



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Διερεύνηση τηλεπισκοπικών τεχνικών για βαθυμετρία και χαρτογράφηση πυθμένα από δορυφορικά και εναέρια δεδομένα



Διπλωματική εργασία
Κωνσταντίνα Καραντώνη

Αθήνα, Μάρτιος 2018



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY
REMOTE SENSING LABORATORY**

**Testing remote sensing techniques for bathymetry and seabed mapping
using satellite and aerial data**

Diploma thesis

Konstantina Karantoni

Athens, March 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

**Διερεύνηση τηλεπισκοπικών τεχνικών για βαθυμετρία και
χαρτογράφηση πυθμένα από δορυφορικά και εναέρια δεδομένα**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 22/03/2018

.....

Κ. Καραντζαλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....

Δ. Αργιαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ο. Αραμπατζή
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Copyright © All rights reserved. Κωνσταντίνα Σ. Καραντώνη, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

Περίληψη

Τα παράκτια θαλάσσια περιβάλλοντα αποτελούν τα πλέον σημαντικά και δυναμικά μεταβαλλόμενα στοιχεία της γήινης επιφάνειας. Ως τοπογράφοι μηχανικοί είναι απαραίτητο να μελετήσουμε και να καταγράψουμε τις μεταβολές αυτές με τον πιο ακριβή και οικονομικό τρόπο. Προς την κατεύθυνση αυτή, μια αρκετά διαδεδομένη εφαρμογή των δορυφορικών συστημάτων παρακολούθησης της Γης είναι η βαθυμετρική εκτίμηση και χαρτογράφηση του πυθμένα σε παράκτιες περιοχές από πολυφασματικά δεδομένα. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, με την αυξημένη διαθεσιμότητα τηλεπισκοπικών δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης υπάρχει έντονη έρευνα και μελέτη στο αντικείμενο.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκαν τηλεπισκοπικά δεδομένα από δορυφορικές και εναέριας λήψεις. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα από δύο δορυφορικούς αισθητήρες (ήτοι, Sentinel-2 και WorldView-2) και από εναέριους (επανδρωμένες και μη επανδρωμένες πτήσεις) για την περιοχή της Βάρκιζας και της παραλίας Λαμπαγιανών στην Αργολίδα. Στα δεδομένα αυτά, αρχικά εφαρμόστηκαν οι απαραίτητες προ-επεξεργασίες, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση του πυθμένα μέσω της διαδικασίας της ταξινόμησης και, τέλος, εκτελέστηκαν επί αυτών τα δύο επικρατέστερα βαθυμετρικά μοντέλα, το γραμμικό (Lyzenga et al., 2006) και αυτό της γραμμικής αναλογίας (Stumpf et al., 2003).

Από την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε πως τηλεπισκοπικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης μπορούν σε ικανοποιητικό βαθμό να συμβάλουν στην βαθυμετρία και τη χαρτογράφηση παράκτιων περιοχών. Συγκεκριμένα, για την βαθυμετρία σημαντικό ρόλο παίζει η χωρική ανάλυση του δέκτη και το είδος του πυθμένα, ενώ τα διαθέσιμα φασματικά κανάλια δεν είναι τόσο καθοριστικά στο αποτέλεσμα. Το γραμμικό μοντέλο (Lyzenga et al., 2006) οδήγησε σε όλες τις περιπτώσεις σε πιο ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με αυτό της γραμμικής αναλογίας (Stumpf et al., 2003). Σχετικά με τη χαρτογράφηση πυθμένα, καλύτερα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση έδωσε η αντικειμενοστραφής ταξινόμηση.

Abstract

Near-shore environments are of vital significance and of the most dynamically changing elements on terrestrial surface. As surveying engineers, it is essential to observe and map those changes in the most accurate and low-cost way. For this reason, the application of remote observation satellite systems for the bathymetry and seabed mapping of such environments is quite common nowadays. It is usually based on spaceborn multispectral imageries. In recent years, many experiments and studies have been conducted and presented for this purpose, also due to the increased availability of high resolution remote sensing data.

Within this thesis, multispectral data from both satellite and airborne systems were tested. More specifically, datasets from two satellite (Sentinel-2 and WorldView-2) and airborne (manned and unmanned armed vehicles) sensors were studied over the Varkiza Gulf, as well as the area of Labayianna Bay in Argolida. Firstly the necessary corrections were applied on the data, secondly the seabed mapping was achieved through classification and, last, the two most popular bathymetric models were applied on the images; the log-linear model (Lyzenga et al., 2006) and the log-ratio model (Stumpf et al., 2003).

After assessing the results, both quality and quantity-wise, it is concluded that remote sensing data could successfully be used for both bathymetry and seabed mapping. Spatial resolution and seafloor-type appear to affect more the result rather than the available spectral bands. In addition, log-linear model (Lyzenga et al., 2006) in any case succeeded more accurate results than that of log-ratio (Stumpf et al., 2003). As far as the seabed mapping applications are concerned, object-oriented classification is suggested to be followed.

Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία αποτελεί το σημείο καμψής στη ζωή κάθε φοιτητή, καθώς είναι το ορόσημο για την ολοκλήρωση ενός κύκλου και το εφαλτήριο σημείο ενός νέου, γεμάτου επιλογές, ευκαιρίες, αλλά και πολλές δυσκολίες...

Κάπως έτσι, με την παρούσα διπλωματική εργασία, ολοκληρώνεται και η δική μου πορεία στο προπτυχιακό πρόγραμμα της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου· ένας δρόμος που μου πρόσφερε εμπειρίες, γνώσεις, φίλους, ένα ταξίδι προς μια Ιθάκη-εργασία που φαίνεται τα τελευταία χρόνια να δυσκολεύει όλο και περισσότερο όποιον Οδυσσέα-τοπογράφο μηχανικό προσπαθήσει να την προσεγγίσει.

Πρώτα, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου, που μου έδωσαν την απαραίτητη Παιδεία, με στήριζαν και πίστευαν σε εμένα ακόμα και όταν εγώ η ίδια με αμφισβητούσα. Επίσης, τους φίλους μου και συμφοιτητές μου που υπήρξαν συνοδοιπόροι για τόσα χρόνια, κάποιες φορές ακόμα και μέντορες ή αδέρφια.

Ωστόσο, η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την συμβολή των καθηγητών της Σχολής και ιδιαίτερα του κ. Κωνσταντίνου Καράντζαλου ο οποίος με εισήγαγε στο συγκεκριμένο αντικείμενο και, παρά τις διάφορες ατυχίες, με καθοδήγησε στα συναρπαστικά μονοπάτια της Τηλεπισκόπησης!

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Στέφανο Δογγούρη και την κ. Ορθοδοξία Αραμπατζή που προέβησαν στις απαραίτητες ενέργειες για τη συνεργασία της Σχολής με την Εφορία Εναλίων Αρχαιοτήτων, την κ. Δέσποινα Κουτσούμπα, αρχαιολόγο της εν λόγω Εφορίας, η οποία παρείχε τις απαραίτητες πληροφορίες και άδειες κατά την επίσκεψη στον αρχαιολογικό χώρο της παραλίας Λαμπαγιαννά, καθώς και τον κ. Βασίλη Καφιμάλη και το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. για την παροχή δεδομένων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να απευθύνω στους διδακτορικούς φοιτητές του Εργαστηρίου Ζαχαρία Κανδυλάκη και Κατερίνα Κικάκη για την πολύτιμη, καθοριστική και πάντα πρόθυμη βοήθειά τους στα διάφορα προγραμματιστικά ή άλλα ζητήματα που προέκυψαν κατά την πραγματοποίηση της εργασίας. Επίσης, στον Παναγιώτη Ζερβό, χωρίς τη βοήθεια του οποίου και την παροχή του UAV δεν θα ήταν εφικτή η απόκτηση αυτών των δεδομένων.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ & ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	15
2.1. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ	15
2.1.1. Ηχοβολιστική Βαθυμετρία	16
2.1.2. Φασματικά Χαρακτηριστικά Υδάτινων Σωμάτων	18
2.1.3. Φασματική Ανακλαστικότητα Υδάτινων Σωμάτων	19
2.1.4. Φασματικές Αλλαγές με την Αύξηση του Βάθους	20
2.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ.....	21
2.2.1. Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης (Side Scan Sonar).....	21
2.2.2. Ταξινόμηση πολυφασματικής εικόνας	22
2.3. ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	23
2.3.1. Βαθυμετρία από Πολυφασματικά Τηλεπισκοπικά Δεδομένα.....	23
2.3.2. Χαρτογράφηση Πυθμένα	25
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ & ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ	27
3.1. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	27
3.1.1. Κόλπος Βάρκιζας.....	27
3.1.2. Παραλία Λαμπαγιαννά Αργολίδας.....	27
3.2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ & ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ	29
3.2.1. Sentinel 2.....	36
3.2.2. WorldView-2.....	39
3.2.3. Δεδομένα από Εναέριο Επανδρωμένο Όχημα (Αεροπλάνο).....	46
3.2.4. Δεδομένα από Εναέριο Μη Επανδρωμένο Όχημα (UAV).....	48
3.3. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ.....	49
3.3.1. Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση.....	50
3.3.2. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....	52
3.3.3. Αντικειμενοστραφής ταξινόμηση.....	54
3.4. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	55
3.4.1. Γραμμικό Βαθυμετρικό Μοντέλο (Lyzenga).....	56
3.3.2. Βαθυμετρικό Μοντέλο Γραμμικής Αναλογίας (Stumpf)	60
3.5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ.....	69
3.5.1. Χρήση Εμπορικών Λογισμικών.....	69
3.5.2. Ανάπτυξη και Προσαρμογή Κώδικα.....	70

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	71
4.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΟΛΠΟΥ ΒΑΡΚΙΖΑΣ	71
4.1.1. Χαρτογράφηση Πυθμένα	71
4.1.2. Βαθυμετρία σε Εικόνα Sentinel 2.....	72
4.1.3. Βαθυμετρία σε Εικόνα WorldView-2	75
4.1.4. Βαθυμετρία σε Εικόνα από Εναέριο Επανδρωμένο Όχημα (Αεροπλάνο).....	79
4.1.5. Βαθυμετρία σε Εικόνα από Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα (UAV).....	82
4.1.5. Συγκεντρωτικοί Πίνακες	83
4.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΡΑΛΙΑΣ ΛΑΜΠΑΓΙΑΝΝΑ.....	86
4.2.1. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ.....	86
4.2.2. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ & ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ.....	90
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	93
5.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
5.2. ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	94
5.3. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	95
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	97
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Ενδεικτικά τμήματα κώδικα	101
7.1. Χωρική Βελτίωση (Pansharpening)	101
7.2. Μετατροπή Συντεταγμένων	103
7.3. Υλοποίηση Μοντέλου Lyzenga.....	103
7.4. Υλοποίηση Μοντέλου Stumpf	105

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενημερωμένη και λεπτομερής παράκτια τοπογραφία και βαθυμετρία αποτελούν το υπόβαθρο για πλήθος εφαρμογών και σκοπών, μεταξύ των οποίων της έρευνας, διαχείρισης και σχεδιασμού του θαλάσσιου χώρου. Με την επέκταση των παράκτιων και θαλάσσιων οικονομικών δραστηριοτήτων, η ανάγκη για ανάπτυξη γρήγορων και, κυρίως, αξιόπιστων μετρήσεων στις παράλιες περιοχές συνεχώς αυξάνεται. Κατά τον ίδιο τρόπο αυξάνεται και η ανάγκη για λεπτομερέστερη περιγραφή των φυσικών χαρακτηριστικών του θαλάσσιου πυθμένα και των παρακείμενων παράκτιων περιοχών με σκοπό την μοντελοποίηση και παρακολούθησή τους. Έτσι, τα παραλιακά συστήματα παρατήρησης βρίσκονται σε συνεχή ανάπτυξη προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι και διαδικασίες που αφορούν την ποιότητα του νερού, την υδροδυναμική, την μετεωρολογία, καθώς και την υποθαλάσσια μορφολογία, για την ανάλυση της οποίας είναι απαραίτητα και τα βαθυμετρικά δεδομένα.

Για πολλά χρόνια και μέχρι σήμερα, δύο από τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους απόκτησης βαθυμετρικών δεδομένων βασίζονται στον ηχοβολισμό (μονής ή πολλαπλής δέσμης) και στα αερομεταφερόμενα συστήματα Light Detection and Ranging (LiDAR). Ωστόσο, το κόστος και οι διοικητικές διαδικασίες που αυτές οι μέθοδοι συνεπάγονται για την πραγματοποίηση βαθυμετρίας και χαρτογράφησης πυθμένα, ιδιαίτερα σε παράκτια ρηχά ύδατα, αποτελούν σκόπελο για την ενημέρωση των τοπογραφικών δεδομένων ή επιτρέπουν την επικαιροποίησή τους μόνο σε σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Με αφορμή τα προβλήματα και τις δυσκολίες που προαναφέρθηκαν, το ζήτημα χρήσης των τηλεπισκοπικών δεδομένων για εξαγωγή συνεχούς βαθυμετρικής πληροφορίας έχει απασχολήσει με πλήθος ερευνών και μελετών την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα, ιδιαίτερα από τη δεκαετία του '80 και έπειτα. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, τα διαφορετικά μήκη κύματος του φάσματος εξασθενούν διαφορετικά ανάλογα με το βάθος του νερού. Στα πρώτα τους βήματα, αυτές οι προσεγγίσεις αδυνατούσαν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά σε εφαρμογές χαρτογράφησης του θαλάσσιου χώρου, κυρίως εξαιτίας των οπτικών ιδιοτήτων του νερού αλλά και των εξαιρετικά ευμετάβλητων παραμέτρων του, όπως η θολότητα, ο επιφανειακός κυματισμός κ.α. Ωστόσο, η αλματώδης εξέλιξη που σημειώθηκε στην τεχνολογία των οπτικών αισθητήρων που φέρουν, πλέον, οι τηλεπισκοπικές διαστημικές πλατφόρμες έχουν βελτιώσει θεαματικά την ικανότητα ανίχνευσης των φασματικών ιδιοτήτων των υδρόβιων στοιχείων, όπως η ανακλαστικότητα του πυθμένα, η κατάλληλη επεξεργασία των οποίων μπορεί να οδηγήσει στην άμεση εκτίμηση του βάθους.

Από τα προαναφερθέντα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τόσο οι διαδικασίες βαθυμετρίας όσο και χαρτογράφησης του πυθμένα σε παράκτια ύδατα αποτελούν έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα που εμπίπτει στο πεδίο δράσης του τοπογράφου μηχανικού. Έτσι, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της χρήσης τηλεπισκοπικών δεδομένων και τεχνικών επεξεργασίας εικόνας για τη βαθυμετρία και χαρτογράφηση σε θαλάσσια περιβάλλοντα, η εκτίμηση της ακρίβειας με την οποία αυτές επιτυγχάνονται και, τελικά, η πρόταση των κατάλληλων μοντέλων και ροής διαδικασιών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής μελέτης .

Η εξέταση αυτών έγινε σε περιοχές πολύ κοντά στην ακτή (παράκτιες περιοχές), όπως είναι τα ρηχά νερά σε αιγιαλίτιδα ζώνη, λιμάνια ή υφαλογενείς περιοχές, καθώς αυτές είναι αρκετά περίπλοκες μορφολογικά και παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες, αφού τα αβαθή ύδατα αποτελούν κίνδυνο για την ναυσιπλοΐα και η τοπογραφία του βυθού μεταβάλλεται διαρκώς, λόγω της ιζηματοπόθεσης και της διάβρωσης των ακτών. Ιδιαίτερα σε χώρες με μεγάλη και έντονη

ακτογραμμή, όπως είναι η Ελλάδα, η παρακολούθηση των παραπάνω αποτελεί νευραλγικό στοιχείο για την οικονομία της χώρας και την ασφάλεια των πολιτών της.

Παράλληλα, τα αποτελέσματα της βαθυμετρίας και της χαρτογράφησης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για περιβαλλοντικά ζητήματα - όπως η παρακολούθηση των διαχρονικών μεταβολών στην ποιότητα του νερού ή η παρατήρηση των κοραλλιογενών υφάλων - τα οποία είναι υψίστης σημασίας για την υγεία των ανθρώπων και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια όπου το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη έχει οδηγήσει στο λιώσιμο των πάγων και την διαρκή μεταβολή της παγκόσμια κατάταξης του αλμυρού -κυρίως- νερού, η βαθυμετρία και χαρτογράφηση έχει συμβάλλει ενεργά στην καταγραφή αυτού του φαινομένου αλλά και στην πρόβλεψη της μελλοντικής πορείας του.

Άλλες εφαρμογές των διαδικασιών βαθυμετρίας και χαρτογράφησης αφορούν την ανακάλυψη, καταγραφή και συντήρηση των εναλίων αρχαιοτήτων (αρχαιολογικοί χώροι που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας), μεγάλο πλήθος των οποίων συναντάται στα παράλια των μεσογειακών -ιδιαιτέρως- χωρών, με την Ελλάδα να αποτελεί την ναυαρχίδα αυτών. Η ανάδειξη των χώρων αυτών και η αξιοποίησή τους μπορεί να προβάλλει ακόμα πιο δυναμικά την εκάστοτε χώρα στον τομέα του τουρισμού, καθώς και στην δημιουργία εναλλακτικών μορφών αυτού, συμβάλλοντας έτσι στην ανάπτυξη της οικονομίας, στην καταπολέμηση της ανεργίας, στην αναθεώρηση της χωροταξικής και πολεοδομικής κρατικής πολιτικής.

Επίσης, πλήθος άλλων τεχνικο-οικονομικών εφαρμογών απαιτεί ως υπόβαθρο την ύπαρξη λεπτομερών και ενημερωμένων βαθυμετρικών χαρτών και δεδομένων πυθμένα. Η κατασκευή λιμένων, η ανάπτυξη των παράκτιων περιοχών, η τοποθέτηση κυματοθραυστών αποτελούν μερικά από τα σημαντικότερα παραδείγματα αυτών.

Από τα παραπάνω συνεπάγεται εύλογα η απαίτηση για συνεχή ενημέρωση των βαθυμετρικών δεδομένων, η απόκτηση των οποίων με επίγειες παραδοσιακές βαθυμετρικές μεθόδους είναι ιδιαίτερα επίπονη, χρονοβόρα και δαπανηρή. Για το λόγο αυτό, η βαθυμετρία και χαρτογράφηση του πυθμένα με πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα αποτελούν μία επιθυμητή εναλλακτική τεχνική, καθώς παρέχουν αυτή τη δυνατότητα σε σχετικά χαμηλό κόστος και για εκτεταμένες περιοχές.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκαν τηλεπισκοπικά δεδομένα από δορυφορικές και εναέριας λήψεις. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα από δύο δορυφορικούς αισθητήρες (ήτοι, Sentinel-2 και WorldView-2) και από εναέριους (επανδρωμένες και μη επανδρωμένες πτήσεις) για την περιοχή της Βάρκιζας και της παραλίας Λαμπαγιαννών στην Αργολίδα.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη: αρχικά περιγράφεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο και η σχετική διαθέσιμη βιβλιογραφία (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια, αναφέρονται και περιγράφονται οι προ-επεξεργασίες που πραγματοποιήθηκαν ανά τηλεπισκοπικό δέκτη, ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά οι ταξινομήσεις και τα βαθυμετρικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν και υλοποιήθηκαν (Κεφάλαιο 3). Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά περιοχή μελέτης και η ποιοτική και ποσοτική τους αξιολόγηση. Τέλος, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και οι προοπτικές για την περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο (Κεφάλαιο 5).

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ & ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ

Ο όρος *βαθυμετρία* υποδηλώνει πληροφορίες τόσο για το βάθος του νερού όσο και για το είδος του βυθού. Η βαθυμετρία αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές με ρηχά νερά, όπως στην αιγιαλίτιδα ζώνη, σε λιμάνια ή σε υφαλογενείς περιοχές, στις οποίες τα αβαθή ύδατα αποτελούν κίνδυνο για την ναυσιπλοΐα και όπου η τοπογραφία του βυθού μεταβάλλεται διαρκώς λόγω ιζηματοπόθεσης και διάβρωσης των ακτών.

Ιδιαίτερα όσον αφορά τη ναυσιπλοΐα, η ύπαρξη σωστών μετρήσεων βάθους με ακρίβεια σε περιοχές με ρηχά νερά είναι υψίστης σημασίας. Παραδοσιακά οι μετρήσεις αυτές γίνονται με *ηχοβολιστική βαθυμετρία* μέσω σκάφους. Αυτή η μέθοδος δίδει ακριβείς σημειακές μετρήσεις βαθών, αλλά για να χρησιμοποιηθεί στη χαρτογράφηση μεγάλης περιοχής απαιτεί πληθώρα μετρήσεων, οι οποίες ανεβάζουν σημαντικά το κόστος. Επίσης, τα ρηχά νερά και η ύπαρξη υφάλων καθιστούν επικίνδυνη την πλοήγηση ακόμα και ενός μικρού σκάφους, γεγονός που καθιστά την ηχοβολιστική βαθυμετρία μη εφαρμόσιμη σε αυτές τις περιοχές. Λόγω τόσο των προαναφερθέντων όσο και της απαίτησης για συνεχή ενημέρωση των βαθυμετρικών δεδομένων, η δημιουργία βαθυμετρικών χαρτών με την εφαρμογή τηλεπισκοπικών μεθόδων (*multispectral bathymetry – MSB*) αποτελεί μία επιθυμητή εναλλακτική τεχνική.

Η MSB χρησιμοποιείται ευρέως για την παγκόσμια παρακολούθηση των αβαθών υδάτων, καθώς παρέχει αυτή τη δυνατότητα σε σχετικά χαμηλό κόστος συγκριτικά με τις παραδοσιακές βαθυμετρικές μεθόδους. Οι τρέχουσες τάσεις στην ανάπτυξη μεθόδων της MSB βασίζονται στην εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης πάνω σε μια σειρά σημείων ελέγχου με σκοπό την απόκτηση ενός σχετικά ακριβούς μοντέλου των βαθών σε παράκτιες περιοχές (Lyzenga, 1981; Ma et al., 2014; Lafon et al., 2002).

Τα υψηλής ακρίβειας μοντέλα MSB έχουν σημαντική επίδραση σε πληθώρα τεχνικο-οικονομικών τομέων, καθώς επιτρέπουν την χαρτογράφηση των μεταβολών στη βαθυμετρία των παράκτιων περιοχών και συμβάλλουν στην ασφάλεια της πλοήγησης σε ρηχά νερά (Pe’eri et al., 2014; Moszynski et al., 2015), ενώ παράλληλα οι μέθοδοι ακριβείας είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για πληθώρα γεω-επιστημών (Kulawiak et al., 2010; Pacheco et al., 2015; Forfinski-Sarkozi and Parrish, 2016).

Μερικά τέτοια παραδείγματα είναι οι περιβαλλοντολογικές μελέτες, όπου η MSB συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση φαινομένων, όπως η παρακολούθηση απόθεσης ιζημάτων σε υδάτινα περιβάλλοντα (Wieczorek et al., 2014), οι διαχρονικές μεταβολές στην ποιότητα του νερού (Doernhoefer et al., 2016), η παρατήρηση των κοραλλιογενών υφάλων (Hamylton et al., 2015), οι ενάλιες αρχαιότητες (Guzinski et al., 2016), ακόμα και οι μεταβολές των παγετωδών λιμνών (Moussavi et al., 2016 – Pope et al., 2016).

Για την εφαρμογή της MSB απαιτούνται παθητικά τηλεπισκοπικά δεδομένα με πληθώρα φασματικής πληροφορίας (όπως πολυφασματικές εικόνες από δορυφόρους). Η επεξεργασία τέτοιων δεδομένων για εξαγωγή βάθους πυθμένα γίνεται, κατά βάση, σύμφωνα με εμπειρικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί κατά καιρούς (Lyzenga et al., 2006; Stumpf et al., 2003; Philpot, 1989; Lyzenga 1985). Για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων συνίσταται η χρήση δεδομένων με πληροφορία σε πάνω από 4 κανάλια (ορατό φάσμα και εγγύς υπέρυθρο). Η υψηλή χωρική ανάλυση είναι, επίσης, απαραίτητη και για το λόγο αυτό συχνά γίνεται χρήση υψηλής ανάλυσης υπερφασματικών εικόνων από αεροσκάφη ή πλατφόρμες πλοίου.

Η εξαγωγή βαθυμετρικής πληροφορίας από τέτοιες εικόνες βασίζεται στην αρχή ότι η ακτινοβολία του ήλιου όχι μόνο αντανακλάται αλλά επίσης εξασθενεί όταν προσπίπτει σε ένα υδάτινο σώμα, καθώς ένα μέρος της απορροφάται από αυτό.

2.1.1. Ηχοβολιστική Βαθυμετρία

Η μέθοδος του ηχοβολισμού χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1920 από το γερμανικό ωκεανογραφικό *Meteor*, έγινε όμως γνωστή κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και καθιερώθηκε μετά το 1950.

Η αρχή λειτουργίας της ηχοβολιστικής μεθόδου στηρίζεται στην ιδιότητα του ήχου να διαδίδεται μέσα σε ρευστό με γνωστή ταχύτητα, η οποία στο θαλασσινό νερό είναι 1.500 m/s. Σύμφωνα με τη διαδικασία του ηχοβολισμού, ένας πομπός εκπέμπει ηχητικό παλμό ο οποίος διαδίδεται στο θαλασσινό νερό και, αφού ανακλαστεί στον πυθμένα, επιστρέφει και καταγράφεται από τον δέκτη.

Ο υπολογισμός του βάθους (H) του νερού γίνεται από την εξίσωση

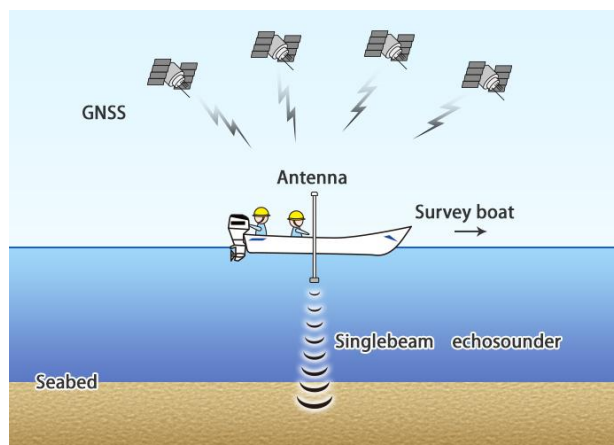
$$H = U \frac{t}{2},$$

όπου U η ταχύτητα του ήχου στο θαλασσινό νερό,

και t ο διπλός χρόνος διαδρομής του ηχητικού παλμού, δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από την εκπομπή του από τον πομπό έως την άφιξή του στον δέκτη.

Βαθύμετρο Απλής Δέσμης (Single Beam Echosounder)

Χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα στις δεκαετίες 1960-1970. Τα βυθόμετρα απλής δέσμης εκπέμπουν μια κάθετη δέσμη ηχητικών παλμών στη συχνότητα των 200 KHz ή των 50 KHz (Καψιμάλης και Παυλόπουλος, 2009). Οι υψηλές συχνότητες αποτυπώνουν με ακρίβεια τη μορφολογία του πυθμένα σε ρηχά νερά, ενώ οι χαμηλές συχνότητες διεισδύουν σε μεγαλύτερα βάθη νερού (Σχήμα 1)¹.



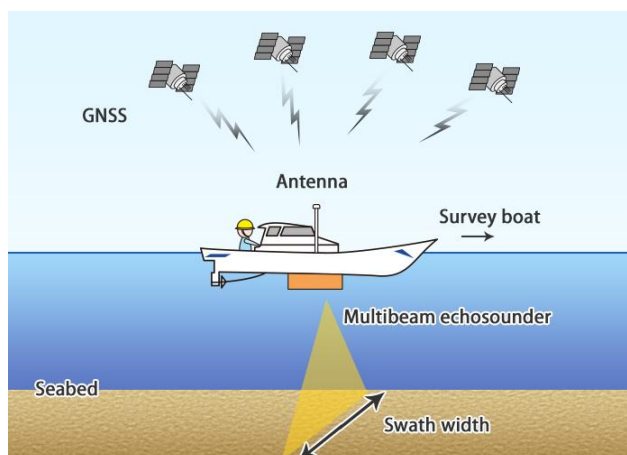
Σχήμα 1. Βυθόμετρο Απλής Δέσμης

Βαθύμετρο Πολλαπλής Δέσμης (Multibeam Echosounder)

Η κατηγορία αυτή βυθομέτρων παρουσιάζει ευρεία χρήση από τη δεκαετία του 1990. Χρησιμοποιήθηκε όμως για πρώτη φορά το 1977 από τους Γάλλους στο Jean Charcot. Ένα βυθόμετρο πολλαπλής δέσμης εκπέμπει πολλαπλή ηχητική δέσμη ευρείας γωνίας πρόσπτωσης κάθετα στην πορεία του πλοίου, συνήθως σε συχνότητες 12 KHz ή 30 KHz. Για κάθε ακτίνα που

¹www.ocean-eng.com

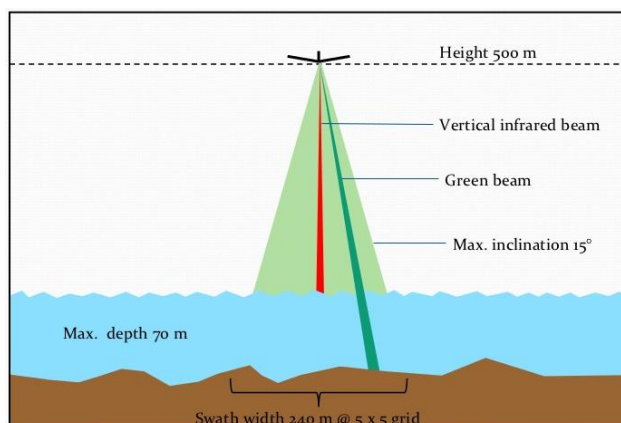
λαμβάνεται, καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και η διεύθυνσή της. Αποτυπώνεται με υψηλή ακρίβεια και ανάλυση το τμήμα του πυθμένα κάτω από την πορεία του πλοίου, με πλευρική κάλυψη περίπου τρεις έως οκτώ φορές το βάθος του νερού (Hell, 2011) (Σχήμα 2)¹.



Σχήμα 2. Βυθόμετρο Πολλαπλής Δέσμης

Βυθοσκόπηση με Laser και LiDAR

Το πρώτο βυθόμετρο Laser κατασκευάστηκε από το πολεμικό ναυτικό της Αυστραλίας και ήταν αερομεταφερόμενο. Ο λόγος της κατασκευής του ήταν η γρήγορη και με μικρό κόστος αποτύπωση του παράκτιου τμήματος της Αυστραλίας. Σύμφωνα με τους Καψιμάλη και Παυλόπουλο (2009) αποτελείται από μια συστοιχία Laser που τοποθετείται πάνω σε ένα μικρό αεροσκάφος, το οποίο πετάει σε ύψος 500 m περίπου. Το Laser εκπέμπει δύο δέσμες, μια κόκκινη που μετρά το ύψος του αεροπλάνου από την επιφάνεια της θάλασσας και μια πράσινη που διεισδύει στο νερό και ανακλάται από τον βυθό. Η διαφορά των αποστάσεων που λαμβάνονται από τις δυο αυτές δέσμες είναι το βάθος της θάλασσας. Η τεχνική αυτή αποδίδει σε ρηχά (έως 70 m), καθαρά και ήρεμα νερά χωρίς να επικρατεί νέφωση (Σχήμα 3)².



Σχήμα 3. Βυθοσκόπηση με Laser

Τα τελευταία χρόνια είναι αρκετά διαδεδομένη η σάρωση με το LiDAR (*Light Detection And Ranging*), όμως το βάθος διείσδυσης περιορίζεται από την απορρόφηση που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο νερό. Το βάθος προσδιορίζεται μετρώντας το χρόνο καθυστέρησης μεταξύ της μετάδοσης ενός παλμού και του σήματος επιστροφής του. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν παλμούς laser δύο συχνοτήτων: έναν χαμηλής συχνότητας (εγγύς υπέρυθρο) ο οποίος ανακλάται από την επιφάνεια του νερού και επιστρέφει, καθώς και έναν υψηλής συχνότητας (πράσινο) ο οποίος διεισδύει στην υδάτινη στήλη και ανακλάται από τον πυθμένα. Οι αναλύσεις των διακριτών αυτών παλμών έχουν ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό του βάθους και,

²National Oceanic and Atmospheric Administration, www.nauticalcharts.noaa.gov

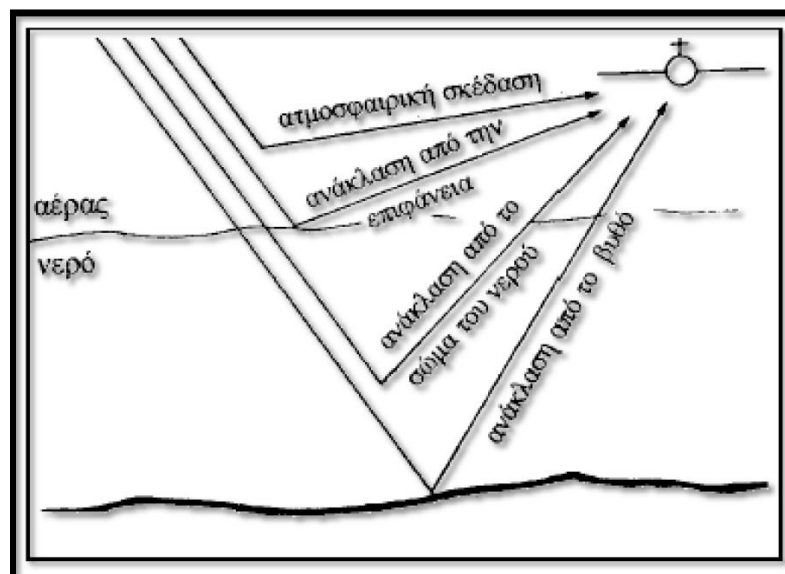
συνεπώς, της αυξομείωσης της ακτογραμμής. Τα συστήματα αυτά μπορούν να διεισδύσουν σε βάθη έως 50 m, με απαραίτητη προϋπόθεση την καθαρότητα των υδάτων.

Η βυθοσκόπηση με σάρωση LiDAR βρίσκει, επίσης, εφαρμογή για συλλογή δεδομένων σε περιοχές με πολύπλοκες και απόκρημνες ακτές (Αλάσκα, Βόρεια Ακτή Ατλαντικού, Καραϊβική), όπου η χρήση τεχνικών βαθυμετρίας με πλοία δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και με ασφάλεια.

2.1.2. Φασματικά Χαρακτηριστικά Υδάτινων Σωμάτων

Η φασματική φύση ενός υδάτινου σώματος καθορίζεται από την αλληλεπίδραση διάφορων παραγόντων, όπως της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του, των οπτικών ιδιοτήτων του νερού, την τραχύτητα της επιφάνειας, των γωνιών παρατήρησης και πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και, σε μερικές περιπτώσεις, της αντανάκλασης του φωτός από τον βυθό (Σχήμα 4).

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει πάνω στην επιφάνεια του νερού, ένα τμήμα της αντανακλάται πίσω στην ατμόσφαιρα. Αυτή η ανακλώμενη ακτινοβολία, ενώ φέρει ελάχιστη πληροφορία σχετικά με το νερό αυτό καθαυτό, μπορεί να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνειας και, κατ' επέκταση, τον άνεμο και τα κύματα. Οι φασματικές ιδιότητες του νερού καθορίζονται κατά κύριο λόγο από την ενέργεια που διαχέεται και ανακλάται μέσα στο υδάτινο σώμα. Η ενέργεια αυτή είναι γνωστή ως ανάκλαση από το σώμα του νερού (*volume reflection*), επειδή συντελείται σε όλο το βάθος του νερού και όχι μόνο στην επιφάνεια αυτού. Ένα τμήμα αυτής της ενέργειας στρέφεται πάλι προς την επιφάνεια, όπου ξαναπερνάει στην ατμόσφαιρα και μετά στο δέκτη παρατήρησης (ανθρώπινο μάτι, φωτογραφικός φακός, δέκτης δορυφόρου κλπ.) (Σχήμα 4). Αυτή η ακτινοβολία είναι η κύρια πηγή της φασματικής ιδιότητας του «χρώματος» του υδάτινου σώματος (Campbell, 1996).



Σχήμα 4. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά του υδάτινου σώματος (Τσακίρη-Στρατή, 2010, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ)

Συμπερασματικά, η συνολική ακτινοβολία που καταγράφεται από το δέκτη δίδεται από την παρακάτω σχέση (Jensen, 2007):

$$L_t = L_b + L_v + L_s + L_p,$$

όπου **L_t** η ακτινοβολία που καταγράφεται από τον δέκτη,
 L_b η ακτινοβολία του βυθού,
 L_v η ακτινοβολία από το σώμα του νερού,
 L_s η ακτινοβολία από την επιφάνεια του νερού,
και **L_p** η ακτινοβολία από την ατμοσφαιρική σκέδαση.

2.1.3. Φασματική Ανακλαστικότητα Υδάτινων Σωμάτων

Εξετάζοντας τη φασματική ανακλαστικότητα του νερού, πιθανόν το πλέον διακριτό χαρακτηριστικό είναι η απορρόφηση στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Το νερό απορροφά ενέργεια στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή εσωτερικά, είτε είναι το νερό των λιμνών και ποταμών, είτε είναι το νερό που περιέχεται στη βλάστηση και στο έδαφος. Ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση των υδατικών επιφανειών με τα τηλεπισκοπικά δεδομένα είναι πολύ πιο εύκολος στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή λόγω της ιδιότητας της απορρόφησής της από το νερό σ' αυτή τη φασματική περιοχή.

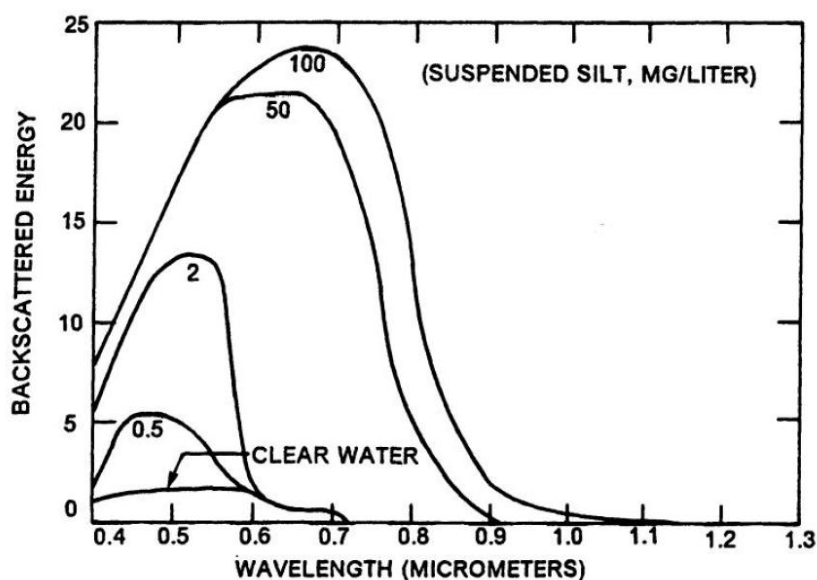
Το φως που εισέρχεται στο νερό επηρεάζεται πρώτον από την απορρόφηση και σκέδαση από το καθαρό νερό και δεύτερον από τη σκέδαση, αντανάκλαση και διάθλαση λόγω των σωματιδίων που αιωρούνται μέσα στο νερό. Το καθαρό νερό απορροφά σχετικά μικρή ενέργεια στα μήκη κύματος τα μικρότερα των 0.6μm (Σχήμα 5). Η μέγιστη μετάδοση του φωτός από το νερό συμβαίνει στα μήκη κύματος από 0.44 μέχρι 0.54μm.

Για το καθαρό νερό ισχύουν οι ίδιες αρχές που διέπουν την ατμοσφαιρική σκέδαση. Η μοριακή σκέδαση (*Rayleigh scattering*) συμβαίνει όταν η διάμετρος των σωματιδίων μέσα στο νερό είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό, οι υδάτινες επιφάνειες με μεγάλο βάθος αναμένεται να έχουν μπλε ή μπλε πράσινο χρώμα, αν δεν υπάρχουν ρύποι. Επειδή το χρώμα του νερού καθορίζεται περισσότερο από την αντανάκλαση του σώματος του νερού παρά από την αντανάκλαση από την επιφάνειά του, οι φασματικές ιδιότητες των υδάτινων σωμάτων καθορίζονται από τον βαθμό διαπερατότητάς τους και όχι από τα χαρακτηριστικά της επιφανείας τους, όπως συμβαίνει στα υπόλοιπα σώματα.

Στην μπλε περιοχή του φάσματος η διείσδυση του φωτός δεν είναι στο μέγιστό της, αλλά σε ελαφρώς μεγαλύτερα μήκη κύματος, στην μπλε – πράσινη περιοχή η διείσδυση είναι μεγαλύτερη και σε αυτά τα μήκη κύματος η δυνατότητα καταγραφής χαρακτηριστικών του βυθού είναι καλύτερη. Στα μεγαλύτερα μήκη κύματος, στην κόκκινη περιοχή του φάσματος, η απορρόφηση του φωτός από το νερό είναι πολύ μεγαλύτερη και μόνο χαρακτηριστικά σε ρηχές περιοχές είναι ευδιάκριτα. Επίσης, στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή του φάσματος, η απορρόφηση του φωτός είναι τόσο μεγάλη, που μόνο η διάκριση ανάμεσα σε νερό και ξηρά μπορεί να επιτευχθεί.

Όταν αλλάζει η θολότητα του νερού λόγω παρουσίας οργανικών ή ανόργανων υλικών, αλλάζουν και τα φασματικά του χαρακτηριστικά (Σχήμα 5). Ιζήματα ή αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάζονται τόσο λόγω φυσικών διεργασιών όσο και λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Το νερό που έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε ιζήματα αναφέρεται ως θολό νερό (*turbid water*). Η θολότητα του νερού καταγράφεται είτε με δειγματοληψία νερού είτε με την χρήση ειδικών μηχανημάτων που υπολογίζουν την θολότητα από την διαύγεια του νερού. Όσο αυξάνει η συγκέντρωση ιζήματος στο νερό τόσο αλλάζουν και οι φασματικές του ιδιότητες. Πρώτον, η ολική του φωτεινότητα στην ορατή περιοχή του φάσματος αυξάνει, ώστε το νερό παύει να δρα ως ένα «σκοτεινό» αντικείμενο και αρχίζει να συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ένα «φωτεινό» αντικείμενο όσο η περιεκτικότητα σε σωματίδια αυξάνεται. Επίσης, όσο η συγκέντρωση σωματιδίων αυξάνει, η μέγιστη αντανάκλαση του φωτός μετατοπίζεται από την μπλε περιοχή προς

την πράσινη. Όταν η συγκέντρωση ιζήματος είναι πολύ μεγάλη, το χρώμα του νερού πλησιάζει το χρώμα του ιζήματος (Campbell, 1996).



Σχήμα 5. Αποτελέσματα λόγω θολότητας στα φασματικά χαρακτηριστικά του νερού

2.1.4. Φασματικές Αλλαγές με την Αύξηση του Βάθους

Το Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6) παρουσιάζει τα φασματικά χαρακτηριστικά του ηλιακού φωτός καθώς αυτό διαπερνά ένα σώμα καθαρού νερού. Όπως φαίνεται, κοντά στην επιφάνεια το γενικό σχήμα της καμπύλης μοιάζει με το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά όσο αυξάνει το βάθος, το νερό επηρεάζει σταδιακά περισσότερο την φασματική σύσταση του φωτός.

Σε βάθος 20m υπάρχει λίγη ή καθόλου υπέρυθη ακτινοβολία, αφού το υδάτινο σώμα απορροφάει αυτά τα μήκη κύματος. Σε τέτοια βάθη, μόνο η μπλε-πράσινη ακτινοβολία παραμένει, οπότε αυτά τα μήκη κύματος είναι διαθέσιμα για την σκέδαση πίσω στην ατμόσφαιρα, τόσο από το νερό, όσο και από τον βυθό του υδάτινου σώματος.

Η φωτεινότητα εντός του νερού σε ένα βάθος z δίδεται από την παρακάτω συνάρτηση (Campbell, 1996).

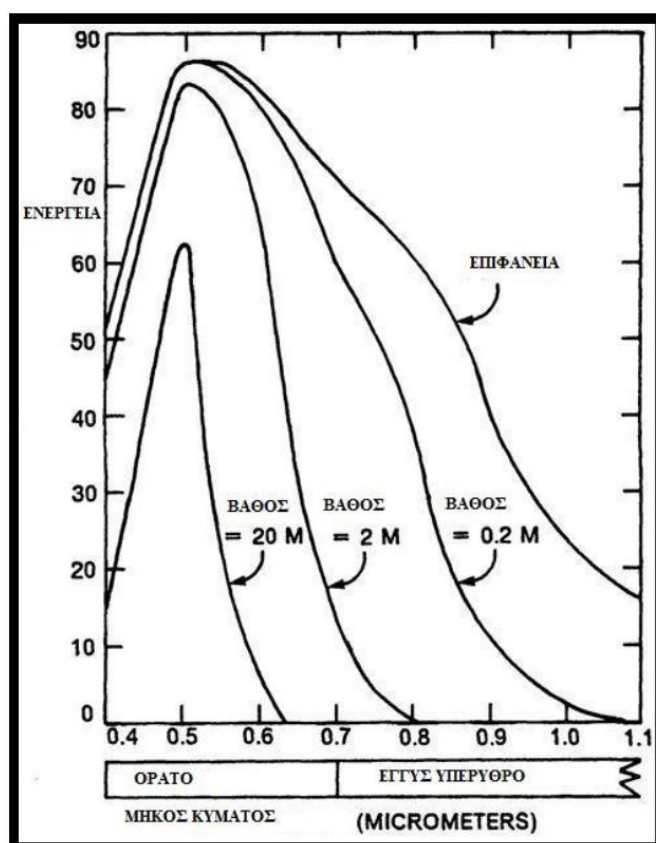
$$E_z = E_0 e^{-kz},$$

όπου E_0 η φωτεινότητα στην επιφάνεια του νερού,

E_z η φωτεινότητα σε βάθος z ,

και k ο συντελεστής εξασθένησης (m^{-1}).

Ο συντελεστής εξασθένησης (*attenuation coefficient*) k περιγράφει τον ρυθμό με τον οποίο το φως εξασθενεί όσο το βάθος αυξάνεται.



Σχήμα 6. Διαπερατότητα του φωτός μέσα από καθαρό νερό σε διάφορα βάθη (Τσακίρη-Στρατή, 2010, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ)

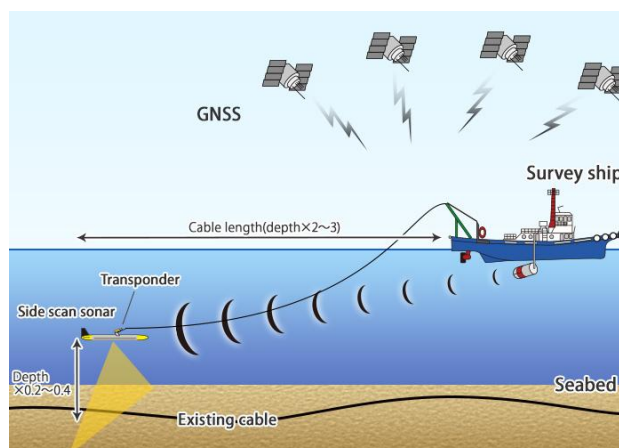
2.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ

Η έννοια της χαρτογράφησης του πυθμένα αφορά την κατηγοριοποίηση των κύριων τύπων κάλυψης του βυθού σε μία θαλάσσια περιοχή (άμμος, βράχια, βραχώδεις πλάκες, λιβάδια ποσειδωνίας κλπ). Σε περιπτώσεις όπου η περιοχή μελέτης είναι μικρή και οι περιβαλλοντικές συνθήκες το επιτρέπουν, η χαρτογράφηση πυθμένα μπορεί να πραγματοποιηθεί με επί τόπου παρατήρηση του βυθού (κατάδυση ή παρατήρηση από την επιφάνεια) και δημιουργία σκαριφήματος. Η διαδικασία αυτή, όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανέφικτη, οπότε έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι χαρτογράφησης του πυθμένα, τόσο για επιτόπια εξέταση του φαινομένου (ηχοβολιστής) όσο και από απόσταση (ταξινόμηση πολυφασματικής εικόνας).

2.2.1. Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης (Side Scan Sonar)

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί έναν διπλό πομποδέκτη προσαρμοσμένο σε μια συσκευή που μοιάζει με τορπίλη (Καφιμάλης και Παυλόπουλος, 2009), η οποία ρυμουλκείται από το ερευνητικό σκάφος (Σχήμα 7)³. Παράγονται δύο ηχητικές δέσμες, η μια δεξιά και η άλλη αριστερά της νοητής πορείας του σκάφους, με αποτέλεσμα την απεικόνιση των ψευδοτριδιάστατων ανωμαλιών του πυθμένα. Οι Ηχοβολιστές Πλευρικής Σάρωσης δεν παρέχουν ακριβή βυθομετρικά δεδομένα, αλλά χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τον εντοπισμό ναυαγίων, βλαβών σε υποβρύχια καλώδια και για τον εντοπισμό μεγάλης έκτασης γεωλογικών φαινομένων. Ειδικά κατά τη δεκαετία του 1980 (Chakraborty and Fernandes, 2012), χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα από την Αμερικανική Εταιρεία Γεωλογικών Ερευνών (USGS) τα ηχοβολιστικά πλευρικής σάρωσης GLORIA (συχνότητα λειτουργίας 6 KHz) και SEAMARC (συχνότητα λειτουργίας 12 KHz).

³www.ocean-eng.com



Σχήμα 7. Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης

2.2.2. Ταξινόμηση πολυφασματικής εικόνας

Με τον όρο ταξινόμηση ψηφιακής πολυφασματικής εικόνας, υποδηλώνεται η διαδικασία κατηγοριοποίησης των εικονοστοιχείων σε ομάδες, ή τάξεις, με κοινά χαρακτηριστικά, από πλευράς φασματικής απόκρισης ή/και υψής.

Οι μέθοδοι πολυφασματικής ταξινόμησης χωρίζονται στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση (supervised classification), στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (unsupervised classification), ενώ τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η αντικειμενοστραφής ανάλυση των τηλεπισκοπικών δεδομένων (object oriented classification).

Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση

Κατά την επιβλεπόμενη ταξινόμηση, μια από τις πιο βασικές διαδικασίες είναι ο καθορισμός των θεματικών τάξεων, δηλαδή των καλύψεων γης/πυθμένα. Η επιλογή του αριθμού των τάξεων εξαρτάται από τον ερευνητή, ο οποίος με βάση τις γνώσεις και την εμπειρία του κάνει την τελική επιλογή του αριθμού αυτών. Στη συνέχεια, ο ερευνητής προσδιορίζει στην υπό μελέτη εικόνα αντιπροσωπευτικά δείγματα, τα λεγόμενα δεδομένα εκπαίδευσης, των θεματικών τάξεων που καλύπτουν την επιφάνεια μελέτης. Η επιλογή αυτή των δειγμάτων καθορίζεται και εξαρτάται από τις πληροφορίες που κατέχει ο μελετητής για την συγκεκριμένη περιοχή όσον αφορά την πραγματική κάλυψη της επιφάνειας γης/πυθμένα.

Τα δεδομένα εκπαίδευσης, τα οποία είναι ομάδες αποτελούμενες από εικονοστοιχεία, χρησιμοποιούνται για να «εκπαιδεύσουν» το σύστημα να αναγνωρίζει φασματικά παρόμοια αντικείμενα ή εμφανίσεις. Ένας ειδικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των φασματικών υπογραφών των διαφόρων δεδομένων εκπαίδευσης. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει υπόψη διάφορες στατιστικές παραμέτρους, όπως ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση, και οι πίνακες μεταβλητότητας και συμμεταβλητότητας, οι οποίες χαρακτηρίζουν μοναδικά τα δεδομένα κάθε θεματικής τάξης. Στη συνέχεια, κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας μετά από σύγκριση της δικής του υπογραφής με τις υπογραφές της κάθε θεματικής τάξης κατηγοριοποιείται στην κατάλληλη τάξη.

Μη Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση

Κατά την μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση δεν χρησιμοποιούνται δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων σε φασματικές ομάδες καθορίζεται από την φασματική υπογραφή τους. Μετά την ολοκλήρωση της ταξινόμησης, με την βοήθεια ειδικών αυτοψιών, ο ερευνητής αναγνωρίζει και ελέγχει τις θεματικές τάξεις.

Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση θεωρείται λιγότερο αποτελεσματική από την επιβλεπόμενη ταξινόμηση λόγω της απουσίας διαδικασίας καθορισμού δεδομένων εκπαίδευσης, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου των αποτελεσμάτων. Από την άλλη, η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση θεωρείται ταχύτερη καθώς περιλαμβάνει λιγότερα στάδια μελέτης.

Αντικειμενοστραφής Ταξινόμηση

Η μεθοδολογία αυτή λαμβάνει υπόψη της την τηλεπισκοπική απεικόνιση ως ένα σύνολο ομοιογενών περιοχών-αντικειμένων. Στην αρχική εικόνα εφαρμόζονται διαδικασίες κατάτμησης (segmentation) με τις οποίες η εικόνα μετατρέπεται σε ένα σύνολο πρωτογενών αντικειμένων.

Οι αλγόριθμοι κατάτμησης εικόνων γενικά δεν αποσκοπούν να εντοπίσουν και να οριοθετήσουν σημασιολογικά αντικείμενα, αλλά να παράγουν πρωτογενή αντικείμενα τα οποία στη συνέχεια θα υποστούν διαδικασίες επεξεργασίας και ταξινόμησης από «έξυπνους» αλγόριθμους.

Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται στην ιεραρχία, μέσω της οποίας υλοποιείται μια αντικειμενοστραφής αναπαράσταση των προς ταξινόμηση κατηγοριών και ταυτόχρονα παρέχεται το λογικό πλαίσιο με βάση το οποίο πραγματοποιούνται οι διαδικασίες κληροδότησης χαρακτηριστικών από ορισμένες γενικότερες κατηγορίες σε πιο ειδικές.

Οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης σε ένα αντικειμενοστραφές σύστημα ανάλυσης εικόνας μπορεί να αφορούν το χρώμα, το σχήμα, την υφή, τη σχέση του αντικειμένου με το περιβάλλον του, την τοπολογία του με άλλες κατηγορίες, την αλληλοκάλυψη με άλλα επίπεδα ανάλυσης κ.α.

2.3. ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.3.1. Βαθυμετρία από Πολυφασματικά Τηλεπισκοπικά Δεδομένα

Μέχρι σήμερα, τα πιο πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα MSB έχουν ληφθεί σε περιπτώσεις όπου οι περιοχές μελέτης χαρακτηρίζονται τόσο από νερά με χαμηλά ποσοστά ιζήματος, όσο και από ομοιογένεια πυθμένα και ποιότητας νερού. Μερικές τέτοιες περιπτώσεις είναι η ακτή της Florida (Lyzenga et al., 2006), τα νησιά της Χαβάης (Stumpf et al., 2003), η Καραϊβική (Ma et al., 2014), η Αυστραλιανή ακτή (Hamylton et al., 2015), η δυτική ακτή της νήσου Roatan στην Ονδούρα (Mishra et al., 2005). Σε αυτές τις εφαρμογές, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε επέτρεψε την εκτίμηση βάθους ακόμα και σε σημεία που βρίσκονται μέχρι και 30m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με σφάλμα μικρότερο των 2.5m. Η εφαρμογή μοντέλων που κάνουν χρήση τοπικής παλινδρόμησης, αν και είναι δύσκολα στην υλοποίησή τους, μπορούν να μειώσουν το σφάλμα ακόμα και στο 1m.

Τα τελευταία χρόνια, οι μελέτες της MSB επικεντρώνονται κυρίως στην ενίσχυση της εμπειρικής απόδοσης ενός μοντέλου χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως πραγματοποίηση γενικευμένης και τοπικής (global and local) παλινδρόμησης (Su et al., 2014), μηχανική μάθηση (machine learning) (Jena et al., 2012), μοντέλα ασαφούς λογικής (fuzzy models) (Kobryn et al., 2013; Corucci et al., 2011; Mishra et al., 2007) και αναλυτικές προσεγγίσεις (Brando and Dekker, 2003; Hoge and Lyon, 1996; Lee et al., 1998).

Οι εν λόγω τεχνικές βελτιστοποίησης εφαρμόστηκαν κυρίως σε γεωγραφικές περιοχές με ευνοϊκές συνθήκες για την εξαγωγή βαθυμετρικής πληροφορίας από τηλεπισκοπικά δεδομένα. Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετές μελέτες οι οποίες εξετάζουν αυτό το θέμα σε πιο απαιτητικά και οπτικά περίπλοκα ύδατα, όπως είναι η Βαλτική θάλασσα (Vahtmaee and Kutser, 2016; Vatmaee et al., 2006) και η Σιγκαπούρη (Bramante et al., 2013).

Σημαντικά βήματα βελτίωσης αυτού του επιστημονικού θέματος, επίσης, επιτεύχθηκαν με την εφαρμογή φυσικών μοντέλων κατά την διαδικασία της εκτίμησης βαθών, όπως είναι η χρήση μοντέλων μεταφοράς ακτινοβολίας προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη στοιχείων στο σώμα του νερού που επηρεάζουν τις οπτικές ιδιότητες του (Spitzer and Dirks, 1986; Mobley et al., 2005; Brando et al., 2009; Giardino et al., 2012; Pope and Fry, 1997).

Η ποιότητα ενός βαθυμετρικού μοντέλου μπορεί, επίσης, να ενισχυθεί χρησιμοποιώντας τηλεπισκοπικούς δέκτες υψηλότερης ακρίβειας σε ό,τι αφορά τη χωρική, ραδιομετρική και ποσοτική ανάλυση. Μερικοί τέτοιοι δέκτες είναι τα δορυφορικά συστήματα Landsat 8, Hyperion ή εμπορικά συστήματα όπως IKONOS, QuickBird, WorldView-2 (Lee et al., 2012). Τα συστήματα αυτά παρέχουν περισσότερες πληροφορίες στο εκάστοτε μοντέλο σχετικά με την υπό μελέτη περιοχή και αναμένεται να ενισχύσουν την αποδοτικότητά του.

Συγκεκριμένα, σχετικά με την υψηλή χωρική ανάλυση ενός δέκτη, αυτή μπορεί να αποτελέσει είτε πλεονέκτημα είτε μειονέκτημα σε μία εφαρμογή βαθυμετρίας. Αφενός παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης σύμπτωσης των συντεταγμένων (x,y) των σημείων ελέγχου με τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία, οπότε επιτυγχάνεται καλύτερη βαθμονόμηση του μοντέλου, καθώς και τη δυνατότητα αναγνώρισης μικροσκοπικών στοιχείων τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στην ναυσιπλοΐα. Αφετέρου, τα δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης αποδίδουν με καλύτερη ακρίβεια τις διαφοροποιήσεις στην κάλυψη του πυθμένα, γεγονός που όχι μόνο επηρεάζει την απόδοση του μοντέλου, αλλά και συμβάλλει στη δημιουργία μίας πολύ πυκνής ψηφιδωτής επιφάνειας (π.χ. στην περίπτωση σχεδίασης ισοβαθών) (Paradouroulou et al., 2014).

Για να είναι όσο το δυνατό πιο αποτελεσματική η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων για εφαρμογές βαθυμετρίας, είναι ιδιαίτερα σημαντική η σωστή προ-επεξεργασία τους, ατμοσφαιρική διόρθωση και αφαίρεση λαμπυρίσματος (Botha, Brando and Dekker, 2016; Eugenio et al., 2015; Mahiny and Turner, 2007; Chavez et al., 1996). Επίσης, απαραίτητη είναι η παράλληλη ύπαρξη επαρκών σημείων ελέγχου και δορυφορικών δεδομένων σε μία περιοχή για την αξιολόγηση της απόδοσης των βαθυμετρικών μοντέλων (Hamylton, Hedley and Beaman, 2015).

Πίνακας 1. Τα χαρακτηριστικά των επικρατέστερων βαθυμετρικών μοντέλων

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ, ΕΤΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ	RMSE (m)	ΔΕΚΤΗΣ/ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (m)	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΕΥΡΟΣ ΒΑΘΟΥΣ (m)
Lyzenga et al., 2006	1.74 – 3.02	IKONOS / 3.2	Cancun, Duck NC, Kahana Bay, Carysoft Reef, Pearl Harbour, Maunaloa Bay	16 - 24
Stumpf et al., 2003	0.2 – 0.7	IKONOS / 3.2	Kure Atoll – Hawaiian Islands	25 - 30

Σε πιο πρόσφατα επιστημονικά άρθρα, οι Pacheco et al. (2014) εξέτασαν την αποτελεσματικότητα του βαθυμετρικού μοντέλου Lyzenga σε ρηχά νερά (0-12 m) στη νότια ακτή της Πορτογαλίας, καθώς και το πώς αυτή επηρεάζεται από τα διαθέσιμα βαθυμετρικά δεδομένα. Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ανοιχτά πολυφασματικά δεδομένα του δορυφόρου Landsat 8 και σημεία ελέγχου υψηλής ανάλυσης LiDAR (2m), μέτριας ανάλυσης LiDAR (30 m) και από βαθύμετρο. Προέκυψε πως το μοντέλο ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά παρά την πολυπλοκότητα

της μορφολογίας, ενώ έδωσε αποτελέσματα υψηλότερης ακριβείας για βάθη 0-8 m. Σχετικά με τα βαθυμετρικά δεδομένα, στο άρθρο αναφέρεται πως είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς η απουσία ή χαμηλή ποιότητα αυτών μπορεί να οδηγήσει στην αποτυχία του μοντέλου στην ίδια περιοχή. Τέλος, αναφέρεται πως η ακρίβεια του βαθυμετρικού μοντέλου επηρεάζεται εν μέρει και από τη διαύγεια του νερού αλλά και από τις κυματικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής μελέτης.

Οι Najhan Md Said et al. (2017) στην έρευνα που διεξήγαν με σκοπό την εκτίμηση της ακριβείας με την οποία προσδιορίζουν το βάθος οι πιο δημοφιλείς αλγόριθμοι για εφαρμογές σε ρηχά νερά, εφάρμοσαν τα μοντέλα Stumpf και Lyzenga σε δορυφορικές εικόνες Pleiades, ενώ για τη συλλογή βαθυμετρικών σημείων χρησιμοποίησαν βαθύμετρο απλής δέσμης. Στο άρθρο αυτό γίνεται αναφορά και στην δυσκολία διαχείρισης δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης (όπως οι Pleiades) εξαιτίας της μεγάλης υπολογιστικής ισχύος που αυτές απαιτούν. Συμπερασματικά, και τα δύο μοντέλα έδωσαν αξιοπρεπή αποτελέσματα, με αυτό του Stumpf να εμφανίζεται ευκολότερο και αμεσότερο στη χρήση, αλλά να αποδίδει πιο χονδρικά τη μορφή του πυθμένα. Στο εν λόγω άρθρο έγινε εφαρμογή της ελαχιστοτετραγωνικής εξίσωσης κατά την διαδικασία βαθμονόμησης των μοντέλων, γεγονός που βελτίωσε κατά περίπου 10% τα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων. Τα αποτελέσματα αυτά ελέγχθηκαν επίσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IHO (International Hydrographic Organization) και προέκυψε ότι το μοντέλο Stumpf έδωσε καλύτερη εκτίμηση βάθους από το Lyzenga.

Ο Πολωνός Andrzej Chybicki (2017) ασχολήθηκε με τη βαθυμετρία στη νότια ακτή της Βαλτικής θάλασσας χρησιμοποιώντας δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 2 και επίγεια δεδομένα από βαθύμετρο απλής δέσμης. Στα πλαίσια του άρθρου εφαρμόστηκαν δύο βαθυμετρικά μοντέλα, αυτό της γραμμικής αναλογίας Stumpf και αυτό της αναλυτικής αντικατάστασης στην εξίσωση ακτινοβολίας που καταγράφεται από τον δέκτη (κεφάλαιο 2.1.2.), ενώ παράλληλα εξετάστηκε πώς ο τύπος πυθμένα επηρεάζει τα εκτιμώμενα βάθη αναπτύσσοντας έναν συντελεστή ποιότητας. Τα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων ήταν ικανοποιητικά για την εν λόγω περιοχή μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη και την ιδιαιτερότητα αυτής εξαιτίας της αυξημένης θολότητας των υδάτων. Μία επίσης ενδιαφέρουσα παρατήρηση αφορά στο γεγονός ότι το μέγιστο βάθος που μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση των βαθυμετρικών μοντέλων δεν μπορεί να προβλεφθεί εκ των προτέρων, καθώς ποικίλει στον χρόνο και στον χώρο. Παράλληλα αναφέρεται ότι και η χρονική διαφορά μεταξύ της λήψης των δορυφορικών και επίγειων δεδομένων δύναται να επηρεάσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τέλος, σύμφωνα με τον δείκτη ποιότητας, τα μοντέλα έχουν την ικανότητα να αυτό-προσαρμόζονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βαθυμετρικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

2.3.2. Χαρτογράφηση Πυθμένα

Η χαρτογράφηση του πυθμένα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια όπου τα παράκτια συστήματα βάλλονται από την αλόγιστη εκμετάλλευση και χρήση τους από τους ανθρώπους. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μόλυνση των υδάτων, η διαταραχή των υδάτινων οικοσυστημάτων εντείνεται από την ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα σε παράκτιες περιοχές. Ειδικά στην περίπτωση της Μεσογείου Θάλασσας, όπου πρόκειται για μία κλειστή λεκάνη και το νερό ανανεώνεται με πολύ αργούς ρυθμούς, η παρακολούθηση του πυθμένα και η διαχρονική χαρτογράφησή του είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς εκεί φιλοξενούνται πλήθος ζωικών και φυτικών οργανισμών απαραίτητων για την προστασία του περιβάλλοντος.

Πλέον, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες μεθόδους εντοπισμού, χαρτογράφησης και παρακολούθησης θαλάσσιων οικοσυστημάτων, κυρίως χάρη στην αποδοτικότητά τους πάνω από μεγάλες και απομακρυσμένες περιοχές, τόσο από άποψη χρόνου όσο και κόστους (Hossain et al., 2014; Knudby and Nordlund, 2011; Mumby et al., 1999). Η ανάλυση διαχρονικών τηλεπισκοπικών δεδομένων επιτρέπει την αναδρομική ποσοτική εκτίμηση

των λιβαδιών, τα οποία αποτελούν ένα από τα πιο ευαίσθητα υδάτινα οικοσυστήματα (Dekker et al., 2006). Συγκεκριμένα για τη χαρτογράφηση των λιβαδιών ποσειδωνίας της Μεσογείου με χρήση δορυφορικών εικόνων έχει διεξαχθεί πλήθος ερευνών (Borfecchia et al., 2013; Fornes et al., 2006; Matta et al., 2014; Pasqualini et al., 2005), σε δεδομένα IKONOS, RapidEye, SPOT και Sentinel 2.

Πρόσφατα, οι Eugenio et al. (2015), συνέταξαν άρθρο σχετικά με τη δημιουργία υψηλής ανάλυσης βαθυμετρικών χαρτών και τη χαρτογράφηση των βενθικών οικισμών σε ρηχά νερά από πολυφασματικά δεδομένα, και συγκεκριμένα από εικόνες WorldView-2. Στο εν λόγω άρθρο, παράλληλα με τη διαδικασία ταξινόμησης, που αποτελεί τη συνήθη πρακτική για τη χαρτογράφηση του πυθμένα (κεφάλαιο 2.2.2.), έγινε χρήση κανονικοποιημένων δεικτών κάλυψης πυθμένα, με αποτέλεσμα η χαρτογράφηση να είναι επιτυχής κατά 70% παρά την πολυπλοκότητα της περιοχής (ακτές Μαλαισίας) και τα περιορισμένα επίγεια δεδομένα. Μία επίσης πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι και στην περίπτωση της χαρτογράφησης του πυθμένα είναι απαραίτητο να προηγηθούν οι διαδικασίες επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα για τον δορυφόρο Sentinel 2, ο οποίος εξετάζεται και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, σε έρευνα που διεξήχθη στα νερά του Θερμαϊκού κόλπου εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι επιβλεπόμενης ταξινόμησης οι οποίες εφαρμόστηκαν σε εικόνα διορθωμένη από επιδράσεις της ατμόσφαιρας και της στήλης ύδατος. Ο συνδυασμός των προαναφερθέντων διαδικασιών οδήγησε στη λεπτομερή χαρτογράφηση των λιβαδιών ποσειδωνίας στην εν λόγω περιοχή (Traganos and Reinartz, 2017).

Ανάλογη έρευνα για τη σημασία των λιβαδιών ποσειδωνίας έχει διεξαχθεί στην περιοχή της Βάρκιζας, κάνοντας όμως χρήση παραδοσιακών μεθόδων χαρτογράφησης πυθμένα (Tzagkarakis, 2016).

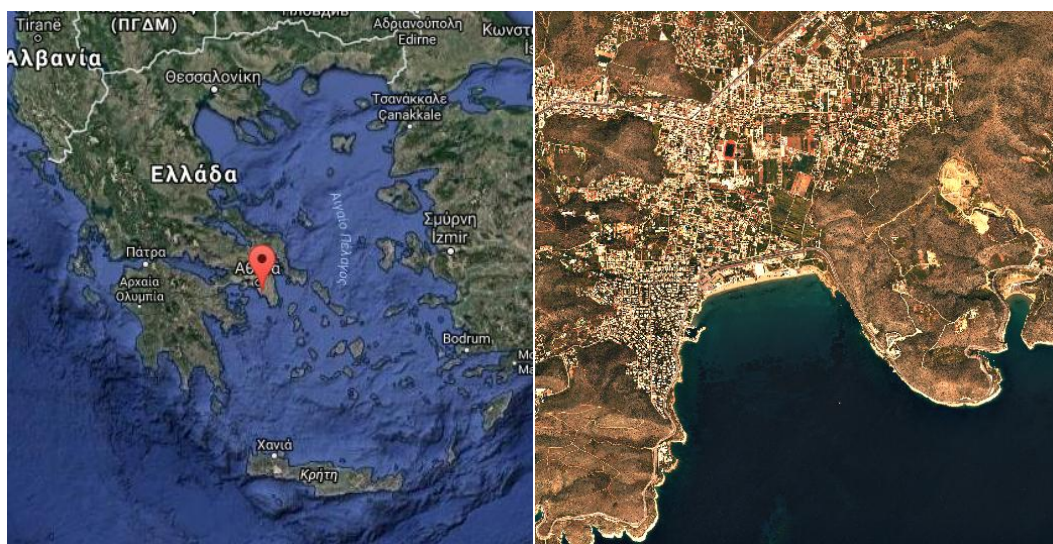
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ & ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ

3.1. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την μελέτη τεχνικών βαθυμετρίας και χαρτογράφησης επιλέχθηκαν δυο περιοχές μελέτης, ήτοι (i) η παραλία Λαμπαγιαννά Αργολίδας, για το αρχαιολογικό ενδιαφέρον που παρουσιάζουν και για την μελέτη της περιοχής στο πλαίσιο και άλλων συναφών διπλωματικών εργασιών και (ii) ο κόλπος της Βάρκιζας, κυρίως λόγω των διαθέσιμων πυκνών χωρικά βαθυμετρικών δεδομένων.

3.1.1. Κόλπος Βάρκιζας

Η Βάρκιζα αποτελεί παραθαλάσσιο οικισμό της Βάρης και ανήκει στην περιφέρεια της Αττικής. Βρίσκεται 25 χλμ νότια του κέντρου της Αθήνας και βρέχεται από τον Σαρωνικό κόλπο (Σχήμα 8). Ο κόλπος της Βάρκιζας είναι σχήματος U, ημι-εκτεθειμένος στον Νότο και η διεύθυνση του είναι Δ-Α.



Σχήμα 1. Ο κόλπος της Βάρκιζας και η θέση του στο χάρτη

3.1.2. Παραλία Λαμπαγιαννά Αργολίδας

Ιστορικά Στοιχεία

Μεγάλης έκτασης βυθισμένο οικισμό της 3ης χιλιετίας π.Χ. έφερε στο φως η έρευνα συνεργασίας της Εφορείας Εναλίων Αρχαιοτήτων και του Πανεπιστημίου της Γενεύης υπό την αιγίδα της Ελβετικής Αρχαιολογικής Σχολής, στον όρμο Κοιλιάδας στην Αργολίδα. [...]

Η επιστημονική ομάδα αναζητά τα ίχνη προϊστορικής ανθρώπινης δραστηριότητας στην ανατολική πλευρά του Αργολικού Κόλπου. Η φετινή ερευνητική περίοδος (2015) ξεκίνησε στις 13 Ιουλίου και επικεντρώθηκε στην παραλία "Λαμπαγιαννάς", όπου είχε εντοπιστεί προϊστορικός οικισμός από την ερευνητική περίοδο του 2014.

Πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη επιφανειακή έρευνα σε όλο τον όρμο. Ο οικισμός, που βρίσκεται σε βάθος από 1 μ. έως 3 μ., έχει έκταση τουλάχιστον 12 στρέμματα και ήταν οχυρωμένος και παραθαλάσσιος. Εντοπίζεται η θεμελίωση πληθώρας κτισμάτων όλων των χαρακτηριστικών πρωτοελλαδικών τύπων (ορθογώνια, κυκλικά, αψιδωτά) και πλακόστρωτα (πιθανώς από δρόμους).

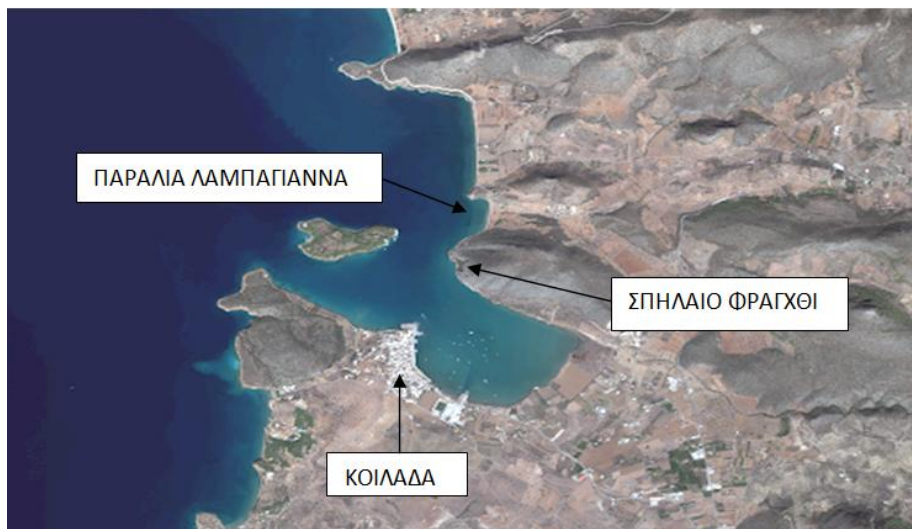
Εντοπίστηκε επίσης τμήμα του οχυρωματικού τείχους του οικισμού και τουλάχιστον τρεις υπερμεγέθεις (18X10 μ) πεταλόσχημες θεμελιώσεις προσαρτημένες στην γραμμή του τείχους (πιθανόν μέρος της οχύρωσης, ίσως πύργοι). Η κεραμική που περισυλλέγη από το χώρο του

οικισμού, είναι χαρακτηριστική της Πρωτοελλαδικής ΙΙ περιόδου (μέσα 3ης χιλιετίας π.Χ., περίπου 2500 π.Χ.). Βρέθηκαν επίσης πληθώρα λίθινων εργαλείων, λεπίδες οψιανού και άλλα αντικείμενα. Η περαιτέρω έρευνα του εκτεταμένου οικισμού, που έρχεται να προστεθεί στο πυκνό δίκτυο παραθαλάσσιων οικισμών της πρώιμης Χαλκοκρατίας στον Αργολικό Κόλπο (λ.χ. Λέρνα, Ασίνη, Σαλάντι κ.ά.), αναμένεται να δώσει πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία για την κατοίκηση, το εμπόριο και τη ναυτιλιακή δραστηριότητα της περιόδου.

(δελτίο τύπου του Υπουργείου Πολιτισμού, Παιδείας και Θρησκευμάτων - 12/8/2015)

Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

Το σπήλαιο Φράγγχι και ο βυθισμένος οικισμός της 3^{ης} χιλιετίας π.Χ. βρίσκονται στη ΝΔ Αργολίδα και συγκεκριμένα στον όρμο της Κοιλιάδας στην επαρχία της Ερμιονίδας (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Ο βυθισμένος οικισμός στην παραλία Λαμπαγιαννά και το σπήλαιο Φράγγχι

Μία από τις παραλίες της Κοιλιάδας είναι αυτή του «Λαμπαγιαννά», στην οποία ανακαλύφθηκε ο βυθισμένος οικισμός. Η ακτή καλύπτεται από βότσαλα και η κατεύθυνσή της είναι Β-ΒΑ, Ν-ΝΔ. Ο πυθμένας παρουσιάζει σχετικά ήπια κλίση και μικρό βάθος. Η περιοχή που πραγματοποιείται η αρχαιολογική έρευνα εκτείνεται σε απόσταση 100m, περίπου, από την ακτή με μέγιστο βάθος τα 3m.

Η συγκεκριμένη παραλία επηρεάζεται πολύ από τον δυτικό άνεμο (Ζέφυρος/Πουνέντες), καθώς παρουσιάζει επιφανειακό κυματισμό προς την παραλία και μεταφέρει υλικό προς αυτή. Επίσης, αυτός ο άνεμος δυσχεραίνει την ορατότητα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια σε συνδυασμό με το μικρό βάθος δημιουργούν θολότητα.

3.2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ & ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ

Οι προεπεξεργασίες που συνήθως εφαρμόζονται επί των τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι αυτές που ακολουθούν.

Ατμοσφαιρική Διόρθωση

Η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος που λαμβάνει ένας δορυφορικός δέκτης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (*Mather, 1999*):

- Την ανάκλαση από τον στόχο.
- Την κλίση και τον προσανατολισμό της επιφάνειας σε σχέση με το ηλιακό αζιμούθιο.
- Την ατμοσφαιρική επίδραση.
- Τη γωνία λήψης του δέκτη.
- Τη γωνία του ηλιακού ύψους.

Είναι, λοιπόν, φανερό ότι η ατμόσφαιρα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξασθένιση του σήματος που φτάνει στον δέκτη του δορυφόρου. Αν και η τεχνολογία σήμερα έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό και οι δέκτες-σαρωτές καταγράφουν με τον καλύτερο τρόπο την ανακλώμενη ακτινοβολία, αρκετές φορές η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι μεγάλη και ειδικότερα στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται σε μια επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα μέρος της ακτινοβολίας να σκεδαστεί, ένα άλλο να απορροφηθεί και το υπόλοιπο να φτάσει στο δορυφορικό αισθητήρα. Η επιφάνεια του εδάφους, όμως, δεν δέχεται μόνο την άμεση ακτινοβολία του ήλιου αλλά και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία η οποία προέρχεται από τη σκέδαση της άμεσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα πριν αυτή φτάσει στο έδαφος.

Η διάχυτη ακτινοβολία που φτάνει στον δορυφορικό αισθητήρα προέρχεται είτε κατευθείαν από την ατμόσφαιρα είτε από την *ακτινοβολία διαδρομής*, την ανακλώμενη –δηλαδή– στην επιφάνεια του εδάφους και σε νέφη. Έτσι, η ακτινοβολία που φτάνει στο δορυφορικό αισθητήρα αποτελεί το άθροισμα όλων των παραπάνω συνιστωσών. Συνεπώς, η τιμή που καταγράφεται σε οποιαδήποτε θέση του εικονοστοιχείου μιας δορυφορικής εικόνας δεν αποτελεί μια καταγραφή της πραγματικής ανακλώμενης (ή εκπεμπόμενης σε ό,τι αφορά στο θερμικό υπέρυθρο) από το έδαφος ακτινοβολίας για το συγκεκριμένο σημείο αφού το σήμα του μεταβάλλεται από την απορρόφηση και τη σκέδαση τμήματος της ακτινοβολίας.

Για να υπολογιστεί η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ανακλώμενη (ή στην εκπεμπόμενη) από την επιφάνεια ακτινοβολία απαιτείται η γνώση διαφόρων παραμέτρων (συνολική ποσότητα υδρατμών, φασματική οπτική πυκνότητα αερολυμάτων, κλπ.) που καθορίζουν τα οπτικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας κατά τη στιγμή της δορυφορικής λήψης. Η ατμοσφαιρική διόρθωση έγκειται πρακτικά στην εξάλειψη από το σήμα τόσο της επίδρασης της ατμοσφαιρικής απορρόφησης και της σκέδασης, όσο και των συνιστωσών ακτινοβολίας που προέρχονται από γειτονικά του στόχου εικονοστοιχεία. Η ατμοσφαιρική διόρθωση προηγείται των άλλων διορθώσεων.

Αφαίρεση Λαμπυρίσματος

Το λαμπύρισμα της επιφάνειας της θάλασσας (*sun glint*) είναι ένα πρόβλημα που εμφανίζεται συχνά στις περιπτώσεις MSB, όπου κύριο αντικείμενο μελέτης είναι η θάλασσα. Οφείλεται στην αντανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας του ήλιου από την επιφάνεια της θάλασσας και συγκεκριμένα όταν απαντούνται τα εξής χαρακτηριστικά:

- καθαρός ουρανός
- ρηχά νερά με επιφανειακό κυματισμό
- αισθητήρας υψηλής χωρικής ανάλυσης

- θέση ήλιου και γωνία καταγραφής δέκτη τέτοια ώστε η ακτινοβολία του ήλιου να αντανακλάται κατευθείαν πίσω σε αυτόν

Βιβλιογραφικά (*Doxani et al., 2013*) , προκύπτει ότι από τις δημοφιλέστερες μεθόδους αφαίρεσης λαμπυρίσματος (*Lyzenga, 1985 - Hochberg et al., 2003 - Hedley et al., 2005*) αποτελεσματικότερη για εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης είναι αυτή των Hedley et al. (2005).

Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται σε δύο βασικές υποθέσεις:

- I. η ακτινοβολία που καταγράφεται στον δορυφορικό δέκτη από μία θαλάσσια περιοχή στον δίαυλο που αντιστοιχεί στο υπέρυθρο τμήμα του μήκους κύματος του φωτός (NIR) οφείλεται αποκλειστικά στο λαμπύρισμα της επιφάνεια της θάλασσας και σε μία συνιστώσα η οποία είναι σταθερή σε όλο το δίαυλο και επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική διαύγεια. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο ότι το νερό παρουσιάζει υψηλή απορρόφηση στην υπέρυθρη ακτινοβολία.
- II. η ποσότητα του λαμπυρίσματος των ορατών διαύλων συνδέεται γραμμικά με την ποσότητα λαμπυρίσματος του υπέρυθρου διαύλου. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι απόλυτοι δείκτες διάθλασης για την υπέρυθρη ακτινοβολία και τις ορατές περιοχές του φάσματος είναι σχεδόν ίδιες (*Modley, 1994*).

Η μέθοδος των Hedley et al. (2005) κάνει χρήση δειγματικών περιοχών προκειμένου να προσδιοριστεί η γραμμική σχέση ανάμεσα στις τιμές ακτινοβολίας των ψηφίδων στον εγγύς υπέρυθρο δίαυλο και στον καθένα από τους ορατούς διαύλους. Ως δειγματικές περιοχές επιλέγονται περιοχές της εικόνας οι οποίες πληρούν τα εξής χαρακτηριστικά:

- καλύπτουν ομογενή περιοχή
- απεικονίζουν εύρος λαμπυρίσματος

Για τους παραπάνω λόγους, συνήθως επιλέγονται περιοχές όπου το βάθος του νερού είναι μεγάλο όποτε τόσο η απορρόφηση της υπέρυθρης περιοχής του φάσματος μπορεί να θεωρηθεί πλήρης, όσο και η περιοχή της εικόνας ομοιογενής.

Για κάθε ορατό δίαυλο οι τιμές των ψηφίδων στις επιλεγμένες περιοχές σχετίζονται γραμμικά με τις αντίστοιχες τιμές του υπέρυθρου διαύλου. Η διόρθωση του λαμπυρίσματος για κάθε ψηφίδα σε κάθε ορατό δίαυλο γίνεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$R'_i = R_i - b_i (R_{NIR} - \min_{NIR}),$$

όπου R'_i η διορθωμένη από το λαμπύρισμα τιμή ακτινοβολίας του εικονοστοιχείου στο κανάλι i ,

R_i η αρχική τιμή ακτινοβολίας του εικονοστοιχείου στο κανάλι i ,

b_i η κλίση του αποτελέσματος της παλινδρόμησης,

R_{NIR} η τιμή ακτινοβολίας του εικονοστοιχείου στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι (NIR),

και \min_{NIR} η ελάχιστη τιμή ακτινοβολίας που καταγράφεται στον δίαυλο της υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) και η οποία προσδιορίζεται από στις ψηφίδες της δειγματικής περιοχής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι συναντώνται περιπτώσεις όπου το λαμπύρισμα έχει κορέσει σε τέτοιο βαθμό τον δέκτη ώστε στις θέσεις της εικόνας όπου είναι έντονο το φαινόμενο δεν μπορεί να εξαχθεί πληροφορία για την αντανάκλαση από το σώμα του νερού και από το βυθό (*Kay et al., 2009*).

Γεωμετρική Αναγωγή

Η δορυφορική εικόνα, ως πρωτογενές δεδομένο, εμφανίζει γεωμετρικές παραμορφώσεις οι οποίες σχετίζονται με τα εξής (Mather, 1999):

- Προοπτική απεικόνιση του συστήματος καταγραφής.
- Η κίνηση του συστήματος του σαρωτή.
- Η κίνηση ή/ και σταθερότητα του συστήματος.
- Η ταχύτητα και το ύψος του συστήματος.
- Το ανάγλυφο της γήινης επιφάνειας.
- Η καμπυλότητα και η περιστροφή της Γης.

Μια δορυφορική εικόνα δεν έχει τις ιδιότητες ενός χάρτη και η κατάλληλη μετατροπή της για την απόκτηση της κλίμακας και των ιδιοτήτων προβολής ενός χάρτη ονομάζεται *γεωμετρική διόρθωση*. Στόχος της διόρθωσης αυτής είναι να μετασχηματίσει το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας (x,y) , το οποίο έχει παραμορφώσεις, σε ένα συγκεκριμένο σύστημα (X,Y) χαρτογραφικής προβολής. Είναι ένα σημαντικό βήμα στην επεξεργασία των δεδομένων διότι επιτρέπει την εισαγωγή τους σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ), την ταυτόχρονη χρήση τους μαζί με άλλα θεματικά επίπεδα πληροφορίας κ.α.

Για την διόρθωση της εικόνας ως προς τον χάρτη, κατ' αρχάς ορίζονται τα συστήματα του χάρτη (X,Y) και της εικόνας (x,y) . Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι θέσεις ενός αριθμού επίγειων σημείων ελέγχου (*GCPs*) τόσο στο σύστημα του χάρτη όσο και στο σύστημα της εικόνας.

Έστω ότι τα δύο συστήματα συντεταγμένων συσχετίζονται μέσω ενός ζεύγους συναρτήσεων χαρτογράφησης f και g ώστε:

$$X = f(x,y) \text{ \& } Y = g(x,y)$$

Επειδή οι συναρτήσεις χαρτογράφησης f και g δεν είναι γνωστές, γενικά χρησιμοποιείται μία πολυωνυμική συνάρτηση πρώτου, δευτέρου ή τρίτου βαθμού.

Συνήθως χρησιμοποιείται ο αφινικός μετασχηματισμός δύο διαστάσεων -ο οποίος είναι η γενική περίπτωση γραμμικού πολυωνυμικού μετασχηματισμού πρώτου βαθμού- διότι λόγω της μεγάλης απόστασης του δορυφόρου από τη γη τα σφάλματα αναγλύφου στην εικόνα είναι γενικά μικρά. Ο αφινικός μετασχηματισμός ορίζεται από τις σχέσεις

$$x = a_0 + a_1 X + a_2 Y \text{ και } y = b_0 + b_1 X + b_2 Y$$

όπου x, y οι συντεταγμένες ενός σημείου στην εικόνα,

X, Y οι συντεταγμένες του ίδιου σημείου στο σύστημα του χάρτη,

a_0, b_0 οι συνιστώσες μετάθεσης της αρχής του συστήματος (x,y) ως προς το (X,Y) ,

και a_i, b_i οι έξι άγνωστοι παράμετροι του αφινικού μετασχηματισμού.

Κάθε χαρτογραφικό σύστημα προβολής είναι σχεδιασμένο ώστε να αναπαριστά την επιφάνεια μιας σφαίρας ή ενός ελλειψοειδούς σε ένα επίπεδο και σχετίζεται με ένα σύστημα συντεταγμένων. Το σύστημα αυτό ακολουθεί έναν κάρναβο του οποίου κάθε θέση εκφράζεται με ένα αριθμητικό ζεύγος X και Y (στήλες και σειρές). Η μετατροπή των δεδομένων μιας εικόνας από ένα σύστημα καννάβου σε άλλο ονομάζεται *γεωμετρική αναγωγή*.

Μετά το πέρας των παραπάνω διεργασιών, τα εικονοστοιχεία του νέου συστήματος δεν είναι σε «ευθυγράμμιση» με το παλαιό και έτσι πρέπει να υπολογισθούν οι τιμές έντασης των ψηφίδων

στις νέες θέσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με την τεχνική της επαναδειγματοληψίας (*resampling*) σύμφωνα με μία εκ των μεθόδων που ακολουθούν.

Μέθοδος του εγγύτερου γείτονα

Με βάση τη μέθοδο αυτή, η ψηφιακή αριθμητική (DN) τιμή του νέου εικονοστοιχείου αντικαθίσταται με την τιμή του πλησιέστερου εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας. Οι προκύπτουσες νέες DN τιμές παραμένουν ίδιες με αυτές της αρχικής εικόνας. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι απλή, διατηρεί τις αρχικές τιμές, ωστόσο παρατηρούνται κάποια σφάλματα κυρίως σε γραμμικά στοιχεία της εικόνας.

Μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τον μέσο όρο DN τιμών των τεσσάρων εγγύτερων αρχικών εικονοστοιχείων για τον υπολογισμό της τιμής του νέου εικονοστοιχείου. Το τελικό αποτέλεσμα συνήθως είναι ικανοποιητικό, δεδομένου ότι λαμβάνονται υπόψη περισσότερες τιμές.

Μέθοδος της δικυβικής παρεμβολής

Είναι η πλέον πολύπλοκη και σύνθετη μέθοδος. Η δικυβική παρεμβολή χρησιμοποιεί τον μέσο όρο των 16 εγγύτερων εικονοστοιχείων για να αποδώσει DN τιμή στο υπό παρεμβολή εικονοστοιχείο. Η αισθητική των νέων εικόνων είναι ικανοποιητική, όμως οι εικόνες υφίστανται ισχυρή αλλοίωση λόγω εξομάλυνσης.

Χωρική Βελτίωση

Η χωρική βελτίωση μιας πολυφασματικής εικόνας επιτυγχάνεται με τη διαδικασία του *ransharpening* (παγχρωματική όξυνση, παν-όξυνση). Πρόκειται για μια διαδικασία συγχώνευσης εικόνων, συνήθως σε επίπεδο εικονοψηφίδας, με στόχο να επιτευχθεί η αύξηση της χωρικής ανάλυσης πολυφασματικών εικόνων αφενός με την εκμετάλλευση της χωρικής πληροφορίας από την υψηλής ανάλυσης παγχρωματική εικόνα και αφετέρου με ταυτόχρονη διατήρηση της ραδιομετρικής ανάλυσης της πολυφασματικής καταγραφής. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως συγχώνευση αναλύσεων (*resolution merge*), ολοκλήρωση εικόνων (*image integration*) ή και συγχώνευση δεδομένων από πολλαπλούς δέκτες (*multisensor data fusion*).

Η τεχνικές *ransharpening* εφαρμόζονται για να ενισχυθούν κάποια χαρακτηριστικά που δεν εμφανίζονται στις επί μέρους εικόνες, για να εντοπισθούν ενδεχόμενες αλλαγές σε διαχρονικά δεδομένα, για να ενισχυθεί η γεωμετρική διόρθωση και να βελτιωθεί η ταξινόμηση.

Στη διεθνή βιβλιογραφία περιγράφονται πολλοί και διαφορετικοί αλγόριθμοι για την εκτέλεση του *ransharpening*. Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι διάφορες παραλλαγές του μετασχηματισμού IHS, ο μετασχηματισμός Brovey, η ανάλυση των πρωτευουσών συνιστωσών (*principal component analysis, PCA*) και οι μέθοδοι που βασίζονται στην επεξεργασία κυματιδίων (*wavelet*), η κυριότερη από τις οποίες περιγράφεται από τους King et al. (2001). Ο πιο πρόσφατος και εξειδικευμένος αλγόριθμος βασίζεται στην ιδέα της μετατροπής και επεξεργασίας των εικόνων στον υπερσφαιρικό χώρο (*HCS fusion*), όπως προτάθηκε από τους Padwick et al. (2010).

Η εφαρμογή των αλγορίθμων για *ransharpening* ουσιαστικά περιλαμβάνει τα εξής:

- I. Η πολυφασματική (MS) εικόνα μεγεθύνεται (*up-sample*) και αντιστοιχίζεται με την παγχρωματική (PAN)
- II. Εφαρμόζεται ένας τελεστής συγχώνευσης σε κάθε ζεύγος αντίστοιχων εικονοψηφίδων της πολυφασματικής και της παγχρωματικής για να προκύψουν αυτές της τελικής.

Ειδικότερα, ένας συνηθισμένος αλγόριθμος για παγχρωματική όξυνση συνήθως περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- **Up-sampling:** αύξηση της ανάλυσης για τις διάφορες επί μέρους καταγραφές, ώστε να αποκτήσουν την ίδια (ονομαστική) ανάλυση με την παγχρωματική
- **Alignment:** ευθυγράμμιση των διαφόρων καταγραφών, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα λόγω εσφαλμένης ταύτισης (όταν τα δεδομένα προέρχονται από τον ίδιο δέκτη, το βήμα αυτό παραλείπεται)
- **Forward Transform:** μετασχηματισμός των καταγραφών στο πεδίο των χρωμάτων, όπου η ένταση είναι κάθετη στην πληροφορία χρώματος
- **Intensity Matching:** συνταύτιση των έγχρωμων καναλιών με το παγχρωματικό στον χώρο του μετασχηματισμού (π.χ. IHS)
- **Component Substitution:** αντικατάσταση του μετασχηματισμένου παράγοντα έντασης με το παγχρωματικό κανάλι
- **Reverse Transform:** αντίστροφος μετασχηματισμός, ώστε να επιστρέψει η εικόνα στον αρχικό χώρο χρωμάτων.

Ως προς τον έλεγχο του τελικού προϊόντος της διαδικασίας *pansharpening*, ιδιαίτερη σημασία έχει η διατήρηση της αρχικής φασματικής πληροφορίας της πολυφασματικής εικόνας (*MS*), καθώς και η χωρική ακρίβεια της παγχρωματικής (*PAN*) στην τελική εικόνα (*MS_PAN*).

Σύμφωνα με τους Wald et al. (1997) και Τσακίρη & Στρατή (2002), για να διατηρήσει η σύνθετη εικόνα τα φασματικά χαρακτηριστικά της αρχικής πολυφασματικής, πρέπει να ισχύουν οι τρεις παρακάτω κανόνες:

- I. Κάθε δίαυλος της σύνθετης εικόνας *MS_PAN*, υποβαθμισμένος στη χωρική ανάλυση της αρχικής πολυφασματικής *MS*, θα πρέπει φασματικά να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο όμοιος με τον αντίστοιχο δίαυλο της αρχικής.
- II. Κάθε δίαυλος της σύνθετης εικόνας *MS_PAN*, θα έπρεπε να έχει όμοια φασματικά χαρακτηριστικά με τον αντίστοιχο δίαυλο μιας πολυφασματικής εικόνας *MS**, που θα καταγράφονταν από πολυφασματικό αισθητήρα με χωρική ανάλυση ίση με αυτή της *PAN*, αν αυτός υπήρχε.
- III. Η σύνθετη εικόνα *MS*, στο σύνολό της θα πρέπει να έχει όμοια φασματικά χαρακτηριστικά με την εικόνα *MS**, που θα καταγράφονταν από πολυφασματικό αισθητήρα με χωρική ανάλυση ίση με αυτή της *PAN*, αν αυτός υπήρχε. (Τσακίρη & Στρατή, 2002).

Σύμφωνα τόσο με τις τεχνικές και τα κριτήρια ελέγχου που αναπτύχθηκαν παραπάνω, όσο και με την σύγχρονη βιβλιογραφία, ως βέλτιστη μέθοδος για τη διαδικασία του *pansharpening* επιλέχθηκε η HCS, η οποία μάλιστα εξ' αρχής προτάθηκε για δορυφόρους μεγάλης χωρικής ανάλυσης. Χαρακτηριστικά, σε ερευνητική μεταπτυχιακή εργασία του τομέα Τηλεπισκόπησης της σχολής ATM-ΕΜΠ, αναφέρεται για την μέθοδο HCS πως «βαθμολογήθηκε σταθερά στην πρώτη θέση σύμφωνα με 5 ποιοτικούς ελέγχους *pansharpening* σε δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης (*Worldview-2* και *Geoeye-1*). Μάλιστα, σύμφωνα με το μέσο όρο των 5 ποιοτικών ελέγχων, η μέθοδος αυτή εμφανίζει ένα προβάδισμα της τάξης του 10% σε σχέση με άλλες κλασσικές μεθόδους *pansharpening* (*HPF* και *LMVM*)» (Βαϊόπουλος, 2013).

Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στη μετατροπή του φυσικού χρωματικού χώρου (*native color space-NCS*) της εικόνας, στον υπερσφαιρικό χρωματικό χώρο (*hyperspherical color space-HCS*). Έστω μια εικόνα με *N* κανάλια (X_1, X_2, \dots, X_n): κατασκευάζεται μια μονοδιάστατη μεταβλητή της έντασης *I* και *N-1* γωνίες στην υπερ-σφαίρα (**ευθύς μετασχηματισμός**). Στη συνέχεια,

πραγματοποιείται **αντίστροφος μετασχηματισμός**, ώστε οι δίαυλοι της εικόνας από τον υπερσφαιρικό χρωματικό χώρο να μετατραπούν εκ νέου στον φυσικό χρωματικό χώρο.

Ευθύς μετασχηματισμός (A)

$$I = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2}$$

$$\varphi_1 = \text{atan} \frac{\sqrt{X_n^2 + X_{n-1}^2 + X_{n-2}^2 + \dots + X_2^2}}{X_1}$$

$$\varphi_{n-2} = \text{atan} \frac{\sqrt{X_n^2 + X_{n-1}^2}}{X_{n-2}}$$

$$\varphi_{n-1} = \text{atan} \frac{X_n}{X_{n-1}}$$

Αντίστροφος μετασχηματισμός (B)

$$X_1 = I_{adj} \cos \varphi_1$$

$$X_2 = I_{adj} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2$$

$$X_{n-1} = I_{adj} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \dots \sin \varphi_{n-2} \cos \varphi_{n-1}$$

$$X_n = I_{adj} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \dots \sin \varphi_{n-2} \sin \varphi_{n-1}$$

Η μέθοδος έχει προταθεί με δύο παραλλαγές, την απλοϊκή (*naïve mode*) και τη γρήγορη (*smart mode*).

Στην **απλοϊκή μέθοδο** τα βήματα έχουν ως εξής:

1. Υπολογισμός μέσων και τυπικών αποκλίσεων των PAN^2 και I^2 :

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \text{μέση απόκλιση } I^2 \\ \sigma_0 &= \text{τυπική απόκλιση } I^2 \\ \mu_1 &= \text{μέση απόκλιση } PAN^2 \\ \sigma_1 &= \text{τυπική απόκλιση } PAN^2 \end{aligned}$$

2. Εφαρμογή του ευθέως μετασχηματισμού (A)
3. Υπολογισμός της ποσότητας

$$P^2 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} (PAN^2 - \mu_1 + \sigma_1) + \mu_0 - \sigma_0$$

και μέσω αυτής προσδιορισμός της προσαρμοσμένης έντασης

$$I_{adj} = \sqrt{P^2}$$

4. Εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού (B)

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, στην απλοϊκή μέθοδο απλά αντικαθίσταται η πολυφασματική τιμή έντασης I από την τιμή της προσαρμοσμένης έντασης I_{adj} όπως αυτή προκύπτει από το παγχρωματικό κανάλι. Τα πλεονεκτήματα της απλοϊκής μεθόδου είναι η ευκολία και η ταχύτητα στην εφαρμογή. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε είναι ευκρινείς εικόνες αλλά με αισθητά αλλοιωμένο χρώμα, όπως είναι αναμενόμενο, αφού έχουμε υποθέσει ότι κάθε φασματικό κανάλι X_i συνεισφέρει εξίσου στην ένταση του παγχρωματικού καναλιού.

Στην **γρήγορη μέθοδο** τα βήματα έχουν ως εξής:

1. Σχηματισμός εξομαλυμένης παγχρωματικής εικόνας με εφαρμογή του φίλτρου του μέσου όρου (παράθυρο διαστάσεων 7X7 ή 9X9)

$$PS^2 = \text{smooth (PAN)}$$

2. Υπολογισμός μέσων και τυπικών αποκλίσεων των PS^2 και I^2 :

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \text{μέση απόκλιση } I^2 \\ \sigma_0 &= \text{τυπική απόκλιση } I^2 \\ \mu_1 &= \text{μέση απόκλιση } PS^2 \\ \sigma_1 &= \text{τυπική απόκλιση } PS^2 \end{aligned}$$

3. Εφαρμογή του ευθέως μετασχηματισμού (A)
4. Υπολογισμός των ποσοτήτων

$$P^2 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} (PAN^2 - \mu_1 + \sigma_1) + \mu_0 - \sigma_0$$

$$PS^2 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} (PS^2 - \mu_1 + \sigma_1) + \mu_0 - \sigma_0$$

και μέσω αυτών προσδιορισμός της προσαρμοσμένης έντασης

$$I_{adj} = \sqrt{I^2 \frac{P^2}{PS^2}}$$

5. Εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού (B)

Σε αυτήν την περίπτωση, για τον υπολογισμό της προσαρμοσμένης έντασης I_{adj} λαμβάνεται υπόψη η διαφορά των εντάσεων μεταξύ της παγχρωματικής και πολυφασματικής εικόνας, σε αντίθεση με την απλοϊκή μέθοδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η έξυπνη μέθοδος να επιτυγχάνει αισθητά καλύτερα αποτελέσματα με ελάχιστη αλλοίωση των χρωμάτων.

Μοντέλο Εδάφους

Η έννοια του «μοντέλου εδάφους» στην περίπτωση της βαθυμετρίας και χαρτογράφησης παράκτιου πυθμένα, αναφέρεται στην απόκτηση επίγειων δεδομένων μέτρησης του βάθους. Η διαδικασία απόκτησης των εν λόγω δεδομένων διακρίνεται σε δύο βήματα, τη *δειγματοληψία* και τη *μέτρηση*. Η *δειγματοληψία* αναφέρεται στη διαδικασία επιλογής εκείνων των σημείων που είναι αναγκαίο να μετρηθούν καθώς οριοθετούν την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Η *μέτρηση* ουσιαστικά ολοκληρώνει την προαναφερθείσα διαδικασία αφού καθορίζει τις συντεταγμένες των σημείων που επιλέχθηκαν.

Τρεις σημαντικές παράμετροι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σχετικά με την απόκτηση των δεδομένων. Αυτές είναι οι *πυκνότητα (density)*, *διανομή (distribution)* και *ακρίβεια (accuracy)*. Οι δύο πρώτοι παράγοντες (πυκνότητα και διανομή) σχετίζονται με την διαδικασία της δειγματοληψίας, ενώ ο τρίτος (ακρίβεια) με αυτή της μέτρησης. Συγκεκριμένα, σχετικά με τη δειγματοληψία είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως η επάρκεια αυτής συνδέεται άμεσα με την επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής για τη συλλογή του δείγματος καθώς και το πλήθος των δεδομένων, αφού απαιτείται αφθονία σημείων ώστε να ανιχνευθούν οι ασυνέχειες της επιφάνειας του εδάφους και να αναπαρασταθούν με κατάλληλο τρόπο οι μεταβολές της τοπογραφίας.

3.2.1. Sentinel 2

Πρόκειται για δορυφορική αποστολή η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Copernicus, με σκοπό την παρακολούθηση της Γης (Earth Observation – EO). Η αποστολή αυτή αποτελείται από δύο πανομοιότυπους δορυφόρους, τους Sentinel 2A και Sentinel 2B, οι οποίοι τέθηκαν σε τροχιά στις 23/06/2015 και 07/03/2017 αντίστοιχα. Αυτοί παρέχουν πολυφασματικά (multispectral) δεδομένα στο ορατό φάσμα, εγγύς υπέρυθρο και υπέρυθρο μικρού μήκους και, πιο συγκεκριμένα, εικόνες από 13 κανάλια ποικίλης χωρικής ανάλυσης (spatial resolution) (Πίνακας 2). Τα δεδομένα τους είναι ελεύθερα και ανοιχτά και αναφέρονται στο σύστημα UTM 34N (EPSG: 32634).

Η εικόνα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία προέρχεται από τον δορυφόρο Sentinel 2A, όπως αυτή διατίθεται από την ιστοσελίδα της USGS, και έχει ημερομηνία λήψης στιγμιότυπου στις 11/05/2012.

Πίνακας 2. Κανάλια δορυφόρου Sentinel 2 και τα χαρακτηριστικά τους

Spectral Bands	Central Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 – Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 – Blue	0.490	10
Band 3 – Green	0.560	10
Band 4 – Red	0.665	10
Band 5 – Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 – Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 – Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 – NIR	0.842	10
Band 8A – Narrow NIR	0.865	20
Band 9 – Water vapour	0.945	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1.375	60
Band 11 – SWIR 1	1.610	20
Band 12 – SWIR 2	2.190	20

Ατμοσφαιρική Διόρθωση

Τα προϊόντα του συγκεκριμένου δορυφόρου γίνονται διαθέσιμα σε διάφορα επίπεδα (levels):

- ✓ Level-0, είναι συμπιεσμένα όλα τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data)
- ✓ Level-1A, είναι ασυμπίεστα raw data με φασματικά κανάλια που έχουν συνενωθεί και συνοδεύονται από βοηθητικά δεδομένα
- ✓ Level-1B, είναι ραδιομετρικά διορθωμένα δεδομένα ακτινοβολίας. Το φυσικό γεωμετρικό μοντέλο δημιουργείται χρησιμοποιώντας διαθέσιμα επίγεια σημεία ελέγχου, προσαρτάται στο προϊόν αλλά δεν εφαρμόζεται

- ✓ Level-1C, παρέχει ανακλαστικότητα ορθο-ανηγμένη σε Top-Of-Atmosphere (TOA), με πολυφασματική εγγραφή υπο-εικονοστοιχείων

Σύμφωνα με το αρχείο μεταδεδομένων των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, πρόκειται για προϊόντα Level-1C με TOA ανακλαστικότητες γεγονός που θεωρείται αποδεκτή ατμοσφαιρική διόρθωση για εφαρμογές πάνω από υδάτινη περιοχή.

Αφαίρεση Λαμπυρίσματος



Σχήμα 10. Ο κόλπος της Βάρκιζας όπως αποτυπώθηκε από τον δορυφόρο Sentinel 2

Στην εικόνα του δορυφόρου Sentinel 2 (Σχήμα 10) δεν παρατηρείται πρόβλημα λαμπυρίσματος.

Γεωμετρική Αναγωγή

Οι εικόνες είναι διαθέσιμες στο σύστημα UTM 34N.

Χωρική Βελτίωση

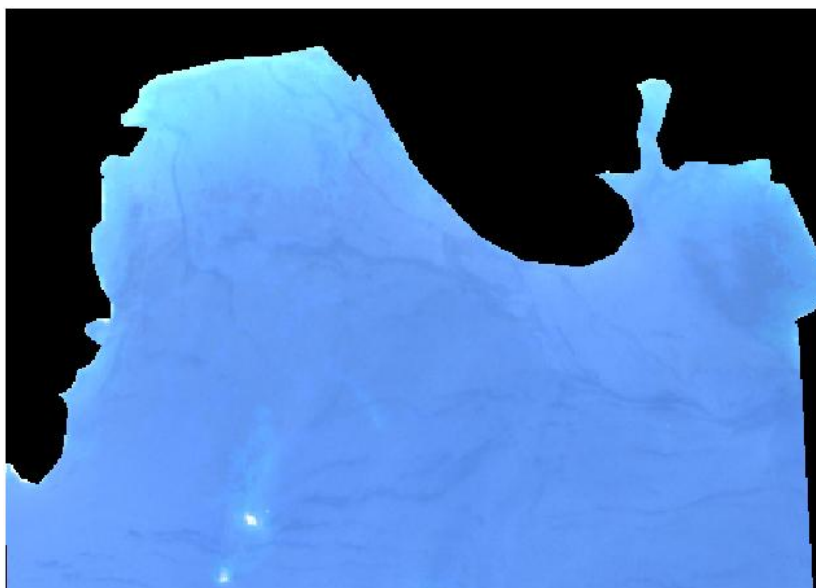
Στην περίπτωση του δορυφόρου S2, το πρόβλημα σε ό,τι αφορά τη χωρική ανάλυση είναι ότι αυτή ποικίλει από κανάλι σε κανάλι, με μικρότερη τιμή αυτή των 10m και μεγαλύτερη αυτή των 60m.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας όπου αντικείμενο μελέτης είναι η θάλασσα, από τα διαθέσιμα κανάλια του δορυφόρου επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τα κανάλια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Επιλεγθέντα κανάλια του δορυφόρου Sentinel 2 και η χωρική τους ανάλυση

Bands	Resolution (m)
Band 1 – Coastal aerosol	60
Band 2 – Blue	10
Band 3 – Green	10
Band 4 – Red	10
Band 8 – NIR	10

Ωστόσο, η χωρική ανάλυση του καναλιού 1 πρέπει να γίνει ίση με αυτή των υπολοίπων ώστε να παραχθεί μία εικόνα με ανάλυση 10m. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της παρεμβολής (interpolation). Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11. Φυσικό έγχρωμο σύνθετο εικόνας δορυφόρου S2 με χωρική ανάλυση 10m

Μοντέλο Εδάφους

Τα επίγεια βαθυμετρικά δεδομένα (*ground control points – GCPs*) για την περιοχή του κόλπου της Βάρκιζας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από βυθομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Πρόκειται για μετρήσεις που έγιναν με ηχοβολιστικό σύστημα και καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής του κόλπου. Τα χαρακτηριστικά σημεία παρουσιάζονται στο Σχήμα 12.

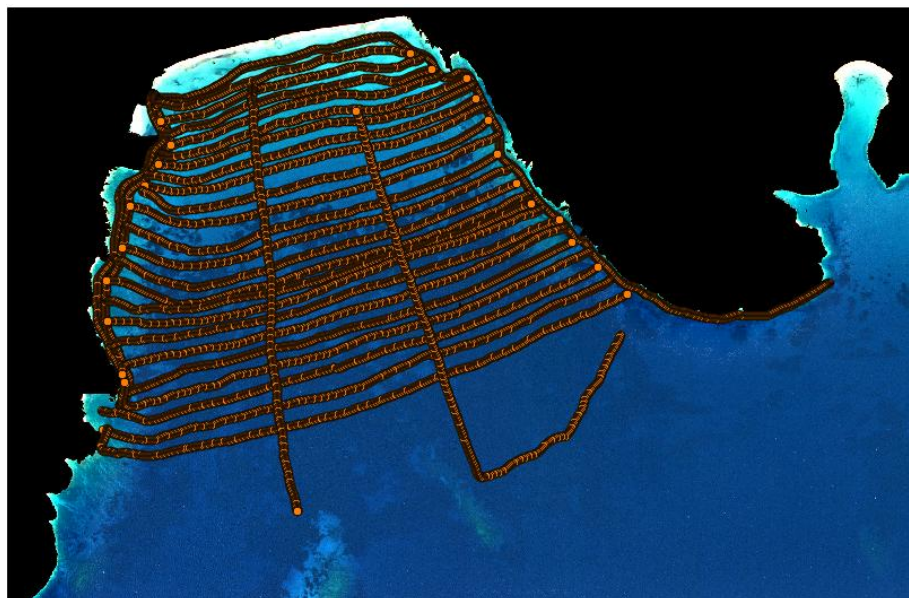
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά επίγειων σημείων ελέγχου (GCPs)

Σύστημα ηχοβολισμού	Single Beam
Ημερομηνία	24/06/2016
Πλήθος σημείων	9760
Εύρος βάθους	3 έως 23 μέτρα
Σύστημα αναφοράς	WGS84 (φ,λ)
Πυκνότητα σημείων	ανά 5 μέτρα

Από τον Πίνακα 4 προκύπτει πως οι διαθέσιμες εικόνες και τα GCPs αναφέρονται σε διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων, αφού οι εικόνες έχουν ορθογώνιες συντεταγμένες στο σύστημα UTM 34N, ενώ τα σημεία δίνονται με γεωγραφικές συντεταγμένες στο σύστημα WGS84. Για το λόγο αυτό απαιτείται μετασχηματισμός των συντεταγμένων των σημείων στο σύστημα των εικόνων.

Ανάλογο πρόβλημα είχε αντιμετωπιστεί σε άλλη διπλωματική εργασία του Εργαστηρίου (Μουντογιαννάκη, 2015) από όπου και αντλήθηκε ο κώδικας σε MATLAB για τη μετατροπή των συντεταγμένων.

Τελικά, η εικόνα των GCPs στην περιοχή μελέτης έχει ως εξής:



Σχήμα 12. Επίγεια βαθυμετρικά σημεία στον κόλπο της Βάρκιζας

3.2.2. WorldView-2

Πρόκειται για εμπορικό δορυφόρο ο οποίος τέθηκε σε τροχιά στις 08.10.2009 και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ΕΟ. Παρέχει πολυφασματικά (multispectral) δεδομένα στο ορατό φάσμα, εγγύς υπέρυθρο και υπέρυθρο μικρού κύματος. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που παρέχει ο εν λόγω δορυφόρος είναι εικόνες από 8 κανάλια χωρικής ανάλυσης 1.84m και μία παγχρωματική εικόνα χωρικής ανάλυσης 0.46m (Πίνακας 5) αναφερόμενες στο σύστημα UTM 34N (EPSG: 32634).

Για την απόκτηση δεδομένων από τον δορυφόρο WorldView-2 απαιτείται αγορά προϊόντος από την DigitalGlobe, ενώ αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχει ημερομηνία λήψης στιγμιότυπου στις 20/06/2016.

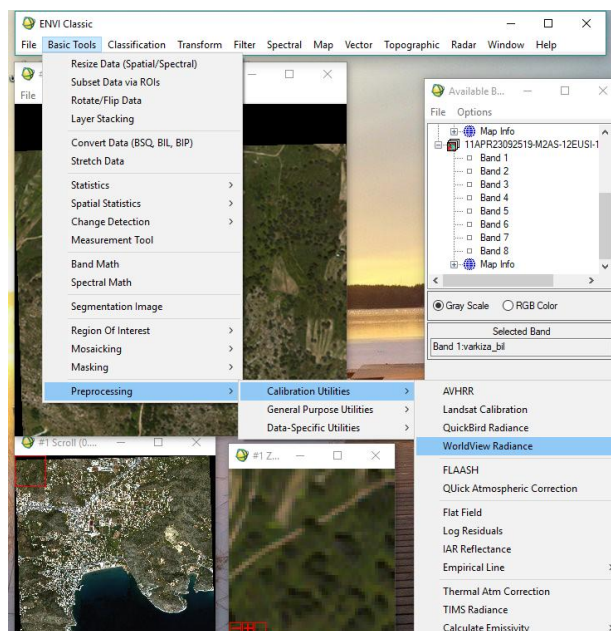
Πίνακας 5. Κανάλια δορυφόρου WorldView-2 και τα χαρακτηριστικά τους

Bands	Wavelength (μm)	Resolution (m)
Panchromatic	0.450-0.800	0.46
Band 1 – Coastal Blue	0.400-0.450	1.84
Band 2 - Blue	0.450-0.510	1.84
Band 3 – Green	0.510-0.580	1.84
Band 4 – Yellow	0.585-0.625	1.84
Band 5 – Red	0.630-0.690	1.84
Band 6 – Red Edge	0.705-0.745	1.84
Band 7 – NIR 1	0.770-0.895	1.84
Band 8 – NIR 2	0.860-1.040	1.84

Ατμοσφαιρική Διόρθωση

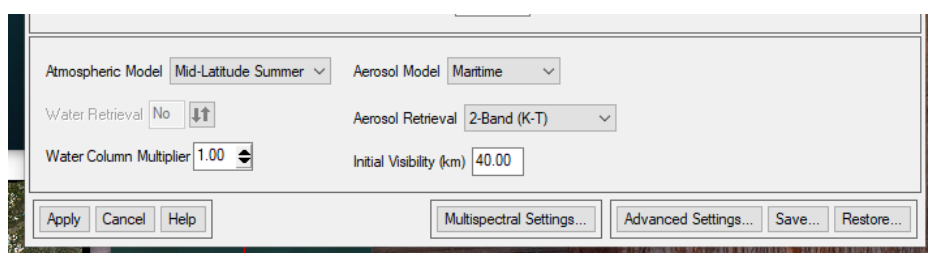
Για την ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων έγινε χρήση του λογισμικού ENVI και συγκεκριμένα του εργαλείου FLAASH που παρέχει, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Εισαγωγή της πολυφασματικής εικόνας στο πρόγραμμα
2. Ραδιομετρική διόρθωση/καλιμπράρισμα με χρήση του αρχείου μεταδεδομένων της πολυφασματικής εικόνας (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. Ραδιομετρική διόρθωση εικόνας στο FLAASH

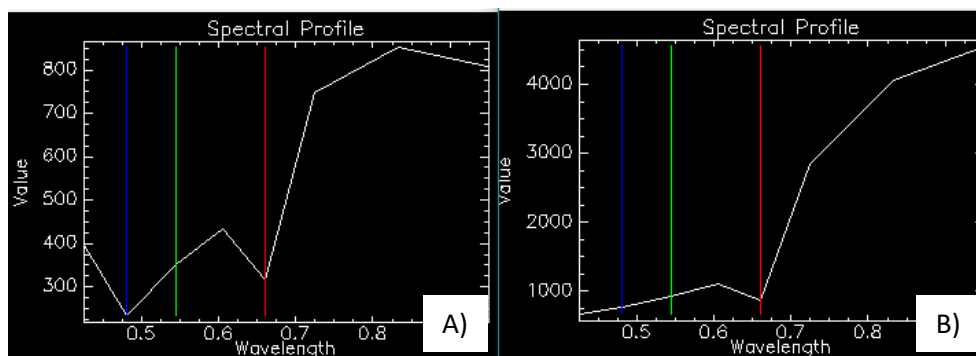
3. Μετατροπή της ραδιομετρικά διορθωμένης εικόνας σε αρχείο τύπου BIL ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο FLAASH.
4. Ατμοσφαιρική διόρθωση της εικόνας με το εργαλείο FLAASH και την κατάλληλη παραμετροποίηση. Στο συγκεκριμένο βήμα σημαντικότερο ρόλο παίζει η παράμετρος Initial Visibility, την οποία ο χρήστης μεταβάλλει μέχρι να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα (Σχήμα 14).



Σχήμα 14. Εισαγωγή παραμέτρων για ατμοσφαιρική διόρθωση στο FLAASH

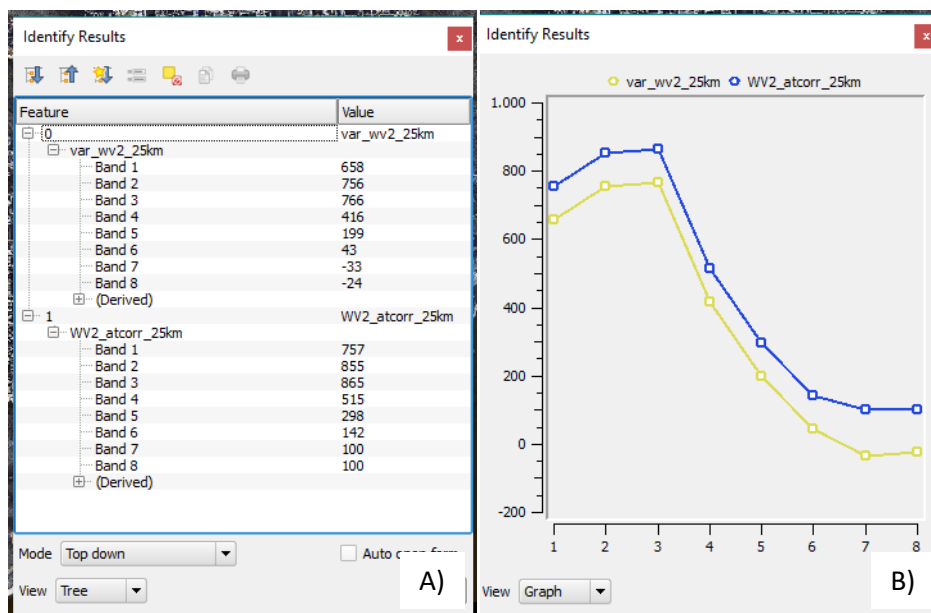
5. Ο έλεγχος του αποτελέσματος γίνεται με τη βοήθεια του εργαλείου Spectral Profile, όπου ελέγχονται οι καμπύλες της αρχικής και της ατμοσφαιρικά διορθωμένης εικόνας για εικονοστοιχεία με γνωστές φασματικές συμπεριφορές και αναλόγως τις παρατηρήσεις επιλέγεται η δεδομένη εικόνα ή επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία με άλλη παραμετροποίηση στο βήμα 4.

Παρόλο που αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία είναι η θάλασσα, το αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης ελέγχθηκε πάνω από περιοχή που απεικονίζει βλάστηση καθώς αυτή παρουσιάζει χαρακτηριστική φασματική συμπεριφορά, σε αντίθεση με τα υδάτινα σώματα.



Σχήμα 15. Η φασματική καμπύλη A) στην αρχική εικόνα, B) στην ατμοσφαιρικά διορθωμένη εικόνα με παράμετρο initial visibility=25km

Στη συνέχεια, σε περαιτέρω έλεγχο της ατμοσφαιρικά διορθωμένης εικόνας παρατηρήθηκε πως οι τιμές ανακλαστικότητας είναι προσημασμένοι αριθμοί, γεγονός το οποίο δημιουργεί προβλήματα ειδικά σε εικονοστοιχεία που απεικονίζουν υδάτινη περιοχή καθώς αυτές παρουσιάζουν ανωμαλίες στη φασματική συμπεριφορά. Έτσι, η επιλεγμένη εικόνα υπέστη περαιτέρω επεξεργασία ώστε η αρνητική τιμή ανακλαστικότητας να πάρει την τιμή 100 και σε όλες τις υπόλοιπες να προστεθούν 99, με αποτέλεσμα η αναλογία να παραμείνει σταθερή.



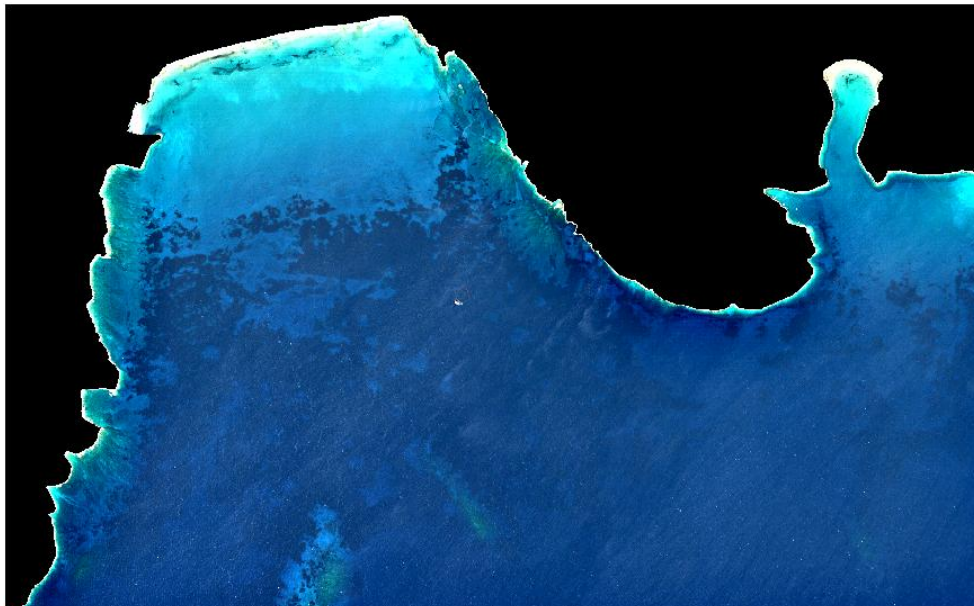
Σχήμα 16. A) Οι αρνητικές τιμές ανακλαστικότητας παίρνουν την τιμή 100 ενώ στις υπόλοιπες προστίθενται 99 ώστε B) η αναλογία να παραμείνει σταθερή



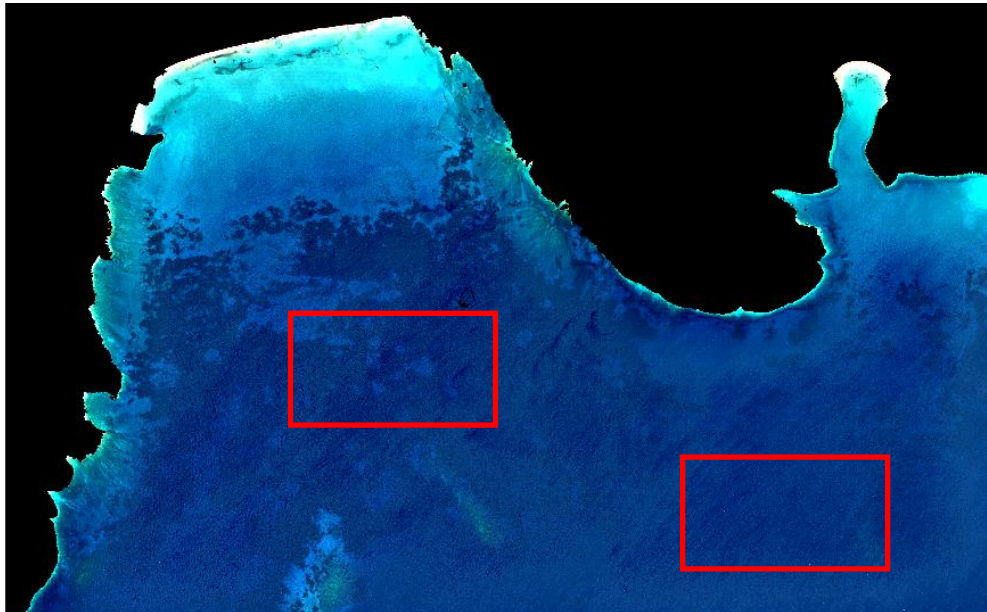
Σχήμα 17. Α) Η αρχική εικόνα Worldview-2 σε έγχρωμο σύνθετο 532, Β) η τελική ατμοσφαιρικά διορθωμένη εικόνα σε έγχρωμο σύνθετο 532 RGB

Αφαίρεση Λαμπυρίσματος

Πρόβλημα λαμπυρίσματος εντοπίστηκε στην εικόνα του δορυφόρου WV2. Από το θεωρητικό μέρος της εργασίας, προκύπτει ότι βιβλιογραφικά η καλύτερη μέθοδος για την αφαίρεσή του είναι αυτή που προτάθηκε από τους Hedley et al. (2005). Η εν λόγω μέθοδος προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Matlab (Παράρτημα Α).

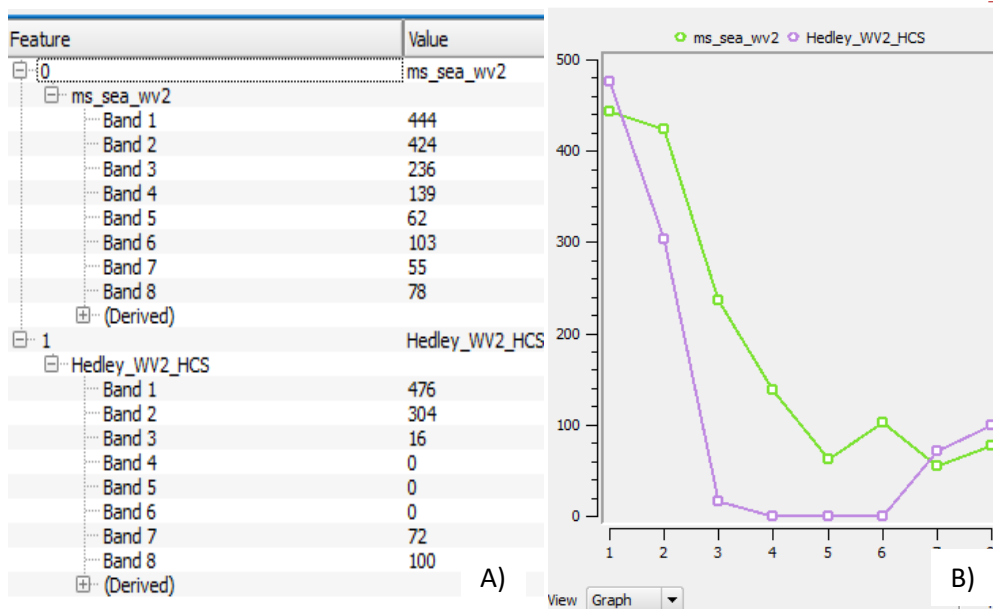


Σχήμα 18. Αρχική εικόνα ατμοσφαιρικά διορθωμένη



Σχήμα 19. Τελική εικόνα μετά την αφαίρεση του λαμπυρίσματος με τη μέθοδο των Hedley et al. (2005). Με κόκκινο πλαίσιο επισημαίνονται σημεία της εικόνας όπου παρουσιαζόταν έντονο πρόβλημα λαμπυρίσματος και απαλείφτηκε

Οπτικά το αποτέλεσμα ήταν αρκετά ικανοποιητικό, καθώς παρατηρήθηκε ότι είχε πράγματι αφαιρεθεί το λαμπύρισμα από την εικόνα (Σχήμα 18 και 19). Ωστόσο, με περαιτέρω έλεγχο των ανακλαστικότητας των δύο εικόνων, παρατηρούμε πως αυτές αλλοιώνονται πολύ στην εικόνα όπου έχει αφαιρεθεί το λαμπύρισμα (Σχήμα 20). Το γεγονός αυτό επηρεάζει άμεσα τις φασματικές υπογραφές των εικονοστοιχείων της εικόνας και, κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα κάθε επόμενης επεξεργασίας αυτής αφού η φασματική υπογραφή είναι το κατ' εξοχήν χαρακτηριστικό που συμμετέχει στις τηλεπισκοπικές διαδικασίες.

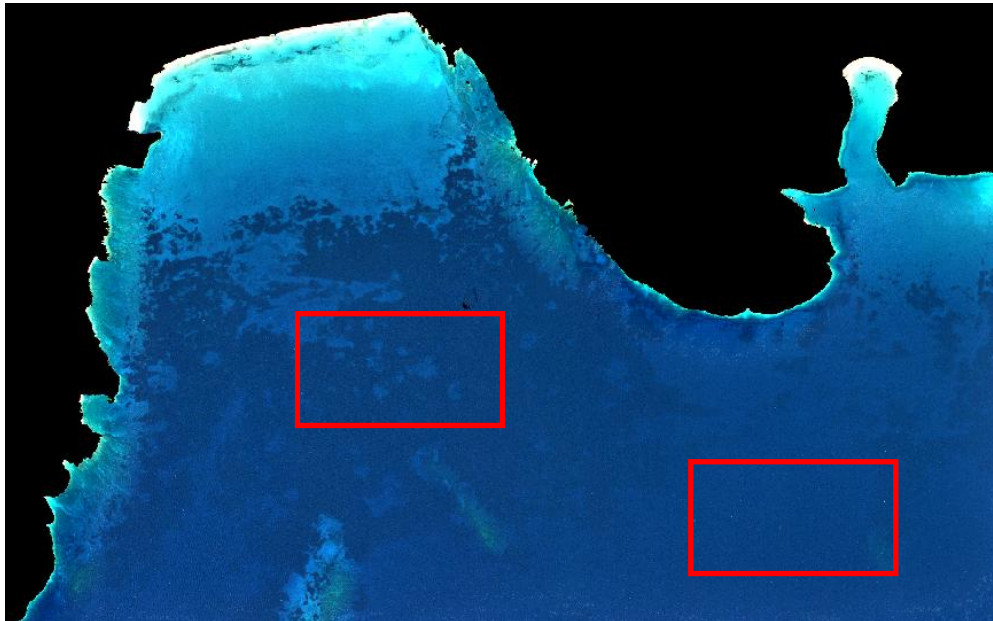


Σχήμα 20. Η μεταβολή της φασματικής συμπεριφοράς μεταξύ των δύο εικόνων γίνεται εύκολα αντιληπτή είτε Α) εξετάζοντας τις τιμές ανακλαστικότητας είτε Β) των φασματικών υπογραφών πάνω από μία περιοχή της εικόνας

Ωστόσο, είναι γνωστό από τις φυσικές ιδιότητες του νερού ότι αυτό δεν ανακλά την υπέρυθρη ακτινοβολία. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται και σχετικά με τις δειγματικές περιοχές της προαναφερθείσας μεθόδου, αυτές συνήθως επιλέγονται όπου το βάθος του νερού είναι μεγάλο όποτε η απορρόφηση της υπέρυθρης περιοχής του φάσματος μπορεί να θεωρηθεί πλήρης. Για το

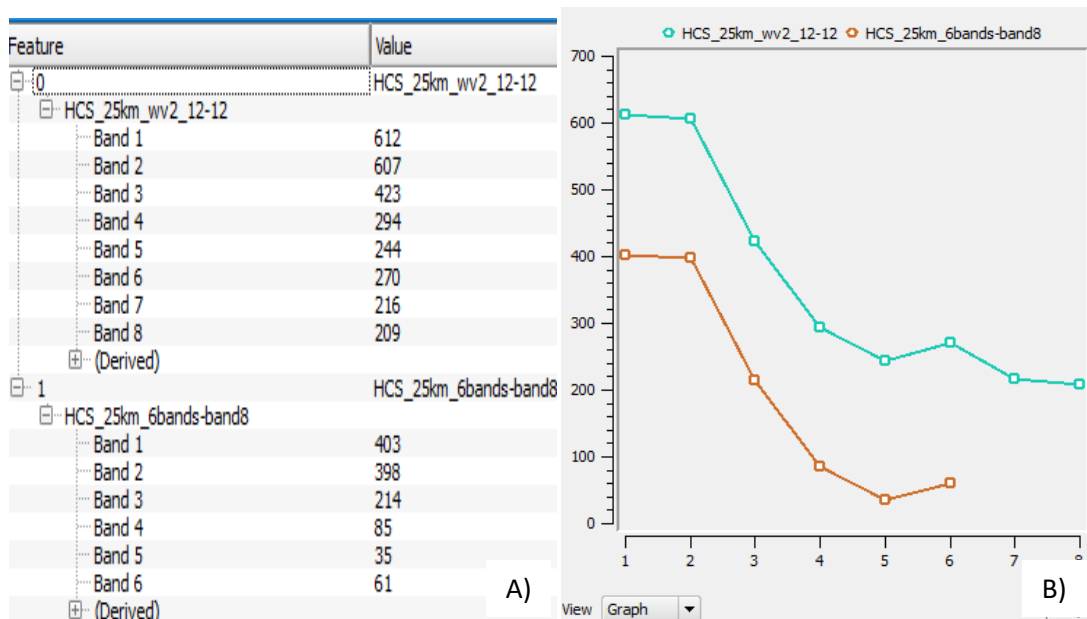
λόγο αυτό μπορεί να θεωρηθεί πως οι τιμές ανακλαστικότητας στα υπέρυθρα κανάλια του WV2 (Bands 7, 8) πάνω από υδάτινη περιοχή αποτελούν ουσιαστικά θόρυβο και πρέπει αφενός να αφαιρεθούν από τις τιμές ανακλαστικότητας στα υπόλοιπα κανάλια και αφετέρου να μη ληφθούν υπόψη στην περαιτέρω επεξεργασία της εικόνας.

Για να δημιουργηθεί η νέα εικόνα με 6 κανάλια (Bands 1 έως 6 του WV2) από τα οποία έχουν αφαιρεθεί οι τιμές του καναλιού 8 (NIR 2) έγινε χρήση του περιβάλλοντος MATLAB. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21. Η νέα εικόνα με 6 κανάλια (το φαινόμενο του λαμπυρίσματος έχει αφαιρεθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό)

Και σε αυτήν την περίπτωση ήταν πολύ σημαντικό να ελεγχθεί πώς αυτές οι πράξεις επί της εικόνας επηρέασαν τις φασματικές υπογραφές των εικονοστοιχείων της (Σχήμα 22).



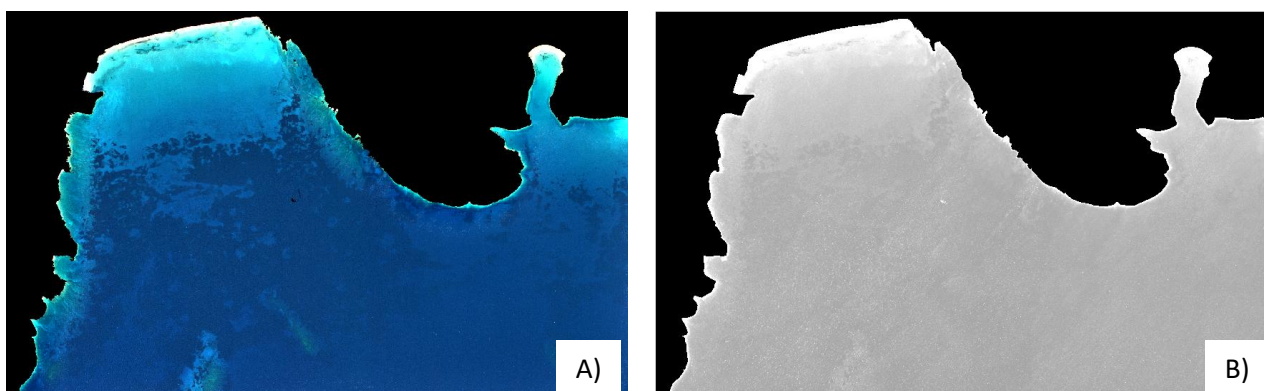
Σχήμα 22. Εξετάζοντας τη φασματική καμπύλη B) παρατηρείται ότι αυτή έχει απλά υποστεί μία παράλληλη μετατόπιση χωρίς να αλλοιώνει όμως την περιγραφή της φασματικής συμπεριφοράς των εικονοστοιχείων της επιλεγμένης περιοχής

Γεωμετρική Αναγωγή

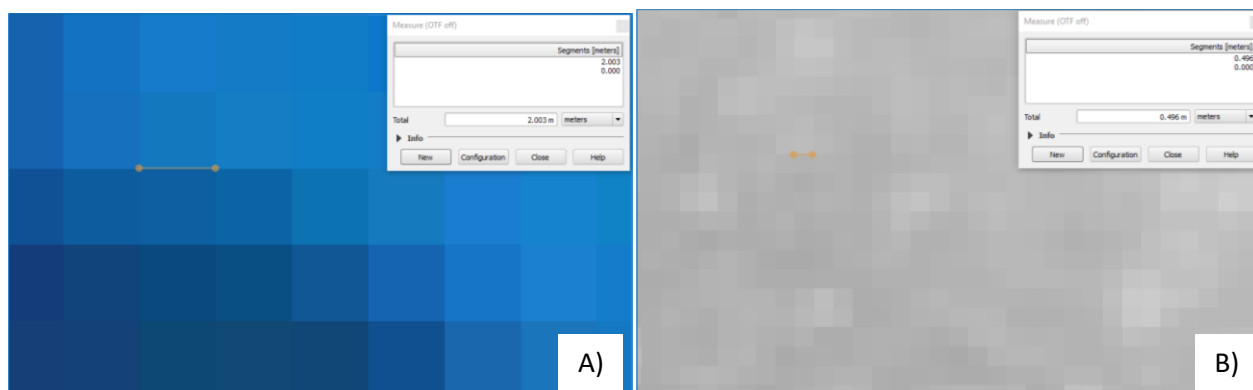
Οι εικόνες είναι διαθέσιμες στο σύστημα UTM 34N.

Χωρική Βελτίωση

Από τα διαθέσιμα δεδομένα, μόνο ο δορυφόρος WV2 παρείχε παγχρωματική εικόνα (Σχήμα 23 και 24) ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος HCS όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2. Τα βήματα της εν λόγω μεθόδου προγραμματίστηκαν σε περιβάλλον Matlab (Παράρτημα Α).

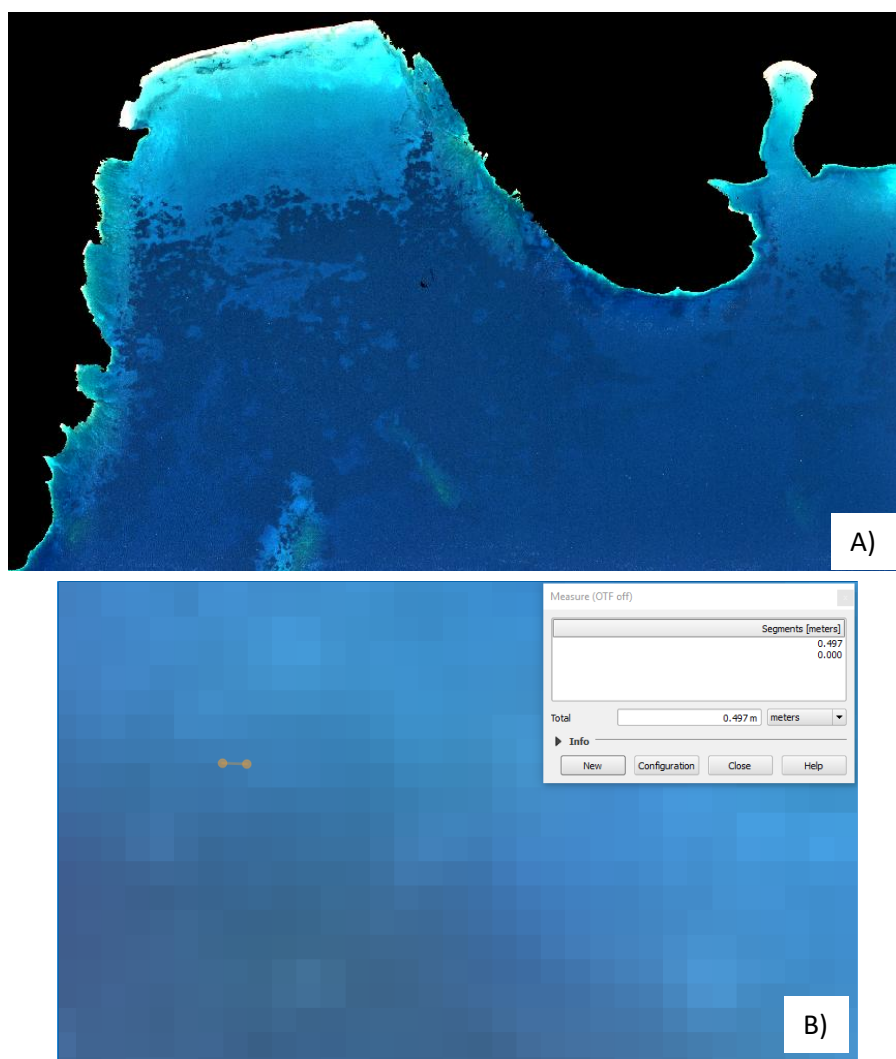


Σχήμα 23. Α) Η διορθωμένη (ατμοσφαιρικά και για λαμπύρισμα) πολυφασματική εικόνα και Β) η παγχρωματική



Σχήμα 24. Η ουσιαστική διαφορά των δύο εικόνων αφορά στη χωρική τους ανάλυση και στο μέγεθος της εδαφοψηφίδας. Εποπτικά αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από το πλήθος των εικονοστοιχείων για την ίδια περιοχή Α) στην πολυφασματική και Β) στην παγχρωματική εικόνα.

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου HCS στις παραπάνω εικόνες, το αποτέλεσμα ήταν μία εικόνα με χωρική ανάλυση ίδια με αυτή της παγχρωματικής (0.46m) και φασματική πληροφορία ίδια με αυτή της πολυφασματικής (6 φασματικοί δίαυλοι) εικόνας (Σχήμα 25).



Σχήμα 25. Α) Η εικόνα-αποτέλεσμα της μεθόδου HCS. Β) Η χωρική βελτίωση στην ίδια περιοχή εικονοστοιχείων σε σχέση με την αρχική πολυφασματική είναι εμφανής.

Μοντέλο Εδάφους

Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε για το δορυφόρο Sentinel 2.

3.2.3. Δεδομένα από Εναέριο Επανδρωμένο Όχημα (Αεροπλάνο)

Η λήψη ψηφιακών εικόνων και αεροφωτογραφιών από αεροπλάνο αποτελεί τον πλέον συνηθισμένο τρόπο απόκτησης τηλεπισκοπικών δεδομένων. Η συγκεκριμένη εικόνα (τετρακάναλη πολυφασματική εικόνα, VNIR) ήταν διαθέσιμη από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης. Τα πολυφασματικά (multispectral) δεδομένα στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο κομμάτι του φάσματος με τη μορφή εικόνων από 4 κανάλια ήταν χωρικής ανάλυσης 0.25m (Πίνακας 6) και αναφέρονταν στο κρατικό σύστημα ΕΓΣΑ '87 (EPSG: 2100).

Πίνακας 6. Κανάλια αεροφωτογραφίας και τα χαρακτηριστικά τους

Bands	Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 – Red	0.640-0.670	0.25
Band 2 – Green	0.530-0.590	0.25
Band 3 – Blue	0.450-0.510	0.25
Band 4 – NIR	0.760-0.900	0.25

Ατμοσφαιρική Διόρθωση

Η ατμοσφαιρική διόρθωση είναι απαραίτητη όταν η ατμόσφαιρα και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που παρεμβάλλονται μεταξύ αισθητήρα και αντικειμένου/ εδάφους είναι ικανές να δημιουργήσουν αλλοιώσεις στις τιμές ανακλαστικότητας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών και του σχετικά μικρού ύψους πτήσης δεν απαιτήθηκε ατμοσφαιρική διόρθωση.

Αφαίρεση Λαμπυρίσματος



Σχήμα 26. Ο κόλπος της Βάρκιζας όπως αποτυπώθηκε κατά την αεροφωτογράφιση

Στην περίπτωση της αεροφωτογραφίας (Σχήμα 26) δεν παρατηρήθηκε σημαντικό πρόβλημα λαμπυρίσματος, οπότε οποιαδήποτε παραπάνω επεξεργασία της εικόνας αποφεύχθηκε ώστε να μην αλλοιωθούν οι φασματικές τιμές.

Γεωμετρική Αναγωγή

Οι αεροφωτογραφίες ήταν διαθέσιμες στο σύστημα ΕΓΣΑ '87. Όλες οι διαθέσιμες εικόνες ήταν αναγκαίο να αναφέρονται στο ίδιο σύστημα οπότε ήταν απαραίτητος ο μετασχηματισμός του συστήματος αναφοράς των αεροφωτογραφιών στο UTM 34N.

Για το λόγο αυτό έγινε χρήση του εργαλείου GEOREFERENCER που διαθέτει το QGIS. Για την πραγματοποίηση του μετασχηματισμού απαιτούνται τουλάχιστον 3 φωτοσταθερά σημεία με συντεταγμένες γνωστές στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς, γίνεται η απαραίτητη παραμετροποίηση του μετασχηματισμού και, τέλος, η εκτέλεσή του.

Μετά την ολοκλήρωση του GEOREFERENCER έγινε έλεγχος σύμπτωσης του τελικού αποτελέσματος με το επιθυμητό σύστημα αναφοράς (π.χ. σε σχέση με μια εικόνα της περιοχής που είναι ήδη αναφερμένη στο σύστημα αυτό).



Σχήμα 27. Έλεγχος σύμπτωσης συστημάτων αναφοράς μετά την εκτέλεση του GEOREFERENCER

Χωρική Βελτίωση

Δεν παρέχεται η δυνατότητα χωρικής βελτίωσης αεροφωτογραφίας. Οι διαθέσιμες εικόνες έχουν μέγεθος εδαφοψηφίδας της τάξης των 25cm.

Μοντέλο Εδάφους

Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε για το δορυφόρο Sentinel 2.

3.2.4. Δεδομένα από Εναέριο Μη Επανδρωμένο Όχημα (UAV)

Πρόκειται για όχημα τύπου drone που μεταφέρει κάμερα Parrot Sequoia. Παρέχει πολυφασματικά (multispectral) δεδομένα στο ορατό κομμάτι του φάσματος και συγκεκριμένα εικόνες από 3 κανάλια (RGB) χωρικής ανάλυσης περίπου 3 εκατοστών (Πίνακας 7). Για την πραγματοποίηση των πτήσεων με τέτοιο όχημα απαιτείται η αγορά ή ενοικίαση ελικοφόρου πλαισίου και η τοποθέτηση των επιθυμητών οργάνων και καμερών.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το όχημα παρασχέθηκε από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης και οι πτήσεις έλαβαν χώρα στις 18/09/2017. Τα δεδομένα που προέκυψαν ήταν σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, λόγω δυσλειτουργίας της κεραίας GPS.

Πίνακας 7. Κανάλια UAV και τα χαρακτηριστικά τους

Bands	Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 – Red	0.640-0.670	0.030
Band 2 – Green	0.530-0.590	0.030
Band 3 – Blue	0.450-0.510	0.030

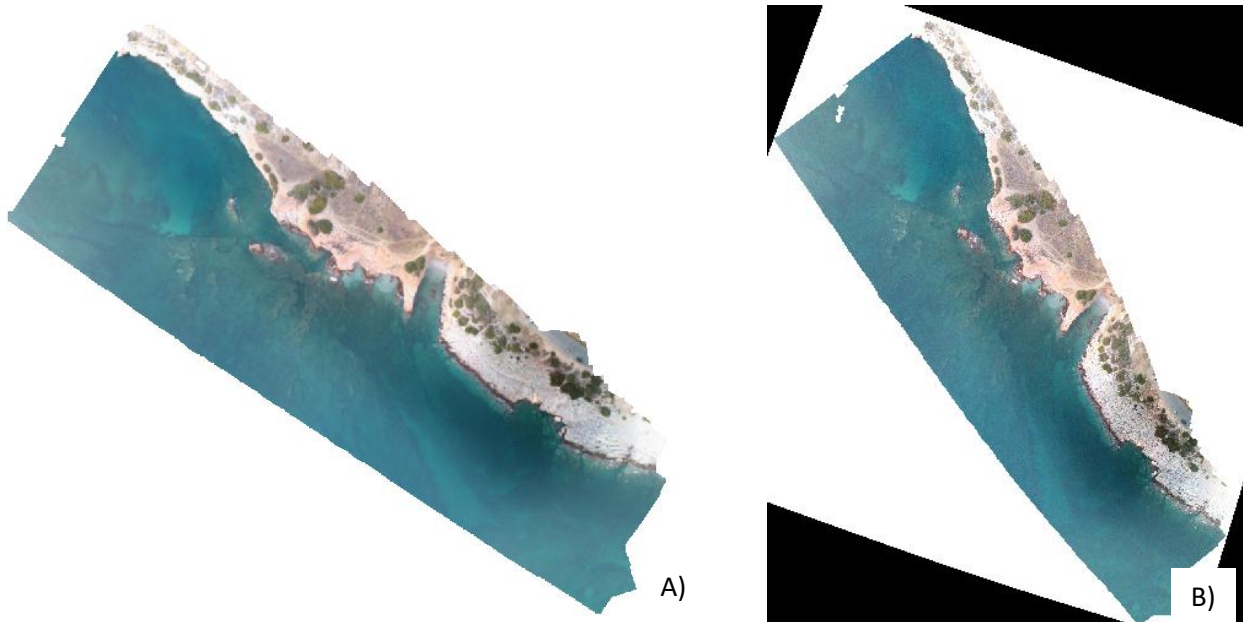
Αφαίρεση Λαμπυρίσματος

Οι λήψεις φωτογραφιών με UAV, σε αντίθεση με αυτές από αεροπλάνα και κυρίως δορυφόρους, έχουν το πλεονέκτημα του προγραμματισμού πτήσης. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον χειριστή του να επιλέξει τις συνθήκες του περιβάλλοντος κατά την πραγματοποίηση της πτήσης. Προκειμένου, λοιπόν, να αποφευχθεί η αντιμετώπιση σοβαρών προβλημάτων στην πορεία της επεξεργασίας, επιλέγονται συνθήκες νημεμίας και η πτήση πραγματοποιείται κατά τις πολύ πρωινές ή

απογευματινές ώρες, ώστε ο ήλιος να προσπίπτει υπό γωνία και να μην παρουσιάζεται το πρόβλημα του λαμπυρίσματος.

Γεωμετρική Αναγωγή

Αρχικά γίνεται η συρραφή των φωτογραφιών και η δημιουργία του φωτομωσαϊκού κάνοντας χρήση του Photoscan (Σχήμα 28 Α). Συνήθως τα συστήματα UAV φέρουν ενσωματωμένο δέκτη GPS, οπότε η γεωαναφορά του μωσαϊκού γίνεται αυτόματα στο πρόγραμμα. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την εν λόγω εργασία, ο δέκτης παρουσίασε δυσλειτουργία κι έτσι τα κέντρα των φωτογραφιών δεν έφεραν τις σωστές συντεταγμένες. Αυτό, είχε σαν αποτέλεσμα να γίνει επιτυχής δημιουργία φωτομωσαϊκού αλλά σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, οπότε και έγινε χρήση του GEOREFERENCER κατά τα γνωστά (Σχήμα 28 Β).



Σχήμα 28. Α) Το φωτομωσαϊκό όπως προέκυψε από το πρόγραμμα και Β) το γεω-αναφερμένο

Χωρική Βελτίωση

Το φωτομωσαϊκό που παρήχθη από το πρόγραμμα είχε μέγεθος εδαφοψηφίδας της τάξης των 3cm οπότε δεν παρουσιάστηκε ανάγκη χωρικής βελτίωσης της εικόνας.

Μοντέλο Εδάφους

Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε για το δορυφόρο Sentinel 2.

3.3. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ

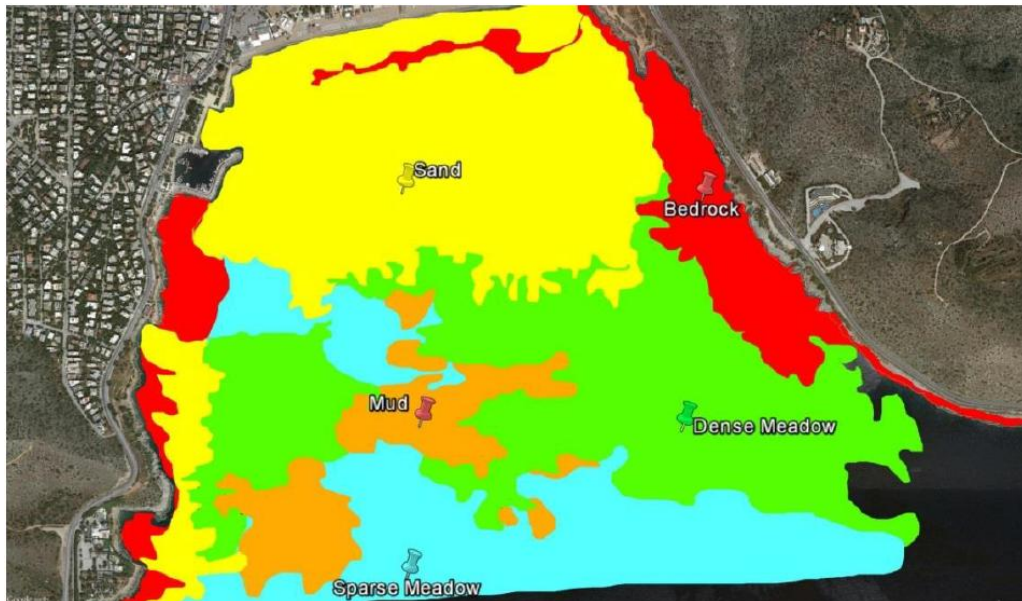
Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν τρεις (3) πιθανοί μέθοδοι χαρτογράφησης:

- Επιβλεπόμενη ταξινόμηση (στο QGIS)
- Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (στο GRASS GIS)
- Object-based classification (στο eCognition)

Για την πραγματοποίηση καθώς και τον έλεγχο της χαρτογράφησης του πυθμένα είναι απαραίτητη η ύπαρξη επίγειων δεδομένων (επί τόπου παρατηρήσεων ή μελετών) που περιγράφουν την πραγματική κατάσταση του βυθού. Στην παρούσα εργασία, η χαρτογράφηση του πυθμένα βασίστηκε στα αποτελέσματα της εργασίας του Τσαγκαράκη Ε. (Tsagkarakis E. (2016), *The Sedimentary Role of Posidonia oceanica in Wave-Dynamic Bays. The case of Varkiza Bay.*), στα

πλαίσια της οποίας έγιναν μετρήσεις με ηχοβολιστή πλευρικής σάρωσης και η εικόνα του πυθμένα στον κόλπο της Βάρκιζας προέκυψε όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 29.

Η διαδικασία της χαρτογράφησης είναι προτιμότερο να προηγείται αυτής της βαθυμετρίας καθώς η γνώση των τύπων πυθμένα βοηθάει στην εφαρμογή των βαθυμετρικών μοντέλων, κυρίως στον έλεγχο των αποτελεσμάτων τους. Οι τύποι πυθμένα που απαντώνται στον κόλπο της Βάρκιζας, σύμφωνα με το Σχήμα 29, είναι αυτός της άμμου (sand), του βραχώδους υποστρώματος (bedrock), της λάσπης (mud), του αραιού λιβαδιού ποσειδωνίας (sparse meadow) και του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας (dense meadow).



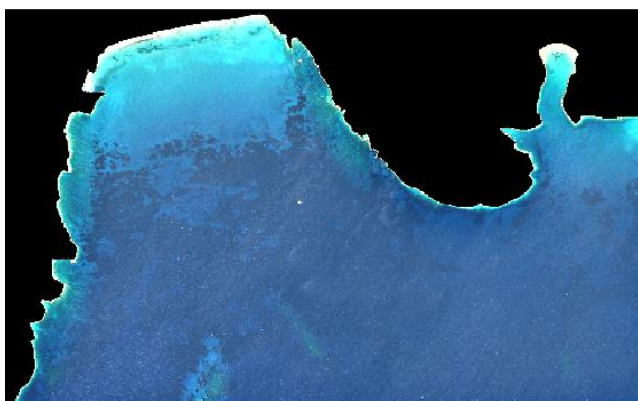
Σχήμα 29. Οι διαφορετικοί τύποι πυθμένα του κόλπου της Βάρκιζας

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής, η ταξινόμηση του πυθμένα πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά στην εικόνα του δορυφόρου WorldView-2, ο οποίος είναι μέτριας χωρικής ανάλυσης και παρέχει πλήθος φασματικών καναλιών ώστε να μπορεί να εξεταστεί και η χρήση πράξεων κατά την ταξινόμηση.

3.3.1. Επιβλεπόμενη Ταξινόμηση

Για την πραγματοποίησή της χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό QGIS και συγκεκριμένα το πρόσθετο SCP (Semi-Automatic Classification Plugin).

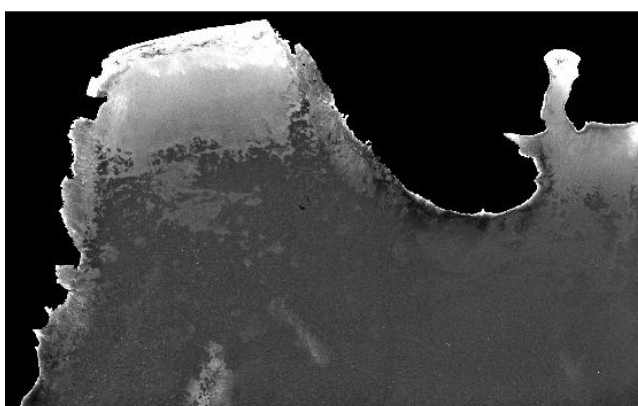
Αρχικά, ως υπόβαθρο για την εκτέλεση της ταξινόμησης, εισήχθη στο πρόγραμμα η πολυφασματική εικόνα του WorldView-2 όπως προέκυψε μετά τις απαραίτητες προ-επεξεργασίες (κεφάλαιο 3.2.2.). Στη δεδομένη εικόνα εφαρμόστηκαν ποικίλοι συνδυασμοί, λόγοι και πράξεις καναλιών (Σχήμα 30, 31 και 32) προκειμένου να γίνει φωτοερμηνεία αυτής, σύμφωνα και με τους τύπους πυθμένα που είναι γνωστό πως απαντώνται στον κόλπο, ώστε να οριστούν οι περιοχές εκπαίδευσης (Σχήμα 33).



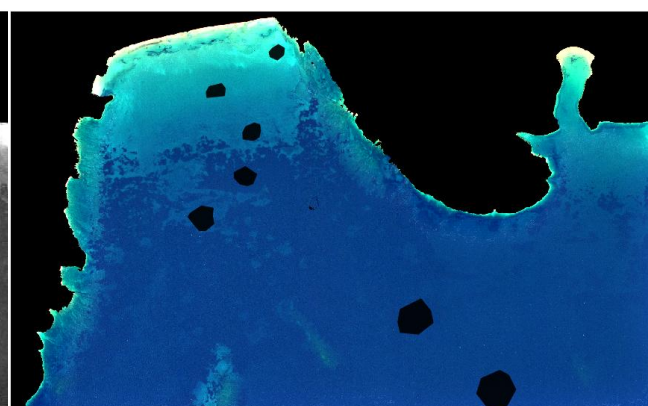
Σχήμα 30. Έγχρωμο σύνθετο 532 RGB (φυσικό)



Σχήμα 31. Έγχρωμο σύνθετο 132 RGB

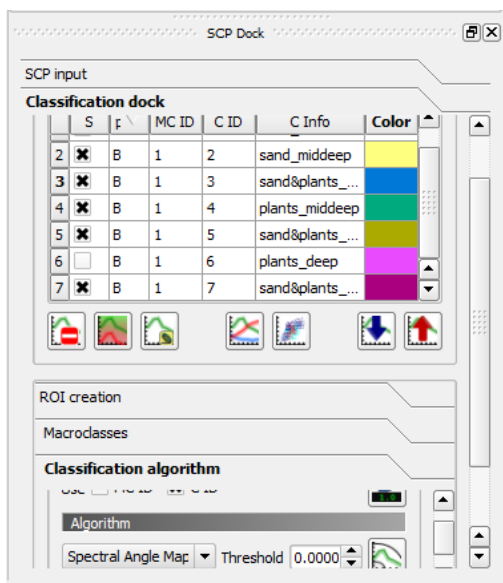


Σχήμα 32. Πράξεις καναλιών (Band 3 - Band 8)



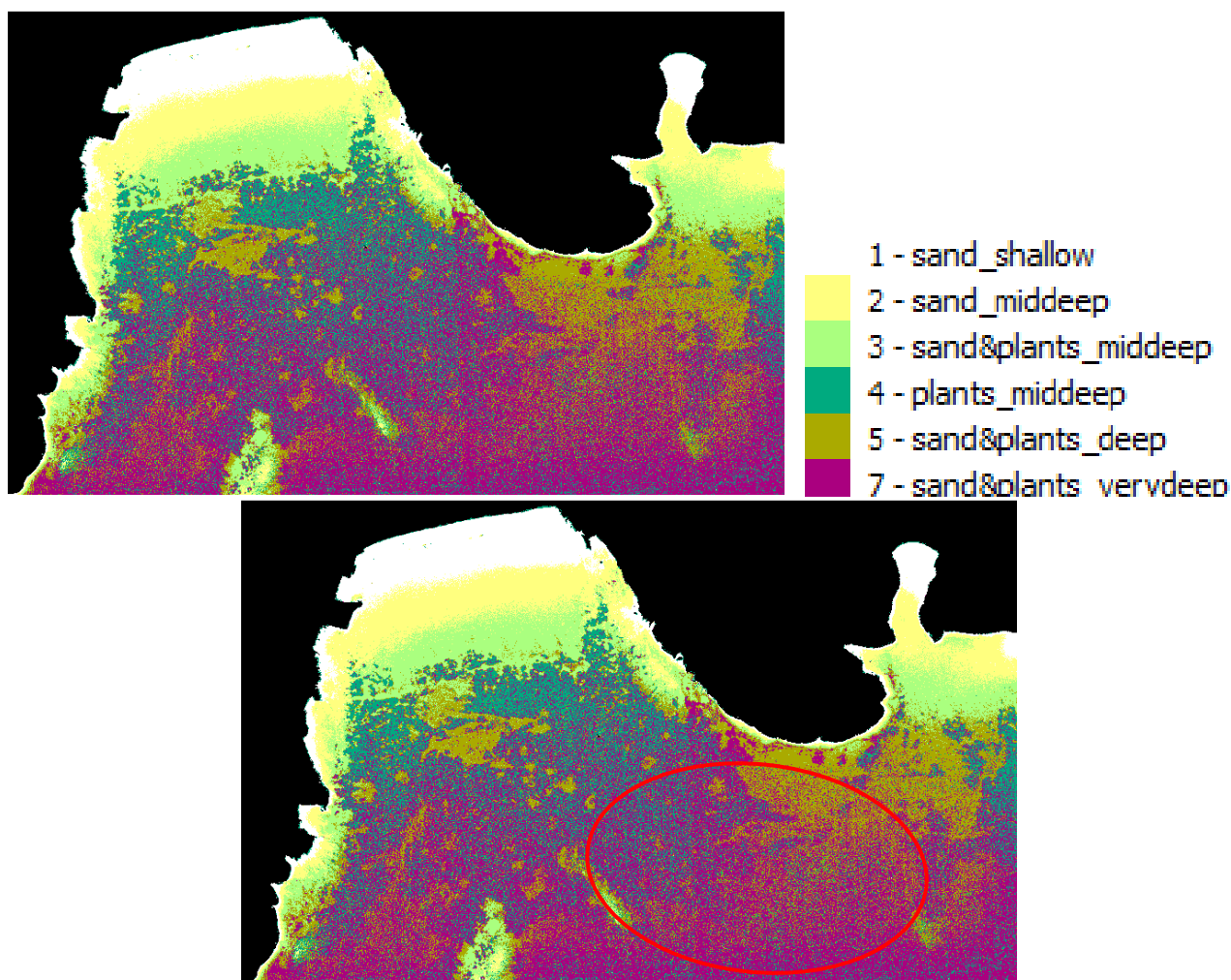
Σχήμα 33. Περιοχές εκπαίδευσης στους διάφορους τύπους πυθμένα

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει μια προεπισκόπηση του τελικού αποτελέσματος, δηλαδή να εκτελέσει την ταξινόμηση ενδεικτικά σε μία υπο-περιοχή της εικόνας προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης και ο χρήστης να προβεί –ή όχι– στις απαραίτητες αλλαγές των περιοχών εκπαίδευσης. Έτσι, ορίστηκαν οι περιοχές όπως φαίνονται στο Σχήμα 33.



Σχήμα 34. SCP Dock

Κατά την παραμετροποίηση της ταξινόμησης μέσω του παραθύρου SCP Dock που δημιουργείται με την εγκατάσταση του πρόσθετου (Σχήμα 34), επιλέχθηκε αυτή να εκτελεστεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο *Spectral Angle Mapping* ο οποίος υπολογίζει τη γωνία μεταξύ των φασματικών υπογραφών των εικονοστοιχείων της εικόνας και των περιοχών εκπαίδευσης (Kruse et al, 1993).



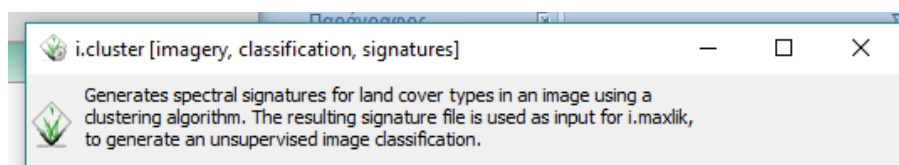
Σχήμα 35. Αποτέλεσμα επιβλεπόμενης ταξινόμησης και η αξιολόγησή του

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 35 και την ποιοτική αξιολόγησή του, το αποτέλεσμα της επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι μία εικόνα με πολλή και συγκεχυμένη πληροφορία, ενώ όσο αυξάνεται το βάθος φαίνεται να αυξάνεται και ο θόρυβος (σημειωμένο με κόκκινο κύκλο στο Σχήμα 36).

Πρόκειται για μια pixel based (με βάση το εικονοστοιχείο) μέθοδο οπότε ήταν αναμενόμενο να παρουσιάσει αυτό το πρόβλημα πάνω από μία εικόνα υδάτινου σώματος όπου όσο αυξάνεται το βάθος τόσο πιο ομοιογενής γίνεται.

3.3.2. Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

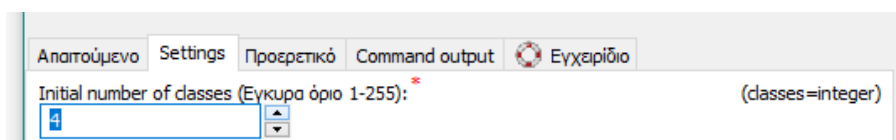
Για την πραγματοποίησή της χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό GRASS GIS και συγκεκριμένα η εντολή *i.cluster* όπως παρέχεται από το μενού Imagery.



Σχήμα 36. Περιγραφή εντολής *i.cluster*

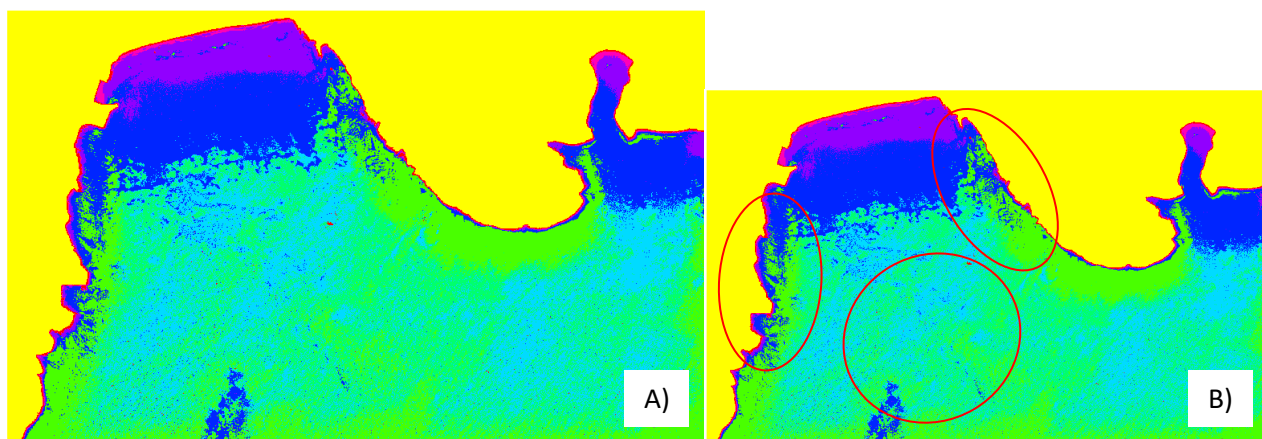
Όπως προκύπτει από την περιγραφή της εντολής στο Σχήμα 36, και στην περίπτωση της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης το αποτέλεσμα βασίζεται στις φασματικές υπογραφές των αντικειμένων που απαντώνται στην εικόνα. Έτσι, και σε αυτήν την ταξινόμηση γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες επί της εικόνας WorldView-2 (προεπεξεργασίες, πράξεις και λόγοι καναλιών, δείκτης νερού κλπ) πριν αυτή εισαχθεί στο λογισμικό, ώστε να παρέχει όσο το δυνατόν περισσότερη και σωστότερη πληροφορία. Το πρόγραμμα αναγνωρίζει και τοποθετεί κάθε κανάλι σε διαφορετικό επίπεδο (layer).

Η διαφορά με την επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση δεν ορίζονται περιοχές εκπαίδευσης, παρά μόνο το επιθυμητό πλήθος των κατηγοριών (κλάσεων) που θα δημιουργήσει ο αλγόριθμος.



Σχήμα 37. Προσδιορισμός αριθμού κλάσεων

Όπως ήδη γνωρίζουμε από το στάδιο προετοιμασίας της ταξινόμησης (φωτοερμηνεία εικόνων, βιβλιογραφία τύπων πυθμένα κλπ), στον κόλπο της Βάρκιζας απαντώνται 4-5 διαφορετικοί τύποι πυθμένα και η συνήθης τακτική είναι να ορίζουμε το διπλάσιο αυτών ως πλήθος κατηγοριών στην μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Δηλαδή, στην συγκεκριμένη περίπτωση 10 κλάσεις.



Σχήμα 38. Α) Αποτέλεσμα μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης και Β) η αξιολόγησή του

Στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 38) φωτοερμηνευτικά μπορούν να αναγνωρισθούν μόλις 4 τύποι πυθμένα, οι οποίοι είναι οι εξής:

- ✓ Άμμος σε ρηχά νερά με **μωβ** χρώμα
- ✓ Άμμος σε μέτριου βάθους νερά με **μπλε** χρώμα
- ✓ Αραιή και πυκνή βλάστηση με **πράσινο** και **τουρκουάζ** χρώμα αντίστοιχα

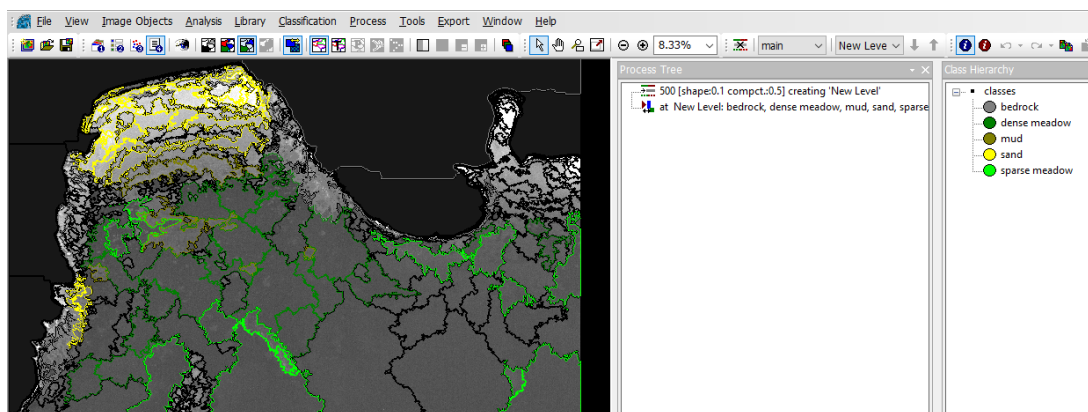
Αξιολογώντας το αποτέλεσμα ποιοτικά, σύμφωνα με το Σχήμα 38, η ταξινόμηση και σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει προβλήματα, καθώς απέτυχε να αναγνωρίσει την κατηγορία του βραχώδους υποστρώματος και της λάσπης, η χωρική τοποθέτηση των κατηγοριών είναι λανθασμένη και η παρεχόμενη πληροφορία συγκεχυμένη.

3.3.3. Αντικειμενοστραφής ταξινόμηση

Για την πραγματοποίησή της χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό eCognition Developer μέσω της εντολής Classification.

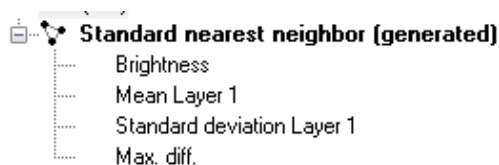
Σε αυτήν την περίπτωση, στο πρόγραμμα εισήχθη η εικόνα WorldView-2 αφού υπέστη τις απαραίτητες προεπεξεργασίες και, συγκεκριμένα, ως υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκε η εικόνα σε τόνους του γκρι (grayscale) που προέκυψε από την πράξη των καναλιών Band3 (Green) – Band5 (Red), καθώς έπειτα από πολυάριθμες δοκιμές αυτή φάνηκε να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Κατά την αντικειμενοστραφή ταξινόμηση, η εικόνα χωρίζεται σε περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό η υπό επεξεργασία εικόνα θα πρέπει να έχει υποστεί την κατάλληλη προεργασία του image segmentation. Η σημαντικότερη παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί είναι αυτή της κλίμακας (scale parameter) η οποία επηρεάζει άμεσα το πλήθος των περιοχών που θα δημιουργηθούν και, συνεπώς, την ακρίβεια του αποτελέσματος καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας. Για την συγκεκριμένη εικόνα κι έπειτα από ποικίλες δοκιμές αυτή επιλέχθηκε να είναι ίση με 500. Στη συνέχεια, ορίζονται από το χρήστη –μέσω φωτοερμηνείας- ορισμένα από τα πολύγωνα που δημιουργήθηκαν κατά το segmentation ως περιοχές εκπαίδευσης των επιθυμητών κατηγοριών (Σχήμα 39).

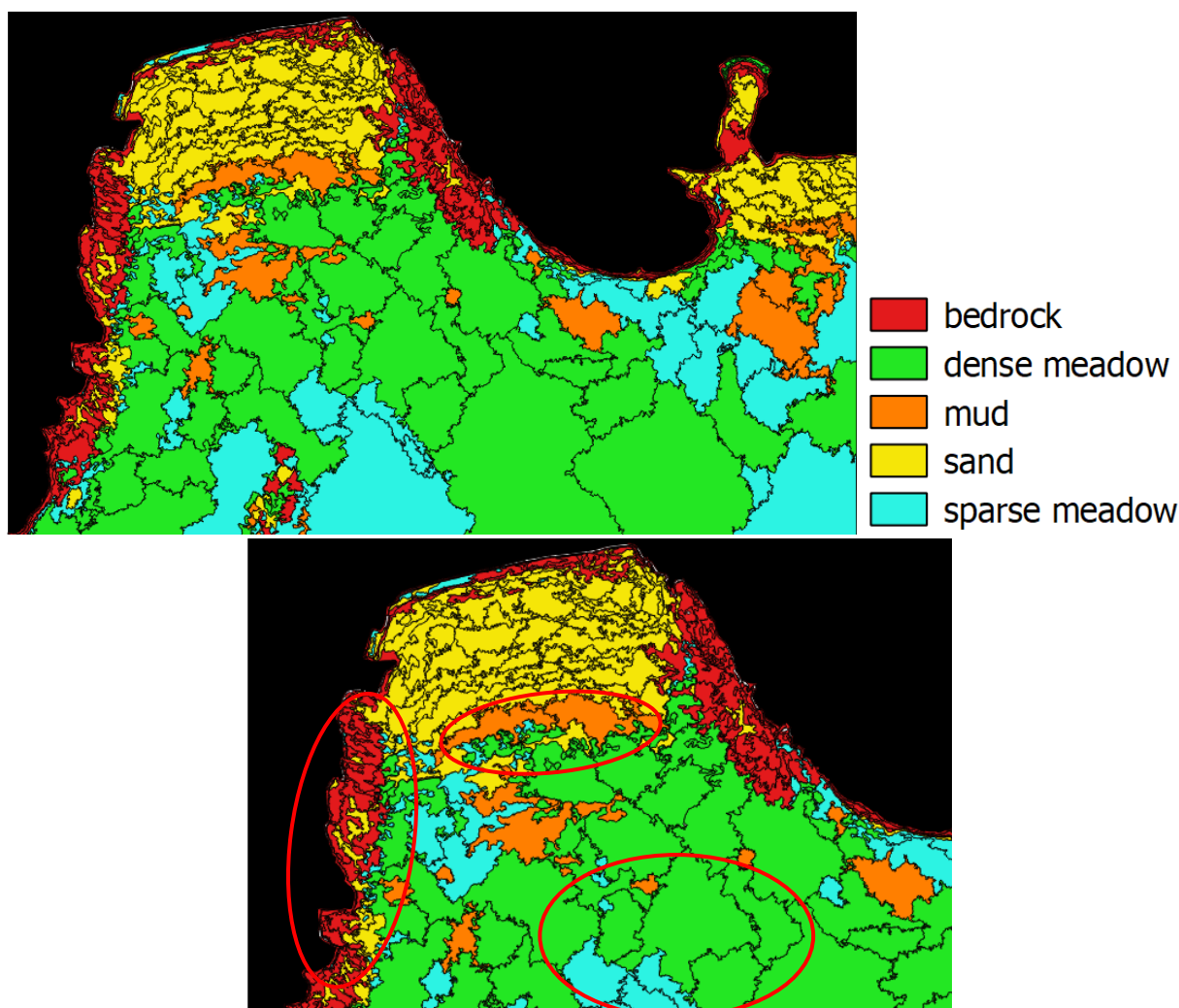


Σχήμα 39. Περιοχές εκπαίδευσης, παράμετροι segmentation και τύποι πυθμένα στο λογισμικό eCognition

Το λογισμικό εφαρμόζει τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor) προκειμένου να ταξινομήσει και τα υπόλοιπα πολύγωνα στις κατηγορίες που έχουν ορισθεί. Τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία ταξινομήθηκαν τα γειτονικά πολύγωνα ήταν η μέση τιμή (mean) και η τυπική απόκλιση (standard deviation) των εικονοστοιχείων της εικόνας (Σχήμα 40).



Σχήμα 40. Κριτήρια αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα



Σχήμα 41. Αποτέλεσμα αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης και η αξιολόγησή του

Το αποτέλεσμα αυτής της ταξινόμησης (Σχήμα 41) παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το Σχήμα 29, αφού εμφανίζονται όλες οι κατηγορίες, ακόμα και αυτή του βραχώδους υποστρώματος, και μάλιστα είναι αρκετά καλά τοποθετημένες στο χώρο σύμφωνα με την εικόνα-πρότυπο πλην ορισμένων μικροδιαφορών (σημειωμένες με κόκκινο κύκλο).

3.4. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Για την εξαγωγή βαθυμετρικών αποτελεσμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια, συνήθως τα μοντέλα εφαρμόζονται σε τμήματα εικόνων που παρουσιάζουν ομοιογενείς τύπους πυθμένα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ταξινόμησης που προηγήθηκε, στον κόλπο της Βάρκιζας απαντώνται οι κατηγορίες της άμμου (sand), του βραχώδους υποστρώματος (bedrock), της λάσπης (mud), του αραιού λιβαδιού ποσειδωνίας (sparse meadow) και του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας (dense meadow).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ελέγχθηκε επίσης η αποτελεσματικότητα και ακρίβεια των επικρατέστερων βαθυμετρικών μοντέλων (Lyzenga, 2006 και Stumpf, 2003) πάνω από ετερογενείς τύπους πυθμένα καθώς και σε διάφορα βάθη, ώστε να εξετασθεί και αυτή η παράμετρος ως προς το πώς επηρεάζει τα αποτελέσματα των μοντέλων.

3.4.1. Γραμμικό Βαθυμετρικό Μοντέλο (Lyzenga)

Το γραμμικό βαθυμετρικό μοντέλο βασίζεται στη θεωρία ότι το φως εξασθενεί γραμμικά σε σχέση με το βάθος. Στη δημοσίευσή του το 1978, ο Lyzenga προσπάθησε να δώσει μια λύση σχετικά με την ποικιλομορφία στον τύπο του πυθμένα χρησιμοποιώντας πολλαπλά φασματικά κανάλια και μία μήτρα περιστροφής.

Αρχικά, καθόρισε τη μεταβλητή X_j για κάθε ένα από τα κανάλια 1 έως N, ως εξής:

$$X_j = \ln (L_j - L_{wj}) ,$$

όπου L_j η ακτινοβολία της επιφάνειας στο κανάλι j,

και L_{wj} η μέση ακτινοβολία στα βαθιά νερά.

Η χρήση του λογαρίθμου έχει ως σκοπό τη δημιουργία γραμμικής σχέσης μεταξύ ακτινοβολίας και βάθους. Η ακτινοβολία στα βαθιά νερά χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η ανάκλαση εξαιτίας των επιδράσεων της επιφάνειας και η σκέδαση στην υδάτινη στήλη, υποθέτοντας ότι η ακτινοβολία στα βαθιά νερά προέρχεται κυρίως από εξωτερικούς παράγοντες αντανάκλασης του νερού –συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου του λαμπυρίσματος και της ατμοσφαιρικής σκέδασης.

Στη συνέχεια, ο Lyzenga χρησιμοποίησε μία μήτρα περιστροφής/μετασχηματισμού, παρόμοια με αυτή της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών, με στόχο να προσδιορίσει τη μεταβλητότητα των τιμών ακτινοβολίας στα διάφορα κανάλια για τα οποία αυτές είναι ανεξάρτητες του βάθους. Έτσι, καθόρισε N μεταβλητότητες της εξής μορφής:

$$Y_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} X_j ,$$

όπου A_{ij} η i-οστή μεταβλητή της μήτρας για το κανάλι j.

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία αφενός N-1 ανεξάρτητων του βάθους μεταβλητών οι οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν δείκτες του τύπου πυθμένα, αφετέρου μίας μεταβλητής (Y_N) η οποία είχε γραμμική σχέση με το βάθος και χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του βάθους.

Αν και ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα με τον τύπο του πυθμένα και δεν απαιτούσε γνωστές μετρήσει βάθους, απέτυχε σε εικόνες όπου τα ύδατα δεν παρουσίαζαν ομοιογένεια στις ιδιότητες.

Έτσι, ο ίδιος ο Lyzenga προέβη σε βελτιστοποιήσεις του αλγορίθμου, το 1985 και ξανά το 2006 μαζί με τους συνεργάτες του, προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ετερογενή ύδατα. Τελικά, προέκυψε το εξής μοντέλο βάθους:

$$\hat{h} = h_0 - \sum_{j=1}^N h_j X_j ,$$

όπου h_0 και h_j είναι σταθερές οι οποίες προσδιορίζουν μία γραμμική σχέση μεταξύ X_j και βάθους.

Όλες οι μεταβλητές h_j και η σταθερά h_0 καθορίζονται μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για ένα σετ δεδομένων βαθών και των «λογαριθμισμένων» ακτινοβολιών όπως υπολογίζονται στα συγκεκριμένα βάρη.

Καθώς η ακτινοβολία μετατρέπεται σε ανακλαστικότητα χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές ακτινοβολίας για ολόκληρη την εικόνα, η παραπάνω σχέση ισχύει όταν γίνεται χρήση «λογαριθμισμένων» ανακλαστικότητας και όχι ακτινοβολιών. Ο Lyzenga απέδειξε πως, κανονικά,

αυτός ο αλγόριθμος θα πρέπει να εφαρμόζεται σε ετερογενείς τύπους πυθμένα και ποιότητα νερού και να δίνει αποτελέσματα ακριβείας (RMSE της τάξης των 2.3m για βάθη έως και 20 m). Θεωρητικά, ο αριθμός των διαφορετικών τύπων πυθμένα και υδάτινων μαζών για τις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος είναι ανάλογες με το πλήθος των καναλιών που χρησιμοποιούνται. Δηλαδή, μια εικόνα με 8 κανάλια αναμένεται να δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα σε ετερογενή ύδατα από μία απλά πολυφασματική δορυφορική εικόνα (με λιγότερα κανάλια).

Η εφαρμογή του εν λόγω βαθυμετρικού μοντέλου στα διάφορα τηλεπισκοπικά δεδομένα έδωσε τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στους Πίνακες 8 έως και 11.

Sentinel 2

Πίνακας 8. Αποτελέσματα μοντέλου Lyzenga στην εικόνα του Sentinel 2

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Sand	634	747550, 4189187	71	75	0.713
Dense meadow	486	747740, 4189102 747791, 4188699	42	43	0.570
Dense meadow deep	FAILED	747968, 4188612 747422, 4188948		FAILED	
Bedrock	322	748140, 4188027 748211, 4188912	68	76	1.167
Mixed shallow	763	748306, 4188870 747177, 4189252	11	12	0.850
Mixed average depth	870	747254, 4189121 747587, 4188760	76	90	0.926
Mixed deep	1138	747711, 4188700 747428, 4188434 747534, 4188306	30	48	1.415

WorldView-2

Πίνακας 9. Αποτελέσματα μοντέλου Lyzenga στην εικόνα του WorldView-2

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Sand	660	747550, 4189187 747740, 4189102	71	71	0.720
Dense meadow	521	747791, 4188699 747968, 4188612	8	8	0.744
Dense meadow deep	FAILED	747422, 4188948 748140, 4188027		FAILED	
Bedrock	165	748211, 4188912 748306, 4188870	67	69	1.170
Mixed shallow	674	747177, 4189252 747254, 4189121	5	5	1.008
Mixed average depth	850	747587, 4188760 747711, 4188700	60	72	1.226
Mixed deep	1132	747428, 4188434 747534, 4188306	15	15	1.612

VNIR

Πίνακας 10. Αποτελέσματα μοντέλου Lyzenga στην αεροφωτογραφία

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Sand	659	747550, 4189187	72	72	0.712
Dense meadow	518	747740, 4189102	18	19	0.702
Dense meadow deep	FAILED	747791, 4188699		FAILED	
Bedrock	316	747968, 4188612	68	71	1.247
Mixed shallow	790	747422, 4188948	11	11	0.959
Mixed average depth	710	748140, 4188027	56	56	0.938
Mixed deep	881	748211, 4188912	56	58	1.075

RGB (UAV)

Στο φωτομωσαϊκό που δημιουργήθηκε από τις φωτογραφίες όπως λήφθηκαν από το drone, απεικονίζεται τμήμα πυθμένα που καλύπτεται αποκλειστικά από βραχώδες υπόστρωμα.

Πίνακας 11. Αποτελέσματα μοντέλου Lyzenga στο φωτομωσαϊκό του UAV

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Bedrock	156	748306, 4188911	13	15	0.712
		748324, 4188869			

3.3.2. Βαθυμετρικό Μοντέλο Γραμμικής Αναλογίας (Stumpf)

Το βαθυμετρικό μοντέλο γραμμικής αναλογίας βασίζεται στη θεωρία ότι το φως εξασθενεί εκθετικά σε σχέση με το βάθος. Οι Stumpf et al. (2003) εξέδωσαν ένα εναλλακτικό μοντέλο προσδιορισμού του βάθους, το οποίο ανταποκρίνεται καλύτερα σε νερά με αυξημένη θολότητα. Αυτό είναι και το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου, καθώς ο πρωταρχικός στόχος του ήταν να καλύψει την αδυναμία εφαρμογής του γραμμικού μοντέλου (Lyzenga) σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα. Κάποιες βενθικές κοινότητες⁴ παρουσιάζουν υψηλή απορρόφηση κυρίως στην μπλε και πράσινη φασματική περιοχή. Η ύπαρξη πυκνής κάλυψης του πυθμένα με βλάστηση και μακροάλη (φύκη) είναι πιθανόν να απορροφήσουν τόσο φως ώστε το σήμα ακτινοβολίας στα βαθιά νερά να είναι αρνητικό, με αποτέλεσμα η χρήση του λογαρίθμου να μην επιστρέφει πραγματικό αριθμό (θεωρία μιγαδικών αριθμών).

Το μοντέλο βασίστηκε στην ίδια απλουστευμένη λύση της μονοδιάστατης μεταφοράς της ακτινοβολίας -όπως και το γραμμικό- και επιπλέον κάνει χρήση λογαριθμικού μετασχηματισμού για να γραμμικοποιήσει τη σχέση μεταξύ φασματικών καναλιών και βάθους. Το μοντέλο των Stumpf et al. (2003) χρησιμοποιεί απλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της αναλογίας ανακλαστικότητας δύο καναλιών και του βάθους. Συγκεκριμένα, το νερό απορροφά το φως με διαφορετικό τρόπο σε ολόκληρο το φάσμα και η «λογαριθμισμένη» ανάκλαση αναμένεται να ελαττώνεται γραμμικά σε σχέση με το βάθος. Τα κανάλια χαμηλής απορρόφησης θα έχουν τιμές ανακλαστικότητας οι οποίες μειώνονται με το βάθος πιο αργά από τα κανάλια υψηλής απορρόφησης. Έτσι, η αναλογία ενός καναλιού χαμηλής απορρόφησης και ενός υψηλής απορρόφησης αναμένεται ότι θα εμφανίζει γραμμική αύξηση με το βάθος, με την προϋπόθεση ότι και οι δύο τιμές έχουν μετασχηματιστεί λογαριθμικά. Μαθηματικά, τα παραπάνω εκφράζονται με την εξής σχέση:

$$\hat{h} = h_0 + h_1 \frac{\ln(nL_{HI})}{\ln(nL_{LO})},$$

όπου h_0 η σταθερά μετάθεσης για το βάθος 0 (απόκλιση offset),

h_1 μία υπολογιζόμενη σταθερά που καθορίζει την σχέση μεταξύ αναλογίας και βάθους,

n μία μεγάλη σταθερά που εξασφαλίζει θετικές τιμές στους λογαρίθμους και γραμμική απόκριση (συνήθως αυτή η σταθερά λαμβάνει την τιμή 1000, καθώς έχει αποδειχθεί ότι δεν έχει σημαντική επίπτωση στο εκτιμώμενο βάθος).

Το μοντέλο αυτό κάνει την παραδοχή ότι οι διαφοροποιήσεις στην ανακλαστικότητα του πυθμένα είναι είτε ίσες και στα δύο κανάλια είτε ότι επηρεάζουν αμελητέα την αναλογία σε σύγκριση με το βάθος, καταλήγοντας έτσι σε σχετικά σταθερές αναλογίες πάνω από διαφορετικούς τύπους πυθμένα και σταθερό βάθος.

Στη δημοσίευση των Stumpf et al. (2003) πραγματοποιείται σύγκριση των δύο μεθόδων, χρησιμοποιώντας για το μεν γραμμικό μοντέλο βάθη που έχουν προκύψει με χρήση LIDAR, για το δε μοντέλο γραμμικής αναλογίας βάθη από ναυτικό χάρτη για την εκτέλεση των αντίστοιχων παλινδρομήσεων. Τα αποτελέσματα που παρήγαγαν τα δύο μοντέλα για την περιοχή μελέτης ήταν

⁴ Βενθικοί καλούνται οι οργανισμοί εκείνοι που έχουν στενή εξάρτηση από τον βυθό – ζουν και κινούνται επί, εντός ή πλησίον του αυτού. Η βενθική βιοκοινωνία ή βενθική κοινότητα αποτελείται από αντιπροσώπους όλων των τροφικών επιπέδων (βακτήρια, φυτά, σπόγγοι, ανεμώνες, καρκινοειδή, μαλάκια, ψάρια κλπ) και διακρίνεται σε φυτοβένθος και ζωοβένθος. Πηγή: Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Βιολογίας

συγκρίσιμα, με μέγιστο κανονικοποιημένο RMSE κάτω από 0.6 για βάρη μέχρι και 25m και 0.3 για τα 15m.

Η εφαρμογή του εν λόγω βαθυμετρικού μοντέλου στα διάφορα τηλεπισκοπικά δεδομένα παρουσιάζεται στους Πίνακες 12 έως και 34.

Sentinel 2

Πίνακας 12. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του Sentinel 2 για την κατηγορία της άμμου

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1 ^{ου} βαθμού	R ² (%) 2 ^{ου} βαθμού
Sand	634	Coastal/red	48	48
		Coastal/green	69	73
		Coastal/blue	26	44
		Coastal/nir	38	44
		Blue/red	47	48
		Blue/green	73	76
		Blue/coastal	26	28
		Blue/nir	38	44
		Green/coastal	69	74
		Green/blue	73	77
		Green/red	29	29
		Green/nir	30	37

Πίνακας 13. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του Sentinel 2 για του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1 ^{ου} βαθμού	R ² (%) 2 ^{ου} βαθμού
Dense meadow	486	Coastal/red	5	5
		Coastal/green	6	7
		Coastal/blue	0	1
		Coastal/nir	6	8
		Blue/red	5	5
		Blue/green	9	10
		Blue/coastal	0	1
		Blue/nir	6	8
		Green/coastal	6	7
		Green/blue	9	10
		Green/red	2	2
		Green/nir	5	7

Πίνακας 14. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *Sentinel 2* για του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας σε βαθιά νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Dense Meadow Deep	363	Coastal/red	0	2
		Coastal/green	1	6
		Coastal/blue	4	4
		Coastal/nir	0	4
		Blue/red	1	3
		Blue/green	8	11
		Blue/coastal	4	4
		Blue/nir	0	4
		Green/coastal	1	7
		Green/blue	8	11
		Green/red	-	0
		Green/nir	0	4

Πίνακας 15. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *Sentinel 2* για την κατηγορία του βραχώδους υποστρώματος

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Bedrock	338	Coastal/red	8	11
		Coastal/green	65	65
		Coastal/blue	8	10
		Coastal/nir	16	16
		Blue/red	2	2
		Blue/green	77	80
		Blue/coastal	8	10
		Blue/nir	11	13
		Green/coastal	65	66
		Green/blue	77	80
		Green/red	36	38
		Green/nir	14	16

Πίνακας 16. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *Sentinel 2* για του μικτού πυθμένα

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Mixed shallow	763	Coastal/red	8	12
		Coastal/green	6	7
		Coastal/blue	0	0
		Coastal/nir	4	7
		Blue/red	8	12
		Blue/green	8	9
		Blue/coastal	0	4
		Blue/nir	4	6
		Green/coastal	6	8
		Green/blue	8	9
		Green/red	4	6
		Green/nir	-	2

Πίνακας 17. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του Sentinel 2 για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Mixed Average depth	870	Coastal/red	12	22
		Coastal/green	11	14
		Coastal/blue	0	0
		Coastal/nir	5	13
		Blue/red	16	30
		Blue/green	33	43
		Blue/coastal	0	0
		Blue/nir	5	14
		Green/coastal	80	84
		Green/blue	84	85
		Green/red	0	4
Green/nir	41	56		

Πίνακας 18. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του Sentinel 2 για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε βαθιά νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Mixed deep	1138	Coastal/red	12	22
		Coastal/green	11	14
		Coastal/blue	0	0
		Coastal/nir	5	13
		Blue/red	16	30
		Blue/green	33	43
		Blue/coastal	0	0
		Blue/nir	5	14
		Green/coastal	12	14
		Green/blue	34	43
		Green/red	9	19
Green/nir	5	13		

Στο σημείο αυτό αξίζει να εξετασθούν συνδυαστικοί λόγοι καναλιών και ο βαθμός συσχέτισης των υπολογισμένων βαθών κατά την εφαρμογή τους (Πίνακας 19). Ως εικόνα-δείγμα επιλέγεται αυτή της άμμου και του μεικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη (mixed average depth) ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα παραπάνω:

Πίνακας 19. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του Sentinel 2 με πράξεις καναλιών

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Mixed Average depth	870	(Green-Blue)/ (Green+Blue)	84	84
		(Green-Red)/ Blue	63	68
		(Green+Coastal)/ Blue	34	34
Sand	634	(Green+Blue)/ Coastal	72	75
		(Coastal+Blue)/ Green	28	29

Τα κανάλια που προτιμήθηκαν είναι τα Coastal blue, Blue και Green, καθώς αυτά στους παραπάνω πίνακες παρουσιάζουν τις υψηλότερες συσχετίσεις στα διάφορα βάθη. Παρατηρείται πως τα αποτελέσματα χειροτερεύουν, οπότε εγκαταλείπεται η περαιτέρω εξέταση των πράξεων καναλιών.

WorldView-2

Πίνακας 20. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *WorldView-2* για την κατηγορία της άμμου

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Sand	660	Coastal/yellow	53	60
		Coastal/red	0	3
		Coastal/green	65	68
		Coastal/blue	5	5
		Coastal/red edge	0	1
		Blue/yellow	52	58
		Blue/red	0	3
		Blue/green	65	70
		Blue/coastal	5	5
		Blue/red edge	0	1
		Green/coastal	64	69
		Green/blue	64	70
		Green/yellow	42	45
		Green/red	0	2
Green/red edge	2	4		

Πίνακας 21. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *WorldView-2* για την κατηγορία του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Dense meadow	521	Coastal/yellow	-	-
		Coastal/red	0	0
		Coastal/green	1	1
		Coastal/blue	1	1
		Coastal/red edge	0	0
		Blue/yellow	0	0
		Blue/red	0	0
		Blue/green	0	0
		Blue/coastal	1	1
		Blue/red edge	0	0
		Green/coastal	0	1
		Green/blue	0	0
		Green/yellow	0	0
		Green/red	0	0
Green/red edge	0	0		

Πίνακας 22. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *WorldView-2* για την κατηγορία του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας σε βαθειά νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Dense meadow deep	377	Coastal/yellow	1	1
		Coastal/red	0	1
		Coastal/green	0	2
		Coastal/blue	2	2
		Coastal/red edge	0	0
		Blue/yellow	2	2
		Blue/red	0	1
		Blue/green	2	3
		Blue/coastal	2	2
		Blue/red edge	0	0
		Green/coastal	0	1
		Green/blue	2	3
		Green/yellow	0	0
		Green/red	0	2
		Green/red edge	0	0

Πίνακας 23. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *WorldView-2* για την κατηγορία του βραχώδους υποστρώματος

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Bedrock	356	Coastal/yellow	2	8
		Coastal/red	1	4
		Coastal/green	52	52
		Coastal/blue	5	8
		Coastal/red edge	0	8
		Blue/yellow	2	7
		Blue/red	1	4
		Blue/green	63	63
		Blue/coastal	5	8
		Blue/red edge	0	8
		Green/coastal	52	52
		Green/blue	62	63
		Green/yellow	9	9
		Green/red	0	3
		Green/red edge	0	7

Πίνακας 24. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του WorldView-2 για την κατηγορία του μικτού πυθμένα

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Mixed shallow	821	Coastal/yellow	5	6
		Coastal/red	0	1
		Coastal/green	6	6
		Coastal/blue	1	2
		Coastal/red edge	-	0
		Blue/yellow	5	5
		Blue/red	0	1
		Blue/green	5	5
		Blue/coastal	1	2
		Blue/red edge	-	2
		Green/coastal	6	6
		Green/blue	5	5
		Green/yellow	5	5
		Green/red	0	1
Green/red edge	-	0		

Πίνακας 25. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf στην εικόνα του WorldView-2 για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 1ου βαθμού	R ² (%) 2ου βαθμού
Mixed Average depth	912	Coastal/yellow	8	9
		Coastal/red	0	0
		Coastal/green	60	71
		Coastal/blue	45	47
		Coastal/red edge	5	7
		Blue/yellow	27	30
		Blue/red	0	0
		Blue/green	58	68
		Blue/coastal	45	47
		Blue/red edge	11	16
		Green/coastal	62	71
		Green/blue	59	68
		Green/yellow	46	46
		Green/red	0	0
Green/red edge	20	28		

Πίνακας 26. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην εικόνα του *WorldView-2* για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε βαθιά νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Mixed deep	1174	Coastal/yellow	3	3
		Coastal/red	-	-
		Coastal/green	0	2
		Coastal/blue	2	2
		Coastal/red edge	1	2
		Blue/yellow	4	4
		Blue/red	-	-
		Blue/green	3	4
		Blue/coastal	2	2
		Blue/red edge	2	2
		Green/coastal	0	0
		Green/blue	3	4
		Green/yellow	2	2
		Green/red	-	0
Green/red edge	1	1		

VNIR

Πίνακας 27. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία της άμμου

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Sand	659	Blue/green	56	59
		Blue/red	1	1
		Blue/nir	11	13
		Green/blue	55	60
		Green/red	10	10
		Green/nir	-	-

Πίνακας 28. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία του πυκνού λιθαδιού ποσειδωνίας

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Dense meadow	519	Blue/green	9	9
		Blue/red	6	9
		Blue/nir	13	15
		Green/blue	9	9
		Green/red	1	1
		Green/nir	8	8

Πίνακας 29. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας σε βαθιὰ νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Dense meadow deep	377	Blue/green	35	4
		Blue/red	17	18
		Blue/nir	29	30
		Green/blue	33	40
		Green/red	4	6
		Green/nir	3	10

Πίνακας 30. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία του βραχώδους υποστρώματος

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Bedrock	322	Blue/green	27	27
		Blue/red	10	20
		Blue/nir	15	25
		Green/blue	27	27
		Green/red	44	48
		Green/nir	46	53

Πίνακας 31. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε ρηχὰ νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Mixed shallow	811	Blue/green	1	2
		Blue/red	0	3
		Blue/nir	4	7
		Green/blue	1	2
		Green/red	-	2
		Green/nir	8	10

Πίνακας 32. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Mixed average depth	710	Blue/green	8	9
		Blue/red	50	51
		Blue/nir	28	30
		Green/blue	8	9
		Green/red	55	56
		Green/nir	30	30

Πίνακας 33. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στην αεροφωτογραφία για την κατηγορία του μικτού πυθμένα σε βαθιά νερά

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Mixed deep	1172	Blue/green	-	0
		Blue/red	0	1
		Blue/nir	2	2
		Green/blue	0	1
		Green/red	1	2
		Green/nir	6	6

RGB (UAV)

Πίνακας 34. Αποτελέσματα μοντέλου *Stumpf* στο φωτομωσαϊκό του UAV

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 1ου βαθμού	R^2 (%) 2ου βαθμού
Bedrock	156	Blue/green	3	8
		Blue/red	4	11
		Green/blue	-	-
		Green/red	1	2

3.5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ

3.5.1. Χρήση Εμπορικών Λογισμικών

Η ENVI (ακρωνύμιο των λέξεων Environment for Visualizing Images) είναι μια εφαρμογή λογισμικού της Exelis Visual Information Solutions (Exelis VIS) που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και την ανάλυση γεωχωρικών εικόνων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό ενός αριθμού επιστημονικών αλγορίθμων για την επεξεργασία εικόνων τα οποία ο χρήστης εφαρμόζει ακολουθώντας τα βήματα του wizard.

Το MATLAB (MATrix LABoratory) είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό πακέτο της MathWorks το οποίο διαθέτει δική του γλώσσα προγραμματισμού. Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και οπτικοποίηση δεδομένων με δυνατότητες προγραμματισμού που το καθιστούν ένα ισχυρό και χρήσιμο εργαλείο στις μαθηματικές και φυσικές επιστήμες. Το Quantum GIS (QGIS) είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Ανοιχτού Κώδικα και διέπεται από την άδεια General Public License (GNU). Αποτελεί επίσημο πρόγραμμα του Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) και υποστηρίζει πολλές μορφές γεωγραφικών δεδομένων (ανυσματικών και ψηφιδωτών), καθώς και μορφές βάσεων δεδομένων. Έχει αρκετές λειτουργικές δυνατότητες που αυξάνονται με τις νεότερες εκδόσεις που είναι συνεχείς.

Το GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) είναι επίσης ένα λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Ανοιχτού Κώδικα και διέπεται από την άδεια General Public License (GNU), επίσημο πρόγραμμα του Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

Χρησιμοποιείται για τη διαχείριση δεδομένων, την επεξεργασία εικόνων, την παραγωγή γραφικών, τη μοντελοποίηση του χώρου και την οπτικοποίηση πολλών μορφών δεδομένων.

Το eCognition της Trimble είναι ένα προηγμένο λογισμικό κατάλληλο για γεωχωρικές εφαρμογές. Είναι σχεδιασμένο για να βελτιώνει, επιταχύνει και αυτοματοποιεί την ερμηνεία ποικίλων γεωχωρικών δεδομένων. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση συγκεκριμένα του eCognition Developer το οποίο αποτελεί ένα ισχυρό περιβάλλον ανάπτυξης για αντικειμενοστραφή ανάλυση εικόνας. Χρησιμοποιείται στις γεω-επιστήμες για την ανάπτυξη εφαρμογών με στόχο την αυτόματη ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης.

Το Photoscan είναι ένα αυτόματο προϊόν λογισμικού της Agisoft που εκτελεί φωτογραμμετρική επεξεργασία ψηφιακών εικόνων και δημιουργεί 3D χωρικά δεδομένα. Χρησιμοποιείται για εφαρμογές GIS, τεκμηρίωση πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς και για έμμεσες παρατηρήσεις διαφόρων κλιμάκων.

3.5.2. Ανάπτυξη και Προσαρμογή Κώδικα

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε κώδικας σε περιβάλλον Matlab για την

✓ *Χωρική Βελτίωση (Pansharpening)*

Στην περίπτωση του δορυφόρου *Sentinel 2*, ο κώδικας ζητάει από τον χρήστη να εισάγει την εικόνα και στη συνέχεια εκτελεί δικυβική παρεμβολή ώστε όλα τα κανάλια της εικόνας να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση.

Στην περίπτωση του δορυφόρου *WorldView-2*, ο κώδικας ζητάει από τον χρήστη να εισάγει την υπερφασματική και παγχρωματική εικόνα και εκτελεί τις απαραίτητες διαδικασίες και υπολογισμούς της μεθόδου HCS.

✓ *Μετατροπή Συντεταγμένων*

Ο κώδικας αυτός βασίστηκε σε προηγούμενες υλοποιήσεις στο πλαίσιο εργασιών στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης (Mountogiannaki, 2015). Σκοπό έχει την μετατροπή των γεωγραφικών συντεταγμένων (φ,λ) στο σύστημα WGS '84 σε ορθογώνιες συντεταγμένες (x,y) στο σύστημα UTM 34N. Ο κώδικας ζητάει από τον χρήστη ένα αρχείο τύπου csv με τις γεωγραφικές συντεταγμένες και, αφού εφαρμόσει τους απαραίτητους συντελεστές μετατροπής, υπολογίζει τις ορθογώνιες συντεταγμένες και τις αποθηκεύει σε νέο csv.

✓ *Υλοποίηση Μοντέλου Lyzenga*

Ο κώδικας ζητάει από τον χρήστη να εισάγει μία εικόνα, ένα αρχείο τύπου csv με τα GCPs και τις συντεταγμένες της δειγματικής περιοχής και στη συνέχεια εκτελεί τις διάφορες πράξεις και διαδικασίες που απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου Lyzenga, όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.3.1. Στο τέλος, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μία «βαθυμετρική» εικόνα στο σύστημα που επιθυμεί ο χρήστης.

✓ *Υλοποίηση Μοντέλου Stumpf*

Ο κώδικας ζητάει από τον χρήστη να εισάγει μία εικόνα και ένα αρχείο τύπου csv με τα GCPs και στη συνέχεια εκτελεί τις διάφορες πράξεις και διαδικασίες που απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου Stumpf, όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.3.2. Στο τέλος, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μία «βαθυμετρική» εικόνα στο σύστημα που επιθυμεί ο χρήστης.

Ενδεικτικά τμήματα των προαναφερθέντων κωδίκων παρατίθενται στο τέλος της εργασίας, στο Παράρτημα Α.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίστηκε τόσο σε ποσοτικούς δείκτες όσο και στην ποιοτική σύγκριση και ανάλυση των παραγόμενων χαρτών – βαθυμετρικών εικόνων. Για την ποσοτική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν ο συντελεστής συσχέτισης R^2 και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE που προέκυψαν κατά την παλινδρόμηση. Συγκεκριμένα:

R^2 : Ο Συντελεστής Συσχέτισης εκφράζει το ποσοστό (%) του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων από την παλινδρόμηση που εφαρμόστηκε. Με άλλα λόγια, αποτελεί το μέτρο της μέσης απόκλισης των εκτιμώμενων από τις παρατηρούμενες τιμές.

RMSE: Η Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος εκφράζει το σφάλμα μεταξύ δύο ομάδων δεδομένων, συγκρίνει, δηλαδή, τις εκτιμώμενες με την παρατηρούμενες τιμές.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι εκτιμώμενες τιμές αφορούν τα βάθη όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των βαθυμετρικών μοντέλων και οι παρατηρούμενες τιμές τα βάθη όπως έχουν προκύψει από τις επιτόπιες μετρήσεις.

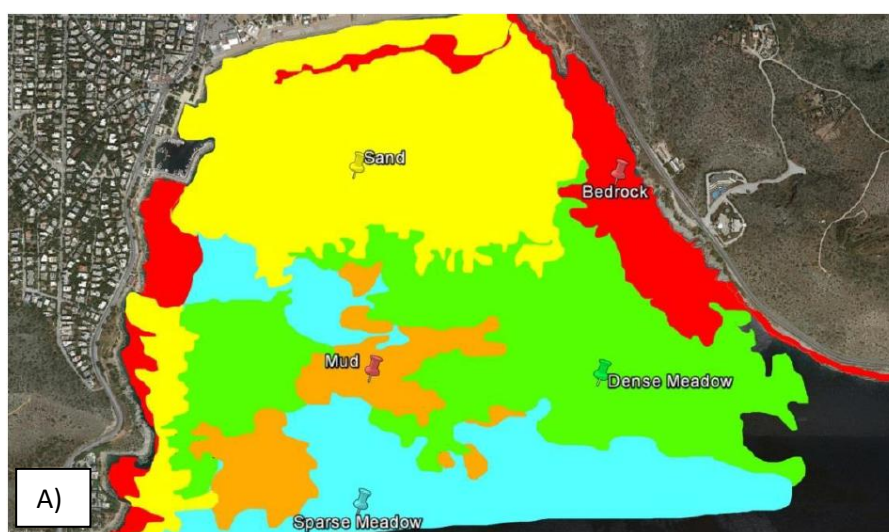
4.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΟΛΠΟΥ ΒΑΡΚΙΖΑΣ

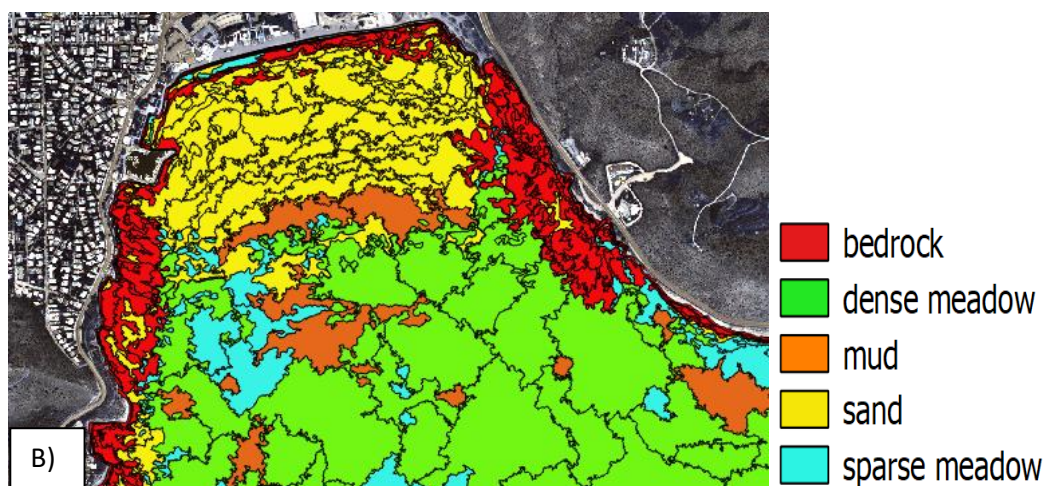
4.1.1. Χαρτογράφηση Πυθμένα

Από τις διαδικασίες χαρτογράφησης πυθμένα, όπως περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3., προκύπτει ως βέλτιστη μέθοδος για τη χαρτογράφηση του πυθμένα αυτή της αντικειμενοστραφούς (object-based) ταξινόμησης.

Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής (Σχήμα 42) ήταν ποιοτικά καλύτερο σε σχέση με αυτό τόσο της επιβλεπόμενης, όσο και της μη-επιβλεπόμενης ταξινόμησης κατά την σύγκρισή τους με τα δεδομένα ελέγχου, καθώς ήταν η μόνη μέθοδος ταξινόμησης με την οποία αναγνωρίστηκαν στην εικόνα όλες οι κατηγορίες πυθμένα του κόλπου.

Επίσης, το αποτέλεσμα των δύο πρώτων ταξινομήσεων (επιβλεπόμενης και μη) εξάγεται σε μορφή TIFF ενώ αυτό της τελευταίας (αντικειμενοστραφούς) σε Shapefile που είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο από ποικίλα λογισμικά και για πλήθος εφαρμογών.





Σχήμα 42. Α) Πραγματική εικόνα του πυθμένα του κόλπου της Βάρκιζας, Β) η εικόνα του πυθμένα όπως προκύπτει από την εφαρμογή της αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης

4.1.2. Βαθυμετρία σε Εικόνα Sentinel 2

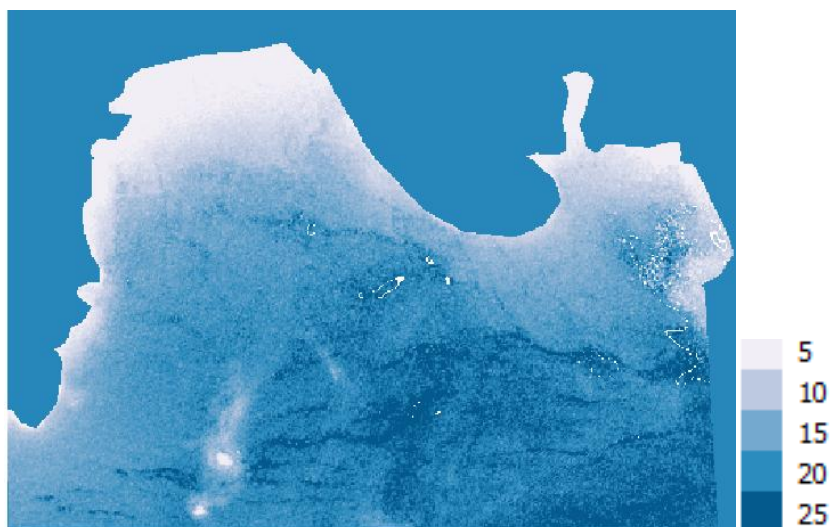
Πίνακας 35. Τα καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga πάνω από τους διάφορους τύπους πυθμένα στην εικόνα του Sentinel 2

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	R^2 (%)		RMSE (m)
		1ου βαθμού	2ου βαθμού	
LYZENGA	Sand	71	75	0.713
	Dense meadow		-	
	Dense meadow deep		FAILED	
	Bedrock	68	76	1.167
	Mixed shallow		-	
	Mixed average depth	76	90	0.926
	Mixed deep		-	

Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 35, προκύπτει ότι η δευτεροβάθμια εξίσωση προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Επίσης, οι κατηγορίες των πυκνών λιβαδιών ποσειδωνίας (*dense meadow*), μικτού πυθμένα σε ρηχά και βαθιά νερά (*mixed shallow* και *mixed deep*) παρουσιάζουν πολύ χαμηλές συσχετίσεις, ενώ οι κατηγορίες της άμμου (*sand*), του βραχώδους υποστρώματος (*bedrock*) και του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη (*mixed average depth*) παρουσιάζουν ικανοποιητικές συσχετίσεις. Τέλος, το μοντέλο αποτυγχάνει ολοσχερώς στην περίπτωση του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας σε βαθιά νερά (*dense meadow deep*).

Πίνακας 36. Αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρη την εικόνα του Sentinel 2

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Sentinel 2	9450	748461, 4187462 750023, 4186787	92	1.549



Σχήμα 43. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Lyzenga στην εικόνα του Sentinel 2

Από τα ποσοτικά (Πίνακας 36) και τα ποιοτικά αποτελέσματα (Σχήμα 43) της εφαρμογής του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρη την έκταση της εικόνας του δορυφόρου Sentinel 2, προκύπτει ότι τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζουν πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης με τα μετρημένα βάθη και μάλιστα έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια της τάξης του 1.5 m.

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου πάνω από ομοιογενείς τύπους πυθμένα (Πίνακας 35) έδωσε μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, δηλαδή όταν το μοντέλο εφαρμόζεται πάνω από ομοιογενείς περιοχές υπολογίζει με αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια τα βάθη.

Πίνακας 37. Τα καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου Stumpf πάνω από τους διάφορους τύπους πυθμένα στην εικόνα του Sentinel 2

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
STUMPF	Sand	Green/Blue	78	0.639
	Dense Meadow		-	
	Dense Meadow Deep		-	
	Bedrock	Green/Blue	80	0.939
	Mixed Shallow		-	
	Mixed average depth	Green/Blue	86	0.718
	Mixed Deep		-	

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα 36, η δευτεροβάθμια εξίσωση προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία της άμμου (*sand*) παρουσιάζει ικανοποιητική συσχέτιση, η κατηγορία των πυκνών λιβαδιών Ποσειδωνίας (*dense meadow*) αποτυγχάνει σε όλα τα βάθη, η κατηγορία του βραχώδους υποστρώματος (*bedrock*) παρουσιάζει αρκετά υψηλό συντελεστή συσχέτισης και, τέλος, η κατηγορία του μεικτού πυθμένα (*mixed*) παρουσιάζει αρκετά υψηλό συντελεστή συσχέτισης σε μέτρια βάθη, ενώ αποτυγχάνει στα βαθειά και ρηχά νερά.

Μία ενδεικτική βαθυμετρική εικόνα για ολόκληρη την έκταση του κόλπου θα μπορούσε να προκύψει εφαρμόζοντας τον λόγο **Green/blue**.

Πίνακας 38. Αποτελέσματα του μοντέλου Stumpf σε ολόκληρη την εικόνα του Sentinel 2

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Sentinel 2	9450	Green/blue	87	2.486



Σχήμα 44. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Stumpf στην εικόνα του Sentinel 2

Από τα ποσοτικά (Πίνακας 38) και τα ποιοτικά αποτελέσματα (Σχήμα 44) της εφαρμογής του μοντέλου Stumpf σε ολόκληρη την έκταση της εικόνας του δορυφόρου Sentinel 2, προκύπτει ότι τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζουν αρκετά υψηλό συντελεστή συσχέτισης με τα μετρημένα βάθη, ενώ έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια της τάξης των 2.5 m.

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου πάνω από ομοιογενείς τύπους πυθμένα (Πίνακας 37) έδωσε πολύ μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, δηλαδή όταν το μοντέλο εφαρμόζεται πάνω από ομοιογενείς περιοχές υπολογίζει με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια τα βάθη.

4.1.3. Βαθυμετρία σε Εικόνα WorldView-2

Πίνακας 39. Τα καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga πάνω από τους διάφορους τύπους πυθμένα στην εικόνα του WorldView-2

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	R^2 (%)		RMSE (m)
		1ου βαθμού	2ου βαθμού	
LYZENGA	Sand	71	71	0.720
	Dense meadow		-	
	Dense meadow deep		FAILED	
	Bedrock	67	69	1.170
	Mixed shallow		-	
	Mixed average depth	60	72	1.226
	Mixed deep		-	

Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 39, προκύπτει ότι η δευτεροβάθμια εξίσωση προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Επίσης, οι κατηγορίες της άμμου (*sand*), του βραχώδους

υποστρώματος (*bedrock*) και του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη (*mixed average depth*) παρουσιάζουν ικανοποιητικές συσχετίσεις. Τέλος, το μοντέλο αποτυγχάνει στην περίπτωση του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας σε όλα τα βάθη (*dense meadow* και *dense meadow deep*), καθώς και σε αυτή του μικτού πυθμένα σε βαθιά νερά (*mixed deep*).

Πίνακας 40. Αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρη την εικόνα του WorldView-2

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
WorldView-2	8005	748568, 4187676 749764, 4187317	80	2.500



Σχήμα 45. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Lyzenga στην εικόνα του WV2

Η εικόνα παρουσιάζεται σημαντικά αλλοιωμένη, καθώς υπέστη επεξεργασία προκειμένου να απομακρυνθούν οι ακραίες τιμές απείρου (*inf*) που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου και να αντικατασταθούν με εικονοστοιχεία με μηδενική καταχώρηση.

Πέρα από αυτό το οπτικό συμπέρασμα, από τα ποσοτικά (Πίνακας 40) και τα ποιοτικά αποτελέσματα (Σχήμα 45) της εφαρμογής του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρη την έκταση της εικόνας του δορυφόρου WorldView-2, προκύπτει ότι τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζουν ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης με τα μετρημένα βάθη, ενώ έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια της τάξης των 2.5 m.

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου πάνω από ομοιογενείς τύπους πυθμένα (Πίνακας 39) έδωσε αρκετά μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, δηλαδή όταν το μοντέλο εφαρμόζεται πάνω από ομοιογενείς περιοχές υπολογίζει με αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια τα βάθη.

Πίνακας 41. Τα καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου *Stumpf* πάνω από τους διάφορους τύπους πυθμένα στην εικόνα του *WorldView-2*

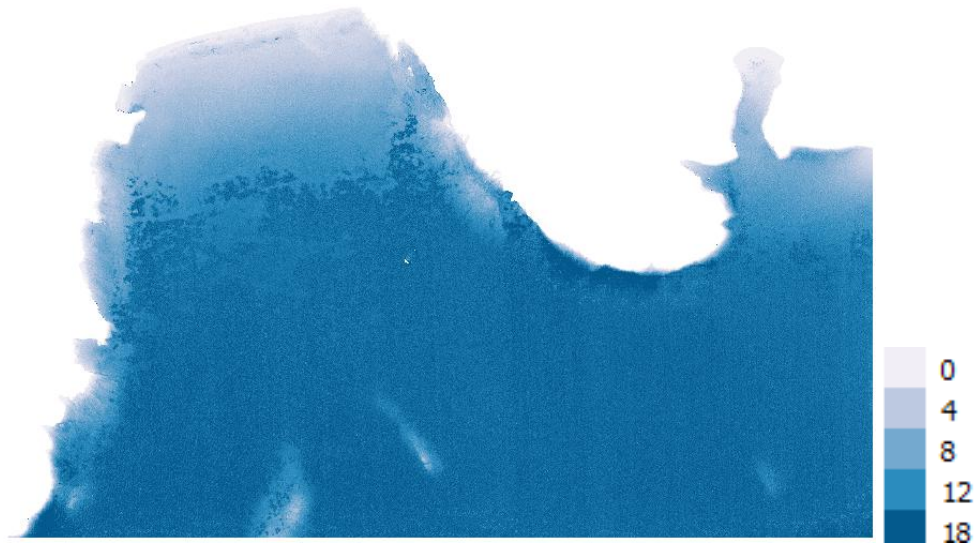
ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
STUMPF	Sand	Blue/Green	72	0.727
	Dense Meadow		-	
	Dense Meadow Deep		-	
	Bedrock	Blue/Green	63	1.309
	Mixed Shallow		-	
	Mixed average depth	Green/Coastal	71	1.053
	Mixed Deep		-	

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 41, η δευτεροβάθμια εξίσωση προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία της άμμου (*sand*), του βραχώδους υποστρώματος (*bedrock*) και του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη (*mixed average depth*) παρουσιάζουν χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης, ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες αποτυγχάνουν εντελώς.

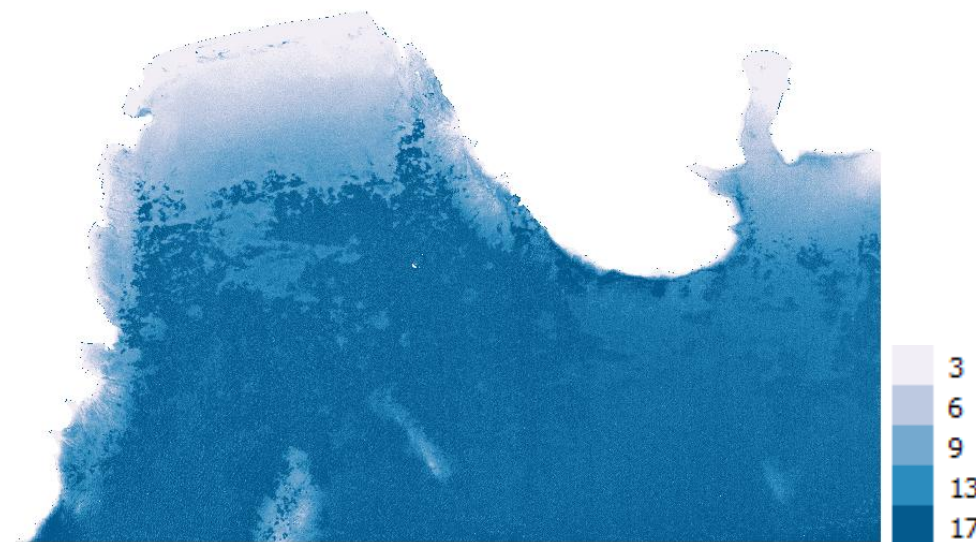
Μία ενδεικτική βαθυμετρική εικόνα για ολόκληρη την έκταση του κόλπου θα μπορούσε να προκύψει εφαρμόζοντας είτε τον λόγο **Blue/Green** είτε **Green/Coastal** στην εικόνα.

Πίνακας 42. Αποτελέσματα του μοντέλου *Stumpf* σε ολόκληρη την εικόνα του *WorldView-2*

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
WorldView-2	9668	Blue/Green	78	2.571
		Green/Coastal	78	2.661



Σχήμα 46. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Stumpf στην εικόνα του WV2 (λόγος Blue/Green)



Σχήμα 47. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Stumpf στην εικόνα του WV2 (λόγος Green/Coastal)

Από τα ποσοτικά (Πίνακας 42) και τα ποιοτικά αποτελέσματα (Σχήμα 46 και 47) της εφαρμογής του μοντέλου Stumpf σε ολόκληρη την έκταση της εικόνας του δορυφόρου WorldView-2 , προκύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις τα εκτιμώμενα βάρη παρουσιάζουν ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης με τα μετρημένα βάρη, ενώ έχουν υπολογιστεί με ελαφρώς καλύτερη ακρίβεια (της τάξης των 2.6 m) στην περίπτωση εφαρμογής του λόγου Blue/Green).

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου πάνω από ομοιογενείς τύπους πυθμένα (Πίνακας 41) έδωσε πολύ μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, δηλαδή όταν το μοντέλο εφαρμόζεται πάνω από ομοιογενείς περιοχές υπολογίζει με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια τα βάρη.

4.1.4. Βαθυμετρία σε Εικόνα από Εναέριο Επανδρωμένο Όχημα (Αεροπλάνο)

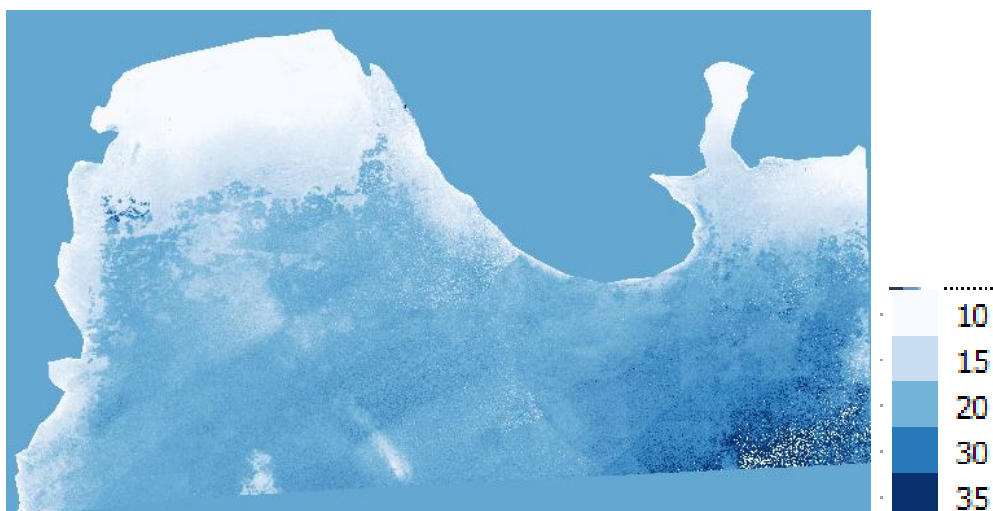
Πίνακας 43. Τα καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga πάνω από τους διάφορους τύπους πυθμένα στην αεροφωτογραφία

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	R^2 (%)		RMSE (m)
		1ου βαθμού	2ου βαθμού	
LYZENGA	Sand	72	72	0.712
	Dense meadow		-	
	Dense meadow deep		FAILED	
	Bedrock	68	71	1.247
	Mixed shallow		-	
	Mixed average depth	56	56	0.938
	Mixed deep	56	58	1.075

Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 43, προκύπτει ότι η δευτεροβάθμια εξίσωση προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Επίσης, οι κατηγορίες της άμμου (*sand*) και του βραχώδους υποστρώματος (*bedrock*) μέτριες συσχετίσεις, ενώ οι κατηγορίες του μικτού πυθμένα παρουσιάζει χαμηλές συσχετίσεις σε όλα τα βάθη (*mixed average depth* και *mixed deep*). Τέλος, το μοντέλο αποτυγχάνει στην περίπτωση του πυκνού λιβαδιού ποσειδωνίας σε όλα τα βάθη (*dense meadow* και *dense meadow deep*), καθώς και σε αυτή του μικτού πυθμένα σε ρηχά νερά (*mixed shallow*).

Πίνακας 44. Αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρη την αεροφωτογραφία

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
A/Φ	9662	748368, 4187878 749237, 4187654	78	2.559



Σχήμα 48. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Lyzenga στην αεροφωτογραφία

Από τα ποσοτικά (Πίνακας 44) και τα ποιοτικά αποτελέσματα (Σχήμα 48) της εφαρμογής του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρη την έκταση της αεροφωτογραφίας, προκύπτει ότι τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζουν ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης με τα μετρημένα βάθη, ενώ έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια της τάξης των 2.5 m.

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου πάνω από ομοιογενείς τύπους πυθμένα (Πίνακας 43) έδωσε αρκετά μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, δηλαδή όταν το μοντέλο εφαρμόζεται πάνω από ομοιογενείς περιοχές υπολογίζει με αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια τα βάθη.

Πίνακας 45. Τα καλύτερα αποτελέσματα του μοντέλου Stumpf πάνω από τους διάφορους τύπους πυθμένα στην αεροφωτογραφία

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
STUMPF	Sand	Green/Blue	60	0.892
	Dense Meadow		-	
	Dense Meadow Deep		-	
	Bedrock	Green/NIR	53	1.584
	Mixed Shallow		-	
	Mixed average depth	Green/Red	56	0.948
	Mixed Deep		-	

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 45, η δευτεροβάθμια εξίσωση προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία της άμμου (*sand*), του βραχώδους υποστρώματος (*bedrock*) και του μικτού πυθμένα σε μέτρια βάθη (*mixed average*

depth) παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης, ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες πυθμένα αποτυγχάνουν εντελώς.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 45, στην περίπτωση της αεροφωτογραφίας είναι δύσκολο να βρεθεί ένας λόγος καναλιών ο οποίος θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ολόκληρη την εικόνα. Ενδεικτικά, εφαρμόζεται ο λόγος **Green/Blue**, καθώς η εφαρμογή του μοντέλου στην συγκεκριμένη εικόνα είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους της και της υψηλής χωρικής ανάλυσης.

Πίνακας 446. Αποτελέσματα του μοντέλου Stumpf σε ολόκληρη την αεροφωτογραφία

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	ΛΟΓΟΣ	R ² (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
A/Φ	9662	Green/Blue	73	2.694



Σχήμα 49. Βαθυμετρική εικόνα μετά την εφαρμογή του μοντέλου Stumpf στην αεροφωτογραφία

Από τα ποσοτικά (Πίνακας 46) και τα ποιοτικά αποτελέσματα (Σχήμα 49) της εφαρμογής του μοντέλου Stumpf σε ολόκληρη την έκταση της αεροφωτογραφίας, προκύπτει ότι τα εκτιμώμενα βάθη παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό συντελεστή συσχέτισης με τα μετρημένα βάθη, ενώ έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια της τάξης των 2.7 m.

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου πάνω από ομοιογενείς τύπους πυθμένα (Πίνακας 45) έδωσε πολύ μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, δηλαδή όταν το μοντέλο εφαρμόζεται πάνω από ομοιογενείς περιοχές υπολογίζει με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια τα βάθη.

4.1.5. Βαθυμετρία σε Εικόνα από Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα (UAV)

Πίνακας 457. Αποτελέσματα του μοντέλου Lyzenga σε ολόκληρο το φωτομωσαϊκό του UAV

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	R^2 (%)	R^2 (%)	RMSE (m)
		1ου βαθμού	2ου βαθμού	
LYZENGA	Bedrock	13	15	0.712

Πίνακας 468. Αποτελέσματα του μοντέλου Stumpf σε ολόκληρο το φωτομωσαϊκό του UAV

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΛΟΓΟΣ	R^2 (%)	RMSE (m)
			2ου βαθμού	
STUMPF	Bedrock	Blue/Red	13	1.074

Και στις δύο περιπτώσεις (Πίνακας 47 και 48), οι βαθμοί συσχέτισης είναι τόσο χαμηλοί ώστε δεν έχει νόημα η εφαρμογή οποιουδήποτε μοντέλου στην εν λόγω εικόνα, παρόλο που η Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος δίνει και στις δύο περιπτώσεις ικανοποιητική τιμή της τάξης του 1 m, καθώς ένα μοντέλο θεωρείται πετυχημένο όταν επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συνδυασμός συντελεστή συσχέτισης και τιμής σφάλματος.

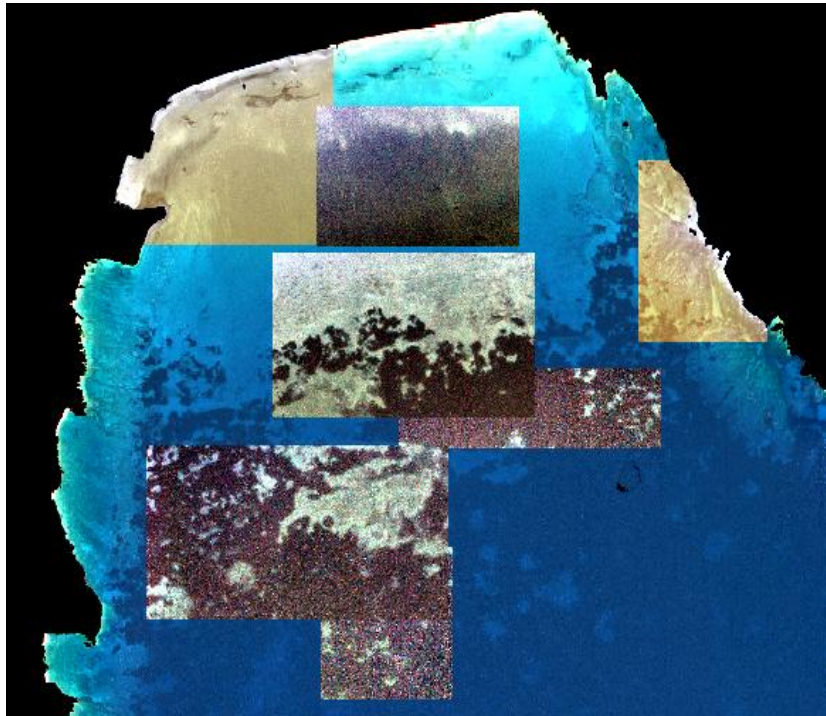
Αξίζει, βέβαια, στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα βαθυμετρικά δεδομένα στην περιοχή που απεικονίζεται στο φωτομωσαϊκό όπως προέκυψε από τις εικόνες που λήφθηκαν με το UAV, δεν ήταν επαρκή σε αριθμό ούτε ικανοποιητικά κατανομημένα σε όλη την έκταση της εικόνας, καθώς η περιοχή αυτή βρίσκεται σε ρηχά νερά με έντονη παρουσία βράχων, γεγονός που δεν επέτρεψε την λεπτομερή βυθοσκόπηση με χρήση σκάφους από το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

4.1.5. Συγκεντρωτικοί Πίνακες

Ομοιογενής Πυθμένας

Πίνακας 479. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ομοιογενή πυθμένα

	EIKONA							
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΥΘΜΕΝΑ	Sentinel 2		WorldView-2		VNIR		RGB (UAV)	
	R^2 (%)							
	<i>Lyzenga</i>	<i>Stumpf</i>	<i>Lyzenga</i>	<i>Stumpf</i>	<i>Lyzenga</i>	<i>Stumpf</i>	<i>Lyzenga</i>	<i>Stumpf</i>
Sand	75	78	71	72	72	60		
Bedrock	76	80	69	63	71	53	15	13
Mixed average depth	90	86	72	71	56	56		
Mixed Deep	-	-	-	-	58	-		
	$RMSE$ (m)							
Sand	0.713	0.639	0.720	0.727	0.712	0.892		
Bedrock	1.167	0.939	1.170	1.309	1.247	1.584	0.712	1.074
Mixed average depth	0.926	0.718	1.226	1.053	0.938	0.948		
Mixed Deep	-	-	-	-	1.075	-		



Σχήμα 50. Περιοχές με ομογενή πυθμένα

Από τον Πίνακα 49, προκύπτει πως στην περίπτωση όπου τα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε ομογενή πυθμένα (οι υποπεριοχές προέκυψαν από τη χαρτογράφηση του πυθμένα και φαίνονται στο Σχήμα 50), τα μοντέλα κατάφεραν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μόλις σε 4 από τις 7 κατηγορίες πυθμένα. Σε αυτές, το μοντέλο Lyzenga έδωσε ελαφρώς υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης, ενώ και τα δύο μοντέλα έδωσαν πολύ χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης στην περίπτωση του UAV, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ποιότητα των GCPs στην εν λόγω περιοχή.

Υψηλοί συντελεστές συσχέτισης ($R^2 > 80\%$) επιτεύχθηκαν μόνο στην περίπτωση της εικόνας του δορυφόρου Sentinel 2, με τον μεγαλύτερο αυτών να αγγίζει το 90% και να αποδίδεται στο μοντέλο Lyzenga. Σχετικά με τις τιμές της Ρίζας του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος και σύμφωνα με τον Πίνακα 1, όπου παρουσιάζονται οι αναμενόμενες τιμές RMSE για τα εν λόγω μοντέλα, αυτό του Lyzenga κατόρθωσε σε κάθε περίπτωση να είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων (1.74m – 3.02m), ενώ αυτό του Stumpf μόνο σε τρεις περιπτώσεις έδωσε σφάλματα εντός των προβλεπόμενων ορίων (0.2m – 0.7m).

Ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει από την εξέταση των παραπάνω συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων (Πίνακας 49) είναι ότι το μεν μοντέλο Stumpf δίνει μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος σε δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης, το δε μοντέλο Lyzenga σε δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης. Δηλαδή, το μεν μοντέλο Stumpf ενδείκνυται περισσότερο για εκτίμηση βαθών σε περιπτώσεις τηλεπισκοπικών δεδομένων χαμηλής χωρικής ανάλυσης, το δε Lyzenga σε περιπτώσεις δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης.

Ετερογενής Πυθμένας

Πίνακας 50. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ετερογενή πυθμένα στην εικόνα του Sentinel 2

ΕΙΚΟΝΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Sentinel 2	LYZENGA	9450	92	1.549
	STUMPF	9450	87	2.486

Πίνακας 51. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ετερογενή πυθμένα στην εικόνα του WorldView-2

ΕΙΚΟΝΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
WorldView-2	LYZENGA	8005	80	2.500
	STUMPF	9668	78	2.571

Πίνακας 52. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ετερογενή πυθμένα στην αεροφωτογραφία

ΕΙΚΟΝΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
Α/Φ	LYZENGA	9662	78	2.559
	STUMPF	9662	73	2.694

Πίνακας 53. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ετερογενή πυθμένα στο φωτομωσαϊκό του UAV

ΕΙΚΟΝΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
UAV	LYZENGA	156	15	0.712
	STUMPF	156	13	1.074

Από τους Πίνακες 50 έως και 53, στην περίπτωση όπου τα μοντέλα εφαρμόζονται σε ετερογενή πυθμένα, παρατηρείται πως το μοντέλο Lyzenga δίνει σε όλες τις περιπτώσεις τόσο μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης R^2 όσο και μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE) από αυτό του Stumpf. Δηλαδή, το μοντέλο Lyzenga ενδείκνυται περισσότερο για εφαρμογές βαθυμετρίας σε ετερογενείς πυθμένες έναντι αυτού του Stumpf.

Και στην περίπτωση εφαρμογής του πάνω από ετερογενή πυθμένα, το μοντέλο Lyzenga κατόρθωσε σε όλα τα τηλεπισκοπικά δεδομένα να εκτιμήσει τα βάθη με ακρίβεια εντός των προβλεπόμενων ορίων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (1.74m – 3.02m), ενώ αυτό του Stumpf απέτυχε σε κάθε περίπτωση (0.2m – 0.7m).

Ένα, επίσης, πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει από την εξέταση των παραπάνω αποτελεσμάτων (Πίνακες 50 έως και 53) είναι ότι όσο αυξάνεται η χωρική ανάλυση των δεδομένων τόσο φθίνει η αποτελεσματικότητα και των δύο βαθυμετρικών μοντέλων.

4.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΡΑΛΙΑΣ ΛΑΜΠΑΓΙΑΝΝΑ

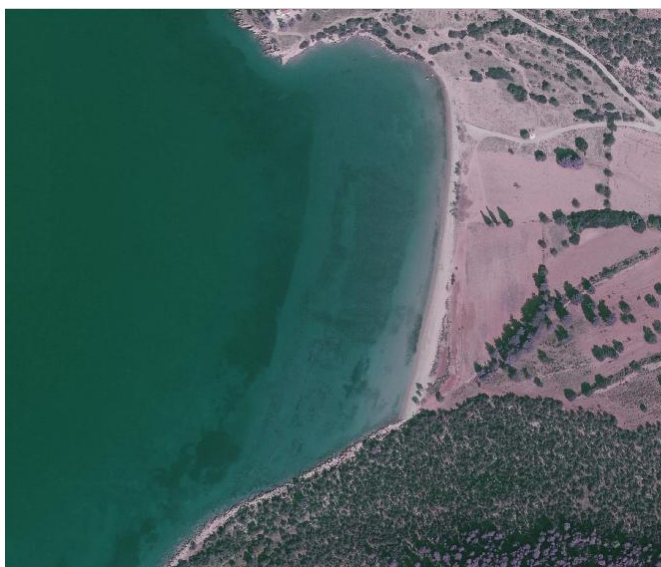
Σε αυτό το σημείο της εργασίας, θα γίνει μία ολοκληρωμένη εφαρμογή και αξιολόγηση βαθυμετρίας και χαρτογράφησης πυθμένα στην παραλία Λαμπαγιαννά Αργολίδας.

Τα βαθυμετρικά δεδομένα προήλθαν από τις επιτόπιες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή τον Αύγουστο 2016, κατά την αποτύπωση μέρους του οικισμού με τοπογραφικές μεθόδους (Λυμπεροπούλου, 2017). Πρόκειται για 107 σημεία με συντεταγμένες γνωστές στο σύστημα ΕΓΣΑ '87 και τα οποία επικεντρώνονται σε βάθη από 1.5m έως 2.5m.

Από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας διατέθηκε αεροφωτογραφία μεγέθους εδαφοψηφίδας 25cm, με 4 κανάλια στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα (Red, Green, Blue, NIR). Η εικόνα αναφέρεται στο σύστημα ΕΓΣΑ '87.

4.2.1. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ

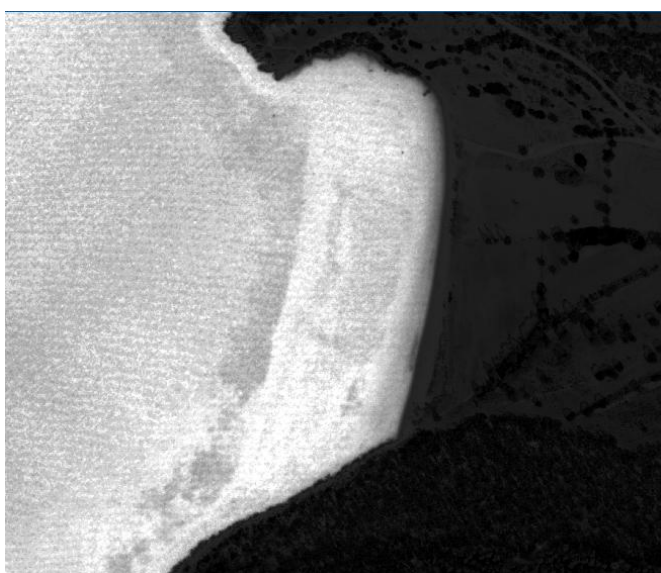
Αρχικά, εφαρμόστηκαν διάφοροι συνδυασμοί, λόγοι και πράξεις καναλιών στη διαθέσιμη εικόνα (Σχήμα 51 έως και 54) προκειμένου να επιλεχθεί η κατάλληλη για φωτοερμηνεία του βυθισμένου οικισμού. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του εργαλείου Raster Calculator του QGIS.



Σχήμα 51. Φυσικό έγχρωμο σύνθετο 123RGB



Σχήμα 52. Έγχρωμο σύνθετο 423RGB



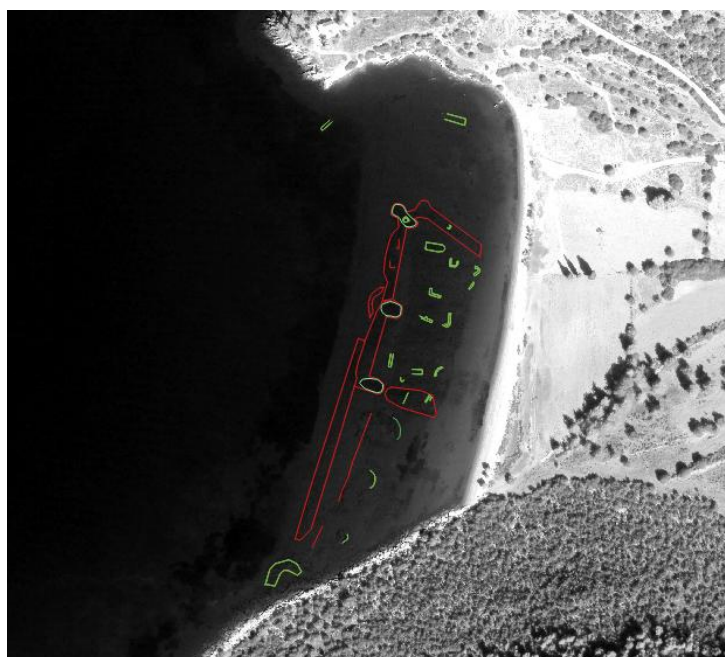
Σχήμα 53. Η εικόνα μετά την εφαρμογή του λόγου καναλιών Green/NIR



Σχήμα 54. Η εικόνα μετά την εφαρμογή της πράξης των καναλιών (Green-NIR)/(Green+NIR)

Από τις παραπάνω, ως καταλληλότερη επιλέχθηκε η τελευταία (Σχήμα 54) παράλληλα με συνδυαστική εξέταση όλων των προηγούμενων. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί πως για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού φωτοερμηνευτικού αποτελέσματος είναι απαραίτητη η επιτόπια εξέταση του χώρου με τη συνοδεία αρχαιολόγου που θα παράσχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την δημιουργία φωτοερμηνευτικών κλειδιών κατάλληλων για αρχαιολογικές εφαρμογές.

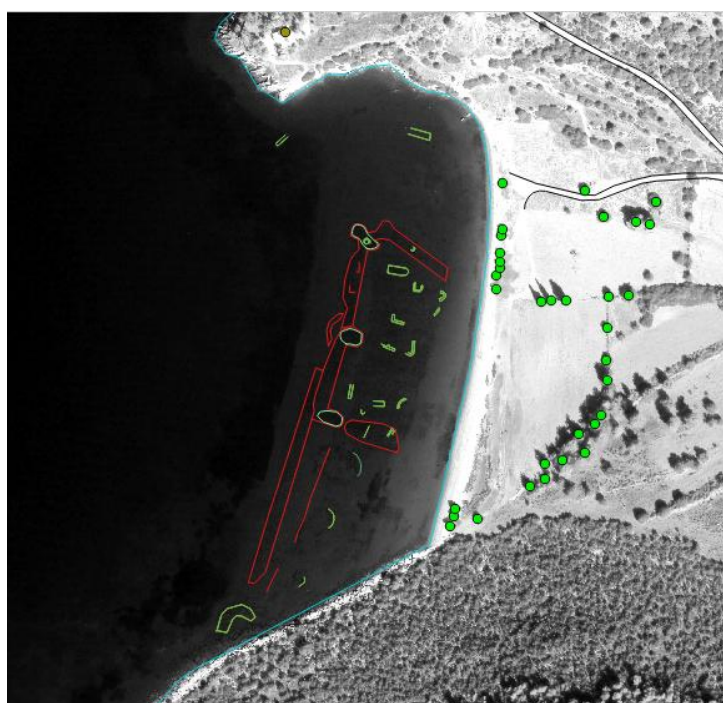
Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις και απαραίτητες επεξηγήσεις κατά την πραγματοποίηση βουτιάς πάνω από την εν λόγω ενάλια αρχαιότητα, στην εικόνα αναγνωρίστηκαν ένα οχυρωματικό τείχος, τρεις πύργοι οι οποίοι πιθανώς χρησίμευαν στην στήριξη του τείχους και την παρατήρηση της γύρω περιοχής, καθώς και πολυάριθμα ευρήματα, κυρίως θεμελίων κτισμάτων (Σχήμα 55).



- τείχος
- πύργοι
- - - ευρήματα

Σχήμα 55. Η παράλληλη διαδικασία επιτόπιας εξέτασης και φωτοερμηνείας της εικόνας είχε ως αποτέλεσμα την αναγνώριση ενός οχυρωματικού τείχους, τριών πύργων και πολυάριθμων θεμελιακών ευρημάτων

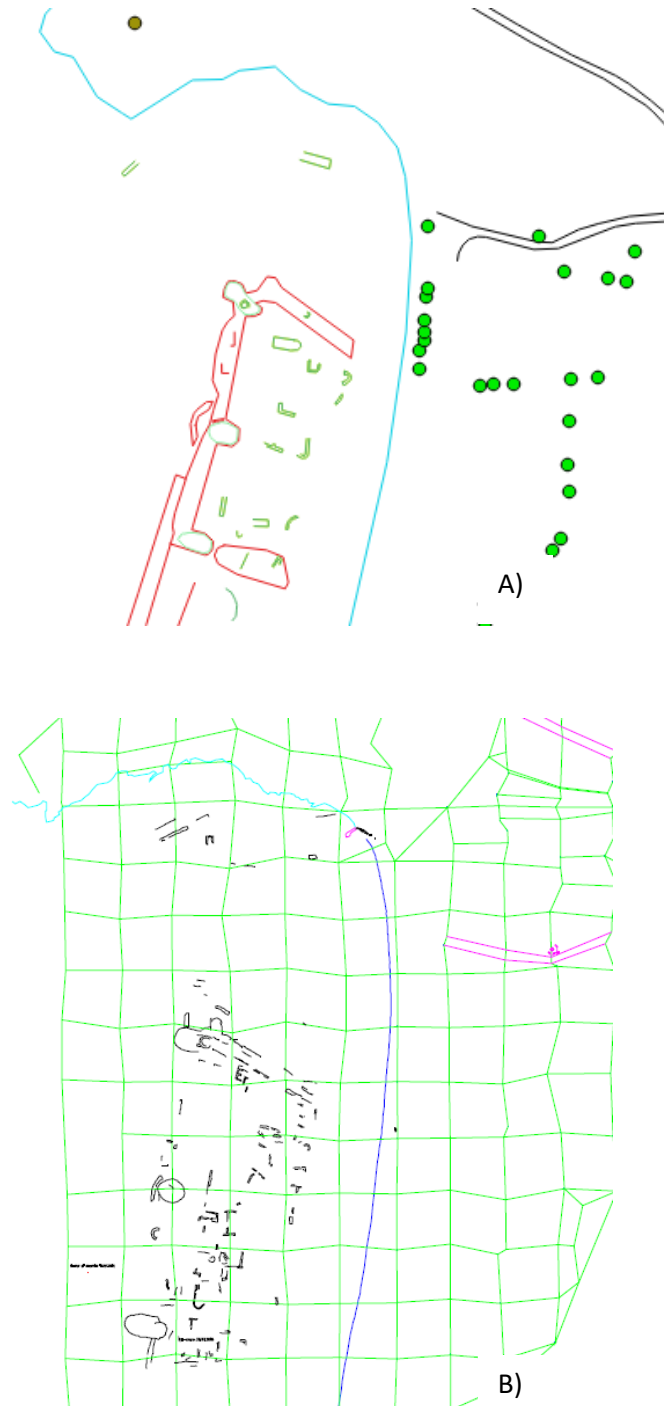
Παράλληλα με τη γεωμετρική τεκμηρίωση του αρχαιολογικού χώρου, στην τηλεπισκοπική μέθοδο ο παρατηρητής έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί και την κλασική τοπογραφική αποτύπωση του περιβάλλοντος χώρου που είναι απαραίτητη για την ολοκληρωμένη τεκμηρίωση του σημείου ενδιαφέροντος (Σχήμα 56).



- τείχος
- πύργοι
- - - ευρήματα
- δέντρο
- εκκλησία
- ακτογραμμή
- δρόμοι

Σχήμα 56. Παράλληλα με την γεωμετρική τεκμηρίωση του αρχαιολογικού χώρου μπορεί να γίνει και η αποτύπωση στοιχείων του περιβάλλοντος χώρου, όπως φυσικά και τεχνητά στοιχεία (δέντρα και δρόμοι), σημεία αναφοράς (εκκλησία) κλπ

Από τις αρχαιολογικές έρευνες στην περιοχή έχει δημιουργηθεί ένα σκαρίφημα των ευρημάτων σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, το οποίο στο Σχήμα 57 παρατίθεται σε άμεση αντιπαραβολή με αυτό που δημιουργήθηκε κατά την αποτύπωση με την τηλεπισκοπική μέθοδο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 57. Αποτύπωση με A) τηλεπισκοπική μέθοδο και B) σκαρίφημα αρχαιολογικής ομάδας

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 57, η αποτύπωση με τη μέθοδο της Τηλεπισκόπησης έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα, αφού αναγνωρίστηκαν αρκετά από τα αρχαιολογικά ευρήματα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη χωρική ανάλυση της δεδομένης εικόνας (25cm), τα διαθέσιμα κανάλια αυτής όσο και την απειρία του χρήστη σε ό,τι αφορά τις αρχαιολογικές έρευνες.

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί η οριζοντιογραφική αποτύπωση του βυθισμένου οικισμού και υπολείπεται η απόκτηση πληροφορίας στην 3^η διάσταση (βάθος σε αυτήν την περίπτωση) ώστε να ολοκληρωθεί και υψομετρικά. Για το σκοπό αυτό πρέπει να πραγματοποιηθεί βαθυμετρία στην περιοχή της παραλίας γύρω από τον οικισμό.

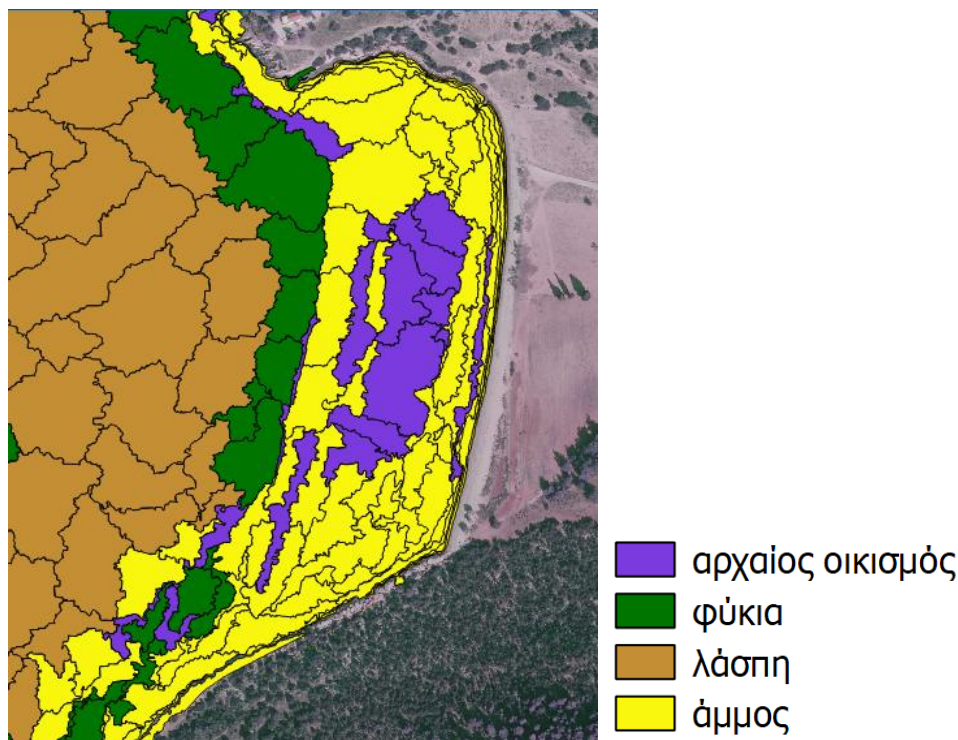
4.2.2. ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ & ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ

Πρόκειται για αεροφωτογραφία γεωαναφερμένη στο σύστημα ΕΓΣΑ '87, η οποία μάλιστα δεν παρουσιάζει φαινόμενο λαμπυρίσματος, οπότε δεν απαιτείται άλλη ενέργεια προεπεξεργασίας.

Ακολουθήθηκε η διαδικασία όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.3.3. Οι κατηγορίες του πυθμένα προέκυψαν από την επιτόπια παρατήρηση του βυθού και ήταν η άμμος, τα φύκια και η λάσπη.

Κατά την εκτέλεση της ταξινόμησης θεωρήθηκε σκόπιμο να εισαχθεί ως κατηγορία πυθμένα και αυτή του αρχαίου οικισμού, ώστε να εξετασθεί κατά πόσο η αντικειμενοστραφής επεξεργασία μίας εικόνας θα μπορούσε να συμβάλλει στην ανακάλυψη βυθισμένων αρχαιολογικών χώρων, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ένδειξη ύπαρξης τέτοιου σε μία περιοχή.

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 58, καθώς απέδωσαν την εικόνα του πυθμένα όπως αυτή έγινε αντιληπτή κατά τις βουτιές που πραγματοποιήθηκαν εκεί.



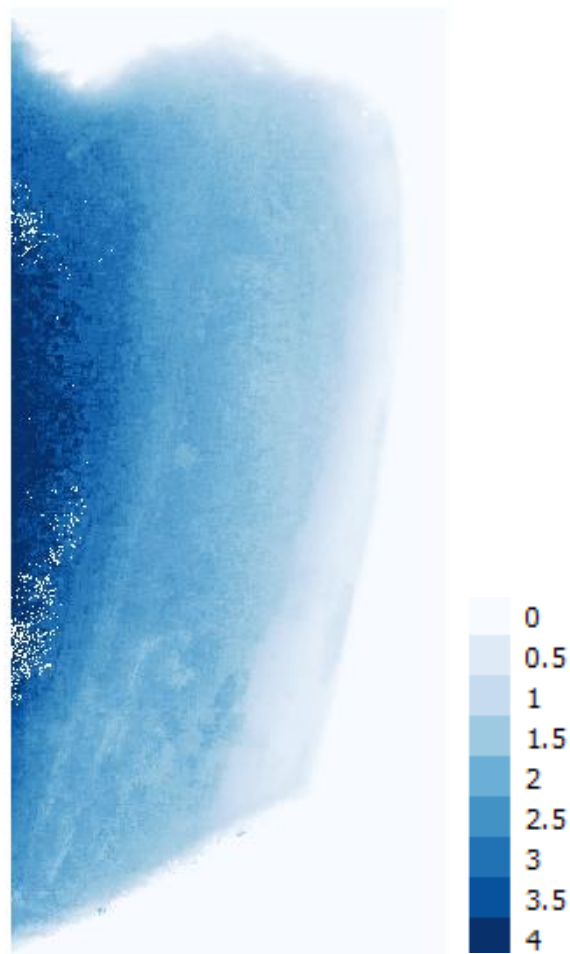
Σχήμα 58. Κατηγορίες πυθμένα που συναντώνται στην παραλία Λαμπαγιαννά. Ο αλγόριθμος κατάφερε να αναγνωρίσει τις περιοχές όπου υπάρχουν βυθισμένα αρχαιολογικά ευρήματα

Για την εκτέλεση βαθυμετρίας επί της διαθέσιμης εικόνας είναι απαραίτητο πρώτα να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο βαθυμετρίας.

Η περιοχή γύρω από τον αρχαιολογικό οικισμό καλύπτεται κυρίως από άμμο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 58. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της εφαρμογής των βαθυμετρικών μοντέλων στην περίπτωση της αεροφωτογραφίας, από το κεφάλαιο 4.1.4. επιλέγεται η χρήση του μοντέλου *Lyzenga* για την εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας.

Πίνακας 54. Αποτελέσματα μοντέλου Lyzenga

ΕΙΚΟΝΑ	ΣΥΝ/ΝΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
A/Φ	423058, 4142470 423079, 4142408	107	96	0.101



Σχήμα 59. Βαθυμετρική εικόνα παραλίας Λαμπαγιαννά

Από τα ποσοτικά (Πίνακας 54) αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου Lyzenga επί της αεροφωτογραφίας που απεικονίζει την παραλία Λαμπαγιαννά, παρατηρείται πως το μοντέλο υπολογίζει τα βάθη με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης (96%) και, μάλιστα, με πολύ καλή ακρίβεια αφού η τιμή της Ρίζας του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος είναι της τάξης των 10 cm.

Επίσης, από την ποιοτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Σχήμα 59) η μορφολογία του πυθμένα έχει αναπαρασταθεί πολύ ικανοποιητικά, καθώς τα βάθη που εκτιμήθηκαν από το μοντέλο καλύπτουν όλο το εύρος των πραγματικών βαθών όπως είχαν προσδιοριστεί από την επιτόπια εξέταση του χώρου.

Για εκπαιδευτικούς λόγους, στην εν λόγω εικόνα εφαρμόστηκε και το μοντέλο Stumpf, συγκεκριμένα ο λόγος Green/Blue καθώς έχει προκύψει από το κεφάλαιο 4.1.4. ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση αεροφωτογραφίας με 4 κανάλια.

Πίνακας 55. Αποτελέσματα μοντέλου Stumpf

ΕΙΚΟΝΑ	ΚΑΝΑΛΙΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ GCPs	R^2 (%) 2ου βαθμού	RMSE (m)
A/Φ	Green/Blue	107	66	0.278

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 55 επιβεβαιώνουν πως το μοντέλο Lyzenga αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή βαθυμετρικού μοντέλου για την συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς στην περίπτωση του Stumpf τα βάθη εκτιμήθηκαν με χαμηλότερο συντελεστή συσχέτισης και μεγαλύτερη τιμή Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος από αυτά που εκτιμήθηκαν με το μοντέλο Lyzenga.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την μελέτη των μεθόδων βαθυμετρίας και χαρτογράφησης πυθμένα, την εφαρμογή και αξιολόγησή τους σε δύο περιοχές μελέτης με διαφορετικά εναέρια και δορυφορικά δεδομένα προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι Τηλεπισκόπησης μπορούν να οδηγήσουν σε ποιοτικά χαρτογραφικά προϊόντα κυρίως με την βέλτιστη εκμετάλλευση των πολυφασματικών δεδομένων. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί και με την σχετική βιβλιογραφία.

Σχετικά με τις εφαρμογές βαθυμετρίας και παραγωγής βαθυμετρικών χαρτών, οι διαθέσιμοι δορυφορικοί και εναέριοι δέκτες, σε συνδυασμό με τις απαραίτητες γεωμετρικές και ραδιομετρικές διορθώσεις, μπορούν να οδηγήσουν σε αποτελέσματα με ακρίβεια της τάξης των 2m για βάθη έως 25m περίπου.

Η πραγματοποίηση επιτόπου μετρήσεων είναι φυσικά απαραίτητη και στην περίπτωση της βαθυμετρίας με βάση τηλεπισκοπικά πολυφασματικά δεδομένα, κυρίως για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Το συγκριτικό πλεονέκτημα των τηλεπισκοπικών μεθόδων είναι η δυνατότητα χαρτογράφησης εκτεταμένων, γεωγραφικά, παράκτιων περιοχών. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι διαθέσιμα σε ψηφιδωτή (raster) μορφή και όχι σημειακά. Αποφεύγονται με τον τρόπο αυτό οι αυθαίρετες παρεμβολές και οι πυκνώσεις καννάβων, ενώ μπορούν να αναλυθούν και επεξεργαστούν περαιτέρω απευθείας σε συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Συγκεκριμένα, τα βαθυμετρικά αυτά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόβαθρα σε ποικίλες τοπογραφικές, αρχαιολογικές και άλλες εφαρμογές, πχ. στο στάδιο προετοιμασίας ενός παράκτιου ή λιμενικού τεχνικού έργου για τον υπολογισμό του κόστους και του χρόνου υλοποίησης.

Από τα μοντέλα της βιβλιογραφίας που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου (Lyzenga) δίνει καλύτερα αποτελέσματα, καθώς αφενός επιτυγχάνονται υψηλότεροι συντελεστές συσχέτισης και αφετέρου μικρότερες τιμές ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του μοντέλου γραμμικής αναλογίας (Stumpf).

Σχετικά με την χαρτογράφηση του πυθμένα, η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων και επεξεργασιών μπορεί να οδηγήσει στον ακριβή χωρικά εντοπισμό των κλάσεων (πχ άμμος, βράχος, βλάστηση, κοκ). Ειδικά για τα πειράματα στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας προήρθαν από δεδομένα μέτρησης προς υψηλής χωρικής ανάλυσης σε σχέση με τα πολύ υψηλής ανάλυσης.

Ο κυριότερος περιορισμός, όπως παρατηρήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, έγκειται στην υπολογιστική ισχύ που απαιτεί η αντικειμενοστραφής ταξινόμηση, καθώς αυτή αποδείχτηκε η βέλτιστη τεχνική για την χαρτογράφηση πυθμένα. Ειδικότερα, δορυφορικά ή άλλα εναέρια δεδομένα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης οδηγούν σε ιδιαίτερα χρονοβόρες και υπολογιστικά απαιτητικές διαδικασίες χαρτογράφησης πυθμένα.

Τέλος, ιδιαίτερα για την Ελληνική παράκτια ζώνη, η χρήση των σημερινών διαθέσιμων διαχρονικών (περίπου μια εικόνα ανά εβδομάδα στα 10 μέτρα χωρική ανάλυση) τηλεπισκοπικών δεδομένων για βαθυμετρία και χαρτογράφηση πυθμένα βρίσκει πλήθος σημαντικών εφαρμογών, όπως η διαχρονική παρακολούθηση των μεταβολών στην ακτογραμμή, ο εντοπισμός και η εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων, τα τεχνικά λιμενικά έργα, αλλά και αυτά σε άλλες παραθαλάσσιες υποδομές/κατασκευές, ακόμα και η χαρτογράφηση, συντήρηση και ανάδειξη βυθισμένων αρχαιολογικών χώρων που βρίθουν στις ελληνικές ακτές.

5.2. ΕΙΔΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με το βαθυμετρικό μοντέλο *Lyzenga* αξίζει να σημειωθεί πως ο προγραμματισμός του εν λόγω μοντέλου είναι αρκετά περίπλοκος και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, η οποία φυσικά είναι άμεσα εξαρτώμενη και από τη χωρική ανάλυση της εικόνας που εξετάζεται.

Επίσης, κατά την εφαρμογή του παρουσιάζονται προγραμματιστικά προβλήματα εξαιτίας της χρήσης των λογαρίθμων. Αυτοί πολλές φορές χρησιμοποιούνται σε πράξεις, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία πινάκων με μιγαδικούς αριθμούς (μορφής *complex double*) οπότε ο χρήστης πρέπει συνεχώς να αναπροσαρμόζει τον κώδικα για να μην διακόπτεται η επεξεργασία της εικόνας (προσδιορισμό μέτρου των στοιχείων ενός πίνακα ώστε να εξαλειφθεί το φανταστικό μέρος κ.α.).

Άμεσο αποτέλεσμα του προαναφερθέντος, είναι οι βαθυμετρικές εικόνες να είναι πολύ πιθανό να προκύψουν αλλοιωμένες εξαιτίας των επεξεργασιών που αυτές υφίστανται, καθώς πολύ συχνά παρουσιάζουν ακραίες τιμές (σημεία με τιμή άπειρο) οι οποίες πρέπει να απομακρυνθούν (να πάρουν μηδενική τιμή) προκειμένου η βαθυμετρική εικόνα να παρέχει στο χρήστη πραγματικές τιμές βάθους στα εικονοστοιχεία.

Άλλη μία πολύ σημαντική παρατήρηση σχετικά με το μοντέλο αυτό είναι ότι δεν είναι αντικειμενικό, καθώς η δειγματική περιοχή για την αφαίρεση των σκοτεινών στοιχείων εισάγεται από τον χρήστη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα διαφορετικοί χρήστες να βγάλουν διαφορετικά αποτελέσματα ή μία λάθος πληκτρολόγηση των συντεταγμένων από τον χρήστη να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα.

Θεωρητικά, ο αριθμός των διαφορετικών τύπων πυθμένα που μπορούν να αντιμετωπιστούν με το εν λόγω μοντέλο είναι ανάλογος του πλήθους των καναλιών που χρησιμοποιούνται. Ο ισχυρισμός αυτός καταρρίφθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αφού η φωτογραφία VNIR έδωσε εξίσου καλά αποτελέσματα με τις δορυφορικές εικόνες και, μάλιστα, στους ίδιους τύπους πυθμένα.

Ωστόσο, από τις εφαρμογές του μοντέλου *Lyzenga* στα διάφορα τηλεπισκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, αυτό φαίνεται να δίνει ελαφρώς υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης και μικρότερες τιμές Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος σε δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης σε σχέση με αυτό του *Stumpf*.

Επίσης, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η εφαρμογή ενός ενιαίου βαθυμετρικού μοντέλου σε εικόνα με ετερογενή πυθμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας συνίσταται η χρήση του μοντέλου *Lyzenga*.

Πιο αναλυτικά, σχετικά με το βαθυμετρικό μοντέλο *Stumpf*, δεν μπορεί να προταθεί ένας λόγος καναλιών ο οποίος να εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση πυθμένα, εφαρμογής ή εικονικού δεδομένου. Έτσι, συνίσταται πάντα να εξετάζονται διάφοροι συνδυασμοί καναλιών και, κυρίως, των *coastal blue*, *blue* και *green* καθώς στις εφαρμογές της παρούσας εργασίας αυτά έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα.

Κατά συνέπεια, σχετικά με τα τηλεπισκοπικά δεδομένα, προτιμώνται οι δορυφορικές εικόνες και μάλιστα χαμηλής χωρικής ανάλυσης για το εν λόγω μοντέλο, καθώς αφενός παρέχουν πληροφορίες στο ευρύτερο οπτικό φάσμα και επιτρέπουν τον έλεγχο μεγάλου συνδυασμού καναλιών ώστε να επιλεχθεί ο βέλτιστος, και αφετέρου παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο *Stumpf* δίνει μικρότερες τιμές σφάλματος σε δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης.

Από την άλλη, για τα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της εργασίας, οι πράξεις καναλιών κατά την εφαρμογή του μοντέλου δεν συντέλεσαν στη βελτίωση των αποτελεσμάτων και δεν έγινε περαιτέρω εξέτασή τους.

Τέλος, το μοντέλο Stumpf είναι προτιμότερο να αποφεύγεται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η βαθυμετρία εικόνας με ετερογενή πυθμένα.

Ορισμένες κοινές παρατηρήσεις και για τα δύο μοντέλα με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας, αφορούν στην εφαρμογή των συντελεστών του δευτεροβάθμιου πολυωνύμου κατά την πολλαπλή (για το Lyzenga) ή απλή (για το Stumpf) γραμμική παλινδρόμηση, καθώς αυτοί έδωσαν υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης και στις δύο περιπτώσεις σε όλα τα δεδομένα που εξετάστηκαν.

Επίσης, και τα δύο μοντέλα απέτυχαν πάνω από περιοχές με λιβάδια ποσειδωνίας ή μικτό πυθμένα. Κατά πάσα πιθανότητα, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θαλάσσια βλάστηση (φύκη, λιβάδια ποσειδωνίας ή άλλων φυτικών οργανισμών) που συναντάται και στις δύο περιπτώσεις απορροφά την ακτινοβολία (Paradourouli et al., 2014) οπότε επιστρέφει αλλοιωμένη πληροφορία ανακλαστικότητας για την συγκεκριμένη περιοχή στον δέκτη.

Τέλος, παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνεται η χωρική ανάλυση των δεδομένων τόσο φθίνει η αποτελεσματικότητα των μοντέλων στην εκτίμηση των βαθών. Συνεπώς, συνίσταται η χρήση δεδομένων μέτριας χωρικής ανάλυσης για τέτοιες εφαρμογές. Η χρήση δεδομένων χαμηλής χωρικής ανάλυσης προτείνεται να αποφευχθεί καθώς σε αυτήν την περίπτωση ενέχει ο κίνδυνος απόκρυψης στοιχείων του θαλάσσιου πυθμένα που είναι απαραίτητα για την ασφαλή ναυσιπλοΐα (ύπαρξη ξέρας μικρότερου μεγέθους από αυτό της εδαφοψηφίδας, απότομη έξαρση στη μορφολογία του πυθμένα κ.α.).

5.3. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σκόπιμο θα ήταν να εξετασθεί περαιτέρω η χρήση δεδομένων από μη επανδρωμένα οχήματα (UAV) για τη βαθυμετρία και χαρτογράφηση του πυθμένα σε παράκτια ύδατα, καθώς αυτά αναμένεται να χρησιμοποιηθούν και να είναι ευρέως διαθέσιμα τα επόμενα χρόνια.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι εικόνες από τέτοια τηλεπισκοπικά συστήματα φάνηκε να αποτυγχάνουν για βαθυμετρικές εφαρμογές, ωστόσο αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η περιοχή η οποία απεικονίστηκε με τέτοιο όχημα δεν είχε επαρκή, σε αριθμό και κατανομή, σημεία ελέγχου.

Ορισμένα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην περίπτωση της χρήσης UAV για εφαρμογές βαθυμετρίας είναι οι κάμερες που θα χρησιμοποιηθούν και οι συνθήκες που θα επικρατούν κατά τη λήψη (μετεωρολογικές συνθήκες, ώρα λήψης, ύψος πτήσης, επικαλύψεις κλπ).

Σχετικά με τις κάμερες, αυτές προτείνεται να φέρουν δέκτες ευαίσθητους σε ευρύ πεδίο του φάσματος και, κυρίως, στον Coastal blue, Blue και Green δίαυλο, ώστε να μπορεί να δοκιμαστεί πλήθος λόγων καναλιών ή/και παλινδρομήσεων, ανάλογα με το μοντέλο που θα επιλεγεί να εφαρμοστεί. Επίσης, σύμφωνα με τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν στο κεφάλαιο 5.2., οι κάμερες συνίσταται να είναι μέτριας χωρικής ανάλυσης.

Σχετικά με τις μετεωρολογικές συνθήκες, συνίσταται νηνεμία (ιδανικά 1 Beaufort) ώστε η επιφάνεια της θάλασσας να είναι ακύμαντη, χαμηλά ποσοστά σε υγρασία στην ατμόσφαιρα ώστε να μην επηρεάζεται η ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον δέκτη και, τέλος, ανέφελος ουρανός

ώστε να μην δημιουργούνται σκιάσεις στην επιφάνεια της θάλασσας. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι θερινοί μήνες ενδείκνυνται περισσότερο ώστε να πληρούνται τα προαναφερθέντα.

Προκειμένου ο χειριστής να επωφεληθεί στο έπακρο από τις παραπάνω μετεωρολογικές συνθήκες, συνίσταται η πραγματοποίηση των λήψεων κατά τις πρωινές ώρες, όταν οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν υπό γωνία και αποφεύγεται η παρουσία του φαινομένου του λαμπυρίσματος. Το φως διαχέεται ομοιόμορφα στην ατμόσφαιρα και παρέχει τις κατάλληλες συνθήκες φωτισμού στην περιοχή.

Παρόμοιες συνθήκες επικρατούν και κατά τις απογευματινές ώρες, αλλά συνίσταται η αποφυγή των ωρών αυτών καθώς το φως είναι ιδιαίτερα αδύναμο, η παρουσία ανθρώπων/σκαφών είναι πολύ πιθανή, η θάλασσα (επιφάνεια ή/και πυθμένας) ίσως είναι ανακατεμένη από την παρουσία λουόμενων κατά τη διάρκεια της ημέρας και, το πλέον σημαντικό, σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου συστήματος του UAV συνεπάγεται αναβολή της λήψης των εικόνων.

Τέλος, σχετικά με το ύψος πτήσης, αυτό θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε με τις διαθέσιμες κάμερες και τη χωρική τους ανάλυση να επιτυγχάνεται η παραγωγή φωτομωσαϊκού με μέγεθος εδαφοψηφίδας της τάξης του 0.5 - 1 m. Επίσης, το ύψος πτήσης παίζει σημαντικό ρόλο στην έκταση της περιοχής που θα απεικονίζεται σε κάθε λήψη ώστε, σε συνδυασμό με την παράμετρο των επικαλύψεων, να είναι εφικτή η συρραφή των εικόνων (εντοπισμός ομόλογων σημείων από εικόνα σε εικόνα) από το πρόγραμμα αυτόματα, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες ο χρήστης να πρέπει να επέμβει χειροκίνητα.

Ιδιαίτερα χρήσιμο, ακόμα, θα ήταν να εξεταστούν περαιτέρω οι δυνατότητες της αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης για πιο λεπτομερή χαρτογράφηση πυθμένα σε απαιτητικές εφαρμογές. Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει τη δυνατότητα χρήσης κανόνων και πολυάριθμων κριτηρίων κατά την ταξινόμηση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην ανάδειξη ιδιαίτερων χαρακτηριστικών ενός πυθμένα και στην εξαγωγή σημαντικών παρατηρήσεων για αυτόν. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε χρήση μόνο βασικών δυνατοτήτων και επιλογών που παρέχει η συγκεκριμένη μέθοδος.

Μία επίσης πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή θα ήταν η εξέταση των αποτελεσμάτων της MS βαθυμετρίας (κάνοντας χρήση εικόνων είτε από δορυφόρους είτε από UAV) πάνω από μία περιοχή πριν και μετά από μία μεγάλη οικολογική καταστροφή. Για παράδειγμα, θα είχε ενδιαφέρον να εξετασθεί κατά πόσο η παρουσία πετρελαιοκηλίδας στην επιφάνεια μιας υδάτινης περιοχής μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα των μοντέλων και αν η εφαρμογή της MS βαθυμετρίας μπορεί να συμβάλλει στην εκτίμηση, την παρακολούθηση, την πρόβλεψη και τον περιορισμό της οικολογικής καταστροφής (περίπτωση Σαρωνικού, Σεπτέμβριος 2017).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΙΕΣ -

Borfecchia, F., Cecco, L. De, Martini, S., Ceriola, G., Bollanos, S., Vlachopoulos, G., Valiante, L.M., Belmonte, A., Micheli, C., 2013. Posidonia oceanica genetic and biometry mapping through high-resolution satellite spectral vegetation indices and seatruth calibration. *Int. J. Remote Sens.* 34, 4680–4701.

Bramante, J. F., D. K. Raju and T. M. Sin. 2013. Multispectral derivation of bathymetry in Singapore's shallow, turbid waters. *International Journal of Remote Sensing* 34(6):2070–88.

Brando V. E. and A. G. Dekker. 2003. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(6):1378–87.

Brando V. E., J. M. Anstee, M. Wettle, A. G. Dekker, S. R. Phinn, and C. Roelfsema. 2009. A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment* 113(4):755–70.

Campbell, R. J. 1996. Wavelength stable uncooled fibre grating semiconductor laser for use in all optical WDM access network. *Electronic Letters*, Vol. 32, Issue 2, pp. 119-120.

Chavez Jr., P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62(9):1025–36.

Chybicki A., 2017. Mapping South Baltic Near-shore Bathymetry Using Sentinel-2 Observations. *Polish Maritime Research* 3 (95), Vol. 24, pp. 15-25.

Corucci, L., A. Masini and M. Cococcioni. 2011. Approaching bathymetry estimation from high resolution multispectral satellite images using a neuro-fuzzy technique. *Journal of Applied Remote Sensing* 5(1):053515–053515-15.

Dekker, A., Brando, V., Anstee, J., Fyfe, S., Malthus, T., Karpouzli, E., 2006. Remote sensing of seagrass ecosystems: use of spaceborne and airborne sensors. In: Larkum, A.W.D., Orth, R.J., Duarte, C.M. (Eds.), *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht, pp. 347–359.

Eugenio, F., J. Marcello and J. Martin. 2015. High-resolution maps of bathymetry and benthic habitats in shallow-water environments using multispectral remote sensing imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53(7):3539–49.

Fornes, A., Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Alvarez, A., Tintore, J., 2006. Mapping Posidonia oceanica from IKONOS. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 60, 315–322.

Giardino, C., G. Candiani, M. Bresciani, Z. Lee, S. Gagliano and M. Pepe. 2012. BOMBER: A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images. *Computers & Geosciences* 45(August):313–18.

Hamylton, S. M., J. D. Hedley and R. J. Beaman. 2015. Derivation of high-resolution bathymetry from multispectral satellite imagery: a comparison of empirical and optimisation methods through geographical error analysis. *Remote Sensing* 7(12):16257–73.

Hedley, J., C. Roelfsema, B. Koetz and S. Phinn. 2012. Capability of the Sentinel-2 mission for tropical coral reef mapping and coral bleaching detection. *Remote Sensing of Environment The Sentinel Missions – New Opportunities for Science* 120(May):145–55.

Hoge, F. E. and P. E. Lyon. 1996. Satellite retrieval of inherent optical properties by linear matrix inversion of oceanic radiance models: an analysis of model and radiance measurement errors. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101(C7):16631–48.

Hossain, M.S., Bujang, J.S., Zakaria, M.H., Hashim, M., 2014. The application of remote sensing to seagrass ecosystems: an overview and future research prospects. *Int. J. Remote Sens.* 36, 61–114.

Jena, B., P. J. Kurian, D. Swain, A. Tyagi and R. Ravindra. 2012. Prediction of bathymetry from satellite altimeter based gravity in the Arabian sea: mapping of two unnamed deep seamounts. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 16(June):1–4.

Jupp, D.L.B. 1988. Background and Extensions to Depth of Penetration (DOP) Mapping in Shallow Coastal Waters. *Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone, Gold Coast, IV2(1)-IV2(19).*

Kapsimalis, V., Pavlopoulos, K., Panagiotopoulos, I., et al. 2009. Geoarchaeological Challenges in the Cyclades Continental Shelf (Aegean Sea). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 53(Suppl. 1): 169-190.

Knudby, A., S. K. Ahmad and C. Ilori. 2016. The potential for landsat-based bathymetry in Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing* 42(4):367–78.

Knudby, A., Nordlund, L., 2011. Remote sensing of seagrasses in a patchy multi-species environment. *Int. J. Remote Sens.* 32, 2227–2244.

Kobryn, H. T., K. Wouters, L. E. Beckley and T. Heege. 2013. Ningaloo reef: shallow marine habitats mapped using a hyperspectral sensor. *Plos One* 8(7):e70105. doi:10.1371/journal.pone.0070105 Kulawiak, M., A. Chybicki, and M. Moszynski. 2010. Web-based GIS as a tool for supporting marine research. *Marine Geodesy* 33(2,3):135–53.

Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloom, P. J. and Goetz, A. F. H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS)-Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sens. Environ.* 44:145-163.

Lee, K. R., R. C. Olsen and F. A. Kruse. 2012. Using multi-angle worldview-2 imagery to determine ocean depth near the island of Oahu, Hawaii. In *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*. Shen S. S. and Lewis P. E. (eds.), vol. 8390, 83901I. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.

Lee, Z., K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Steward and J. S. Patch. 1998. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model. *Applied Optics* 37(27):6329–38.

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* 1, 2(1):71–82.

Lyzenga, D. R., N. P. Malinas and F. J. Tanis. 2006. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(8):2251–59.

Lyzenga, D. R. 1977. Reflectance of a flat ocean in limit of zero water depth. *Applied Optics* 16(2):282–83.

- Ma, S., Z. Tao, X. Yang, Y. Yu, X. Zhou and Z. Li. 2014.** Bathymetry retrieval from hyperspectral remote sensing data in optical-shallow water. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(2):1205–12.
- Mahiny, A. S. and B. J. Turner. 2007.** A comparison of four common atmospheric correction methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73(4):361–68.
- Matta, E., Aiello, M., Bresciani, M., Gianinetto, M., Musanti, M., Giardino, C., 2014.** Mapping Posidonia Meadow From High Spatial Resolution Images in the Gulf of Oristano (Italy). 2014 IEEE, Quebec City, pp. 5152–5155.
- Mishra, D. R., S. Narumalani, D. Rundquist and M. Lawson. 2005.** High-resolution ocean color remote sensing of benthic habitats: a case study at the Roatan Island, Honduras. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43(7):1592–1604.
- Mishra, D., S. Narumalani, D. Rundquist and M. Lawson. 2006.** Benthic habitat mapping in tropical marine environments using quickbird multispectral data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(9):1037–1048.
- Mishra, D. R., S. Narumalani, D. Rundquist, M. Lawson and R. Perk. 2007.** Enhancing the detection and classification of coral reef and associated benthic habitats: a hyperspectral remote sensing approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112:C08014.
- Mobley, C. D., L. K. Sundman, C. O. Davis, J. H. Bowles, T. V. Downes, R. A. Leathers, M. J. Montes, et al. 2005.** Interpretation of hyperspectral remote-sensing imagery by spectrum matching and look-up tables. *Applied Optics* 44(17):3576–92.
- Mountogiannaki, D. 2015.** Estimating the quality of coastal European waters with high resolution multispectral remote sensing data. Διπλωματική Εργασία. ΣΑΤΜ. ΕΜΠ.
- Mumby, P.J., Green, E.P., Edwards, A.J., Clark, C.D., 1999.** The cost-effectiveness of remote sensing for tropical coastal resources assessment and management. *J. Environ. Manag.* 55, 157–166.
- Pacheco, A., Horta, J., Loureiro and C., Ferreira, O. 2014.** Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sens. Environ.* 159, 102–116.
- Papadopoulou, M., Lafazani, P., Mavridou, E. R., Tsakiri-Strati, M. and Doxani G. 2014.** *Tour. Manag.* 14, 407–408.
- Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Pergent, G., Agreil, M., Skoufas, G., Sourbes, L., Tsirika, A. 2005.** Use of SPOT 5 for mapping seagrasses: an application to *Posidonia oceanica*. *Remote Sens. Environ.* 94, 39–45.
- Pe’eri, S., C. Parrish, C. Azuike, L. Alexander and A. Armstrong. 2014.** Satellite remote sensing as a reconnaissance tool for assessing nautical chart adequacy and completeness. *Marine Geodesy* 37 (3):293–314.
- Pope, A., T. A. Scambos, M. Moussavi, M. Tedesco, M. Willis, D. Shean and S. Grigsby. 2016.** Estimating supraglacial lake depth in west Greenland using landsat 8 and comparison with other multispectral methods. *Cryosphere* 10(1):15–27.
- Pope, R. M. and E. S. Fry. 1997.** Absorption spectrum (380–700 Nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics* 36(33):8710–23.
- Said, Najhan, Mahmud, Mohd and Hasan, Rozaimi. 2017.** Satellite-derived Bathymetry: Accuracy Assessment on Depths Derivation Algorithm for Shallow Water Area. *The International*

Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W5.

Spitzer, D and R.W. J. Dirks. 1986. Shallow water bathymetry and bottom classification by means of the Landsat and SPOT optical scanners. 1986 International Symposium/Innsbruck 0660:136–38.

Stumpf, R. P., K. Holderied and M. Sinclair. 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. Limnology and Oceanography 48(1part2):547–56.

Su, H., H. Liu, L. Wang, A. M. Filippi, W. D. Heyman and R. A. Beck. 2014. Geographically adaptive inversion model for improving bathymetric retrieval from satellite multispectral imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 52(1):465–76.

Su, H., H. Liu and Q. Wu. 2015. Prediction of water depth from multispectral satellite imagery #x2014; The regression kriging alternative. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 12(12):2511–15.

Su, H., H. Liu and W. D. Heyman. 2008. Automated derivation of bathymetric information from multi-spectral satellite imagery using a non-linear inversion model. Marine Geodesy 31(4):281–98.

Traganos, D., Reinartz, P., 2016. Satellite-based Quantitative Assessment of Seagrass Habitats in Thermaikos Gulf, NW Aegean Sea, Greece. F1000Research 2.

Tsagkarakis, E. 2016. The Sedimentary Role of Posidonia oceanica in Wave-Dynamic Bays. The case of Varkiza Bay. Μεταπτυχιακή Διατριβή. ΑΠΘ.

Vahtmae, E., T. Kutser, G. Martin and J. Kotta. 2006. Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters—a Baltic sea case study. Remote Sensing of Environment 101(3):342–51.

Vahtmae, E. and T. Kutser. 2016. Airborne mapping of shallow water bathymetry in the optically complex waters of the Baltic sea. Journal of Applied Remote Sensing 10(May):025012.

Βαϊόπουλος, Α. 2013. Διερεύνηση και αξιολόγηση μεθόδων συγχώνευσης πολυφασματικών και παγχρωματικών δορυφορικών δεδομένων. Ερευνητική Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης. ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Λυμπεροπούλου, Ε. 2017. Υποβρύχια αποτύπωση σε τμήμα αρχαίου οικισμού της 3^{ης} χιλιετίας π.Χ. στην παραλία «Λαμπαγιαννά» στο Φράγγχι Αργολίδος. Διπλωματική εργασία. ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Πέκαλης, Δ. 2016. Πολυφασματική βαθυμετρία με χρήση δορυφορικής εικόνας WorldView-2. Μεταπτυχιακή διατριβή. ΤΑΤΜ ΑΠΘ.

Τσακίρη-Στρατή Μ. 2014. Τηλεπισκόπηση Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.

- ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ -

<https://remotepixel.ca/projects/satellitesearch.html>

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

<https://www.mathworks.com/support.html>

<https://plugins.qgis.org/plugins/>

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Ενδεικτικά τμήματα κώδικα

7.1. Χωρική Βελτίωση (Pansharpening)

```
%For Sentinel2 images - Interpolation
%KK_13/11/2017

format longG
format compact
prompt='Choose image from folder (Sentinel 2 imagery):'
[fname,pname]=uigetfile('*.tif');
filename=fullfile(pname,fname);
[A3,R3]=geotiffread(filename);

%interpolation
[x_0,y_0]=meshgrid(1:0.16:size(A3,2),1:0.16:size(A3,1));
A3new=interp2(single(A3),x_0,y_0,'cubic');

R3new=R3;
R3new.RasterSize = size(A3new);
A3new=uint16(A3new);

coordRefSysCode=32634;
geotiffwrite('B1_interp10_cubic.tif', A3new, R3new,...
    'CoordRefSysCode', coordRefSysCode);

%For WV2 images - Pansharpening using HCS algorithm
%KK_03/11/2016, 14/11/2016

format longG
format compact

%Input Multispectral image
prompt='Choose image from folder (MULTISPECTRAL atmospherically corrected):'
[fname,pname]=uigetfile('*.tif');
filename=fullfile(pname,fname);
[M,R]=geotiffread(filename);

M=uint16(M); %if initial image is int16 format
M=im2double(M);

%Input panchromatic image
prompt='Choose image from folder (PANCHROMATIC):'
[fname,pname]=uigetfile('*.tif');
filename=fullfile(pname,fname);
[P,R_p]=geotiffread(filename);
[m n]=size(P);

P=im2double(P);
P_2=P.^2;

%Upsample MS to PAN size
M_resize=imresize(M,[m n]);

C=M_resize(:,:,1);
B=M_resize(:,:,2);
G=M_resize(:,:,3);
Y=M_resize(:,:,4);
Red=M_resize(:,:,5);
RE=M_resize(:,:,6);
NIR1=M_resize(:,:,7);
NIR2=M_resize(:,:,8);

%SMART MODE
%STEP1: Smoothing Panchromatic image
Pan_smooth=medfilt2(P,[7 7]);
```

```

%STEP2: Computing Deviations
m1=mad(mad(Pan_smooth.^2)); %mean deviation of P_sm^2 (number)
s1=std(std(Pan_smooth.^2)); %standard deviation of P_sm^2 (number)

I_sq=C.^2+B.^2+G.^2+Y.^2+Red.^2+RE.^2+NIR1.^2+NIR2.^2;

m0=mad(mad(I_sq)); %mean deviation of I^2 (number)
s0=std(std(I_sq)); %standard deviation of I^2 (number)

%STEP3: Forward transformation
I=sqrt(I_sq);
f1=atan((sqrt(NIR2.^2+NIR1.^2+RE.^2+Red.^2+Y.^2+G.^2+B.^2))./C);
f2=atan((sqrt(NIR2.^2+NIR1.^2+RE.^2+Red.^2+Y.^2+G.^2))./B);
f3=atan((sqrt(NIR2.^2+NIR1.^2+RE.^2+Red.^2+Y.^2))./G);
f4=atan((sqrt(NIR2.^2+NIR1.^2+RE.^2+Red.^2))./Y);
f5=atan((sqrt(NIR2.^2+NIR1.^2+RE.^2))./Red);
f6=atan((sqrt(NIR2.^2+NIR1.^2))./RE);
f7=atan(NIR2./NIR1);

%STEP4: Computing new PS^2 and P^2
P_sm_sq=((s0/s1)*(Pan_smooth.^2-m1+s1))+m0-s0;
figure(1),imagesc(P_sm_sq),colormap gray,axis image,axis off,impixelinfo,...
title('PAN smooth squared');

P_sq=((s0/s1)*(P_2-m1+s1))+m0-s0;
figure(2),imagesc(P_sq),colormap gray,axis image,axis off,impixelinfo,...
title('PAN squared');

%STEP5: Computing Iadj (adjusted intensity)
Iadj=sqrt((P_sq./P_sm_sq).*I_sq);
Iadj=real(Iadj);
figure(3),imagesc(Iadj),colormap gray,axis image,axis off,impixelinfo,...
title('Adjusted Intensity (smart mode)');

%STEP6: Reverse transformation
C_adj=Iadj.*cos(f1);
B_adj=Iadj.*(sin(f1).*cos(f2));
G_adj=Iadj.*(sin(f1).*sin(f2).*cos(f3));
Y_adj=Iadj.*(sin(f1).*sin(f2).*sin(f3).*cos(f4));
Red_adj=Iadj.*(sin(f1).*sin(f2).*sin(f3).*sin(f4).*cos(f5));
RE_adj=Iadj.*(sin(f1).*sin(f2).*sin(f3).*sin(f4).*sin(f5).*cos(f6));
NIR1_adj=Iadj.*(sin(f1).*sin(f2).*sin(f3).*sin(f4).*sin(f5).*sin(f6).*cos(f7));
NIR2_adj=Iadj.*(sin(f1).*sin(f2).*sin(f3).*sin(f4).*sin(f5).*sin(f6).*sin(f7));

%Create pansharpened multispectral image
M_pan=zeros(m,n,size(M_resize,3));
M_pan(:,:,1)=C_adj;
M_pan(:,:,2)=B_adj;
M_pan(:,:,3)=G_adj;
M_pan(:,:,4)=Y_adj;
M_pan(:,:,5)=Red_adj;
M_pan(:,:,6)=RE_adj;
M_pan(:,:,7)=NIR1_adj;
M_pan(:,:,8)=NIR2_adj;

%Convert image from double to uint16
int_Mpan=im2uint16(M_pan);
figure(4),imagesc(int_Mpan(:,:,1)),colormap gray,axis image,axis off,impixelinfo,...
title('MS pansharpened (HCS)');

%Save the pansharpened multispectral image
R_pan=R_p;
R_pan.RasterSize = size(int_Mpan);
prompt='Give EPSG: '
coordRefSysCode=input(prompt);
new_filename = 'HCS_25km_6bands-band8.tif';
geotiffwrite(new_filename, int_Mpan, R_pan,...
'CoordRefSysCode', coordRefSysCode);

```

7.2. Μετατροπή Συντεταγμένων

```

%% WGS'84
a = 6378137;
b = 6356752.3142;
f = (a-b)/a;
e = sqrt( (a^2-b^2)/a^2 );
ee2 = (a^2-b^2)/b^2;

%% Reading WGS'84 coordinates
prompt='Choose csv file with coordinates of bathymetry:'
[fname,pname]=uigetfile('*.csv');
filename=fullfile(pname,fname);
data=csvread(filename);
l = length(data);
lon = data(:,2)*pi()/180;
lat = data(:,3)*pi()/180;
zone = ceil( (data(:,2)+180)/6 ); %UTM zone

%% Calculating new coordinates
k = 0.9996;
T = (tan(lat)).^2;
C = ee2*(cos(lat)).^2;
dlon = lon-(6*zone-183)*pi()/180;
A = dlon .* cos(lat);
M0 = 1-e^2/4-3*e^4/64-5*e^6/256;
M2 = 3*e^2/8+3*e^4/32+45*e^6/1024;
M4 = 15*e^4/256+45*e^6/1024;
M6 = 35*e^6/3072;
M = a*( M0*lat-M2*sin(2*lat)+M4*sin(4*lat)-M6*sin(6*lat) );
R = a*(1-e^2)./(1-e^2*(sin(lat)).^2).^3/2;
N = a./( sqrt( 1-e^2*( sin(lat)).^2) );

x = 500000*ones(l,1)+k*N.*(A + (ones(l,1)-T+C).*A.^3/6+. . .
(5*ones(l,1)-18*T+T.^2+72*C-58*ee2*ones(l,1)).*A.^5/120);

y = k*(M+N.*tan(lat)).*(A.^2/2+A.^4/24.*(5*ones(l,1)-T+9*C+4*C.^2)+...
A.^6/720.*(61*ones(l,1)-58*T+T.^2+600*C-330*ee2*ones(l,1)));

for i=1:l
if lat<0
y(i) = y(i)+10000000;
end
end

%% Saving new coordinates
EXC = zeros(l+1,6);
EXC(2:(l+1),1)=data(:,1);
EXC(2:(l+1),2)=data(:,2);
EXC(2:(l+1),3)=data(:,3);
EXC(2:(l+1),4)=x;
EXC(2:(l+1),5)=y;
EXC(2:(l+1),6)=zone;
csvwrite('UTM_xy.csv',EXC);

```

7.3. Υλοποίηση Μοντέλου Lyzenga

```

% Lyzenga model for airborne imagery
% KK_13/10/2016,16/11/2016

format longG
format compact
prompt='Choose image from folder :'
[fname,pname]=uigetfile('*.tif');
filename=fullfile(pname,fname);
[MS,R]=geotiffread(filename);

```

```

[m n]=size(MS(:, :, 1));

MS=single(MS);
MS=rescale(MS);

prompt='Choose csv file with coordinates (ID,X,Y,Depth) : '
[fname,pname]=uigetfile('*.csv');
filename=fullfile(pname,fname);
coord=csvread(filename);

[w f]=size(coord);
B=zeros(w,22);
B(:,1:4)=coord;

for i=1:w
    x=B(i,2);
    y=B(i,3);
    [l,o]=map2pix(R,x,y);
    r=floor(l);
    c=floor(o);
    if (r>0) && (c>0) && (r<m) && (c<n)
        B(i,5)=MS(r,c,1); %red
        B(i,6)=MS(r,c,2); %green
        B(i,7)=MS(r,c,3); %blue
        B(i,8)=MS(r,c,4); %nir
        %B(5:12)=reflectance
    end
end

%Lyzenga's Xj parameter

%Sampling region
prompt='COORDINATES OF SAMPLING REGION'
prompt='Give left up corner x_coordinate: '
x_1=input(prompt);
prompt='Give left up corner y_coordinate: '
y_1=input(prompt);
[l1,m1]=map2pix(R,x_1,y_1);
r1=floor(l1);
c1=floor(m1);
prompt='Give right bottom corner x_coordinate: '
x_2=input(prompt);
[l2,m2]=map2pix(R,x_2,y_1);
c2=floor(m2);
prompt='Give left bottom corner y_coordinate: '
y_2=input(prompt);
[l3,m3]=map2pix(R,x_1,y_2);
r3=floor(l3);

bands=size(MS,3);

for j=1:bands
    Lwj(j)=min(min(MS(r1:r3,c1:c2,j)));
    for i=1:w
        if B(i,5)>0
            Xj=log(B(i,4+j)-Lwj(j));
            B(i,8+j)=abs(Xj); %B(:,11:16)=Xj of lyzenga model
        end
    end
end

%Xj for entire image
Xj_all=zeros(m,n,bands);

for k=1:bands
    temp = MS(:, :, k)-Lwj(k);
    Xj_all(:, :, k) = abs(log(temp));
end

s=1;

```



```

for i=1:w
    if B(i,5)>0
        EST(s,1)=abs(B(i,4));
        EST(s,2:bands+1)=B(i,9:12);
        s=s+1;
    end
end

% Remove inf values
count = 1;
inf_index = isinf(EST);
for j=1:length(EST)
    check = sum(inf_index(j,:));
    if check == 0
        DATA(count,:) = EST(j,:);
        count = count + 1;
    end
end

%Regression
X = [ones(size(DATA,1),1) DATA(:,2:end)];
[c,cint,r,rint,stats] = regress(DATA(:,1),X);

RMSE = sqrt(sum(r.*r)/(length(r)-1))

est_depths=c(1)+c(2).*DATA(:,2)+c(3).*DATA(:,3)+...
+c(4).*DATA(:,4)+c(5).*DATA(:,5);

V=est_depths;
GT=DATA(:,1);
[coeff1,coeff2,Rsq1,Rsq2]=poly12(V,GT);

Rsq1
Rsq2

Lyzenga_depths=c(1)+c(2).*Xj_all(:,:,1)+c(3).*Xj_all(:,:,2)+c(4).*Xj_all(:,:,3);

% Remove inf values and save image
count=1;
inf_index=isinf(Lyzenga_depths);
inf_index=(inf_index==0);
Lyzenga_depths=inf_index.*Lyzenga_depths;

R_lyzdepth=R;
R_lyzdepth.RasterSize = size(Lyzenga_depths);

prompt='Give EPSG: '
coordRefSysCode=input(prompt);
new_filename = 'LABAGIANNA ANCIENT-Lyzenga_depths.tif';
geotiffwrite(new_filename, Lyzenga_depths, R_lyzdepth,...
    'CoordRefSysCode', coordRefSysCode);

```

7.4. Υλοποίηση Μοντέλου Stumpf

```

%Stumpf model for WV2 imagery
%KK_14/11/2016_&_07/11/2017

format longG
format compact
prompt='Choose image from folder (pansharpened WV2 MS):'
[fname,pname]=uigetfile('*.tif');
filename=fullfile(pname,filename);
[MS,R]=geotiffread(filename);
[m g]=size(MS(:,:,1));

MS=double(MS);
MS=rescale(MS);

```

```

%Reading csv file
prompt='Choose csv file with coordinates (ID,X,Y,Depth):'
[fname,pname]=uigetfile('*.csv');
filename=fullfile(pname,fname);
coord=csvread(filename);
[w f]=size(coord);
B=zeros(w,10);
B(:,1:4)=coord;

%Converting coordinates to pixels & reflectance
for i=1:w
    x=B(i,2);
    y=B(i,3);
    [l,o]=map2pix(R,x,y);
    r=floor(l);
    c=floor(o);
    if (r>0) && (r<m) && (c>0) && (c<g)
        B(i,5)=MS(r,c,1); %coastal
        B(i,6)=MS(r,c,2); %blue
        B(i,7)=MS(r,c,3); %green
        B(i,8)=MS(r,c,4); %yellow
        B(i,9)=MS(r,c,5); %red
        B(i,10)=MS(r,c,6); %red edge
        %B(5:10)=reflectance
    end
end

s=1;
for i=1:w
    if B(i,5)>0
        sand_B(s,1)=B(i,1);
        sand_B(s,2)=B(i,4);
        sand_B(s,3)=B(i,5); %coastal
        sand_B(s,4)=B(i,6); %blue
        sand_B(s,5)=B(i,7); %green
        sand_B(s,6)=B(i,8); %yellow
        sand_B(s,7)=B(i,9); %red
        sand_B(s,8)=B(i,10); %red edge
        s=s+1;
    end
end

%RELATIVE DEPTHS
%Stumpf model for GCPs
n=1000;
for i=1:(s-1)
    Z_relative=log(n*sand_B(i,5))/log(n*sand_B(i,8));
    sand_B(i,9)=Z_relative;
    %B(:,9)=relative depths from model
end

%Stumpf for entire image
rel_depth=zeros(size(MS,1),size(MS,2));

for i=1:size(MS,1)
    for j=1:size(MS,2)
        rel_depth(i,j)=log(n*MS(i,j,3))/log(n*MS(i,j,1));
    end
end

%ESTIMATED DEPTHS
%Computing coefficients for Stumpf model (regression)
[RMSE,sand_B(:,10),sand_B(:,11),p2]= regress_k(sand_B(:,2),sand_B(:,9));
V=-sand_B(:,11);
GT=sand_B(:,2);
[coeff1,coeff2,Rsq1,Rsq2]=poly12(V,GT);
RMSE
Rsq1

```

Rsq2

```
%Estimated depths for entire image
est_depth=polyval(p2,rel_depth);

count = 1;
inf_index = isinf(est_depth);
inf_index = (inf_index == 0);
est_depth = inf_index .* est_depth;

%Saving image showing estimated depths
R_estdepth=R;
R_estdepth.RasterSize = size(est_depth);

prompt='Give EPSG: '
coordRefSysCode=input(prompt);
new_filename = 'VARKIZA_xmas-Stumpf_depths_wv2_greencoastal.tif';
geotiffwrite(new_filename,est_depth, R_estdepth,...
    'CoordRefSysCode', coordRefSysCode);
```

{όπου

```
function [RMSE, u, est, p2] = regress_k( y, x )
y=abs(y);
x=abs(x);

%polynomials
p2=polyfit(x,y,1);

%estimated
est=polyval(p2,x);

%residuals
u = y-est;
u_sq = (u .* u)/(length(est)+1);

RMSE = sqrt(sum(u_sq));

End}
```