ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

«Εντοπισμός και Παρακολούθηση Επιπλεόντων Υπολειμμάτων Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων από Ατυχήματα στη Θάλασσα με Δορυφορικές Εικόνες.»

Διπλωματική Εργασία



Χρήστος Κ. Κόντζογλου

Εξεταστική Επιτροπή :

- Στυλιανός Π. Μερτίκας, Καθηγητής (επιβλέπων)
- Παναγιώτης Παρτσινέβελος, Καθηγητής
- Ανδρέας Γιώτης, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά

Οκτώβριος, 2022

I

Περίληψη

Η διασπορά των πλαστικών ρύπων στις θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη μάζα του συνόλου τους, αποτελεί έναν όλο και μεγαλύτερο κίνδυνο για τις ανθρώπινες δραστηριότητες και για την θαλάσσια πανίδα λόγω της υψηλής αντοχής τους σε διεργασίες βιοαποικοδόμησης και των ποικίλων μεγεθών των τεμαχίων τους.

Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι οι άνω των 160 εκατομμύρια τόνοι πλαστικού που υπάρχουν στις θάλασσες της Γης θα υπερτριπλασιαστούν μέχρι το έτος 2040 (Richard Bailey et al., 2020), κάτι που θα λειτουργήσει αυξητικά με την σειρά του στην μόλυνση των υδάτων από επικίνδυνους ρύπους για την ανθρώπινη υγεία (είτε μέσω άμεσης επαφής είτε μέσω κατανάλωσης θαλάσσιων ειδών) καθώς και στην διατάραξη βιολογικών ισορροπιών που είναι απαραίτητες για την διατήρηση κρίσιμων οικοσυστημάτων.

Έτσι, η ικανότητα εντοπισμού και παρατήρησης αυτών των ρύπων αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στην δημιουργία μηχανισμού που θα μπορέσει να αναστρέψει την πορεία της θαλάσσιας μόλυνσης από πλαστικά υλικά. Η επιστράτευση μέσων τα οποία επιτρέπουν την μελέτη μεγάλων εκτάσεων για να προσδιοριστεί η τρέχουσα θέση συγκεντρώσεων επιπλεόντων απορριμμάτων επιτρέπει την έγκαιρη ενεργοποίηση διαδικασιών περισυλλογής τους και την έρευνα πιθανών σημείων απόθεσης τους.

Οι δορυφορικές παρατηρήσεις αποτελούν ένα τέτοιο μέσο, καθώς παρέχουν πληροφορίες για μεγάλα τμήματα της γήινης επιφάνειας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ενώ ταυτόχρονα δίνουν και την δυνατότητα εστίασης σε μικρότερες περιοχές ενδιαφέροντος. Η αποτελεσματικότητα της χρήσης δορυφορικών εικόνων βασίζεται στην διαφοροποίηση των οπτικών ιδιοτήτων (π.χ. φασματικές ταυτότητες) των επιπλεόντων πλαστικών απορριμμάτων σε σχέση με το υδάτινο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Με βάση αυτή την διαφοροποίηση , υπάρχει μια ποικιλία δορυφορικών συστημάτων των οποίων οι εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση επιθαλάσσιων πλαστικών ρύπων.

Η τελική επιλογή, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας ήταν το σύστημα Sentinel-2, επειδή προσφέρει έναν συνδυασμό χωρικής ανάλυσης, γεωγραφικής κάλυψης, επαναληψιμότητας και προσβασιμότητας δεδομένων ο οποίος εξυπηρετεί τις ανάγκες της έρευνας που διεξήχθη.

Abstract

The mobility of plastic pollutants in marine and coastal areas, combined with the increasing mass of their assemblage, poses an increasing risk to human activities and marine fauna due to their high resistance to physical degradation processes and their varying particle sizes.

It is estimated that the more than 160 million tonnes of plastic present in the Earth's seas will more than triple by the year 2040 (Richard Bailey et al., 2020), which will in turn act incrementally to contaminate waters with pollutants hazardous to human health (either through direct contact or through consumption of marine species) and to disrupt biological balances necessary to maintain critical ecosystems.

Thus, the ability to detect and observe these pollutants is a crucial step in creating a mechanism that can reverse the course of marine plastic pollution. The deployment of instruments that allow large areas to be studied to determine the current location of concentrations of floating litter allows for the timely activation of collection procedures as well as investigations of potential deposit sites.

Satellite imagery is one such tool, as it provides information on large areas of the Earth's surface at specific times while allowing a focus on smaller areas of interest. The effectiveness of using satellite imagery is based on the differentiation of the optical properties (e.g. spectral identities) of the floating plastic litter in relation to the aquatic environment in which it is found. Based on this differentiation, there are a variety of satellite systems whose images can be used to monitor surface plastic litter.

The final choice, for the purposes of this work, was the Sentinel-2 system because it offers a combination of spatial resolution, geographic coverage, repeatability, and data accessibility that serves the needs of the research conducted.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υπομονετική καθοδήγηση του καθηγητή κ. Μερτίκα Στυλιανού και των βοηθών του εργαστηρίου Γεωδαισίας & Πληροφορικής των Γεωεπιστημών του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Ξενοφών Φραντζή και κ. Αχιλλέα Τριπολιτσιώτη.

Θα ήθελα να δώσω ειδικές ευχαριστίες στον συνάδελφο Αλέξανδρο Μιχαλόπουλο και την Κωνσταντίνα Εμμανουηλίδου για τη συμβολή και τη βοήθειά τους στην ολοκλήρωση του παρόντος.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή1
1° Κεφάλαιο Τηλεπισκόπηση – Βασικές Έννοιες4
1.1 Τηλεπισκόπηση
1.2 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία4
1.3 Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολίας με την Ύλη7
1.4 Φασματική Ταυτότητα Υλικών8
1.5 Δορυφορικά Συστήματα9
1.6 Δορυφορικές Εικόνες της Γης9
1.7 Θαλάσσια Εξάπλωση Πλαστικών Ρύπων13
1.8 Φασματική Ταυτότητα Πλαστικών Υλικών14
2° Κεφάλαιο Ανάλυση Δορυφορικών Συστημάτων17
2.1 Το Δορυφορικό Σύστημα LANDSAT 818
2.2 Το Δορυφορικό Σύστημα WorldView-3
2.3 Ο Αισθητήρας ASTER
2.4 Τα Δορυφορικά Συστήματα Sentinel24
2.4.1 Το Δορυφορικό Σύστημα Sentinel-225
3ο Κεφάλαιο Ιστορική Αναδρομή
3.1) Εξέλιξη Δορυφορικών Συστημάτων Γήινης Παρατήρησης
3.2) Μέθοδοι Παρακολούθησης Συγκεντρώσεων Επιθαλάσσιων Πλαστικών Ρύπων
4° Κεφάλαιο Μεθοδολογία
4.1 Αναζήτηση και Επιλογή Δορυφορικών Εικόνων
4.2 Λογισμικό Επεξεργασίας (SeNtinel Application Platform – SN.A.P.)
4.3 Διαδικασία Επεξεργασίας Εικόνων40
4.3.1 Ατμοσφαιρική Διόρθωση
4.3.2 Επαναδειγματοληψία (Resampling)
4.3.3 Μάσκα Ξηράς
4.3.4 Εφαρμογή Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων (FDI)

4.3.5 Χρήση NDVI (Κανονικοποιημένου Δείκτη Διαφοράς Βλάστησης)	48
5° Κεφάλαιο Επεξεργασία Δορυφορικών Εικόνων	51
5.1 Παρουσίαση και Ανάλυση Εικόνων Προ και Μετά Επεξεργασίας	51
5.1.1 Εικόνες Μυτιλήνης	52
5.1.2 Εικόνες Βιετνάμ	57
6° Κεφάλαιο	63
Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	63
Βιβλιογραφία	65
Ελληνική Βιβλιογραφία	65
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	66

Κατάλογος Σχημάτων και Πινάκων

Σχήμα 1 : Οι φασματικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. (NASA, 2004,
τροποποιημένο)
Σχήμα 2 : Φασματική ταυτότητα πέντε συχνών ειδών επιφάνειας σε δορυφορικές εικόνες
(Xiaoyong Zhuge, 2017)
Σχήμα 3 : Δορυφορική εικόνα του συστήματος PlanetScope με χωρική ανάλυση 3 m (a) και
του συστήματος SkySat με χωρική ανάλυση 0.5 m (b)10
Σχήμα 4 : Παράθυρο εικόνας του διαύλου B11 του συστήματος Sentinel-2 και το διάγραμμα
του ιστογράμματος της
Σχήμα 5 : Διάγραμμα ετήσιων τόνων πλαστικών απορριμμάτων που καταλήγουν στους
ωκεανούς για τις 20 χώρες με την μεγαλύτερη απόθεση (Hirdy Othman et al., January 2020). 14
Σχήμα 6 : Ανακλαστικότητα διαφορετικών ειδών πλαστικών ρύπων που συλλέχθηκαν από της
νήσους Cocos τον Φεβρουάριο του 2020 και καθαρών πολυμερών που συλλέχθηκαν το 2021.
(Jenna Gufforr et al. , 2021)
Σχήμα 7 : Μέση ανακλαστικότητα στεγνών και υδατοβρεχτών μικροπλαστικών που
συλλέχθηκαν από την θάλασσα, με την τυπική απόκλισή της. (Heidi M. Dierssen, 2018) 16
Σχήμα 8 : Βασικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Landsat-8
Σχήμα 9 : Χρονοδιάγραμμα του συστήματος Landsat από το 1972. (USGS, 2016)19
Σχήμα 10 : Απεικόνιση της δυτικής Κρήτης από τον δορυφόρο Landsat-8 (Εικόνα RGB, 2017).
Σχήμα 11 : Βασικά χαρακτηριστικά δορυφόρου WorldView-3
Σχήμα 12 : Εικόνα "πολύ υψηλής ανάλυσης" (κατά την Maxar Technologies) από τον
δορυφόρο WorldView-3
Σχήμα 13 : Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρα ASTER23
Σχήμα 14 : Μήκη κύματος στα οποία τα πλαστικά υλικά παρουσιάζουν υψηλή
ανακλαστικότητα και οι δίαυλοι των εξεταζόμενων δορυφορικών συστημάτων που τα
εμπεριέχουν στο φάσμα τους
Σχήμα 15 : Δίαυλοι του συστήματος Sentinel-2 και τα χαρακτηριστικά τους25
Σχήμα 16 : Απεικόνιση της περιοχής της δυτικής Κρήτης από το σύστημα Sentinel-2 (Εικόνα
RGB, 2018)
Σχήμα 17 : Χάρτης ημερών μεταξύ των λήψεων δύο εικόνων Sentinel-2 με μηδενική
νεφοκάλυψη. (Martin Sudmanns et al., 2019)
Σχήμα 18 : Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών των τεσσάρων δορυφορικών συστημάτων που
διερευνήθηκαν

Σχήμα 19 : Μία από τις πρώτες απεικονίσεις της Γης από δορυφορικό σύστημα. (TIROS-1,
1960)
Σχήμα 20 : Σχεδιάγραμμα της μεθόδου MARLIN (IVL Swedish Environmental Research
Institute, 2018)
Σχήμα 21 : Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού SN.A.P. (Version 8.0)
Σχήμα 22 : Εικόνα του διαύλου Β11 από την περιοχή του λιμένα της Μυτιλήνης πριν την
εφαρμογή μάσκας ξηράς, με το αντίστοιχο διάγραμμα ιστογράμματος
Σχήμα 23 : Εικόνα του διαύλου Β11 από την περιοχή του λιμένα της Μυτιλήνης μετά την
εφαρμογή μάσκας ξηράς, με το αντίστοιχο διάγραμμα ιστογράμματος
Σχήμα 24 : Αναπαράσταση της ανακλαστικότητας επιπλέοντων υλικών (Xin-peng Tian και Lin
Sun, 2016)
Σχήμα 25: Οι τιμές εικονοψηφίων κατά την εφαρμογή του Κανονικοποιημένος Δείκτης
Διαφοράς Βλάστησης ανάλογα με το υλικό που καταλαμβάνει την περιοχή του εικονοψηφίου
(Lauren Biermann et al., 2020)
Σχήμα 26 : Οι τιμές εικονοψηφίων κατά την εφαρμογή του Δείκτη Πλεούμενων
Απορριμμάτων ανάλογα με το υλικό που καταλαμβάνει την περιοχή του εικονοψηφίου.
(Lauren Biermann et al., 2020)
Σχήμα 27 : Τιμές εικονοψηφίων που αντιστοιχούν σε περιοχές διάφορων υλικών κατά την
εφαρμογή του Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές κατά την
εφαρμογή Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης. (Lauren Biermann et al., 2020) 50
Σχήμα 28 : Προβολή της ευρύτερης περιοχής της Μυτιλήνης από το λογισμικό SNAP
Σχήμα 29 : RGB Απεικόνιση της περιοχής του λιμένα Μυτιλήνης και παραλίας Τσαμάκια
(Sentinel-2, 2018)
Σχήμα 30 : Εικόνα της περιοχής του λιμένα της Μυτιλήνης. (Sentinel-2, 2018)
Σχήμα 31 : Περιοχή λιμένα Μυτιλήνης, μετά την εφαρμογή της μάσκας ξηράς και του δείκτη
FDI (Sentinel-2, 2018, τροποποιημένη)
Σχήμα 32 : Περιοχή λιμένα Μυτιλήνης, μετά την εφαρμογή μάσκας ξηράς και του δείκτη
NDVI. (Sentinel-2, 2018, τροποποιημένη)
Σχήμα 33 : Περιοχή κόλπου Cam Rahn. Στο ερυθρό πλαίσιο περιλαμβάνεται η περιοχή της
ακτής Binh Lap στην οποία έγινε έρευνα για πλαστικούς ρύπους. (Sentinel-2, 2020)
Σχήμα 34 : RGB απεικόνιση της παραλίας μελέτης στην περιοχή ενδιαφέροντος (Sentinel-2,
2020)
Σχήμα 35 : Περιοχή της παραλίας έρευνας στην ακτή Binh Lap μετά την εφαρμογή μάσκας
ξηράς και του δείκτη FDI. Τα εικονοστοιχεία υψηλών τιμών στην θαλάσσια περιοχή ενδέχεται
να αντιστοιχούν σε θέσεις πλαστικών ρύπων. (Sentinel-2, 2020, τροποποιημένη)
Σχήμα 36 : Διάκριση των πλαστικών στόχων ανάμεσα στα εικονοστοιχεία που παρουσιάζουν
υψηλές τιμές στον δείκτη FDI. (Sentinel-2, 2020, τροποποιημένη)60

Σχήμα 38 : Αντιστοίχιση των θέσεων επιβεβαιωμένων πλαστικών στόχων στην RGB	
απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος της ακτής Binh Lap.	
(Sentinel-2, 2020, τροποποιημένη)	62

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε εντοπισμός πλαστικών απορριμμάτων που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας με την χρήση του δορυφορικού συστήματος Sentinel-2. Ο βασικός στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας η οποία επιτρέπει τον έλεγχο εκτενών θαλάσσιων εκτάσεων για την ύπαρξη επιπλεόντων ρύπων σε ελάχιστο χρόνο και την διάκρισή τους σε πλαστικούς ή μη.

Οι παγκόσμιες θάλασσες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των αυξανόμενων συγκεντρώσεων πλαστικών απορριμμάτων, μια κατάσταση η οποία επηρεάζει άμεσα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες και συνθήκες διαβίωσης. Η Κίνα, η Ινδονησία και οι Φιλιππίνες, οι χώρες με τις τρεις μεγαλύτερες θαλάσσιες αποθέσεις πλαστικών απορριμμάτων, ευθύνονται συνολικά για σχεδόν 14 εκατομμύρια τόνους πλαστικού που επιπλέουν σε παγκόσμια νερά μόνο μέσα στο έτος 2020. Η ανθεκτικότητα των υλικών αυτών σε βιοαποικοδόμηση σε συνδυασμό με την τάση κατακερματισμού τους σε τεμάχια πολύ μικρών διαστάσεων (<5mm στην μεγαλύτερη διάσταση - μικροπλαστικά) καθιστούν την συλλογή τους πολύ δυσκολότερη και δαπανηρή, έως αδύνατη στην περίπτωση κάποιων περιοχών (όπως οι θάλασσες με ισχυρά ρεύματα). Ως εκ τούτου, ο έγκαιρος εντοπισμός των συγκεντρώσεων τέτοιων ρύπων είναι απαραίτητος για την αποτελεσματική ελάττωση της ρύπανσης από πλαστικά στις ωκεάνιες περιοχές.

Η χρήση δορυφορικών συστημάτων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην επίτευξη του στόχου αυτού. Η επιφανειακή κάλυψη των συστημάτων αυτών καθιστά δυνατή την παρακολούθηση της παγκόσμιας θαλάσσιας επιφάνειας χωρίς την παρουσία προσωπικού σε κάθε περιοχή που ερευνάται. Τα επίπεδα χωρικής ανάλυσης που έχουν τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα δίνουν βάσιμη εικόνα για τις διαστάσεις των συγκεντρώσεων που εντοπίζονται και το παρατηρήσιμο εύρος μεγεθών αυξάνεται με την βελτίωση της χωρικής ανάλυσης του συστήματος. Ανάλογα με την χρονική διακριτική ικανότητα ενός δορυφορικού συστήματος, είναι επίσης δυνατόν να ερευνηθεί και η περιοχή απόθεσης κάθε πλαστικού στόχου υπό παρατήρηση. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των δορυφορικών συστημάτων θα ενισχύσει ακόμα περισσότερο τις παραπάνω ικανότητες τους, με αποτέλεσμα να κρίνεται σημαντική η έγκαιρη ένταξη των συστημάτων αυτών στις διαδικασίες καθαρισμού των θαλάσσιων επιφανειών.

Η ικανότητα των δορυφορικών συστημάτων να διακρίνουν συγκεντρώσεις πλαστικών ρύπων οφείλεται στην διαφορά της φασματικής ταυτότητας των πλαστικών υλικών σε σχέση με εκείνη του θαλασσινού νερού. Ένα δορυφορικό σύστημα επίγειας παρατήρησης δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης και αναλύει την ακτινοβολία αυτή με βάση την τοποθεσία από την οποία ελήφθη. Στην περίπτωση των δορυφόρων Sentinel-2 (το

σύστημα που προτιμήθηκε για τους σκοπούς αυτής της εργασίας) χρησιμοποιείται η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία για την δημιουργία εικόνων και η ανάλυση της γίνεται σε ένα φάσμα που καλύπτει τιμές μηκών κύματος από 443 nm έως 2190 nm, χωρισμένες σε 12 διαύλους (bands). Μέσα στο φάσμα αυτό ερευνήθηκαν τιμές μηκών κύματος ακτινοβολιών οι οποίες απορροφόνται και ανακλώνται ισχυρότερα στις επιφάνειες πλαστικών αντικειμένων (φασματική ταυτότητα πλαστικού), και η διαφορά των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες του περιβάλλοντος (θαλάσσια ύδατα). Με βάση τις τιμές αυτές, έγινε χρήση ανάλογου δείκτη (index) ο οποίος τονίζει τα σημεία των εξεταζόμενων εικόνων που αντιστοιχούν σε θέσεις πλεούμενων πλαστικών συγκεντρώσεων κατά την ημερομηνία λήψης της εικόνας.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται βασικές αρχές της μεθόδου, ξεκινώντας με τον ορισμό της τηλεπισκόπησης και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση των αλληλεπιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη και της έννοιας της φασματικής ταυτότητας και πως αυτή βοηθάει στον εντοπισμό στόχων. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων και του τρόπου δημιουργίας της δορυφορικής εικόνας, και οι τελικές ενότητες κάνουν αναφορά στα πλαστικά υλικά που αποτελούν σημείο εστίασης της εργασίας, με περιγραφή των τρόπων διασποράς τους σε θαλάσσιες επιφάνειες και την φασματική ταυτότητα που τα χαρακτηρίζει.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση των δορυφορικών συστημάτων που εξετάστηκαν προκειμένου να επιλεχθεί μία πηγή εικόνων μέσω των οποίων θα διεξαγόταν η αναζήτηση πλαστικών στόχων. Αρχικά παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών συστημάτων LANDSAT-8, ASTER και WorldView-3 καθώς και οι λόγοι για τους οποίους τελικά δεν επιλέχθηκαν ως πηγές για τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αναλύεται η σειρά δορυφόρων Sentinel, το σύστημα Sentinel-2 και τα πλεονεκτήματα που παρέχει η επιλογή του.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί μία ιστορική αναδρομή στις μεθόδους παρατήρησης πλαστικών επιθαλάσσιων ρύπων και την εξέλιξη των δυνατοτήτων των δορυφορικών συστημάτων επίγειας παρατήρησης με το πέρασμα του χρόνου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία επιλογής και επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων του συστήματος Sentinel-2 προκειμένου να γίνουν διακριτοί οι πλαστικοί πλεούμενοι στόχοι τόσο σε εικόνες όπου η θέση και ο αριθμός του είναι γνωστά όσο και σε εικόνες που δεν είναι. Αρχικά γίνεται επεξήγηση των κριτηρίων με βάση τα οποία έγινε επιλογή των εικόνων, και πως αυτά διέφεραν από τις εικόνες όπου οι θέσεις πλαστικών ρύπων είναι γνωστές από εκείνες όπου οι θέσεις και ο αριθμός τους δεν είναι γνωστά. Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στο λογισμικό SN.A.P. το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της επεξεργασίας των εικόνων των εικόνων των εικόνων των κριτηρίων τως. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αναλύονται

οι διαδικασίες τροποποίησης και επεξεργασίας των τιμών της κάθε εικόνας, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν την επαναδειγματοληψία (resampling), την χρήση μάσκας ξηράς και την εφαρμογή των δεικτών NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) και FDI (Floating Debris Index).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα στάδια επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη των περιοχών ενδιαφέροντος. Οι περιοχές αυτές είναι η περιοχή του λιμένα της Μυτιλήνης στην Ελλάδα και η παραλία Binh Lap στο Βιετνάμ.

Το έκτο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνει μία ανάλυση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δορυφορικών προϊόντων. Στην συνέχεια επεξηγούνται τα συμπεράσματα στα οποία οδήγησε η διαδικασία της έρευνας και μελέτης των περιοχών ενδιαφέροντος, καθώς και τρόπος με τον οποίο μπορεί να βελτιωθεί η διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

1º Κεφάλαιο Τηλεπισκόπηση – Βασικές Έννοιες

1.1 Τηλεπισκόπηση

Ως τηλεπισκόπηση ορίζεται "η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από έναν στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς στην πραγματικότητα να έρθουμε σε απευθείας επαφή με αυτόν" (Μερτίκας, 2009). Σε ότι αφορά την συλλογή πληροφοριών γύρω από έναν στόχο, οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούν αισθητήρες οι οποίοι δημιουργούν την εικόνα του αντικειμένου ή της περιοχής ενδιαφέροντος. Η εικόνα που δημιουργείται υπόκειται σε επεξεργασία, σε επόμενο στάδιο, η οποία κάνει πιο έντονα και εμφανή συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εικονιζόμενης περιοχής ή του εικονιζόμενου αντικειμένου, αναλόγως των ιδιοτήτων που μελετώνται. Τα χαρακτηριστικά αυτά προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του στόχου με προσπίπτουσα ακτινοβολία (είτε ηλιακή είτε ακτινοβολία γνωστού μήκους κύματος, ανάλογα το είδος του συστήματος) και καθορίζουν το είδος επεξεργασίας που θα πρέπει να υποστεί μία εικόνα. Τέτοιου είδους εικόνες χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η θέση στόχου γνωστών φασματικών ιδιοτήτων ή για να μελετηθεί το είδος των υλικών σε μια περιοχή ενδιαφέροντος (παραδείγματος χάριν, η έκταση καμένης χλωρίδας σε περιοχές πρόσφατων πυρκαγιών).

1.2 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

Τα χαρακτηριστικά με τα οποία διακρίνεται συνηθέστερα η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι το μήκος κύματος, η συχνότητα και η ενέργεια της. Οι τιμές που λαμβάνουν αυτά τα χαρακτηριστικά καθορίζουν τις ιδιότητες της ακτινοβολίας και το συνολικό εύρος του αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ο χαρακτηρισμός των ακτινοβολιών που χρησιμοποιήθηκαν έγινε αποκλειστικά με χρήση του μήκος κύματος τους, το οποίο μετρήθηκε σε nm.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα (επονομαζόμενα φασματικές ζώνες) τα οποία καθορίζονται από μία ελάχιστη και μία μέγιστη τιμή του μεγέθους που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των διάφορων ακτινοβολιών. Ακτινοβολίες μηκών

κύματος που ανήκουν στην ίδια φασματική ζώνη παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες και περιγράφονται συλλογικά από την ονομασία της φασματικής ζώνης στην οποία ανήκουν.

Κάθε είδος έρευνας που αξιοποιεί τις φασματικές ιδιότητες ενός ή περισσότερων υλικών χρησιμοποιεί συγκεκριμένες φασματικές ζώνες για την διεξαγωγή της. Στην περίπτωση των ερευνών που χρησιμοποιούν μεθόδους Τηλεπισκόπησης οι πιο σημαντικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι εκείνες που δημιουργούνται από τον Ήλιο, δηλαδή ακτίνες γάμμα (< 0.03 nm) μέχρι και τα ραδιοκύματα (≥ 30 cm) (Μερτίκας, 2009). Οι ζώνες αυτές αναφέρονται είτε σε ακτινοβολία παραγόμενη απευθείας από τις πυρηνικές αντιδράσεις του Ήλιου είτε σε ακτινοβολία που προκύπτει από την ανάκλαση ή απορρόφηση και επανεκπομπή των ηλιακών ακτινών.



Σχήμα 1 : Οι φασματικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. (NASA, 2004, τροποποιημένο)

Από το σύνολο των φασματικών ζωνών που παράγονται εξαιτίας του Ήλιου, εκείνα που χρησιμοποιούν περισσότερο οι μέθοδοι Τηλεπισκόπησης είναι η υπεριώδης, η ορατή, η υπέρυθρη και τα μικροκύματα.

Η ζώνη της υπεριώδους ακτινοβολίας εκτείνεται από 10 nm έως τα 400 nm. Ωστόσο, η ισχυρή απορρόφηση από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας επιτρέπει τη χρήση μόνο των μηκών κύματος από 300 έως 400 nm. Στην πραγματικότητα, προκειμένου να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί όλο το προαναφερθέν εύρος, θα πρέπει να γίνει χρήση ειδικών φακών καθώς το συμβατικό γυαλί απορροφά ακτίνες μήκους κύματος κάτω από 350-360 nm. Οι εικόνες που δημιουργούνται από σήμα υπεριωδών ακτινών παρουσιάζουν χαμηλή διαχωριστική ικανότητα λόγω ισχυρής ατμοσφαιρικής σκέδασης, ελαττώνοντας σημαντικά τις περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν. Επιπλέον, παρατηρούνται φαινόμενα φθορισμού, δηλαδή επανεκπομπή της υπεριώδους ακτινοβολίας που έχει απορροφηθεί ως ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος. Το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που ονομάζεται «ορατό» αναφέρεται στα μήκη κύματος των ακτινοβολιών στις οποίες είναι ευαίσθητο το ανθρώπινο μάτι. Το φάσμα της ζώνης αυτής αποτελείται από τις τιμές μηκών κύματος 400 nm έως 700 nm. Το εύρος αυτό διαχωρίζεται σε πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα τα οποία είναι μπλε (400 – 500 nm), πράσινο (500 - 600 nm) και ερυθρό (600 – 700 nm). Ο όρος «αθροιστικά» αναφέρεται στο γεγονός ότι η άθροιση των συγκεκριμένων τριών χρωμάτων σε συγκεκριμένες αναλογίες μπορεί να αποδώσει οποιοδήποτε άλλο χρώμα. Έτσι, η ανθρώπινη όραση αντιλαμβάνεται τις αποχρώσεις του περιβάλλοντος με βάση τα ποσοστά στα οποία οι ακτινοβολίες των τριών πρωτευόντων χρωμάτων ανακλώνται και απορροφόνται από τις επιφάνειες κάθε σώματος. Για παράδειγμα, ένα κίτρινο αντικείμενο εμφανίζεται με αυτή την απόχρωση λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας του στις ακτινοβολίες που αντιστοιχούν στο κόκκινο και το πράσινο φάσμα ενώ ταυτόχρονα απορροφά ισχυρά τις αντίστοιχες του μπλε χρώματος. Ακραίες περιπτώσεις αποτελούν το μαύρο χρώμα, το οποίο είναι ένδειξη ισχυρής απορρόφησης όλων των μηκών κύματος τα ορατής ακτινοβολίας, και το λευκό χρώμα, το οποίο προκύπτει από την ισχυρή ανάκλαση όλων των μηκών κύματος τα ορατής ακτινοβολίας.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία εκτείνεται από τα μήκη κύματος 700 nm έως 10⁶ nm. Όπως και με την ζώνη του ορατού φάσματος, η οποία χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές, η υπέρυθρη ακτινοβολία διακρίνεται σε εγγύς, μέση, άπω και άκρα υπέρυθρη. Ωστόσο, εν αντιθέσει με τα αθροιστικά πρωτεύοντα χρώματα, οι τρεις υποδιαιρέσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας δεν έχουν ξεκάθαρα όρια. Ένα κοινό χαρακτηριστικό των ακτινών της υπέρυθρης φασματικής ζώνης είναι η υψηλή έως ολική απορρόφηση τους από υδάτινα σώματα. Αυτό καθιστά το συγκεκριμένο είδος ακτινοβολίας ιδανικό για την παρακολούθηση ακτογραμμών και την εύρεση ρηχών υπόγειων μαζών νερού.

Το εύρος 700 – 3000 nm αντιστοιχεί στο φάσμα της εγγύς και μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας. Σαν κύριο χαρακτηριστικό τους έχουν ότι αποτελούνται από ηλιακή ακτινοβολία η οποία έχει ανακλαστεί στην γήινη επιφάνεια. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της εγγύς και της μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι παρόμοιοι με εκείνους που πραγματοποιούν καταγραφές στο ορατό φάσμα.

Στα μήκη κύματος $3 - 300 * 10^6 nm$ αντιστοιχούν τα μικροκύματα. Πρόκειται για ακτινοβολίες οι οποίες αντιστοιχούν στην θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την γήινη επιφάνεια. Λόγω των υψηλών μηκών κύματός τους δέχονται ελάχιστη επιρροή σε ότι αφορά φαινόμενα απορρόφησης και σκέδασης από την ατμόσφαιρα, με την επιρροή αυτή να γίνεται πιο αισθητή στα μεγαλύτερα μήκη κύματος. Αυτό καθιστά τις συγκεκριμένες ακτινοβολίες ιδανικές για ανίχνευση και παρακολούθηση μέσα από έντονα καιρικά φαινόμενα, και είναι ο λόγος που χρησιμοποιούνται στα συστήματα RADAR.

1.3 Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολίας με την Ύλη

Η ποιότητα των δορυφορικών εικόνων, καθώς και η επεξεργασία που είναι απαραίτητη για την χρήση τους, εξαρτάται από την επίδραση που δέχεται κάθε δέσμη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την πρόσπτωσή της σε μία επιφάνεια και τη διαδρομή που ακολουθεί μέχρι το δέκτη του χρησιμοποιούμενου συστήματος. Οι κύριες αλληλεπιδράσεις που καθορίζουν τις πληροφορίες που λαμβάνονται από μια μέθοδο τηλεπισκόπησης είναι η ανάκλαση, η σκέδαση (κυρίως λόγω της ατμόσφαιρας) και η απορρόφηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Στην περίπτωση της ανάκλασης, γίνεται αναφορά στην αλλαγή της διεύθυνσης μίας ακτίνας φωτός ως αποτέλεσμα της πρόσπτωσής της σε μία επιφάνεια. Όταν προκύπτει, υπάρχουν δύο πιθανά ενδεχόμενα : η πλήρης αλλαγή της πορείας της ακτίνας, διατηρώντας όλη ή σχεδόν όλη την ενέργειά της (όταν η πρόσπτωση γίνεται σε λεία επιφάνεια) ή η διάχυση της ακτίνας προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις (ως αποτέλεσμα πρόσπτωσης σε επιφάνεια με υψηλή τραχύτητα σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτίνας). Υψηλή ανακλαστικότητα ενός υλικού σε ένα ή περισσότερα μήκη κύματος οδηγεί στην εμφάνιση υψηλότερων τιμών, για εκείνα τα μήκη κύματος, στις τιμές μίας δορυφορικής εικόνας στις οποίες εντοπίζεται το υλικό εκείνο.

Όταν παρατηρείται απορρόφηση της ακτινοβολίας υπάρχει κατακράτηση ενός αισθητού κλάσματος της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτίνας από ένα σώμα στο οποίο προσέπεσε ή μέσα από το οποίο διήλθε. Η ενέργεια αυτή, στην συνέχεια, διασκορπίζεται στο περιβάλλον με την μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας. Φαινόμενα απορρόφησης μπορούν να παρατηρηθούν τόσο λόγω των υλικών των σωμάτων που περιέχονται σε μία εικόνα όσο και λόγω της ίδιας της ατμόσφαιρας, με κύριους απορροφητές το όζον (O_3), το οζυγόνο (O_2), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα (H_2O). Στις εικόνες που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε έντονη απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος λόγω της θαλάσσιας επιφάνειας (κάτι που ήταν αναμενόμενο μέσα στα πλαίσια της εργασίας, καθώς η μελέτη επικεντρώθηκε σε παράκτιες περιοχές). Όταν μελετώνται εικόνες των μηκών κύματος τα οποία απορροφόνται έντονα σε κάποιες περιοχές της εικόνας, τότε οι περιοχές εκείνες θα διακρίνονται από χαμηλές έως και μηδενικές τιμές.

Κατά το φαινόμενο της σκέδασης, έχουμε εκτροπή της ακτινοβολίας από αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Ο βαθμός εκτροπής εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων που την προκαλούν, το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και την έκταση που διάνυσε ανάμεσα στα εν λόγω σωματίδια. Σαν αποτέλεσμα της σκέδασης, μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας δεν προσπίπτει ποτέ στην επιφάνεια της Γης. Αυτό επηρεάζει περισσότερο παθητικούς δέκτες όπως αυτοί του συστήματος Sentinel-2, οι οποίοι λειτουργούν χρησιμοποιώντας την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από την γήινη επιφάνεια.

1.4 Φασματική Ταυτότητα Υλικών

Κάθε υλικό σώμα αλληλοεπιδρά με την προσπίπτουσα ακτινοβολία με συγκεκριμένο τρόπο ο οποίος καθορίζεται από την σύνθεσή του. Έτσι, για κάθε μήκος κύματος ακτινοβολίας, υπάρχει ένα συγκεκριμένο ποσοστό ανάκλασης, απορρόφησης ή επανεκπομπής του όταν αυτό προσπίπτει σε ένα υλικό σώμα. Το σύνολο των ποσοστών αυτών για όλο το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αποτελεί την φασματική ταυτότητα ή φασματική υπογραφή ενός σώματος.

Η φασματική ταυτότητα είναι χαρακτηριστική για κάθε σώμα και χρησιμοποιείται για την διάκριση του από το περιβάλλον του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανθρώπινη όραση : τα χρώματα με τα οποία το ανθρώπινο μάτι αναγνωρίζει κάθε αντικείμενο καθορίζονται από τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος τα οποία ανακλώνται και εκπέμπονται από το αντικείμενο εκείνο. Στις μεθόδους τηλεπισκόπησης είναι απαραίτητη η γνώση της φασματικής ταυτότητας των υλικών που υπάρχουν σε μία περιοχή προκειμένου να είναι δυνατή η διάκριση των στόχων ενδιαφέροντος από το υπόλοιπο περιβάλλον.



Σχήμα 2 : Φασματική ταυτότητα πέντε συχνών ειδών επιφάνειας σε δορυφορικές εικόνες. Η ανακλαστικότητα επιφάνειας αναφέρεται στο ποσοστό της εκάστοτε ακτινοβολίας που ανακλάται στην επιφάνεια ενός υλικού. (Xiaoyong Zhuge, 2017)

1.5 Δορυφορικά Συστήματα

Ως δορυφορικά συστήματα γήινης παρατήρησης ορίζονται οι ανθρώπινες κατασκευές που τοποθετούνται σε τροχιά γύρω από την Γη και έχουν ως σκοπό την συλλογή δεδομένων από την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνεια της. Αυτό επιτυγχάνεται συνηθέστερα με την χρήση αισθητήρων που χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία για να δημιουργήσουν την εικόνα της περιοχής που βρίσκεται στο πεδίο σάρωσής τους. Ένα δορυφορικό σύστημα χρησιμοποιεί δύο ή και περισσότερους τέτοιους δορυφόρους προκειμένου να επιτύχει καλύτερη κάλυψη και επαναληψιμότητα, σε όσο το δυνατόν μικρότερα διαστήματα στις λήψεις εικόνων.

Κάποιες περιπτώσεις συστημάτων χρησιμοποιούν, αντί για την ηλιακή ακτινοβολία, την ανάκλαση ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα ίδια για να δημιουργήσουν την εικόνα μίας περιοχής. Κυριότερο παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι δορυφόροι όπως οι ERS-1 και ERS-2, οι οποίοι φέρουν σύστημα RADAR (Radio Detection And Ranging). Τέτοια συστήματα ονομάζονται «ενεργά» και καταγράφουν δεδομένα με βάση τον χρόνο διαδρομής της ακτινοβολίας.

Το κάθε δορυφορικό σύστημα παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με βάση τα χαρακτηριστικά του, τα οποία καθορίζονται με βάση τον ρόλο για τον οποίο προορίζεται κατά την δημιουργία του (παρακολούθηση αγροτικών περιοχών, αστική παρακολούθηση, παρακολούθηση θαλάσσιων επιφανειών κ.α.).

1.6 Δορυφορικές Εικόνες της Γης

Το σήμα των ανακλώμενων ακτινοβολιών από την επιφάνεια της Γης επιτρέπει στους αισθητήρες των δορυφορικών συστημάτων επίγειας παρατήρησης να δημιουργούν απεικονίσεις των περιοχών της.

Οι απεικονίσεις αυτές αποτελούνται από εικονοστοιχεία (ή εικονοψηφία ή ψηφίδες), την δομική μονάδα της δορυφορικής εικόνας, με το κάθε ένα να αντιστοιχεί σε επιφάνεια έκτασης ανάλογη της χωρικής ανάλυσης του δορυφορικού συστήματος. Αυτό σημαίνει πως, σε ένα δορυφορικό σύστημα με χωρική ανάλυση 10 m, ένα εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει μια τετραγωνική έκταση 10 m X 10 m (ή 100 m²). Μία περιοχή γειτονικών εικονοψηφίων στον χώρο (x,y) ονομάζεται παράθυρο ψηφίδων. Συνηθέστερα επιλέγονται παράθυρα τετράγωνου σχήματος με κέντρο μία ψηφίδα (i,j) και μήκος πλευράς 1 (l=1,2,3,...).



Σχήμα 3: Δορυφορική εικόνα του συστήματος PlanetScope με χωρική ανάλυση 3 m (a) και του συστήματος SkySat με χωρική ανάλυση 0.5 m (b). (Medium, 2021)

Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας χρησιμοποιεί σύστημα συντεταγμένων (x,y) με διακριτές τιμές (i,j). Σε κάθε ένα από αυτά προσδίδεται μία τιμή της κλίμακας του γκρι. Οι τιμές της κλίμακας του γκρι g(x,y) προσδιορίζονται από την μέση τιμή της έντασης της ακτινοβολίας της

επιφάνειας, ενώ η τιμή g(x,y) ονομάζεται φωτεινότητα του εικονοστοιχείου. Στις περιπτώσεις πολυφασματικών εικόνων, κάθε ψηφίδα έχει παραπάνω από μία τιμές φωτεινότητας. Οι τιμές αυτές έχουν ένα εύρος από το 0 έως και μία επιλεγμένη δύναμη του 2 μείον 1 (π.χ. 2⁸ -1). Χαμηλότερα ποσοστά ανάκλασης ή εκπομπής ακτινοβολίας αντιστοιχούν σε τιμές κοντινότερες του 0 ενώ υψηλότερα ποσοστά ανάκλασης ή εκπομπής ακτινοβολίας αντιστοιχούν σε τιμές πλησιέστερες στην μέγιστη. Το σύνολο των τιμών αυτών (δηλαδή η επιλεγμένη δύναμη του 2) εξαρτάται από την ραδιομετρική ικανότητα (τον αριθμό των διαβαθμίσεων του γκρι που χρησιμοποιούνται για να αποτυπωθεί η ένταση της ακτινοβολίας που καταγράφεται) του δορυφορικού συστήματος.

Για κάθε μία εικόνα το εύρος των τιμών του γκρι που καλύπτουν οι τιμές των εικονοστοιχείων της φαίνεται στο ιστόγραμμα της. Ιστόγραμμα εικόνας ονομάζεται η γραφική παράσταση του αριθμού των ψηφίδων της εικόνας που διαθέτουν συγκεκριμένο επίπεδο της κλίμακας του γκρι (Μερτίκας, 2009). Ένα ιστόγραμμα μπορεί να αντιστοιχεί σε ολόκληρη την εικόνα ή σε παράθυρο ψηφίδων της (Σχήμα 3). Σε κάθε επίπεδο του γκρι αντιστοιχεί η συχνότητα εμφάνισης του σε ψηφίδες στην εικόνα ή το παράθυρο στο οποίο αναφέρεται το ιστόγραμμα.

Με βάση τα προηγούμενα, κάθε δορυφορική εικόνα είναι, στον πυρήνα της, ένας πίνακας αριθμών. Προκειμένου οι πληροφορίες ενός τέτοιου πίνακα να είναι ευανάγνωστες και ξεκάθαρες, γίνεται «μετάφραση» της κάθε μίας τιμής των εικονοστοιχείων σε μία απόχρωση του γκρι, ανάλογα την θέση της τιμής στο εύρος από το 0 έως την επιλεγμένη δύναμη του 2 (μείον 1). Έτσι, η ελάχιστη τιμή, δηλαδή το 0, αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα και η μέγιστη αντιστοιχεί στο λευκό χρώμα με όλες τις ενδιάμεσες τιμές να αντιστοιχούν σε αποχρώσεις του γκρι που υποδεικνύουν πόσο πλησιέστερα στο μέγιστο (ανοιχτόχρωμες αποχρώσεις) ή το ελάχιστο (σκουρότερες αποχρώσεις) του συνόλου τιμών βρίσκονται.



Σχήμα 4 : Παράθυρο εικόνας του διαύλου B11 του συστήματος Sentinel-2 και το διάγραμμα του ιστογράμματος της. Στον άζονα x εμφανίζονται οι τιμές ανακλαστικότητας στα μήκη κύματος του διαύλου B11 που παρουσιάζονται στην εικόνα με αποχρώσεις του γκρι και στον άζονα y ο αριθμός pixel που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή ανακλαστικότητας.

Μέσω της αντιστοίχισης των τιμών των εικονοστοιχείων σε αποχρώσεις του γκρι είναι δυνατή η αναπαράσταση μίας γήινης επιφάνειας με πιστότητα που καθορίζεται από τις δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου συστήματος. Υψηλότερη χωρική ανάλυση επιτρέπει λεπτομερέστερη

αναπαράσταση των σχημάτων και αποστάσεων των απεικονιζόμενων σωμάτων, ενώ υψηλότερη ραδιομετρική ανάλυση επιτρέπει καθαρότερο διαχωρισμό των διαφορετικών υλικών των επιφανειών της απεικονιζόμενης περιοχής.

Οι τρεις κύριες μέθοδοι λήψης ψηφιακών εικόνων είναι αεροφωτογραφία, σάρωση και διανυσματική απεικόνιση. Οι εικόνες που έχουν ληφθεί με τις δύο τελευταίες μεθόδους παρουσιάζουν γεωμετρικές παραμορφώσεις που απαιτούν συγκεκριμένες μεθόδους διόρθωσης.

Οι κύριες αιτίες των γεωμετρικών παραμορφώσεων σε ψηφιακές εικόνες είναι η επίδραση της περιστροφής της Γης (προκαλεί μετατόπιση της τελευταίας γραμμής σάρωσης), πανοραμική παραμόρφωση (προκαλεί ανομοιομορφία στα μεγέθη των ψηφίδων της εικόνας), η καμπυλότητα της Γης (προκαλεί αύξηση του εμβαδού της κυψέλης των ψηφίδων της εικόνας), η πεπερασμένη ταχύτητα δειγματοληψίας (προκαλεί παραμορφώσεις κατά την διεύθυνση καταγραφής μίας γραμμής), μεταβολές στην τροχιά του δορυφόρου, παραμορφώσεις λόγω δειγματοληψίας κατά την διεύθυνση σάρωσης, και η μεταβολή στην ταχύτητα κίνησης του επαναφερόμενου κατόπτρου.

Μία από τις μεθόδους διόρθωσης γεωμετρικών παραμορφώσεων είναι η διόρθωση με μοντέλα τροχιάς, η οποία είναι κατάλληλη για εικόνες συστημάτων με μικρό οπτικό πεδίο. Η διαδικασία της διόρθωσης με μοντέλα τροχιάς είναι χρονοβόρα και πολύπλοκη. Ωστόσο έχει υψηλή αποτελεσματικότητα όταν τα χαρακτηριστικά των γεωμετρικών παραμορφώσεων είναι ορισμένα.

Η γεωμετρική διόρθωση με πολυώνυμα στοχεύει στην διαμόρφωση ενός μαθηματικού μετασχηματισμού πολυωνύμων χωρίς την χρήση των δεδομένων των γεωμετρικών παραμορφώσεων. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την κατάλληλη επιλογή σημείων ελέγχου (ground control points) προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακριβής αναπαράσταση του μαθηματικού πολυωνύμου.

1.7 Θαλάσσια Εξάπλωση Πλαστικών Ρύπων

Οι εφαρμογές του πλαστικού στην καθημερινότητα είναι ποικίλες, από συσκευασία και κατασκευή έως ηλεκτρονικά είδη. Ως εκ τούτου, η παραγωγή και χρήση του στη βιομηχανία οδηγεί σε υπερμεγέθεις μάζες του υλικού να διατίθενται σε κυκλοφορία (περίπου 300 εκατομμύρια τόνοι ανά έτος), με ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 150 εκατομμύρια) από αυτές να χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε καταλήγουν να απορρίπτονται σε σύντομο χρονικό διάστημα, με 14 εκατομμύρια τόνους τουλάχιστον να καταλήγουν στον ωκεανό. Έτσι, τα πλαστικά απορρίμματα έχουν καταλήξει ως ο σημαντικότερος τύπος ρύπανσης στα θαλάσσια οικοσυστήματα, με ποσοστό έως και 80% των επιφανειακών ρυπαντών να είναι ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Επιπλέον, οι περισσότερες τουριστικές ακτές αποτελούν τοποθεσίες υψηλών συγκεντρώσεων πλαστικών υλικών που καταλήγει στα θαλάσσια ρεύματα, ενώ οι κατοικημένες περιοχές αποτελούν εστίες απόθεσης πλαστικής ρύπανσης, ειδικά σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει επαρκής διαχείριση απορριμμάτων. Το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο όταν εκλείπουν μέθοδοι ασφαλούς απόθεσης και ανακύκλωσης, με αποτέλεσμα οι παράνομες απορρίψεις πλαστικών υλικών να ακολουθούνται ως κύρια λύση, οδηγώντας σε περαιτέρω απορριμματικό φορτίο σε ακτές.



Σχήμα 5: Διάγραμμα ετήσιων ποσοτήτων (σε εκατομμύρια τόνους) πλαστικών απορριμμάτων που καταλήγουν στους ωκεανούς για τις 20 χώρες με την μεγαλύτερη απόθεση (Hirdy Othman et al., January 2020)

1.8 Φασματική Ταυτότητα Πλαστικών Υλικών

Οι τρόποι με τους οποίους οι πλαστικοί ρύποι αλληλοεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά τους αποτελούν τις φασματικές του ιδιότητες και αποτελούν γνώμονα για την αναζήτηση και παρατήρηση των ρύπων αυτών. Η ποικιλομορφία που έχουν αποκτήσει τα πλαστικά προϊόντα, μέσω της συστηματικής χρήσης τους στην σύγχρονη βιομηχανία, οδηγεί σε ένα εύρος φασματικών ιδιοτήτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3, το οποίο εκτείνεται από υψηλή απορρόφηση (~90%) του μήκους κύματος 300 nm και υψηλή ανακλαστικότητα (~70%) στο μήκος κύματος 750 nm (παρατηρείται στο λευκό

πολυβινυλοχλωρίδιο) έως και σχεδόν ολική απορρόφηση (>99%) στο μήκος κύματος 2450 nm και μεσαία ανακλαστικότητα (~50%) στο μήκος κύματος 750 nm (παρατηρείται στο διαφανές πολυαιθυλένιο).

Η χρήση της φασματικής ταυτότητας των πλαστικών ρύπων απαιτεί έρευνα γύρω από το φάσμα μηκών κύματος 300 nm έως και 2450 nm ώστε να βρεθούν «περιοχές» τιμών στις οποίες τα διαφορετικά είδη πλαστικών υλικών παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να αναπτυχθεί μία μέθοδος εντοπισμού που δεν χρειάζεται τροποποιήσεις για κάθε διαφορετικό είδος πλαστικών υλικών που είναι ικανή να διακρίνει. Οι υψηλότερες τιμές ανάκλασης των πλαστικών υλικών που εμφανίζονται συνηθέστερα σε ρύπους (διαφανές πολυαιθυλένιο – Clear PE, μελανό πολυαιθυλένιο – Black PE και λευκό πολυβινυλοχλωρίδιο – White PVC) βρίσκονται στην περιοχή 400 nm έως και περίπου 1600 nm και οι υψηλότερες τιμές απορρόφησης βρίσκονται μεταξύ 1600 nm και 2500 nm (Lizhen Lu et al., 2015) (Σχήμα 3).



Σχήμα 6 : Ανακλαστικότητα διαφορετικών ειδών πλαστικών ρύπων που συλλέχθηκαν από της νήσους Cocos τον Φεβρουάριο του 2020 και καθαρών πολυμερών που συλλέχθηκαν το 2021. (Jenna Gufforr et al., 2021)

Παρατηρείται πως το φάσμα 400-1600 nm εμπεριέχει όλη την «περιοχή» μηκών κύματος που αντιστοιχούν στη ζώνη της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (near-infrared, NIR) και της ορατής. Ταυτόχρονα το νερό, το οποίο αποτελεί το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η αναζήτηση των πλαστικών στόχων, παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη ανακλαστικότητα (<10%) σε σχέση με τους πλαστικούς στόχους, των οποίων η ανακλαστικότητα φτάνει κοντά στο 70%, στο εύρος των τιμών που αντιστοιχούν στην εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (780-1400 nm). Αυτό καθιστά ευκολότερη την διάκριση των περιοχών με υψηλές συγκεντρώσεις πλαστικών ρύπων από την υπόλοιπη θαλάσσια επιφάνεια.

Ένα ποσοστό (30% σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης πλαστικής ρύπανσης) των πλεούμενων πλαστικών απορριμμάτων βρίσκεται σε μορφή μικροπλαστικών, τα οποία, αν και είναι δύσκολο έως αδύνατο να παρατηρηθούν με τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, δίνουν μία εικόνα της φασματικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις ποικιλίας πλαστικών υλικών που έχουν δεχτεί επιρροές από το φυσικό περιβάλλον. Με βάση εργαστηριακές έρευνες που ασχολήθηκαν με τα μικροπλαστικά και την εξάπλωσή τους στις θάλασσες, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά ανακλαστικότητας και απορρόφησης που παρουσιάζουν οι πλαστικοί ρύποι διαφόρων ειδών μετά τον φυσικό ανασχηματισμό τους σε τεμάχια μικρότερα των 5 mm. Στο παρακάτω διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί μια κορύφωση της ανακλαστικότητας για τις τιμές 830, 1160, 1320 και 1600 nm, τόσο στα ξηρά (μπλε γραμμή) όσο και στα υγρά μικροπλαστικά (πράσινη γραμμή). Αυτό εξηγεί την συμμετοχή που έχουν οι δίαυλοι των συγκεκριμένων μηκών κύματος στην δημιουργία του δείκτη FDI (Floating Debris Index) ο οποίος έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην διάκριση πλαστικών στόχων σε σχέση με το θαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται.



Σχήμα 7 : Μέση ανακλαστικότητα στεγνών και υδατοβρεχτών μικροπλαστικών που συλλέχθηκαν από την θάλασσα, με την τυπική απόκλισή της. Χρησιμοποιήθηκε θαλασσινό νερό σε ποσότητα 30 ppt. (Heidi M. Dierssen, 2018)

2º Κεφάλαιο

Ανάλυση Δορυφορικών Συστημάτων

Η επιλογή δορυφορικού συστήματος για την αναζήτηση και παρακολούθηση πλεούμενων θαλάσσιων πλαστικών συγκεντρώσεων γίνεται με κύρια κριτήρια τα εξής χαρακτηριστικά : χωρική ανάλυση, φασματική ανάλυση και χρονική ανάλυση.

Η χωρική ανάλυση αναφέρεται στην έκταση πραγματικής επιφάνειας που αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο του προϊόντος ενός δορυφορικού συστήματος. Το μέγεθος των υπό μελέτη στόχων καθορίζει την ελάχιστη χωρική ανάλυση με την οποία είναι δυνατόν να εντοπιστούν. Στην περίπτωση των θαλάσσιων πλαστικών ρύπων, το μέγεθος των μεγαλύτερων συγκεντρώσεων τους φτάνουν μέχρι και τα 1.6 km² (Μεγάλη Πλαστική Νήσος Ειρηνικού, Great Pacific Garbage Patch) (L. Lebreton et al., 2018), με αποτέλεσμα να μπορούν να παρατηρηθούν από την χωρική ανάλυση πολλών συστημάτων. Ωστόσο, λόγω των μεγεθών της πλειοψηφίας των επιθαλάσσιων πλαστικών απορριμμάτων (1-100 cm στην μεγαλύτερη τους διάσταση) η χρήση συστημάτων υψηλότερης χωρικής ανάλυσης (δηλαδή κάτω των 100 cm) δίνει την δυνατότητα παρατήρησης συγκεντρώσεων μικρότερης εξάπλωσης, προτού αυτές αναπτυχθούν από την συσσώρευση περαιτέρω τεμαχίων.

Η χρονική ανάλυση αναφέρεται στην συχνότητα στην οποία ένα δορυφορικό σύστημα επανέρχεται και λαμβάνει εικόνες από μία συγκεκριμένη τοποθεσία. Ο κύριος παράγοντας που οδηγεί στην δημιουργία μεγάλων συγκεντρώσεων πλαστικών επιθαλάσσιων ρύπων είναι η διασπορά τους λόγω των θαλάσσιων ρευμάτων. Η κινητικότητα αυτή δημιουργεί δυσκολίες στην παρατήρηση των εν λόγω ρύπων από δορυφορικά συστήματα των οποίων η χρονική ανάλυση δεν είναι ικανή να ακολουθήσει την μετατόπιση που προκαλείται. Τα ισχυρότερα επιφανειακά ρεύματα μπορούν να φτάσουν ταχύτητες που ξεπερνούν τα 2.5 m/sec (ή 216 km/day), με αποτέλεσμα οι πλαστικοί ρύποι που παρασύρονται να μετατοπίζονται με αντίστοιχες ταχύτητες. Έτσι, ένα δορυφορικό σύστημα που έχει μεγάλη περίοδο επαναληψιμότητας (π.χ. 16 ημέρες στις περιπτώσεις κάποιων συστημάτων) θα αντιμετωπίσει δυσκολίες στον εντοπισμό ενός στόχου πλαστικών ρύπων σε επόμενες ημερομηνίες, καθώς ένα πιθανό ρεύμα θα έχει μετακινήσει τον στόχο έως και 3456 km σε τυχαία κατεύθυνση. Οι δυσκολίες αυτές δυσχεραίνουν σημαντικά οποιαδήποτε έρευνα για σημεία απόθεσης πλαστικών ρύπων.

Στην ενότητα 1.6 αναλύθηκαν η φασματική υπογραφή που χαρακτηρίζει τα πλαστικά απορρίμματα και τα μήκη κύματος στα οποία η ανακλαστικότητα και η απορρόφηση τους είναι πιο έντονες. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, είναι σημαντικό η φασματική κάλυψη του επιλεγμένου δορυφορικού συστήματος να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερα μήκη κύματος τα οποία ανακλώνται ή απορροφόνται ισχυρά στους υπό μελέτη στόχους. Με χρήση προσθαφαίρεσης διαύλων που περιέχουν αυτά τα μήκη κύματος είναι δυνατόν να ενισχυθεί η διακριτότητα των περιοχών των πλαστικών στόχων και, ταυτόχρονα, να ελαττωθεί η αντίστοιχη του περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή βελτιώνεται όταν στο σύστημα συνυπάρχουν περισσότεροι από δύο δίαυλοι στους οποίους περιλαμβάνονται μήκη κύματος ακτινοβολίας που είναι σημείο αναφοράς για τις φασματικές ιδιότητες του στόχου.

Σαν επιπλέον κριτήριο τέθηκε και η προσβασιμότητα των δεδομένων και των αρχείων των δορυφορικών συστημάτων, καθώς και η ύπαρξη ή μη χρηματικού κόστους για την απόκτηση των προϊόντων τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ένα σύστημα προτιμάται αν οι εικόνες του είναι διαθέσιμες μέσω απευθείας λήψης και αν δεν επιφέρουν οικονομικές επιβαρύνσεις. Τα κριτήρια αυτά χρησιμοποιήθηκαν κυρίως κατά την επιλογή των δορυφορικών συστημάτων που θα εξετάζονταν, και δεν είχαν μεγάλη επιρροή κατά την επιλογή ενός συστήματος από τα παρακάτω τέσσερα (κυρίως επειδή τα δεδομένα των συστημάτων αυτών ήταν ήδη διαθέσιμα στο ευρύ κοινό με ξεκάθαρες διαδικασίες απόκτησης και χωρίς κάποιο χρηματικό αντίτιμο), με εξαίρεση τον αποκλεισμό του συστήματος WorldView-3.

2.1 Το Δορυφορικό Σύστημα LANDSAT 8

Χαρακτηριστικά Landsat-8	
	430 – 1380 nm (10 δίαυλοι, Operational Land Imager), 10300 – 12500 nm (2
Φασματική Κάλυψη	δίαυλοι, Thermal InfraRed Sensor)
Χωρική Ανάλυση	15 m, 30 m кал 100 m
Χρονική Ανάλυση	16 ημέρες
Πλάτος Λωρίδας	185 km

Σχήμα 8 : Βασικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Landsat-8.

Ο δορυφόρος Landsat-8 είναι ένας αμερικανικός δορυφόρος επίγειας παρατήρησης. Βρίσκεται σε λειτουργία από τον Φεβρουάριο του 2013 (Σχήμα 1) και υπολογίζεται πως θα εξακολουθήσει να συλλέγει δεδομένα μέχρι το 2028. Η δημιουργία του είναι αποτέλεσμα συνεργασίας της NASA (National Aeronautics and Space Association) και της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS – United States Geological Survey).



Σχήμα 9 : Χρονοδιάγραμμα του συστήματος Landsat από το 1972. (USGS, 2016)

Μέχρι την εκτόξευση του Landsat-9, ο Landsat-8 μαζί με τον Landsat-7 ήταν οι κύριες πηγές δορυφορικών δεδομένων του προγράμματος Landsat. Η λειτουργία του βασίζεται σε δύο διαφορετικούς αισθητήρες : τον OLI (Operational Land Imager) και τον TIRS (Thermal InfraRed Sensor). Σε ότι αφορά την ποιότητα των προϊόντων του δορυφόρου, ο αισθητήρας OLI παρέχει δεδομένα σε ένα συνολικό φάσμα 430 – 2290 nm, χρησιμοποιώντας 9 διαύλους με χωρική ανάλυση 30 m (με εξαίρεση τον δίαυλο 8 ο οποίος έχει χωρική ανάλυση στα 15 m) και ο αισθητήρας TIRS παρέχει δεδομένα σε ένα σε ένα φάσμα 10600 – 12510 nm και χρησιμοποιεί 2 διαύλους χωρικής ανάλυσης 100 m.

Ο κύριος στόχος του δορυφόρου είναι η συλλογή και αρχειοθέτηση δεδομένων εικόνας σχετικά με της περιοχές ξηράς της Γης. Αυτό καθιστά τον δορυφόρο μία καλή επιλογή για εδαφικές μελέτες. Επιπλέον, λόγω της δυνατότητας χρήσης των δεδομένων του Landsat-8 χωρίς οικονομικές επιβαρύνσεις, είναι δυνατή η μελέτη πολλαπλών εικόνων προκειμένου να βρεθούν όσες εξυπηρετούν καλύτερα τους σκοπούς της εκάστοτε έρευνας.

Σχετικά με την παρούσα εργασία, ο δορυφόρος Landsat-8 παρέχει στοιχεία μονάχα για ένα από τα τέσσερα μήκη κύματος στα οποία οι πλαστικοί ρύποι παρουσιάζουν την υψηλότερη ανακλαστικότητα. Επιπλέον, η χωρική ανάλυση των διαύλων του είναι χειρότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα δορυφορικά συστήματα που εξετάζονται, τα οποία φτάνουν χωρικές αναλύσεις έως και 34 cm. Εξαιτίας των παραπάνω, αν ο Landsat-8 είχε επιλεγεί ως το μέσο έρευνας της εργασίας, θα μπορούσε να γίνει χρήση μόνο ενός από τους 12 διαύλους του, του διαύλου 6, και θα ήταν δυνατός ο εντοπισμός συγκεντρώσεων πλαστικών ρύπων μονάχα για περιπτώσεις όπου οι συγκεντρώσεις αυτές εξαπλώνονταν σε έκταση που καταλαμβάνει όλη ή σχεδόν όλη την επιφάνεια ενός τετραγώνου διαστάσεων 30 X 30 m.



Σχήμα 10 : Απεικόνιση της δυτικής Κρήτης από τον δορυφόρο Landsat-8 (Εικόνα RGB, 2017).

2.2 Το Δορυφορικό Σύστημα WorldView-3

Χαρακτηριστικά WorldView-3	
	400 – 1040 nm (Παγχρωματικοί δίαυλοι, 8
	δίαυλοι), 1195 – 2365 nm (Δίαυλοι
	Υπέρυθρων ακτινών βραχέος μήκους, 8
	δίαυλοι), 405 – 2245 nm (Δίαυλοι CAVIS, 12
Φασματική Κάλυψη	δίαυλοι)
	31-34 cm (Παγχρωματικοί δίαυλοι), 3.7-4.1 m
	(Δίαυλοι υπέρυθρων βραχέος μήκους ή
Χωρική Ανάλυση	SWIR), 30-33 m (Δίαυλοι CAVIS)
Χρονική Ανάλυση	1 - 4.5 ημέρες
Πλάτος Λωρίδας	13.1 km

Σχήμα 11 : Βασικά χαρακτηριστικά δορυφόρου WorldView-3.

Ο δορυφόρος WorldView-3 τέθηκε σε τροχιά στις 13 Αυγούστου 2014 από την αεροπορική βάση Vandenberg από την εταιρία Maxar Technologies. Αυτό που διαχωρίζει το εν λόγω σύστημα από τα υπόλοιπα είναι η πολύ υψηλή χωρική του ανάλυση, η οποία μπορεί να φτάσει και τα 31 cm. Η ίδια η εταιρία ισχυρίζεται πως ο WorldView-3 φτάνει την υψηλότερη χωρική ανάλυση από οποιοδήποτε άλλο δορυφορικό σύστημα στον κόσμο.

Επιπλέον, οι αισθητήρες του δορυφόρου παρέχουν πρόσβαση σε 28 διαύλους οι οποίοι καλύπτουν μήκη κύματος από 400 έως 2365 nm. Το εύρος αυτό και η ιδιαίτερα υψηλή χωρική ανάλυση του WorldView-3 επιτρέπουν την χρήση των εικόνων του για μια μεγάλη ποικιλία στόχων.

Αξίζει να τονιστεί ότι οι επιδόσεις του WorldView-3 ξεπερνούν σημαντικά εκείνες των υπόλοιπων δορυφορικών συστημάτων που εξετάστηκαν για την παρακολούθηση επιθαλάσσιων αντικειμένων. Η υψηλή χρονική ανάλυση του δορυφόρου επιτρέπει την συνεχή παρακολούθηση τυχόν μετατοπίσεων των στόχων καθώς και την έρευνα για το σημείο απόθεσης τους σε θαλάσσια ύδατα. Ωστόσο, τα χρηματικά ποσά για την αγορά εικόνων από το αρχείο του συγκεκριμένου δορυφόρου καθιστούν την απόκτηση τέτοιων δεδομένων πολύ δυσκολότερη σε σχέση με δορυφορικά συστήματα που επιτρέπουν δωρεάν πρόσβαση σε εικόνες που έχουν ληφθεί πριν από συγκεκριμένες ημερομηνίες. Επιπρόσθετα, η υψηλή χωρική ανάλυση των εικόνων του δορυφόρου WorldView-3 οδηγεί σε υψηλές απαιτήσεις για

ηλεκτρονικό αποθηκευτικό χώρο και υπολογιστική δύναμη προκειμένου να είναι εφικτή η επεξεργασία τους. Ένα υπολογιστικό σύστημα με δύο επεξεργαστές συχνότητας 2.9 GHz, 16 πυρήνες και 96 GB RAM χρειάστηκε 20 ώρες για να τμηματοποιήσει μία εικόνα από τον WorldView-3 που αντιπροσωπεύει μια περιοχή επιφάνειας 0.250 km² (Στέφανος Γεωργάνος et al., 2018).



Σχήμα 12 : Εικόνα "πολύ υψηλής ανάλυσης" (κατά την Maxar Technologies) από τον δορυφόρο WorldView-3. Η διακριτότητα των στόχων γίνεται εμφανής στις λεπτομέρειες που μπορούν να παρατηρηθούν στα αντικείμενα της εικόνας. (Maxar Technologies, 2014)

2.3 Ο Αισθητήρας ASTER

Χαρακτηριστικά ASTER			
	520 – 860 nm (Ορατό Εγγύς Υπέρυθρο, 4		
	δίαυλοι), 1600 – 2430 nm (Δίαυλοι		
	Υπέρυθρων Βραχέος Μήκους, 6 δίαυλοι), 8125		
	– 11650 nm (Δίαυλοι Θερμικού Υπέρυθρου, 5		
Φασματική Κάλυψη	δίαυλοι)		
Χωρική Ανάλυση	15-90 m		
Χρονική Ανάλυση	16 ημέρες		
Πλάτος Λωρίδας	60 km		

Σχήμα 13 : Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρα ASTER.

Το όργανο τηλεπισκόπησης ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) ευθύνεται για τις εικόνες με την υψηλότερη χωρική ανάλυση που υπάρχουν στο αρχείο του δορυφορικού συστήματος TERRA. Η λειτουργία του ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2000, έναν χρόνο μετά την εκτόξευση του δορυφορικού συστήματος επάνω στο οποίο λειτουργεί. Το ίδιο το όργανο ASTER αποτελείται από τρία υποσυστήματα : το VNIR (Visible Near Infrared, όργανο ορατής εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας), το SWIR (όργανο υπέρυθρης ακτινοβολίας βραχέος μήκους) και το TIR (Thermal Infra-Red, όργανο θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας). Η ικανότητα τους να αλλάζουν γωνίες θέασης και η υψηλή χωρική ανάλυση του οργάνου παρέχουν την δυνατότητα δημιουργίας στερεοσκοπικών εικόνων και λεπτομερών μοντέλων ανύψωσης του εδάφους (NASA, 2003).

Το υποσύστημα VNIR λειτουργεί με τρεις φασματικούς διαύλους (θεωρητικά τέσσερις, καθώς οι εικόνες του διαύλου 3 λαμβάνονται από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες δημιουργώντας έτσι τους ξεχωριστούς διαύλους 3N και 3B) και χωρική ανάλυση 15 m. Αποτελείται από δύο τηλεσκόπια, ένα στραμμένο προς το ναδίρ με ανιχνευτή τριών διαύλων (Δίαυλοι 1,2 και 3N) και ένα στραμμένο προς τα πίσω με ανιχνευτή ενός διαύλου (Δίαυλος 3B). Το υποσύστημα SWIR λειτουργεί με έξι φασματικούς διαύλους και χωρική ανάλυση 30 m. Αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο στραμμένο προς το ναδίρ, με ανιχνευτή έξι διαύλων (Δίαυλοι 4, 5, 6, 7, 8 και 9). Το υποσύστημα TIR λειτουργεί με πέντε φασματικούς διαύλους (Δίαυλοι 10, 11, 12, 13 και 14), χωρική ανάλυση 90 m και ένα τηλεσκόπιο στραμμένο προς το ναδίρ.

Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι για τους οποίους οι εικόνες του οργάνου ASTER δεν επιλέχθηκαν για την μελέτη του αντικειμένου της εργασίας αυτής. Πρώτον, η χωρική ανάλυση του συστήματος φτάνει τα 15 μέτρα με αποτέλεσμα να είναι χαμηλότερη από το επιλεχθέν σύστημα Sentinel-2 (στο οποίο η μέγιστη χωρική ανάλυση φτάνει τα 10 m). Δεύτερον, η χρονική ανάλυση του δορυφόρου TERRA φτάνει τις 16 ημέρες. Αυτό σημαίνει πως ένας πλαστικός στόχος που εντοπίζεται σε μία τοποθεσία, σε συγκεκριμένη ημερομηνία, μπορεί να έχει μετατοπισθεί έως και 3456 km σε τυχαία κατεύθυνση μέχρι την επόμενη φορά που θα ληφθεί εικόνα από την εν λόγω τοποθεσία, κάτι που καθιστά την εξέταση της πορείας του και της πιθανής τοποθεσίας απόθεσής του δυσκολότερη.

Χαρακτηριστικό Μήκος Κύματος (nm)	Δίαυλοι Δορυφορικών Συστημάτων			
	Sentinel-2	Landsat-8	WorldView-3	ASTER
830 (51% Ανακλαστικότητα)	Δίαυλος 8 (785-900 nm)	(Ουδείς)	Δίαυλος 7 (770-895 nm)	Δίαυλοι 3Ν και 3Β (780 - 860 nm)
1160 (53% Ανακλαστικότητα)	(Ουδείς)	(Ουδείς)	(Ουδείς)	(Ουδείς)
1320 (48% Ανακλαστικότητα)	(Ουδείς)	(Ουδείς)	(Ουδείς)	(Ουδείς)
1600 (40% Ανακλαστικότητα)	Δίαυλος 11 (1565-1655 nm)	Δίαυλος 6 (1570 - 1650 nm)	(Ουδείς)	Δίαυλος 4 (1600 - 1700 nm)

Σχήμα 14 : Μήκη κύματος στα οποία τα πλαστικά υλικά παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα και οι δίαυλοι των εξεταζόμενων δορυφορικών συστημάτων που τα εμπεριέχουν στο φάσμα τους. Οι τιμές που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στις κορυφές του διαγράμματος Μήκος Κύματος (nm) – Ανακλαστικότητα (%).

2.4 Τα Δορυφορικά Συστήματα Sentinel

Οι αποστολές των δορυφόρων Sentinel ξεκίνησαν ως μέρος του προγράμματος Copernicus το οποίο διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency – ESA). Η λειτουργία τους επικεντρώνεται στην παρατήρηση των εδαφικών, θαλάσσιων και ατμοσφαιρικών στόχων με την χρήση τεχνολογιών όπως ραντάρ και πολυφασματικών εργαλείων (MSI – Multi Spectral Instrument). Οι δορυφόροι αυτοί έχουν κατασκευαστεί και ρυθμιστεί με αποκλειστικό γνώμονα τις ανάγκες του προγράμματος Copernicus, δηλαδή τον εντοπισμό περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών στον πλανήτη Γη. Κάθε αποστολή Sentinel αποτελείται από ένα ζεύγος δορυφόρων που κινούνται με διαφορά φάσης 180° ώστε να επιτυγχάνεται μειωμένος χρόνος μεταξύ των διαφορετικών "σαρώσεων" κάθε περιοχής. Εκτός της αποστολής Sentinel-2 (η οποία θα αναλυθεί παρακάτω ως η επιλεγμένη πηγή δορυφορικών εικόνων) έχουν τεθεί δύο ακόμη συστήματα δορυφόρων Sentinel σε τροχιά (Sentinel-1, που χρησιμοποιεί σύστημα radar, και Sentinel-3, το οποίο κάνει χρήση πολλαπλών εργαλείων με κύριο σκοπό την παρακολούθηση της θαλάσσιας στάθμης).
2.4.1 Το Δορυφορικό Σύστημα Sentinel-2

Πρόκειται για ένα σύστημα που χρησιμοποιεί παθητικούς δέκτες (βασίζεται δηλαδή στην ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται ή επανεκπέμπεται από την επιφάνειά της Γης) για την δημιουργία πολυφασματικών εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης που έχει σαν κύριο σκοπό την εδαφική παρατήρηση, όπως η απεικόνιση βλάστησης, παράκτιων περιοχών και ενδοχώριων υδάτων (π.χ. ποταμούς και λίμνες).

Οι δορυφόροι του συστήματος Sentinel-2 τέθηκαν σε τροχιά στις 23 Ιουνίου 2015 (Sentinel-2A) και στις 7 Μαρτίου 2017 (Sentinel-2B) με την χρήση διαστημικών οχημάτων τύπου Vega και περί το 2024 σχεδιάζεται η προσθήκη ενός τρίτου δορυφόρου στο σύστημα (Sentinel-2C). Οι δύο δορυφόροι κινούνται σε ίδια τροχιά με διαφορά φάσης 180°, επιτυγχάνοντας έτσι την υψηλή επαναληψιμότητα του συστήματος (3-5 ημέρες περίπου). Το κυριότερο στοιχείο των δορυφόρων αυτών είναι το Πολυφασματικό Εργαλείο (Multi-Spectral Instrument – MSI) που φέρει ο κάθε ένας τους, καθώς σε αυτό οφείλεται η φασματική κάλυψη του συστήματος.

Δίαυλοι Sentinel-2	Μέσο Μήκος Κύματος (nm)	Χωρική Ανάλυση (m)
Δίαυλος 1 - Παράκτια Αερολύματα	443	60
Δίαυλος 2 - Μπλε	490	10
Δίαυλος 3 - Πράσινο	560	10
Δίαυλος 4 - Ερυθρό	665	10
Δίαυλος 5 - Ερυθρό Όριο Βλάστησης	705	20
Δίαυλος 6 - Ερυθρό Όριο Βλάστησης	740	20
Δίαυλος 7 - Ερυθρό Όριο Βλάστησης	783	20
Δίαυλος 8 - Εγγύς Υπέρυθρο	842	10
Δίαυλος 8Α - Ερυθρό Όριο Βλάστησης	865	20
Δίαυλος 9 - Υδρατμοί	945	60
Δίαυλος 10 - Υπέρυθρο Βραχέου Μήκους	1375	60
Δίαυλος 11 - Υπέρυθρο Βραχέου Μήκους	1610	20
Δίαυλος 12 - Υπέρυθρο Βραχέου Μήκους	2190	20

Σχήμα 15 : Δίαυλοι του συστήματος Sentinel-2 και τα χαρακτηριστικά τους.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 15, το σύστημα χρησιμοποιεί 13 διαύλους (bands) με κάλυψη από τα 443 nm (Band 1, Coastal Aerosol) έως και τα 2190 nm (Band 12, Short-Wave Infrared 3), τα εύρη των οποίων κυμαίνονται από το ορατό φάσμα έως το εγγύς υπέρυθρο φάσμα και το φάσμα υπέρυθρων ακτινών βραχέος μήκους. Αυτή η κάλυψη ικανοποιεί τις ανάγκες για καλύτερο εντοπισμό αλλαγών στο εδαφικό ανάγλυφο (έντονη βλάστηση, καταστροφές από πυρκαγιές,

μεταβολή υδάτινων σωμάτων κ.α.) αλλά και την διάκριση σωμάτων σε παράκτιες περιοχές για τους ερευνητικούς σκοπούς της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, οι εικόνες του συστήματος Sentinel-2 χαρακτηρίζονται από υψηλή χωρική ανάλυση σε σχέση με τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα που εξετάστηκαν. Οι δυνατότητες ανάλυσης του είναι στα 60 m (για τους διαύλους 1, 9 και 10), στα 20 m (για τους διαύλους 5, 6, 7, 8A, 11 και 12) και στα 10 m (για τους διαύλους 2, 3, 4 και 8), καθιστώντας μονάχα το σύστημα WorldView-3 ως ισχυρότερο του στον συγκεκριμένο τομέα.

Για την παρακολούθηση πλαστικών ρύπων συγκεκριμένα, η ανάλυση των 10 m σε συνδυασμό με την υψηλή ικανότητα του χρησιμοποιούμενου δείκτη (FDI – Floating Debris Index) να διακρίνει στόχους επιπλεόντων σωμάτων από το θαλάσσιο περιβάλλον επιτρέπει την παρατήρηση τοποθεσιών που αντιστοιχούν σε θαλάσσιες επιφάνειες διαστάσεων 10 m επί 10 m οι οποίες επικαλύπτονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους (≥ 60%) από τους εν λόγω ρύπους. Ταυτόχρονα, οι δίαυλοι του συστήματος Sentinel-2 καλύπτουν τα μήκη κύματος 830 nm και 1600 nm, τα οποία είναι δύο από τα τέσσερα μήκη κύματος στα οποία βρέθηκε πως τα πλαστικά υλικά παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ανακλαστικότητα.

Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δορυφορικά συστήματα που εξετάστηκαν, το πλάτος λωρίδας των δορυφόρων Sentinel-2 (290 km) επιτρέπει ευκολότερη επεξεργασία των εικόνων μεγάλων περιοχών. Αυτό ευνοεί τους σκοπούς των διάφορων ερευνών που χρησιμοποιούν εικόνες Sentinel-2 με το να μην χρειάζονται μεγάλο αριθμό προϊόντων προκειμένου να παρατηρηθεί μια εκτεταμένη περιοχή. Έτσι ελαττώνεται και η απαίτηση για διόρθωση και συνένωση εικόνων.

Ο συνδυασμός του πλάτους λωρίδας με τον χρόνο επανάληψης επιτρέπει στο σύστημα να παρατηρεί πλωτούς στόχους προτού διανύσουν αποστάσεις μεγαλύτερες των 1100 km σε διάστημα 5 ημερών, δεδομένου ότι η μέγιστη καταγεγραμμένη ταχύτητα επιφανειακού θαλάσσιου ρεύματος είναι 2,5 m/sec. Ωστόσο, λόγω της έλλειψης πληροφορίων που παρέχει το σύστημα για τις θαλάσσιες επιφάνειες που απέχουν περισσότερο από 20 km από ακτές, αντιμετωπίζονται δυσκολίες στις περιπτώσεις πλεούμενων ρύπων οι οποίοι παρασύρονται σε ανοιχτές θάλασσες.



Σχήμα 16 : Απεικόνιση της περιοχής της δυτικής Κρήτης από το σύστημα Sentinel-2 (Εικόνα RGB, 2018)

Η ελλιπής ποικιλία σε εικόνες από επιφάνειες ανοιχτής θάλασσας εξηγείται από την γεωγραφική κάλυψη του συστήματος Sentinel-2 η οποία περιλαμβάνει :

- όλες τις ηπειρωτικές χερσαίες επιφάνειες (συμπεριλαμβανομένων των ενδοχώριων υδάτων) μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 56° Νότια και 82,8° Βόρεια
- όλα τα παράκτια ύδατα σε απόσταση έως 20 χλμ. από κάθε ακτή
- όλα τα νησιά με επιφάνεια μεγαλύτερη από 100 km^2
- όλα τα νησιά σε περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- την Μεσόγειο Θάλασσα
- όλες τις κλειστές θάλασσες, όπως η Κασπία Θάλασσα

Η κάλυψη αυτή, αν και δεν ευνοεί έρευνες σε μεσωκεάνια ύδατα (όπως φαίνεται από την Σχήμα 4), παρέχει πρόσβαση σε εικόνες από όλες τις παράκτιες θαλάσσιες επιφάνειες,

επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση των αποθέσεων πλαστικών απορριμμάτων και της πορείας όσων από αυτά «παγιδεύονται» και συσσωρεύονται σε κόλπους και παραλίες.



Σχήμα 17 : Χάρτης ημερών μεταξύ των λήψεων δύο εικόνων Sentinel-2 με μηδενική νεφοκάλυψη. Οι περιοχές χωρίς κάποιο χρώμα από το υπόμνημα (κάτω αριστερά του χάρτη) είναι τοποθεσίες που δεν καλύπτονται συστηματικά από το πλάνο εικονοληψίας του Sentinel-2. (Martin Sudmanns et al., 2019)

Οσον αφορά την επεξεργασία που απαιτείται, η βάση δεδομένων του Sentinel-2 δίνει πρόσβαση σε δύο ειδών προϊόντα, L1C και L2A. Η κατηγορία L1C αναφέρεται σε εικόνες ανάκλασης στις οποίες υπάρχει επιρροή από την ατμόσφαιρα και έχουν δεχθεί γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση. Οι διαστάσεις τους είναι 100 km x 100 km και ο όγκος των δεδομένων τους είναι περίπου 500 MB. Τα προϊόντα αυτά είναι διαθέσιμα από τον κόμβο ανοικτής πρόσβασης του προγράμματος Copernicus στο ευρύ κοινό, χωρίς κάποιο κόστος, και μπορούν να δεχτούν ατμοσφαιρική διόρθωση από το πρόγραμμα επεξεργασίας Sen2Cor προκειμένου να μετατραπούν σε προϊόντα L2A. Τα προϊόντα L2A είναι εικόνες επιφανειακής ανάκλασης οι οποίες χαρακτηρίζονται «δεδομένα έτοιμα προς ανάλυση» (Analysis-Ready Data). Η διόρθωση της ατμοσφαιρικής επιρροής καθιστά αυτή την κατηγορία εικόνων πολύ απλούστερη στην χρήση και την μελέτη. Η διαθεσιμότητά τους είναι σχεδόν η ίδια με τα προϊόντα L1C, με μοναδική διαφορά ότι οι απεικονίσεις της κατηγορίας L2A είναι διαθέσιμες σε μικρότερη ποσότητα για την εκάστοτε τοποθεσία.

Για οποιαδήποτε τροποποίηση ή παρέμβαση, έγινε χρήση του ειδικού λογισμικού το οποίο έχει αναπτυχθεί με κύριο γνώμονα την διευκόλυνση της χρήσης εικόνων των αποστολών Sentinel το οποίο αναλύεται περαιτέρω στην ενότητα 4.

		Χρονική			
Ονομασία Συστήματος	Φασματική Ανάλυση	Ανάλυση	Χωρική Ανάλυση (m)	Γεωγραφική Κάλυψη	Δωρεάν Παροχή Δεδομένων
	430-1380 nm, 10300-				
LANDSAT-8	12500 nm	16 ημέρες	15, 30 και 100	Παγκόσμια Εδαφική	NAI
	400-1040 nm, 1195-				
	2365 nm, 405-2245	1 - 4.5	0.31-0.34, 3.7-4.1, 30-		
WorldView-3	nm	ημέρες	33	90 N, -90 S, -180 W, 180 E	OXI
	520-860 nm, 1600-				
	2430 nm, 8125-11650				
ASTER	nm	16 ημέρες	15 - 90	Παγκόσμια	NAI
	442 - 2102	5.10 (10.00	Όλες τις χερσαίες περιοχές μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 56° Νότια και 82,8°	
Sentinel-2	443 - 2190 nm	5-10 ημέρες	10, 20 kai 60	Βόρεια (βλ. παρ 2.4.1)	NAI

Σχήμα 18 : Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών των τεσσάρων δορυφορικών συστημάτων που διερευνήθηκαν.

3ο Κεφάλαιο Ιστορική Αναδρομή

3.1) Εξέλιξη Δορυφορικών Συστημάτων Γήινης Παρατήρησης

Η χρήση δορυφορικών συστημάτων γήινης παρατήρησης ξεκίνησε από το 1957, με την επιτυχή εκτόξευση του δορυφόρου Sputnik 1 σαν μέρος του Σοβιετικού Διαστημικού Προγράμματος. Ο δορυφόρος μετέδιδε ραδιοκύματα σε συχνότητες 20005 και 40007 MHz (Ralph H. Didlake και Oleg P. Odinets, 2007) και ολοκλήρωνε μία πλήρη περιστροφή γύρω από την Γη σε 96.2 λεπτά. Η λειτουργία του διήρκησε για τρεις εβδομάδες προτού τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω εξάντλησης των πηγών ενέργειάς του (μπαταρίες αργύρου και ψευδαργύρου). Στην διάρκεια αυτών των εβδομάδων, τα σήματα ραδιοκυμάτων που μετέδωσε παρείχαν χρήσιμα δεδομένα σχετικά με την γήινη ιονόσφαιρα (Don P. Mitchell 2007).

Η επόμενη, χρονολογικά, καταγεγραμμένη αποστολή δορυφόρου που βοήθησε στην συλλογή πληροφοριών σχετικά με την Γη είναι του Explorer 1. Ξεκίνησε την 1η Φεβρουαρίου 1958, με τον δορυφόρο να έχει κατασκευαστεί από τα Jet Propulsion Labs των Ηνωμένων Πολιτειών, και έληξε 111 ημέρες αργότερα με την εξάντληση της πηγής ενέργειας του συστήματος. Ο Explorer 1 ολοκλήρωνε μία πλήρη τροχιά γύρω από τον πλανήτη μέσα σε 115 λεπτά, και έφερε 8 όργανα μετρήσεων : 5 θερμοκρασιακούς αισθητήρες, 1 αισθητήρα κοσμικών ακτινών και 2 αισθητήρες μικρομετεωριτών. Χάρη στον αισθητήρα κοσμικών ακτινών, ο δορυφόρος έπαιξε κρίσιμο ρόλο στην ανακάλυψη των Ζωνών Ακτινοβολίας Van Allen (ζώνες παγιδευμένων φορτισμένων σωματιδίων) στο μαγνητικό πεδίο της Γης.

Το πρόγραμμα TIROS (Television Infrared Observation Satellite Program) (NASA, 1960) αποτέλεσε την πρώτη πειραματική προσπάθεια της NASA να διερευνήσει την δυνατότητα παρατήρησης της Γης με την χρήση δορυφορικών συστημάτων. Η αποστολή του TIROS-1, του πρώτου δορυφόρου του προγράμματος, διήρκησε 75 ημέρες (1 Απριλίου – 15 Ιουνίου 1960), κατά τα οποίες ελήφθησαν 23000 φωτογραφίες της γήινης επιφάνειας (παράδειγμα στο σχήμα 19), εκ των οποίων οι 19000 μπόρεσαν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη καιρικών φαινομένων. Ο ίδιος ο δορυφόρος έφερε 2 κάμερες αργής σάρωσης και έναν αισθητήρα ορίζοντα, και ολοκλήρωνε μια πλήρη περιστροφή μέσα σε 99.16 λεπτά.



Σχήμα 19 : Μία από τις πρώτες απεικονίσεις της Γης από δορυφορικό σύστημα. (TIROS-1, 1960)

Δώδεκα χρόνια αργότερα από την εκτόξευση του συστήματος TIROS-1 τίθεται σε λειτουργία ο Δορυφόρος Τεχνολογίας Γήινων Πόρων (Earth Resources Technology Satellite - ERTS), σαν μέρος του προγράμματος LANDSAT (NASA και USGS, 1972). Στόχος της αποστολής του δορυφόρου είναι η συλλογή πληροφοριών σχετικά με δασικούς και γεωλογικούς πόρους καθώς και η παρατήρηση θαλάσσιων επιφανειών και μετεωρολογικών φαινομένων. Η ονομασία του άλλαξε μετά την εκτόξευσή του σε LANDSAT-1, με τους επόμενους δορυφόρους του προγράμματος να ονομάζονται ανάλογα (LANDSAT-2, LANDSAT-3, και ούτω καθεξής). Ο LANDSAT-1 είναι ο πρώτος δορυφόρος που μετέφερε πολυφασματικό σαρωτή, ένα όργανο γραμμικής σάρωσης που παρατηρεί την Γη κάθετα στην τροχιακή διαδρομή. Χάρη σε αυτό το όργανο, το δορυφορικό σύστημα παρείχε πληροφορίες σε τέσσερις διαύλους (Opató Πράσινο (500 – 600 nm), Opató Epuθρό (600 – 700 nm), και δύο διαύλους Eγγύς Yπέρυθρου (700 – 800 nm και 800 – 1100 nm)). Επιπλέον, έκανε χρήση ενός vidicon (λυχνία κάμερας που βασίζεται στην φωτοαγωγιμότητα) για ακτίνες επιστροφής, με το οποίο δημιουργούσε εικόνες δεδομένων με διόρθωση ραδιομετρικών και γεωμετρικών σφαλμάτων. Οι δίαυλοι στους οποίους παρείχε δεδομένα το vidicon ήταν Opató Mπλε - Πράσινο (475 – 575 nm), Opató Πορτοκαλί-Ερυθρό (580 – 680 nm) και Opató Eρυθρό Έως Εγγύς Υπέρυθρο (690 – 830 nm). Όλες οι εικόνες του συστήματος είχαν χωρική ανάλυση 80 m, η χρονική του ανάλυση ήταν 18 ημέρες και ο χρόνος περιόδου του ήταν 103 λεπτά ή 14 περιφορές ανά ημέρα (usgs.gov, 2011).

Το πρόγραμμα Copernicus έθεσε σε τροχιά τον πρώτο του δορυφόρο με στόχο την παρατήρηση θάλασσας και εδάφους (European Space Agency, 2014). Ο δορυφόρος αυτός ονομάζεται Sentinel-1A, είναι ο πρώτος του συστήματος Sentinel-1 και ξεκίνησε την λειτουργία του στις 23 Απριλίου 2014. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με ραντάρ συνθετικού ανοίγματος διαύλου C (37474057 - 74948115 nm), το οποίο χρησιμοποιεί την πρόσω κίνηση του συστήματος και το φαινόμενο Doppler για να δημιουργήσει μία κεραία μεγάλου μεγέθους (Μερτίκας, 2009). Τα δεδομένα που συλλέγει το σύστημα αποθηκεύονται με ρυθμό 640 Mbit/s σε συγχρονισμένη δυναμική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (synchronous dynamic random access memory – SDRAM) χωρητικότητας 1443 Gbit. Ο δορυφόρος Sentinel-1 σχεδιάστηκε και εκτοξεύτηκε με αναλώσιμα είδη επαρκή για δώδεκα έτη λειτουργίας, έχει χρονική ανάλυση 12 ημερών και χρόνο περιόδου 98.6 λεπτών. Στις 25 Απριλίου του 2016 προστέθηκε και ο δορυφόρος Sentinel-1B στο σύστημα, ο οποίος είχε παρόμοια χαρακτηριστικά με τον Sentinel-1A. Οι δύο δορυφόροι λειτούργησαν συνεργατικά μέχρι τις 23 Δεκεμβρίου 2021, όπου ο Sentinel-1B παρουσίασε βλάβη, λόγω της οποίας σημειώθηκε απώλεια δυνατότητας μετάδοσης δεδομένων του συγκεκριμένου δορυφόρου (ESA, 2022).

3.2) Μέθοδοι Παρακολούθησης Συγκεντρώσεων Επιθαλάσσιων Πλαστικών Ρύπων

Οι πρώτες έρευνες σχετικά με την εξάπλωση πλαστικών ρύπων στους ωκεανούς έγιναν μέσα στην δεκαετία 1970 με 1980 (Carpenter και Law, 1972). Το 1986 πραγματοποιήθηκε οργανωμένη περισυλλογή πλαστικών απορριμμάτων στον βόρειο Ατλαντικό από πλοιάριο εξοπλισμένο με δίχτυα, κατά την οποία έγινε μέτρηση του αριθμού των τεμαχίων που ήταν δυνατό να κατακρατηθούν από τον εξοπλισμό του σκάφους. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στην δημιουργία του πρώτου συνόλου πληροφοριών σχετικά με την θαλάσσια πλαστική μόλυνση της περιοχής (Law, 2010). Η κύρια μέθοδος που ακολουθούταν από τις πρώτες απόπειρες εκτίμησης της εξάπλωσης πλαστικών ρύπων στην θαλάσσια επιφάνεια ήταν μια από τις δύο

εξής : Συλλογή και μέτρηση μικρών πλαστικών αντικειμένων (μικροπλαστικά, <5mm στην μεγαλύτερη διάστασή τους) σε επιφανειακά δίχτυα ή οπτική παρατήρηση μεγάλων τεμαχίων (μάκροπλαστικά, >20 mm στην μεγαλύτερη διάστασή τους) σε περιοχές αλιείας και ακτές.

Το 1996 γίνεται η ανακάλυψη της Μεγάλης Πλαστικής Νήσου από τον Charles Moore, με οπτική παρατήρηση από θαλάσσιο σκάφος, ο οποίος δημοσιεύει το 2001 την πρώτη αναφορά σχετικά με την συγκέντρωση μεγάλων όγκων πλαστικού στο κέντρο του υποτροπικού στροβίλου του Βόρειου Ειρηνικού.

Η μέθοδος οπτικής παρατήρησης από θαλάσσιο σκάφος που χρησιμοποιήθηκε κατά τις προαναφερθείσες έρευνες επιτρέπει τον εντοπισμό και την κατηγοριοποίηση των επιπλεόντων πλαστικών αντικείμενων χωρίς να υπάρχει επιρροή από το παραλιακό περιβάλλον. Τέτοιου είδους επιρροή περιλαμβάνει :

- Την ανάμιξη ρύπων που αποτέθηκαν άμεσα στην παραλία με τους επιθαλάσσιους ρύπους που αποτέθηκαν σε παραλίες από τις παλίρροιες. Αυτό το φαινόμενο δυσχεραίνει τον διαχωρισμό των ρύπων θαλάσσιων σκαφών από τους ρύπους της ξηράς.
- Ταφή μέρους των ρύπων εντός του αμμώδους εδάφους και την συλλογή των ρύπων από τοπικές κοινότητες. Η συγκεκριμένη δυσκολία ελαττώνει τους ρύπους που είναι άμεσα ορατοί, και παρατηρείται κυρίως σε ακτές που χρησιμοποιούνται για σκοπούς ψυχαγωγίας.

Επιπλέον, η οπτική παρατήρηση από θαλάσσιο σκάφος, προσφέρει την δυνατότητα άμεσης αναγνώρισης της φθοράς που προκαλείται από τους υπό μελέτη ρύπους στο θαλάσσιο περιβάλλον, δίνοντας έτσι μια πληρέστερη εικόνα της σημασίας του ελέγχου και της συλλογής τους.

Ωστόσο, σε ότι αφορά την ικανότητα της συγκεκριμένης μεθόδου να αντιλαμβάνεται όλα τα διαφορετικά δείγματα πλαστικών απορριμμάτων, υπάρχουν αξιοσημείωτες ελλείψεις. Η μέθοδος φέρει το ρίσκο του «ανθρώπινου σφάλματος», δηλαδή της πιθανότητας των παρατηρητών να αμελήσουν ή να παραβλέψουν κάποια τεμάχια ή κάποιες ποσότητες τεμαχίων, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψιν η μερική βύθιση ποσοστού των στόχων παρατήρησης. Λόγω των παραβλέψεων αυτών, τα καταγεγραμμένα δείγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μια γενικότερη εικόνα της κατάστασης μίας συγκέντρωσης πλαστικών στόχων αλλά όχι για να δοθεί μία ακριβής κατανομή των μεγεθών των επί μέρους τεμαχίων. Ακόμα και χωρίς να υπήρχε ο παράγοντας του ανθρώπινου σφάλματος, τα θαλάσσια ρεύματα και η έκθεση των πλαστικών υλικών στην τοπική πανίδα δυσκολεύουν την αναγνώριση των αρχικών μεγεθών των τεμαχίων που έχουν συλλεχθεί. Αυτό συμβαίνει λόγω της καταστροφής των τεμαχίων από την τοπική πανίδα και του διασκορπισμού των υπολειμμάτων από τα υπάρχοντα ρεύματα.

Παράλληλα με την μέθοδο της οπτικής παρατήρησης από θαλάσσιο σκάφος, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος οπτικής παρατήρησης παραλιακών ρύπων. Πριν το 2011 η συγκεκριμένη μέθοδος αντιμετώπιζε πρόβλημα σχετικά με την δυνατότητα σύγκρισης των μετρήσεων μεταξύ ερευνητικών ομάδων, καθώς δεν υπήρχε προκαθορισμένος τρόπος διεξαγωγής τους. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την διεξαγωγή ερευνών των οποίων τα αποτελέσματα δεν ήταν συγκρίσιμα μεταξύ τους επειδή τα μεγέθη που χρησιμοποιούσε το κάθε ένα για να περιγράψει την εξάπλωση των πλαστικών ρύπων σε μία επιλεγμένη περιοχή δεν μπορούσαν να συσχετιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να γίνει μετατροπή του ενός μεγέθους στο άλλο (οι συνηθέστερες περιπτώσεις ήταν η χρήση της συνολική μάζας των πλαστικών ρύπων).

Κατά την υλοποίηση του σχεδίου MARLIN (FEE Latvia et al., 2011-2013), έγινε στοχευμένη προσπάθεια στην συλλογή πληροφοριών σχετικά με τους παραλιακούς πλαστικούς ρύπους στην Βαλτική Θάλασσα οι οποίες χρησιμοποιούν κοινά μεγέθη και καταγράφονται μέσα από μία τυποποιημένη διαδικασία μελέτης πεδίου.

Σαν κύριο βήμα, η μέθοδος προέβλεπε τον χωρισμό της υπό μελέτη ακτής σε τρεις ζώνες κάθετα στο μήκος της ακτής : η πρώτη ζώνη αποτελείται από μία λωρίδα πάχους 10 m στην οποία μετρούνται οι ποσότητες των μικρότερων πλαστικών τεμαχίων (<2,5 cm στην μεγαλύτερη διάστασή τους), η δεύτερη ζώνη αποτελείται από μία λωρίδα πάχους 100 m, στην οποία μετρούνται οι ποσότητες μεγαλύτερων τεμαχίων πλαστικού (2,5-50 cm στην μεγαλύτερη διάστασή τους) και η τρίτη ζώνη, η οποία αποτελείται από μία λωρίδα πάχους 1 χιλιομέτρου και αποτελεί την περιοχή στην οποία μετρούνται μονάχα τα μεγαλύτερα τεμάχια ανάμεσα στους συνολικούς ρύπους (>50 cm στην μεγαλύτερη διάστασή τους).



Σχήμα 20 : Σχεδιάγραμμα της μεθόδου MARLIN (IVL Swedish Environmental Research Institute, 2018)

Στις 21 Οκτωβρίου 2019 πραγματοποιήθηκε θεωρητική έρευνα (Victor Martinez-Vicente et al., 2019) η οποία πραγματεύεται την δυνατότητα να επιτευχθεί παρατήρηση πλαστικών επιθαλάσσιων ρύπων μέσω μεθόδων τηλεπισκόπησης, επικεντρώνοντας στην χρήση δορυφορικών συστημάτων. Στην έρευνά αυτή, εξηγείται η δυνατότητα ανίχνευσης πλαστικών στόχων με την χρήση φασματοσκοπίας που εστιάζει στα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (near infrared) και το φάσμα υπέρυθρων βραχέος μήκους (short-wave infrared). Η δυνατότητα αυτή υφίσταται εφόσον οι στόχοι που ανιχνεύονται βρίσκονται σε παράκτιο περιβάλλον και όχι στην ανοικτή θάλασσα, λόγω της μεγαλύτερης χρονικής μεταβλητότητας που παρουσιάζουν οι έλεγχοι σε αντικείμενα που επιπλέουν στην ανοιχτή θάλασσα.

Το 2020 πραγματοποιήθηκε επιτυχημένη παρακολούθηση πλεούμενων πλαστικών στόχων με την χρήση του δορυφορικού συστήματος Sentinel-2 (Lauren Biermann et al., 2020). Όπως περιγράφεται στο κείμενο του άρθρου που αναφέρεται σε αυτήν την διαδικασία, αυτό που κατέστησε δυνατή την επιτυχία αυτής της έρευνας ήταν τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος Sentinel-2, καθώς τα υπόλοιπα συστήματα που είχαν ελεγχθεί παρουσίαζαν κάποια έλλειψη στις απαιτούμενες ικανότητες παρατήρησης. Οι ελλείψεις αυτές εντοπίστηκαν στην χωρική ανάλυση, την χρονική ανάλυση και των αριθμό των φασματικών διαύλων. Σαν μέρος της εν λόγω έρευνας αναπτύχθηκε ένας δείκτης (συνάρτηση των τιμών των εικονοστοιχείων μιας εικόνας σε διαφορετικούς διαύλους) ο οποίος αυξάνει την διακριτότητα εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε θέσεις πλεούμενων πλαστικών στόχων. Ο δείκτης ονομάζεται Floating Debris Index (Δείκτης Πλεούμενων Απορριμμάτων) και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

4º Κεφάλαιο Μεθοδολογία

Η διαδικασία επιλογής και επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων του συστήματος Sentinel-2 γίνεται με κύρια κριτήρια τις πληροφορίες από εξωτερικές πηγές για την ύπαρξη ή μη στόχων ενδιαφέροντος, την νεφοκάλυψη, τα πιθανά σφάλματα κατά τη λήψη της εικόνας και το είδος του προϊόντος.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη επεξεργασία για κάθε εικόνα μέσω του λογισμικού SN.A.P., η οποία περιλαμβάνει σαν κύρια βήματα την ατμοσφαιρική διόρθωση, την επαναδειγματοληψία, την μάσκα ξηράς και την εφαρμογή των δεικτών FDI (Floating Debris Index - Δείκτης Πλεούμενων Απορριμμάτων) και NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης).

4.1 Αναζήτηση και Επιλογή Δορυφορικών Εικόνων

Δεδομένης της ευρείας κάλυψης του συστήματος Sentinel-2 (γεωγραφικά πλάτη 84° νότια και 84° βόρεια), υπήρχαν ελάχιστοι περιορισμοί από μεριάς του χρησιμοποιούμενου μέσου. Για αυτό χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτο κριτήριο επιλογής εικόνων οι πληροφορίες από εξωτερικές πηγές (άρθρα περί οικολογικών θεμάτων, εργασίες και μελέτες σχετικά με την εξάπλωση πλαστικών απορριμμάτων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες). Αυτό οδήγησε στην διερεύνηση δύο κατηγοριών εικόνων : τοποθεσίες γνωστών θέσεων στόχων (περιοχές για τις οποίες δίνονται ακριβή στοιχεία για την θέση πλεούμενων πλαστικών ρύπων σε συγκεκριμένες ημερομηνίες) και τοποθεσίες άγνωστων στόχων (περιοχές για τις οποίες δίνονται ακριβή στοιχεία για την θέση πλεούμενων πλαστικών ρύπων σε συγκεκριμένες ημερομηνίες) και τοποθεσίες άγνωστων στόχων (περιοχές για τις οποίες υπάρχουν αναφορές σχετικά με την εμφάνιση πλαστικών ρύπων σε συγκεκριμένες ημερομηνίες αλλά η ακριβής θέση των πλαστικών στόχων δεν είναι γνωστή.). Να σημειωθεί πως όλες οι εικόνες είχαν υποστεί γεωμετρικές διορθώσεις με βάση ένα παγκόσμιο ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου χωρικής ανάλυσης 90 m (PlanetDEM90).

Ως δεύτερο κριτήριο τέθηκε η νεφοκάλυψη που επικρατεί σε κάθε εικόνα, η οποία θεωρήθηκε επαρκώς χαμηλή σε ποσοστά <15% με εξαίρεση τις περιπτώσεις στις οποίες τα νέφη ήταν συγκεντρωμένα επί της τοποθεσίας ενδιαφέροντος. Περαιτέρω μείωση του αποδεκτού ποσοστού νεφοκάλυψης οδηγούσε σε πολύ μικρότερη επιλογή εικόνων από το αρχείο του Sentinel-2, στις οποίες δεν εμφανίζονταν οι περιοχές των πηγών της πρώτης κατηγορίας (γνωστές θέσεις στόχων). Από την κατηγορία εικόνων με γνωστές θέσεις στόχων, βρέθηκαν έγκυρες πηγές για τις περιοχές του Ντουρμπάν (Durban, Nότια Αφρική), στην οποία υπήρξε υπερχείλιση μεγάλων όγκων πλαστικών ρύπων το τριήμερο 24-26 Απριλίου 2019 στην τοποθεσία του λιμένα (SABC Radio, 2019) και της Μυτιλήνης, στην οποία διεξήχθη πείραμα κατά το οποίο τοποθετήθηκαν πλαστικοί στόχοι γνωστών διαστάσεων στην θαλάσσια περιοχή 30 km από την παραλία Τσαμάκια (Τοπουζέλης et al., 2022). Κατά τον έλεγχο των διαθέσιμων εικόνων που περιέχουν τις παραπάνω περιοχές βρέθηκε πως εκείνες που αντιστοιχούσαν στην περιοχή ενδιαφέροντος της πόλης Ντουρμπάν παρουσίαζαν πολύ υψηλή νεφοκάλυψη (>30%) η οποία απέκρυπτε σχεδόν εξ' ολοκλήρου την περιοχή έρευνας. Αντίθετα, η εικόνα που δημιουργήθηκε κατά την ημερομηνία του πειράματος στην Μυτιλήνη παρουσιάζει ικανή ευκρίνεια (νεφοκάλυψη <9%), με αποτέλεσμα να προτιμηθεί. Καμία από τις προαναφερθείσες εικόνες δεν παρουσίαζαν κάποιο σφάλμα κατά την λήψη τους, και βρέθηκαν όλες σε μορφή προϊόντος L2A (προϊόντα στα οποία έχει εφαρμοστεί ατμοσφαιρική διόρθωση, η σημασία της οποίας αναλύεται στην παράγραφο 4.3.1).

Από την κατηγορία εικόνων τοποθεσιών άγνωστων στόχων υπήρξε μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών, οπότε εφαρμόστηκαν πιο αυστηρά κριτήρια σε σχέση με τις εικόνες τοποθεσιών γνωστών στόχων. Το αποδεκτό ποσοστό νεφοκάλυψης ορίστηκε ως < 9% (σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία στην οποία μία εικόνα με νεφοκάλυψη ≤ 15% θα μπορούσε να θεωρηθεί αποδεκτή εφόσον η περιοχή περί των γνωστών στόχων ήταν διακριτή) και η επιλογή προϊόντων μορφής L1C, στα οποία δεν έχει εφαρμοστεί αυτόματη ατμοσφαιρική διόρθωση, αποκλείστηκε. Ο τελευταίος περιορισμός τέθηκε επειδή οι συγκεκριμένες εικόνες απαιτούν έρευνα σε όλη την έκταση τους, και η εφαρμογή ατμοσφαιρικής διόρθωσης καθολικά σε κάθε μία από αυτές θα πρόσθετε ώρες επεξεργασίας.

Οι αρχικές έρευνες έγιναν στις περιοχές της επονομαζόμενης Μεγάλης Πλαστικής Νήσου του Ειρηνικού (Great Pacific Garbage Patch), η οποία αναγνωρίζεται ως η μεγαλύτερη εκ των νήσων πλαστικού της περιοχής. Το προϊόντα του Sentinel-2 που απεικονίζουν την περιοχή δεν απέδωσαν επαρκή ευκρίνεια στις θέσεις των εξαπλωμένων πλαστικών λόγω νεφοκάλυψης, μικρού μεγέθους μεγάλου ποσοστού (94%) των πλαστικών τεμαχίων και διαφορετικά επίπεδα βύθισης των ίδιων.

Στην συνέχεια ερευνήθηκαν τοποθεσίες σε ακτές της Ινδονησίας οι οποίες αποτέλεσαν θέμα κάλυψης οικολογικών άρθρων την περίοδο του 2018 με 2019. Στην αυτή την περίπτωση ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί η ευρύτερη περιοχή στην οποία αναφερόταν κάθε άρθρο, αλλά ήταν δυσκολότερο να βρεθούν εικόνες που δημιουργήθηκαν κατά τις συγκεκριμένες ημερομηνίες που αναφέρονταν, ειδικά όταν συνυπολογίζονταν τα κριτήρια επιλογής τους. Τελικώς,

βρέθηκαν δύο εικόνες της νήσου Τούντα (Tunda, Ινδονησία) οι οποίες διερευνήθηκαν και δεν παρουσίασαν θετική ανταπόκριση στην ύπαρξη πλαστικών απορριμμάτων, τουλάχιστον σε ότι αφορά τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

Η τελευταία τοποθεσία που διερευνήθηκε είναι η παραλία Binh Lap στο Βιετνάμ, στην οποία έγιναν έρευνες σχετικά με την συγκέντρωση πλαστικών απορριμμάτων και του βαθμού διαχείρισης τους (Thu-Tang T. Nguyen et al., 2022). Η συγκεκριμένη τοποθεσία παρουσίασε υψηλή συγκέντρωση πλαστικών ρύπων (18.99 αντικείμενα/m²). Με αναζήτηση στο αρχείο εικόνων του Sentinel-2, εντοπίστηκαν προϊόντα του συστήματος τα οποία εμπεριέχουν πλήρως την περιοχή, παρουσιάζουν ελάχιστη νεφοκάλυψη και, κατόπιν επεξεργασίας, είχαν θετική ανταπόκριση στην αναζήτηση επιθαλάσσιων πλαστικών ρύπων.

Με το πέρας της διαδικασίας αναζήτησης, είχαν επιλεχθεί μία εικόνα από την περιοχή της Μυτιλήνης, ως τοποθεσία γνωστών στόχων, και μία από την παραλία Binh Lap, ως τοποθεσία άγνωστων στόχων.

4.2 Λογισμικό Επεξεργασίας (SeNtinel Application Platform – SN.A.P.)

Για την επεξεργασία των εικόνων που επιλέχθηκαν προτιμήθηκε το λογισμικό SN.A.P. το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), την ίδια υπηρεσία υπό την εποπτεία της οποίας βρίσκονται τα δορυφορικά συστήματα Sentinel. Ως εκ τούτου, το λογισμικό αυτό παρουσιάζει συμβατότητα με εικόνες του συστήματος Sentinel-2, διευκολύνοντας έτσι την διαδικασία επεξεργασίας και προσαρμογής τους στις ανάγκες της έρευνας που διεξήχθη. Ως επιπλέον πλεονέκτημα, η διαθεσιμότητα του λογισμικού είναι ελεύθερη προς το ευρύ κοινό, χωρίς οικονομικές επιβαρύνσεις και χωρίς περιορισμούς στις διαδικασίες που μπορεί να πραγματοποιήσει.

Οι δυνατότητες που παρέχει το SN.A.P. εμπεριέχουν βασικές εφαρμογές όπως ατμοσφαιρική διόρθωση, απομόνωση περιοχής ενδιαφέροντος, επαναδειγματοληψία και εφαρμογή μασκών αλλά και πιο πολύπλοκες διαδικασίες, όπως προκαθορισμένες αλυσίδες επεξεργασίας και την διαχείριση διαφορετικών επιπέδων (layers) εικόνας.

Μέσα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι κύριες διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η επαναδειγματοληψία, η εφαρμογή μάσκας, οι πράξεις μεταξύ διαύλων και, σε μικρότερο βαθμό, η ατμοσφαιρική διόρθωση.



Σχήμα 21 : Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού SN.A.P. (Version 8.0)

4.3 Διαδικασία Επεξεργασίας Εικόνων

4.3.1 Ατμοσφαιρική Διόρθωση

Η ηλιακή ακτινοβολία, στην οποία βασίζεται η λειτουργία του συστήματος Sentinel-2, επηρεάζεται εντόνως κατά την διαδρομή της εν μέσω της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να αλλοιώνει το σήμα που καταφθάνει στον δέκτη (αισθητή θολερότητα, ελάττωση της αντίθεσης) (βλ. 1.3). Οι αλλοιώσεις αυτές παρατηρούνται σε μεγαλύτερο βαθμό στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο φάσμα, τα οποία συμμετέχουν αμφότερα στην συνολική διαδικασία εντοπισμού πλαστικών απορριμμάτων σε θαλάσσιες επιφάνειες. Έτσι, η εφαρμογή αποτελεσματικής ατμοσφαιρικής διόρθωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της έρευνας στις επιλεγμένες εικόνες.

Η πλατφόρμα SN.A.P. δίνει την δυνατότητα εφαρμογής ατμοσφαιρικής διόρθωσης εικόνων Sentinel-2 με την εργαλειοθήκη Sen2Cor, η οποία λειτουργεί με βάση έναν αλγόριθμο που προτάθηκε για την Ατμοσφαιρική/Τοπογραφική Διόρθωση σε Δορυφορικές Εικόνες (Atmospheric/Topographic Correction of Satellite Imagery – ATCOR) (Richter και Schlaepfer, 2011) και πραγματοποιεί διορθώσεις των ατμοσφαιρικών επιρροών με τρόπο παρόμοιο του μοντέλου μεταφοράς ακτινοβολίας LIBRADTRAN (Mayer και Kylling, 2005). Για την δημιουργία χάρτη τοπογραφικών διορθώσεων A(x,y) η μορφή του αλγορίθμου είναι η εξής :

$$A(x,y) = \frac{\cos(\theta_s) + \frac{C}{h_0}}{\cos(\beta(x,y)) + \frac{C * h(x,y)}{h_0}}$$

Όπου :

- $θ_s = γωνία ηλιακού ζενίθ$
- C = κλίση / τομή
- $h = 1 (\chi \alpha \rho \tau \eta \varsigma \kappa \lambda \delta \sigma \eta \varsigma / \pi)$
- β = γωνία φωτισμού

$$\rho(x, y) = \frac{\pi * L_s(x, y, z) * A(x, y)}{T(x, y, z) * \{E_{dir} * \cos(\theta)_s + E_{dif}(x, y, z)\}}$$

Όπου :

- $L_s = \epsilon \pi i \varphi a \nu \epsilon i a \kappa \tau i \nu o \beta o \lambda i a$
- Τ = συνολική μετάδοση αισθητήρα-εδάφους
- $E_{dir} =$ άμεση ακτινοβολία (direct radiance)
- $E_{dif} = \delta_{ia}$ διάχυτη ηλιακή ροή (diffused solar flow)

Αυτό επιτρέπει την αφαίρεση των επιδράσεων της ατμόσφαιρας από εικόνες κατηγορίας L1C (εικόνες τέτοιας κατηγορίας ερευνήθηκαν κατά την αναζήτηση και επιλογή εικόνων).

4.3.2 Επαναδειγματοληψία (Resampling)

Η εφαρμογή πράξεων μεταξύ διαύλων είναι απαραίτητη για την χρήση των δεικτών οι οποίοι κάνουν δυνατή την διάκριση των επιθαλάσσιων πλαστικών ρύπων. Για να είναι δυνατές οι πράξεις αυτές θα πρέπει η υπό επεξεργασία εικόνα να μετατραπεί από προϊόν πολλαπλών μεγεθών (multi-size product, εικόνα της οι οποίας οι δίαυλοι έχουν διαφορετικά επίπεδα χωρικής ανάλυσης) σε προϊόν ενός μεγέθους (single-size product, εικόνα των οποίων οι δίαυλοι έχουν το ίδιο επίπεδο χωρικής ανάλυσης).

Η μετατροπή αυτή είναι δυνατή μέσω της διαδικασίας της επαναδειγματοληψίας (ή επανάληψη της δειγματοληψίας), η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των νέων τιμών των αποχρώσεων του γκρι για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας μετά την εφαρμογή όλων των

απαραίτητων διορθώσεων. Η διαδικασία της επαναδειγματοληψίας επιτυγχάνεται με τρεις διαφορετικές τεχνικές (Μερτίκας, 2009) :

- Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου, μία διαδικασία κατά την οποία η τιμή του εκάστοτε εικονοστοιχείου αντικαθίσταται με εκείνη του πλησιέστερου σημείου της αρχικής εικόνας (δηλαδή πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε διόρθωσης).
- Η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής, στην οποία χρησιμοποιούνται 4 τιμές αποχρώσεων του γκρι από εικονοστοιχεία περιμετρικά του υπό αντικατάσταση στοιχείου.
- Η μέθοδος της κυβικής παρεμβολής, όπου οι 16 πλησιέστερες αρχικές τιμές απόχρωσης
 του γκρι χρησιμοποιούνται για τον ορισμό της τελικής τιμής ενός εικονοστοιχείου.

Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους προσφέρει διαφορετικά προτερήματα και παρουσιάζει διαφορετικά μειονεκτήματα στην περίπτωση κάθε εικόνας και τον σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται η εικόνα. Για τους σκοπούς της ανίχνευσης πλαστικών ρύπων σε παράκτιες περιοχές, προτιμήθηκε η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου για δύο κυρίως λόγους :

a) Είναι σημαντική η διατήρηση των αρχικών τιμών της εικόνας στον μεγαλύτερο δυνατό
 βαθμό, καθώς η αλλοίωσή τους μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολία στον εντοπισμό στόχων.

β) Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί πολύ μικρότερη υπολογιστική ισχύ από τις άλλες δύο (έως και 10 φορές μικρότερη από την μέθοδο κυβικής παρεμβολής), με αποτέλεσμα να επιτρέπει την εφαρμογή επαναδειγματοληψίας σε μεγαλύτερες περιοχές ενδιαφέροντος χωρίς να αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος επεξεργασίας.

Η εφαρμογή της επαναδειγματοληψίας με την μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου στις εικόνες που διερευνήθηκαν έγινε μέσω του λογισμικού SN.A.P.. Ο στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η ρύθμιση των εικόνων όλων των διαύλων ώστε να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση καθώς και ο επαναϋπολογισμός των αποχρώσεων του γκρι ώστε να καταλαμβάνουν τα κέντρα του ιστού της εικόνας. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης έρευνας, η χωρική ανάλυση που προτιμήθηκε είναι αυτή των 10 m.

4.3.3 Μάσκα Ξηράς

Όταν πραγματοποιείται έρευνα σε θαλάσσιες περιοχές, οι επιφάνειες ξηράς αντιστοιχούν σε τιμές οι οποίες αλλάζουν το εύρος του συνόλου των τιμών της επεξεργασμένης εικόνας, καθιστώντας πιο δύσκολο να διακριθούν τα εικονοστοιχεία που περιέχουν τους επιθυμητούς στόχους. Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με την εφαρμογή της κατάλληλης μάσκας.

Η εφαρμογή μάσκας για τον διαχωρισμό των εικονοστοιχείων ξηράς από τα εικονοστοιχεία θάλασσας πρόκειται για μία πράξη πολλαπλασιασμού εικόνων. Αρχικά, τίθεται ένα όριο διαχωρισμού το οποίο διακρίνει ένα εικονοστοιχείο ξηράς από ένα εικονοστοιχείο θάλασσας. Όταν η ακτινοβολία που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της εικόνας ανήκει στο υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τότε, λόγω της υψηλής απορρόφησης αυτών των ακτινών από τα θαλάσσια ύδατα, συνηθίζεται να ορίζεται τιμή κατωφλιού η οποία είναι υψηλότερη από κάθε τιμή εικονοστοιχείου θάλασσας και χαμηλότερη από κάθε εικονοστοιχείου ξηράς. Έπειτα, δημιουργείται δυαδική εικόνα με την τιμή 0 σε κάθε εικονοστοιχείο του οποίου η τιμή αντιστοιχεί σε περιοχή ξηράς και την τιμή 1 σε κάθε εικονοστοιχείο του οποίου η τιμή αντιστοιχεί σε περιοχή βαλασσας (ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με χρήση της τιμής κατωφλιού που ορίστηκε). Η δυαδική εικόνα πολλαπλασιάζεται με την αρχική εικόνα, με αποτέλεσμα οι τιμές των εικονοστοιχείων ξηράς να μηδενίζονται ενώ οι τιμές των εικονοστοιχείων θάλασσας να παραμένουν ίδιες. Δεδομένου ότι και οι δύο κύριες εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσώπευαν παράκτιες τοποθεσίες με στοιχεία ξηράς να καταλαμβάνουν ένα μέρος του συνόλου, η εφαρμογή μάσκας κρίθηκε απαραίτητη.



Σχήμα 22 : Εικόνα του διαύλου B11 από την περιοχή του λιμένα της Μυτιλήνης πριν την εφαρμογή μάσκας ζηράς, με το αντίστοιχο διάγραμμα ιστογράμματος. Στον άζονα x του διαγράμματος έχουν τοποθετηθεί οι τιμές της ανακλαστικότητας στα μήκη κύματος του διαύλου B11 (π.χ. 0.025 = ανάκλαση του 2.5% της συνολικής ακτινοβολίας) που εμφανίζονται στην εικόνα (αντιπροσωπεύονται από τις διάφορες αποχρώσεις του γκρι) ενώ στον άζονα y αντιστοιχει ο αριθμός των pixel στα οποία εμφανίζεται κάθε τιμή ανακλαστικότητας.



Σχήμα 23: Εικόνα του διαύλου B11 από την περιοχή του λιμένα της Μυτιλήνης μετά την εφαρμογή μάσκας ζηράς, με το αντίστοιχο διάγραμμα ιστογράμματος. Στον άζονα x του διαγράμματος έχουν τοποθετηθεί οι τιμές της ανακλαστικότητας στα μήκη κύματος του διαύλου B11 (π.χ. 0.0125 =ανάκλαση του 1.25% της ακτινοβολίας) που εμφανίζονται στην εικόνα (αντιπροσωπεύονται από τις διάφορες αποχρώσεις του γκρι) ενώ στον άζονα y αντιστοιχει ο αριθμός των pixel στα οποία εμφανίζεται κάθε τιμή ανακλαστικότητας.

Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το ιστόγραμμα εικόνας του SN.A.P. (Σχήματα 22 και 23). Μέσω αυτού, παρατηρήθηκε ότι οι περιοχές ξηράς παρουσίαζαν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στα μήκη κύματος τους διαύλου 11 (Band 11, Short-Wave Infrared, 1610 nm) του συστήματος Sentinel-2, συγκεκριμένα μεγαλύτερη του 3,75%, σε σχέση με την αντίστοιχη των ψηφίδων θάλασσας οι οποίες απορροφούσαν τα συγκεκριμένα μήκη πολύ ισχυρότερα (Σχήμα 24). Έτσι, με βάση την ανισότητα B11 < 0.0375 (δηλαδή εμφάνιση μόνο των εικονοψηφίων στα οποία υπάρχει ανακλαστικότητα μικρότερη του 3.75% στα μήκη κύματος του διαύλου B11) η οποία προστέθηκε στην ιδιότητα 'συνάρτηση αποδεκτού εικονοστοιχείου' (valid pixel expression) των διαύλων που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε η απομόνωση των ψηφίδων της θαλάσσιας επιφάνειας.



Σχήμα 24 : Αναπαράσταση της ανακλαστικότητας ζηρής βλάστησης (μαύρη γραμμή), πράσινης βλάστησης (κόκκινη γραμμή), άμμου (πράσινη γραμμή), ύδατος (κίτρινη γραμμή), εδάφους (μπλε γραμμή), βράχων (ιώδης γραμμή), χιονιού (γαλάζια γραμμή) και πάγου (λαδόχρωμη γραμμή). (Xin-peng Tian και Lin Sun, 2016).

4.3.4 Εφαρμογή Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων (FDI)

Μετά το πέρας των διαδικασιών προεπεξεργασίας, είναι δυνατόν να γίνει η εφαρμογή του κύριου εργαλείου εντοπισμού επιθαλάσσιων πλαστικών ρύπων, του Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων (Floating Debris Index) (Lauren Biermann et al., 2020). Πρόκειται για μια σχέση μεταξύ διαύλων που αναπτύχθηκε με σκοπό να κάνει διακριτή την παρουσία πλεούμενων πλαστικών ρύπων σε μία δορυφορική εικόνα σε σχέση με το θαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Ο δείκτης βασίστηκε στον δείκτη επιπλέουσας άλγης (FAI – Floating Algae Index) που αναπτύχθηκε για το Landsat, το φασματογράφο απεικόνισης μέσης ανάλυσης (Medium Resolution Imaging Spectrometer - MERIS) και το φασματοραδιόμετρο απεικόνισης μέσης ανάλυσης (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS) (Lauren Biermann et al., 2020). Κατά την εφαρμογή του δείκτη, οι πλέουσες πλαστικές συγκεντρώσεις στην ελεγχόμενη περιοχή χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές (0.025-0.09), ενώ το θαλάσσιο περιβάλλον από πολύ χαμηλότερες (0.005-0.01).

$$FDI = B8 - \left(B6 + (B11 - B6) * \left(\frac{842 - 665}{1610 - 665}\right) * 10\right)$$

Παραπάνω φαίνεται αναλυτικά η σχέση του δείκτη και οι χρησιμοποιούμενοι δίαυλοι (B8 αντιστοιχεί στον δίαυλο 8, B11 στον δίαυλο 11 κ.ο.κ.). Στην θέση του ερυθρού διαύλου (δίαυλος 4, στην περίπτωση του Sentinel-2) χρησιμοποιήθηκε ο δίαυλος ερυθρού ορίου (δίαυλος 6, 740 nm). Έτσι, είναι δυνατή η χρήση της διαφοράς του εγγύς υπέρυθρου και της βασικής ανάκλασης του εγγύς υπέρυθρου. Η αφαίρεση αυτή οδηγεί σε μικρότερη επιρροή του δείκτη από τις αλλαγές στην ατμόσφαιρα (τύπος και μέγεθος αερολυμάτων, γωνία ηλιακής ακτινοβολίας/ θέασης και λάμψεις) και επιτρέπει την παρατήρηση μέσα από λεπτά νέφη και ομίχλη (Lauren Bierman et al., 2020). Η τιμή 665 προέκυψε από γραμμική παρεμβολή μεταξύ των διαύλων ερυθρού ορίου 2 (δίαυλος 6 – Red Edge 2) και υπέρυθρης ακτινοβολίας βραχέος μήκους κύματος 1 (δίαυλος 11 – SWIR 1). Οι τιμές 842 και 1610 αντιστοιχούν στις ενδιάμεσες τιμές μηκών κύματος των διαύλων 8 (Near-Infrared – Εγγύς Υπέρυθρο) και 11 (Short-Wave Infrared - Υπέρυθρη Ακτινοβολία Βραχέος Μήκους Κύματος).

Ο δείκτης παρουσιάζει δυνατότητα εντοπισμού πλαστικών πλεούμενων στόχων σε κλίμακα μικρότερη της ψηφίδας (sub-pixel scale), όπως φάνηκε και σε πείραμα που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή, στο οποίο οι πλαστικοί στόχοι επιφάνειας 10x10 m, σε εικόνα χωρικής ανάλυσης 10 m, κάλυπταν τέσσερα γειτονικά εικονοστοιχεία ο κάθε ένας λόγω της εξάπλωσης τους σε κλάσμα της περιοχής των εικονοστοιχείων αυτών. Επιπλέον, έχει εφαρμοστεί στην ανίχνευση συγκεντρώσεων φυκιών στις νήσους Μπαρμπάντος, θαλάσσιο αφρό στην ανατολική ακτή της

Σκωτίας και επιπλέοντα ηφαιστειακά πετρώματα στα ανοικτά του πελάγους Τόνγκα (Tonga, Πολυνησία) (Lauren Biermann et al., 2020).

4.3.5 Χρήση NDVI (Κανονικοποιημένου Δείκτη Διαφοράς Βλάστησης)

Ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (NDVI) είναι ένας απλός δείκτης που χρησιμοποιείται συχνά για την ανάλυση των δεδομένων τηλεπισκόπησης και την αξιολόγηση του κατά πόσον ο παρατηρούμενος στόχος περιέχει πράσινη υγιή βλάστηση ή όχι. Ο NDVI μιας περιοχής με πυκνή βλάστηση θα τείνει προς θετικές τιμές, ενώ το νερό και οι δομημένες περιοχές θα αντιπροσωπεύονται από σχεδόν μηδενικές ή αρνητικές τιμές.

Ο συγκεκριμένος δείκτης ποσοτικοποιεί τη βλάστηση μετρώντας τη διαφορά μεταξύ του εγγύς υπέρυθρου (NIR) (το οποίο η βλάστηση ανακλά έντονα) και του κόκκινου φωτός (το οποίο η βλάστηση απορροφά έντονα). Το εύρος τιμών του κυμαίνεται από +1 έως -1, όπου το -1 αντιστοιχεί γενικά σε υδάτινα σώματα και το +1 αντιστοιχεί γενικά σε πυκνή πράσινη φυλλώδης βλάστηση. Ως εκ τούτου, μπορούμε να πούμε ότι ο NDVI είναι ένας δείκτης για τη μέτρηση της υγιούς πράσινης βλάστησης (Varun Dutta Gupta et al., 2021). Ο υπολογισμός του δείκτη γίνεται με τον παρακάτω τύπο :

NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red)

Όπου NIR αναφέρεται σε δίαυλο εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (near-infrared) και Red αναφέρεται σε δίαυλο ερυθρής ακτινοβολίας.

Ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας λόγω της υψηλής διάκρισης που επιτυγχάνει μεταξύ των επιπλεόντων υλικών (Σχήμα 25). Με την χρήση των τιμών του NDVI είναι δυνατόν να χωριστούν περιοχές υψηλής συγκέντρωσης πλέουσας χλωρίδας από συγκεντρώσεις πλαστικών υλικών, ένας διαχωρισμός που ήταν χρήσιμος κατά την μελέτη εικόνων από τοποθεσίες άγνωστων στόχων (τοποθεσίες όπου είναι γνωστή η παρουσία επιθαλάσσιων πλαστικών απορριμμάτων, αλλά όχι η ακριβής θέση τους). Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, ο λόγος της τιμής του δείκτη πλεούμενων απορριμμάτων (FDI) προς τον λόγο της τιμής του κανονικοποιημένου δείκτη αντιστοιχούν με υψηλή βεβαιότητα σε πλαστικά υλικά.



Σχήμα 25 : Οι τιμές εικονοψηφίων κατά την εφαρμογή του Κανονικοποιημένου Δείκτη Διαφοράς Βλάστησης ανάλογα με το υλικό που καταλαμβάνει την περιοχή του εικονοψηφίου (Lauren Biermann et al., 2020)



Σχήμα 26 : Οι τιμές εικονοψηφίων κατά την εφαρμογή του Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων ανάλογα με το υλικό που καταλαμβάνει την περιοχή του εικονοψηφίου. (Lauren Biermann et al., 2020)



Σχήμα 27 : Τιμές εικονοψηφίων που αντιστοιχούν σε περιοχές διάφορων υλικών κατά την εφαρμογή του Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές κατά την εφαρμογή Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης. (Lauren Biermann et al., 2020)

5° Κεφάλαιο Επεξεργασία Δορυφορικών Εικόνων

5.1 Παρουσίαση και Ανάλυση Εικόνων Προ και Μετά Επεξεργασίας

Οι δορυφορικές εικόνες που επιλέχθηκαν για τον εντοπισμό πλαστικών απορριμμάτων, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, αντιστοιχούν στις περιοχές του λιμένα της Μυτιλήνης (παραλία Τσαμάκια) και της ακτής Binh Lap στο Βιετνάμ. Ακολουθήθηκαν όλα τα βήματα επεξεργασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, επιτυγχάνοντας έτσι την διάκριση των παράκτιων πλαστικών στόχων στις τοποθεσίες που ερευνήθηκαν.

Η τοποθεσία ανατολικά του λιμένα της Μυτιλήνης απαιτεί λιγότερες διαδικασίες για την επιβεβαίωση της θέσης και του μεγέθους των συγκεντρώσεων πλαστικού, καθώς οι προδιαγραφές του πειράματος που αποτέλεσε πηγή για την παρατήρηση των πλαστικών στόχων της περιοχής (Τοπουζέλης, 2022) αποτελούν μέτρο σύγκρισης για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας της εικόνας. Δύο από τους πλαστικούς στόχους είναι ορατοί χωρίς καμία επεξεργασία στο δορυφορικό προϊόν, ενώ και οι τρεις γίνονται ευδιάκριτοι με την εφαρμογή του δείκτη FDI (καθώς η λειτουργία του δείκτη είναι η διάκριση επιπλεόντων αντικειμένων σε σχέση με το θαλάσσιο περιβάλλον τους).

Στην εικόνα της περιοχής Binh Lap είναι δυνατόν να διακριθούν πολλαπλοί στόχοι που επιπλέουν σε παράκτια ύδατα. Δεν υπάρχει γνώση για το ποσοστό ή τις θέσεις των πλαστικών απορριμμάτων ανάμεσά τους, ωστόσο υπάρχει βεβαιότητα ότι ένα μέρος των πλεούμενων στόχων είναι όντως πλαστικά υλικά (Ενότητα 4.1). Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η φύση των αντικειμένων που παρατηρήθηκαν, έγινε, πέραν των υπολοίπων βημάτων, χρήση του δείκτη NDVI και των Σχημάτων 25, 26 και 27.

Τα βήματα επεξεργασίας των εικόνων που ακολουθήθηκαν είναι, με την σειρά :

- Η απομόνωση της περιοχή ενδιαφέροντος
- Η επανάληψη της δειγματοληψίας
- Η εφαρμογή μάσκας ξηράς
- Η εφαρμογή των δεικτών FDI και NDVI

Οι εικόνες που επιλέχθηκαν είχαν ήδη διορθωθεί σε ότι αφορά γεωμετρικές παραμορφώσεις (γεωμετρική διόρθωση) και επιρροές από την ατμόσφαιρα (ατμοσφαιρική διόρθωση). Το πρώτο βήμα επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό SN.A.P. είναι η απομόνωση της περιοχής ενδιαφέροντος σε ξεχωριστή εικόνα (subset) ώστε να είναι πιο ευδιάκριτοι οι υπό

μελέτη στόχοι και να ελαττωθούν οι χρόνοι επεξεργασίας. Δεύτερο βήμα ήταν η επανάληψη της δειγματοληψίας ώστε να γίνει αντιστοίχιση των θέσεων των διαβαθμίσεων του γκρι στα κέντρα του πλέγματος της εικόνας που έχει δεχθεί γεωμετρική διόρθωση. Η μέθοδος που προτιμήθηκε είναι εκείνη του πλησιέστερου γειτονικού σημείου ώστε να διατηρηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι αρχικές τιμές της εικόνας. Σαν τελευταίο βήμα επεξεργασίας εφαρμόστηκε μάσκα ξηράς προκειμένου να είναι δυνατή η χρήση των εικόνων χωρίς να υπάρχει επιρροή του συνόλου των τιμών ανακλαστικότητας από τις περιοχές που αντιστοιχούν σε ξηρά, η οποία δεν αποτελεί μέρος του αντικειμένου της έρευνας που διεξήχθη. Η βασική αρχή της μάσκας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ποσοστό ανάκλασης των μηκών κύματος του διαύλου B11 του Sentinel-2. Πιο συγκεκριμένα, μηδενίστηκε η τιμή των εικονοστοιχείων που παρουσίαζαν ποσοστά ανάκλασης στα εν λόγω μήκη κύματος μεγαλύτερα του 3,75%. Έτσι, σχεδόν όλα τα εικονοστοιχεία που διατήρησαν τις τιμές του ανταποκρίνονταν σε περιοχές θάλασσας.

Για την αναζήτηση πλαστικών στόχων χρησιμοποιήθηκε ο Δείκτης Πλεούμενων Απορριμμάτων (Floating Debris Index - FDI) (L. Biermann et al., 2020), ενώ για την επιβεβαίωση της φύσης των στόχων που εντοπίστηκαν χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός του FDI και του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης.

5.1.1 Εικόνες Μυτιλήνης



Σχήμα 28 : Προβολή της ευρύτερης περιοχής της Μυτιλήνης από το λογισμικό SNAP. Στην θέση του κόκκινου πλαισίου με τον αριθμό 3 βρίσκεται η τοποθεσία που καλύπτεται από την εικόνα που χρησιμοποιήθηκε.

Η διάταξη του πειράματος στο οποίο βασίστηκε η έρευνα της συγκεκριμένης εικόνας (Τοπουζέλης, 2022) περιλαμβάνει τρεις πλατφόρμες που αποτελούνται από απορρίμματα διαφορετικών πλαστικών υλικών (πλαστικά μπουκάλια, δίχτυα αλιείας και πλαστικές σακούλες) και έχουν διαστάσεις 10 m x 10 m. Οι πλατφόρμες αυτές τοποθετήθηκαν στην θαλάσσια επιφάνεια 30 m από την ακτή.

Στο σχήμα 28 φαίνεται η περιοχή μελέτης σε ψευδοχρωματική εικόνα Sentinel-2 που χρησιμοποιεί τους διαύλους 2, 3, και 4 του συστήματος. Εντός του κόκκινου περιγράμματος είναι εμφανείς οι δύο από τους τρεις στόχους της διάταξης του πειράματος (πλαστικά μπουκάλια (νοτιότερη θέση στόχου), δίχτυα αλιείας (βορειότερη θέση στόχου).

Το ευμέγεθες λευκό σχήμα στην κάτω αριστερή γωνία της εικόνας (πράσινο πλαίσιο) αντιστοιχεί στον λιμένα της Μυτιλήνης και η λευκή λωρίδα ανώτερα των διακριτών στόχων (ιώδες περίγραμμα) αντιστοιχεί στην ακτή Τσαμάκια.



Σχήμα 29 : RGB Απεικόνιση της περιοχής του λιμένα Μυτιλήνης και παραλίας Τσαμάκια Το κόκκινο πλαίσιο περικλείει στην θέση των γνωστών στόχων. (Sentinel-2, 2018)

Οι τιμές των εικονοψηφίων που βρίσκονται άνω και αριστερά αυτών των δύο περιοχών της εικόνας (Σχήμα 11) έπρεπε να μηδενιστούν με την χρήση μάσκας, καθώς αντιστοιχούν σε σημεία ξηράς τα οποία επηρεάζουν το σύνολο των τιμών του πλέγματος της εικόνας.



Σχήμα 30 : Εικόνα της περιοχής του λιμένα της Μυτιλήνης. Η περιοχή που έχει τονιστεί με κόκκινο χρώμα αποτελείται από την ζηρά και οι τιμές των εικονοστοιχείων της θα μηδενιστούν με την χρήση μάσκας ζηράς. (Sentinel-2, 2018)

Η μάσκα που εφαρμόστηκε για την περιοχή ξηράς της εικόνας έχει σαν στόχο τον μηδενισμό της τιμής των εικονοστοιχείων τα οποία παρουσιάζουν τιμές ανάκλασης στα μήκη κύματος του διαύλου 11 (μέση τιμή 1610 nm) μεγαλύτερες από 3,75%. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11, υπάρχουν ελάχιστα εικονοστοιχεία ξηράς τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονται στην περιοχή «επίδρασης» της μάσκας και βρίσκονται σε σποραδικές θέσεις περιμετρικά της ερυθρής ζώνης (παράδειγμα εντός του πράσινου πλαισίου).

Την εφαρμογή της μάσκας ξηράς ακολούθησε η δημιουργία της εικόνας τιμών του FDI. Στο σχήμα 12 φαίνεται το αποτέλεσμα της χρήσης του συγκεκριμένου δείκτη, κατά την οποία ο τρίτος πλαστικός στόχος του πειράματος που διεξήχθη (Τοπουζέλης, 2022) είναι διακριτός από το περιβάλλον του, ενώ η διακριτότητα των δύο νοτιότερων στόχων έχει βελτιωθεί (κόκκινο

πλαίσιο). Και οι τρεις στόχοι καταλαμβάνουν τέσσερα εικονοστοιχεία, εκ των οποίων τουλάχιστον δύο αποκτούν υψηλές τιμές κατά την εφαρμογή του FDI, ενώ τα υπόλοιπα αποκτούν χαμηλότερες τιμές χωρίς να πλησιάζουν το μηδέν («φωτεινές» αποχρώσεις του γκρι). Η εξάπλωση αυτή οφείλεται στην διακριτική ικανότητα του δείκτη FDI, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό πλεούμενων ρύπων σε ένα εικονοστοιχείο όταν οι εν λόγω ρύποι καλύπτουν την πλειοψηφία της περιοχής του εικονοστοιχείου και όχι μόνο όταν εξαπλώνονται σε ολόκληρη την επιφάνεια της περιοχής του.

Η περιοχή της παράκτιας θάλασσας (σχήμα 12) χαρακτηρίζεται από τιμές εμφανώς χαμηλότερων τιμών FDI σε σχέση με αυτές των πλαστικών στόχων («σκοτεινότερες» αποχρώσεις του γκρι) το οποίο οφείλεται στην υψηλή απορρόφηση των υπέρυθρων ακτινών από τα θαλάσσια ύδατα, δεδομένου οι τιμές ανακλαστικότητας που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του FDI αντιστοιχούν σε διαύλους ερυθρών και υπέρυθρων ακτινών.



Σχήμα 31 : Περιοχή λιμένα Μυτιλήνης, μετά την εφαρμογή της μάσκας ζηράς και του δείκτη FDI. Οι τρεις πλαστικοί στόχοι είναι εμφανείς σε 3 ή 4 εικονοστοιχεία έκαστος (ερυθρό πλαίσιο). (Sentinel-2, 2018, τροποποιημένη)

Η γνώση πως και οι τρεις διακριτές περιοχές υψηλών τιμών FDI αντιστοιχούν σε πλαστικούς στόχους επιτρέπει την έρευνα των τιμών που λαμβάνουν τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στις θέσεις πλαστικών ρύπων όταν εφαρμόζεται ο δείκτης NDVI. Στο σχήμα 31 φαίνεται η εικόνα τιμών του δείκτη NDVI και μπορούν παρατηρηθούν οι διαφορές σε σχέση με την εικόνα του σχήματος 30.



Σχήμα 32 : Περιοχή λιμένα Μυτιλήνης, μετά την εφαρμογή μάσκας ζηράς και του δείκτη NDVI. Τα πράσινα πλαίσια αντιστοιχούν στις θέσεις των πλαστικών στόχων. (Sentinel-2, 2018, τροποποιημένη)

Στο σχήμα παρουσιάζονται πολλές εναλλαγές τιμών καθώς το στοιχείο που επικρατεί είναι το θαλασσινό νερό, το οποίο απορροφά σημαντικά τις ακτινοβολίες των μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται στον NDVI (Σχήμα 6). Παρά την ικανότητα που παρουσιάζει ο δείκτης στην διάκριση διαφορετικών υλικών (Σχήμα 25) το γεγονός ότι δεν έχει την ικανότητα για εντοπισμό υλικών σε κλίμακα μικρότερη της ψηφίδας (sub-pixel detection) που έχει ο FDI, η παρουσία θαλασσινού νερού στις περιοχές όπου εξαπλώνεται το πλαστικό επηρεάζει σημαντικά την τιμή που λαμβάνουν τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στους πλαστικούς στόχους.

Το κόκκινο πλαίσιο αντιστοιχεί, όπως και στο σχήμα 12, στην περιοχή πλεύσης των πλαστικών στόχων του πειράματος που χρησιμοποιήθηκε σαν πηγή. Τα εικονοστοιχεία στην θέση του στόχου πλαστικών μπουκαλιών (νοτιότερη περιοχή στόχου στο κόκκινο πλαίσιο) αποκτούν υψηλότερες τιμές από το υδάτινο περιβάλλον τους μετά την εφαρμογή του NDVI. Παρόμοιες τιμές παρατηρούνται και στην θέση του βορειότερου στόχου (πλαστικές σακούλες), το οποίο συμφωνεί με το εύρος τιμών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6 σε ότι αφορά την σχέση τιμών NDVI των πλαστικών στόχων και του ύδατος.

Σε αντίθεση με τους άλλους δύο στόχους, ο στόχος πλαστικών διχτυών αλιείας βρίσκεται σε θέση της οποίας τα εικονοστοιχεία έχουν αποκτήσει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις ψηφίδες που βρίσκονται περιμετρικά. Αυτό οφείλεται σε μερική βύθιση του στόχου, εξαιτίας της οποίας μεγάλο μέρος των ακτινοβολιών που σχετίζονται με τον δείκτη NDVI (NIR και ορατή ερυθρή) απορροφόνται από επιφανειακά θαλάσσια ύδατα.

5.1.2 Εικόνες Βιετνάμ



Σχήμα 33 : Περιοχή κόλπου Cam Rahn. Στο ερυθρό πλαίσιο περιλαμβάνεται η περιοχή της ακτής Binh Lap στην οποία έγινε έρευνα για πλαστικούς ρύπους. (Sentinel-2, 2020)

Με βάση έρευνα που διεξήχθη σχετικά με την συγκέντρωση ρύπων στην περιοχή της παραλίας Binh Lap του κόλπου Cam Rahn (Thu-Tang T. Nguyen et al., 2022), κρίθηκε ως τοποθεσία στην οποία υπάρχουν επαρκώς μεγάλες εμφανίσεις πλεούμενων πλαστικών ρύπων. Οι ακριβείς θέσεις και τα μεγέθη των εμφανίσεων αυτών είναι, προ επεξεργασίας, άγνωστα, όπως επίσης και η πιθανότητα παρουσίας μη πλαστικών πλεούμενων στόχων στην περιοχή, καθώς η in-situ έρευνα που διεξήχθη (Thu-Tang T. Nguyen et al., 2022) δεν απασχολήθηκε σημαντικά με την θαλάσσια επιφάνεια. Το σχήμα 33 αποτελεί μία ψευδοχρωματική απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος με χρήση των διαύλων 2, 3, και 4 του συστήματος Sentinel-2. Στην κάτωθι δεξιά γωνία της απεικόνισης είναι διακριτή η περιοχή ξηράς της παραλίας, ενώ στην υπόλοιπη εικόνα φαίνεται η θαλάσσια επιφάνεια. Είναι δυνατόν να παρατηρηθούν 12 στόχοι επί της θαλάσσιας επιφάνειας στην περιοχή της εικόνας εκ των οποίων ένα ποσοστό αντιστοιχεί σε πλαστικούς ρύπους.



Σχήμα 34 : RGB απεικόνιση της παραλίας μελέτης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στην κάτω δεζιά γωνία είναι εμφανής περιοχή ζηράς, και οι υπόλοιποι στόχοι που διακρίνονται στην θαλάσσια επιφάνεια (κίτρινα πλαίσια) είναι πιθανοί πλαστικοί ρύποι. (Sentinel-2, 2020)

Προκειμένου να γίνει διάκριση των πλαστικών στόχων από τους μη πλαστικούς στόχους, εφαρμόστηκαν οι ίδιες διαδικασίες επεξεργασίας με την εικόνα της Μυτιλήνης, και διερευνήθηκε η «απόκριση» των στόχων της εικόνας της περιοχής Binh Lap σε σχέση με εκείνη των γνωστών πλαστικών στόχων στην εικόνα της περιοχής της Μυτιλήνης σε κάθε βήμα της

επεξεργασίας. Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο λόγος των τιμών των δεικτών FDI/NDVI και το σχήμα 26 προκειμένου να επιβεβαιωθεί η φύση των στόχων που αναγνωρίστηκαν ως πλέοντα πλαστικά κατά την διαδικασία της επεξεργασίας.

Με την εφαρμογή της μάσκας ξηράς υπήρξε πολύ καθαρός διαχωρισμός των επιθαλάσσιων στόχων από το περιβάλλον τους, όπως και με τους τρεις πλαστικούς στόχους στην εικόνα του λιμένα της Μυτιλήνης (Σχήμα 34).



Σχήμα 35 : Εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος (δίαυλος B11) στην παραλία Binh Lap (Βιετνάμ) μετά την εφαρμογή μάσκας ζηράς.

Στο επόμενο βήμα, εφαρμόστηκε ο δείκτης FDI προκειμένου να ερευνηθούν οι τιμές που λαμβάνουν οι υπό έρευνα στόχοι. Όπως φαίνεται στο σχήμα 35, οι 13 αρχικοί στόχοι παρουσιάζουν υψηλές τιμές (λευκότερες αποχρώσεις) και εμφανίζονται μερικά σημεία εν μέσω της θάλασσας που παρουσιάζουν αντίστοιχα υψηλές τιμές. Επιπλέον, για 8 από τους 13 στόχους, παρατηρούνται εικονοστοιχεία στην περίμετρό τους τα οποία έχουν λάβει χαμηλές έως ακραία χαμηλές τιμές (μελανές αποχρώσεις). Αυτό πιθανότατα οφείλεται σε ανομοιομορφία των υλικών που τους αποτελούν, και είναι ένα φαινόμενο που δεν παρατηρείται στους στόχους της εικόνας της Μυτιλήνης. Σε ότι αφορά τα σημεία που εμφανίζουν υψηλές τιμές και δεν ανήκουν στους 13 στόχους που είναι υπό διερεύνηση, λαμβάνονται υπόψιν ως πιθανοί πλεούμενοι ρύποι οι οποίοι δεν είναι ευδιάκριτοι στην εικόνα RGB.



Σχήμα 36 : Περιοχή της παραλίας έρευνας στην ακτή Binh Lap μετά την εφαρμογή μάσκας ζηράς και του δείκτη FDI. Τα εικονοστοιχεία υψηλών τιμών στην θαλάσσια περιοχή ενδέχεται να αντιστοιχούν σε θέσεις πλαστικών ρύπων. (Sentinel-2, 2020, τροποποιημένη)

Το τελικό βήμα επεξεργασίας του παραθύρου της εικόνας της παραλίας Binh Lap είναι η χρήση του διαγράμματος NDVI-FDI και το «φιλτράρισμα» (με την χρήση της ρύθμισης Valid Pixel Expression του λογισμικού SN.A.P.) των εικονοστοιχείων τα οποία αποκτούν συγκεκριμένες τιμές στον εκάστοτε από τους δύο δείκτες (0.018-0.056 για τον δείκτη FDI και 0.0-0.2 για τον δείκτη NDVI με βάση το Σχήμα 26, Lauren Biermann et al., 2020). Οι ψηφίδες οι οποίες αποκτούν τιμές που αντιστοιχούν σε πλαστικά υλικά κατά τα προηγούμενα βήματα και περνάνε
από το «φιλτράρισμα» που εφαρμόστηκε θεωρούνται επιβεβαιωμένες τοποθεσίες πλαστικών επιθαλάσσιων ρύπων.

Στο σχήμα 36 εμφανίζονται μονάχα οι ψηφίδες του παραθύρου που πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις :

- Η τιμή ανάκλασης του διαύλου 11 είναι <0.0375 (<3.75%)
- Η τιμή y του δείκτη FDI είναι $0.018 \le y \le 0.056$
- Η τιμή x του δείκτη NDVI είναι $0.0 \le x \le 0.2$



Σχήμα 37 : Διάκριση των πλαστικών στόχων ανάμεσα στα εικονοστοιχεία που παρουσιάζουν τιμές από συγκεκριμένα εύρη τιμών στους δείκτες FDI και NDVI. Η διάκριση έγινε με χρήση του Σχήματος 26 (τιμές δεικτών FDI και NDVI). (Sentinel-2, 2020, τροποποιημένη)

Τα 8 στίγματα που αποτελούν το παραπάνω σχήμα αντιστοιχούν στις θέσεις των 7 από τους 12 υπό μελέτη επιπλέοντες στόχους (τα δύο στίγματα στο ιώδες πλαίσιο αντιστοιχούν στην θέση ενός στόχου, όχι δύο.). Οι συγκεκριμένες θέσεις πρόκεινται για τοποθεσίες πλεούμενων πλαστικών αντικειμένων ή σωρών πλαστικών αντικειμένων. Στο σχήμα 37 γίνεται η

αντιστοίχιση με τις θέσεις των υπό μελέτη στόχων (κόκκινα στίγματα) και είναι εμφανείς οι στόχοι οι οποίοι δεν παρουσίασαν οπτικές ιδιότητες που να ανταποκρίνονται σε πλαστικά υλικά (κίτρινα πλαίσια).



Σχήμα 38 : Αντιστοίχιση των θέσεων επιβεβαιωμένων πλαστικών στόχων στην RGB απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος της ακτής Binh Lap. (Sentinel-2, 2020, τροποποιημένη)

6° Κεφάλαιο

Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των επιλεγμένων εικόνων, η τελική μορφή της εικόνας από την περιοχή της παραλίας Τσαμάκια αποδεικνύει την ικανότητα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου να διαχωρίζει τους επιπλέοντες στόχους από το θαλάσσιο περιβάλλον τους, χάρη στον Δείκτη Πλεούμενων Απορριμμάτων (Floating Debris Index – FDI). Η τελική μορφή της εικόνας της περιοχής Binh Lap αποδεικνύει την δυνατότητα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου να διαχωρίζει τις συγκεντρώσεις πλαστικών πλεούμενων απορριμμάτων από συγκεντρώσεις άλλων υλικών στην επιφάνεια της θάλασσας, χάρη στον συνδυασμό του FDI και του Κανονικοποιημένου Δείκτη Διαφοράς Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index).

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν χωρική ανάλυση 10 m. Αυτό σημαίνει πως μία συγκέντρωση πλαστικών απορριμμάτων στις εικόνες αυτές μπορεί να εντοπιστεί εφόσον καλύπτει μία επιφάνεια 10x10 m. Ο καλύτερος τρόπος για να μειωθεί το μέγεθος αυτό (βελτίωση του ελάχιστου παρατηρήσιμου μεγέθους) είναι η χρήση συστημάτων με υψηλότερη χωρική ανάλυση, όπως το WorldView-3 το οποίο έχει χωρική ανάλυση 30 cm ή 0.3 m. Ωστόσο, υπάρχουν πλαστικοί ρύποι πολύ μικρών μεγεθών (<1 cm στην μεγαλύτερη διάστασή τους) τα οποία δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν με την χρήση δορυφορικών μέσων.

Οι στόχοι επιθαλάσσιων πλαστικών που παρατηρήθηκαν στις δύο περιοχές μελέτης ανήκαν σε διάφορες κατηγορίες πολυμερών υλικών, οι οποίες δεν είναι ξεκάθαρες στην περίπτωση της εικόνας της περιοχής Binh Lap, ενώ στην περιοχή Τσαμάκια ήταν γνωστές λόγω της διάταξης του πειράματος που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή. Η ικανότητα διαφοροποίησης των διαφορετικών κατηγοριών πλαστικών ρύπων εξαρτάται από την ραδιομετρική ανάλυση του χρησιμοποιούμενου συστήματος, δηλαδή τον αριθμό των αποχρώσεων του γκρι που χρησιμοποιεί το σύστημα για να σηματοδοτήσει πόσο υψηλή ή χαμηλή είναι η τιμή που αντιστοιχεί στην κάθε ψηφίδα.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε απαιτεί την χρήση ενός δορυφορικού συστήματος το οποίο να έχει ευαισθησία στο ερυθρό και το υπέρυθρο φάσμα, καθώς εξαρτάται σημαντικά από την απορρόφηση των ακτινών των συγκεκριμένων φασμάτων από το θαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται οι υπό παρατήρηση πλαστικοί ρύποι.

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι δυνατόν να βελτιωθεί με την χρήση δορυφορικών συστημάτων τα οποία έχουν καλύτερη χωρική ανάλυση από το Sentinel-2, ελαττώνοντας έτσι το ελάχιστο ανιχνεύσιμο μέγεθος πλαστικών συγκεντρώσεων. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το WorldView-3, το οποίο δεν προτιμήθηκε για την συγκεκριμένη εργασία λόγω του κόστους των εικόνων του αρχείου του. Μια διαφορετική μορφή βελτίωσης της μεθόδου είναι η χρήση δορυφορικού συστήματος με υψηλότερη ραδιομετρική ανάλυση, η οποία επιτρέπει καλύτερο διαχωρισμό των διαφορετικών πλεούμενων υλικών. Τέλος, χρησιμοποιώντας εικόνες από μία περιοχή σε διαφορετικές ημερομηνίες, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η κινητικότητα των επιπλεόντων πλαστικών ρύπων που έχουν εντοπιστεί.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Μερτίκας, Σ.Π., (1999). «ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ & ΨΗΦΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ.» Ίων, Αθήνα. pp.22-24, 30-33, 46-58, 93-110, 113-119, 137-166, 176-180, 225-257, 269-284, 293-316.
- 2. Τοπουζέλης .Κ.(2022). «PLASTIC LITTER PROJECTS: ΜΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ.». Τελευταία Ανάγνωση : July 10, 2022, https://www.aegean.gr/announcement/plastic-litter-projects-μια-σύγχρονη-προσπάθειααντιμετώπισης-πλαστικών-στο-θαλάσσιο
- Κοινή Γνώμη. (2018). «Εντοπισμός πλαστικών στη θάλασσα με χρήση drones.» Ανακτήθηκε 7 Ιουλίου 2022, <u>https://www.koinignomi.gr/news/paideia/2018/05/31/entopismos-plastikon-sti-thalassa-me-hrisi-drones.html</u>
- Περάκης, Κ., & Φαρασλής, Ι. (2022). «Τηλεπισκόπηση Φωτοερμηνεία Ενότητα 10: Ραδιομετρική Ενίσχυση – Χωρική Επεξεργασία Δορυφορικών Εικόνων.» Presentation, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- Παρχαρίδης, Ι. (2015). "Ανάλυση οπτικών δορυφορικών εικόνων.". Αρχές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης . Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. κεφάλαιο
 <u>http://hdl.handle.net/11419/3965</u>.
- Παρχαρίδης, Ι. (2016). "Τηλεπισκόπηση & Φωτοερμηνεία". Εκπαιδευτικές Ασκήσεις, Ενότητα 6: Βελτίωση αντίθεσης εικόνας – Image Enhancement . Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

https://eclass.hua.gr/modules/document/file.php/GEO290/%CE%95%CE%BD%CF%8 C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%206.pdf

 Fayad, P. (2019). Χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες Sentinel. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου 2022, <u>https://medium.com/@philipfayad/χρησιμοποιώντας-δορυφορικές-</u> εικόνες-sentinel-b9d16451a9bd

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- STEP Forum (2020). Sentinel-2: Resampling Spatial Resolution, Last Reviewed : July 12, 2022, <u>https://forum.step.esa.int/t/sentinel-2-resampling-spatial-resolution/23505</u>
- European Space Agency (2020). Sentinel-2 MSI Revisit and Coverage, Last Reviewed : July 12, 2022, <u>https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage</u>
- Basu, Bidroha & Sannigrahi, Srikanta & Basu, Arunima & Pilla, Francesco. (2021). Development of Novel Classification Algorithms for Detection of Floating Plastic Debris in Coastal Waterbodies Using Multispectral Sentinel-2 Remote Sensing Imagery. Remote Sensing. 13. 1508. 10.3390/rs13081598.
- GEOSPATIAL TECHNOLOGY (2019). Remote Sensing Resampling Methods, Last Reviewed : July 12, 2022, <u>https://mapasyst.extension.org/remote-sensing-resampling-methods/</u>
- Biermann, L., Clewley, D., Martinez-Vicente, V. et al. (2020). Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data. Sci Rep 10, 5364. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z</u>
- Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., Garaba, S.P. (2019). Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018). Int J Appl Earth Obs Geoinf. 79, 175–183. <u>https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.011</u>
- Ec.europa.eu. (2022). Marine litter GES Environment European Commission.Last Reviewed : July 7, 2022,<u>https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmentalstatus/descriptor-10/index_en.htm</u>
- Tian, Xin-peng, and Lin Sun. (2016). "Retrieval of Aerosol Optical Depth over Arid Areas from MODIS Data" Atmosphere 7, no. 10: 134. <u>https://doi.org/10.3390/atmos7100134</u>
- SATELLITE IMAGING Corp. (2020). Landsat 8 Satellite Sensor (15m). Last Reviewed : July 6, 2022 <u>https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat-8/</u>
- Zhuge, Xiaoyong & Zou, X. & Wang, Yuan. (2017). A Fast Cloud Detection Algorithm Applicable to Monitoring and Nowcasting of Daytime Cloud Systems. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 55. 6111-6119. 10.1109/TGRS.2017.2720664.
- Sudmanns, Martin & Tiede, Dirk & Augustin, Hannah & Lang, Stefan. (2019).
 Assessing global Sentinel-2 coverage dynamics and data availability for operational

Earth observation (EO) applications using the EO-Compass. International Journal of Digital Earth. 13. 1-17. 10.1080/17538947.2019.1572799.

- Lu, Lizhen & Hang, Danwei & Di, Liping. (2015). Threshold model for detecting transparent plastic-mulched landcover using moderate-resolution imaging spectroradiometer time series data: A case study in southern Xinjiang, China. Journal of Applied Remote Sensing. 9. 097094. 10.1117/1.JRS.9.097094.
- Othman, Hirdy & Petra, Mohammad & Liyanage, De Silva & Caesarendra, Wahyu.
 (2020). Automated trash collector design. Journal of Physics: Conference Series. 1444.
 012040. 10.1088/1742-6596/1444/1/012040.
- 14. Cózar, Andrés & Echevarría, Fidel & González-Gordillo, Juan & Irigoien, Xabier & Úbeda, Bárbara & Hernandez-Leon, Santiago & Palma, Alvaro & Navarro, Sandra & Lomas, Juan & Ruiz, Andrea & Fernández-de-Puelles, María & Duarte, Carlos. (2014). Plastic debris in the open ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 111. 10.1073/pnas.1314705111.
- Main-Knorn, Magdalena & Pflug, Bringfried & Louis, Jerome & Debaecker, Vincent & Müller-Wilm, Uwe & Gascon, Ferran. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2. 3. 10.1117/12.2278218.
- 16. European Space Agency (2020).Facts and figures, Last Reviewed : July 9, 2022. <u>https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-</u><u>1/Facts_and_figures</u>
- Copernicus (2022). Copernicus Sentinel-1B anomaly (2nd update), Last Reviewed : July 2, 2022, <u>https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage</u>
- European Space Agency (2020). Revisit and Coverage, Last Reviewed: July 11, 2022, <u>https://earth.esa.int/eogateway/catalog/worldview-esa-archive</u>
- 19. European Space Agency (2020). Sentinel-1, Last Reviewed: July 13, 2022, https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1
- 20. ESA 2013 | Illustration: P. CARRIL 2008 ESA'S RADAR OBSERVATORY MISSION FOR COPERNICUS OPERATIONAL SERVICES. Last Reviewed: July 8, 2022, https://esamultimedia.esa.int/docs/S1-Data_Sheet.pdf
- McDonald, F., and Naugle, J. E. (2008), Discovering Earth's Radiation Belts: Remembering Explorer 1 and 3, Eos Trans. AGU, 89(39), 361–363, doi:10.1029/2008EO390001.
- Dr. David R. Williams, (2022), National Aeronautics and Space Administration. Explorer 1 NSSDCA ID: 1958-001A, Retrieved: March 7, 2022, <u>https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/displayTrajectory.action?id=1958-001A</u>

- 23. eoPortal Directory. (2022). Terra Mission. Last Reviewed: July 3, 2022, https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/terra
- 24. USGS. Landsat 1, Last Reviewed: July 13, 2022, <u>https://www.usgs.gov/landsat-</u> <u>missions/landsat-1</u>
- Dr. David R. Williams, (2022), National Aeronautics and Space Administration. TIROS 1, NSSDCA/COSPAR ID: 1960-002B, Retrieved: March 7, 2022, <u>https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1960-002B</u>
- 26. Mitchell, D. (2007). Sputnik-1. Retrieved 7 July 2022, http://mentallandscape.com/S_Sputnik1.htm
- 27. NASA. TIROS Science Mission Directorate. (2016). Retrieved 10 July 2022, https://science.nasa.gov/missions/tiros/
- 28. ESA Forums, (2016). Question about the algorithm used by Sen2cor for atmospheric corrections. Last Reviewed : 6 July 2022, <u>https://forum.step.esa.int/t/question-about-the-algorithm-used-by-sen2cor-for-atmospheric-corrections/3767</u>
- Mayer, Bernhard & Kylling, Arve. (2005). Technical Note: The libRadtran Software Package for Radiative Transfer Calculations - Description and Examples of Use. Atmospheric Chemistry and Physics. 5. 1855-1877. DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005.
- Richter, Rudolf & Schläpfer, Daniel & Muller, Andreas. (2011). Operational Atmospheric Correction for Imaging Spectrometers Accounting for the Smile Effect. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 49. 1772 - 1780. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2089799.
- Lebreton et al. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. Scientific Reports. 2018. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w</u>
- 32. FINAL REPORT OF BALTIC MARINE LITTER PROJECT MARLIN. (2014). Retrieved 10 July 2022, from http://pidasaaristosiistina.fi/files/1994/Marlin_Final_Report_2014.pdf
- Georganos, S. et al. (2018). Scale Matters: Spatially Partitioned Unsupervised Segmentation Parameter Optimization for Large and Heterogeneous Satellite Images. Remote Sensing, 10(9), 1440. <u>https://doi.org/10.3390/rs10091440</u>
- Topouzelis, K. (2018). Plastic Litter Project 2018 PLP. Retrieved 8 July 2022, from http://plp.aegean.gr/plastic-litter-project-2018/
- 35. PEW Charitable Trusts and SystemIQ. (2020). "Breaking the Plastic Wave: A Comprehensive Assessment of Pathways Towards Stopping Ocean Plastic Pollution," <u>https://www.systemiq.earth/wp-</u> content/uploads/2020/07/BreakingThePlasticWave MainReport.pdf

- 36. Satellite Imaging Corporation. (2001-2022). ASTER Satellite Sensor (15m). Retrieved 12 July 2022, from <u>https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/other-satellite-sensors/aster/</u>
- 37. Rayne, N. (2022). ASTER | Terra. Retrieved 6 July 2022, from https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster
- The Indian express. (2021). Explained: How scientists are counting elephants from space. Retrieved 6 July 2022, from <u>https://indianexpress.com/article/explained/how-scientists-are-counting-elephants-from-space-7157019/</u>
- Thermo Fisher Scientific UK. (2022). Microplastics Analysis. Retrieved 16 July 2022, from

https://www.thermofisher.com/gr/en/home/industrial/environmental/environmentalcontaminant-analysis/microplasticsanalysis.html?gclid=CjwKCAjwy_aUBhACEiwA2IHHQEhGbvrP8-_XUCcf304N4DvM1C4elFh6GFDNVzodamClChuWG7unOxoCh-UQAvD_BwE&cid=7010z00000v8Yc&s_kwcid=AL!3652!3!336348895192!p!!g!!mi croplastics&ef_id=CjwKCAjwy_aUBhACEiwA2IHHQEhGbvrP8-_XUCcf304N4DvM1C4elFh6GFDNVzodamClChuWG7unOxoCh-UQAvD_BwE:G:s&s_kwcid=AL!3652!3!336348895192!p!!g!!microplastics

- Cipollini, et al. (2017). Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges. In: Cazenave, A., Champollion, N., Paul, F., Benveniste, J. (eds) Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components. Space Sciences Series of ISSI, vol 58. Springer, Cham. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-319-56490-6_3</u>
- Bondur, Valery. (2005). Complex satellite monitoring of coastal water areas. Retrieved
 9 July 2022, from <u>https://www.isprs.org/proceedings/2005/isrse/html/papers/10030.pdf</u>
- Stankov, E. (2002). Speed of Ocean Currents The Physics Factbook. Retrieved 11 July 2022, from <u>https://hypertextbook.com/facts/2002/EugeneStatnikov.shtml</u>
- Bondur, Valery. (2005). Complex satellite monitoring of coastal water areas. Retrieved
 9 July 2022, <u>https://www.isprs.org/proceedings/2005/isrse/html/papers/10030.pdf</u>
- 44. Sebille, Erik et al. (2015). A global inventory of small floating plastic debris.
 Environmental Research Letters. doi:10. 124006. 10.1088/1748-9326/10/12/124006.
- 45. Parker, L. (2020). Plastic trash flowing into the seas will nearly triple by 2040 without drastic action. Retrieved 11 July 2022, from https://www.nationalgeographic.com/science/article/plastic-trash-in-seas-will-nearly-triple-by-2040-if-nothing-done
- Ryan, P. G. et al. (2009). Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 364(1526), 1999–2012. <u>https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0207</u>

- 47. Geyer, R. et al. (2017). "Production, use, and fate of all plastics ever made", Science Advances, Vol. 3, No. 7.
- 48. Law, K.L. et al. (2020). "The United States' contribution of plastic waste to land and ocean.", Science Advances, Vol. 6, No. 44.
- Martínez-Vicente, V., Clark, J. R., et al. (2019). Measuring Marine Plastic Debris from Space: Initial Assessment of Observation Requirements. Remote Sensing, 11(20), 2443. <u>https://doi.org/10.3390/rs11202443</u>
- 50. Li et al. (2021) Remote Sensing, Heat Island Effect and Housing Price Prediction via AutoML Advances in Intelligent Systems and Computing book series, volume 1213, pp 113-118, <u>https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-51328-3_17</u>
- Morét, Skye et al. (2010). "The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean.", Marine pollution bulletin. 60. 1873-8. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.020.
- Ray, Justin (11 February 2013). "Atlas 5 rocket launch continues legacy of Landsat". Spaceflight Now. Retrieved 12 February 2013.
- Andrady A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine pollution bulletin, 62(8), 1596–1605. <u>https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030</u>
- Laist, David. (1987). "Overview of the biological effects of lost and discarded plastic debris in the marine environment.," Marine Pollution Bulletin. 18. 319-326. Doi: 10.1016/S0025-326X (87)80019-X.
- 55. Pruter, A.T. (1987). "Sources, quantities and distribution of persistent plastics in the marine environment.", Marine Pollution Bulletin, 18, 305-310.
- 56. Rochman, C.M. (2020). "The story of plastic pollution: From the distant ocean gyres to the global policy stage.", Oceanography 33(3):60–70, <u>https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.308</u>.
- Nelms, S. (2019). "Microplastics in marine mammals stranded around the British coast: ubiquitous but transitory?", Scientific Reports. 9. 1075. doi:10.1038/s41598-018-37428-3.
- 58. Ryan, P.G. (2015). "A Brief History of Marine Litter Research." In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) Marine Anthropogenic Litter. Springer, Cham. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_1</u>
- Ryan, P. G. et al. (2009). "Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. Philosophical transactions of the Royal Society of London". Series B, Biological sciences, 364(1526), 1999–2012. <u>https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0207</u>
- 60. Cervest. (2020). Remote sensing of Planet Earth Part 2. Retrieved 16 July 2022, from <u>https://cervest.earth/news/remote-sensing-of-planet-earth-part-2-processing-sentinel-2-optical-imagery</u>

- Forbes, M. (2020). Episode 14: Garbage Patches: How Gyres Take Our Trash Out to Sea [Podcast]. Retrieved 10 July 2022, from <u>https://oceanservice.noaa.gov/podcast/mar18/nop14-ocean-garbage-patches.html</u>
- 62. The Ocean Cleanup. (2022). "The Great Pacific Garbage Patch" Retrieved 7 July 2022, from https://theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch/
- 63. Tanhua T. (2020). "A near-synoptic survey of ocean microplastic concentration along an around-the-world sailing race.". PLOS ONE 15(12): e0243203. <u>https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243203</u>
- Germanov, E. (2019). "Microplastics on the Menu: Plastics Pollute Indonesian Manta Ray and Whale Shark Feeding Grounds.", Frontiers in Marine Science. 6. 679. doi: 10.3389/fmars.2019.00679.
- 65. Faizal, I. (2022). "Baseline data of marine debris in the Indonesia beaches.", Data in Brief. 41. 107871. Doi: 10.1016/j.dib.2022.107871.
- 66. Shah, A. (2021). "Marine Debris Dataset for Object Detection in Planetscope Imagery", Version 1.0, Radiant MLHub. [Date Accessed] 28 June 2022 <u>https://doi.org/10.34911/rdnt.9r6ekg</u>
- 67. WWF. (2022). "How does plastic end up in the ocean?" Retrieved 9 July 2022, from https://www.wwf.org.uk/updates/how-does-plastic-end-ocean
- 68. E.S.A. (2018)." Sentinel 2 first steps." Retrieved 16 July 2022, from <u>https://gisbits.wordpress.com/tag/snap/</u>
- 69. Sannigrahi, S. et al. (2021). "Detection of marine floating plastic using Sentinel-2 imagery and machine learning models." ArXiv, abs/2106.03694.
- 70. Clean Atlantic EU. (2019). Tackling Marine Litter in the Atlantic Area. Retrieved 8 July 2022, from <u>http://www.cleanatlantic.eu/wp-content/uploads/2020/05/Cefas_5.2-</u> <u>Final_-Monitoring-the-presence-of-marine-litter.pdf</u>
- Topouzelis, K. et al. (2019). "Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018).", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 79. 175-186. Doi: 10.1016/j.jag.2019.03.011.
- 72. Stack Exchange. (2021). "How to remove banding in Sentinel-2 imagery over water?". Retrieved 11 July 2022, from <u>https://gis.stackexchange.com/questions/387204/how-to-remove-banding-in-sentinel-2-imagery-over-water</u>
- Shippert, P. (2013). "Digital Number, Radiance, and Reflectance.". Retrieved 12 July 2022, from <u>https://www.l3harrisgeospatial.com/Learn/Blogs/Blog-</u> Details/ArtMID/10198/ArticleID/16278/Digital-Number-Radiance-and-Reflectance
- Wolfe, J. (2015). "When Should I Correct My Imagery for Atmospheric Effects?". Retrieved 4 July 2022, from <u>https://www.l3harrisgeospatial.com/Learn/Blogs/Blog-</u>

Details/ArtMID/10198/ArticleID/15452/When-Should-I-Correct-My-Imagery-for-Atmospheric-Effects

- 75. European Space Agency (2018).Level-2A Algorithm Overview, Last Reviewed : July 13, 2022, <u>https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2msi/level-2a/algorithm</u>
- 76. Sen2Cor. (2019). How to run Sen2Cor in SNAP. Retrieved 9 July 2022, from <u>https://rus-copernicus.eu/forum/t/sen2cor-how-to-run-sen2cor-in-snap/270</u>
- 77. NASA. (1999). Remote Sensing. Retrieved 10 July 2022, from https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing/remote_04.php
- 78. Parks, S. (2020). "The importance of calibrating your remote sensing imagery.". Materials Talks. Retrieved 5 July 2022, from <u>https://www.materials-talks.com/the-importance-of-calibrating-your-remote-sensing-imagery/</u>
- GISGeography. (2022). "What is Atmospheric Correction in Remote Sensing?". Retrieved 7 July 2022, from <u>https://gisgeography.com/atmospheric-correction/</u>
- 80. Carleton University Open-Source GIS Tutorials. (2022) Downloading, Visualizing and Preprocessing Sentinel-2 Data in SNAP. Retrieved 11 July 2022, from <u>https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Downloading, Visualizing and Preprocessing Sentinel-2 Data in SNAP</u>
- Braun, A. (2020). Export of products from SNAP. European Space Agency. Retrieved from <u>http://step.esa.int/docs/tutorials/Exporting%20data%20from%20SNAP.pdf</u>
- 82. STEP Forum (2020). "Normalization of Sentinel-2-pixel values", Last Reviewed: July 12, 2022, <u>https://forum.step.esa.int/t/normalization-of-sentinel-2-pixel-values/22422</u>
- 83. Land/Water Mask Algorithm Specification. Retrieved 7 July 2022, from <u>https://seadas.gsfc.nasa.gov/help-</u> <u>8.1.0/watermask/WatermaskAlgorithmSpecification.html</u>
- 84. Biermann, L. (2021). "Detecting floating macroplastics using high resolution optical satellite data.". Presentation, Ocean Plastic Webinars. Retrieved from <u>https://data.jncc.gov.uk/data/200d1a14-4f1e-442a-9afd-6fda4f7d5833/EO4water-1-3-Lauren-Biermann.pdf</u>
- Lebreton, L. et al. (2018). "Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic.". Scientific Reports. 2018. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w</u>.
- 86. Medium. 2021. "High-Res vs Mid-Res vs Low-Res: What Type of Satellite Imagery Fits the Bill?", https://medium.datadriveninvestor.com/high-res-vs-mid-res-vs-low-reswhat-type-of-satellite-imagery-fits-the-bill-78cbd45f5d79.

- 87. News24. (2019). "Durban harbor, beaches awash with plastic pollution after floods". Retrieved 12 July 2022, from <u>https://www.news24.com/News24/pics-durban-harbour-beaches-awash-with-plastic-pollution-after-floods-20190424</u>
- Lebreton, L. et al. (2017). "River plastic emissions to the world's oceans.". Nature Communications. 8. <u>https://doi.org/10.1038/ncomms15611</u>
- Tasseron, P. et al. (2021). "Advancing floating macroplastic detection from space using hyperspectral imagery.". doi: 10.31223/X5QK7F.
- 90. Band Arithmetic function. Retrieved 10 July 2022, from <u>https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/band-arithmetic-function.htm</u>
- Phiri, D. et al. (2020). "Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review.", Remote Sensing, 12(14), 2291. <u>https://doi.org/10.3390/rs12142291</u>
- 92. Montoya, S. (2017). "How many Spectral Bands have the Sentinel 2 Images?". Retrieved 14 July 2022, from <u>https://hatarilabs.com/ih-en/how-many-spectral-bands-have-the-sentinel-2-images</u>
- Moshtaghi, M. (2021). "Spectral reflectance of marine macroplastics in the VNIR and SWIR measured in a controlled environment.". Scientific Reports. 11. 5436. doi: 10.1038/s41598-021-84867-6.
- 94. Myer, P. (2020). "Building the Groundwork for Remote Sensing and Tracking of Plastics in the Ocean.". Retrieved 5 July 2022, from <u>https://marinesciences.uconn.edu/2020/11/05/building-the-groundwork-for-remote-sensing-and-tracking-of-plastics-in-the-ocean/#</u>
- 95. Igarashi, K. (2019). "Microplastic waste floating in Pacific Ocean tipped to double by 2030.". Retrieved 12 July 2022, from https://mainichi.jp/english/articles/20190128/p2a/00m/0na/027000c
- 96. Ocean Tracks (2017). "Major Currents.". Retrieved 7 July 2022, from https://oceantracks.org/library/the-north-pacific-ocean/major-currents
- Maximenko, N. (2019). "Toward the Integrated Marine Debris Observing System.", Frontiers in Marine Science, 6. doi: 10.3389/fmars.2019.00447
- Van Sebille, E et al. (2020). "The physical oceanography of the transport of floating marine debris.". Environmental Research Letters. 15. doi: 10.1088/1748-9326/ab6d7d.
- 99. Hampson, M. (2021). "Tracking Plastics in the Ocean by Satellite.". Retrieved 11 July 2022, from <u>https://spectrum.ieee.org/scientists-track-the-flow-of-microplastics-in-the-ocean-from-space</u>
- 100. GISGeography. (2022). Sentinel 2 Bands and Combinations. Retrieved 5 July
 2022, from https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/