παρέχουν πλήρεις πληροφορίες για την κατακόρυφη εδαφική σύσταση σε ευρύτερη περιοχή. Έτσι, για πιο αντιπροσωπευτικές αναλύσεις εδαφικής σύστασης, απαιτούνται επιπλέον δείγματα από διάφορες θέσεις και βάθη.



Εικόνα 1.8. Εφαρμογή Piston Coring, Πηγή: <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/7/3353#>

1.2 Στόχος της εργασίας

Το αντικείμενο της συλλογής και επεξεργασίας υποθαλάσσιων βαθυμετρικών δεδομένων, ώστε να προκύψουν ερμηνείες του πυθμένα της θάλασσας, αφορούν την επιστήμη της υδρογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, η υδρογραφία αναφέρεται στον κλάδο της επιστήμης που ασχολείται με την μελέτη και τη χαρτογράφηση του αναγλύφου του θαλάσσιου πυθμένα, συμπεριλαμβανομένων των ωκεανών, θαλασσών, ποταμών και λιμνών. Οι υδρογράφοι ασχολούνται με την συλλογή, την ανάλυση και την απεικόνιση γεωγραφικών δεδομένων που σχετίζονται με τα ύδατα, προκειμένου να δημιουργήσουν ναυτιλιακούς χάρτες, χάρτες βυθού, προγνώσεις θαλάσσιων φαινομένων και άλλα γεωχωρικά προϊόντα που εξυπηρετούν ναυτιλιακές, θαλάσσιες και υδρολογικές δραστηριότητες (IHO, 2005).

Στον τομέα της υδρογραφίας, έχει συμβεί σημαντική εξέλιξη με την ενσωμάτωση δορυφορικών δεδομένων στις υδρογραφικές διαδικασίες. Οι δορυφορικές τεχνολογίες, τείνουν να γίνουν αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης υδρογραφίας και συμβάλουν στην εξέλιξη αυτής. Οι δορυφορικές εικόνες, όπως αυτές που παρέχονται από τους δορυφόρους Sentinel-2 του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus, παρέχουν υψηλή ανάλυση σε εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη των θαλάσσιων περιοχών. Αυτές οι εικόνες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της θαλάσσιας επιφάνειας, την ανίχνευση αλλαγών στην παράκτια ζώνη, την ταξινόμηση του βυθού και την εκτίμηση του βάθους του νερού.

Η ενσωμάτωση δορυφορικών δεδομένων έχει επεκτείνει την δυνατότητα της υδρογραφίας να παρέχει ακριβείς, ενημερωμένες και πιο εκτεταμένες πληροφορίες για τις θαλάσσιες περιοχές και το υποθαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό βοηθά στην βελτίωση της ναυτιλίας και στην καλύτερη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων. Οι δορυφορικές πληροφορίες παρέχουν σημαντικά δεδομένα για την ασφάλεια της ναυτιλίας, τον περιβαλλοντικό έλεγχο, την παρακολούθηση της ακτογραμμής, και την επιστημονική έρευνα. Συνολικά, η χρήση δορυφορικών δεδομένων συμβάλλει στην βελτίωση της γνώσης και της ασφάλειας στον υδάτινο χώρο.

Ωστόσο, η ακρίβεια και η απόδοση αυτών των δορυφορικών δεδομένων μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος της θάλασσας. Στα μεγαλύτερα βάθη, η υδρογραφία χρησιμοποιεί παραδοσιακές μεθόδους συλλογής δεδομένων με ειδικά σκάφη και κατάλληλο εξοπλισμό. Επομένως, η δορυφορική υδρογραφία αποτελεί λύση για την παρακολούθηση παράκτιων περιοχών και υδάτων με μικρό βάθος, αλλά πρέπει να συνδυάζεται και με τις άλλες μεθόδους συλλογής βαθυμετρίας για την μέτρηση μεγαλύτερων βαθών (Buongiorno Nardelli, 2020).

Έτσι, ως κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι αρχικά να επεξεργαστούν βαθυμετρικά δεδομένα «MBES, SSS & SVP», να υπολογισθούν τα βάθη και να πραγματοποιηθεί η ταξινόμηση του βυθού. Έπειτα, να ληφθούν τα κατάλληλα δορυφορικά δεδομένα και να επεξεργαστούν, ώστε να εφαρμοστούν αλγόριθμοι ταξινόμησης του βυθού. Στο τέλος, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση αυτών των δύο μεθόδων, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα και ενδεχόμενες προτάσεις.

Για την ολοκλήρωση των παραπάνω στόχων, υπάρχει πληθώρα λογισμικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τόσο για τα βαθυμετρικά ηχοβολιστικά δεδομένα, όσο και για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό και την εξαγωγή της βαθυμετρίας, σε μορφή σημειακής πληροφορίας, ήταν το εμπορικό λογισμικό AutoClean της BeamworX. Για τα δεδομένα Side Scan Sonar χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Hypack και SonarWiz, όπου υπολογίστηκε η ταξινόμηση του βυθού. Σε λογισμικό GIS «QGIS & ArcGIS», πραγματοποιήθηκαν διάφοροι υπολογισμοί, όπως δημιουργία ισοβαθών και DTM. Τα δορυφορικά δεδομένα προ-επεξεργάστηκαν και επεξεργάστηκαν αποκλειστικά στο ελεύθερο λογισμικό SNAP. Τέλος, για την δημιουργία διαγραμμάτων και την εφαρμογή στατιστικών, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Excel και IBM SPSS.

Η συλλογή δεδομένων SSS (Side Scan Sonar) και MBES (Multibeam Echo Sounder) μπορεί να αποκαλύψει πολλά ενδιαφέροντα στοιχεία για το υποθαλάσσιο περιβάλλον, αναδεικνύοντας την γεωλογία της περιοχής, αποκαλύπτοντας γεωλογικά χαρακτηριστικά και αρχαιολογικά ευρήματα. Ταυτόχρονα, μπορεί να προσφέρει ενδείξεις για την υποθαλάσσια οικολογία, την παρουσία βιοτικών κοινοτήτων και τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, μπορεί να ανιχνεύσει αέρια σώματα και υδροθερμικές πηγές, προσφέροντας πληροφορίες για δυνητικές ζώνες υψηλής δραστηριότητας. Τέλος, η αναγνώριση της υποθαλάσσιας φυτοκάλυψης και οι υδρογραφικές παρατηρήσεις μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του υδάτινου περιβάλλοντος. Αυτά τα στοιχεία είναι πολύτιμα για την έρευνα, την διαχείριση των θαλάσσιων πόρων, την πρόβλεψη κινδύνων στη ναυτιλία και την προστασία του περιβάλλοντος.

Επίσης, εξετάστηκε η ακρίβεια των δεδομένων και η χωρικής τους ανάλυση. Σαφέστατα, η χωρική ανάλυση των ηχοβολιστικών δεδομένων είναι της τάξεως των εκατοστών ή του μέτρου, ενώ των δορυφορικών εικόνων είναι των μέτρων. Αυτό δυνητικά θα μπορέσει να βελτιωθεί με την γνωστή μέθοδο Data Fusion, χρησιμοποιώντας το παγχρωματικό ασπρόμαυρο φασματικό κανάλι (Gagolewski, 2022). Επίσης, αξιολογήθηκαν οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν στα δορυφορικά δεδομένα, ως προς την ακρίβεια και την ικανότητα τους. Στην αξιολόγηση του αποτελέσματος της ταξινόμησης των δορυφορικών δεδομένων, με την χρήση νέων τεχνολογιών, θα πρέπει να συγκριθούν με την ταξινόμηση του βυθού από τα δεδομένα ηχοβολιστικών σαρώσεων.

Η ταξινόμηση του βυθού στα βαθυμετρικά ηχοβολιστικά δεδομένα, είναι μια έγκυρη και ακριβής μέθοδος, ώστε να διαπιστωθούν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του πυθμένα (Fish, 1990). Αυτά τα χαρακτηριστικά, του τμήματος του πυθμένα, μπορεί να είναι μια αμμώδης ή βραχώδης περιοχή, φυτοκάλυψη ποσειδωνίας ή κάποια άλλα χαρακτηριστικά. Συνήθως το αποτέλεσμα που προκύπτει, είναι ένα πλήθος διαγραμμάτων/χαρτοσυνθέσεων, όπου απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του πυθμένα σε μορφή πολυγώνου με ξεχωριστό χρωματισμό. Έτσι, ο αναγνώστης είναι σε θέση να αντιληφθεί και να ξεχωρίσει όλα τα απεικονιζόμενα στοιχεία του πυθμένα, διότι το καθένα θα έχει ξεχωριστό χρωματισμό.

Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, συντάχθηκαν όλοι οι απαραίτητοι χάρτες, με τα κατάλληλα τους χαρακτηριστικά, στους οποίους θα εμπεριέχονται οι πληροφορίες της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης του βυθού, από τα αποτελέσματα της ηχοβολιστικής μελέτης και της δορυφορικής βαθυμετρίας. Έτσι, η σύγκριση των δύο μεθόδων θα είναι πιο κατατοπιστική και αποτελεσματική.

1.3 Σημασία της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει την εξερεύνηση και την επεξεργασία δεδομένων βαθυμετρίας και πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων, με στόχο την εξαγωγή και βαθμονόμηση δορυφορικής βαθυμετρίας. Η σημασία αυτής της εργασίας είναι πολυδιάστατη και εκτείνεται σε διάφορους τομείς, από την επιστημονική κοινότητα μέχρι τις πρακτικές εφαρμογές και την κοινωνική / οικονομική επίδραση.

Η επιστημονική σημασία της εργασίας είναι η συμβολή της στην κατανόηση της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης του βυθού. Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων βαθυμετρίας και πολυφασματικών δορυφορικών δεδομένων μπορεί να προσφέρει νέες προοπτικές και κατανοήσεις σε αυτόν τον τομέα. Επιπλέον, η εργασία μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Συνεπώς, ανοίγει το δρόμο για πολλές πρακτικές εφαρμογές που μπορούν να έχουν άμεση επίδραση στην κοινωνία και στο περιβάλλον. Η κατανόηση της υποβρύχιας γεωμορφολογίας και του οικοσυστήματος στην περιοχή, μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων για την διαχείριση της ακτογραμμής, την διατήρηση της βιοποικιλότητας και την προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Στην συνέχεια, η εφαρμογή των αποτελεσμάτων της εργασίας, σε προγράμματα πρόβλεψης και λήψης προληπτικών μέτρων για φυσικές καταστροφές, μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια και την προστασία του πληθυσμού και των περιουσιών στις παράκτιες περιοχές. Μάλιστα, η εφαρμογή νέων τεχνολογιών και μεθόδων στην υδρογραφία και την γεωπληροφορική μπορεί να ενισχύσει την καινοτομία και την ανταγωνιστικότητα στον τομέα της θαλάσσιας τεχνολογίας και της βιομηχανίας (Ziyin Wu, 2020).

Όσον αφορά τις πρακτικές εφαρμογές, μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις σε διάφορους τομείς, όπως η τοπογραφία, η περιβαλλοντική διαχείριση και η προστασία των υδάτων. Για παράδειγμα, η βελτιωμένη κατανόηση της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης του βυθού μπορεί να βοηθήσει στην προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων, στην ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μεθόδων για την τοποθέτηση υποθαλάσσιων καλωδίων και στην αύξηση της αποδοτικότητας των επιχειρήσεων που εξαρτώνται από την ακριβή κατανόηση του βυθού (Radjawane, 2022).

Επιπροσθέτως, οι πληροφορίες και οι γνώσεις που θα αποκτηθούν από αυτήν την έρευνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνικών παρακολούθησης του υποβρύχιου περιβάλλοντος, την πρόβλεψη φυσικών καταστροφών, όπως τσουνάμι και καταστροφές παράκτιων περιοχών, καθώς και για την ανάπτυξη αειφόρων πρακτικών για την διαχείριση των θαλάσσιων πόρων και την προστασία του οικοσυστήματος.

Τέλος, η κοινωνική και οικονομική σημασία δεν πρέπει να υποτιμηθεί. Η βελτιωμένη κατανόηση της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης του βυθού μπορεί να συμβάλει στην προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων, ένα ζήτημα ζωτικής σημασίας για την κοινωνία μας. Επιπλέον, η ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μεθόδων για την τοποθέτηση υποθαλάσσιων καλωδίων και αγωγών μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά οφέλη, καθώς η αύξηση της αποδοτικότητας μπορεί να μειώσει το κόστος και να αυξήσει την αξιοπιστία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

1.4 Διάταξη της Διπλωματικής Εργασίας

Η διάταξη της διπλωματικής εργασίας, βασίζεται στην επεξήγηση όλων των εννοιών και των μεθοδολογιών. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 όλες οι βασικές έννοιες επεξηγούνται, ώστε η εργασία να μπορεί να αναγνωστεί και να κατανοηθεί εις βάθος, από πολλούς επιστημονικούς κλάδους, πέρα από τον κλάδο της Υδρογραφίας και της Τηλεπισκόπησης. Στο Τρίτο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης με διάφορα στοιχεία, όπως κλιματολογικά, γεωμορφολογικά, και αναφέρονται οι πληροφορίες του έργου, όπως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συμπεριλαμβανομένων και των πλοίων.

Το Τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει την μεθοδολογία επεξεργασίας των βαθυμετρικών δεδομένων, την επεξήγηση βασικών εννοιών που αφορούν τον κλάδο της Υδρογραφίας και της Τηλεπισκόπησης, το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, σε τι αποσκοπούν, και τι αποτελέσματα μπορούν να εξάγουν. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα ακατέργαστα δεδομένα MBES, χρησιμοποιώντας το λογισμικό AutoClean, ενώ αναλύεται η διαδικασία ταξινόμησης του βυθού, εφαρμόζοντας φίλτρα και εξάλειψη σφαλμάτων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Hyrack. Το Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζει την μεθοδολογία εξαγωγής βαθυμετρίας από δορυφορικά δεδομένα, την ταξινόμηση του βυθού με την χρήση βιο-οπτικών παραμέτρων και στην συνέχεια τον υπολογισμό της βαθυμετρίας, μαζί με την στατιστική ακρίβεια των αποτελεσμάτων, υπολογίζοντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Στο Έκτο Κεφάλαιο παρατίθεται τα συμπεράσματα, όπου εκεί συζητείται και αξιολογείται το αποτέλεσμα της δορυφορική βαθυμετρίας, η ακρίβεια της ταξινόμησης του βυθού με την χρήση βιο-οπτικών παραμέτρων και η σύγκρισή τους με μετρήσεις πεδίου βαθυμετρίας και ταξινόμησης. Οι κατάλληλες χαρτοσυνθέσεις παρουσιάζονται σε Παράρτημα.

Κεφάλαιο 2 – Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Αρχές της υδρογραφίας

Η υδρογραφική έρευνα είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει την προετοιμασία, συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση, παραγωγή και διανομή των υδρογραφικών δεδομένων. Τα υδρογραφικά δεδομένα περιλαμβάνουν την πληροφορία για το βάθος, την τοπογραφία, την ταξινόμηση των ιζημάτων του πυθμένα και την ανίχνευση αντικειμένων του βυθού, καθώς και την πληροφορία για την τοποθεσία, τη ροή, την πυκνότητα, την θερμοκρασία, την αλατότητα και την χημική σύσταση του νερού (IHO, 2005). Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των αλλαγών στο περιβάλλον και για την υποστήριξη των θαλάσσιων δραστηριοτήτων (Pugh, 2004). Η υδρογραφική χαρτογράφηση είναι η διαδικασία παραγωγής χαρτών του βυθού της θάλασσας, των λιμνών και των ποταμών. Αυτοί οι χάρτες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, την επιστημονική έρευνα, την προστασία του περιβάλλοντος και την οικονομική ανάπτυξη (Pugh, 2004) και μπορούν να είναι είτε σε αναλογικοί, είτε σε ψηφιακοί.

Οι υδρογραφικές έρευνες περιλαμβάνουν την χρήση σκαφών, υποβρυχίων, δορυφόρων, αισθητήρων και άλλων συστημάτων για την μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών των ωκεανών, των θαλασσών, των παράκτιων περιοχών, των λιμνών και των ποταμών (Pugh, 2004). Σχετικά με τα υδρογραφικά συστήματα, είναι τα όργανα και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την συλλογή, την επεξεργασία και την ανάλυση των υδρογραφικών δεδομένων. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από την φύση της έρευνας, τις απαιτήσεις για την ακρίβεια και την ανάλυση των δεδομένων, και τον διαθέσιμο προϋπολογισμό (Lurton, 2010).

Η υδρογραφία απαιτεί εξειδικευμένη γνώση και δεξιότητες σε πολλά επιστημονικά και τεχνικά ζητήματα, συμπεριλαμβανομένων της γεωγραφίας, της γεωλογίας, της φυσικής, της μηχανικής, της ακουστικής, της πληροφορικής και της ναυτιλίας. Οι υδρογράφοι πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με τις τεχνολογίες και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την συλλογή, την επεξεργασία, την ανάλυση και την παρουσίαση των υδρογραφικών δεδομένων. Επίσης, πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με τους νόμους και τους κανονισμούς που διέπουν την χρήση και την προστασία των υδάτινων πόρων (Lurton, 2010).

Τα υδρογραφικά πρότυπα και οι κανονισμοί είναι οι κατευθυντήριες οδηγίες που διέπουν την πρακτική της υδρογραφίας και μπορεί να καθορίζουν τις μεθόδους συλλογής δεδομένων, τις απαιτήσεις για την ακρίβεια, την ανάλυση και την παρουσίαση των δεδομένων, καθώς και τις διαδικασίες για την επαλήθευση και την επικύρωση των δεδομένων. Οι διεθνείς οργανισμοί όπως ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός (IHO) και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχουν ορίσει αυτά τα πρότυπα και τους κανονισμούς (IHO, 2005).

Η υδρογραφία έχει πολλές εφαρμογές, στην ναυσιπλοΐα, την επιστημονική έρευνα, την προστασία του περιβάλλοντος, την οικονομική ανάπτυξη και την ασφάλεια. Ειδικότερα, οι υδρογραφικοί χάρτες χρησιμοποιούνται για την ασφαλή πλοήγηση των πλοίων, την επιστημονική έρευνα των ωκεανών και των παράκτιων περιοχών, την προστασία και την διαχείριση των υδάτινων πόρων, την εξερεύνηση και την εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων πόρων, και την προετοιμασία για και την αντίδραση σε φυσικές καταστροφές (Pugh, 2004).

2.2 Βαθυμετρικά δεδομένα

Τα βαθυμετρικά δεδομένα είναι οι πληροφορίες που συλλέγονται για το βάθος του νερού σε συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία χαρτών του βυθού, την ανάλυση της δομής του και την κατανόηση των διαδικασιών που επηρεάζουν την τοπογραφία (Lurton, 2010).

Τα βαθυμετρικά δεδομένα μπορούν να συλλεγούν με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένων (Lurton, 2010):

- Ηχοβολιστικά συστήματα πολλαπλής δέσμης (MBES – MultiBeam Echo Sounder): Τα MBES χρησιμοποιούν έναν πομπό και έναν δέκτη για να στείλουν και να λάβουν ηχητικά σήματα. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της αποστολής και της λήψης του σήματος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βάθους. Η βαθμονόμηση και ο έλεγχος του εξοπλισμού είναι κρίσιμης σημασίας, πριν από κάθε μέτρηση.
- Συστήματα πλευρικής σάρωσης (SSS – Side Scan Sonar): Τα SSS χρησιμοποιούν ηχητικά σήματα για την δημιουργία αποτύπωσης του βυθού. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παράγουν λεπτομερείς εικόνες της δομής του βυθού και των αντικειμένων που βρίσκονται στον βυθό, καταγράφοντας την ένταση της κάθε ανάκλασης, και έτσι καθιστούν δυνατή την ταξινόμηση του πυθμένα.
- Συστήματα Sub-Bottom Profilers (SBP): Τα SBP χρησιμοποιούν ηχητικά σήματα για την ανίχνευση των στρωμάτων κάτω από τον βυθό. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παράσχουν πληροφορίες για την γεωλογική δομή και την παρουσία υδρογονανθράκων.
- Συστήματα Μέτρησης Ταχύτητας Ήχου «προφίλ» (SVP): Το SVP είναι όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ταχύτητας του ήχου σε διάφορα βάθη στο νερό. Η ταχύτητα του ήχου μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η πίεση του νερού. Η γνώση της ταχύτητας του ήχου σε διαφορετικά βάθη, είναι σημαντική για την ακριβή ερμηνεία των βαθυμετρικών δεδομένων (Medwin & Clay, 1998).

- Συστήματα Μέτρησης Ταχύτητας Ήχου (SVS): Το SVS είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση και παρακολούθηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό. Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των αλλαγών στην ταχύτητα του ήχου που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των βαθυμετρικών μετρήσεων (Medwin & Clay, 1998). Συχνά οι μετρήσεις του SVP επαληθεύονται από τα αποτελέσματα του SVS.

2.3 Μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων

Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τα βαθυμετρικά δεδομένα. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν την προ-επεξεργασία των δεδομένων, την εφαρμογή αλγορίθμων ταξινόμησης, την εκτίμηση του βάθους, και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η σύγκριση των διάφορων μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για συγκεκριμένες εφαρμογές. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την σύγκριση των αποτελεσμάτων των διάφορων μεθόδων, την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μεθόδων, και την ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των διάφορων μεθόδων (Lurton, 2010; Jensen, 2016). Στην παρούσα εργασία, διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων εφαρμόστηκαν για την επεξεργασία των βαθυμετρικών δεδομένων που περιλαμβάνουν την εφαρμογή αλγορίθμων ταξινόμησης, τον προσδιορισμό του βάθους, και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων επιτρέπει την ακριβέστερη και λεπτομερέστερη ανάλυση των υδρογραφικών δεδομένων (Fretwell et al., 2014).

Για τα βαθυμετρικά δεδομένα, όπως αυτά που συλλέχθηκαν από MBES και SSS, υπάρχουν διάφορα προγράμματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία, όπως το SonarWiz, Hypack και AutoClean. Αυτά τα προγράμματα παρέχουν εργαλεία για την επεξεργασία των δεδομένων, την ανίχνευση των ανωμαλιών, την εξομάλυνση των δεδομένων, και την εκτίμηση του βάθους. Κατά την επεξεργασία των βαθυμετρικών δεδομένων, η ανίχνευση τυχόν ανωμαλιών είναι ένα σημαντικό στάδιο. Οι ανωμαλίες μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως η παρουσία αντικειμένων στον βυθό, η παρουσία βιολογικών οργανισμών, ή η παρουσία θορύβου στα δεδομένα. Η ανίχνευση και απαλοιφή αυτών των ανωμαλιών μπορεί να βοηθήσει στην ακριβέστερη εκτίμηση του βάθους και στην καλύτερη ανάλυση των υδρογραφικών δεδομένων.

Τα δεδομένα MBES αποτελούν μια πηγή υψηλής ακρίβειας βαθυμετρικών δεδομένων. Η επεξεργασία των δεδομένων MBES περιλαμβάνει πολλά στάδια, όπως η απομάκρυνση του θορύβου, η διόρθωση των σφαλμάτων του συστήματος, η εξομάλυνση των δεδομένων, και ο προσδιορισμός του βάθους. Το λογισμικό Hypack είναι ένα εμπορικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται συχνά για την επεξεργασία των δεδομένων MBES και είναι ευρέως γνωστό στον κλάδο της υδρογραφίας. Τα δεδομένα SSS (Side Scan Sonar) είναι μια άλλη πηγή βαθυμετρικών δεδομένων που παρέχουν λεπτομερείς εικόνες του βυθού. Η επεξεργασία των δεδομένων SSS περιλαμβάνει την απομάκρυνση του θορύβου, την διόρθωση των σφαλμάτων του συστήματος και την εξομάλυνση των δεδομένων. Το SonarWiz είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται συχνά για την επεξεργασία των δεδομένων SSS.

2.4 Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρά τις πολλές δυνατότητες που παρέχουν οι μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων, υπάρχουν επίσης πολλές προκλήσεις και περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αρχικά, η ποιότητα των δεδομένων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα με χαμηλή ποιότητα ή μεγάλο ποσοστό θορύβου μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες εκτιμήσεις ή αναλύσεις. Επομένως, η προ-επεξεργασία των δεδομένων για την απομάκρυνση του θορύβου και την βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων είναι ένα κρίσιμο βήμα στην επεξεργασία τους.

Τα δεδομένα που προέρχονται από διάφορες πηγές ή συστήματα μπορεί να έχουν διαφορετικές μορφές, διαστάσεις ή μονάδες. Η επεξεργασία και η ανάλυση αυτών των δεδομένων απαιτεί συχνά πολύπλοκες μεθόδους ή αλγόριθμους. Επιπλέον, η εφαρμογή αυτών των μεθόδων μπορεί να είναι χρονοβόρα και να απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ (Jensen, 2016).

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων αποτελεί επίσης μια πρόκληση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα μπορεί να επηρεαστούν από διάφορους παράγοντες, όπως ο θόρυβος, οι ανωμαλίες, τα σφάλματα του συστήματος ή ακόμη και οι παράμετροι των αλγορίθμων. Επομένως, η κατανόηση αυτών των παραγόντων και η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τα δεδομένα (Fretwell κ.α., 2014).

Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, και κάθε ένας έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου μπορεί να εξαρτηθεί από πολλούς παράγοντες, όπως τον τύπο των δεδομένων, τις απαιτήσεις της εφαρμογής, την ποιότητα των δεδομένων και τις προδιαγραφές του κάθε έργου.

Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας δεδομένων συχνά απαιτούν την ρύθμιση των παραμέτρων τους για να παράγουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων μπορεί να είναι μια δύσκολη διαδικασία που απαιτεί γνώση και κατανόηση των αλγορίθμων και των δεδομένων. Επιπλέον, η προσαρμογή των παραμέτρων μπορεί να είναι χρονοβόρα και να απαιτεί πολλές δοκιμές ενώ μπορεί να παράγονται και αρκετά λάθη (Jensen, 2016; Mather κ.α., 2011).

Η επιβεβαίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων από την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων είναι ένα άλλο σημαντικό βήμα και περιλαμβάνει την σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλα δεδομένα ή μεθόδους, την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με την πραγματικότητα. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων συχνά απαιτεί την επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ διαφόρων επιστημόνων από διαφορετικούς κλάδους, όπως γεωλόγων, υδρογράφων, προγραμματιστών, και αναλυτών δεδομένων. Η επικοινωνία και συνεργασία αυτή μπορεί να είναι δύσκολη, καθώς κάθε επιστήμονας μπορεί να έχει διαφορετική κατανόηση ή προσέγγιση στα δεδομένα. Ωστόσο, η συνεχής επικοινωνία και συνεργασία μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβείς και αξιόπιστες αναλύσεις (Kelleher κ.α., 2011).

Η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων απαιτεί επίσης συνεχή εκπαίδευση και κατάρτιση. Το προσωπικό πρέπει να είναι εξοικειωμένο με τους αλγορίθμους, τα εργαλεία και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων. Αυτό μπορεί να απαιτήσει εκπαίδευση και κατάρτιση, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Η έλλειψη κατάλληλης εκπαίδευσης και κατάρτισης μπορεί να είναι ένας περιορισμός για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων και να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα (Teixeira κ.α., 2013).

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά τις προκλήσεις και τους περιορισμούς, η επεξεργασία και η ανάλυση δεδομένων παραμένει ένα ισχυρό εργαλείο για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τα βαθυμετρικά και τα δορυφορικά δεδομένα. Με την σωστή εφαρμογή και ερμηνεία, οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση του βυθού και της επιφάνειας της γης.

2.5 Δορυφόροι και οι Χρήσεις τους στη Γεωεπιστήμη

Οι δορυφόροι έχουν αναδειχθεί ως αναπόσπαστο εργαλείο στη γεωεπιστήμη, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για την κατανόηση και παρακολούθηση της Γης. Από τις αρχές της διαστημικής εποχής, οι δορυφόροι έχουν χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή εικόνων και δεδομένων που σχετίζονται με τη γεωλογία, την υδρογραφία, την ατμόσφαιρα και το κλίμα. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα εξεταστούν οι διάφοροι τύποι δορυφόρων, οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και οι εφαρμογές τους στη γεωεπιστήμη.

2.5.1 Τύποι Δορυφόρων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι δορυφόρων, καθένας από τους οποίους εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς και λειτουργεί σε διαφορετικά ύψη και τροχιές. Οι κυριότεροι τύποι δορυφόρων περιλαμβάνουν:

Γεωστατικοί Δορυφόροι: Οι γεωστατικοί δορυφόροι βρίσκονται σε σταθερή θέση πάνω από τον ισημερινό, σε ύψος περίπου 35.786 χιλιομέτρων. Αυτή η θέση τους επιτρέπει να παρακολουθούν συνεχώς μια συγκεκριμένη περιοχή της Γης. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τηλεπικοινωνίες, μετεωρολογία και παρακολούθηση καιρού.

Πολικοί Τροχιακοί Δορυφόροι: Αυτοί οι δορυφόροι κινούνται σε τροχιές που περνούν πάνω από τους πόλους της Γης. Οι πολικοί τροχιακοί δορυφόροι παρέχουν πλήρη κάλυψη της επιφάνειας της Γης, καθώς η τροχιά τους επιτρέπει να σαρώσουν ολόκληρο τον πλανήτη μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιούνται για περιβαλλοντική παρακολούθηση, χαρτογράφηση και στρατιωτικές εφαρμογές.

Δορυφόροι Χαμηλής Γήινης Τροχιάς (LEO): Αυτοί οι δορυφόροι βρίσκονται σε χαμηλή γήινη τροχιά, συνήθως σε ύψος μεταξύ 160 και 2.000 χιλιομέτρων. Χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παρατήρησης της Γης, της τηλεπισκόπησης και της επιστημονικής έρευνας. Η χαμηλή τροχιά τους επιτρέπει υψηλή ανάλυση των εικόνων και των δεδομένων που συλλέγουν.

2.5.2 Αρχές Λειτουργίας Δορυφόρων

Η λειτουργία των δορυφόρων βασίζεται σε μια σειρά τεχνολογιών και φυσικών αρχών που τους επιτρέπουν να παραμένουν σε τροχιά και να συλλέγουν δεδομένα. Οι κύριες αρχές λειτουργίας περιλαμβάνουν:

Τροχιά και Κινητική Ενέργεια: Οι δορυφόροι διατηρούνται σε τροχιά γύρω από τη Γη λόγω της ισορροπίας μεταξύ της βαρυτικής έλξης της Γης και της φυγόκεντρης δύναμης που προκύπτει από την ταχύτητά τους. Η σωστή τροχιά επιτυγχάνεται μέσω προσεκτικού σχεδιασμού και εκτόξευσης.

Ηλεκτρικά Συστήματα: Οι δορυφόροι χρησιμοποιούν ηλιακά πάνελ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των οργάνων και των συστημάτων του δορυφόρου.

Τηλεμετρία και Επικοινωνία: Οι δορυφόροι διαθέτουν συστήματα τηλεμετρίας που επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων πίσω στη Γη. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν μετρήσεις από επιστημονικά όργανα, καθώς και πληροφορίες για την κατάσταση και τη λειτουργία του δορυφόρου.

Συστήματα Προώθησης και Διόρθωσης Τροχιάς: Οι δορυφόροι διαθέτουν συστήματα προώθησης που τους επιτρέπουν να εκτελούν μικρές διορθώσεις στην τροχιά τους. Αυτές οι διορθώσεις είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της ακριβούς θέσης και τροχιάς του δορυφόρου.

2.5.3 Εφαρμογές των Δορυφόρων στη Γεωεπιστήμη

Οι δορυφόροι έχουν πολλές και ποικίλες εφαρμογές στη γεωεπιστήμη, οι οποίες έχουν επαναστατικοποιήσει τον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε και παρακολουθούμε τον πλανήτη μας. Μερικές από τις κύριες εφαρμογές περιλαμβάνουν:

Παρακολούθηση Κλιματικών Αλλαγών: Οι δορυφόροι παρέχουν συνεχείς παρατηρήσεις της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και της επιφάνειας της Γης. Αυτά τα δεδομένα είναι κρίσιμα για την κατανόηση των κλιματικών αλλαγών και την εκτίμηση της κατάστασης.

Μετεωρολογία και Καιρικές Προβλέψεις: Οι δορυφόροι μετεωρολογίας συλλέγουν δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών και την πρόβλεψη του καιρού. Οι δορυφορικές εικόνες και τα μετεωρολογικά δεδομένα βοηθούν στην παρακολούθηση καταιγίδων, τυφώνων και άλλων καιρικών φαινομένων.

Χαρτογράφηση και Γεωχωρική Ανάλυση: Οι δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ακριβών χαρτών και την ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν τη γεωλογία, την ορυκτολογία, την αστική ανάπτυξη και τη διαχείριση φυσικών πόρων.

Περιβαλλοντική Παρακολούθηση: Οι δορυφόροι παρακολουθούν περιβαλλοντικά φαινόμενα όπως η αποδάσωση, η ρύπανση των υδάτων και των εδαφών, καθώς και οι επιπτώσεις φυσικών καταστροφών. Αυτά τα δεδομένα είναι κρίσιμα για τη διαχείριση του περιβάλλοντος και τη λήψη αποφάσεων.

Ωκεανογραφία και Υδρογραφία: Οι δορυφόροι παρέχουν δεδομένα για τη μελέτη των ωκεανών, περιλαμβάνοντας την παρακολούθηση των ρευμάτων, της θερμοκρασίας της επιφάνειας των υδάτων και τη στάθμη της θάλασσας. Η υδρογραφική χαρτογράφηση και η βαθυμετρία είναι επίσης σημαντικές εφαρμογές των δορυφόρων.

Οι δορυφόροι συνεχίζουν να παίζουν καθοριστικό ρόλο στη γεωεπιστήμη, προσφέροντας νέες ευκαιρίες για την κατανόηση και την παρακολούθηση του πλανήτη μας. Οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω τις δυνατότητες των δορυφορικών εφαρμογών, παρέχοντας ακόμη πιο ακριβή και λεπτομερή δεδομένα.

2.6 Δορυφορική Βαθυμετρία

Η δορυφορική βαθυμετρία αποτελεί μια σύγχρονη και καινοτόμο μέθοδο για τη μέτρηση του βάθους της θάλασσας, χρησιμοποιώντας δεδομένα από δορυφόρους. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει έναν αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο για τη συλλογή βαθυμετρικών δεδομένων σε μεγάλες περιοχές, ιδιαίτερα σε περιοχές που είναι δύσκολο να προσπελαστούν με παραδοσιακές μεθόδους.

2.6.1 Μέθοδοι Δορυφορικής Βαθυμετρίας

Η δορυφορική βαθυμετρία βασίζεται κυρίως στη χρήση πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων, οι οποίες καταγράφουν την αντανάκλαση του φωτός σε διάφορα φασματικά μήκη κύματος. Μία από τις βασικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι η πολυφασματική ανάλυση. Οι δορυφορικές εικόνες καταγράφουν την αντανάκλαση του ηλιακού φωτός από τον πυθμένα της θάλασσας σε διάφορα φασματικά μήκη κύματος. Η ανάλυση αυτών των εικόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του βάθους της θάλασσας, καθώς οι διαφορετικές φασματικές ζώνες είναι ευαίσθητες σε διαφορετικά βάθη, επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση του βάθους.

Μια άλλη μέθοδος είναι με τη χρήση δεδομένων Synthetic Aperture Radar (SAR), που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τη λήψη λεπτομερών εικόνων της επιφάνειας της Γης. Στη δορυφορική βαθυμετρία, τα δεδομένα SAR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του βάθους μέσω της ανάλυσης των κυμάτων και των ανακλάσεων. Τέλος, η χρήση προηγμένων αλγορίθμων και μοντέλων είναι ζωτικής σημασίας για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων και την εκτίμηση του βάθους. Οι αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως η θολότητα του νερού, η γωνία λήψης και η ηλιακή ακτινοβολία.

2.6.2 Πλεονεκτήματα της Δορυφορικής Βαθυμετρίας

Η δορυφορική βαθυμετρία προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους βαθυμετρίας. Καταρχάς, επιτρέπει τη γρήγορη και αποτελεσματική συλλογή δεδομένων σε μεγάλες και απομακρυσμένες περιοχές, οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολο ή δαπανηρό να χαρτογραφηθούν με επιτόπιες μεθόδους. Αυτό καθιστά τη δορυφορική βαθυμετρία ιδανική για την χαρτογράφηση μεγάλων θαλάσσιων περιοχών.

Επιπλέον, η χρήση δορυφορικών δεδομένων μειώνει το κόστος συλλογής βαθυμετρικών δεδομένων, καθώς δεν απαιτείται η παρουσία ακριβού εξοπλισμού και προσωπικού επί τόπου. Η δορυφορική βαθυμετρία προσφέρει επίσης τη δυνατότητα συνεχών παρατηρήσεων και δεδομένων, επιτρέποντας τη διαχρονική παρακολούθηση των αλλαγών στον βυθό της θάλασσας. Αυτό είναι σημαντικό για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών αλλαγών και των επιπτώσεων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων.

Οι σύγχρονοι δορυφόροι προσφέρουν εικόνες υψηλής ανάλυσης, επιτρέποντας την λεπτομερή χαρτογράφηση του βυθού της θάλασσας και την αναγνώριση μικρών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας μπορεί να είναι κρίσιμο για διάφορες εφαρμογές, από την επιστημονική έρευνα μέχρι τη ναυσιπλοΐα και τη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων.

2.6.3 Περιορισμοί της Δορυφορικής Βαθυμετρίας

Παρά τα πλεονεκτήματα, η δορυφορική βαθυμετρία αντιμετωπίζει και μια σειρά από περιορισμούς. Ένας από τους βασικούς περιορισμούς είναι η ακρίβεια των δεδομένων. Η ακρίβεια των δορυφορικών βαθυμετρικών δεδομένων μπορεί να είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις επιτόπιες μετρήσεις, όπως αυτές που γίνονται με χρήση ηχοβολιστικών συστημάτων. Η ακρίβεια εξαρτάται από την ποιότητα των δορυφορικών εικόνων και τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων.

Επιπλέον, η ποιότητα των δορυφορικών δεδομένων μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θολότητα του νερού, η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων και οι καιρικές συνθήκες. Η θολότητα μπορεί να μειώσει τη διαύγεια του νερού και να δυσχεράνει την ακριβή εκτίμηση του βάθους. Η ακρίβεια των εκτιμήσεων βάθους εξαρτάται επίσης από την ποιότητα και την ακρίβεια των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων. Η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση αυτών των αλγορίθμων απαιτεί σημαντική έρευνα και κατανόηση των τοπικών συνθηκών.

Ένας ακόμη περιορισμός είναι η περιορισμένη διείσδυση του ηλιακού φωτός σε μεγάλα βάθη. Η δορυφορική βαθυμετρία είναι πιο αποτελεσματική σε ρηχά νερά, καθώς το ηλιακό φως δεν μπορεί να διεισδύσει σε μεγάλα βάθη. Σε περιοχές με μεγάλα βάθη, η δορυφορική βαθυμετρία μπορεί να μην είναι τόσο ακριβής ή χρήσιμη.

2.6.4 Εφαρμογές της Δορυφορικής Βαθυμετρίας

Η δορυφορική βαθυμετρία έχει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς της γεωεπιστήμης και της θαλάσσιας έρευνας. Μία από τις κύριες εφαρμογές της είναι η χαρτογράφηση θαλάσσιων περιοχών και η δημιουργία βαθυμετρικών χαρτών. Αυτοί οι χάρτες είναι κρίσιμοι για τη ναυσιπλοΐα, την αλιεία και τη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων. Επιπλέον, η δορυφορική βαθυμετρία χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των αλλαγών στον βυθό της θάλασσας και την ανίχνευση περιβαλλοντικών αλλαγών, όπως η διάβρωση των ακτών και η αποξήρανση των υδροβιοτόπων.

Η δορυφορική βαθυμετρία παρέχει επίσης δεδομένα για τη μελέτη των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και την κατανόηση της δομής και της λειτουργίας τους. Αυτά τα δεδομένα είναι σημαντικά για την προστασία και τη διαχείριση των θαλάσσιων βιοτόπων. Επιπλέον, η δορυφορική βαθυμετρία χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στον βυθό της θάλασσας και στα παράκτια περιβάλλοντα. Οι δορυφορικές παρατηρήσεις μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση των μακροπρόθεσμων αλλαγών που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή.

Τέλος, παρέχει δεδομένα που υποστηρίζουν επιστημονικές έρευνες και μελέτες, βοηθώντας στην ανάπτυξη νέων θεωριών και στην κατανόηση των γεωμορφολογικών και υδρογραφικών διαδικασιών. Η δορυφορική βαθυμετρία συνεχίζει να εξελίσσεται και να προσφέρει νέες δυνατότητες για τη μελέτη των θαλάσσιων περιβαλλόντων.

Κεφάλαιο 3 – Περιοχή Μελέτης, Μετρήσεις Πεδίου και Εξοπλισμός

3.1. Περιγραφή και Χαρακτηριστικά Περιοχής Μελέτης

Το Ντακάρ, η πρωτεύουσα της Σενεγάλης, είναι μια περιοχή με πλούσια γεωμορφολογία και περιβαλλοντικές ιδιαιτερότητες που την καθιστούν ιδανική για την υλοποίηση μελετών βαθυμετρίας. Βρίσκεται στη δυτική άκρη της Αφρικής, στις ακτές του Ατλαντικού Ωκεανού. Η παράκτια ζώνη του Ντακάρ είναι ποικιλόμορφη και περιλαμβάνει αμμώδεις παραλίες, βραχώδεις ακτές και λιμνοθάλασσες, που προσφέρουν μια πληθώρα δεδομένων για την ανάλυση των βαθυμετρικών χαρακτηριστικών.

Το κλίμα της περιοχής είναι τροπικό με δύο κύριες εποχές: την ξηρή περίοδο που διαρκεί από τον Νοέμβριο έως τον Μάιο και την υγρή περίοδο που εκτείνεται από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβριο. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 24°C έως 30°C, ενώ η υγρή περίοδος χαρακτηρίζεται από αυξημένες βροχοπτώσεις και υψηλή υγρασία. Οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή προέρχονται κυρίως από τον βορειοανατολικό αληγέα κατά την ξηρή περίοδο και από τον νοτιοδυτικό μουσώνα κατά την υγρή περίοδο, επηρεάζοντας σημαντικά τα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Τα κύματα στην περιοχή έχουν ύψος που κυμαίνεται από 0,5 έως 2 μέτρα, με τις μεγαλύτερες κυματικές εντάσεις να παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου.

Η παράκτια γεωμορφολογία του Ντακάρ περιλαμβάνει υψομετρικές διαφορές, βραχώδεις ακτές, αμμώδεις παραλίες και ρηχές υφαλοκρηπίδες. Οι υψομετρικές διαφορές σε συνδυασμό με την παρουσία πολύπλοκων υποθαλάσσιων γεωμορφολογιών, δημιουργούν μια ποικιλόμορφη υποθαλάσσια τοπογραφία που είναι ιδανική για βαθυμετρικές μελέτες. Το Ντακάρ έχει πληθυσμό περίπου 1 εκατομμύριο κατοίκους, αποτελώντας όχι μόνο την πολυπληθέστερη πόλη της Σενεγάλης, αλλά και το σημαντικότερο εμπορικό και οικονομικό κέντρο της χώρας. Το λιμάνι του Ντακάρ είναι ένα από τα πιο δραστήρια λιμάνια της Δυτικής Αφρικής, προσφέροντας πρόσβαση σε διεθνείς θαλάσσιες διαδρομές.

Από την άλλη, το Γκραν-Μπασάμ βρίσκεται στη νοτιοανατολική Ακτή Ελεφαντοστού, στις ακτές του Ατλαντικού Ωκεανού. Αυτή η περιοχή είναι γνωστή για την ιστορική της σημασία και τα πολιτιστικά της μνημεία, καθώς και για τις εκτεταμένες αμμώδεις παραλίες της. Η παράκτια ζώνη του Γκραν-Μπασάμ περιλαμβάνει αμμώδεις παραλίες, βραχώδεις ακτές και λιμνοθάλασσες, ενώ οι υψομετρικές διαφορές και η παρουσία υποθαλάσσιων φαραγγίων προσφέρουν μια ποικιλία υποθαλάσσιων τοπίων για μελέτη.

Το κλίμα στο Γκραν-Μπασάμ είναι τροπικό με υψηλή υγρασία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 24°C έως 31°C, με την υγρή περίοδο να διαρκεί από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο και την ξηρή από τον Νοέμβριο έως τον Απρίλιο. Οι κυρίαρχοι άνεμοι στην περιοχή είναι οι νοτιοδυτικοί μουσώνες κατά την υγρή περίοδο και οι βορειοανατολικοί αληγείς κατά την ξηρή περίοδο. Τα κύματα στην περιοχή μπορεί να φτάσουν έως και τα 2,5 μέτρα ύψος, με τις μεγαλύτερες κυματικές εντάσεις να παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου.

Η παράκτια γεωμορφολογία του Γκραν-Μπασάμ περιλαμβάνει αμμώδεις παραλίες και εκτεταμένες υφαλοκρηπίδες. Η περιοχή χαρακτηρίζεται επίσης από σημαντικές παράκτιες αμμώδεις νησίδες και λιμνοθάλασσες, που δημιουργούν ένα πλούσιο και ποικιλόμορφο περιβάλλον για την ανάλυση της βαθυμετρίας. Ο πληθυσμός του Γκραν-Μπασάμ ανέρχεται περίπου στους 80.000 κατοίκους, με την περιοχή να αποτελεί σημαντικό τουριστικό και πολιτιστικό κέντρο της Ακτής Ελεφαντοστού. Το ιστορικό κέντρο του Γκραν-Μπασάμ έχει καταχωρηθεί ως Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO, ενισχύοντας τη σημασία της περιοχής σε διεθνές επίπεδο.

Για την καλύτερη κατανόηση των γεωμορφολογικών και βαθυμετρικών χαρακτηριστικών των περιοχών μελέτης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεωλογικοί χάρτες και χάρτες γεωμορφολογίας. Αυτοί οι χάρτες παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τη σύσταση του εδάφους, τις υψομετρικές διαφορές και τις μορφές του βυθού, που είναι απαραίτητες για την ακριβή ανάλυση των δεδομένων. Η χρήση γεωλογικών χαρτών επιτρέπει την ταυτοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών και την κατανόηση της δυναμικής των υποθαλάσσιων διεργασιών που επηρεάζουν την τοπογραφία του βυθού.

Οι γεωμορφολογικοί χάρτες αποτυπώνουν τις υψομετρικές διαφορές και τις γεωμορφές της περιοχής, βοηθώντας στην κατανόηση των φυσικών διεργασιών που διαμορφώνουν την παράκτια ζώνη. Η χρήση αυτών των χαρτών μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των βαθυμετρικών μελετών και να παράσχει πολύτιμες πληροφορίες για τη διαχείριση των παράκτιων περιοχών και των θαλάσσιων πόρων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρτών πραγματοποιείται συνήθως πριν από την αποτύπωση του πυθμένα, ώστε να υπάρχει καλύτερη προετοιμασία και γνώση των αναμενόμενων γεωλογικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών. Με αυτόν τον τρόπο, οι ερευνητές μπορούν να προσαρμόσουν τις μεθόδους συλλογής δεδομένων και να εντοπίσουν κρίσιμες περιοχές για μελέτη, εξασφαλίζοντας ακριβέστερα και πιο αποτελεσματικά αποτελέσματα.

Με την ενσωμάτωση γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρτών στις μελέτες βαθυμετρίας, είναι δυνατή η παραγωγή πιο ακριβών και λεπτομερών αποτελεσμάτων, που συμβάλλουν στην κατανόηση της υποθαλάσσιας τοπογραφίας και των φυσικών διεργασιών που επηρεάζουν την περιοχή. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προετοιμασία και τον σχεδιασμό έργων που σχετίζονται με την υποθαλάσσια έρευνα, τη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος.

3.2. Χρονοδιάγραμμα αποτύπωσης βυθού

Τα σκάφη που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη ήταν ερευνητικά πλοία, τα οποία κατείχαν όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό και προσωπικό, ώστε να φέρουν εις πέρας την υδρογραφική αποτύπωση. Μάλιστα, υπήρξε συνεργασία με υπερ-εργολάβους, οι οποίοι ανέλαβαν κάποιο κομμάτι του έργου, ώστε να ολοκληρωθούν οι εργασίες στα πλαίσια του χρονοδιαγράμματος που είναι πολύ αυστηρό και απαιτείται η πλήρη τήρησή του, ώστε να υλοποιηθεί και να ολοκληρωθεί το έργο σε συγκεκριμένες ημερομηνίες.

Με βάση το χρονοδιάγραμμα, οι εργασίες είχαν προγραμματιστεί να αρχίσουν στις 10/11/2018 στο Ντακάρ, την πρωτεύουσα της Σενεγάλης. Οι εργασίες αυτές αρχικά αφορούσαν το αβαθές τμήμα της περιοχής αποτύπωσης στο οποίο δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση τα πλοία και αναφέρεται σε βάθη από 0 έως 3 μέτρα. Συνεπώς, η αποτύπωση βασίζεται σε δύτες και αντίστοιχο τοπογραφικό εξοπλισμό. Επιπρόσθετα, ένα μικρό σκάφος είχε πρόσβαση στα βάθη από 3 έως 20 μέτρα, ώστε να κάνει αποτύπωση του βυθού με την χρήση ηχοβολιστικού εξοπλισμού. Αυτή η αποτύπωση ονομάζεται 'Inshore Survey' και αναφέρεται στην παράκτια ζώνη. Πριν από την χρήση του κάθε εξοπλισμού, έχει υπάρξει βαθμονόμηση και έλεγχος, ώστε τα αποτελέσματα να είναι αντικειμενικά και αδιαμφισβήτητα.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε στις 01/12/2019 πόλη Γκραν-Μπασάμ στην Ακτή Ελεφαντοστού. Όλες οι διαδικασίες διήρκησαν σχεδόν 11 ημέρες, ακριβώς όπως και στην Σενεγάλη. Η γεωτεχνική μελέτη υλοποιήθηκε μόνο στην θαλάσσια περιοχή της Ακτής Ελεφαντοστού και όχι στην Σενεγάλη. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν ήταν οι Cone Penetration Test (CPT) και Cores. Πιο συγκεκριμένα, για την γεωτεχνική μελέτη πάρθηκαν δείγματα και από τις δύο μεθόδους, κάθε 10 χιλιόμετρα. Αυτή η μελέτη ολοκληρώθηκε για βάθη από 20 έως 1.000 μέτρα. Από την κάθε μέθοδο συλλέχθηκαν 3 δείγματα, τα οποία στάλθηκαν για εξειδικευμένο εργαστηριακό έλεγχο, ώστε να μελετηθούν και να προκύψουν τα γεωτεχνικά στοιχεία του υπεδάφους.

Με βάση το χρονοδιάγραμμα, η γεωφυσική έρευνα στα βαθιά νερά, ξεκίνησε στο Ντακάρ της Σενεγάλης στις 06/12/2018. Σε αντίθεση με πριν, χρησιμοποιήθηκε ένα αρκετά μεγαλύτερο πλοίο για την ολοκληρωμένη αποτύπωση του πυθμένα. Παράλληλα, εφαρμόστηκε και η μέθοδος του μαγνητομέτρου, ώστε να εντοπισθούν ενεργά και ανενεργά καλώδια, τα οποία περιλαμβάνονται στην περιοχή.

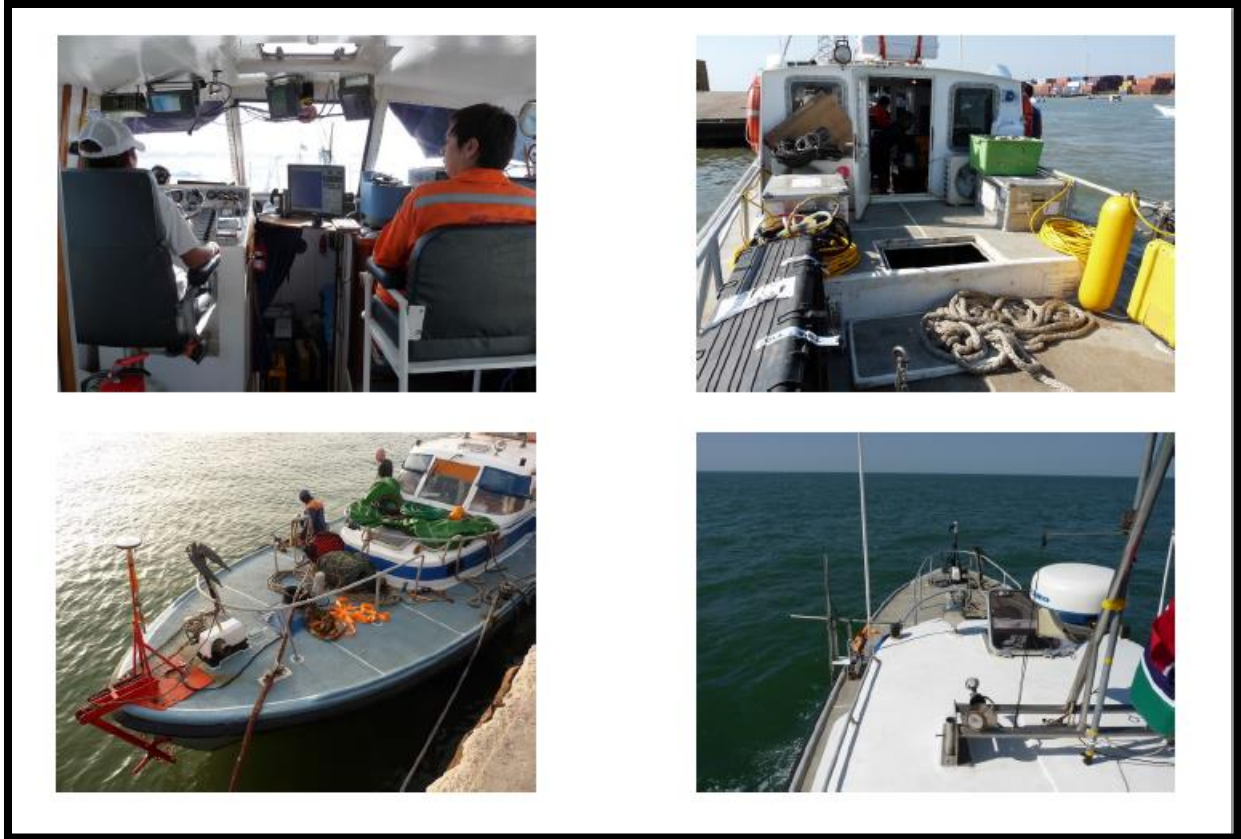
Η γεωφυσική έρευνα χωρίστηκε σε δύο διαφορετικά στάδια, όπου είναι τα «ρηχά» και τα «βαθιά» νερά. Έτσι, δόθηκε η ονομασία ‘Shallow water Survey’ για την αποτύπωση του βυθού από 20 μέτρα έως και τα 1.000 μέτρα βάθος. Για τα βάθη όπου ξεπερνούν τα 1.000 μέτρα δόθηκε η ονομασία ‘Deep Water Survey’. Οι διαδικασίες της γεωφυσικής έρευνα με ηχοβολιστικό εξοπλισμό στην περιοχή της Σενεγάλης, διήρκησε σχεδόν 18 ημέρες. Μόλις ολοκληρώθηκαν οι διαδικασίες, εφαρμόστηκε η ίδια μεθοδολογία και έρευνα στην περιοχή της Ακτής Ελεφαντοστού. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 23/12/2019 και χρειάστηκαν 10 ημέρες για την ολοκλήρωση της αποτύπωσης του πυθμένα.

3.3. Ερευνητικός εξοπλισμός

Ο κύριος εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του έργου, αναφέρεται σε ηχοβολιστικά συστήματα και σε ερευνητικά πλοία ή σκάφη τα οποία ορίστηκαν στην αρχή του έργου. Σημειώνεται πως υπήρξαν υπερ-εργολάβοι οι οποίοι υποστήριξαν την ολοκλήρωση του έργου, συνεπώς ο εξοπλισμός ποικίλει.

3.3.1 Ερευνητικά πλοία

Τα ερευνητικά πλοία και σκάφη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στο σύνολο τρία. Πρακτικά, ήταν δύο διαφορετικά μικρά σκάφη, τα οποία ήταν καθορισμένα για την αποτύπωση του βυθού της παράκτιας περιοχής της Σενεγάλης και της Ακτής Ελεφαντοστού. Το πρώτο μικρό σκάφος ονομάζεται «Hermes» και ήταν υπεύθυνο για την αποτύπωση του βυθού στο «ρηχό» κομμάτι της Σενεγάλης και διενέργησε την αποτύπωση του βυθού από τα 3 έως και τα 20 μέτρα βάθος, ολοκληρώνοντας τις απαιτήσεις της γεωφυσικής έρευνας.



Εικόνα 3.1. Ερευνητικό σκάφος Hermes.

Το ερευνητικό σκάφος το οποίο ήταν υπεύθυνο για την αποτύπωση του βυθού στο παράκτιο τμήμα της Ακτής Ελεφαντοστού, ονομάζεται CDI Diver, διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό και ολοκλήρωσε την βαθυμετρική αποτύπωση στην Γκραν-Μπασάμ, για βάθη από 3 έως 20 μέτρα βάθος (Εικόνα 3.2 & Εικόνα 3.3).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως τα δύο προαναφερθέν σκάφη, ανήκαν σε εξωτερικούς εργολάβους, οι οποίοι βοήθησαν στην υλοποίηση του έργου. Παρόλα αυτά, υπεύθυνη για την υλοποίηση του έργου ήταν ανάδοχη εταιρεία.



Εικόνα 3.2. Ερευνητικό σκάφος CDI Diver.



Εικόνα 3.3. Ερευνητικό σκάφος CDI Diver

Το τρίτο πλοίο που χρησιμοποιήθηκε, διενέργησε την αποτύπωση σε βάθη μεγαλύτερα από 20 μέτρα. Το συγκεκριμένο πλοίο είναι μεγαλύτερο από τα άλλα δύο και ανήκει στην Ελληνική εταιρεία PSL και κάλυψε τη μεγαλύτερη έκταση του έργου και ολοκλήρωσε την γεωτεχνική και γεωφυσική έρευνα. Αυτό το πλοίο ονομάζεται Med Surveyor και έχει συνολικό μήκος 47,4 μέτρα. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1968 και ήταν στην ιδιοκτησία του επιστημονικού οργανισμού «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)». Αγοράστηκε το 2014 από την PSL και ονομάστηκε ως Med Surveyor, ενώ η προηγούμενη του ονομασία ήταν NOAAS Delaware II (R 445) (Annapolis, 1990). Από την αγορά του μέχρι και σήμερα, έχει εμπλουτιστεί με ερευνητικό εξοπλισμό και προσαρμόζεται στις ανάγκες του κάθε έργου.



Εικόνα 3.4. Ερευνητικό πλοίο Med Surveyor.

3.3.2 Ηχοβολιστικός εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο Med Surveyor ήταν διαφορετικός, σε σύγκριση με τα δύο σκάφη. Το κάθε όργανο και ο κάθε αισθητήρας, ελέγχθηκε, βαθμονομήθηκε και πιστοποιήθηκε πριν από κάποια μέτρηση. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει από τα συστήματα εντοπισμού θέσης έως και τα ηχοβολιστικά συστήματα.

Τα σκάφη Hermes και CDI Diver ήταν πλήρως εξοπλισμένα με τα απαραίτητα ηχοβολιστικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, για την μέτρηση της ταχύτητας του ήχου μέσα στην θάλασσα, σε διαφορετικά βάθη, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα AML Base X2 SVP (Εικόνα 3.5). Έτσι, ήταν εφικτή η δημιουργία ενός προφίλ ήχου. Για ηχοβολιστικό όργανο MBES χρησιμοποιήθηκε το NORBIT (integrated broadband multi-beam kit, Εικόνα 3.6) και για SSS (Side Scan Sonar) χρησιμοποιήθηκε το KLEIN 3000 (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.5. SVP – Inshore Survey



Εικόνα 3.6. MBES – Inshore Survey



Εικόνα 3.7. SSS – Inshore Survey.

Το ερευνητικό πλοίο Med Surveyor διαθέτει εξοπλισμό ο οποίος είναι μόνιμα τοποθετημένος στο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα, φέρει το ηχοβολιστικό όργανο Deepwater ELAC MBES 3030 [24kHz] – Hull Mounted. Αυτό το ηχοβολιστικό λόγω της συχνότητας του αξιολογήθηκε ως κατάλληλο για βάθη από 20 έως 200 μέτρα. Για βάθη μεγαλύτερα των 200 μέτρων χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης (MBES) Reson T-20P (Εικόνα 3.8). Το σύστημα SVP είναι το Valeport MIDAS SVP (Εικόνα 3.9). Επιπρόσθετα, το ηχοβολιστικό πλευρικής σάρωσης (SSS) που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του έργου ήταν το Edgetech 2000 DSS (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.8. MBES – Deep Water



Εικόνα 3.9. SVP – Deep Water



Εικόνα 3.10. SSS – Deep Water

Κεφάλαιο 4 – Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, αναφέρεται στην επεξεργασία και ανάλυση των βαθυμετρικών δεδομένων, που συλλέχθηκαν για το έργο ‘MainOne’ και την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων Sentinel-2, που λήφθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus.

4.1 Επεξεργασία ηχοβολιστικών δεδομένων

4.1.1 Εισαγωγή στην επεξεργασία των δεδομένων MBES, SSS και SVP

Τα διαθέσιμα βαθυμετρικά δεδομένα καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος βαθών. Τα μαγνητόμετρα (Magnetometer) χρησιμοποιήθηκαν για να εντοπισθούν τυχόν ήδη υπάρχων τοποθετημένα καλώδια στον πυθμένα της θάλασσας, ενώ χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα και από τα συστήματα Sub-Bottom Profiler (SBP), τα οποία αξιοποιήθηκαν για την χαρτογράφηση των υποστρωμάτων του πυθμένα. Παρ’ όλο που αυτά τα δεδομένα ήταν ένα αναπόσπαστο κομμάτι του έργου, η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει μόνο στα δεδομένα MBES, SSS και SVP, τα οποία θα υποστηρίξουν τις διαδικασίες της χαρτογράφησης και της ταξινόμησης του βυθού.

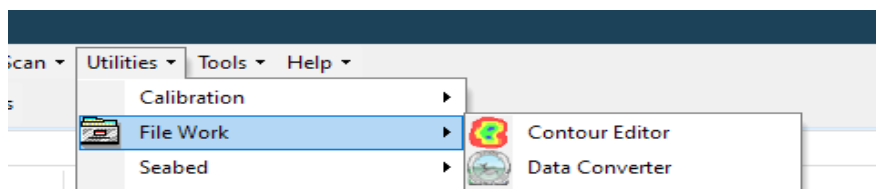
Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, αναφέρονται για όλο το εύρος της γεωφυσικής και της γεωτεχνικής έρευνας. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για την εξαγωγή βαθυμετρίας από δορυφορικά δεδομένα υπάρχουν περιορισμοί στην εκτίμηση του βάθους και της ταξινόμησης του πυθμένα, διότι η ηλιακή ακτινοβολία αδυνατεί να ανακλαστεί στον πυθμένα της θάλασσας, μετά από κάποια μέτρα βάθος. Υπάρχουν κι άλλοι παράμετροι που εισάγουν σφάλμα στην καταγεγραμμένη από τον δορυφόρο ηλιακή ακτινοβολία, όπως για παράδειγμα είναι η ποιότητα του νερού. Έτσι, έχει αξιολογηθεί πως η εκτίμηση του βάθους και η ταξινόμηση του βυθού, μπορεί ενδεχομένως να γίνει έως και τα 50 μέτρα βάθος. Αυτό δεν είναι απόλυτο και εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δορυφορικών δεδομένων. Για τους λόγους αυτούς, η επεξεργασία των βαθυμετρικών δεδομένων θα περιοριστεί στα 50 μέτρα, γεγονός που σημαίνει πως θα χρησιμοποιηθούν όλα τα δεδομένα που πάρθηκαν από τα δύο μικρά σκάφη, μεταξύ 3 έως 20 μέτρα βάθος, ενώ για βάθη μεγαλύτερα των 20 μέτρων, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα που πάρθηκαν από το ερευνητικό πλοίο Med Surveyor.

4.1.2 Συλλεχθέντα βαθυμετρικά δεδομένα

Προετοιμάζοντας την επεξεργασία των δεδομένων, είναι σημαντικό να καθοριστούν τα αρχεία που θα υποστούν την επεξεργασία. Διαπιστώθηκε ότι ο πρώτος σημαντικός προβληματισμός είναι ο τύπος των δεδομένων, διότι κατά την συλλογή τους επιλέχθηκε διαφορετικός τύπος δεδομένων. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην επεξεργασία, διότι τα εμπορικά λογισμικά υποστηρίζουν διαφορετικές δομές δεδομένων. Συνεπώς, πριν από την συλλογή των δεδομένων, θα πρέπει το προσωπικό να γνωρίζει το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία, ώστε να προσαρμόσει την δομή (format) των αρχείων αυτών.

Στο συγκεκριμένο έργο, τα λογισμικά που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία, ήταν το QPS Qimera για τα δεδομένα MBES και το SonarWiz για τα δεδομένα SSS και SBP. Για την συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό πρόγραμμα AutoClean από την BeamworX, για τα βαθυμετρικά δεδομένα MBES. Παρ' όλα αυτά, τα format που εξάχθηκαν ήταν αρκετά και διαφορετικά και υπήρξε η ανάγκη μετατροπής των δεδομένων σε ένα ενιαίο format, ώστε να μπορέσει να ολοκληρωθεί η εισαγωγή των αρχείων σε περιβάλλον AutoClean.

Για την μετατροπή των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα Hypack, που υποστηρίζει τεράστια πληθώρα τύπων αρχείων. Ο αλγόριθμος Contour Editor ήταν σε θέση να ολοκληρώσει την μετατροπή για πολλά αρχεία δεδομένων «Batch Processing» (Εικόνα 4.1).



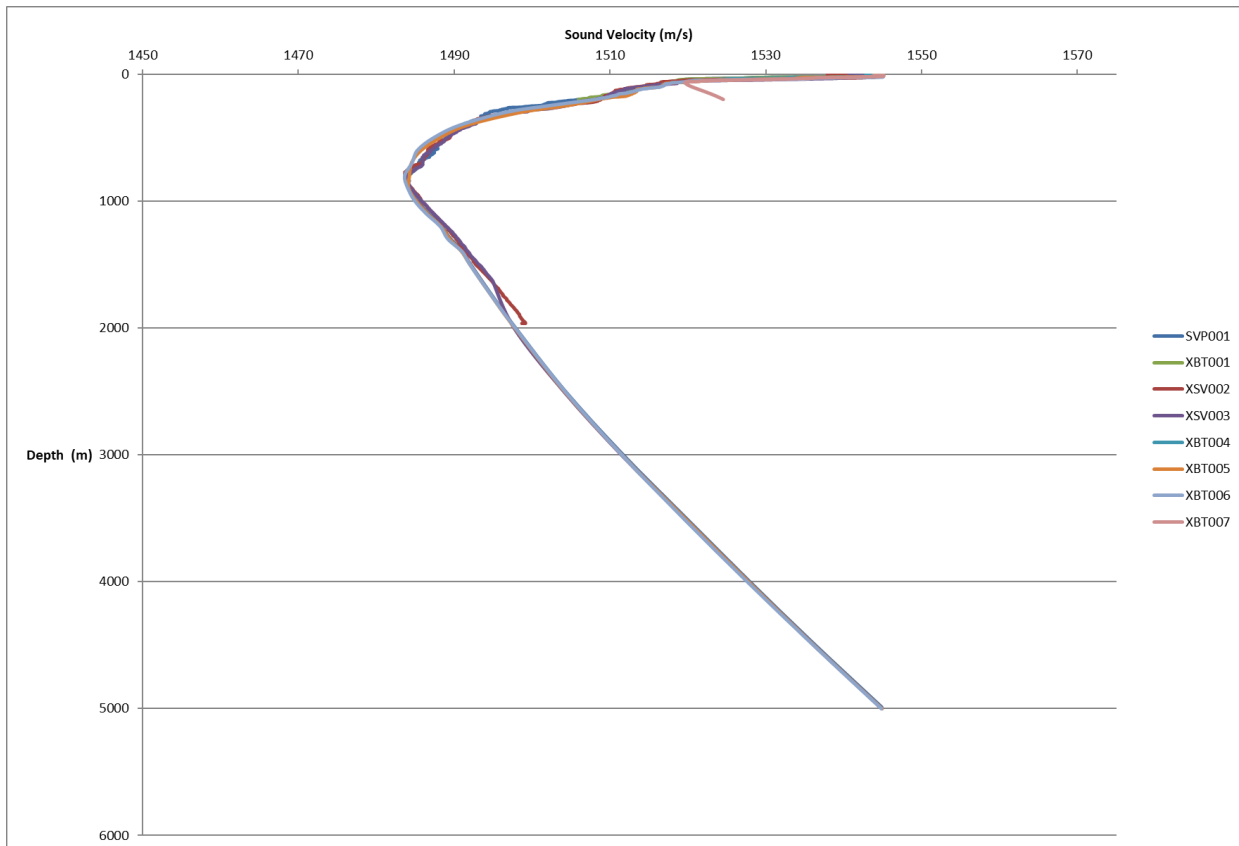
Εικόνα 4.1. Μετατροπή δεδομένων στο Hypack.

Εν τέλει, όλα τα βαθυμετρικά δεδομένα MBES μετατράπηκαν στο format HSX, το οποίο υποστηρίζεται στο AutoClean. Σχετικά με τα δεδομένα SSS, έγινε η μετατροπή τους σε format XTF, που είναι ο πιο γνωστός τύπος δεδομένων sonar. Αυτός ο τύπος δεδομένων υποστηρίζεται στο AutoClean, ενώ το λογισμικό δεν υποστηρίζει την επεξεργασία δεδομένων SSS. Συνεπώς, έπρεπε να επιλεγεί κάποιο άλλο λογισμικό, όπου οι διαθέσιμες επιλογές ήταν το Hypack και το SonarWiz. Επιλέχθηκε τελικά το SonarWiz, διότι η άδεια που δόθηκε για το Hypack, για ακαδημαϊκούς σκοπούς, είχε περιορισμούς.

4.1.3 Προ-επεξεργασία δεδομένων MBES και SVP

Τα καταγεγραμμένα δεδομένα SVP ήταν διαθέσιμα σε μορφή BSVP. Πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων και προέκυψε ένα αρχείο Excel με τα τελικά προφίλ της ταχύτητας του ήχου. Η συχνότητα καταγραφής δεδομένων ταχύτητας ήχου, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η αλατότητα και η θερμοκρασία της θάλασσας. Τουλάχιστον πριν από κάθε μέτρηση βαθυμετρικών δεδομένων, απαιτείται η δημιουργία ενός τέτοιου προφίλ ήχου. Η συχνότητα λήψης δεδομένων SVP ορίστηκε από το αρμόδιο προσωπικό του πλοίου.

Αφού υπολογίστηκε η ταχύτητα του ήχου στο νερό, σε διαφορετικά βάθη, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα προφίλ ήχου. Πρακτικά, πρόκειται για ένα διάγραμμα, όπου στον άξονα x είναι η ταχύτητα του ήχου και στον άξονα y το βάθος (Εικόνα 4.2). Επίσης, τα προφίλ ήχου ήταν διαθέσιμα σε μορφή CSV, ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο AutoClean.

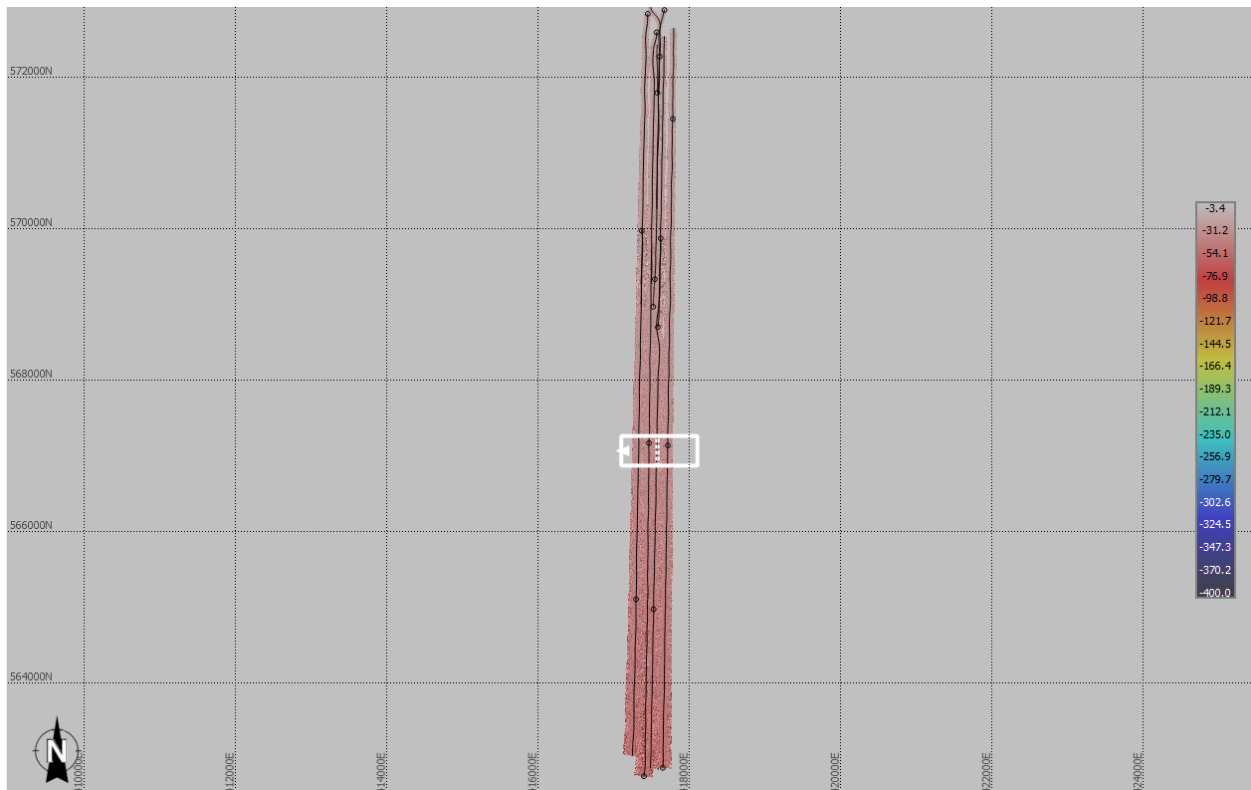


Εικόνα 4.2. Προφίλ ήχου.

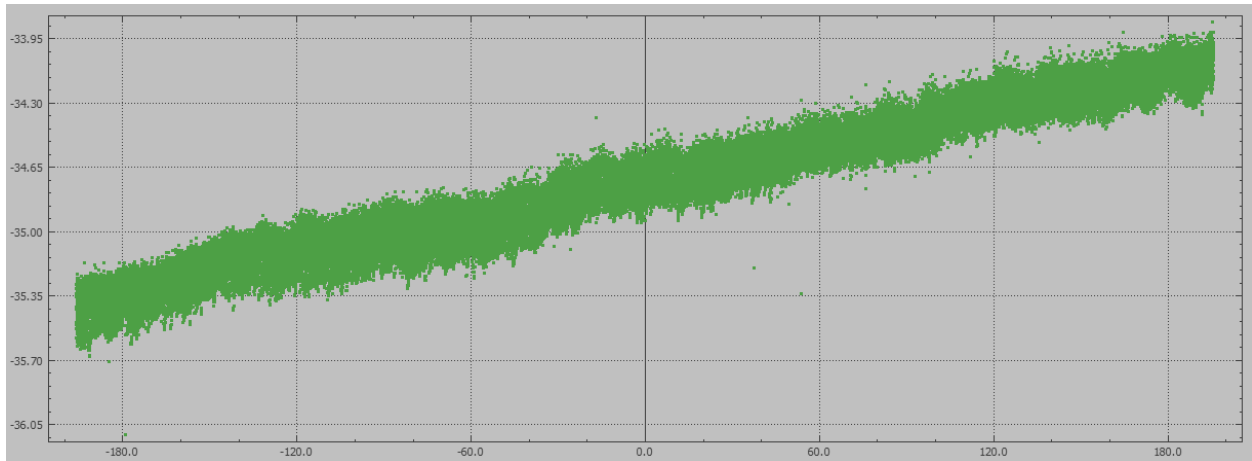
Για την εισαγωγή των δεδομένων MBES και SVP, δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα Projects σε περιβάλλον AutoClean. Παράλληλα, δηλώθηκε το αντίστοιχο προφίλ ήχου, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των σωστών βαθών. Το λογισμικό έδινε την δυνατότητα να διαβάσει αυτή την πληροφορία από το ίδιο αρχείο HSX. Επί της ουσίας, δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά Project:

- Inshore Survey έως 20 μέτρα βάθος – Ντακάρ, Σενεγάλη (Hermes)
- Inshore Survey έως 20 μέτρα βάθος – Γκραν-Μπασάμ, Ακτή Ελεφαντοστού (CDI Diver)
- Offshore Survey από 20 μέτρα βάθος – Ντακάρ, Σενεγάλη (Med Surveyor)
- Offshore Survey από 20 μέτρα βάθος – Γκραν-Μπασάμ, Ακτή Ελεφαντοστού (Med Surveyor)

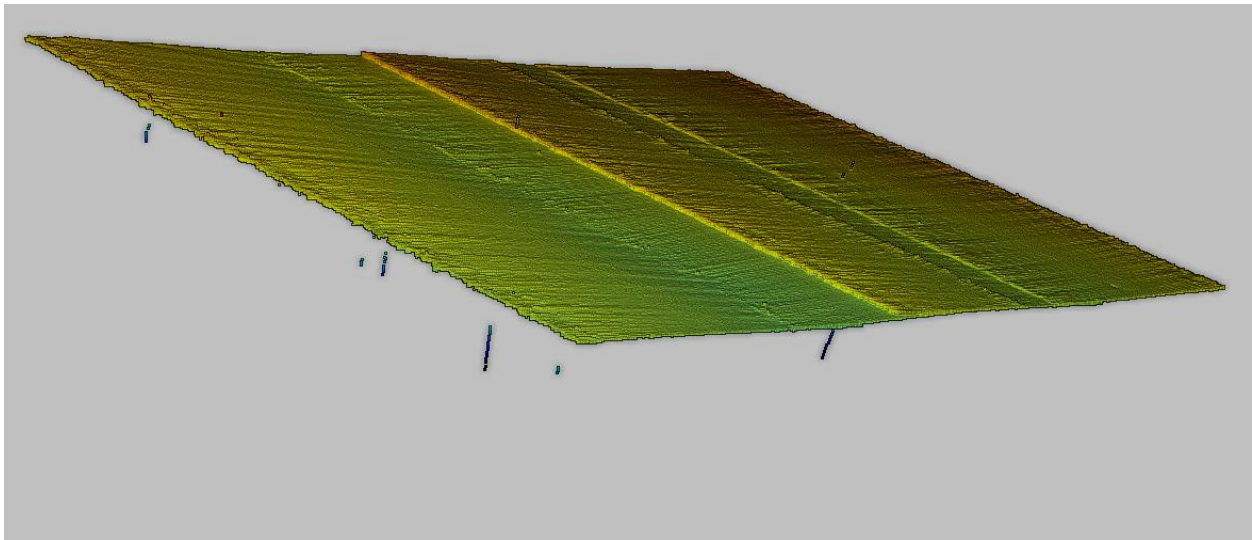
Έτσι, ολοκληρώθηκε η ολική εισαγωγή των δεδομένων σε υδρογραφικό περιβάλλον, με σωστή αποτύπωση για όλα τα βάθη. Το περιβάλλον εργασίας και η απεικόνιση των δεδομένων ήταν τέτοια ώστε ο χρήστης να έχει την δυνατότητα να προβάλει τα δεδομένα με διαφορετικούς τρόπους, όπως είναι η τρισδιάστατη αποτύπωση, η κάτοψη και η τομή σε επιθυμητό σημείο (Εικόνα 4.3, Εικόνα 4.4 & Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.3. Περιβάλλον εργασίας στο AutoClean – Chart View



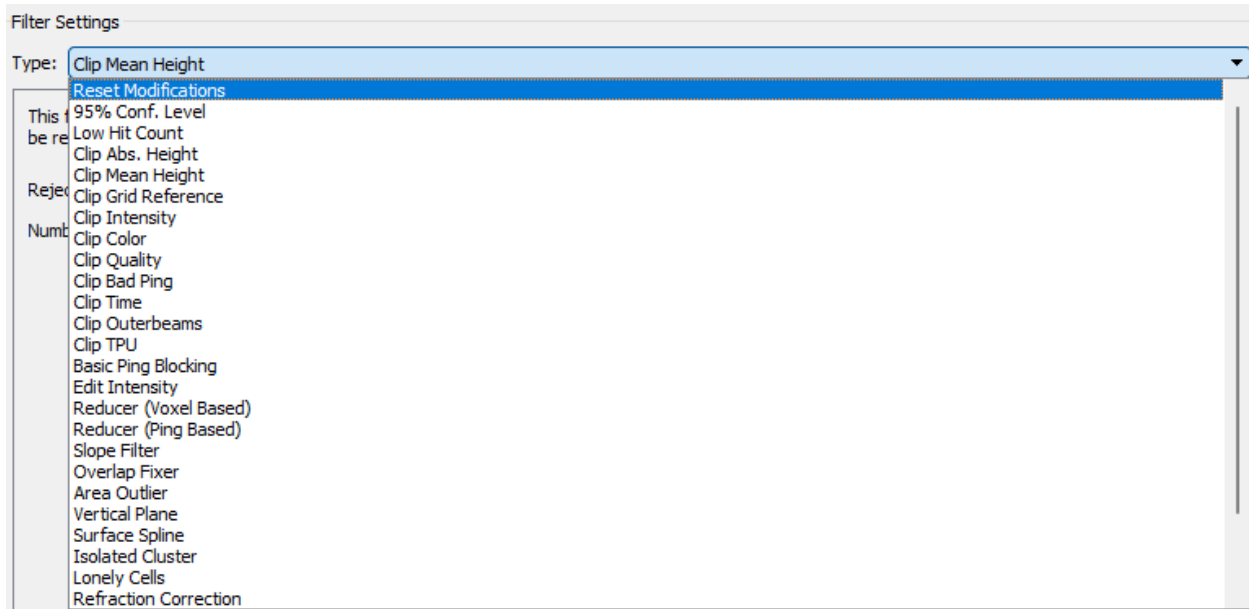
Εικόνα 4.4. Περιβάλλον εργασίας στο AutoClean – Slice View



Εικόνα 4.5. Περιβάλλον εργασίας στο AutoClean – 3D View

Όπως διαπιστώνεται στις παραπάνω απεικονίσεις των δεδομένων βαθυμετρίας, υπάρχουν αρκετά σφάλματα. Πιο εμφανή παρουσιάζονται στην τρισδιάστατη αποτύπωση, όπου παρατηρούνται κάποιες κάθετες «γραμμές» (spikes). Αυτό το φαινόμενο είναι σύνηθες στην υδρογραφία και γι' αυτόν τον λόγο υπάρχει η ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης η οποία μπορεί να γίνει χειροκίνητα, δηλαδή ο χρήστης να επιλέξει τα ανεπιθύμητα σημεία και να τα αφαιρέσει. Φυσικά, αυτά τα σημεία δεν διαγράφονται και απλά χαρακτηρίζονται ως «rejected points». Από την άλλη, αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει με την εφαρμογή επιθυμητών φίλτρων, ώστε να εξομαλυνθούν τα δεδομένα και να μην υπάρχουν τα σφάλματα.

Η εφαρμογή των φίλτρων πραγματοποιείται μέσω της εργαλειοθήκης ‘Filter Control’ και εφαρμόζεται στα επιλεγμένα δεδομένα. Πρακτικά, δημιουργείται μια ομάδα φίλτρων, όπου το κάθε φίλτρο έχει τις δικές του παραμέτρους. Τα φίλτρα που διαθέτει το λογισμικό είναι πάρα πολλά και μπορούν να καλύψουν όλες τις πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων (Εικόνα 4.6). Μετά από αρκετές δοκιμές των φίλτρων, ολοκληρώθηκε η επεξεργασία των βαθυμετρικών δεδομένων. Έτσι, στα βαθυμετρικά δεδομένα έγινε εξομάλυνση και απαλοιφή των σφαλμάτων. Τα σημεία που έχει αφαιρέσει το λογισμικό, χαρακτηρίζονται ως rejected points. Αν επιθυμεί ο χρήστης να τα εμφανίσει, μπορεί να επιλέξει Show Rejected Points.



Εικόνα 4.6. Φίλτρα λογισμικού AutoClean

Μετά την ολοκλήρωση της εφαρμογής των κατάλληλων φίλτρων, ακολουθεί η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στην υδρογραφία, δημιουργούνται συχνά οι ισοβαθείς καμπύλες του πυθμένα της θάλασσας, όπου η πληροφορία προέρχεται από την γεωφυσική μελέτη. Μάλιστα, δημιουργούνται οι κατάλληλες χαρτοσυνθέσεις, για σκοπούς οπτικοποίησης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Έτσι, το λογισμικό μπορεί να υπολογίσει τις ισοβαθείς καμπύλες, ώστε να μελετηθεί το αποτέλεσμα της βαθυμετρίας. Επίσης, μπορούν τα σημεία της βαθυμετρίας να εξαχθούν ως τρισδιάστατη πληροφορία.

4.1.4 Επεξεργασία βαθυμετρικής πληροφορίας

Η συγκεκριμένη επεξεργασία αφορά την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DTM) και ισοβαθών, από την πληροφορία της βαθυμετρίας. Αυτά τα αποτελέσματα θα βοηθήσουν στην κατανόηση του βυθού και στην σύγκριση με τα αποτελέσματα της δορυφορικής βαθυμετρίας. Για την δημιουργία αυτών των αρχείων επιλέχθηκε το ελεύθερο λογισμικό QGIS. Αρχικά, εισήχθησαν τα δεδομένα σε μορφή XYZ και οπτικοποιήθηκαν ως δομές 'Point cloud'. Επειδή η αναπαράσταση της σημειακής πληροφορίας είναι πολύ πυκνή, αντικατοπτρίζεται η αναπαράσταση της.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μέθοδος παρεμβολής Triangular Irregular Network (TIN), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στον κλάδο της γεωπληροφορικής. Πρακτικά, δημιουργούνται ψηφιακά τριγωνικά διανυσματικά αρχεία και υπολογίζονται οι νέες τιμές των κορυφών των τριγώνων, με βάση τις τιμές των κορυφών του τριγωνισμού (Lim J., 2022). Επιλέχθηκε ο γραμμικός αλγόριθμος (Linear) για τον υπολογισμό των τιμών του αρχείου Raster, όπου το κάθε ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου έχει διαστάσεις εικονοστοιχείου 0,50 μέτρα.



Εικόνα 4.7. Οπτικοποίηση βαθυμετρίας σε περιβάλλον QGIS

Είναι φανερό πως στην Εικόνα 4.8, ο υπολογισμός έχει ξεφύγει από τα όρια της περιοχής μελέτης, κατά συνέπεια απαιτείται χωρικός περιορισμός των δεδομένων. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρειάζεται να δημιουργηθούν οι κατάλληλες μάσκες, οι οποίες θα περιορίσουν τα δεδομένα στα ακριβή όρια της περιοχής μελέτης. Αυτές έχουν υπολογισθεί στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης «Preliminary Survey», και συγκεκριμένα, ο διάδρομος μελέτης έχει 500 μέτρα πλάτος για βάθη έως 20 μέτρα και 200 μέτρα πλάτος για βάθη μεγαλύτερα των 20 μέτρων. Ο κάθε διάδρομος έχει κέντρο την όδευση της μελέτης και εντός των διαδρόμων οριοθετείται η περιοχή μελέτης.

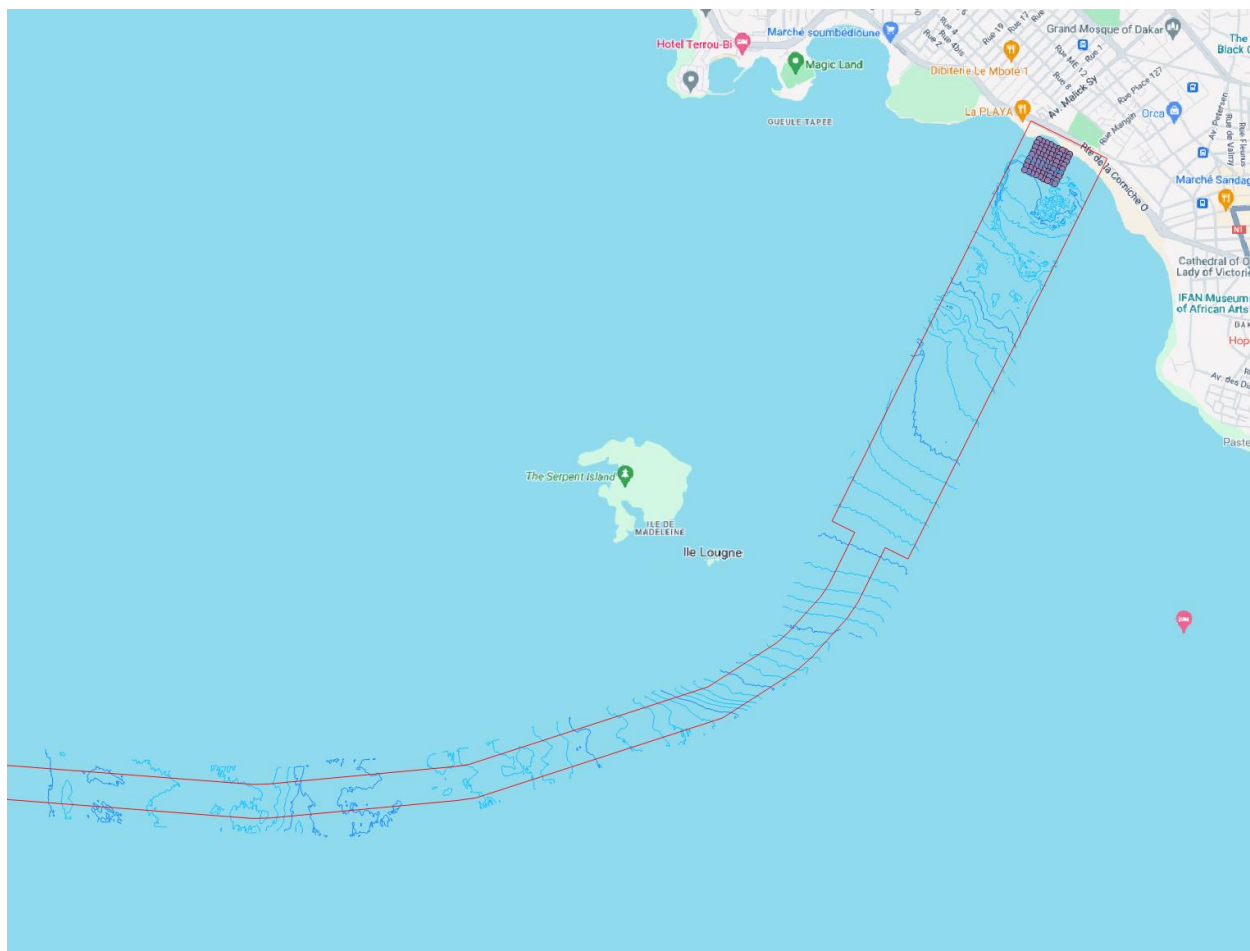
Αφού έχει ολοκληρωθεί η δημιουργία όλων των αρχείων Raster, όπου το κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε μία πραγματική τιμή βάθους, το «τελικό» προϊόν βαθυμετρίας είναι οι ισοβαθείς καμπύλες. Έτσι, όλα τα DTM έχουν καθορισμένα όρια, με συγκεκριμένη διάσταση εικονοστοιχείων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το εμπορικό λογισμικό AutoClean παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα να εξαχθούν οι ισοβαθείς καμπύλες, από τα δεδομένα του ηχοβολιστικού πολλαπλής δέσμης (MBES).



Εικόνα 4.8. Μετατροπή βαθυμετρίας σε DTM

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αποφασήθηκε ότι η ισοδιάσταση των καμπυλών/ισοβαθών θα είναι 1 μέτρο και οι κύριες καμπύλες θα αυξάνονται κάθε 5 μέτρα βάθος. Για την καλύτερη οπτικοποίηση και κατανόηση των αποτελεσμάτων, είναι σημαντικό να ξεχωρίζουν οι κύριες καμπύλες, με πιο έντονο χρωματισμό. Μάλιστα, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή τρισδιάστατης σημειακής πληροφορίας, όπου αναφέρεται στα βάθη που πάρθηκαν έως 3 μέτρα, από τους δύτες.

Το αποτέλεσμα της βαθυμετρίας σε μορφή ισοβαθών καμπυλών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9, για την περιοχή του Ντακάρ, Σενεγάλης. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα βαθυμετρίας που πάρθηκαν από δύτες, για βάθη μικρότερα από 3 μέτρα. Αυτά τα βάθη ήταν δύσκολα να αποτυπωθούν με υδρογραφικό εξοπλισμό και έτσι πάρθηκαν μετρήσεις με εξοπλισμό δυτών. Αυτές οι μετρήσεις αναφέρονται σε σημειακή πληροφορία, σε συγκεκριμένες συντεταγμένες και κάθε σημείο αναφέρεται σε συγκεκριμένο βάθος. Είναι δεδομένο πως αυτή η πληροφορία χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των αρχείων DTM. Τα δεδομένα που πήραν οι δύτες, εμφανίζονται στην Εικόνα 4.9, μαζί με τα όρια των διαδρόμων.



Εικόνα 4.9. Δημιουργία ισοϋψών καμπυλών

4.1.5. Προ-επεξεργασία δεδομένων SSS

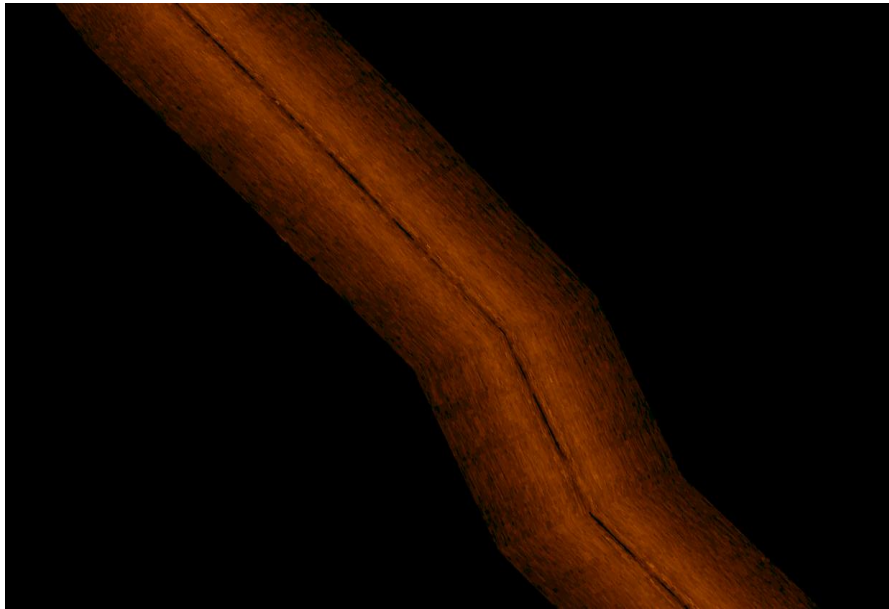
Η επεξεργασία των δεδομένων πλευρικού ηχοβολιστικού (SSS) είναι μία απαιτητική διαδικασία, η οποία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εκτίμηση του υδρογράφου που επεξεργάζεται τα δεδομένα. Αρχικά, χρειάζεται να γίνει μια μελέτη του βυθού, η οποία βασίζεται στην βιντεοσκόπηση του. Αυτή η μεθοδολογία, ονομάζεται «Visual Survey» στον κλάδο της υδρογραφίας. Στα μικρά βάθη, μπορεί να γίνει η βιντεοσκόπηση του βυθού από τους δύτες, ενώ σε πιο μεγάλα βάθη απαιτείται ειδικός εξοπλισμός. Για παράδειγμα, υπάρχουν τα ROV (Remotely Operated Vehicle), τα οποία είναι σε θέση να φτάσουν σε πολύ μεγάλα βάθη και να βιντεοσκοπήσουν τον βυθό.

Αφού έχει ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, η πληροφορία που θα εξαχθεί από τα συλλεχθέντα βίντεο, θεωρείται ως υψίστης σημασίας. Ο υδρογράφος μηχανικός θα πρέπει να είναι σε θέση να ερμηνεύσει τον πυθμένα της θάλασσας και να προσδιορίσει τα διαφορετικά ιζήματα του βυθού. Ενδεχόμενος κάποια ιζήματα να μην είναι δυνατόν να ξεχωρίσουν μεταξύ τους, όπως είναι ο άργιλος με την άμμο. Αντίθετα, οι βραχώδεις περιοχές θα είναι αρκετά εμφανείς, λόγω του όγκου που θα κατέχουν. Αφού λοιπόν εντοπιστούν όλα τα διαφορετικά ιζήματα του πυθμένα (π.χ. ποσειδωνία), θα πρέπει να καταγραφεί η χιλιομετρική θέση και ενδεχομένως η έκταση των αντικειμένων. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ώστε να βοηθηθεί ο χρήστης και να επιλέξει τις σωστές περιοχές εκπαίδευσης, για την χρήση του αλγορίθμου της ταξινόμησης.

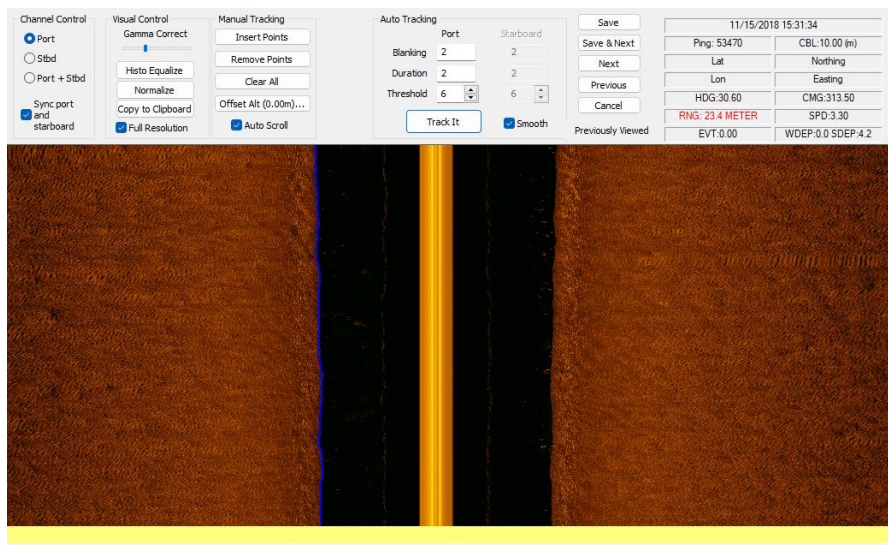
Παρ' όλα αυτά, η πιο χρήσιμη πληροφορία που θα παρθεί για την επιλογή περιοχών εκπαίδευσης, είναι από τα αρχεία XTF παρατηρώντας την υφή και την μορφολογία του πυθμένα. Επιπρόσθετα, μπορούν να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της ταξινόμησης, κάνοντας κάποιους δειγματοληπτικούς ελέγχους, ώστε να διαπιστωθεί αν η ταξινόμηση συμφωνεί με την βιντεοσκόπηση του βυθού. Έτσι, θα είναι σε θέση να εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί και να προσδιοριστούν οι περιοχές με βάση τον χαρακτηρισμό που θα τους δοθεί. Ο αλγόριθμος θα αξιολογήσει τις ιδιότητες των υπόλοιπων περιοχών που δεν έχουν εκπαιδευτεί και θα κατατάξει τις περιοχές σε κάποια ομάδα θαλάσσιου πυθμένα.

Είναι σημαντικό να γίνουν πολλαπλοί έλεγχοι και να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Ενδεχομένως να χρειάζονται πολλές δοκιμές ώστε το αποτέλεσμα της εκτίμησης του αλγορίθμου να αξιολογηθούν ως αποδεκτά. Το τελικό προϊόν που αναμένεται να δημιουργηθεί, είναι μια πολυγωνική πληροφορία σε διανυσματική (vector) μορφή Shapefile, η οποία θα αντιστοιχεί σε κάποια ομάδα. Σε συνδυασμό με την βαθυμετρική πληροφορία, ολοκληρώνεται το στάδιο επεξεργασίας και οπτικοποίησης της βαθυμετρίας. Για την εκκίνηση της επεξεργασίας των δεδομένων SSS χρησιμοποιείται το λογισμικό SonarWiz. Ολοκληρώνοντας την εισαγωγή των δεδομένων XTF, απεικονίζεται η υφή και η γεωμορφολογία του πυθμένα. Για την ταξινόμηση των δεδομένων, είναι δυνατή η εφαρμογή φίλτρων που μπορούν να βοηθήσουν στην επεξεργασία και την ανάλυση των δεδομένων, όπως το φίλτρο Low/High Pass, το οποίο φιλτράρει τη συχνότητα των δεδομένων.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν φίλτρα τα οποία βοηθούν στην ομαλοποίηση των δεδομένων, (Smoothing Filters) καθώς και άλλα φίλτρα (όπως Gamma Corection, αφαίρεση spikes κτλ) όπου ορίζει ο χρήστης ένα κατώφλι (Threshold), ώστε να απομακρυνθεί το αδύναμο σήμα, το οποίο αξιολογείται ως αναξιόπιστο (Εικόνα 3.11). Με βάση τις οδηγίες του λογισμικού, αυτές οι παρεμβάσεις χρειάζεται να γίνουν κατά την αρχή της προ-επεξεργασίας των δεδομένων, δηλαδή πριν την ανάλυση. Συνεπώς, το αποτέλεσμα των φιλτραρισμάτων/διορθώσεων αποσκοπεί στην βελτίωση της ποιότητας των εικόνων και την αφαίρεση θορύβου. Το παράθυρο που επιτρέπει αυτές τις παρεμβάσεις, ονομάζεται 'Bottom Track' (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.10. Δεδομένα SSS.



Εικόνα 4.11. Bottom Track.

Για την ολοκλήρωση της προ-επεξεργασίας στα δεδομένα SSS, ώστε η ανάλυση τους να είναι η βέλτιστη δυνατή, δημιουργούνται τα κατάλληλα μωσαϊκά (Mosaics). Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί ο χρήστης να δουλεύει στο λογισμικό, χρησιμοποιώντας ένα μωσαϊκό, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα πλήθος αρχείων δομής XTF. Επίσης, μπορεί να συμπεριφερθεί ξεχωριστά σε κάθε αρχείο XTF, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τα υπόλοιπα αρχεία. Αυτό δεν συνιστάται στην περίπτωση που η ταξινόμηση βυθού αφορά ολόκληρο τον πυθμένα.

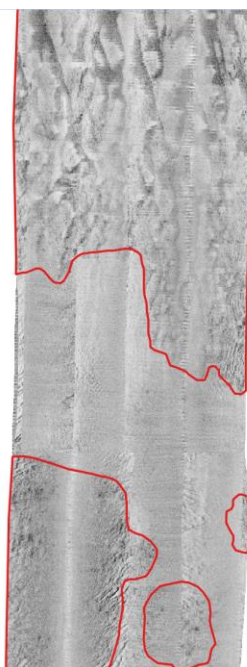
Για τον εντοπισμό των διαφόρων ιζημάτων στον πυθμένα της θάλασσας, είναι σημαντικό να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά των μωσαϊκών. Τα SSS δεδομένα παρέχουν εικόνες του πυθμένα που αντανakλούν τις διαφορές στην υφή και την σκληρότητα των υλικών. Έτσι, ένα βασικό χαρακτηριστικό των βραχωδών περιοχών, είναι πως συνήθως εμφανίζονται ως περιοχές με υψηλή ανακλαστικότητα. Στις εικόνες του sonar, αυτές οι περιοχές θα φαίνονται πιο φωτεινές σε σύγκριση με περιοχές με άμμο ή λάσπη. Μάλιστα, δημιουργούν σαφείς σκιές πίσω τους, λόγω της απότομης ανύψωσης από τον πυθμένα. Οι σκιές εμφανίζονται ως σκοτεινές περιοχές δίπλα στις φωτεινές ανακλαστικές επιφάνειες. Οι βράχοι και οι πετρώδεις περιοχές παρουσιάζουν ακανόνιστες και σκληρές δομές. Η εικόνα θα δείχνει ανώμαλες και τραχιές επιφάνειες σε αντίθεση με τις ομαλές και λείες επιφάνειες της άμμου ή της λάσπης (Εικόνα 4.12).

Σχετικά με άλλα ιζήματα, οι περιοχές με άμμο ή άργιλο, είναι πολύ συνηθισμένες στον πυθμένα της θάλασσας. Ο άργιλος μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορα βάθη στον υδάτινο χώρο, ανάλογα με τις συνθήκες του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Συνήθως, περιοχές με άργιλο μπορεί να βρίσκονται σε σχετικά ρηγά νερά κοντά σε ακτές ή σε περιοχές χαμηλών υδάτων. Ωστόσο, επίσης μπορεί να υπάρχουν σε βαθύτερα νερά, ανάλογα με την περιοχή του πυθμένα της θάλασσας. Επομένως, ο άργιλος μπορεί να εμφανιστεί σε μεγάλο εύρος βάθους, από τα ρηγά έως τα βαθύτερα υδάτινα στρώματα. Αντίθετα, η άμμος συνήθως εμφανίζεται σε πιο ρηγά νερά και σε περιοχές παραλίας, δηλαδή σε βάθη που δεν υπερβαίνουν συνήθως τα μερικά μέτρα. Ωστόσο, ανάλογα με τις συνθήκες και την γεωλογία του υποβρύχιου περιβάλλοντος, η άμμος μπορεί να εμφανιστεί και σε βαθύτερα νερά, αν και αυτό είναι λιγότερο συνηθισμένο.

Σχετικά με την υφή και την γεωμορφολογία τους, οι περιοχές με άμμο και άργιλο τείνουν να έχουν λιγότερο σαφείς σκιές σε σύγκριση με τις βραχώδεις περιοχές. Η ύπαρξη σκιών μπορεί να είναι ενδεικτική για τον προσδιορισμό της τοπογραφίας, αλλά δεν είναι τόσο έντονες όσο στις βραχώδεις περιοχές. Οι περιοχές με άμμο συνήθως εμφανίζουν μια ομαλή και ομοιόμορφη υφή. Μπορεί να υπάρχουν μικρά μοτίβα από κυματισμούς λόγω της κίνησης του νερού, αλλά συνήθως η επιφάνεια είναι σχετικά ομοιόμορφη. Αντίθετα, οι περιοχές με άργιλο είναι πιο λείες και μπορεί να φαίνονται ακόμη πιο ομοιόμορφες από τις περιοχές με άμμο. Στην εικόνα του sonar η επιφάνεια του αργίλου μπορεί να φαίνεται πιο λεία και με λιγότερες ανωμαλίες (Εικόνα 4.13).



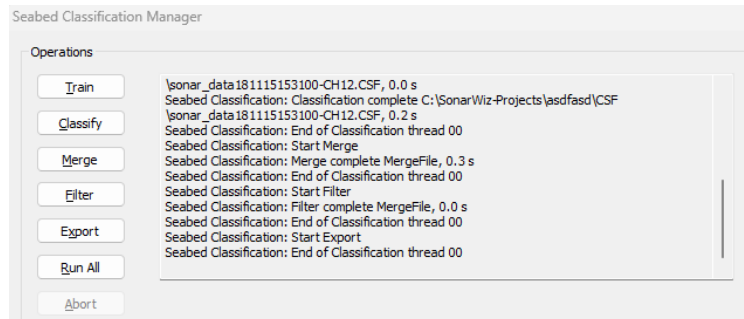
Εικόνα 4.12. Μωσαϊκό SSS για βραχώδη περιοχή «μπλε περίγραμμα».



Εικόνα 4.13. Μωσαϊκό SSS για αμμώδη περιοχή «κόκκινο περίγραμμα» και περιοχές αργίλου.

Πέρα από τα παραπάνω ιζήματα που αναφέρθηκαν, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν βραχώδη περιοχές, όπου είναι αισθητή η παρουσία και του αργίλου ή της άμμου. Αυτό ήταν φανερό τόσο από τα μωσαϊκά, όσο και από τα υποθαλάσσια βίντεο. Συνεπώς, αυτές οι περιοχές που εντοπίστηκαν μόνο στο Ντακάρ, ονομάστηκαν υπο-βραχώδεις περιοχές. Μάλιστα, η επιφάνεια τους είναι συνήθως πιο ομαλή σε σύγκριση με βραχώδη περιοχή αλλά δεν εντάχθηκαν στο ίζημα της βραχώδης περιοχής, διότι θα μπερδευόταν ο αλγόριθμος ταξινόμησης και το αποτέλεσμα θα είχε σφάλματα.

Έχοντας τα δεδομένα προ-επεξεργασμένα, ακολουθεί η διαδικασία της ταξινόμησης και γνωρίζοντας την πληροφορία των χαρακτηριστικών ιζημάτων του πυθμένα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Seabed Classification στο λογισμικό SonarWiz (Εικόνα 4.14). Στην συνέχεια, για την κατηγοριοποίηση των ιζημάτων του πυθμένα, εκπαιδεύτηκε ο αλγόριθμος με βάση τα ιζήματα που παρατηρήθηκαν και αναφέρθηκαν, ορίστηκαν όλες οι επιθυμητές κλάσεις και δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα εκπαίδευσης των κλάσεων της ταξινόμησης, σε μορφή DXF. Αυτή η διαδικασία έγινε και για τις δύο περιοχές μελέτης, στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 4.14. Seabed Classification Manager.

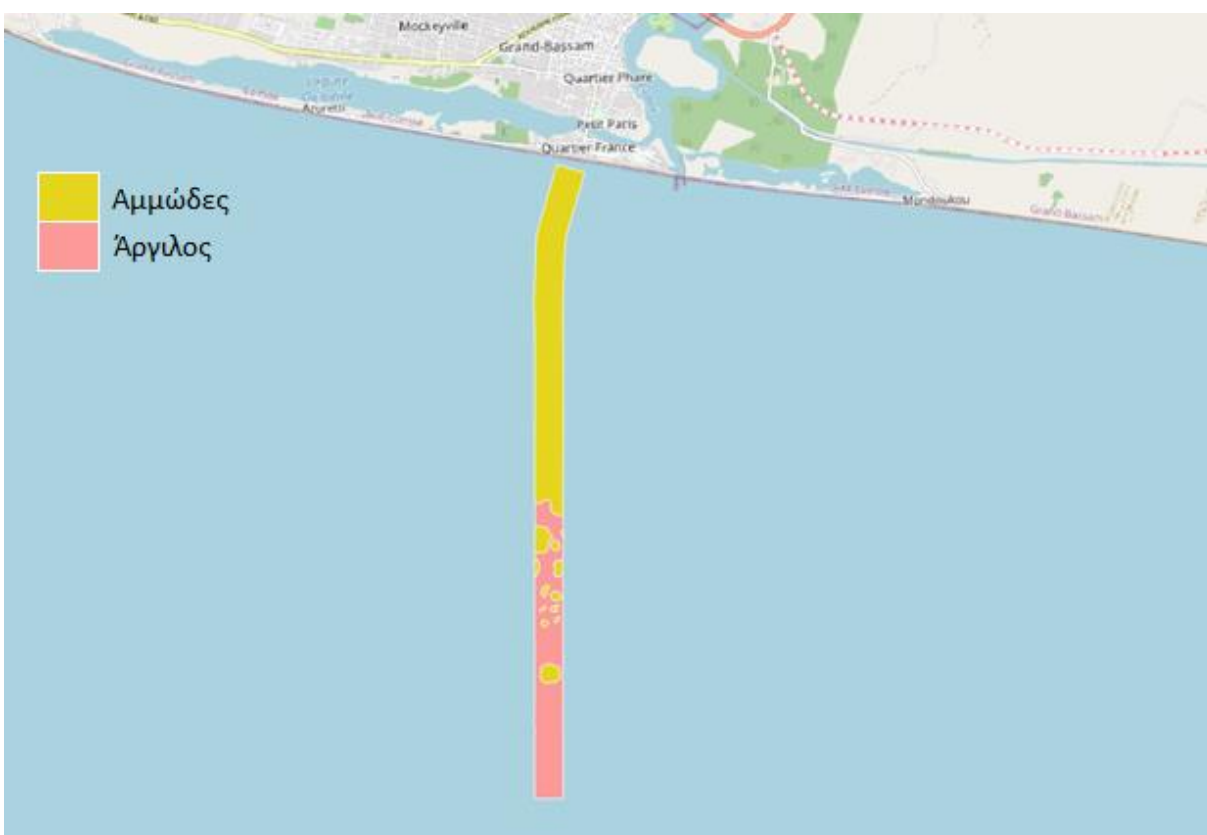
Όλες οι μετατροπές συντεταγμένων πραγματοποιήθηκαν με το εμπορικό λογισμικό Global Mapper, διότι πολλές συντεταγμένες αρχείων αναφέρονται στην Μερκατορική προβολή με συγκεκριμένες παραμέτρους «False Easting/Northing, Scale Factor κτλ». Συνεπώς, η μετατροπή αυτών των δεδομένων σε ένα γνωστό σύστημα συντεταγμένων, είναι μια πιο δύσκολη διαδικασία και το λογισμικό Global Mapper παρέχει τις αντίστοιχες δυνατότητες, καθώς επιτρέπει την μαζική μετατροπή αρχείων «Batch Converter/Reproject» και την εισαγωγή των παραμέτρων της Μερκατορικής προβολής.

Για λόγους οπτικοποίησης, η ταξινόμηση του βυθού εφαρμόστηκε σε περιβάλλον QGIS (Εικόνα 4.15 & 4.16). Δόθηκαν οι επιθυμητοί χρωματικοί συμβολισμοί στα πολύγωνα των κλάσεων «της ταξινόμησης του βυθού». Ο χρωματικός συμβολισμός δεν βασίστηκε σε κάποια πρότυπα, αλλά είναι ενδεικτικός για την κατανόηση του βυθού. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα δεδομένα θα πρέπει να περιοριστούν στα όρια του διαδρόμου, και να μην ξεφεύγουν από τα όρια της περιοχής μελέτης. Έτσι, η σύγκριση των δύο μεθόδων, θα είναι πιο αντικειμενική. Συνεπώς, οι κλάσεις που προέκυψαν για βάθη έως 50 μέτρα, ήταν:

- Άργιλος «Κόκκινο χρώμα»
- Πέτρες «Γκρι χρώμα»
- Υπο-βραχώδη περιοχή «Λαχανί χρώμα»
- Άμμος «Κίτρινο χρώμα»



Εικόνα 4.15. Οπτικοποίηση ταξινόμησης βυθού στο Ντακάρ.



Εικόνα 4.16. Οπτικοποίηση ταξινόμησης βυθού στο Γκραν Μπασάμ.

Κεφάλαιο 5 – Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων

5.1. Δορυφορικά δεδομένα

Τα δορυφορικά δεδομένα αποτελούν μια πολύτιμη πηγή απόκτησης πληροφοριών για την υδρογραφία. Οι δορυφόροι, όπως οι Sentinel-2, παρέχουν πολυφασματικές εικόνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση του βυθού και την εκτίμηση του βάθους. Αυτές οι εικόνες μπορούν να επεξεργαστούν για την εξαγωγή δορυφορικής βαθυμετρίας, η οποία στην συνέχεια μπορεί να βαθμονομηθεί και να συγκριθεί με δεδομένα πεδίου (Fretwell κ.α., 2014).

Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι Sentinel-2 αποτελούνται από δύο δορυφόρους, τον Sentinel-2A και τον Sentinel-2B, ενώ ένας τρίτος ο Sentinel-2C βρίσκεται επί του παρόντος υπό δοκιμές. Οι δορυφόροι Sentinel έχουν ως σκοπό την παρατήρηση της Γης (Earth Observation – EO) από το Πρόγραμμα Copernicus, το οποίο συλλέγει συστηματικά δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης (10 μέτρα έως 60 μέτρα) πάνω από την Γη και τα παράκτια νερά (ESA, 2023). Το πρόγραμμα Copernicus αποτελεί πρόγραμμα του Ευρωπαϊκού Διαστημικού Οργανισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο εξετάζει τον πλανήτη και το περιβάλλον του για το όφελος όλων των ευρωπαίων πολιτών (European Commission, 2023).

Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων περιλαμβάνει πολλά στάδια προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας, όπως η διόρθωση των δεδομένων για ατμοσφαιρικές και ηλιακές ανακλάσεις, η εφαρμογή αλγορίθμων ταξινόμησης για την αναγνώριση διαφορετικών τύπων βυθού, και η εφαρμογή μοντέλων για την εκτίμηση του βάθους από την ανακλαστικότητα του νερού (Lyzenga, 1985; Stumpf κ.α., 2003). Μάλιστα, τα δεδομένα που θα ληφθούν μπορούν να έχουν ήδη υποστεί ατμοσφαιρικές και γεωμετρικές διορθώσεις, τα οποία φέρουν τον χαρακτηρισμό «Level 2A».

Η βαθμονόμηση της δορυφορικής βαθυμετρίας είναι ένα κρίσιμο στάδιο για την εξασφάλιση της ακρίβειας των εκτιμήσεων του βάθους. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει την σύγκριση της ακρίβειας του βάθους από τα δορυφορικά δεδομένα με μετρήσεις πεδίου, όπως με τα δεδομένα MBES που συλλέχθηκαν στο συγκεκριμένο έργο, και την προσαρμογή των μοντέλων βάθους για να ελαχιστοποιήσουν τις διαφορές - σφάλματα (Fretwell κ.α., 2014).

Τα δορυφορικά δεδομένα τείνουν να έχουν ευρεία χρήση στην υδρογραφία. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της δυναμικής των ωκεανών, την ανίχνευση των αλλαγών στον βυθό, την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, την εκτίμηση της βιοποικιλότητας, και την παρακολούθηση των αλλαγών στο περιβάλλον λόγω της κλιματικής αλλαγής (Mouw κ.α., 2015). Συνεπώς, οι εφαρμογές δεν περιορίζονται μόνο στο φάσμα της βαθυμετρίας, αλλά ποικίλουν.

Παρά τις πολλές εφαρμογές των δορυφορικών δεδομένων, υπάρχουν και ορισμένες προκλήσεις και περιορισμοί. Οι δορυφορικές εικόνες μπορεί να επηρεαστούν από την ατμόσφαιρα, την ηλιακή γωνία, και την παρουσία των σύννεφων και της αιθαλομίχλης. Επιπλέον, η εκτίμηση του βάθους από τα δορυφορικά δεδομένα είναι περιορισμένη στις παράκτιες περιοχές και στα ρηχά νερά, καθώς η ανακλαστικότητα του νερού μειώνεται σημαντικά με το βάθος (Lyzenga, 1985; Stumpf κ.α., 2003). Έτσι, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια σφαλμάτων, διότι πέρα από τις αδυναμίες των δορυφόρων να υπολογίσουν το ακριβές βάθος της θάλασσας, η χωρική ανάλυση των δεδομένων γενικεύει αυτήν την πληροφορία.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι δυνατότητες των δορυφορικών δεδομένων στην υδρογραφία συνεχίζουν να επεκτείνονται. Οι νέες τεχνολογίες, όπως οι δορυφόροι υψηλής ανάλυσης και οι προηγμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας δεδομένων, ανοίγουν νέες δυνατότητες για την ακριβέστερη και λεπτομερέστερη ανάλυση των υδρογραφικών δεδομένων. Σημαντικό παράδειγμα είναι η εκτόξευση των δορυφόρων PRISMA και EnMAP οι οποίοι είναι υπερ-φασματικοί και διαθέτουν δεδομένα σε πάρα πολλά κανάλια τα οποία παρέχουν νέες δυνατότητες για την δορυφορική βαθυμετρία (Wang et al., 2023).

Για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι και λογισμικά τα οποία με την χρήση κατάλληλων εργαλειοθηκών για την επίλυση των ζητημάτων της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, της ανίχνευσης των συννεφιασμένων / χιονισμένων περιοχών, της εξαγωγής των χαρακτηριστικών του βυθού, και της εκτίμησης του βάθους. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορεί να βασίζονται σε διάφορες τεχνικές, όπως η στατιστική ανάλυση, η μηχανική μάθηση, η τεχνητή νοημοσύνη και η ανάλυση των δεδομένων (Lyzenga, 1985; Stumpf κ.α., 2003; Mouw κ.α., 2015). Η σύγκριση των δορυφορικών δεδομένων με τα δεδομένα πεδίου είναι ένα σημαντικό βήμα για την επιβεβαίωση της ακρίβειας των δορυφορικών εκτιμήσεων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την σύγκριση των εκτιμήσεων του βάθους από τα δορυφορικά δεδομένα με τις παρατηρήσεις βάθους από δεδομένα MBES και SSS. Η σύγκριση μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των περιορισμών των δορυφορικών δεδομένων, και στην βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας και ανάλυσης τους.

Δημιουργείτε η ανάγκη βελτίωσης των δορυφορικών δεδομένων, όπως της χωρικής τους ανάλυσης. Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο φασματικό κανάλι, το οποίο αφορά το παγχρωματικό ασπρόμαυρο, όπου αυτό είναι διαθέσιμο, μπορεί να βελτιωθεί η χωρική ανάλυση όλων των φασματικών καναλιών, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγόριθμους. Αυτή η μεθοδολογία ονομάζεται σύμπτυξη δεδομένων (Data Fusion) και μπορεί να εξυπηρετήσει στην βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων του βάθους, να βοηθήσει στην αναγνώριση των αλλαγών στον βυθό και να παρέχει πιο λεπτομερείς πληροφορίες για την δυναμική των ωκεανών. Επιπλέον, μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων και των περιορισμών που σχετίζονται με την χρήση των δορυφορικών δεδομένων, όπως η ατμοσφαιρική ανακλαστικότητα, η ηλιακή γωνία και η παρουσία των σύννεφων και της αιθαλομίχλης (Pohl & Van Genderen, 1998; Zhang, 2010).

5.2 Επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών δεδομένων

Για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων, όπως οι εικόνες από τον Sentinel-2, υπάρχουν διάφορα προγράμματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως το ENVI και το MultiSpec. Αυτά τα προγράμματα παρέχουν εργαλεία για την προ-επεξεργασία των δεδομένων, την εφαρμογή αλγορίθμων ταξινόμησης, την εκτίμηση του βάθους, και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Επίσης, τα ΓΣΠ (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών– GIS) είναι σε θέση να επιλύσουν αρκετά ζητήματα, όπως π.χ. το plugin Semi-Automatic Classification για το ελεύθερο λογισμικό QGIS.

Τα δορυφορικά δεδομένα παρέχουν πληροφορίες για την επιφάνεια της γης σε μεγάλη κλίμακα και η επεξεργασία τους περιλαμβάνει την απομάκρυνση του θορύβου, την διόρθωση των σφαλμάτων του συστήματος, την εξομάλυνση των δεδομένων και τον προσδιορισμό του βάθους. Το ENVI είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται συχνά για την προ-επεξεργασία και την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων και την ανάλυση των αλλαγών στην επιφάνεια της Γης, σε διάφορες χρονικές στιγμές, ώστε να είναι εφικτός ο εντοπισμός μεταβολών στην κάλυψη/χρήση της γης και του περιβάλλοντος. Η ανάλυση αυτών των αλλαγών μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των περιβαλλοντικών φαινομένων και στην προσαρμογή των στρατηγικών διαχείρισης της γης (Jensen, 2016).

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν για την παρούσα μελέτη είναι από τον δορυφόρο Sentinel 2 του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus. Πρωταρχικό κριτήριο ήταν η ημερομηνία λήψης των δεδομένων, να είναι κοντινή από την ημερομηνία καταγραφής βαθυμετρικών δεδομένων. Αυτό δεν ήταν απαραίτητα εφικτό, λόγω θορύβου και συννεφοκάλυψης σε κάποιες λήψεις. Έτσι, επιλέχθηκαν δεδομένα που αφορούν καλοκαιρινές περιόδους, για καλύτερη ευκρίνεια. Τα δεδομένα που τελικά λήφθηκαν για την περιοχή του Ντακάρ, έχουν ημερομηνία καταγραφής 21/08/2018, ενώ για την περιοχή του Γκραν-Μπασάμ η ημερομηνία καταγραφής είναι 14/07/2019. Δεν αναμένεται να υπάρχουν έντονες διαφορές στον πυθμένα της θάλασσας, λόγω της διαφοροποίησης των ημερομηνιών, συνεπώς τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την δορυφορική βαθυμετρία θα είναι αντίστοιχα με τα αποτελέσματα των δεδομένων πεδίου.

Εφόσον τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα υποστούν κατάλληλη προ-επεξεργασία και επεξεργασία, είναι σε θέση να οπτικοποιήσουν το αποτέλεσμα της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης του βυθού. Στην υφιστάμενη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μεθοδολογιών και αλγορίθμων, όπου η κάθε μεθοδολογία συμβάλει με διαφορετικό τρόπο και το αποτέλεσμα μπορεί να διαφέρει. Η επιθυμητή ακρίβεια είναι ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει την πορεία της κάθε επεξεργασίας.

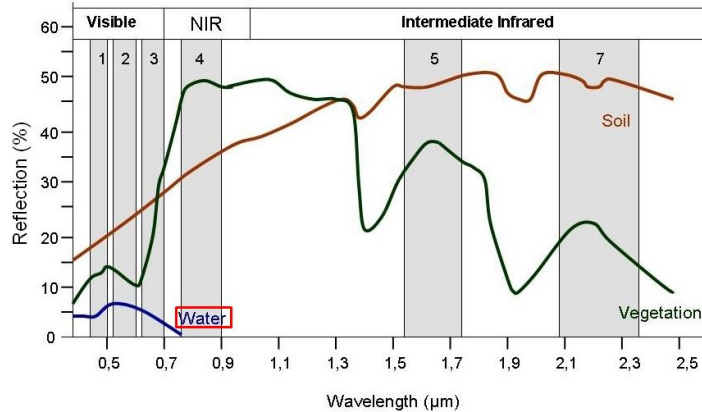
Πριν την επεξεργασία των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τα διαθέσιμα εργαλεία και λογισμικά. Με αυτόν τον τρόπο, αξιολογήθηκαν οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι και επιλέχθηκαν τα κατάλληλα μοντέλα, τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενο υποκεφάλαιο. Μετά την ολοκλήρωση της άνω έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι και διαδικασίες που κρίθηκαν ως κατάλληλοι για την εφαρμογή τους, για τις συγκεκριμένες περιοχές μελέτης.

5.2.1 Ταξινόμηση βυθού

Για την καλύτερη διερεύνηση των ιζημάτων του πυθμένα της θάλασσας, είναι σημαντική η επιλογή μίας μέθοδος ταξινόμησης του βυθού. Οι μέθοδοι ταξινόμησης δεν περιορίζονται στις παράκτιες περιοχές των θαλασσών, αλλά αναφέρονται γενικότερα στην ταξινόμηση του εδάφους. Οι εφαρμογές ποικίλουν και εξαρτώνται από τον σκοπό της ταξινόμησης και τα αποτελέσματα που δύναται να προκύψουν. Για παράδειγμα, μπορεί να ταξινομηθεί η βλάστηση και να προσδιοριστούν τα διαφορετικά είδη της. Για τον σκοπό αυτό, είναι σημαντικό να γνωρίζει ο χρήστης τις φασματικές καμπύλες του κάθε είδους βλάστησης, ώστε να κάνει σωστά την ταξινόμηση. Επίσης, η χρήση των ψευδοχρωματικών εικόνων βοηθάει στην σωστή ταξινόμηση των δεδομένων.

Σχετικά με την μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, λήφθηκε υπόψιν ο σκοπός της ταξινόμησης του βυθού της θάλασσας, προκειμένου να καθοριστούν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του πυθμένα. Αυτό δεν μπορεί να γίνει για όλο το εύρος των βαθών της παράκτιας περιοχής, αλλά περιορίστηκε έως τα 50 μέτρα βάθος. Η ηλιακή ακτινοβολία καθώς διαδίδεται προς τον πυθμένα της θάλασσας, ένα τμήμα αυτής ανακλάται από τον πυθμένα και επιστρέφει στο διάστημα όπου καταγράφεται από τους αισθητήρες του δορυφόρου. Σε μεγαλύτερα βάθη, η ηλιακή ακτινοβολία είτε δεν καταφέρνει να φτάσει μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας, είτε απορροφάται είτε σκεδάζεται κατά την διαστολή της μέσα στην θάλασσα, είτε ανακλάται από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η ακτινοβολία που δεν καταφέρνει να επιστρέψει στον αισθητήρα του δορυφόρου, μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως η θερμότητα. Στον επιστημονικό κλάδο της Τηλεπισκόπησης είναι γνωστό πως τα ύδατα στο ορατό φάσμα μπορούν να εμπεριέχουν πληροφορία ανάκλασης, ενώ το υπέρυθρο κομμάτι του φάσματος παρέχει μηδαμινή πληροφορία από τα ύδατα, λόγω απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 5.1). Συνεπώς, αν απεικονιστεί σε κλίμακα γκρι (gray scale) ένα φασματικό κανάλι υπέρυθρου μιας δορυφορικής λήψης, θα παρατηρηθεί πως τα ύδατα έχουν χαμηλές τιμές ανάκλασης και μαύρο χρώμα. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνική για να δημιουργηθούν μάσκες νερού και εδάφους, ώστε να περιοριστούν τα δεδομένα, στα όρια των εν λόγω μασκών.



Εικόνα 5.1. Φασματική υπογραφή νερού.

Σχετικά με την μέθοδο ταξινόμησης, υπάρχει στη βιβλιογραφία ένας αριθμός τρόπων ταξινόμησης που ο καθένας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Οι τρεις βασικές κατηγορίες ταξινόμησης είναι:

- Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (unsupervised classification)
- Επιβλεπόμενη ταξινόμηση (supervised classification)
- Αντικειμενοστρεφής ταξινόμηση (Object-based)

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση ο αναλυτής παρέχει συγκεκριμένες πληροφορίες για περιοχές κατηγοριοποίησης με γνωστά σημεία καθώς και σημεία εκπαίδευσης. Αντιθέτως, η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση δεν απαιτεί τέτοιες πληροφορίες. Μάλιστα, το λογισμικό χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τους πιο συχνά παρατηρούμενους τύπους κάλυψης, ενώ ο χρήστης τους ερμηνεύει σε μετέπειτα στάδιο. Τέτοιοι αλγόριθμοι μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι οι K-means και ISODATA, όπου επιλέγεται το πλήθος των επιθυμητών κλάσεων (Richards, 2022). Ουσιαστικά ο αλγόριθμος προσπαθεί να εντοπίσει τα διαφορετικά αντικείμενα, λαμβάνοντας υπόψη την φασματική συμπεριφορά των αντικειμένων στα διαφορετικά κανάλια. Έτσι, ο αναλυτής ερμηνεύει τα αποτελέσματα και τα αξιολογεί, ώστε να χαρακτηρίσει εν τέλει τις κλάσεις, ως προς το είδος, π.χ. ύδατα, βλάστηση κ.λπ.

Αντίθετα, η επιβλεπόμενη ταξινόμηση απαιτεί από τον χρήστη την εκπαίδευση του αλγορίθμου, ώστε να εκτιμήσει την έκταση της κάθε κλάσης και να προσδιορίσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά στην εικόνα. Πέρα από περιοχές εκπαίδευσης, θα πρέπει να υπάρχουν κάποιες επιπλέον περιοχές ελέγχου, ώστε να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι που έχουν προταθεί από την επιστημονική κοινότητα, όπως είναι οι Artificial Neural Network (ANN), Random Forest (RF) και Support Vector Machine (SVM). Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Random Forest, όπου είναι διαθέσιμος στην επέκταση Sen2Coral στο λογισμικό SNAP, για τα δεδομένα Sentinel 2.

Η μέθοδος της αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης στην Τηλεπισκόπηση επικεντρώνεται στην αναγνώριση και ταξινόμηση των αντικειμένων σε μια εικόνα, αντί για την απλή κατηγοριοποίηση σε εικονοστοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι τα εικονοστοιχεία ομαδοποιούνται σε αντιπροσωπευτικά σχήματα και μεγέθη, τα οποία μπορούν να είναι αντικείμενα με συγκεκριμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την δημιουργία αντικειμένων που έχουν σημασία και αντιπροσωπεύουν πραγματικά στοιχεία στην εικόνα. Η διαδικασία περιλαμβάνει την πολυδιάστατη κατάτμηση της εικόνας, δημιουργώντας ομοιογενή αντικείμενα εικόνας που έχουν διαφορετικές κλίμακες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν βάσει διαφόρων χαρακτηριστικών όπως η υφή, το πλαίσιο και η γεωμετρία. Η μέθοδος επιτρέπει την χρήση πολλαπλών φασματικών ζωνών ή άλλων πηγών δεδομένων, όπως πληροφορίες υψομέτρου ή shapefiles, για την ταξινόμηση των αντικειμένων.

Κατά το στάδιο της υλοποίησης των παραπάνω αλγορίθμων ταξινόμησης, διαπιστώθηκε πως τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά, συγκρίνοντας τα με τα πραγματικά δεδομένα, από την διαδικασία ταξινόμησης βυθού με τα συστήματα SSS. Αυτό κρίνεται ως αναμενόμενο, μιας και αυτοί οι αλγόριθμοι επινοήθηκαν κυρίως ώστε να ταξινομήσουν περιοχές ξηράς. Οπότε, διαπιστώθηκε ότι παρουσίασαν, στις συγκεκριμένες περιοχές μελέτης, αδυναμία στην ταξινόμηση του πυθμένα. Ως αποτέλεσμα, αποφασίστηκε να υιοθετηθεί η μέθοδος ταξινόμησης του πυθμένα της θάλασσας με βάση τις βιο-οπτικές παραμέτρους (Inherent Optical Properties) των υδάτων όπου εξαρτώνται αποκλειστικά από τις φυσικές και οπτικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και δεν είναι ευαίσθητες στο φως που προέρχεται από την διάχυση της περιβάλλουσας ακτινοβολίας μέσα στα θαλάσσια ύδατα (Mavraeidopoulos, 2022). Για τον υπολογισμό των βιο-οπτικών παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο ημι-αναλυτικός αλγόριθμος (Quasi-Analytical Algorithm QAA) των Lee et al. (2002), ώστε σε δεύτερη φάση να υπολογισθεί η ταξινόμηση του πυθμένα της θάλασσας.

Για την υλοποίηση των παραπάνω, υπολογίζεται ο συντελεστής r_{rs} , που αφορά την υποθαλάσσια ακτινοβολία και αφορά μόνο τα φασματικά κανάλια του ορατού, δηλαδή το μπλε, το πράσινο και κόκκινο. Μάλιστα, ο αριθμητής R_{rs} αντιπροσωπεύει την καταγραφόμενη υδάτινη ακτινοβολία.

$$r_{rs} = \frac{R_{rs}}{0.52 + 1.7 \cdot R_{rs}} \quad \text{Εξίσωση (1)}$$

Επιπρόσθετα, χρειάστηκε να υπολογισθεί ένας εκθέτης Y , ο οποίος σχετίζεται με το μέγεθος και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων στο νερό.

$$Y = 2.2 \times \left(1 - 1.2 \times \exp \left(-0.9 \times \frac{r_{rs}(440)}{r_{rs}(640)} \right) \right) \quad \text{Εξίσωση (2)}$$

Στην συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης $b_{bp}(\lambda)$, λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων.

$$bbp_{Greenband} = \left(\frac{0.0619}{0.05} \right) \times rrs_{B3} \quad \text{Εξίσωση (3)}$$

Γνωρίζοντας την υποθαλάσσια ανακλαστικότητα, υπολογίζεται ένας ενδιάμεσος συντελεστής, όπου είναι ο λόγος u .

$$u = \frac{-0.0895 + \sqrt{0.0895^2 + 4 \times 0.1247 \times rrs}}{2 \times 0.1247} \quad \text{Εξίσωση (3)}$$

Ο υπολογισμός του συντελεστή r_{rs} και ο λόγος u , έγινε σε όλα τα κανάλια του ορατού φάσματος. Έπειτα, υπολογίζονται οι συντελεστές bb στα κανάλια 2, 3 και 4 (μπλε, πράσινο, κόκκινο) του Sentinel2.

$$\begin{aligned} bb_{B2} &= bbp(GreenBand) \times \left(\frac{wavelength_{GreenBand}}{wavelength_{Blueband}} \right)^Y + bbw(wavelength_{Blue}) \\ bb_{B3} &= bbp(GreenBand) \times \left(\frac{wavelength_{GreenBand}}{wavelength_{Greenband}} \right)^Y + bbw(wavelength_{Green}) \\ bb_{B4} &= bbp(GreenBand) \times \left(\frac{wavelength_{GreenBand}}{wavelength_{Redband}} \right)^Y + bbw(wavelength_{Red}) \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση (4)-(6)}$$

Οι συντελεστές bb είναι απαραίτητοι για τον υπολογισμό των συντελεστών της συνολικής απορρόφησης $\alpha(\lambda)$

$$\begin{aligned} \alpha(B2) &= \frac{(1 - u_{B2}) \times BB_{B2}}{u_{B2}} \\ \alpha(B3) &= \frac{(1 - u_{B3}) \times BB_{B3}}{u_{B3}} \\ \alpha(B4) &= \frac{(1 - u_{B4}) \times BB_{B4}}{u_{B4}} \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση (7)-(9)}$$

Τέλος, υπολογίζεται ο τελικός συντελεστής εξασθένησης $K_d(\lambda)$ λόγω της διάχυσης του ηλιακού φωτός στα θαλάσσια ύδατα.

$$K_{d_{B2}} = (1 + 0.005 \times sun_zenith) \times a(Degl(B2)) + (1 - 0.265 \times \frac{bbw(Degl(B2))}{bb(Degl(B2))}) \times 4.26 \times (1 - (0.52 \times \exp(-10.8 \times a(Degl(B2)))))) \times bb(B2)$$

$$K_{d_{B3}} = (1 + 0.005 \times sun_zenith) \times a(Degl(B3)) + (1 - 0.265 \times \frac{bbw(Degl(B3))}{bb(Degl(B3))}) \times 4.26 \times (1 - (0.52 \times \exp(-10.8 \times a(Degl(B3)))))) \times bb(B3)$$

$$K_{d_{B4}} = (1 + 0.005 \times sun_zenith) \times a(Degl(B4)) + (1 - 0.265 \times \frac{bbw(Degl(B4))}{bb(Degl(B4))}) \times 4.26 \times (1 - (0.52 \times \exp(-10.8 \times a(Degl(B4)))))) \times bb(B4)$$

Εξίσωση (10)-(12)

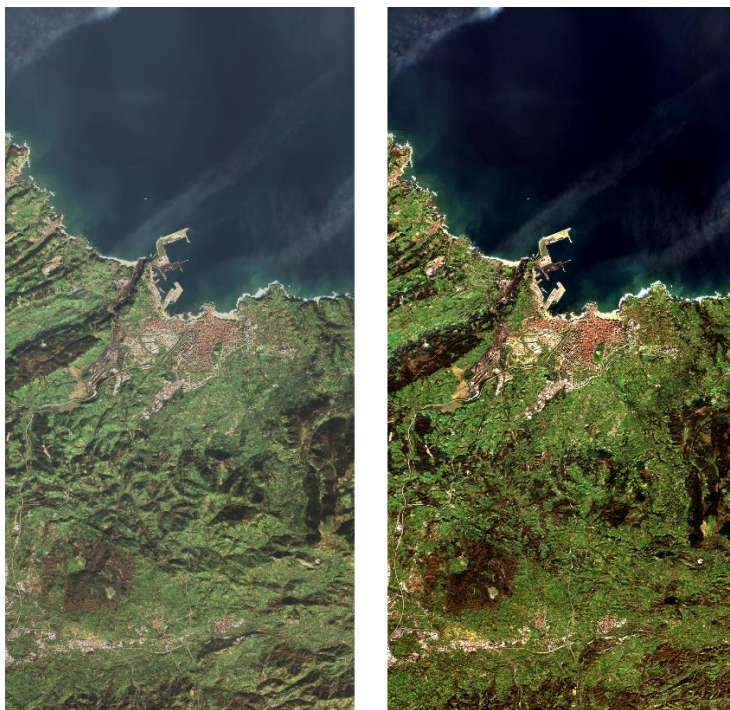
Εφόσον έχουν υπολογισθεί όλοι οι επιθυμητοί βιο-οπτικοί παράμετροι, επόμενο βήμα είναι η δημιουργία μίας εξίσωσης, η οποία θα συγκρίνει την σχέση μεταξύ των παραμέτρων. Σαφέστατα, μπορεί να προκύψουν πολλές διαφορετικές εξισώσεις, όπου πρακτικά το σύνολο τους θα είναι το σύνολο των διαφορετικών ιζημάτων που έχουν εντοπισθεί στον πυθμένα της θάλασσας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το πλήθος των κλάσεων που θα προκύψουν από τις μεθόδους Τηλεπισκόπησης, ενδεχομένως να διαφέρουν από τα ιζήματα που έχουν εντοπισθεί στον πυθμένα της θάλασσας με την χρήση των SSS. Αυτό μπορεί να συμβεί, διότι η ηλιακή ακτινοβολία, αντιδρά φασματικά με τον πυθμένα της θάλασσας, σε σχέση με τα ηχοβολιστικά συστήματα. Έτσι, η ταξινόμηση υλοποιείται με βάση το χαρακτηριστικό της επιστρεφόμενης από τον υδάτινο πυθμένα ακουστικής ενέργειας που διαδίδεται/εκπέμπεται από το πλευρικό ηχοβολιστικό (SSS) ή το ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης (MBES). Συνεπώς, υπάρχει το ενδεχόμενο, οι μέθοδοι Τηλεπισκόπησης να διακρίνουν/αντιληφθούν κάποιο επιπρόσθετο ίζημα, σε σχέση με τα ηχοβολιστικά συστήματα Sonar ή και το αντίστροφο.

5.2.2. Ατμοσφαιρική διόρθωση (Level-2)

Έχοντας αναλύσει ενδελεχώς την διαδικασία ταξινόμησης του βυθού στην προηγούμενη ενότητα, με την χρήση των βιο-οπτικών παραμέτρων, είναι σημαντικό να γίνει και μια αναφορά στην σημασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης η οποία αποσκοπεί στην απομάκρυνση της επίδρασης της ατμόσφαιρας στις δορυφορικές εικόνες. Πρακτικά, η ηλιακή ακτινοβολία που καταγράφεται από τα δορυφορικά συστήματα, έχει διασχίσει 2 φορές την ατμόσφαιρα. Τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας επιδρούν αρνητικά στην ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η καταγραφή να περιέχει σφάλματα.

Η μεθοδολογία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης αξιολογείται ως απαραίτητη, ανάλογα με την εφαρμογή των δεδομένων. Η ατμοσφαιρική διόρθωση, επιτρέπει την πιο ακριβή ανάλυση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας της γης και είναι απαραίτητη για την σύγκριση των τιμών μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της διόρθωσης, οι τιμές ανάκλασης θα αναφέρονται σε τιμές επιφανειακής ανάκλασης. Έτσι, το κάθε εικονοστοιχείο θα έχει τιμές οι οποίες δεν περιέχουν κάποια επίδραση από τα σφάλματα της ατμόσφαιρας. Επιπρόσθετα, συμπεριλαμβάνεται και η διαδικασία γεωμετρικής διόρθωσης, ώστε τα δεδομένα να είναι στην σωστή κλίμακα και γεωαναφερόμενα.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι οι οποίοι μετατρέπουν τα δεδομένα, σε ατμοσφαιρικά διορθωμένα. Η επιλογή του αλγορίθμου, εξαρτάται άμεσα από το δορυφορικό σύστημα που χρησιμοποιείται. Για τα δεδομένα Sentinel 2, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Sen2Cor, ο οποίος μετατρέπει τα δεδομένα από Level 1C σε Level 2A. Αυτή την διαδικασία μπορεί να την κάνει είτε ο χρήστης χρησιμοποιώντας κάποιο λογισμικό που υποστηρίζει τον παραπάνω αλγόριθμο όπως για παράδειγμα το ελεύθερο λογισμικό πρόγραμμα SNAP, είτε να κατεβάσει δεδομένα Sentinel2, τα οποία έχουν ήδη υποστεί ατμοσφαιρική διόρθωση και είναι έτοιμα προς περαιτέρω επεξεργασία. Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζεται στα αριστερά η δορυφορική εικόνα χωρίς να έχει υποστεί ατμοσφαιρική διόρθωση και στα δεξιά η ατμοσφαιρικά διορθωμένη εικόνα, στα φυσικά χρώματα. Για τα πλαίσια της εργασίας, τα δεδομένα που λήφθηκαν συμπεριλαμβάνουν την διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, είναι δηλαδή Level 2A.



Εικόνα 5.2. (Αριστερά) Level-1C, (Δεξιά) Level-2A.

5.2.3. Απομάκρυνση Νεφών

Η διαδικασία απομάκρυνσης νεφών στα πολυφασματικά δεδομένα, είναι ένα σημαντικό βήμα που θα πρέπει να γίνει, πριν την ατμοσφαιρική διόρθωση των δεδομένων. Παρ' όλο που τα δεδομένα που λήφθηκαν για τις περιοχές μελέτης ήταν αρκετά καθαρά και η νεφοκάλυψη ήταν ελάχιστη, αυτό το βήμα δεν παραλήφθηκε στην παρούσα εργασία. Τα δεδομένα που λήφθηκαν αναφέρονται σε καλοκαιρινούς μήνες, όπου η ακτινοβολία του ηλιακού φάσματος είναι πιο ισχυρή και η νεφοκάλυψη ελάχιστη.

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου της ατμοσφαιρικής επίδρασης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα SNAP (Sentinel Application Platform) το οποίο είναι ελεύθερο λογισμικό που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA) και τους συνεργάτες της για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων παρατήρησης της Γης (Earth Observation).

Η πρώτη διαδικασία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία στα δορυφορικά δεδομένα, ήταν ο περιορισμός των δεδομένων, κοντά στα όρια της κάθε περιοχής μελέτης. Αυτό έγινε ώστε οι διαδικασίες που υιοθετήθηκαν στην συνέχεια, να ήταν πιο γρήγορες, απαιτώντας λιγότερη υπολογιστική ισχύ. Επίσης, ο όγκος των παραγόμενων δεδομένων είναι ο απαραίτητος δυνατός. Η διαδικασία ονομάζεται περικοπή (Subset) στο λογισμικό, όπου με την εφαρμογή της βελτιώθηκε η χωρική ανάλυση όλων των καναλιών στα 10 μέτρα. Η διαδικασία βελτίωσης της χωρικής ανάλυσης, συνήθως γίνεται με το παγχρωματικό ασπρόμαυρο, όπου έχει καλύτερη ανάλυση από τα άλλα κανάλια. Τα δορυφορικά δεδομένα δεν προσφέρονται αρχικά με την βέλτιστη ανάλυση των 10 μέτρων, για εξοικονόμηση όγκου δεδομένων και ταχύτερης εξυπηρέτησης των χρηστών.

Η αφαίρεση των νεφών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και λογισμικά. Αναφέρεται πως χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη Sen2Coral, υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεση των νεφών, με μια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Αυτό που έχει να κάνει ο χρήστης είναι να επιλέξει την μέγιστη τιμή που εμφανίζεται σε κάποιο εικονοστοιχείο νεφοκάλυψης σε συγκεκριμένο κανάλι και να επιλέξει τα κανάλια όπου θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος. Στην συγκεκριμένη μεθοδολογία, δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος αλγόριθμος, αλλά η διαδικασία έγινε χειροκίνητα. Πρακτικά, παρατηρήθηκε πως στο φασματικό κανάλι τους εγγύς υπέρυθρου οι τιμές των εικονοστοιχείων για τα σύννεφα, δεν ξεπερνούσαν την τιμή 0.05. Έτσι, εφαρμόστηκε το κατάλληλο Band Math, όπου οι τιμές μεγαλύτερες του 0.05 ορίστηκαν με την τιμή 1, ενώ οι υπόλοιπες τιμές ως NaN (Not a Number). Με αυτόν τον τρόπο, υπήρξε η δυνατότητα πολλαπλασιασμού του καναλιού που προέκυψε ως «κανάλι μάσκας», με τα επιθυμητά κανάλια. Αυτά τα επιθυμητά κανάλια δεν θα μπορούσε να είναι άλλα από τις φασματικές ζώνες του ορατού, διότι σε αυτά υπάρχει καλύτερη αλληλεπίδραση ηλιακής ακτινοβολίας. Στο κανάλι του υπέρυθρου, υπάρχει «σχεδόν» ολική απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, στα ύδατα. Συνεπώς, σε αυτό το κανάλι δεν μπορεί να εξαχθεί κάποια πληροφορία για περιοχές υδάτων, πέρα από την δημιουργία μάσκας επί των υδάτινων περιοχών.

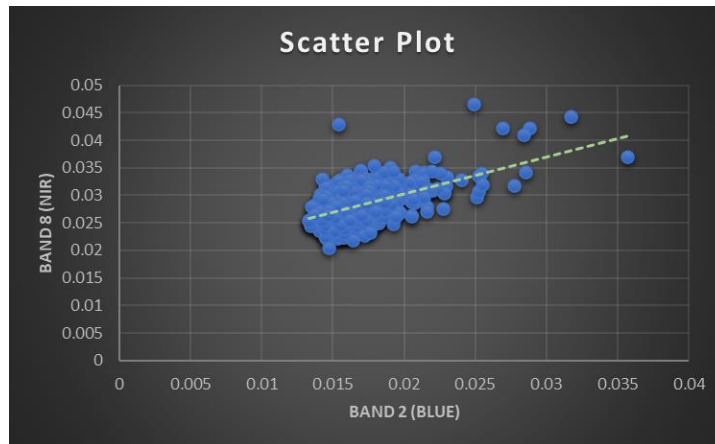
5.2.4. Διαδικασία αποθάμβωσης (Sunlint Correction)

Η αποθάμβωση (Sunlint) στα δορυφορικά δεδομένα αποσκοπεί στην απομάκρυνση των ανεπιθύμητων ανακλάσεων επί της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας, που δεν φέρει καμία πληροφορία για τα ύδατα. Οι δορυφορικές εικόνες συχνά επηρεάζονται από την θάμβωση που προκαλεί θόρυβο λόγω της ανάκλασης της ηλιακή ακτινοβολίας από την επιφάνεια του νερού. Για την διόρθωση θάμβωσης (Sunlint), έχει αναπτυχθεί μια τεχνική για την απομάκρυνση του εν λόγω σφάλματος, χρησιμοποιώντας είτε ένα φάσμα στο μικροκυματικό υπέρυθρο (SWIR) είτε ένα φάσμα στο εγγύς υπέρυθρο (NIR), όπου η απορρόφηση της ακτινοβολίας στα ύδατα είναι αρκετά μεγάλη και η ακτινοβολία που προέρχεται από το νερό είναι αμελητέα σε μονάδες ανακλαστικότητας. Συνεπώς, ένα σημαντικό βήμα για την βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων, είναι να ολοκληρωθεί η απομάκρυνση των ανεπιθύμητων επιδράσεων που προκαλεί αυτό το φαινόμενο.

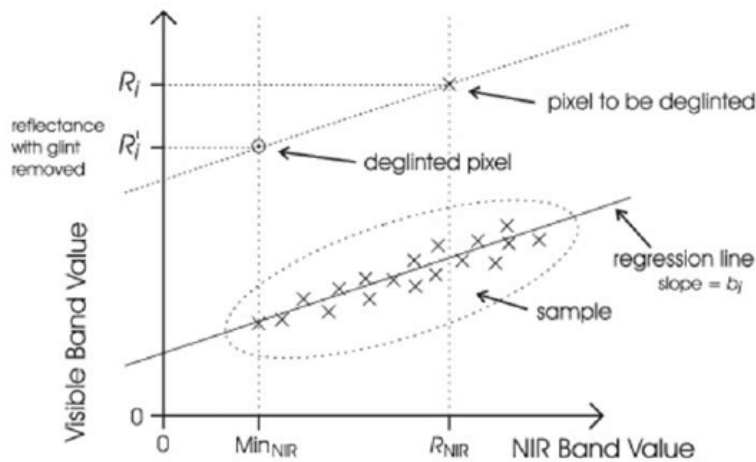
Στα δορυφορικά δεδομένα Sentinel 2, η διαδικασία της αποθάμβωσης δεν παρέχεται έτοιμη κατά την λήψη των δεδομένων. Μάλιστα, δεν θεωρείται απολύτως απαραίτητη, όταν αυτό το φαινόμενο δεν παρατηρείται στα ληφθέντα δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, για την μέγιστη ακρίβεια των δεδομένων, συνιστάται η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας. Υπάρχουν αυτοματοποιημένες μέθοδοι, οι οποίες ολοκληρώνουν την διαδικασία της αποθάμβωσης, χωρίς ο χρήστης να επέμβει με χειροκίνητους υπολογισμούς. Σχετικά με τις αυτοματοποιημένες μεθόδους, το λογισμικό SNAP μπορεί να διορθώσει τα δεδομένα ως προς το φαινόμενο λάμψης, χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη Sen2Coral. Αφού πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση της σχετικής επέκτασης (plugin), μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία με την χρήση του αλγορίθμου Deglint Processor. Επίσης, πρέπει να ορισθούν κάποια δείγματα αποθάμβωσης, ώστε ο αλγόριθμος να βαθμονομηθεί σε αυτά τα δείγματα τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν ως περιοχές βαθέων υδάτων με μορφή πολυγωνικών διανυσματικών αρχείων δομής (Vector ή Shapefile), που θα χρησιμοποιηθούν κατά την επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας για την εξαγωγή της βαθυμετρίας.

Αφού έχουν δηλωθεί τα δείγματα, επιλέγονται τα επιθυμητά φασματικά κανάλια. Επειδή στο ύδωρ περιέχεται και πληροφορία που προέρχεται από την υδάτινη ανάκλαση στο ορατό φάσμα, δηλώθηκαν τα αντίστοιχα κανάλια ως κανάλια αναφοράς (Source Band). Επειδή στο υπέρυθρο φάσμα δεν παρέχεται κάποια πληροφορία, λόγου της «σχεδόν» ολικής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας, επιλέγεται ένα κανάλι που αφορά το υπέρυθρο «π.χ. το Band 8 στα δεδομένα Sentinel 2». Εκτελώντας τον αλγόριθμο, ολοκληρώνονται οι διαδικασίες και πλέον μπορούν να προβληθούν τα επεξεργασμένα δεδομένα είτε σε κλίμακα RGB είτε σε διαβαθμίσεις του γκρι.

Παρ' όλο που αυτός ο αλγόριθμος αξιολογήθηκε ως αξιόπιστος, επειδή χρησιμοποιείται ευρέως, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μια διαφορετική προσέγγιση. Έτσι, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία των Hedley et al. (2005), όπου βασικό προ-απαιτούμενο είναι να παρουσιάζεται γραμμικότητα στα φασματικά δεδομένα (Εικόνες 5.4 & 5.5). Αυτή η τεχνική δέχθηκε βελτιώσεις και παρουσιάστηκε ως πιο ολοκληρωμένη, από τους Kay et al. (2009) μέσω της εξίσωσης (13). Πρακτικά, από το κάθε φασματικό κανάλι στο ορατό φάσμα, αφαιρείται η τιμή κλίσης «όπου προκύπτει από την εξίσωση πρώτου βαθμού $Y = A \cdot x + B$ », όπου πολλαπλασιάζεται με ένα κανάλι εγγύς υπέρυθρου «στη συγκεκριμένη εφαρμογή με το Band 8», αφαιρώντας τη μικρότερη τιμή.



Εικόνα 5.3. Κατανομή γραμμικής συσχέτισης, μορφής Scatter Plot

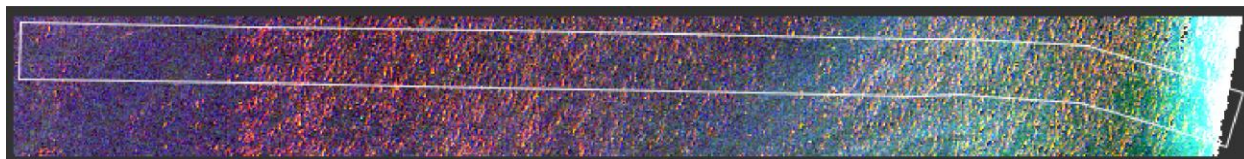


Εικόνα 5.4. Διάγραμμα επεξήγησης αποθάμβωσης «Regression Analysis»

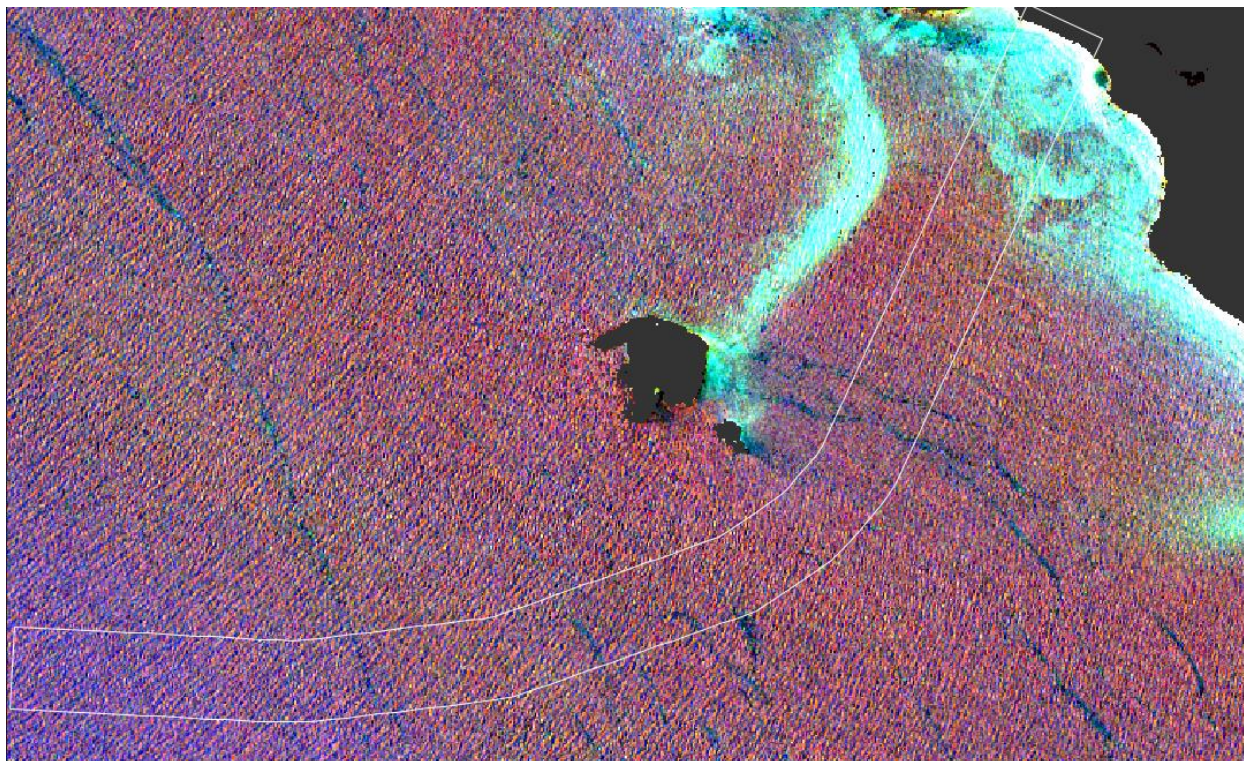
$$\text{Deg}(R_{BI}) = R_{BI} - \text{slope}_{BI} \cdot (R_{NIR} - \text{minNIR})$$

Εξίσωση (13)

Αφού δημιουργήθηκαν όλα τα επιθυμητά διαγράμματα διασποράς, αρχικά επιβεβαιώθηκε πως όντως παρουσιάζεται γραμμικότητα στα δεδομένα. Έπειτα, εντοπίστηκε η μικρότερη τιμή στον κανάλι του υπέρυθρου που χρησιμοποιήθηκε (Band 8) ώστε να συνταχθεί η εξίσωση για το κάθε κανάλι στο ορατό φάσμα. Υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες μαθηματικές εξισώσεις πρώτου βαθμού και με την χρήση του λογισμικού SNAP, υπολογίστηκαν τα αποθαμβωμένα κανάλια του ορατού φάσματος (Εικόνες 5.6 & 5.7).



Εικόνα 5.5. Αποθαμβωμένη εικόνα RGB ορατού φάσματος στην περιοχή Γκραν-Μπασάμ της Ακτής Ελεφαντοστού



Εικόνες 5.6. Αποθαμβωμένη εικόνα RGB ορατού φάσματος, στην περιοχή Ντακάρ της Σενεγάλης

5.2.5. Διαδικασία διόρθωσης υδάτινης στήλης (Water Column Correction)

Η διόρθωση της υδάτινης στήλης στα δορυφορικά δεδομένα, είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται σε δορυφορικές εικόνες που απεικονίζουν υδάτινες περιοχές, με σκοπό την εξάλειψη του σφάλματος λόγω της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην υδάτινη στήλη. Αυτές οι επιπτώσεις προκαλούνται κυρίως από την απορρόφηση και σκέδαση του φωτός μέσα στην στήλη νερού, που μπορεί να αλλοιώσει το σήμα που λαμβάνονται από τους δορυφόρους.

Η διόρθωση του πυθμένα επιτρέπει την σαφέστερη αναγνώριση και κατηγοριοποίηση των χαρακτηριστικών της θάλασσας. Επίσης, είναι δυνατή η καλύτερη εκτίμηση της ποιότητας του νερού, καθώς τα δεδομένα που λαμβάνονται γίνονται πιο αξιόπιστα για την ανάλυση παραμέτρων όπως η θολότητα και η παρουσία χλωροφύλλης.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την διόρθωση της υδάτινης στήλης, οι οποίες μπορεί να είναι φυσικές, εμπειρικές ή ημι-αναλυτικές:

- Οι φυσικές μέθοδοι βασίζονται σε θεμελιώδεις αρχές της φυσικής και της οπτικής για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης του φωτός με το νερό και τα συστατικά του.
- Οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται σε παρατηρήσεις και χρησιμοποιούν στατιστικές τεχνικές για την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των φασματικών δεδομένων και των χαρακτηριστικών του βυθού ή της ποιότητας του νερού.
- Οι ημι-αναλυτικές μέθοδοι συνδυάζουν αρχές της φυσικής με εμπειρικά δεδομένα για την δημιουργία μοντέλων, που είναι πιο ακριβή από τις καθαρά εμπειρικές μεθόδους και πιο προσαρμοστικά από τις καθαρά φυσικές μεθόδους.

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τις συγκεκριμένες συνθήκες του περιβάλλοντος, τα διαθέσιμα δεδομένα και τους στόχους της μελέτης. Ενδεχομένως, να χρειαστούν πολλαπλοί υπολογισμοί, ώστε το αποτέλεσμα που θα προκύψει να αξιολογηθεί ως αξιόπιστο προς χρήση. Μερικές φορές, οι ερευνητές χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό μεθόδων για να επιτύχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Στην συγκεκριμένη μεθοδολογία, χρησιμοποιήθηκε μια εμπειρική μέθοδος διόρθωσης της υδάτινης στήλης «Depth Invariant Index - DII», που αναπτύχθηκε από τον Lyzenga (1981). Αυτή η μέθοδος έχει αξιολογηθεί ως αποτελεσματική, για την διόρθωση της υδάτινης στήλης και χρησιμοποιείται ευρέως στις μελέτες χαρτογράφησης βυθού και ανάλυσης υδάτινων περιοχών. Η εν λόγω τεχνική, βασίζεται στην λογαριθμική σχέση μεταξύ της φασματικής ανάκλασης και του βάθους για την δημιουργία δεικτών που είναι ανεξάρτητοι από το βάθος του νερού. Πρακτικά, υπολογίζεται ο συντελεστής εξασθένησης ακτινοβολίας του νερού για αντίστοιχο κανάλι, συμβολίζοντας το δείκτη ως KB.

$$DII = \ln(DegI(Bi)) - \left(\frac{KBj}{KBi} \right) \cdot \ln(DegI(Bj))$$

Εξίσωση (14)

Όπου

$$\frac{K_{\text{DegIB}_i}}{K_{\text{DegIB}_j}} = a + \sqrt{a^2 + 1}$$

Εξίσωση (15)

Είναι οι συντελεστής εξασθένισης λόγω διάχυσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο ύδωρ και για το κανάλι (i) και (j), ενώ ο συντελεστής a προκύπτει από τον λόγο των αντίστοιχων διακυμάνσεων και συν-διακυμάνσεων που υπολογίζονται και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a = \frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2 \times \sigma_{ij}}$$

Εξίσωση (16)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η διόρθωση υδάτινης στήλης «Depth Invariant Index», μπορεί να πραγματοποιηθεί στο λογισμικό SNAP, όπου παρέχεται ο αλγόριθμος Depth Invariant Indices Processor, ο οποίο βρίσκεται στην βιβλιοθήκη Sen2Coral. Η χρήση του είναι αρκετά απλή, καθώς ο χρήστης χρειάζεται αρχικά να δημιουργήσει ζεύγη καναλιών. Στην συνέχεια, αφού έχουν δημιουργηθεί τα κατάλληλα δείγματα περιοχών πολυγωνικής μορφής, ο χρήστης δύναται να επιλέξει τα δείγματα που αναφέρονται σε βαθιά ύδατα και σε περιοχές όπου τα βάθη είναι παρεμφερή. Συνήθως, τα ζεύγη που χρειάζονται να υλοποιηθούν για δεδομένα Sentinel 2, είναι μεταξύ των καναλιών B2_B3, B3_B4 και B2_B4. Στα ζεύγη καναλιών που θα δηλωθούν, θα πρέπει να αναφέρονται τα αποθαμβωμένα φασματικά κανάλια.

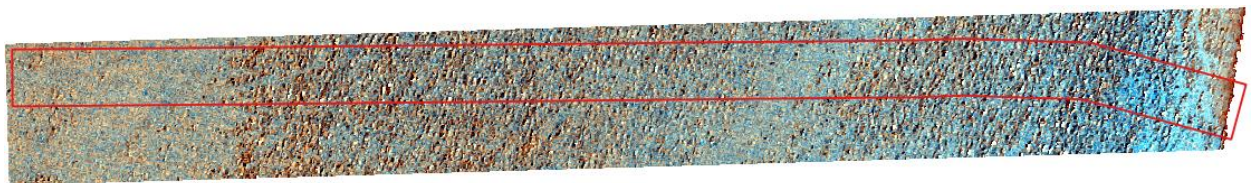
Για να εφαρμοστούν οι παραπάνω εξισώσεις, είναι απαραίτητο να ληφθούν πολυγωνικά δείγματα, από τα δεδομένα. Τα δείγματα θα αναφέρονται στα δεδομένα που έχουν δεχθεί την διόρθωση της αποθάμβωσης. Για να υπάρχει η πληροφορία του πυθμένα από τα καταγραφικά συστήματα, επιλέχθηκαν δείγματα όπου το βάθος είναι μικρότερο των 15 μέτρων. Έτσι, όλα τα δείγματα που λήφθηκαν, εμπεριέχουν πληροφορία του πυθμένα της θάλασσας. Μάλιστα, το κάθε δείγμα θα πρέπει να αναφέρεται αποκλειστικά σε ένα συγκεκριμένο ιζήμα και το πλήθος των δειγμάτων ανά κλάση να είναι δύο. Συνεπώς, για την περιοχή του Ντακάρ της Σενεγάλης, όπου ο πυθμένα της θάλασσας παρουσιάζει τρία διαφορετικά ιζήματα, τα δείγματα θα είναι στο σύνολο έξι.

Η δημιουργία των δειγμάτων μπορεί είτε να γίνει σε περιβάλλον SNAP, είτε σε ένα εξωτερικό λογισμικό τύπου GIS. Για λόγους πρακτικότητας, τα δείγματα δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον QGIS και έπειτα πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή τους σε μορφή Shapefile. Είναι σημαντικό πως η εισαγωγή των δειγμάτων, θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε το κάθε δείγμα να είναι αυτόνομο. Έτσι, για το κάθε δείγμα, εξάχθηκε η φασματική πληροφορία όλων των καναλιών.

Η εξαγωγή των τιμών για τα φασματικά κανάλια μέσω της λειτουργίας «Export Transect Pixels», πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Excel, ώστε να διαμορφωθεί και να διαγραφεί κάθε περιττή πληροφορία. Έπειτα, αυτά τα δεδομένα εισάχθηκαν σε περιβάλλον IBM SPSS, ώστε να υπολογισθεί η στατιστική διακύμανση (variance σ_{ii} και σ_{jj}) και η συνδιακύμανση (Co-variance σ_{ij}). Ακολούθως, υπολογίστηκε ο συντελεστής α (Εξίσωση 16) και ο συντελεστής εξασθένησης K_D (Εξίσωση 15), για τα ζεύγη B2_B3, B3_B4 & B2_B4. Για την εφαρμογή της Εξίσωσης (14) για την διόρθωση της υδάτινης στήλης DII, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAP, συντάσσοντας τις κατάλληλες εξισώσεις στο περιβάλλον Band Maths.



Εικόνα 5.7. Αποτελέσματα ψευδοχρωματική εικόνας διόρθωσης της υδάτινης στήλης DII, στην περιοχή Ντακάρ Σενεγάλης



Εικόνα 5.8. Αποτελέσματα ψευδοχρωματικής εικόνας διόρθωσης της υδάτινης στήλης DII, στην περιοχή Γκραν-Μπασάμ της Ακτής Ελεφαντοστού.

5.3. Ταξινόμηση του βυθού, με την χρήση βιο-οπτικών παραμέτρων

Πριν από τον υπολογισμό και την χρήση των βιο-οπτικών παραμέτρων, έγιναν διάφορες και πολλαπλές προσπάθειες, ώστε να ταξινομηθεί ο πυθμένας της θάλασσας, με υφιστάμενους αλγόριθμους επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Πρωταρχικά, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Random Forest, που διατίθεται στο λογισμικό SNAP.

Ο αλγόριθμος Random Forest (RF) είναι μια ισχυρή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης, ιδιαίτερα δημοφιλής στην ανάλυση δορυφορικών δεδομένων. Βασίζεται στην δημιουργία ενός μεγάλου αριθμού δέντρων απόφασης κατά την φάση της εκπαίδευσης, όπου κάθε δέντρο είναι εκπαιδευμένο σε ένα διαφορετικό υποσύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης.

Ως διαφορετική προσέγγιση, χρησιμοποιήθηκε και ο αλγόριθμος K-Nearest Neighbor (KNN), με πολλαπλά και διαφορετικά κριτήρια. Ο αλγόριθμος KNN είναι μια απλή αλλά ισχυρή μέθοδος επιβλεπόμενης μάθησης που χρησιμοποιείται συχνά για την ταξινόμηση δορυφορικών δεδομένων. Λειτουργεί εντοπίζοντας τους k πλησιέστερους γείτονες ενός δείγματος δεδομένων, με βάση την μέτρηση απόστασης, συνήθως την Ευκλείδεια απόσταση. Το δείγμα ταξινομείται στην κατηγορία που είναι πιο συνηθισμένη ανάμεσα στους k πλησιέστερους γείτονες. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως η αναγνώριση γης, η ταξινόμηση εδαφών και η ανίχνευση αλλαγών, αξιοποιώντας την χωρική και φασματική πληροφορία που περιέχουν τα δορυφορικά δεδομένα.

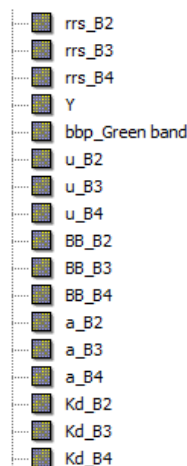
Παρατηρήθηκε πως τα αποτελέσματα αυτών των δύο αλγορίθμων επιβλεπόμενης ταξινόμησης ήταν παρεμφερή. Σε κάθε περίπτωση, όμως τα αποτελέσματα που προέκυψαν αξιολογήθηκαν ως ακατάλληλα προς χρήση, διότι η ταξινόμηση που πρόκυπτε ήταν πολύ διαφορετική με την ταξινόμηση των SSS (Side Scan Sonar). Συνεπώς, οι αλγόριθμοι RF και KNN παρουσίασαν αδυναμία υπολογισμού ιζημάτων του θαλάσσιου πυθμένα, τουλάχιστον στις δύο περιοχές μελέτης. Ενδεχομένως να αξιολογούνται ως ικανοί αλγόριθμοι ταξινόμησης, σε διαφορετικούς τύπους υδάτων, με καλύτερες συνθήκες λήψης δεδομένων.

Οπότε, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μια πιο εξειδικευμένη μέθοδος ταξινόμησης του πυθμένα της θάλασσας, υπολογίζοντας τις βιο-οπτικές παραμέτρους που παρουσιάστηκαν στην αρχή του κεφαλαίου. Οι υπολογισμοί εφαρμόστηκαν στα δεδομένα, όπου έχουν υποστεί τις απαραίτητες διορθώσεις, ώστε τα αποτελέσματα να έχουν την επιθυμητή ακρίβεια. Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό SNAP και έτσι δημιουργήθηκαν όλα τα επιθυμητά κανάλια. Περιγράφοντας τους υπολογισμούς που υλοποιήθηκαν, υπολογίστηκε καταρχάς η υποθαλάσσια ανακλαστικότητα, στα αποθαμβωμένα κανάλια του ορατού φάσματος (Γ_{rs}), ώστε στην συνέχεια να υπολογισθεί ο συντελεστής Y .

Έπειτα, υπολογίσθηκε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων στα ύδατα, για το μήκος κύματος του φασματικού καναλιού Green (bbp_{Green}). Στην συνέχεια, υπολογίσθηκαν οι συντελεστές u και b_b , οι οποίοι εξυπηρετούν στον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης « a ». Έτσι, υπολογίζεται ο συντελεστής εξασθένησης λόγου διάχυσης του φωτός στα ύδατα K_d . Τα αποτελέσματα που προέκυψε από τους παραπάνω υπολογισμούς, απεικονίζονται στην Εικόνα 5.8-5.9.

Οι βιο-οπτικές παράμετροι και τα αποθαμβωμένα κανάλια παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις, οι οποίες στην συνέχεια μπορούν να εξυπηρετήσουν στον υπολογισμό των διαφορετικών κλάσεων, ώστε να υλοποιηθεί η ταξινόμηση του πυθμένα. Έτσι, πάρθηκε ένα πλήθος δειγμάτων, σε βάθη μικρότερα των 15 μέτρων. Η κατανομή των σημείων ήταν επαρκής και καλά κατανομημένη στο χώρο, όπου το κάθε δείγμα αναφερόταν σε ένα συγκεκριμένο ίζημα με βάση τα πραγματικά δεδομένα ταξινόμησης, ως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση των καταγραφών των SSS. Η δειγματοληψία ολοκληρώθηκε χρησιμοποιώντας ένα πλήθος σημείων (Pins) στο SNAP, όπου το κάθε σημείο είχε αντίστοιχο χρώμα, ανάλογα με το ίζημα του. Ο λόγος για τον οποίο το κάθε σημείο είχε συγκεκριμένο ίζημα, ήταν να διαπιστωθεί εάν η ταξινόμηση του πυθμένα της θάλασσας συμφωνεί με την ταξινόμηση των SSS. Αναμένεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις, διότι τα συστήματα SSS αντιλαμβάνονται διαφορετικά τον πυθμένα της θάλασσας, σε σχέση με τις τεχνικές ταξινόμησης με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων.

Τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούν την καταγεγραμμένη ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας για να αναλύσουν την επιφάνεια της γης και της θάλασσας, ενώ τα συστήματα Sonar χρησιμοποιούν ηχητικά κύματα για να καταγράψουν τα ιζήματα του πυθμένα της θάλασσας. Μάλιστα, αναφέρεται πως τα δεδομένα SSS παρέχουν υψηλή ανάλυση και λεπτομέρεια της μορφολογίας του βυθού, ενώ τα δορυφορικά δεδομένα παρέχουν γενικές πληροφορίες σε μεγαλύτερη κλίμακα, κατάλληλες για ευρεία ταξινόμηση και παρακολούθηση.



Εικόνα 5.9. Βιο-οπτικοί παράμετροι.

Αφού δημιουργήθηκαν όλα τα επιθυμητά δείγματα, εξάχθηκαν σε περιβάλλον Excel, ώστε να συγκριθούν οι βιο-οπτικοί παράμετροι (Εικόνα 5.10) και τα αποθαμβωμένα κανάλια. Οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιώντας εργαλεία ταξινόμησης τιμών, συγκρίνοντας τις τιμές των καναλιών μεταξύ τους. Διαπιστώθηκε, πως στην περιοχή του Ντακάρ υπάρχουν στο σύνολο 4 διαφορετικές κλάσεις ιζημάτων, ενώ στην περιοχή του Γκραν-Μπασάμ Ακτής Ελεφαντοστού υπάρχει μόνο μία. Οι κλάσεις της περιοχής του Ντακάρ Σενεγάλης, δεν συμφωνούν με τα πραγματικά δεδομένα και δεν απευθύνονται αποκλειστικά σε ένα ίζημα με βάση τα δεδομένα Sonar.

Πιο συγκεκριμένα, τα δείγματα της πρώτης κλάσης αναφέρονται σε υπο-βραχώδη και αμμώδη περιοχή, της δεύτερης σε πετρώδη περιοχή, της τρίτης σε υπο-βραχώδη περιοχή και της τέταρτης κλάσεις που εμπεριέχει όλα τα ιζήματα. Είναι φανερό πως η κάθε κλάση που προέκυψε, δεν αντιπροσωπεύει αποκλειστικά ένα ίζημα και αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε επειδή η μέθοδος ταξινόμησης κατάφερε μεν να διακρίνει ένα ίζημα που όμως δεν κατάφερε να διαπιστωθεί με τις τεχνικές υδρογραφίας, είτε αντιλήφθηκε με διαφορετικό τρόπο τα ιζήματα του πυθμένα. Σε κάθε περίπτωση, ο θαλάσσιος πυθμένας της πρώτης περιοχής είναι αρκετά πολύπλοκος και θα συζητηθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων.

Αντίθετα, στην περιοχή του Γκραν-Μπασάμ, τα αποτελέσματα ταξινόμησης των τεχνικών Τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιήθηκαν, με τα αποτελέσματα των Sonar, συμφωνούν μεταξύ τους. Πράγματι, ο πυθμένας της θάλασσας για την περιοχή μελέτης της δεύτερης περιοχής, παρουσιάζει μόνο ένα ίζημα για βάθη έως 15 μέτρα και αυτό αφορά την αμμώδη περιοχή. Συνεπώς όσα δείγματα πάρθηκαν, αναφέρονται μόνο σε ένα ίζημα, όπου αυτό στην συνέχεια διαπιστώθηκε και με την σύγκριση/αξιολόγηση των βιο-οπτικών παραμέτρων. Ωστόσο, υπάρχει και το ίζημα αργίλου, αλλά βρίσκεται σε μεγάλα βάθη, όπου είναι αδύνατη η καταγραφή της ακτινοβολίας από τα δορυφορικά καταγραφικά συστήματα. Έτσι, οι σχέσεις που προέκυψαν για την δημιουργία των επιθυμητών κλάσεων, είναι οι:

- if $Kd_B2 \geq Kd_B3$ && $Kd_B3 \geq Kd_B4$ && $a_B2 \geq a_B3$ && $a_B3 \geq a_B4$ && $rrs_B4 \geq rrs_B3$ && $rrs_B3 \geq rrs_B2$ then 1 else 0 «Ντακάρ»
- if $Kd_B2 \geq Kd_B3$ && $Kd_B3 \geq Kd_B4$ && $a_B2 \geq a_B4$ && $a_B4 \geq a_B3$ && $rrs_B3 \geq rrs_B4$ && $rrs_B4 \geq rrs_B2$ then 1 else 0 «Ντακάρ»
- if $Kd_B2 \geq Kd_B3$ && $Kd_B3 \geq Kd_B4$ && $a_B2 \geq a_B3$ && $a_B3 \geq a_B4$ && $rrs_B3 \geq rrs_B4$ && $rrs_B4 \geq rrs_B2$ then 1 else 0 «Ντακάρ»

- if $Kd_B2 \geq Kd_B3 \ \&\& \ Kd_B3 \geq Kd_B4 \ \&\& \ a_B2 \geq a_B4 \ \&\& \ a_B4 \geq a_B3 \ \&\& \ rrs_B3 \geq rrs_B2 \ \&\& \ rrs_B2 \geq rrs_B4$ then 1 else 0 «Ντακάρ»
- if $Kd_B2 \geq Kd_B3 \ \&\& \ Kd_B4 \geq Kd_B3 \ \&\& \ a_B2 \geq a_B3 \ \&\& \ a_B4 \geq a_B3 \ \&\& \ rrs_B3 \geq rrs_B4 \ \&\& \ rrs_B3 \geq rrs_B2$ then 1 else 0 «Γκραν-Μπασάμ»

Στις κλάσεις που προέκυψαν, εφαρμόστηκε ένα μαθηματικό φίλτρο, το οποίο εξυπηρετεί στην καλύτερη εκτίμηση και αποτύπωση των ιζημάτων. Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε αφορά ένα μαθηματικό φίλτρο αριθμητικού μέσου, χρησιμοποιώντας πίνακες 3x3. Αυτό έγινε για όλες τις κλάσεις και για τις δύο περιοχές. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε μια επανα-ταξινόμηση (Reclassify) των τιμών, όπου οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν την τιμή 1 ενώ οι υπόλοιπες τις μηδενικές τιμές.

5.4. Δορυφορική Βαθυμετρία

Το στάδιο υπολογισμού βαθών με τηλεπισκοπικές τεχνικές/μεθόδους, αφορά την βαθμονόμηση των βαθυμετρικών δεδομένων από τα συστήματα MBES, με τα βάθη που υπολογίσθηκαν από τα κανάλια της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2, δημιουργώντας τα κατάλληλα γραφήματα διασποράς. Υπολογίζοντας την βέλτιστη εξίσωση πρώτου ή δευτέρου βαθμού, είναι δυνατόν να υπολογισθούν τα βάθη της κάθε κλάσης και το κάθε εικονοστοιχείο αναφέρεται σε συγκεκριμένο βάθος, με μονάδες μέτρησης τα μέτρα.

5.4.1. Υπολογισμός λόγων/αλγοριθμικών λόγων βιο-οπτικών παραμέτρων.

Η εξαγωγή της βαθυμετρίας αρχίζει υπολογίζοντας τους λόγους και τους αλγοριθμικούς λόγους των βιο-οπτικών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα χρησιμοποιηθούν για να εντοπισθεί η καλύτερη σχέση μεταξύ των λόγων και των βαθών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως βάθη βαθμονόμησης του μοντέλου. Μέσω της δημιουργίας κατάλληλων γραφημάτων διασποράς, θα προκύψει η αντίστοιχη μαθηματική σχέση/εξίσωση, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας. Η βαθυμετρία αρχικά θα υπολογισθεί για κάθε κλάση χωριστά, όπου στην συνέχεια θα γίνει συνένωση των αποτελεσμάτων ώστε να προκύψει μια ενιαία. Για την καλύτερη κατανόηση των υπολογισμών που χρησιμοποιήθηκαν και το αποτελεσμάτων που προέκυψαν, απεικονίζονται οι λόγοι και οι αλγοριθμικοί λόγοι στην Εικόνα 5.11.

Ratio (Degl(B2)_Degl(B3))	In_Ratio (Degl(B2)_Degl(B3))
Ratio (Degl(B2)_Degl(B4))	In_Ratio (Degl(B2)_Degl(B4))
Ratio (Degl(B3)_Degl(B4))	In_Ratio (Degl(B3)_Degl(B4))
Ratio (Kd(B2)_Kd(B3))	In_Ratio (Kd(B2)_Kd(B3))
Ratio (Kd(B2)_Kd(B4))	In_Ratio (Kd(B2)_Kd(B4))
Ratio (Kd(B3)_Kd(B4))	In_Ratio (Kd(B3)_Kd(B4))
Ratio (a(B2)_a(B3))	In_Ratio (a(B2)_a(B3))
Ratio (a(B2)_a(B4))	In_Ratio (a(B2)_a(B4))
Ratio (a(B3)_a(B4))	In_Ratio (a(B3)_a(B4))
Ratio (BB(B2)_BB(B3))	In_Ratio (BB(B2)_BB(B3))
Ratio (BB(B2)_BB(B4))	In_Ratio (BB(B2)_BB(B4))
Ratio (BB(B3)_BB(B4))	In_Ratio (BB(B3)_BB(B4))
Ratio (rrs(B2)_rrs(B3))	In_Ratio (rrs(B2)_rrs(B3))
Ratio (rrs(B2)_rrs(B4))	In_Ratio (rrs(B2)_rrs(B4))
Ratio (rrs(B3)_rrs(B4))	In_Ratio (rrs(B3)_rrs(B4))

Εικόνα 5.10. Λόγοι και αλγοριθμικοί λόγοι βιο-οπτικών παραμέτρων.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε συσχετισμός των κλάσεων, με τους λόγους και του αλγοριθμικούς λόγου των βιο-οπτικών παραμέτρων και τα διορθωμένα δεδομένα υδάτινης στήλης (DII). Συνεπώς, το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού είναι εικονοστοιχεία που αναφέρονται μόνο σε τιμές που εμπεριέχονται στην αντίστοιχη κλάση, ενώ οι μηδενικές τιμές είναι ουσιαστικά οι περιοχές που δεν εμπεριέχονται στην κλάση και μπορούν να δηλωθούν ως No Data Values.

5.4.2. Δειγματοληψία βαθών

Για τον υπολογισμό των βαθών, χρησιμοποιούνται ως δείγματα κάποια βάθη αναφοράς που συλλέχθηκαν με τον εξοπλισμό MBES. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως στο λογισμικό SNAP, διατίθεται προς χρήση ένας αλγόριθμος υπολογισμού βαθών, όπου ονομάζεται EmpiricalBathymetry Processor και βρίσκεται στη βιβλιοθήκη Sen2Coral.

Η χρήση του αλγορίθμου είναι αρκετά απλή, όπου ο χρήστης δηλώνει τα επιθυμητά κανάλια και ένα αρχείο τύπου CSV, το οποίο περιέχει την δειγματοληψία βαθών. Στην συγκεκριμένη μεθοδολογία, δεν χρησιμοποιήθηκε αυτός ο αλγόριθμος και όλες οι διαδικασίες εξαγωγής βαθυμετρίας πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα.

Το πλήθος των δειγμάτων που λήφθηκαν για όλες κλάσεις χωριστά είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το μέγεθος που καλύπτει η κλάση στην περιοχή μελέτης. Συνεπώς, μια κλάση που έχει πολύ μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με κάποια άλλη, έχει μεγαλύτερο πλήθος δειγμάτων. Αυτό θα εξυπηρετήσει στην σωστή βαθμονόμηση των βαθυμετρικών μοντέλων που θα προκύψουν. Συνεπώς, αποφασίστηκε να ληφθούν 50 δείγματα ανά 1 τετραγωνικό χιλιόμετρο. Έτσι, είναι δυνατή η εφαρμογή κάποιων φίλτρων, ώστε τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν καλύτερη γραμμικότητα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα δείγματα των βαθών, θα πρέπει να ανήκουν σε εικονοστοιχεία της μίας κλάσης.

Επειδή τα εικονοστοιχεία της κάθε κλάσης έχουν δυαδικές τιμές, θα πρέπει τα βάθη που θα επιλεγθούν να αναφέρονται σε τιμές 1 της αντίστοιχης κλάσης. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό QGIS, ώστε να απαλειφθούν οι μηδενικές τιμές, να δημιουργηθούν οι επιθυμητές μάσκες και στην συνέχεια να περικόπτουν τα σημειακά δεδομένα, στα όρια της κάθε μάσκας.

Υπολογίζοντας την έκταση της κάθε κλάσης, προσδιορίστηκε το πλήθος των δειγμάτων. Χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο τύπου Random Selection, επιλέχθηκαν τυχαία δείγματα, έπειτα εξάχθηκαν σε μορφή Shapefile και στην συνέχεια έγινε εισαγωγή αυτών στο λογισμικό SNAP. Έτσι, δημιουργήθηκαν όλα τα επιθυμητά δείγματα, ανά κλάση, όπου το κάθε δείγμα αναφέρεται σε τιμές κλάσεις και όχι σε μηδενικές τιμές.

5.4.3. Υπολογισμός Δορυφορικής Βαθυμετρίας

Για τον υπολογισμό της βαθυμετρίας, δημιουργήθηκαν όλα τα δυνατά γραφήματα διασποράς, ώστε να εντοπισθεί αυτό με την καλύτερη συσχέτιση/κατανομή, για κάθε κλάση χωριστά. Μάλιστα, στα γραφήματα περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα της διόρθωσης της υδάτινης στήλης (DII). Η δημιουργία των γραφημάτων διασποράς πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SNAP, επιλέγοντας την διαδικασία Correlative Plot. Μελετήθηκαν όλα τα γραφήματα της κάθε κλάσης και εντοπίστηκαν αυτά που παρουσιάζουν την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Αυτή η αξιολόγηση διενεργήθηκε, υπολογίζοντας τον συντελεστή R^2 . Για τον οποίο όσο μεγαλύτερη η τιμή του τόσο καλύτερη η συσχέτιση των δεδομένων.

Επειδή υπήρχε πληθώρα δειγμάτων για τα βάθη, ήταν δυνατή η εφαρμογή φίλτρων με σκοπό την καλύτερη κατανομή των σημείων. Έτσι, αφαιρέθηκαν κάποια δείγματα, τα οποία επηρέαζαν αρνητικά το συντελεστή R^2 . Στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζονται οι τελικές μαθηματικές εξισώσεις και τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της βαθυμετρίας.

Κλάσεις	R^2	Μαθηματική εξίσωση	x	Δείγματα
Ντακάρ, Σενεγάλη				
1	0.8546	$y = -62.687x + 52.038$	$\ln_Ratio_ (a(B2))_ (a(B3))$	79
2	0.8747	$y = 78.067x - 65.769$	$Ratio_ (Kd(B3))_ (Kd(B4))$	13
3	0.802	$y = 485.43x - 56.727$	$\ln_Ratio(BB(B3))_ (BB(B4))$	54
4	0.8621	$y = -45.141x - 110.34$	B3_B4_DII_SAND	17
Γκραν-Μπασάμ, Ακτή Ελεφαντοστού				
1	0.7584	$y = -71.397x + 30.371$	$\ln_Ratio (Kd(B2))_ Kd(B3))$	53

Πίνακας 5.1. Μαθηματικές εξισώσεις βαθυμετρίας

5.4.4. Στατιστική αξιολόγηση αποτελεσμάτων Βαθυμετρίας «RMSE»

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθυμετρίας με στατιστικές μεθόδους είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι για την ερμηνεία της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, χρειάζεται να προκύψουν οι τιμές σφάλματος που υπάρχουν, στα εξαχθέντα κανάλια βαθυμετρίας, λαμβάνοντας υπόψιν τα πραγματικά βάθη. Η Στατιστική αξιολόγηση μέσω της «Ρίζας του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος» (RMSE - Root Mean Square Error) είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί παρέχει μια συνολική μέτρηση της διαφοράς μεταξύ των υπολογισμένων και των προβλεπόμενων τιμών και επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των βαθυμετρικών δεδομένων.

Ο υπολογισμός του RMSE παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των σφαλμάτων και μπορεί να εντοπίσει συστηματικές αποκλίσεις ή τυχαία σφάλματα στις μετρήσεις. Έτσι, μπορούμε να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα των εμπειρικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των βαθών από πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα. Η χαμηλή τιμή του RMSE υποδεικνύει υψηλή ακρίβεια των βαθυμετρικών δεδομένων, ενώ υψηλή τιμή του RMSE υποδηλώνει μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Η τιμή του RMSE παρέχει μια σαφή και ποσοτική ένδειξη για το πόσο κοντά βρίσκονται οι υπολογιζόμενες τιμές βάθους στις πραγματικές τιμές. Έτσι, το RMSE είναι ένα κρίσιμο εργαλείο για την σύγκριση και την αξιολόγηση διαφορετικών μεθόδων βαθυμετρίας.

Εκτός από το RMSE, υπάρχουν διάφοροι άλλοι στατιστικοί δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ακρίβειας των βαθυμετρικών δεδομένων. Μερικοί από αυτούς περιλαμβάνουν:

- **Mean Absolute Deviation (MAD):** Η Μέση Απόλυτη Απόκλιση μετρά την μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών και είναι λιγότερο ευαίσθητη σε ακραίες τιμές σε σύγκριση με το RMSE

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \hat{z}_i| \quad \text{Εξίσωση (17)}$$

- **Mean Absolute Percentage Error (MAPE):** Το Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα μετρά την ακρίβεια σε ποσοστιαία βάση και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν οι τιμές των δεδομένων διαφέρουν σημαντικά κατά μέγεθος.

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{z_i - \hat{z}_i}{z_i} \right| \quad \text{Εξίσωση (18)}$$

- **Median Absolute Deviation (MedAD):** Η Μέση Απόλυτη Απόκλιση από τη νδιάμεσο, είναι πιο ανθεκτική σε ακραίες τιμές (outliers).

$$\text{MedAD} = \text{median}(|z_i - \hat{z}_i|) \quad \text{Εξίσωση (19)}$$

- **Mean Squared Error (MSE):** Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι παρόμοιο με το RMSE, αλλά χωρίς την τετραγωνική ρίζα, ενώ είναι επίσης ευαίσθητο σε μεγάλες αποκλίσεις.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2 \quad \text{Εξίσωση (20)}$$

- **Standard Deviation of Errors (SDE):** Η Τυπική Απόκλιση των Σφαλμάτων παρέχει πληροφορίες για την κατανομή των σφαλμάτων γύρω από την μέση τιμή τους.

$$\text{SDE} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left((z_i - \hat{z}_i) - (\bar{z} - \bar{\hat{z}}) \right)^2} \quad \text{Εξίσωση (21)}$$

Για την συγκεκριμένη στατιστική τεχνική, ο δείκτης RMSE αξιολογήθηκε ως αρκετός και επαρκής, ώστε να υπολογισθούν τα σφάλματα στον υπολογισμό της βαθμμετρίας. Σημειώνεται πως η εφαρμογή γίνεται ανά κλάση και όχι απευθείας σε όλο το εύρος της βαθμμετρίας, και στην συνέχεια ενοποιούνται και παρουσιάζονται ως μια ενιαία βαθμμετρία - χαρτοσύνθεση.

Για την εξαγωγή των τιμών, ώστε να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον Excel, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAP. Δημιουργώντας τα κατάλληλα διαγράμματα διασποράς, εξάχθηκαν οι τιμές των πραγματικών και των υπολογισμένων βαθμών. Έπειτα, εντοπίστηκαν οι τιμές οι οποίες παρουσιάζουν χονδροειδή σφάλμα και στην συνέχεια έγιναν φιλτραρίσματα. Αυτά τα σφάλμα μπορούν να οφείλονται σε διάφορους και πολλαπλούς λόγους, εξαιτίας των διορθώσεων και υπολογισμών που έχουν γίνει. Σε κάθε περίπτωση, αυτό επρόκειτο να τεκμηριωθεί στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων, για την καλύτερη ροή του αναγνώστη.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία φιλτραρίσματος, χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη εξίσωση, για όλες τις κλάσεις ξεχωριστά και τα αποτελέσματα του δείκτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Κλάσεις	RMSE	Κανάλι	Δείγματα
Ντακάρ, Σενεγάλη			
1	3.05	In_Ratio_(a(B2))_(a(B3))	59
2	3.65	Ratio_(Kd(B3))_(Kd(B4))	9
3	4.05	In_Ratio(BB(B3))_(BB(B4))	35
4	3.53	B3_B4_DII_SAND	18
Γκραν-Μπασάμ, Ακτή Ελεφαντοστού			
1	3.30	In_Ratio_(Kd(B2))_(Kd(B3))	72

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα RMSE

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και της πιστότητας τους (accuracy & precision) μπορεί να υλοποιηθούν αξιολογώντας τους επιθυμητούς στατιστικούς δείκτες και παρατηρώντας τα αποτελέσματα. Για την καλύτερη ερμηνεία τους, δημιουργήθηκαν κατάλληλες χαρτοσυνθέσεις, και οι οποίες εμπεριέχουν τις πληροφορίες των βαθών. Έτσι, η ορθή εξαγωγή των συμπερασμάτων μπορεί να βοηθηθεί από τις αντίστοιχες χαρτοσυνθέσεις.

6.1 – Δημιουργία χαρτοσυνθέσεων

Το πλήθος των χαρτών που δημιουργήθηκαν, είναι στο σύνολο τους έξι. Πρακτικά, τρεις χαρτοσυνθέσεις αφορούν την περιοχή του Ντακάρ και οι άλλες τρεις την περιοχή του Γκραν-Μπασάμ. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης, τόσο των ηχοβολιστικών, όσο και των δορυφορικών συστημάτων. Οι χάρτες αυτοί διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ερμηνεία και σύγκριση των αποτελεσμάτων της έρευνας, καθώς η απεικόνιση των δεδομένων βαθυμετρίας και ταξινόμησης επιτρέπουν την οπτική ανάλυση των διαφορών και ομοιοτήτων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης.

Όλοι οι χάρτες εμπεριέχουν τα απαραίτητα στοιχεία της χαρτοσύνθεσης, ώστε να γίνουν αντιληπτά στον αναγνώστη τα ακριβή αποτελέσματα που προκύψανε. Μάλιστα, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι συμβολισμοί, για την ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων ώστε να διασφαλιστεί ότι οι αναγνώστες μπορούν να τα κατανοήσουν με ακρίβεια, διευκολύνοντας έτσι την σύγκριση των δεδομένων μεταξύ ηχοβολιστικών και δορυφορικών συστημάτων. Τα αποτελέσματα των χαρτοσυνθέσεων, παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1 & 2.

6.2 – Σύγκριση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Εκ πρώτης όψεως, είναι φανερό πως τα αποτελέσματα των δορυφορικών μεθόδων δεν ταυτίζονται πλήρως με τα αποτελέσματα των ηχοβολιστικών τεχνικών. Αυτό είναι απολύτως λογικό και οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπου θα συζητηθούν μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Μάλιστα, αν υπήρχε πλήρης ταύτιση, αυτό θα προκαλούσε προβληματισμούς και ανησυχίες ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Χρησιμοποιώντας τους χάρτες που εξάχθηκαν, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απλουστεύεται. Η πρώτη διαφοροποίηση που παρατηρείται, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι πως τα δορυφορικά συστήματα δεν κατάφεραν να εντοπίσουν το ίδιο πλήθος ιζημάτων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των ηχοβολιστικών μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα SSS (Side Scan Sonar) εντόπισαν τρία διαφορετικά ιζήματα στην περιοχή του Ντακάρ της Σενεγάλης, ενώ οι δορυφορικές τεχνικές ταξινόμησης εντόπισαν τέσσερα. Σχετικά με την περιοχή Γκραν-Μπασάμ, στην Ακτή Ελεφαντοστού τα συστήματα SSS εντόπισαν δύο ιζήματα, ενώ η δορυφορική μεθοδολογία ταξινόμησης εντόπισε μόνο ένα ίζημα.

Μάλιστα, στην αποτύπωση της περιοχής του Ντακάρ, η δορυφορική ταξινόμηση του πυθμένα δεν σχετίζεται καθόλου με την «πραγματική» ταξινόμηση. Συνεπώς, η ανάλυση με βάση τα δορυφορικά δεδομένα δεν κατάφερε να προσδιορίσει τα είδη των ιζημάτων και γι' αυτό δεν τους δόθηκε κάποιος χαρακτηρισμός. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρέασε αυτά τα αποτελέσματα, ήταν η ιδιαιτερότητα που πυθμένα. Η κατανομή των ιζημάτων στα αποτελέσματα των SSS δεν είναι ομοιόμορφη. Επίσης, το ίζημα της υπο-βραχώδης περιοχής στην περιοχή του Ντακάρ αναφέρεται σε βραχώδη περιοχή μαζί με την ύπαρξη άμμου. Συνεπώς, η αναφορά του πυθμένα για αυτές τις περιοχές, αναφέρεται σε δύο εντελώς διαφορετικά ιζήματα, όπου ομαδοποιήθηκαν. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην δορυφορική ταξινόμηση, διότι την υπο-βραχώδη περιοχή ο δορυφόρος την αντιλαμβάνεται σαν δύο διαφορετικά ιζήματα. Αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση της ποσότητας της ανακλώμενης ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος. Έτσι, στην συγκεκριμένη περιοχή, ο δορυφόρος ενδεχομένως κατάφερε να ξεχωρίσει αυτά τα ιζήματα λόγω του διαφορετικού πλήθους ιζημάτων.

Μάλιστα, παρατηρείται πως κατάφερε να εντοπίσει ιζήματα στα ρηχά ύδατα που αντιστοιχούν σε υπο-βραχώδη και βραχώδη περιοχή, με βάση τα αποτελέσματα των SSS. Επιπροσθέτως, μετά τα δεκαπέντε μέτρα βάθος, παρατηρείται πως στην δορυφορική ταξινόμηση δεν υπάρχει κάποια ακρίβεια στα αποτελέσματα. Αυτό είναι απολύτως λογικό, διότι σε τέτοια βάθη είναι πολύ δύσκολο να παρθεί κάποια πληροφορία του πυθμένα. Πρακτικά, η ακτινοβολία που ταξιδεύει στην ατμόσφαιρα, εισέρχεται στην θάλασσα, δεν καταφέρνει να ανακλαστεί στον πυθμένα και η καταγραφή της από τα καταγραφικά συστήματα δεν πραγματοποιείται. Συνεπώς, δεν παρέχεται καμία πληροφορία ανακλαστικότητας του πυθμένα σε μεγάλα βάθη, σε όλο το εύρος τους φάσματος. Φυσικά, αυτό το φαινόμενο δεν επηρεάζει μόνο την ταξινόμηση του πυθμένα, αλλά και την εκτίμηση του βάθους με μεθόδους Τηλεπισκόπησης.

Στα αποτελέσματα της περιοχής του Γκραν-Μπασάμ της Ακτής Ελεφαντοστού, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος τηλεπισκοπικής ταξινόμησης εντόπισε μόνο ένα ίζημα, και αυτό συνέβη διότι τα δείγματα που είχαν παρθεί για τη δημιουργία εξισώσεων, ώστε να προκύψουν τα τελικά ιζήματα, αφορούσαν μόνο το ίζημα της αμμώδους περιοχής. Υπενθυμίζεται πως αυτό έγινε επειδή τα δείγματα που πάρθηκαν ήταν αυστηρά μέχρι δεκαπέντε μέτρα, ώστε να αναφέρονται σε ανακλάσεις του πυθμένα. Επειδή ο άργιλος εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη, δεν πάρθηκαν κάποια δείγματα για την ταξινόμηση, διότι δεν υπάρχει η πληροφορία του πυθμένα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως για την περιοχή του Γκραν-Μπασάμ τα αποτελέσματα των δορυφορικών μεθόδων συμφωνούν με τα ηχοβολιστικά αποτελέσματα. Αυτό γίνεται επειδή προέκυψε μόνο μια εξίσωση ταξινόμησης, άρα ένα ίζημα, όπου πράγματι τα δείγματα που πάρθηκαν αφορούν μόνο ένα ίζημα. Επίσης, η ταξινόμηση που προέκυψε έχει πολύ καλή ακρίβεια εκτίμησης της αμμώδους περιοχής η οποία αρχίζει να γίνεται πιο αραιή περίπου στα 30 μέτρα βάθους, όπου πράγματι μετά από αυτά τα βάθη υπάρχει το ίζημα του αργίλου αλλά δεν γινόταν να εντοπιστεί δορυφορικά. Για λόγους πειραματισμού, θα είχε ενδιαφέρον αν είχαν παρθεί δείγματα αργίλου ώστε να διαπιστωθεί εάν μετά τα τριάντα μέτρα βάθος είναι δυνατός ο εντοπισμός του ιζήματος. Συμπερασματικά, τα δορυφορικά συστήματα, κατάφεραν να κάνουν εκτίμηση των ιζημάτων του πυθμένα με αρκετά καλή ακρίβεια στα ρηχά βάθη.

Όσον αφορά την δορυφορική βαθυμετρία, η εκτίμηση του βάθους έχει διάφορα εύρη. Από τις χαρτοσυνθέσεις που δημιουργήθηκαν, δεν είναι εύκολα αντιληπτή η ποιότητα των αποτελεσμάτων, όμως είναι διακριτό πως τα μικρά βάθη εμφανίζονται μόνο στις παράκτιες περιοχές. Μάλιστα, οι ισοβαθείς που υπολογίστηκαν από τα συστήματα MBES συμφωνούν με αρκετά βάθη των δορυφορικών βαθυμετρικών υπολογισμών. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκαν οι στατιστικοί δείκτες RMSE, όπου μαρτυρούν τα σφάλματα που υπάρχουν στους υπολογισμούς.

Τα σφάλματα ή τα υπολειπόμενα σφάλματα «Residuals», υπάρχουν για διάφορους παράγοντες. Αρχικά, για τον υπολογισμό δορυφορικής βαθυμετρίας, πάρθηκαν δείγματα ακόμα και από μεγάλα βάθη, έως και τα πενήντα μέτρα. Συνεπώς, τα μοντέλα της βαθυμετρίας, βαθμονομήθηκαν με δείγματα όπου δεν υπάρχει κάποια πληροφορία του πυθμένα και εισάγεται ένα σφάλμα σε αυτά τα μοντέλα που επηρεάζει την τιμή RMSE και την συνολική εκτίμηση του βάθους. Για την βελτίωση των αποτελεσμάτων, μια πιο μικρή περιοχή μελέτης, η οποία μπορεί να παρέχει πληροφορίες του πυθμένα, θα βοηθούσε στην καλύτερη εκτίμηση των βαθών.

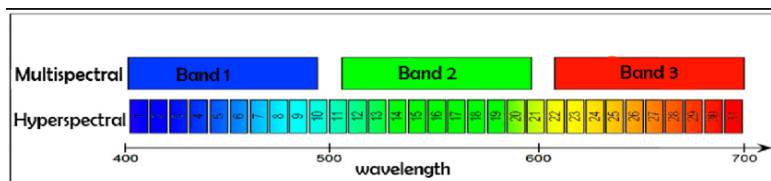
Τα υπολειπόμενα σφάλματα «Residuals», ήταν παρόντα κατά την υλοποίηση του κάθε υπολογισμού, διότι καμία μέθοδος αποθάμβωσης και διόρθωσης υδάτινης στήλης δεν παρέχει μηδενικό σφάλμα. Όλες οι μέθοδοι διόρθωσης υδάτινης στήλης και αποθάμβωσης στα δεδομένα είναι εκτιμήσεις. Μάλιστα, υπάρχουν επιπλέον μέθοδοι αποθάμβωσης διόρθωσης υδάτινης στήλης, και διαφορετικοί αλγόριθμοι θα επηρέαζαν το αποτέλεσμα με διαφορετικό τρόπο, είτε θετικά είτε αρνητικά. Συνεπώς, η αποφυγή των Residual είναι αναπόφευκτη, δίχως να είναι γνωστό το πόσο μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Ενδεχομένως, σε κάποιες άλλες περιοχές μελέτες, τα υπολειπόμενα σφάλματα να ήταν πιο μικρά.

Το ίδιο φαινόμενο ισχύει και στις βιο-οπτικές παραμέτρους που υπολογίστηκαν καθώς η κάθε παράμετρος έχει το δικό της σφάλμα, όπου στο τέλος όλα αυτά τα σφάλματα αθροίζονται. Έτσι, επηρεάζεται τόσο η εκτίμηση του βάθους, όσο και η δορυφορική ταξινόμηση. Σε κάθε περίπτωση, θα υπήρχε διαφοροποίηση στα αποτελέσματα, σε περίπτωση όπου είχε χρησιμοποιηθεί άλλη μεθοδολογία, δίχως να είναι γνωστό «εξ αρχής» αν το αποτέλεσμα θα ήταν καλύτερο ή όχι. Σε κάθε περιοχή και σε κάθε τύπο υδάτων, τα σφάλματα μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους, και ενδεχομένως να χρειάζονται αρκετές δοκιμές ώστε να επιλεγθεί ο αλγόριθμος με τα μικρότερα σφάλματα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως σφάλματα υπάρχουν ακόμη και στην διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, συμπεριλαμβανομένου της ραδιομετρικής και γεωμετρικής διόρθωσης. Παρ' όλο που τα πολυφασματικά δεδομένα λήφθηκαν ατμοσφαιρικά διορθωμένα, όπου έχει χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Sen2Cor από την ESA, τα Residuals δεν είναι ανύπαρκτα. Μάλιστα, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μια θολούρα στα δεδομένα, η οποία φανερώνει αυτά τα σφάλματα. Φυσικά, υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι ατμοσφαιρικής διόρθωσης, όπου κανένας δεν έχει χαρακτηριστεί ως ο πιο αξιόπιστος, όπως είναι ο αλγόριθμος FLAASH. Συνεπώς, η αποφυγή αυτών των σφαλμάτων, είναι επίσης αναπόφευκτη.

Επιπροσθέτως, η χωρική ανάλυση των δεδομένων Sentinel 2 μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην ταξινόμηση και στην εκτίμηση του βάθους. Συνεπώς, μπορεί να απαιτείται μια καλύτερη χωρικής ανάλυση, δηλαδή μικρότερη των δέκα μέτρων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως το κάθε εικονοστοιχείο, αντιστοιχεί σε έκταση 100 τετραγωνικών μέτρων και μπορεί σε αυτή την έκταση να υπάρχουν δύο ίζηματα τα οποία ο δορυφόρος αδυνατεί να καταγράψει. Έτσι, η εκτίμηση που θα κάνει, μπορεί να βασίζεται σε ένα ίζημα και όχι σε δύο.

Πέρα από την χωρική ανάλυση, σημαντικές πληροφορίες χάνονται λόγω της μειωμένης φασματικής ανάλυσης η οποία ορίζεται από το πλήθος των καναλιών που καταγράφονται σε όλο το μήκος κύματος. Πρακτικά, οι δορυφόροι Sentinel 2 καταγράφουν μόνο τρία κανάλια στο ορατό φάσμα, ενώ υπάρχουν υπερ-φασματικοί δορυφόροι όπως είναι ο Γερμανικός δορυφόρος EnMAP που είναι σε θέση να καταγράψουν πολλά κανάλια στο ορατό φάσμα (Εικόνα 6.1). Συνεπώς, μια υπερ-φασματική δορυφορική εικόνα, μπορεί να παρέχει λεπτομερέστετες πληροφορίες, βελτιώνοντας δραματικά την εκτίμηση της βαθυμετρίας και της ταξινόμησης του πυθμένα.



Εικόνα 6.1, Ενδεικτική φασματική ανάλυση πολυφασματικών και υπερ-φασματικών δορυφόρων.

Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι οι καιρικές συνθήκες των δύο περιοχών κατά την καταγραφή των πολυφασματικών δεδομένων. Οι κυματισμοί που δημιουργούνται εξαιτίας ισχυρών ανέμων εμποδίζουν την παροχή πληροφοριών του πυθμένα. Δυστυχώς, είναι άγνωστες οι καιρικές συνθήκες των περιοχών, πόσο μάλλον τα ύψη των κυμάτων, που όντως διακρίνονται στα δορυφορικά δεδομένα. Σαφέστατα, οι βροχοπτώσεις μπορούν επίσης να εισάγουν σφάλματα στις εκτιμήσεις, μεταφέροντας ιζήματα από τις ακτές προς την θάλασσα. Επιπλέον, σε περίπτωση κακών καιρικών συνθηκών, τα ιζήματα στην θάλασσα ανακατεύονται μεταξύ τους, προκαλώντας τους κόκκους της άμμου να αιωρούνται στην θάλασσα. Αυτό το γεγονός εισάγει πολύ μεγάλο σφάλμα, διότι οι δορυφορικές τεχνικές δεν θα καταφέρουν να εντοπίσουν τα ακριβή ιζήματα και βάθη. Έτσι, λόγω των καιρικών συνθηκών τα δορυφορικά συστήματα καταγράφουν τα αιωρούμενα σωματίδια αντί τον πυθμένα της θάλασσας.

Πέρα από τα σφάλματα των δορυφορικών δεδομένων, όπου παρατηρείται επιπρόσθετος θόρυβος, κρίσιμο ρόλο έχει και ο τύπος των υδάτων. Επειδή δεν υφίσταται η ανάλυση υδάτινων δειγμάτων από τις περιοχές μελέτης, ώστε να προσδιοριστεί ο τύπος των υδάτων, αυτός ο παράγοντας είναι άγνωστος. Οι δύο βασικές κατηγορίες υδάτων είναι τα θολά και καθαρά ύδατα. Τα καθαρά νερά επιτρέπουν μεγαλύτερη διείσδυση του φωτός, καθιστώντας ευκολότερη την ανίχνευση του πυθμένα. Αυτό είναι ευεργετικό για τον υπολογισμό των βαθών και την ανίχνευση των ιζημάτων. Αντίθετα, τα θολά νερά, λόγω της ύπαρξης σωματιδίων ή άλλων ρύπων, απορροφούν και διασκορπίζουν το φως, καθιστώντας πιο δύσκολη την αποτύπωση του πυθμένα. Το νερό απορροφά και διασκορπίζει το φως με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την σύστασή του.

Η παρουσία διαφορετικών ειδών φυτοπλαγκτόν και αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να αλλάξει τα φασματικά χαρακτηριστικά του νερού, δυσκολεύοντας την διάκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων ιζημάτων στον πυθμένα. Μάλιστα, συμπεραίνεται πως τα ύδατα των περιοχών μελέτης δεν ήταν καθαρά. Το συμπέρασμα αυτό, βασίζεται στην αδυναμία των αλγόριθμων επιβλεπόμενης ταξινόμησης KNN και RF καθώς δεν είχαν κάποια σχέση με την πραγματική αποτύπωση, και επομένως θεωρείται πως η ποιότητα των υδάτων δεν ήταν καλή. Αυτό το ενδεχόμενο είναι πολύ αναμενόμενο, επειδή οι περιοχές μελέτης ανήκουν σε υποτροπικές περιοχές με πολλές περιόδους βροχοπτώσεων.

Επιπλέον, οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να προκαλέσουν κυματισμούς, όπου με την σειρά τους προκαλούν ανατάραξη στην επιφάνεια της θάλασσας, δημιουργώντας φυσαλίδες αέρα που μπορούν να συνενωθούν και να σχηματίσουν αφρό στην επιφάνεια της θάλασσας. Η παρουσία ρύπων από βιομηχανικές και αστικές περιοχές, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του αφρού στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι φυσαλίδες και ο αφρός αυξάνουν την αντανάκλαση του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της θάλασσας, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει θόρυβο στα δορυφορικά δεδομένα, καθιστώντας δύσκολη την ακριβή μέτρηση του βάθους.

Μάλιστα, οι φυσαλίδες και ο αφρός μπορούν να διασκορπίζουν και να απορροφήσουν το φως, μειώνοντας την ποσότητα του φωτός που φτάνει στον πυθμένα. Αυτό περιορίζει την ικανότητα των δορυφορικών αισθητήρων να ανιχνεύσουν και να καταγράψουν πληροφορίες για τον πυθμένα και τα ιζήματα. Συμπερασματικά, μπορούν να αλλοιωθούν τα φασματικά χαρακτηριστικά που καταγράφονται από τους δορυφορικούς αισθητήρες και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά την ταξινόμηση του πυθμένα και την αναγνώριση των ιζημάτων.

Τελικός παράγοντας σφαλμάτων, είναι η άγνωστη ακρίβεια των αποτελεσμάτων SSS & MBES που μπορούν να επηρεάσουν τα συγκριτικά αποτελέσματα, ανάλογα με την βαθμονόμηση των συστημάτων. Επίσης, στα ρηχά ύδατα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά ηχοβολιστικά συστήματα, σε σχέση με τα πιο βαθιά ύδατα. Ενδεχομένως, να εισαχθεί σφάλμα στις περιοχές επικάλυψής των διαφορετικών συστημάτων, επηρεάζοντας την ταξινόμηση και την βαθυμετρία. Σε κάθε περίπτωση, αξιολογήθηκαν ως αξιόπιστα δεδομένα και χρησιμοποιήθηκαν για λόγους σύγκρισης τηλεπισκοπικών μεθόδων.

6.3 – Σύνοψη και Προτάσεις

Οι δορυφορικές μέθοδοι και οι ηχοβολιστικές τεχνικές δεν αποδίδουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα λόγω διαφόρων παραγόντων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι δορυφορικές τεχνικές μπορούν να εντοπίσουν περισσότερα ιζήματα σε ορισμένες περιοχές, ενώ σε άλλες είναι λιγότερο αποτελεσματικές. Οι δορυφόροι μπορούν να διακρίνουν διαφορετικά ιζήματα λόγω των διακυμάνσεων στην ανακλαστικότητα, ιδιαίτερα σε ρηγά νερά, αλλά παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια σε μεγαλύτερα βάθη λόγω των περιορισμών στην αντανάκλαση της ακτινοβολίας.

Τα αποτελέσματα της δορυφορικής βαθυμετρίας συγκρίθηκαν με αυτά των ηχοβολιστικών συστημάτων MBES, και παρόλο που υπάρχουν σφάλματα λόγω διαφόρων παραγόντων όπως η βαθμονόμηση και η ποιότητα των υδάτων, τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα για συγκρίσεις. Η χωρική και φασματική ανάλυση των δεδομένων επηρεάζει επίσης τα αποτελέσματα, με τις πολυφασματικές εικόνες να παρουσιάζουν περιορισμούς σε σύγκριση με τις υπερ-φασματικές. Οι καιρικές συνθήκες, οι κυματισμοί και η ποιότητα των υδάτων επίσης επηρεάζουν τα αποτελέσματα, καθώς οι φυσαλίδες και ο αφρός στη θάλασσα μπορούν να αλλοιώσουν τα δεδομένα και να δυσκολέψουν την ανίχνευση του πυθμένα.

Παρά τα σφάλματα και τους περιορισμούς, τα δορυφορικά συστήματα παρείχαν αρκετά καλή ακρίβεια στα ρηγά βάθη της τάξης των $\pm 3-4$ μέτρων μέχρι τα 15 μέτρα βάθους σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ηχοβολιστικές μεθόδους. Οι μετεωρολογικές συνθήκες κατά την καταγραφή των δεδομένων είναι ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει σφάλματα. Ισχυροί άνεμοι, κυματισμοί και βροχοπτώσεις μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των δεδομένων, δημιουργώντας θόρυβο και καθιστώντας δύσκολη την ακριβή μέτρηση του βάθους και την ανίχνευση των ιζημάτων. Οι συνθήκες του νερού, όπως η θολότητα και η ύπαρξη φυτοπλαγκτόν ή αιωρούμενων σωματιδίων, επηρεάζουν επίσης τα αποτελέσματα. Τα θολά νερά απορροφούν και διασκορπίζουν το φως, καθιστώντας πιο δύσκολη την ανίχνευση του πυθμένα σε σύγκριση με τα καθαρά νερά, τα οποία επιτρέπουν μεγαλύτερη διείσδυση του φωτός.

Ολοκληρώνοντας την σύνοψη, τα σφάλματα στα αποτελέσματα των ηχοβολιστικών συστημάτων SSS και MBES μπορεί να επηρεαστούν από την βαθμονόμηση των συστημάτων και τις περιοχές επικάλυψης των διαφορετικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε ρηγά και βαθιά νερά. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα θεωρήθηκαν αξιόπιστα για την σύγκριση με δορυφορικές μεθόδους.

Σε περίπτωση όπου στην συγκεκριμένη διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία ήταν επιθυμητή η εμβάθυνση στο κομμάτι βελτίωσης των αποτελεσμάτων, θα ήταν δυνατόν να υλοποιηθούν επιπλέον αλγόριθμοι. Οι διαφορετικοί αλγόριθμοι και οι περαιτέρω δοκιμές, αφορούν τόσο την ατμοσφαιρική διόρθωση, όσο και τους υπολογισμούς των αποθαμβωμένων καναλιών, την διόρθωση της υδάτινης στήλης και εναλλακτικών υπολογισμού βαθών/ταξινόμησης, πέρα από τις βιο-οπτικές παραμέτρους. Έτσι, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σύγκριση των διαφόρων αποτελεσμάτων, ώστε να εντοπισθούν οι αλγόριθμοι που προσδίδουν μικρότερα σφάλματα.

Επιπρόσθετα, η χρήση νέων δορυφορικών συστημάτων, ενδεχομένως να παρήγαγαν διαφορετικά αποτελέσματα, λόγω του διαφορετικού τύπου αισθητήρων. Φυσικά, σε περίπτωση όπου υπήρχαν διαθέσιμα υπερ-φασματικά δεδομένα, αναμένεται πως τα αποτελέσματα θα ήταν πιο κοντά στην πραγματικότητα. Αναφέρεται πως υπάρχουν μεθοδολογίες για εφαρμογές υδάτων, οι οποίες χρησιμοποιούν δεδομένα ραντάρ, όπως είναι οι αισθητήρες Synthetic-Aperture Radar (SAR). Τα ραντάρ είναι ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και μπορούν να διεισδύσουν σε σύννεφα και βροχή, δίνοντας πιο σταθερά αποτελέσματα ανεξάρτητα από τις συνθήκες του καιρού. Συνεπώς, σε περιοχές με κακές καιρικές συνθήκες και θολά νερά, ενδεχομένως τα δεδομένα ραντάρ να είναι σε θέση να προσφέρουν μια λύση.

Μια επιπλέον τεχνική, η οποία εξυπηρετεί στην βελτίωση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την δορυφορική βαθυμετρία, είναι να εντοπισθούν τα εικονοστοιχεία με χονδροειδή σφάλματα και να αφαιρεθούν. Με αυτόν τον τρόπο, οι στατιστικοί δείκτες θα είχαν βελτιωμένες τιμές, αποδεικνύοντας καλύτερη πιστότητα στα δεδομένα. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι τεχνικές και οι μεθοδολογίες εισάγουν σφάλμα στα αποτελέσματα, καθώς ακόμα εξελίσσεται ο κλάδος της Τηλεπισκόπησης, ανακαλύπτοντας νέες τεχνολογίες και μεθόδους επεξεργασίας, διόρθωσης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

Annapolis, Md. : Naval Institute Press (1990). Combat fleets of the world 1990/91 : their ships, aircraft, and armament, Σελίδα 916

Buongiorno Nardelli, B. (2020). A Deep Learning Network to Retrieve Ocean Hydrographic Profiles from Combined Satellite and In Situ Measurements. Remote Sensing, 12(19), 3151

ESA. (2023). Sentinel-2. Ανακτήθηκε από https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2

European Commission. (2023). Copernicus. Ανακτήθηκε από <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>

Fretwell, P., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G., Bamber, J. L., Barrand, N. E., Bell, R., ... & De Rydt, J. (2014). Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. The Cryosphere, 7(1), 375-393.

Gagolewski, M. (2022). Data Fusion: Theory, Methods, and Applications. Institute of Computer Science, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland.

Geoscience Australia (2022). Marine Geoscience in action: a search for green doughnuts, Διαθέσιμο στο: Marine Geoscience in action: a search for green doughnuts | Geoscience Australia (ga.gov.au)

Hedley, J.; Harborne, A.; Mumby, P. Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow-Water Benthos. Int. J. Remote Sens. 2005, 26, 2107-2112.

IEEE - Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023. "Direct Measurement of Underwater Sound Velocity via Dual-Comb System and Matched Filtering Algorithm

IHO - International Hydrographic Organization (2005). MANUAL ON HYDROGRAPHY

IHO - International Hydrographic Organization (2015). "Sound Velocity Profile (SVP) Inversion Through Correcting The Terrain Distortion". International Hydrographic Review, May 2015

IHO - International Hydrographic Organization. (2005). MANUAL ON HYDROGRAPHY

Ivonne Radjawane, Lufti Ranga (2022). SEABED COVERAGE CLASSIFICATION USING LIDAR BATHYMETRY

Jahnke, R. A., and L. H. Knight. 1997. A gravity-driven, hydraulically-damped multiple piston corer for sampling fine-grained sediments. Deep-Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap. 44: 713–718.

Jensen, J. R. (2016). Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Pearson.

John Perry Fish, Arnold Carr (1990). Sound Underwater Images: A Guide to the Generation and Interpretation of Side Scan Sonar Data.

Kay, S., Hedley, J.D., & Lavender, S. (2009). Sun glint correction of high and low spatial resolution. *Remote Sensing*, 1, 697-730. <https://doi.org/10.3390/rs1040697>

Kelleher, C., & Wagener, T. (2011). Ten guidelines for effective data visualization in scientific publications. *Environmental Modelling & Software*, 26(6), 822-827.

Kim UJ, Kim HY, Alvarez D, Lee IS, Oh JE (2014) Using SPMDs for monitoring hydrophobic organic compounds in urban river water in Korea compared with using conventional water grab samples. *Sci Total Environ* 470:1537–1544.

Kordella, S. (2020). Optimal sidescan sonar and subbottom profiler surveying of ancient wrecks: The 'Fiskardo' wreck, Kefallinia Island, Ionian Sea

Lee, Z.P., Carder, K.L., & Arnone, R.A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(27), 5755-5772.

Lim J. , Pilesjö P. (2022). Triangulated Irregular Network (TIN) Models. *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (2nd Quarter 2022 Edition)*.

Lurton, X. (2010). *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media.

Lyzenga, D. R. (1985). Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 115-125

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.

Mather, P. M., & Koch, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley & Sons.

Mavraeidopoulos, A. (2022). Waters remote sensing and bathymetry extraction. *Kallipos*, Open Academic Editions. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-66>, p. 24.

Medwin, H., & Clay, C. S. (1998). *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic press.

Mouw, C. B., Greb, S., Aurin, D., DiGiacomo, P. M., Lee, Z., Twardowski, M., ... & Yu, X. (2015). Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 160, 15-30.

NOAA Ocean Exploration. (2023). *Exploration Tools: Magnetometer*. Διαθέσιμο στο: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/magnetometer/magnetometer.html>

Pohl, C., & Van Genderen, J. L. (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International journal of remote sensing*, 19(5), 823-854

Pugh, D. (2004). *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press.

Richards, J. A. (2022). Clustering and Unsupervised Classification. In: *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6_9

Samui, P., & Kim, D. (2021). *Modeling in Geotechnical Engineering*. Elsevier

Seacoast Online. (2023). Newington's SubCom a worldwide provider of undersea fiber optic systems. Διαθέσιμο στο: <https://eu.fosters.com/story/business/2020/08/16/newingtons-subcom-worldwide-provider-of-undersea-fiber-optic-systems/1086482007/>

Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1part2), 547-556.

Sundararajan, N., Eshagh, M., Saibi, H., Meghraoui, M., Al-Garni, M., & Giroux, B. (2019). On Significant Applications of Geophysical Methods: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), Tunisia 2018. Springer.

Teixeira, J. C., Lopes, A. M., Dias, J. M., Cardoso, A. C., & Silva, J. C. (2013). Bathymetry estimation using fuzzy logic and multi-spectral satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(6), 2077-2093.

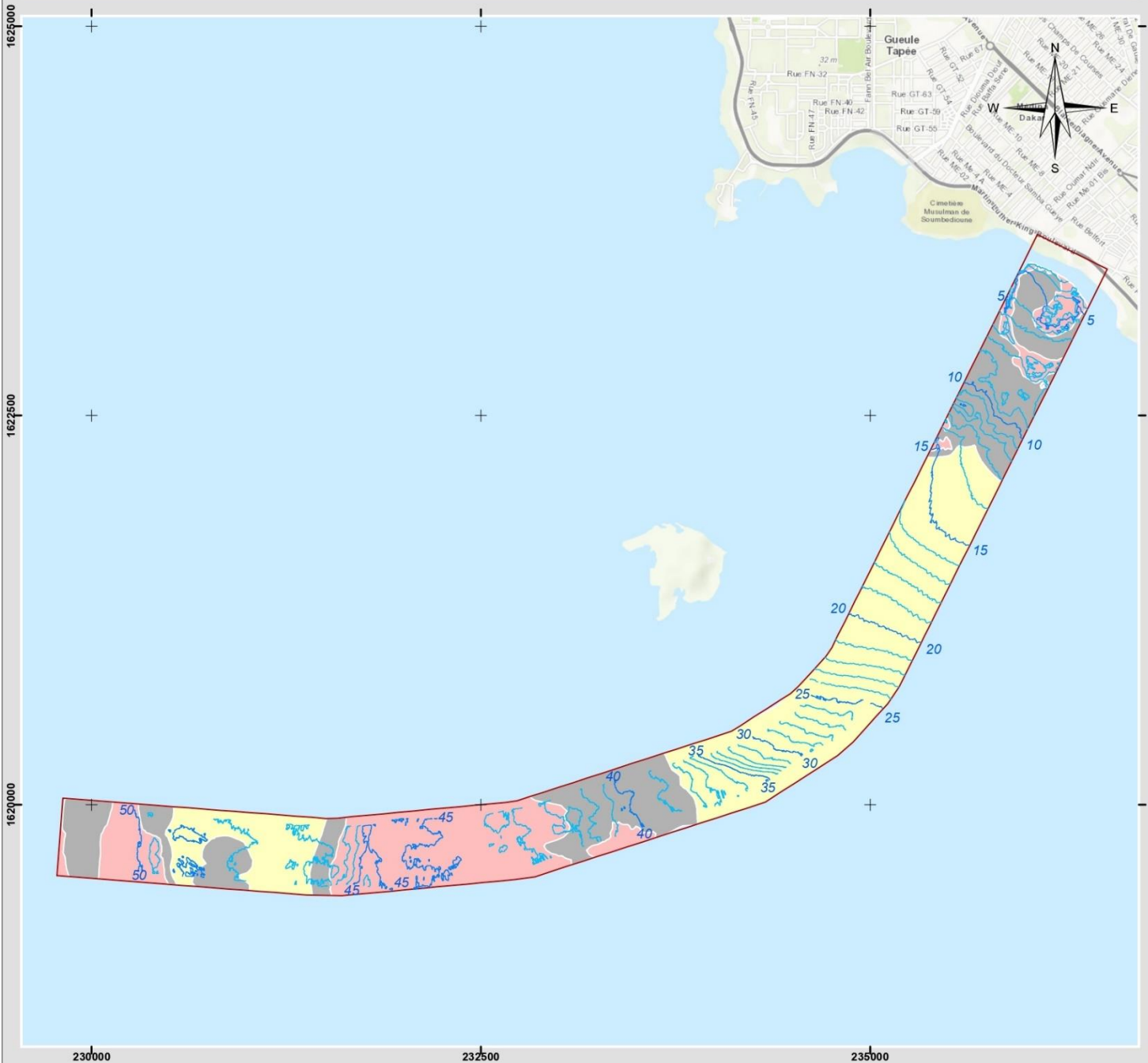
Wang Y, Chen M, Xi X, Yang H. 2023. Bathymetry Inversion Using Attention-Based Band Optimization Model for Hyperspectral or Multispectral Satellite Imagery. *Water*. 2023; 15(18):3205. <https://doi.org/10.3390/w15183205>

Zhang, Y. (2010). Understanding image fusion. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 70(6), 657-661.

Ziyin Wu, Fanlin Yang, Yong Tang (2020). Overview of Bathymetric Surveying Technology. *High-resolution Seafloor Survey and Applications*.

Παράρτημα 1 – Χαρτοσυνθέσεις της περιοχής Ντακάρ, Σενεγάλης

Βαθυμετρία και Ταξινόμηση του πυθμένα με τη χρήση συστημάτων SSS & MBES, για την περιοχή του Ντακάρ, Σενεγάλης



Υπόμνημα

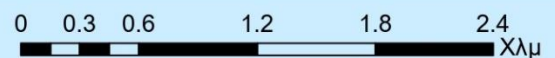
- Περιοχή Μελέτης
- Ενδιάμεση Ισοβαθής
- Κυρία Ισοβαθής
- Βραχώδης
- Αμμώδης
- Υπο-βραχώδης

Περιοχή Μελέτης

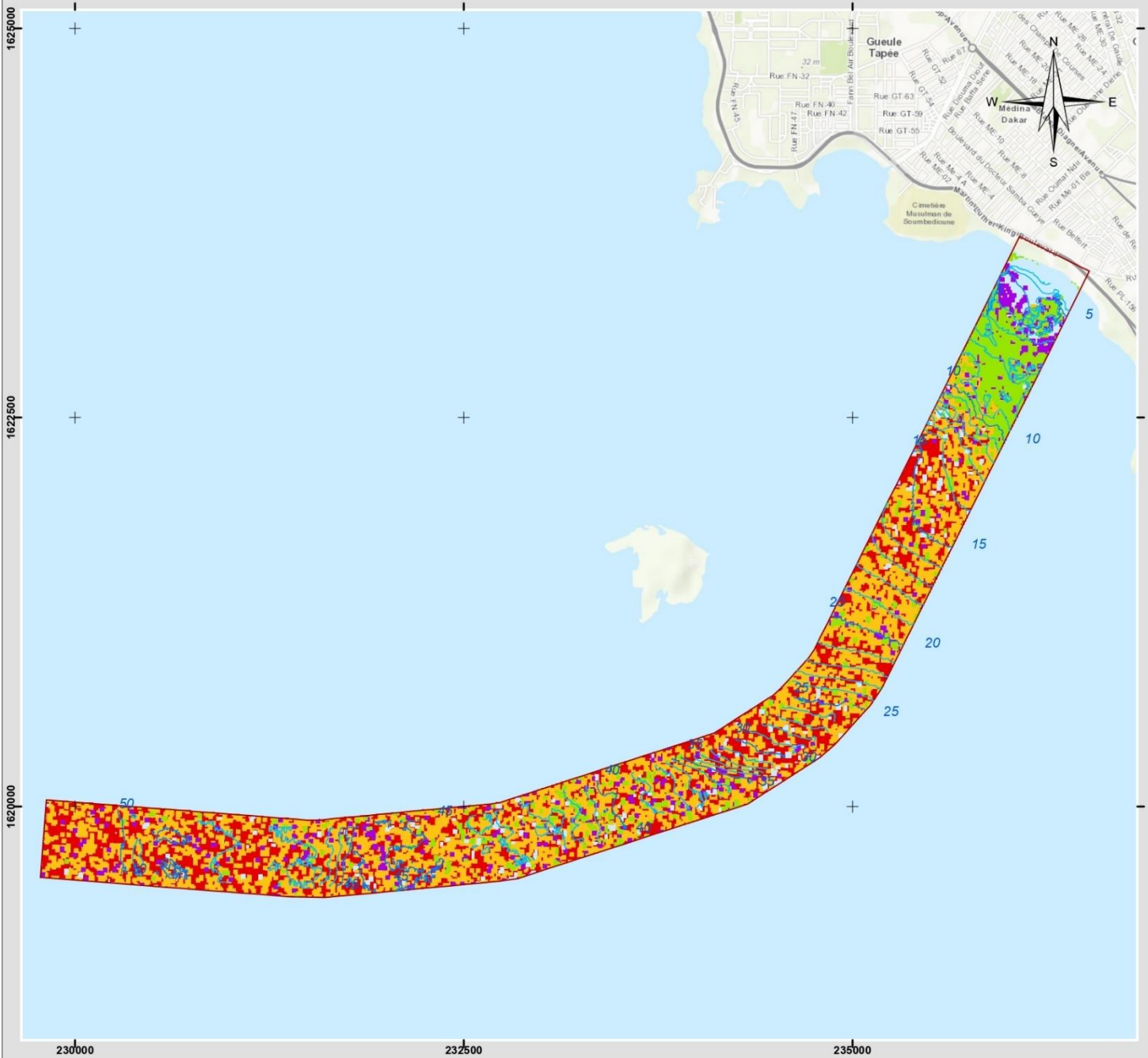


Στοιχεία Σύνταξης

Όνομ/νυμο Συντάκτη: Βασίλειος Καστανίδης
Ημ. Σύνταξης: 06/06/2024
Τοποθεσία Σύνταξης: Αθήνα
Σύστημα Συντεταγμένων: UTM 28N



Ταξινόμηση του πυθμένα με τη χρήση Τηλεπισκοπικών μεθόδων για την περιοχή του Ντακάρ, Σενεγάλης



Υπόμνημα

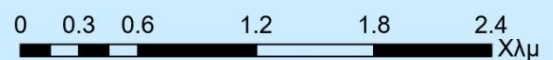
- Περιοχή Μελέτης
- Ενδιάμεση Ισοβαθής
- Κυρία Ισοβαθής
- Κλάση 1
- Κλάση 2
- Κλάση 3
- Κλάση 4

Περιοχή Μελέτης

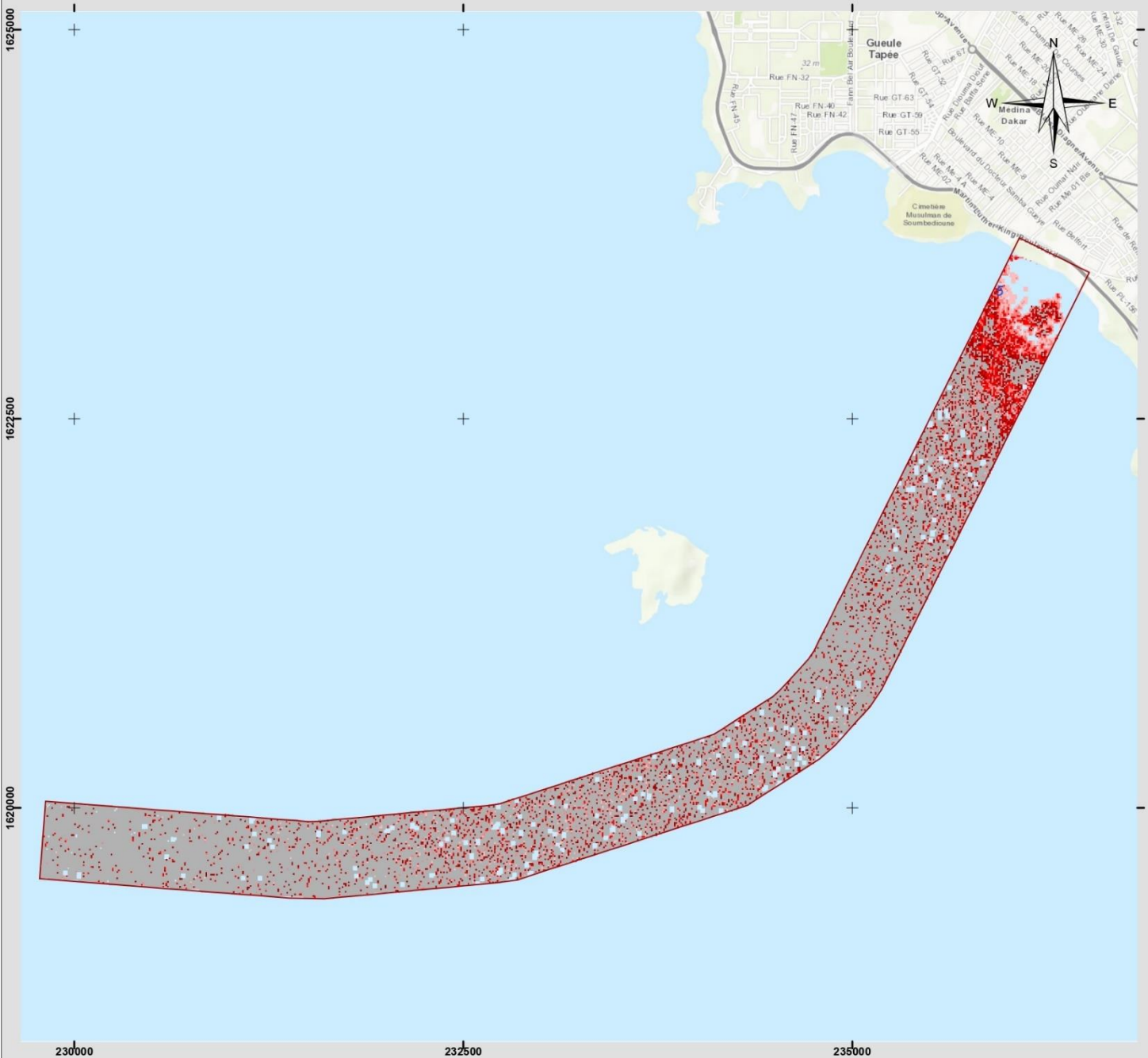


Στοιχεία Σύνταξης

Όνομ/νυμο Συντάκτη: Βασίλειος Καστανίδης
Ημ. Σύνταξης: 06/06/2024
Τοποθεσία Σύνταξης: Αθήνα
Σύστημα Συντεταγμένων: UTM 28N



Βαθυμετρία του πυθμένα με τη χρήση συστημάτων μεθόδων Τηλεπισκόπησης, για την περιοχή του Ντακάρ, Σενεγάλης



Υπόμνημα

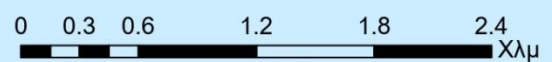
- Περιοχή Μελέτης
- 0 - 5 (m)
- 5 - 10 (m)
- 10 - 15 (m)
- 15 - 20 (m)
- >20 (m)

Περιοχή Μελέτης



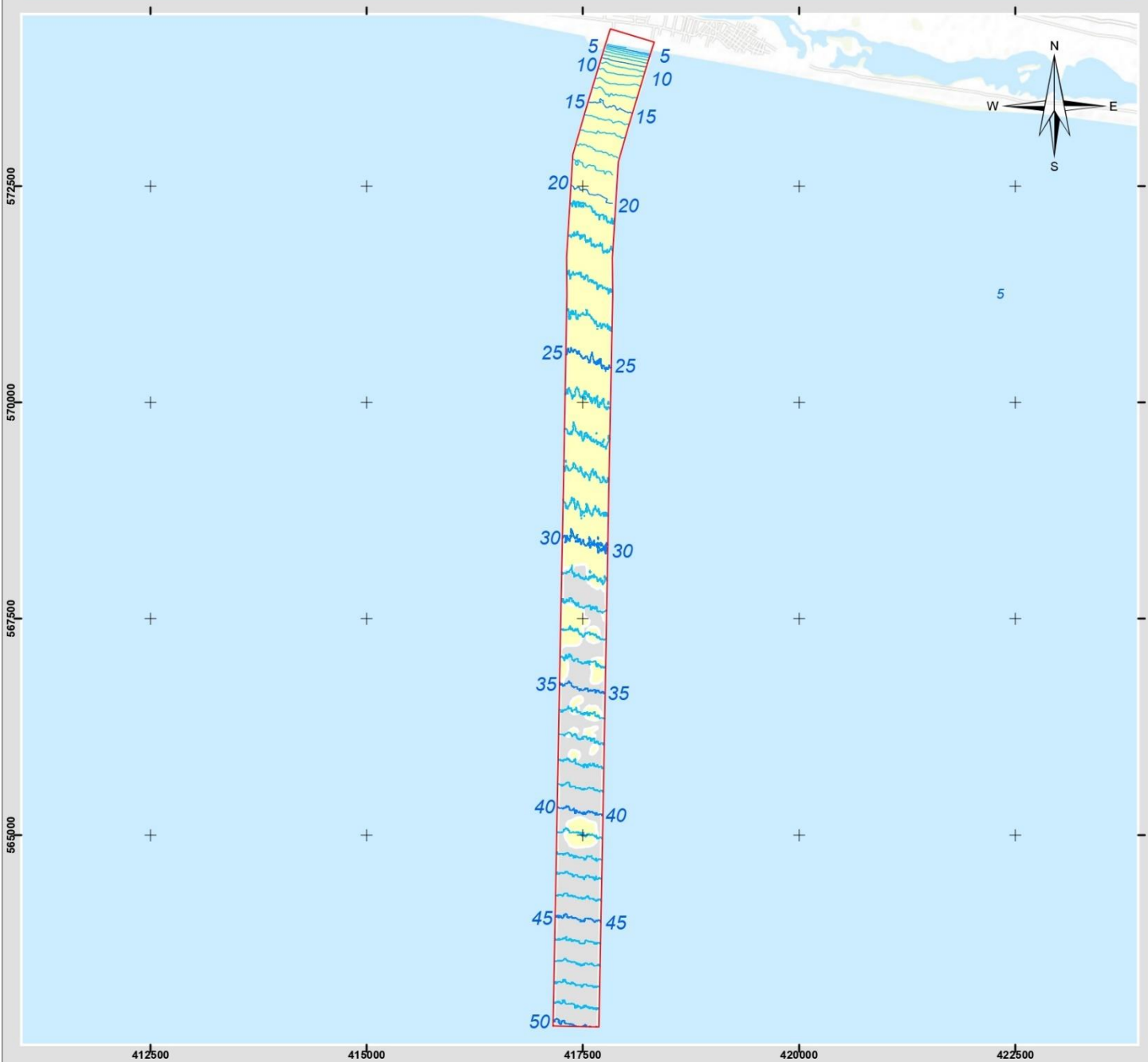
Στοιχεία Σύνταξης

Όνομ/νυμο Συντάκτη: Βασίλειος Καστανίδης
Ημ. Σύνταξης: 06/06/2024
Τοποθεσία Σύνταξης: Αθήνα
Σύστημα Συντεταγμένων: UTM 28N



**Παράρτημα 2 – Χαρτοσυνθέσεις της περιοχής Γκραν-Μπασάμ, Ακτή
Ελεφαντοστού**

Βαθυμετρία και Ταξινόμηση του πυθμένα με τη χρήση συστημάτων SSS & MBES, για την περιοχή του Γκραν-Μπασάμ, Ακτής Ελεφαντοστού



Υπόμνημα

- Ενδιάμεση Ισοβαθής
- Κύρια Ισοβαθής
- Περιοχή Μελέτης
- Άργιλος
- Άμμος

Περιοχή Μελέτης

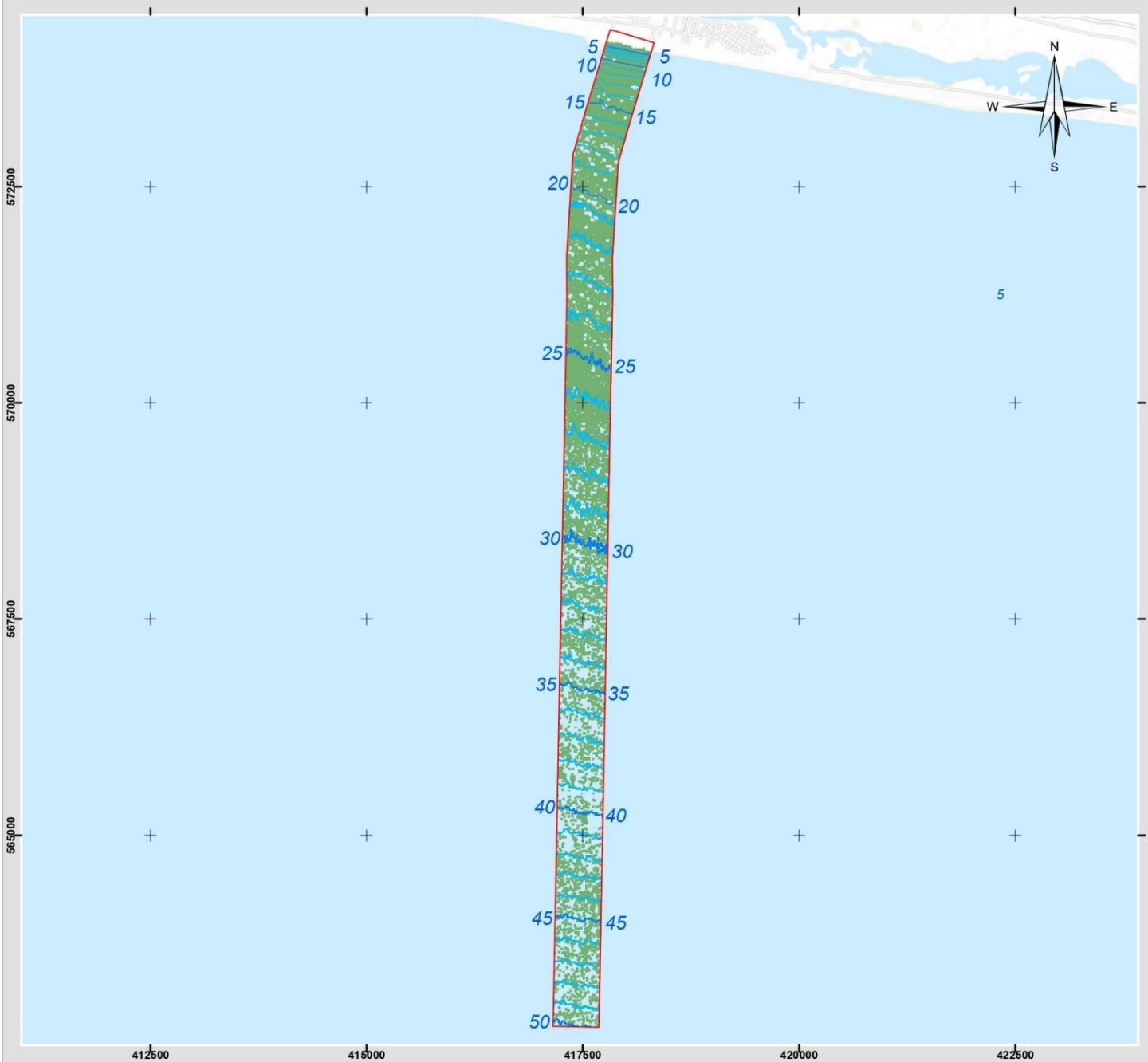


Στοιχεία Σύνταξης

Όνομ/νυμο Συντάκτη: Βασίλειος Καστανίδης
Ημ. Σύνταξης: 06/06/2024
Τοποθεσία Σύνταξης: Αθήνα
Σύστημα Συντεταγμένων: UTM 30N



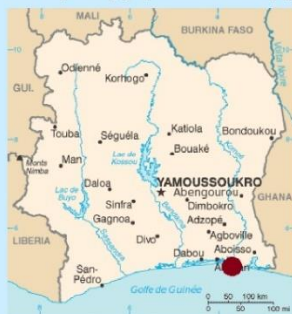
Ταξινόμηση του πυθμένα με τη χρήση Τηλεπισκοπικών μεθόδων για την περιοχή του Γκραν-Μπασάμ, Ακτής Ελεφαντοστού



Υπόμνημα

- Ενδιάμεση Ισοβαθής
- Κύρια Ισοβαθής
- Περιοχή Μελέτης
- Κλάση 1

Περιοχή Μελέτης

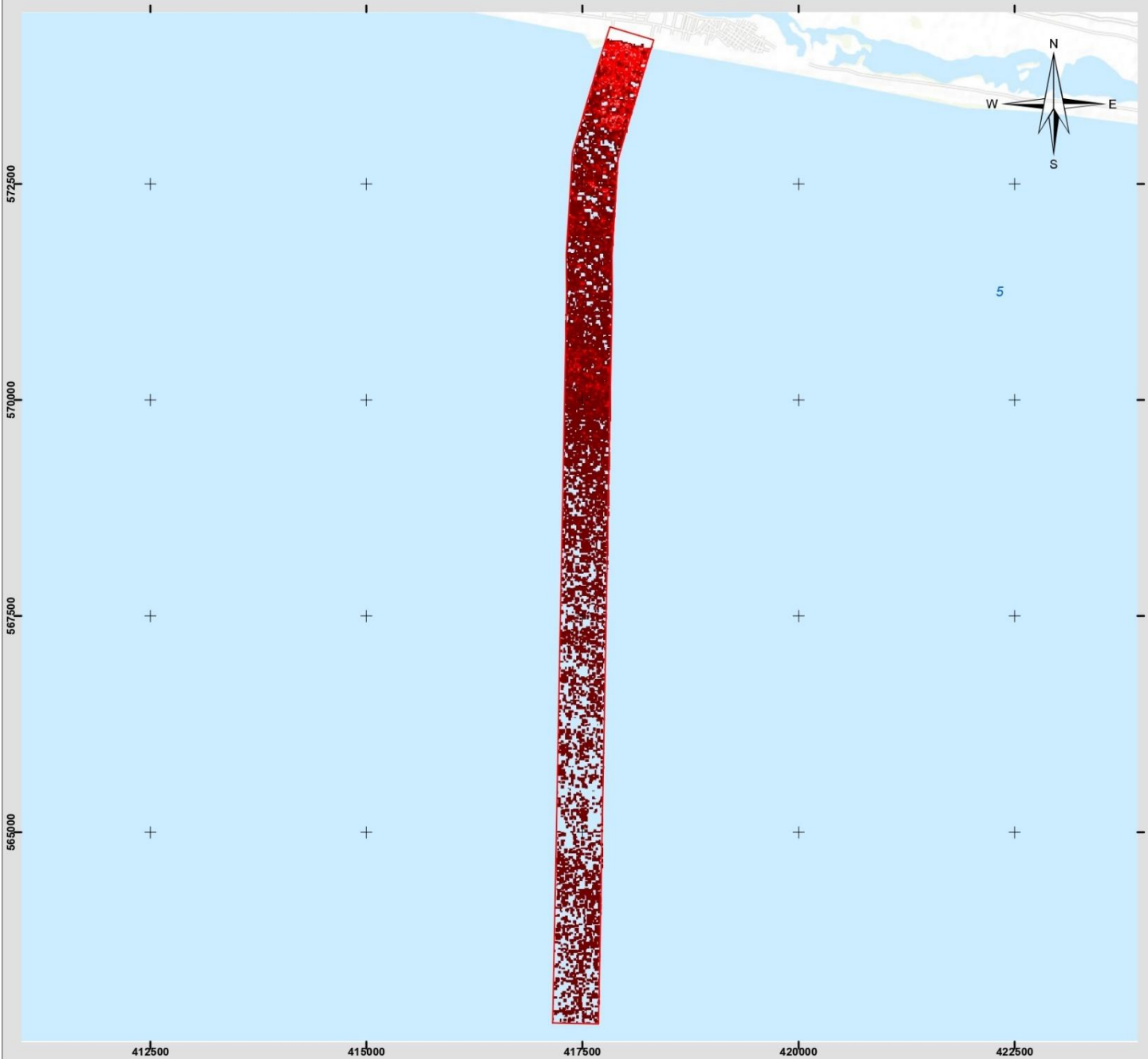


Στοιχεία Σύνταξης

Όνομ/νυμο Συντάκτη: Βασίλειος Καστανίδης
Ημ. Σύνταξης: 06/06/2024
Τοποθεσία Σύνταξης: Αθήνα
Σύστημα Συντεταγμένων: UTM 30N



Βαθυμετρία του πυθμένα με τη χρήση Τηλεπισκοπικών μεθόδων για την περιοχή του Γκραν-Μπασάμ, Ακτής Ελεφαντοστού



Υπόμνημα

- Περιοχή Μελέτης
- 0 - 5 (m)
- 5 - 10 (m)
- 10 - 15 (m)
- 15 - 20 (m)
- > 20 (m)

Περιοχή Μελέτης



Στοιχεία Σύνταξης

Όνομ/νυμο Συντάκτη: Βασίλειος Καστανίδης
Ημ. Σύνταξης: 06/06/2024
Τοποθεσία Σύνταξης: Αθήνα
Σύστημα Συντεταγμένων: UTM 30N

