



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
"ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

**Επεξεργασία δορυφορικών εικόνων Sentinel 2 για
τον εντοπισμό πλαστικών στην επιφάνεια της
θάλασσας.**

**Διπλωματική Εργασία του φοιτητή
Δημήτρη Παπαγεωργίου**

Εξεταστική Επιτροπή:
Καθ. ΣΑΤΜ Β. Καραθανάση (Επιβλέπουσα)
Επικ. Καθ. Κ. Τοπουζέλης (Παν. Αιγαίου)
ΕΔΙΠ ΣΑΤΜ Π. Κολοκούσης

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Περίληψη:

Στην παρούσα εργασία διερευνείται η δυνατότητα χρήσης δορυφορικών εικόνων Sentinel 2 για τον εντοπισμό επιφανειακών θαλάσσιων πλαστικών απορριμμάτων (ΘΠΑ). Πραγματοποιείται ανάλυση των φασματικών υπογραφών στόχων από πλαστικό σε 6 διαφορετικές πολυφασματικές εικόνες, οι οποίες κατασκευάστηκαν και αγκυροβολήθηκαν στην περιοχή Τσαμάκια της Μυτιλήνης κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου (Plastic Litter Project 2018 & 2019). Εφαρμόζεται φασματικός διαχωρισμός των υπογραφών, μια σειρά μεθόδων εντοπισμού και ταξινόμησης, ενώ προτείνεται ένας νέος δείκτης για τον εντοπισμό επιπλέοντων αντικειμένων στην επιφάνεια της θάλασσας (floating debris index) και μια συνδυαστική μέθοδος εντοπισμού ΘΠΑ. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν βασικούς παράγοντες επιρροής στην δυνατότητα εντοπισμού ΘΠΑ, οι οποίοι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης: κλάσμα αφθονίας πλαστικών στο pixel, επίπεδα sunglint, παραμόρφωση λόγω BRDF, λόγος σήματος προς θόρυβο του αισθητήρα, οπτικό βάθος υδάτινης στήλης. Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού συνιστά μια πολύ βασική αρχική προσέγγιση, η οποία ωστόσο προσφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για τη χρήση πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης για τον εντοπισμό επιφανειακών ΘΠΑ.

Λέξεις κλειδιά: θαλάσσια τηλεπισκόπηση, θαλάσσια απορρίμματα, φασματικός διαχωρισμός, matched filtering, Plastic Litter Project, Sentinel 2

Abstract:

The present study explores the possibility of using Sentinel 2 multispectral images to detect floating marine plastic debris. The spectral signatures of a series of plastic targets constructed and deployed at sea during two experiments conducted by the University of the Aegean (Plastic Litter Project 2018 & 2019), were analysed in 6 multispectral images. Linear spectral unmixing was conducted for the plastic signatures, along with a series of detection and classification methods, while a new index for the detection of floating debris is proposed (floating debris index), along with a combined method for the detection of floating marine plastics. The results point out major factors affecting the detection process, which are in need of further investigation: abundance fraction of plastics in a pixel, levels of sunglint, BRDF distortion, signal to noise ratio of the sensor and optical depth of the water column. The proposed detection method is a preliminary approach which needs further research, however it provides encouraging results for the use of multispectral satellite imagery for the detection of floating marine plastic debris.

Keywords: marine remote sensing, marine plastic debris, spectral unmixing, Plastic Litter Project, Sentinel 2

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	3
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1 Φασματικά χαρακτηριστικά νερού και πλαστικών	9
2.2 Το φαινόμενο του sunglint	14
2.3 Τηλεπισκοπικές εφαρμογές εντοπισμού ΘΠΑ.....	17
3. Εικόνες και Μεθοδολογία.....	27
3.1 Δορυφορικές εικόνες Sentinel 2 – Plastic Litter Project (PLP) 2019	27
3.2 Μεθοδολογία	29
3.2.1 Sentinel 2 BRDF παραμόρφωση	29
3.2.2 Ατμοσφαιρική διόρθωση και διόρθωση για sunglint.....	29
3.2.3 Ανάλυση φασματικών υπογραφών	30
3.2.4 Γραμμικός Φασματικός Διαχωρισμός	30
3.2.5 Matched Filtering.....	31
3.2.6 Προτεινόμενος δείκτης FDI.....	32
3.2.7 Χαρτογράφηση Φασματικής Γωνίας (SAM – ENVI)	32
3.2.8 ENVI Anomaly Detection.....	32
4. Αποτελέσματα και Συζήτηση	33
4.1 BRDF Παραμόρφωση	33
4.2 Ατμοσφαιρική διόρθωση και διόρθωση για sunglint.....	34
4.2.1 Ατμοσφαιρική διόρθωση και μάσκα στεριάς	34
4.2.2 Εκτίμηση και διόρθωση sunglint	35
4.3 Ανάλυση φασματικών υπογραφών	38
4.4 Γραμμικός φασματικός διαχωρισμός (LSU).....	41
4.5 Matched Filtering (ENVI).....	44
4.6 Προτεινόμενος δείκτης FDI.....	48
4.7 Προτεινόμενη συνδυαστική μέθοδος.....	53
4.8 Χαρτογράφηση φασματικής γωνίας (ENVI)	55
4.9 ENVI Anomaly Detection.....	56
5. Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα	57
Βιβλιογραφία	60

1. Εισαγωγή

Ο όρος πλαστικά περιλαμβάνει μια σειρά συνθετικών και ημισυνθετικών οργανικών υλικών, σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους (Tokiwa et al, 2009). Ο Βακελίτης, το πρώτο πλήρως συνθετικό πλαστικό, κατασκευάστηκε το 1907 (Baekeland, 1909), ωστόσο η μαζική παραγωγή πλαστικών ξεκίνησε κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Η παραγωγή των πλαστικών αυξάνεται συνεχώς, με 64.4 εκατομμύρια τόνους (Mt) πλαστικών να παράγονται στην Ευρώπη το 2017 και 348 παγκοσμίως (PlasticsEurope, 2018), κάνοντας τα πλαστικά ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα υλικά παγκοσμίως. Όντας ελαφριά, φθηνά, ανθεκτικά και με μια σειρά άλλων επιθυμητών ιδιοτήτων, τα πλαστικά είναι χρήσιμα σε αμέτρητες εφαρμογές. Σε συνδυασμό με την έλλειψη ολοκληρωμένων μεθόδων διαχείρισης των πλαστικών προϊόντων μετά το τέλος ζωής τους, η αφθονία και ανθεκτικότητα των πλαστικών παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο πρόβλημα σχετικά με το φυσικό περιβάλλον και ιδιαίτερα τα θαλάσσια οικοσυστήματα, προκαλώντας παράλληλα ζημιά εκατομμυρίων ευρώ στον τουρισμό, την αλιεία και μέσω του κόστους καθαρισμών (Gold et al, 2013). Το 2015, μόνο το 9% της παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών απορριμμάτων ανακυκλώθηκε, με το 12% να αποτεφρώνεται και το υπόλοιπο 79% να καταλήγει προς ταφή ή στο φυσικό περιβάλλον (Geyer, Jambeck & Law, 2017).

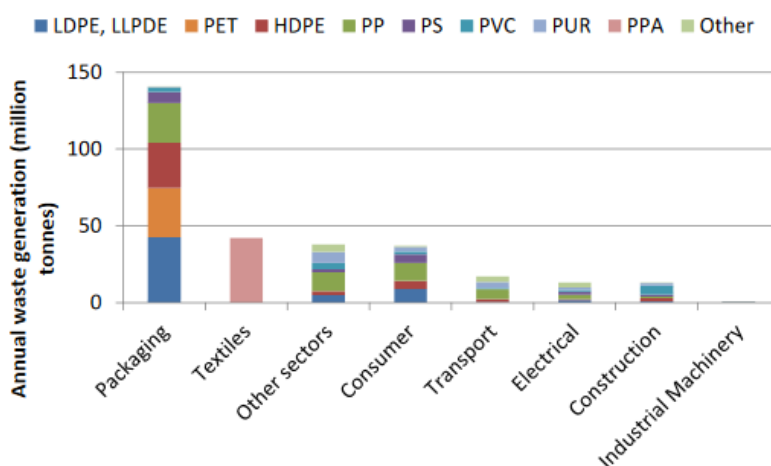


Figure 1: Παγκόσμια παραγωγή απορριμμάτων ανά τομέα. (Πηγή: OECD, 2018)

Τα σημερινά επίπεδα ανακύκλωσης πλαστικού παγκοσμίως φτάνουν περίπου το 14-18% των 302 Mt απορριμμάτων που παράγονται ετησίως, ποσοστό πολύ χαμηλότερο άλλων ευρείας χρήσης υλικών όπως τα βιομηχανικά μέταλλα ή το χαρτί, και με την αποτέφρωση σε ποσοστό 24%, περίπου το 60% του συνόλου των πλαστικών απορριμμάτων καταλήγει σε χωματερές ή στο περιβάλλον (Geyer, Jambeck & Law, 2017). Τα ποσοστά ανακύκλωσης διαφέρουν κατά πολύ ανά τον κόσμο και μεταξύ διαφορετικών ροών και πολυμερών, με κάποια είδη πολυμερών να ανακυκλώνονται πολύ περισσότερο από άλλα – πολυμερή όπως το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) ανακυκλώνονται σε ποσοστά άνω του 10%, ενώ το πολυπροπυλένιο (PP) και το πολυστυρένιο (PS) δεν ανακυκλώνονται σχεδόν καθόλου (OECD, 2018).

Οι περισσότερες μεγαλουπόλεις βρίσκονται στην παράκτια ζώνη (Brown et al, 2013), με περίπου το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού να ζει σε αποστάσεις μικρότερες των 100 km από τη θάλασσα (UN, 2017). Στην Ευρώπη το ίδιο ποσοστό του πληθυσμού ζει σε αποστάσεις μικρότερες των 40 km από τη θάλασσα (EUROSTAT, 2017). Η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα των παράκτιων περιοχών αναπόφευκτα οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή πλαστικών απορριμμάτων. Εκτιμάται ότι περίπου 4.8 με 12.7 Mt πλαστικών απορριμμάτων κατέληξαν στη θάλασσα το 2010, κατά μέσο όρο 8.3 Mt ανά έτος, με την ποσότητα να αναμένεται να διπλασιαστεί μέχρι το 2025 (Jambeck et al, 2015). Τα κακώς διαχειριζόμενα απορρίμματα, αυτά που είτε απορρίπτονται απευθείας στο περιβάλλον ή σε μη ελεγχόμενους χώρους ταφής και απόρριψης, μπορούν να καταλήξουν στη θάλασσα μέσω ποτάμιων ροών και όμβριων υδάτων, και μεταφέρονται από τον άνεμο, τις παλίρροιες και τα ρεύματα (Jambeck et al, 2015). Εκτιμάται ότι μεταξύ 1.15 και 2.41 Mt πλαστικών εισέρχονται στο θαλάσσιο περιβάλλον μέσω ποτάμιων ροών, ποσοστό που αντιστοιχεί στο 9 με 50% της συνολικής ετήσιας εισροής πλαστικών στη θάλασσα. (Lebreton et al., 2017).

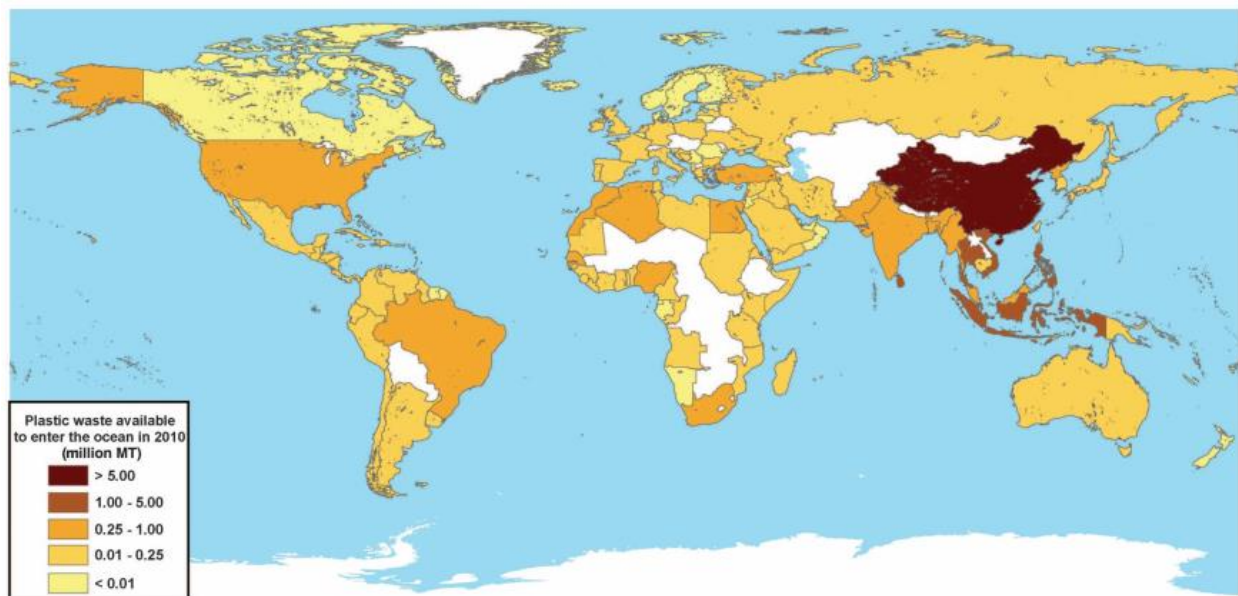


Figure 2: Παγκόσμιος χάρτης με τα εκτιμώμενα ποσοστά παραγωγής κακώς διαχειριζόμενων πλαστικών απορριμμάτων για το 2010 από πληθυσμούς εντός 50km από τον ωκεανό (Πηγή: Jambeck et al, 2015)

Τα θαλάσσια πλαστικά απορρίμματα (ΘΠΑ) χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες – τα μικροπλαστικά, αυτά που είναι μικρότερα των 5 mm και τα μακροπλαστικά, μεγαλύτερα των 5 mm (Thevenon et al, 2014). Από τη στιγμή που θα βρεθούν στη θάλασσα, τα πλαστικά είτε επιπλέουν πάνω ή λίγο κάτω από την επιφάνεια του νερού, είτε βυθίζονται, ανάλογα με το μοριακό βάρος του πολυμερούς από το οποίο αποτελούνται. Το PET και το PVC για παράδειγμα με μοριακά βάρη μεγαλύτερα του θαλασσινού νερού θα βυθιστούν, ενώ το PS ή το HDPE σε γενικές γραμμές θα επιπλέουν. Εξάιρεση αποτελούν πλαστικά τα οποία έχουν επηρεαστεί από biofouling – δημιουργία μιας οργανικής επίστρωσης στην επιφάνεια των πλαστικών, διαδικασία που αυξάνει το μοριακό βάρος και μπορεί να οδηγήσει στη βύθιση πολυμερών που υπό φυσιολογικές συνθήκες θα επέπλεαν (Kooi et al, 2017).

Περίπου το 60% του συνολικού παραγόμενου πλαστικού επιπλέει (Andrady, 2011). Τα ΘΠΑ που επιπλέουν τείνουν να παγιδεύονται σε βασικά κυκλικά ωκεάνια ρεύματα (Goldstein and Goodwin, 2013), ή ξεβράζονται στις ακτές (Kako et al, 2014). Το Great Pacific Garbage Patch (GPGP) είναι μια από τις γνωστότερες και πιο μελετημένες περιοχές συγκέντρωσης ΘΠΑ στο υποτροπικό κυκλικό ωκεάνιο ρεύμα του Β Ειρηνικού Ωκεανού (Wong, Green & Cretney, 1974). Μια πρόσφατη μελέτη (Lebreton et al, 2018) έδειξε πως το GPGP αυξάνεται εκθετικά σε μέγεθος και με πιο γρήγορους ρυθμούς από ότι οι συγκεντρώσεις γειτονικών υδάτων, ενώ περισσότερο από το 75% της συνολικής μάζας αποτελείται από αντικείμενα μεγαλύτερα των 5 mm και πάνω από το 46% αποτελείται από δίχτυα.

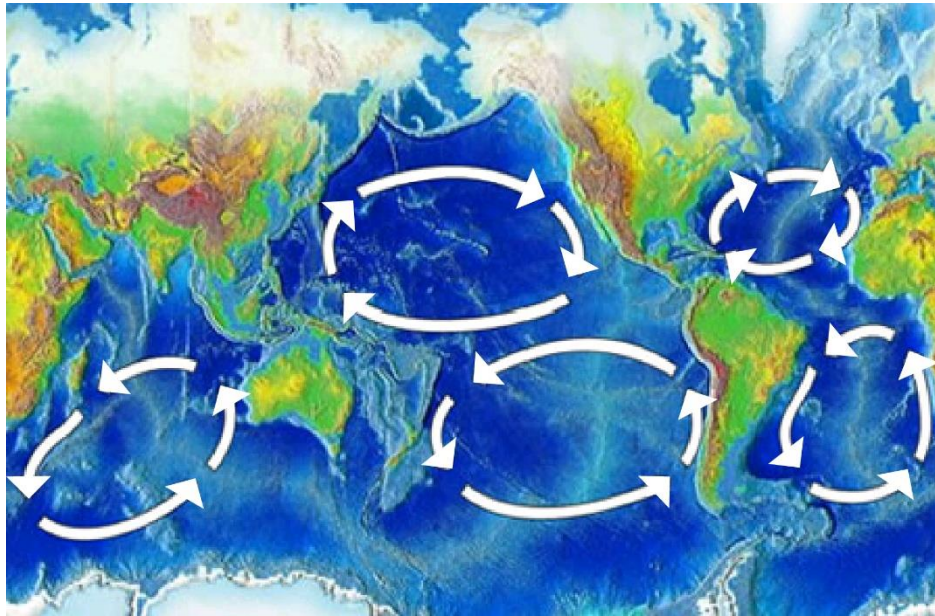


Figure 3: Τα 5 κύρια κυκλικά ωκεάνια ρεύματα, από αριστερά προς δεξιά: Ινδικό, Βόρειο και Νότιο Ειρηνικό και Βόρειο και Νότιο Ατλαντικό Ωκεάνιο Ρεύμα (Πηγή: NOAA)

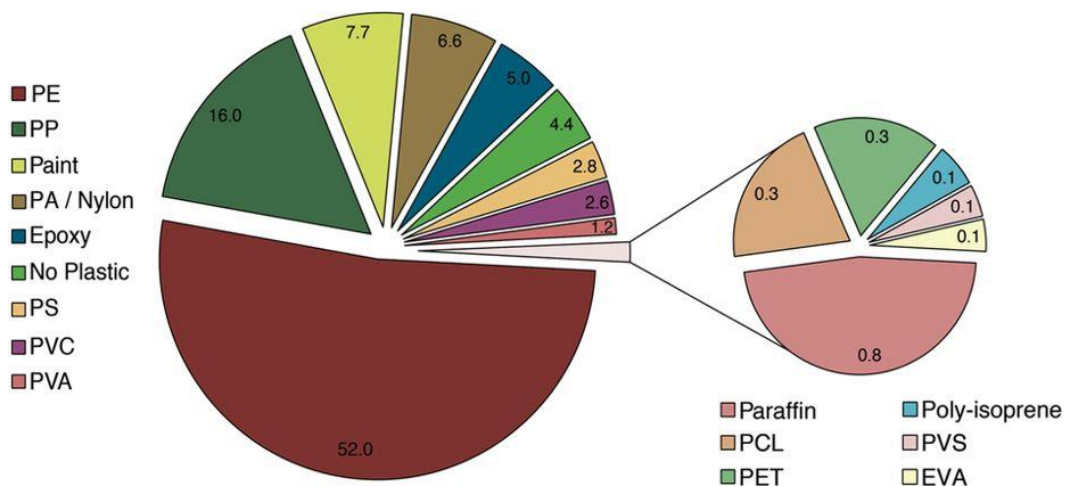


Figure 4: Σύνθεση ΘΠΑ στα επιφανειακά ύδατα της Μεσογείου (Πηγή: Suaria et al, 2016)

Η Μεσόγειος και η Μαύρη Θάλασσα, με μεγάλους παράκτιους πληθυσμούς, έχουν βρεθεί να περιέχουν περιοχές συγκέντρωσης ΘΠΑ, με πυκνότητες αντίστοιχες των μεγάλων ωκεάνιων ρευμάτων (Van Sebille et al, 2015; Suaria & Aliani, 2014; Suaria & Aliani, 2015; Cozar et al, 2015; Suaria et al, 2016). Οι Suaria και Aliani (2014) υπολογίζουν ότι περισσότερα από 63 εκατομμύρια μακροπλαστικά αντικείμενα επιπλέον στην επιφάνεια της Μεσογείου. Επιπρόσθετα με τις μελέτες επιφανείας, τα πλαστικά που καταλήγουν στην ακτή μέσω κυματικής δράσης δίνουν επίσης μια καλή εκτίμηση της αφθονίας και της σύνθεσης των ΘΠΑ που επιπλέουν στην επιφάνεια του ωκεανού (εικόνες 4 & 5).

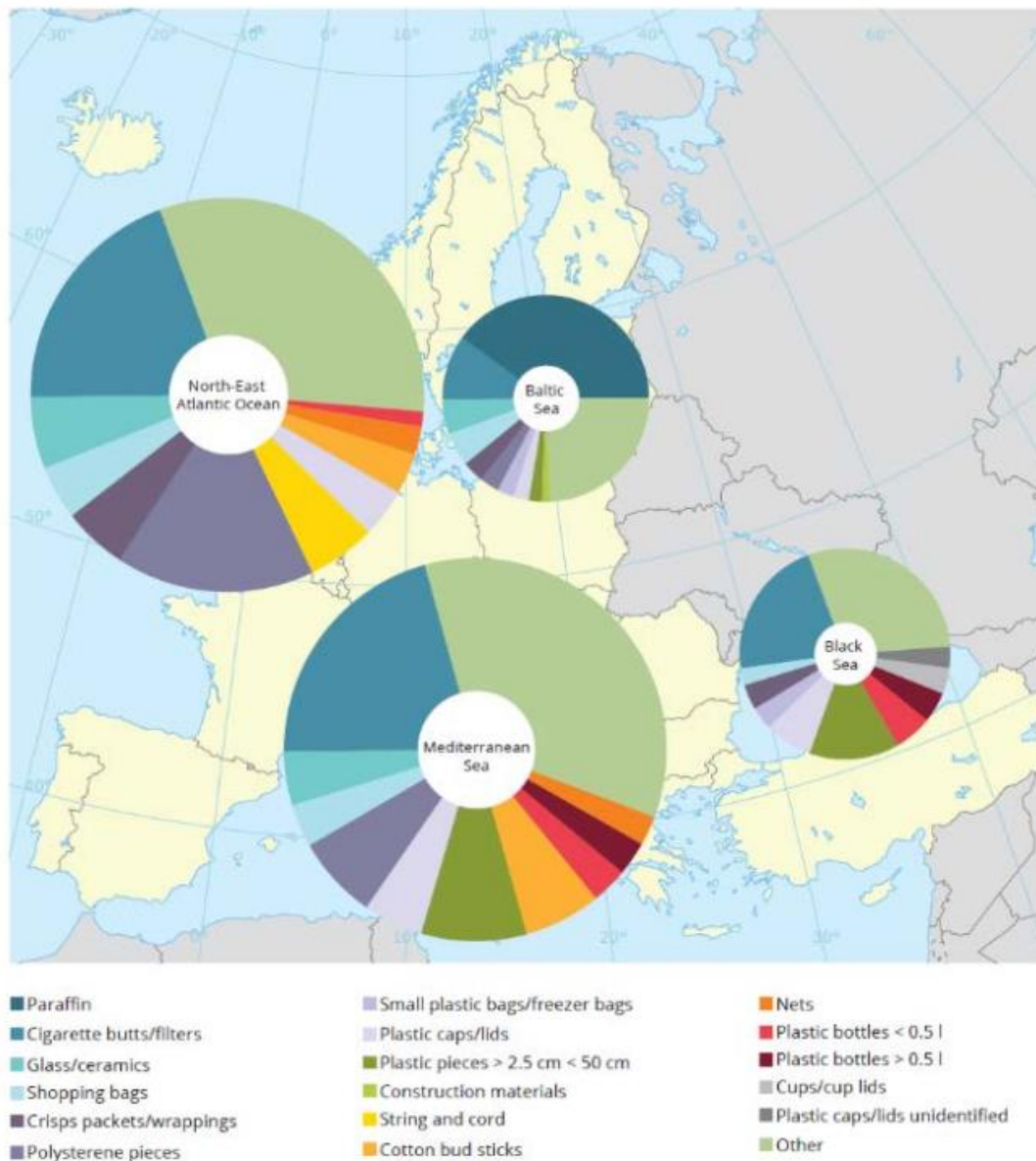


Figure 5: Κατηγορίες απορριμμάτων σε παραλίες, το μέγεθος της πίτας υποδηλώνει απορριμμάτων (Πηγή: European Environment Agency, 2018)

Τα πλαστικά είναι ουσιαστικά μη βιοδιασπώμενα, παραμένουν στο περιβάλλον και αποτελούν κίνδυνο για το θαλάσσιο περιβάλλον, την άγρια ζωή και πιθανώς τους ανθρώπους (Thompson, 2009). Είτε επιπλέοντα στην επιφάνεια, αιωρούμενα στη στήλη νερού ή βυθιζόμενα, τα ΘΠΑ προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές, οικολογικές και οικονομικές επιπτώσεις, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στον αυξανόμενο αριθμό επιστημονικών δημοσιεύσεων σχετικών με τα ΘΠΑ ετησίως (fig 6).

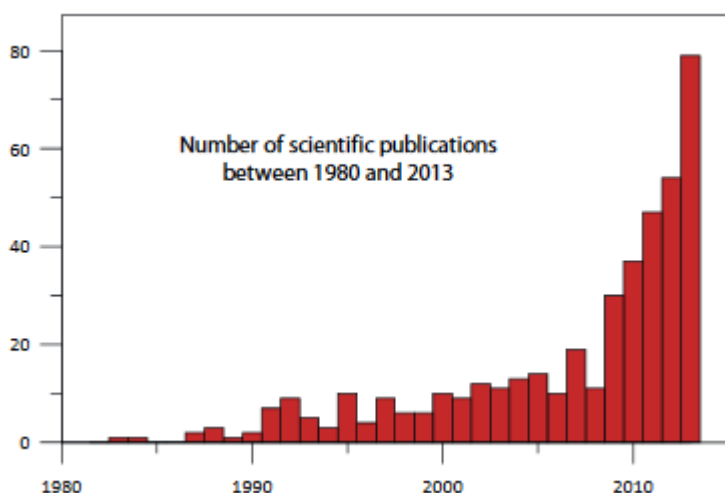


Figure 6: Αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων σχετικών με τα ΘΠΑ από το 1980 έως το 2013 (Πηγή: Thevenon et al, 2014)

Περισσότερα από 267 θαλάσσια είδη είναι γνωστό ότι επηρεάζονται από τα ΘΠΑ, κυρίως μέσω κατάποσης – επηρεάζει κυρίως θαλάσσια πουλιά, ή παγίδευσης – επηρεάζει κυρίως θαλάσσια θηλαστικά (Hammer, Kraak & Parsons, 2012). Τα χαμένα ή απορριπτόμενα δίχτυα – ghost nets, είναι ιδιαίτερα επιβλαβή καθώς μπορούν να συνεχίζουν να παγιδεύουν θαλάσσια είδη για πολλά χρόνια (Matsuoka et al, 2005). Μελέτες έχουν δείξει ότι αρκετά είδη ψαριών καταναλώνουν μικροπλαστικά σε σταθερή βάση (Lusher, McHugh & Thompson, 2013; Neves et al, 2015). Μια μετα-ανάλυση ελεγχόμενων πειραματικών μελετών έδειξε πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της κατάποσης πλαστικών σε είδη ζωοπλαγκτού και ψαριών, συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης κατανάλωσης φυσικής τροφής, αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη, αναπαραγωγή και επιβίωση (Foley et al, 2018). Πέρα από τις αρνητικές συνέπειες λόγω μηχανικών δυσλειτουργιών στο πεπτικό σύστημα των θαλάσσιων οργανισμών, τα ΘΠΑ μπορούν να συγκρατούν στην επιφάνειά τους επικίνδυνες οργανικές ουσίες και μέταλλά τα οποία μπορεί να βρίσκονται στο νερό (Lee et al, 2014; Homes et al, 2012), προκαλώντας βιοσυσσώρευση τοξικών ουσιών (Ziccardi et al, 2016). Επιπρόσθετα, διάφορα πλαστικά έχουν βρεθεί να εκλύουν ουσίες οι οποίες λειτουργούν ως ενδοκρινικοί διαταράκτες για θαλάσσια είδη (Chen et al, 2019). Υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για τις πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, ωστόσο δεν έχουν πραγματοποιηθεί οι αναγκαίες έρευνες σχετικά με τον κίνδυνο κατανάλωσης θαλάσσιων ειδών που έχουν επηρεαστεί από μικροπλαστική ρύπανση ή την απευθείας κατανάλωση μικροπλαστικών από τον άνθρωπο (Lusher et al, 2017). Παρά την έλλειψη δεδομένων ωστόσο, πιθανοί μηχανισμοί δράσης των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία έχουν ήδη ταυτοποιηθεί (Wright and Kelly, 2017). Σε

συνδυασμό με τις πιθανές επιπτώσεις για την ανθρώπινη υγεία, οι συγκεντρώσεις μικροπλαστικών που εντοπίζονται σε εμπορικά σημαντικά είδη ψαριών και μαλακίων, μπορούν να διακινδυνεύσουν σε μεγάλο βαθμό την διατροφική ασφάλεια σημαντικού τμήματος του παγκόσμιου πληθυσμού και να επιφέρουν σημαντικά οικονομικά κόστη και ζημιές (Gallo et al, 2018). Τα ψάρια και άλλα θαλάσσια είδη παίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην διατροφή εκατομμυρίων ανθρώπων ανά τον κόσμο, ειδικά σε αναπτυσσόμενες παράκτιες περιοχές, με δισεκατομμύρια σε ετήσιο τζίρο (FAO, 2016). Υψηλές συγκεντρώσεις μακροπλαστικών έχουν αναφερθεί να επηρεάζουν αρνητικά αλιείες επιβίωσης στην Ινδονησία από το 1992 ακόμα (Nash, 1992). Συμπεριλαμβάνοντας επιπτώσεις στον τουρισμό και την ψυχαγωγία, η παγκόσμια θαλάσσια πλαστική ρύπανση εκτιμάται ότι προκαλεί ετήσια ζημία της τάξης των 0.5 έως 2.5 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, σε ό,τι αφορά την αξία των οφελών που λαμβάνονται από τις οικοσυστημικές υπηρεσίες (Beaumont et al, 2019). Το κόστος για το περιβάλλον και τη θαλάσσια ζωή, πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, σε συνδυασμό με την άμεση και έμμεση οικονομική ζημία που προκαλείται, κάνουν επιτακτική την ανάγκη εύρεσης λύσης για το πρόβλημα της θαλάσσιας ρύπανσης.

Παράλληλα με τις προσπάθειες μείωσης της παραγωγής πλαστικών απορριμμάτων και κατάλληλης διαχείρισης, ο εντοπισμός των ΘΠΑ και η απομάκρυνσή τους από το θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί σημαντικό ζήτημα. Τα ΘΠΑ που έχουν ξεβραστεί σε παραλίες μπορούν να εντοπιστούν και απομακρυνθούν με σχετική ευκολία, ενώ μια σειρά προσπαθειών επικεντρώνονται στην απομάκρυνση των ΘΠΑ από την επιφάνεια της θάλασσας (π.χ. Ocean Cleanup Project). Οι προσπάθειες εντοπισμού των ΘΠΑ ενώ βρίσκονται ακόμα στην επιφάνεια επικεντρώνονται κυρίως στην ταυτοποίηση περιοχών συγκέντρωσης και μοτίβων μεταφοράς κάνοντας χρήση μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη φυσικές διεργασίες και δεδομένα από επιφανειακούς drifters (Critchell and Lambrechts, 2016; Mansui et al, 2015; Lebreton et al, 2012; Maximenko et al, 2011; Law et al, 2010). Ο εντοπισμός ΘΠΑ μέσω τηλεπισκοπικών μεθόδων είναι ένας ανερχόμενος κλάδος, και μέχρι στιγμής δεν έχει προταθεί κάποιος ολοκληρωμένος αλγόριθμος εντοπισμού κάνοντας χρήση ανοιχτών τηλεπισκοπικών δεδομένων. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην επεξεργασία ανοιχτών δορυφορικών δεδομένων Sentinel 2 που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια δύο πειραμάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου (Plastic Litter Project 2018 & 2019), με σκοπό τη μελέτη των φασματικών υπογραφών στόχων πλαστικού και την εκτίμηση της δυνατότητας χρήσης διάφορων μεθόδων ταξινόμησης για τον εντοπισμό ΘΠΑ στη θαλάσσια επιφάνεια μέσω πολυφασματικών δορυφορικών δεδομένων.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Φασματικά χαρακτηριστικά νερού και πλαστικών

Όλα τα υλικά και αντικείμενα, φυσικά ή ανθρωπογενή, χαρακτηρίζονται από μια σειρά οπτικών ιδιοτήτων – πχ. χρώμα, δείκτης διάθλασης, ανακλαστικότητα κτλ. Αυτές οι χαρακτηριστικές οπτικές ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών υλικών σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Στα εργοστάσια ανακύκλωσης για παράδειγμα χρησιμοποιούνται μηχανές οπτικού διαχωρισμού για τη διάκριση μεταξύ των διάφορων ανακυκλώσιμων υλικών (εικόνα. 7). Η ανακλαστικότητα συγκεκριμένα είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό σε τηλεπισκοπικές εφαρμογές, καθώς καθορίζει την απόκριση ενός υλικού σε διαφορετικά μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΦ). Όταν φως προσπίπτει στην επιφάνεια κάποιου αντικειμένου, ο λόγος προσπίπτοντος προς ανακλώμενου φωτός για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (ή για ένα εύρος του φάσματος) ονομάζεται φασματική ανακλαστικότητα, και είναι χαρακτηριστική του υλικού, ανεξαρτήτως άλλων εξωτερικών παραγόντων (Peddle et al, 2001). Αν οι τιμές της προσπίπτουσας και ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι γνωστές, η ανακλαστικότητα του αντικειμένου-στόχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση του μεταξύ άλλων υλικών (εικόνα 8).

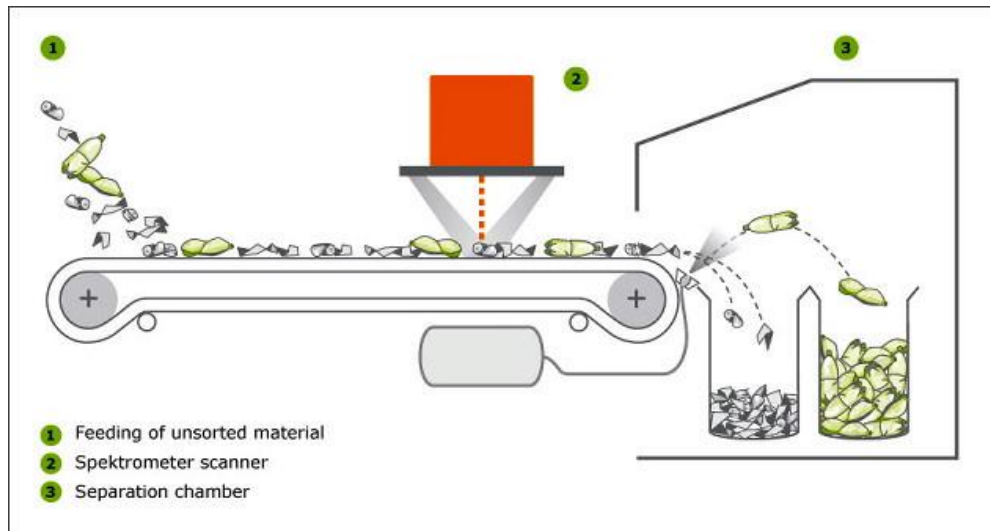


Figure 7: Μηχανή υπερφασματικού διαχωρισμού σε εφαρμογές ανακύκλωσης (Πηγή: VAN DYK recycling solutions)

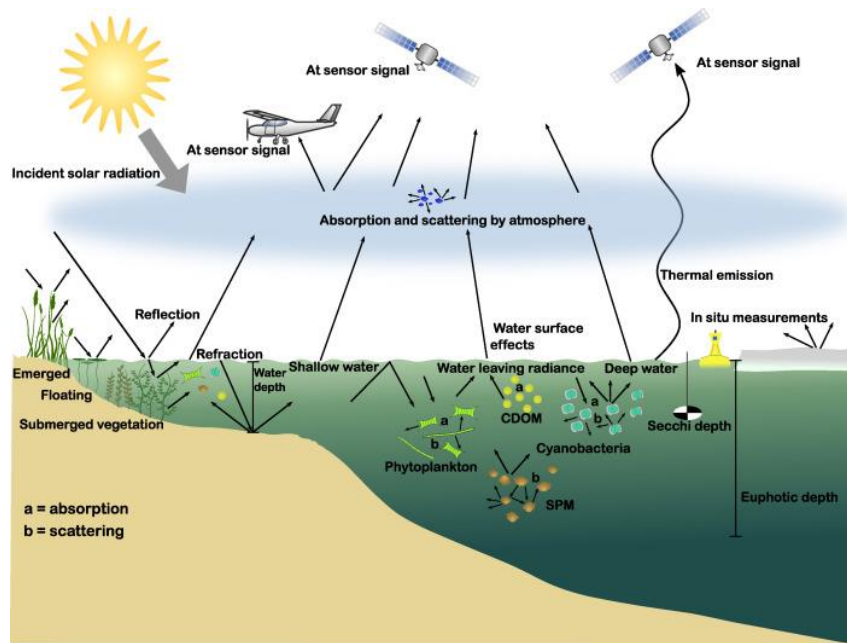


Figure 8: Αλληλεπίδραση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας, αντικειμένων και τηλεπισκοπικών αισθητήρων (Πηγή: Dornhofer and Oppelt, 2015)

Όταν η ανακλαστικότητα (ή απόκριση/σήμα) ενός υλικού αποτυπωθεί συναρτήσει των αντίστοιχων μηκών κύματος του ΗΦ, η καμπύλη που παράγεται ονομάζεται φασματική υπογραφή και είναι χαρακτηριστική του υλικού προς ανάλυση (Huete, 2004). Η φασματική υπογραφή ενός υλικού αποτυπώνει ιδιαίτερα φασματικά χαρακτηριστικά (όπως για παράδειγμα περιοχές απορρόφησης – μήκη κύματος του ΗΦ τα οποία απορροφούνται από το υλικό και ένα πολύ μικρό μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών υλικών σε τηλεπισκοπικά δεδομένα (εικόνα. 9).

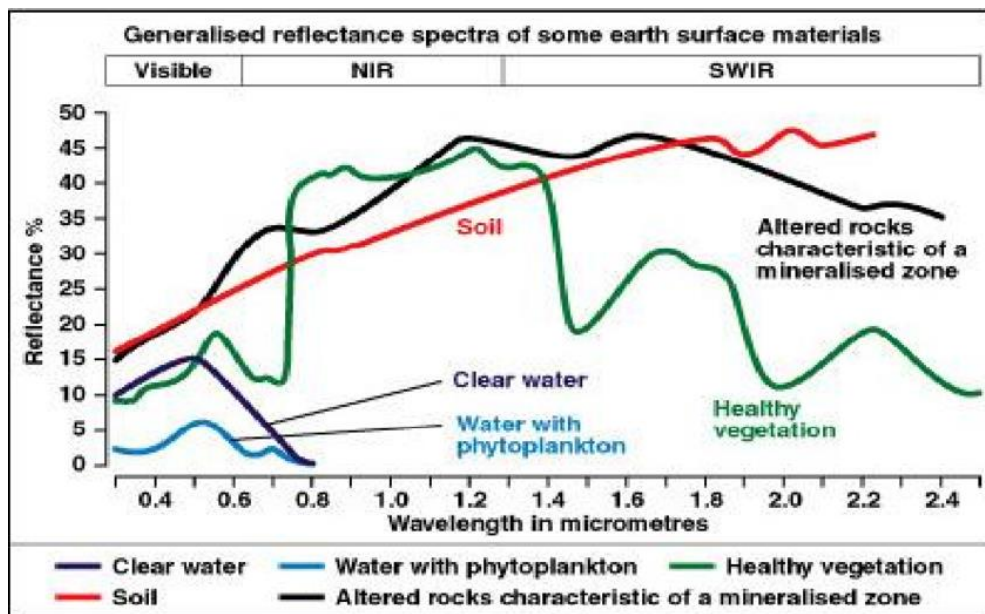


Figure 9: Φασματικές υπογραφές κοινών υλικών (Πηγή: Oshira, 2014)

Η ατμόσφαιρα της Γης αποτελείται από αέρια και υδρατμούς, ουσίες οι οποίες έχουν διαφορετικές φασματικές υπογραφές και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος/περιοχές απορρόφησης. Ως αποτέλεσμα, σε κάποιες περιοχές του ΗΦ μικρό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται (π.χ. το ορατό εύρος του φάσματος στα 400-700 nm), ενώ σε άλλες μικρό τμήμα της ακτινοβολίας του ήλιου φτάνει στην επιφάνεια της Γης (πχ. το υπεριώδες τμήμα του φάσματος <400nm). Οι χαρακτηριστικές αυτές περιοχές απορρόφησης της ατμόσφαιρας, καθορίζουν ποια τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τηλεπισκοπικές εφαρμογές (εικόνα 10).

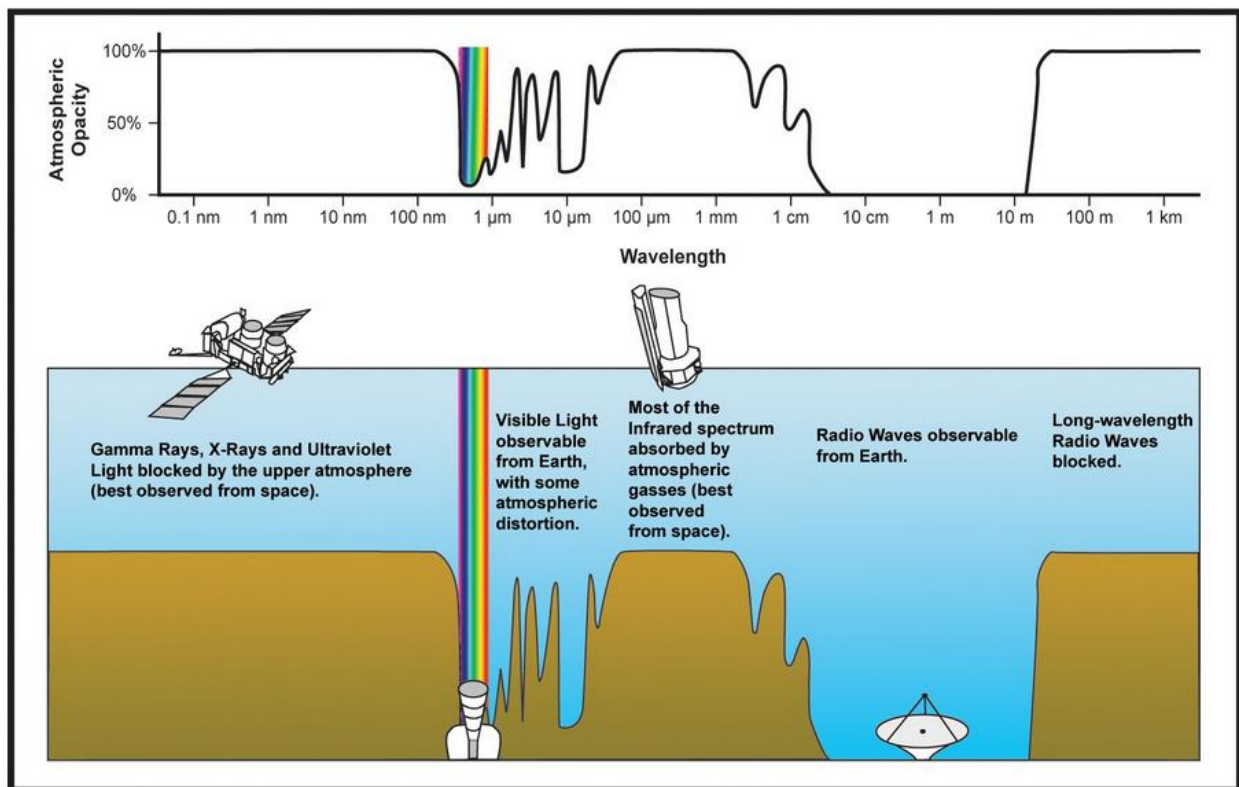


Figure 10: Κανάλια ατμοσφαιρικής απορρόφησης και μετάδοσης (Πηγή: Humbolt university, http://gsp.humboldt.edu/olm_2016/courses/GSP_216_Online/lesson2-1/atmosphere.html)

Το υγρό νερό έχει χαμηλή ανακλαστικότητα σε όλο το εύρος του ΗΦ, με μια κορυφή στο μπλέ κομμάτι του ορατού τμήματος του φάσματος (εικόνα. 11). Στο εγγύς και μέσο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, το νερό έχει σχεδόν μηδενική απόκριση/υψηλή απορρόφηση. Ωστόσο, το θολερό νερό ή νερό με υψηλές περιεκτικότητες χλωροφύλλης μπορεί να έχει διαφορετική απόκριση, κυρίως στο ορατό τμήμα του φάσματος (Gomez, 2014). Η ανάκλαση του πυθμένα της θάλασσας, καθώς και η κατοπτρική ανάκλαση του νερού – το φαινόμενο του sunglint, επίσης προκαλούν έντονη απόκριση, μη χαρακτηριστική αυτής του νερού. Τμήμα της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται στην διεπιφάνεια αέρα-νερού, και η υπόλοιπη εισχωρεί στο νερό διαθλώμενη προς τα κάτω (εικόνα 12). Μέσα στη στήλη νερού, το φως απορροφάται και

σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις, και αν η στήλη νερού είναι αρκετά βαθιά ώστε ο βυθός να μην είναι ορατός (οπτικά βαθύ νερό), το ποσό του φωτός που σκεδάζεται προς τα πάνω περιέχει πληροφορίες για τα οπτικά ενεργά συστατικά του νερού (π.χ. συγκεντρώσεις χλωροφύλλης, θολερότητα κ.α) (Goddijn-Murphy et al, 2018). Η συνολική υποεπιφανειακή απόκριση του νερού είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των συστατικών που απορροφούν (νερό, αιωρούμενα στερεά, διαλυμένη οργανική ύλη, πλανγκτόν) και αυτών που οπισθοσκεδάζουν (πλανγκτόν, αιωρούμενα στερεά) την ηλιακή ακτινοβολία (Gordon et al, 1975). Αυτές οι συγκεντρώσεις είναι που καθορίζουν το προφανές χρώμα του ωκεανού και μπορούν να υπολογιστούν μέσω τηλεπισκοπικών μετρήσεων. Η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία χωρίζεται σε άμεση (δέσμες ακτινών του ήλιου) και διάχυτη ακτινοβολία (φως το οποίο διαχέεται σε όλες τις κατευθύνσεις από την ατμόσφαιρα), και ο λόγος τους εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την γωνία ύψους του ήλιου (Jerlov, 1968).

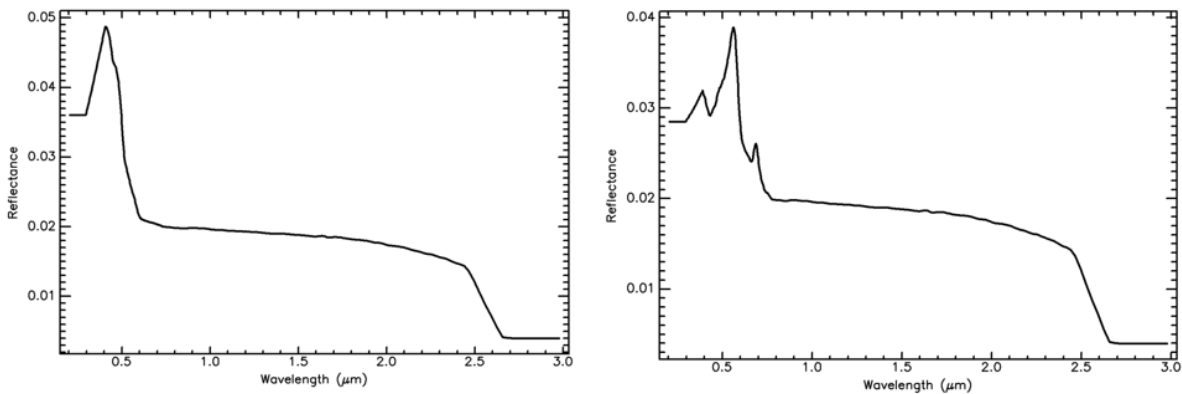


Figure 11: Φασματική υπογραφή ωκεάνιων (αριστερά) και παράκτιων υδάτων από USGS Spectral Library v. 7 (Πηγή: Kokaly et al, 2017)

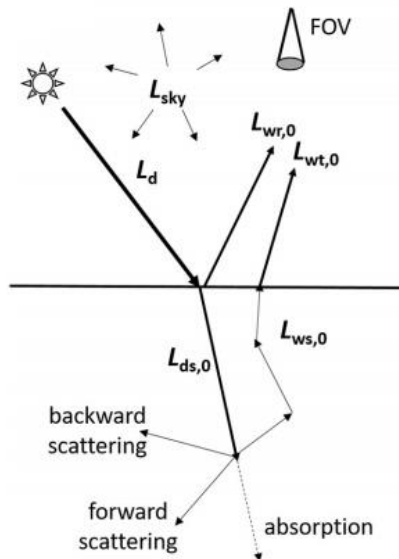


Figure 12: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης του φωτός με τη διεπιφάνεια νερού-αέρα. (Πηγή: Goddijn-Murphy et al, 2018)

Τα πλαστικά αντιθέτως, αναλόγως σύνθεσης αλλά και χρώματος, μπορούν να έχουν ποικίλες φασματικές υπογραφές (εικόνα 12).

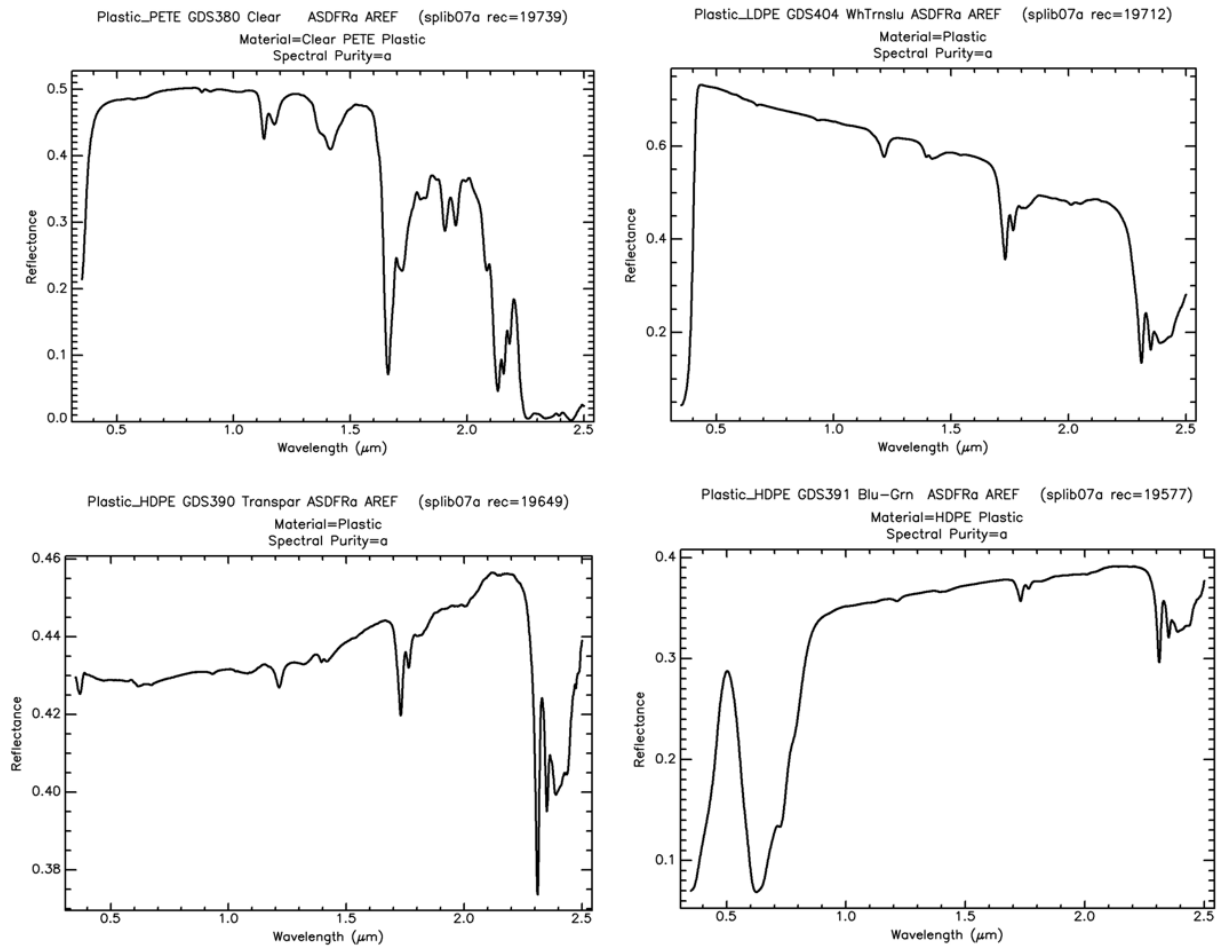


Figure 13: Υπερφασματικές υπογραφές τυπικών πλαστικών: clear PET, white translucent LDPE, clear HDPE and Blue-green HDPE (Πηγή: Kokaly et al, 2017)

Σε γενικές γραμμές, συγκριτικά με το νερό τα πλαστικά έχουν πολύ πιο υψηλή απόκριση σε όλο το εύρος του ΗΦ (εικόνες 11&12). Πολλά πλαστικά τείνουν να έχουν μια σχεδόν επίπεδη απόκριση στο ορατό και χαμηλό εγγύς υπέρυθρο (NIR) (περίπου 400 με 1000nm), με χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης στο εγγύς και μέσο υπέρυθρο (SWIR) (1000 με 3000nm). Μέθοδοι όπως η υπερφασματική εικονομετρία, η φασματομετρία μετασχηματισμού Φουριέ και Ράμαν φασματοσκοπία, χρησιμοποιούνται ευρέως για την ταυτοποίηση και τον διαχωρισμό διαφορετικών πλαστικών σε εργοστάσια ανακύκλωσης, κάνοντας χρήση των ιδιαίτερων οπτικών χαρακτηριστικών των πλαστικών στο NIR και SWIR τμήμα του ΗΦ (Vazquez-Guardado et al, 2015; Moroni et al, 2015; Ulrici et al, 2013; Serranti et al, 2012).

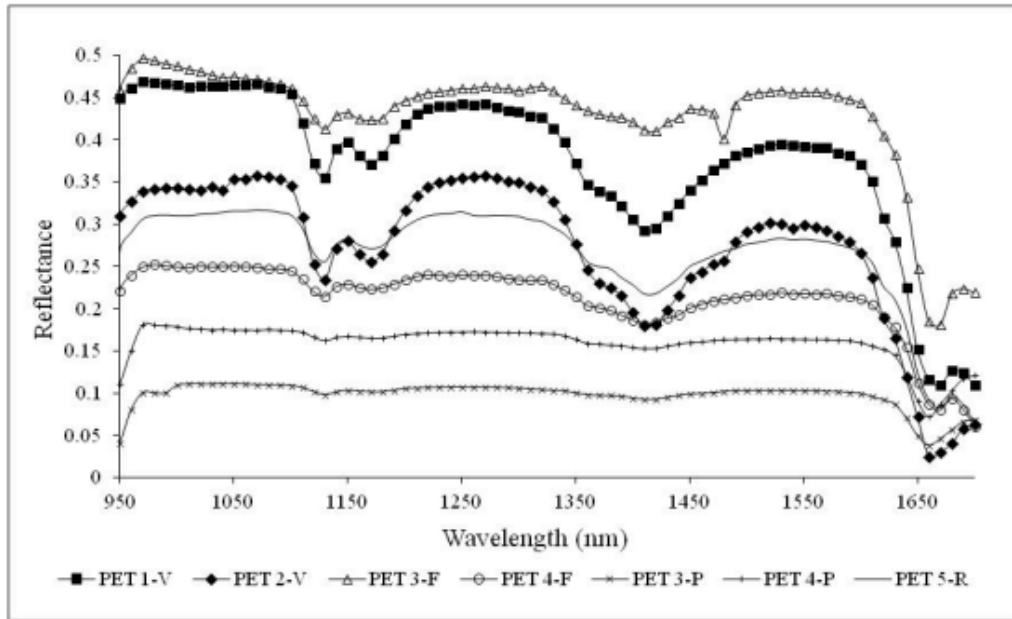


Figure 14: Υπογραφές δημάτων PET στο εγγύς υπέρυφρο τμήμα του φάσματος (Πηγή: Moroni et al, 2015)

2.2 Το φαινόμενο του sunglint

Το φως του ήλιου περνάει μέσα από την ατμόσφαιρα, όπου απορροφάται και διαχέεται από ατμοσφαιρικά αέρια και σωματίδια, και αλληλεπιδρά με τη στήλη νερού, όπου απορροφάται και διαχέεται από το νερό, τις διαλυμένες και αιωρούμενες ουσίες, πριν φτάσει στον τηλεπισκοπικό αισθητήρα. Σε αυτή την περίπτωση, η απόκριση του νερού, θεωρώντας πως έχει προηγηθεί ατμοσφαιρική διόρθωση, θα οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην ύλη μέσα στη στήλη νερού, ενώ δεν θα ξεπερνούσε το 40% της συνολικής απόκρισης στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA) (Harmel et al, 2017). Ωστόσο, η επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να προκαλέσει κατοπτρική ανάκλαση των ακτινών του ήλιου προς τον αισθητήρα (εικόνα 14), φαινόμενο γνωστό ως sunglint (Hedley et al, 2005). Οι Cox και Munk το 1954 αναφέρουν χαρακτηριστικά, «Αν η επιφάνεια της θάλασσας ήταν τελειώς ήρεμη, μια σαν σε καθρέπτη ανάκλαση του ήλιου θα ήταν ορατή στο οριζόντιο κατοπτρικό σημείο». Το σήμα του sunglint μπορεί να συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην συνολική απόκριση της στήλης νερού, ξεπερνώντας σε μεγάλο βαθμό την ακτινοβολία που διαχέεται από την ατμόσφαιρα και την υδάτινη στήλη (Harmel and Chami, 2012). Η γεωμετρία θέασης, η θέση του ήλιου και η κλίση των κυμάτων είναι οι κυρίαρχοι παράγοντες που καθορίζουν την παρουσία και ένταση του sunglint σε τηλεπισκοπικά δεδομένα (Hulburt, 1934; Cox and Munk, 1954a). Όταν η επιφάνεια της θάλασσας δεν είναι επίπεδη, αντί για μια μικρή πολύ λαμπρή περιοχή της επιφάνειας, οι ακτίνες του ήλιου μπορούν να αντανακλούν προς τον αισθητήρα από πολλές μικρές επιφάνειες, οδηγώντας σε μια μεγαλύτερη περιοχή επηρεασμένη από sunglint (Kay et al, 2009).

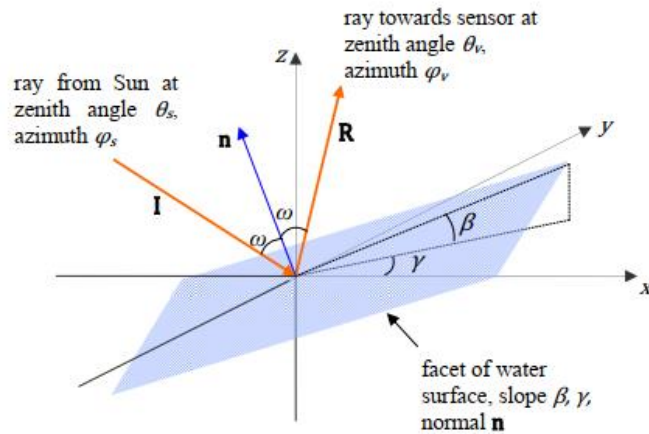


Figure 15: Γεωμετρία κατοπτρικής ανάκλασης (sun glint) (Πηγή: Kay et al, 2009)

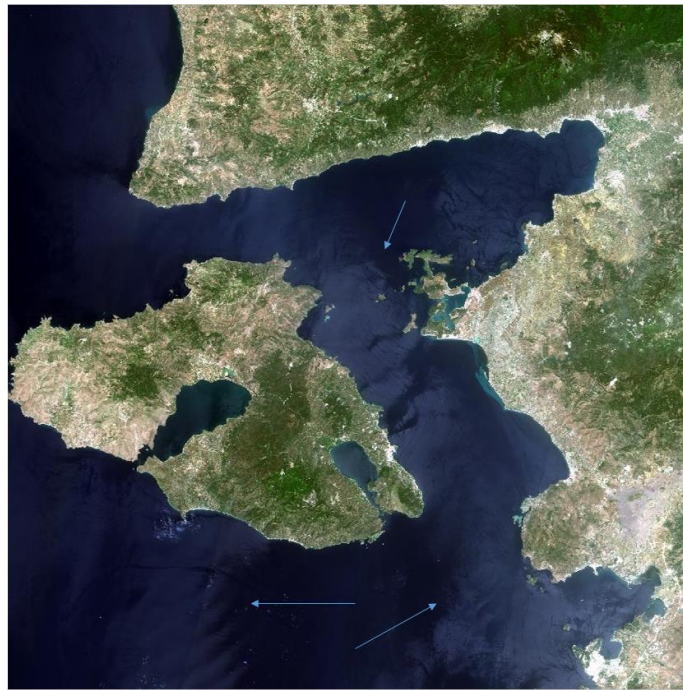


Figure 16: 20190528 L1C Sentinel 2 RGB έγχρωμο, τα βέλη δείχνουν περιοχές με glint.

Το sun glint διακρίνεται εύκολα στο άνωθεν L1C Sentinel 2 έγχρωμο σύνθετο της θαλάσσιας περιοχής της Λέσβου (εικόνα 15).

Το γεγονός ότι το sun glint μπορεί να επηρεάσει σε τέτοιο βαθμό την απόκριση της στήλης του νερού, το καθιστά έναν σημαντικό περιοριστικό παράγοντα σε υδάτινες τηλεπισκοπικές εφαρμογές (Harmel and Chami, 2012; Hochberg et al, 2003; Hedley et al, 2005; Harmel et al, 2017; Kay et al, 2009; Garaba et al, 2012 and others). Όταν το glint υπάρχει σε τηλεπισκοπικά δεδομένα, τα pixel που είναι επηρεασμένα είτε μασκάρονται και αποκλείονται από περαιτέρω

ανάλυση είτε διορθώνεται κάνοντας χρήση καναλιών αναφοράς για την εκτίμηση του σήματος του sunglint. Σε κάποιες περιπτώσεις το sunglint μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθούν συμπεράσματα για άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα στον εντοπισμό πετρελαιοκηλίδων (Hu et al, 2009).

Η ναδίρ γεωμετρία θέασης δορυφόρων όπως ο Sentinel 2 και ο Landsat 8, τους κάνει ιδιαίτερα επιρρεπής στο sunglint (Harmel et al, 2018). Σε συνδυασμό με τις ώρες λήψης των εικόνων πάνω από τη Μεσόγειο, ένα μεγάλο κομμάτι των εικόνων της Μεσογείου ενδέχεται να είναι επηρεασμένες από glint. Ο αποκλεισμός από την ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού pixel τα οποία είναι επηρεασμένα από glint θα οδηγούσε σε αποκλεισμένα pixel τα οποία ενδεχομένως να περιείχαν ΘΠΑ. Επομένως, το συνολικό σήμα του glint και τα επηρεασμένα pixel, είναι αναγκαίο να εκτιμάται και είτε να διορθώνεται, είτε με κάποιο τρόπο να ενσωματώνεται στη διαδικασία.

Οι αλγόριθμοι που διορθώνουν για sunglint μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, αυτούς οι οποίοι χρησιμοποιούν στατιστικά μοντέλα της επιφάνειας της θάλασσας για την εκτίμηση της πιθανότητας ύπαρξης glint και αυτούς που χρησιμοποιούν την απόκριση στα NIR και SWIR κανάλια για να εκτιμήσουν την ένταση του glint σήματος (Kay et al, 2009). Σε κάθε περίπτωση η συνεισφορά του glint εκτιμάται και αφαιρείται από το συνολικό σήμα, ενώ αν είναι πολύ έντονη τα επηρεασμένα pixel αφαιρούνται από τη διαδικασία. Στην πρώτη κατηγορία, οι περισσότερες μέθοδοι χρησιμοποιούν το στατιστικό μοντέλο Cox και Munk (Cox and Munk, 1954) για τον υπολογισμό της κατάστασης της επιφάνειας της θάλασσας για συγκεκριμένο διάνυσμα ανέμου για να προβλέψουν πόσο κάθε pixel της εικόνας είναι επηρεασμένο από glint (Wang and Bailey, 2001; Wang et al, 2002; Ottaviani et al, 2008; and others). Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για χαμηλής με μέτριας ανάλυσης εικόνες (100-1000m) του ωκεανού, ενώ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των ανεμολογικών μετρήσεων και δεν μπορούν να διορθώσουν υπερβολικά επηρεασμένα pixel. Σε εικόνες υψηλότερης ανάλυσης, όπου το μέγεθος του pixel δεν μπορεί να θεωρηθεί πολύ μεγαλύτερο των χαρακτηριστικών της επιφάνειας της θάλασσας και ως αποτέλεσμα πολλές από τις στατιστικές υποθέσεις δεν ισχύουν σε μεγάλο βαθμό (Kay et al, 2009), η δεύτερη κατηγορία μεθόδων χρησιμοποιείται κατά κόρον. Οι μέθοδοι αυτές κάνουν χρήση της σχεδόν μηδενικής απόκρισης του νερού στα NIR και SWIR τμήματα του φάσματος, υποθέτοντας πως σημαντική απόκριση σε αυτά τα τμήματα του φάσματος είναι αποτέλεσμα ατμοσφαιρικής διάχυσης και του φαινομένου του sunglint, αναλόγως του αν έχει πραγματοποιηθεί ατμοσφαιρική διόρθωση ή όχι (Vanhellemont, 2019; Harmel et al, 2018; Hedley et al, 2005; Hochberg et al, 2003). Το σήμα του glint στη συνέχεια παρεκτινείται στις υπόλοιπες μπάντες και διορθώνεται. Η χρήση των NIR καναλιών για την εκτίμηση του sunglint μπορεί να είναι προβληματική σε πολύ θολερά ή ρηγά νερά, καθώς η αντανάκλαση πυθμένα και τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν την συνολική απόκριση (Lavender et al, 2005; Siegel et al, 2000). Τα πλαστικά έχουν έντονη απόκριση στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, γεγονός που σημαίνει πως τυχόν διόρθωση για sunglint επηρεάζει την απόκριση pixel τα οποία περιέχουν κλάσμα ΘΠΑ.

2.3 Τηλεπισκοπικές εφαρμογές εντοπισμού ΘΠΑ

Οι τηλεπισκοπικοί αισθητήρες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες – ενεργητικούς και παθητικούς. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων αισθητήρων έγκειται στην πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι ενεργητικοί αισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν κυρίως στην περιοχή των μικροκυμάτων, διαθέτουν τη δική τους πηγή (πομπό) ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ οι παθητικοί αισθητήρες βασίζονται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του περιβάλλοντος, η οποία προέρχεται κυρίως από τον ήλιο. Και οι δύο τύποι τηλεπισκοπικών αισθητήρων έχουν προταθεί ως πιθανώς κατάλληλοι για τον εντοπισμό ΘΠΑ στη θαλάσσια επιφάνεια (Veenstra and Churnside, 2012), ωστόσο η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται αποκλειστικά σε παθητικούς δέκτες.

Τα τελευταία χρόνια, αυξανόμενος αριθμός μελετών έχουν επικεντρωθεί στον τηλεπισκοπικό εντοπισμό επιφανειακών ΘΠΑ, με τις περισσότερες να επικεντρώνονται στη χρήση υπερφασματικών δεδομένων. Οι φασματικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων (τα πλαστικά είναι ουσιαστικά σύνθετες μορφές υδρογονανθράκων) και κυρίως οι χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης, έχουν εξεταστεί εδώ και πολλά χρόνια για εφαρμογή σε τηλεπισκοπικά δεδομένα (Cloutis, 1989). Κατά τη δεκαετία του 1990 τουλάχιστον 2 μελέτες εστίασαν στη χρήση πολυφασματικών δεδομένων (Landsat Thematic Mapper και Daedalus) για τον εντοπισμό υδρογονανθράκων (Bannert et al, 1994; Kühn and Hörig, 1995), ωστόσο η φασματική ανάλυση των δύο αυτών αισθητήρων δεν ήταν αρκετά υψηλή ώστε να διακρίνονται οι περιοχές απορρόφησης των υδρογονανθράκων, όπως μπορούν να εντοπιστούν μέσω φασματομετρίας πεδίου (Hörig et al, 2001).

Το 2001, οι Hörig et al. χρησιμοποίησαν υπερφασματικά δεδομένα HyMap από περιοχές οι οποίες περιείχαν στόχους αναφοράς, όπως αμμώδες έδαφος, έδαφος εμποτισμένο με πετρέλαιο, γρασίδι, πλαστικές επιφάνειες (μουσαμάδες), με σκοπό την ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπερφασματικό εντοπισμό και τη χαρτογράφηση υδρογονανθράκων. Χρησιμοποίησαν φασματόμετρο πεδίου για την συλλογή των φασματικών χαρακτηριστικών των στόχων αναφοράς, εντοπίζοντας χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης των υδρογονανθράκων στα 1730 και 2310 nm, σε συμφωνία με τον Cloutis (1989). Συγκρίνοντας τις υπογραφές αναφοράς με τα υπερφασματικά δεδομένα HyMap προχώρησαν σε επιτυχή χαρτογράφηση υδρογονανθράκων στην περιοχή μελέτης. Καταλήγουν πως υπερφασματικά δεδομένα με υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), σε συνδυασμό με φασματομετρία πεδίου για τον καθορισμό υπογραφών αναφοράς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση των περιοχών απορρόφησης των υδρογονανθράκων και τον ακριβή εντοπισμό τους .

Οι Kühn et al. (2004), συμπληρώνοντας τους Hörig et al. (2001) και χρησιμοποιώντας τις περιοχές απορρόφησης που είχαν ήδη ταυτοποιηθεί, ανέπτυξαν έναν δείκτη (Hydrocarbon Index – HI) για τον εντοπισμό υδρογονανθράκων με τη χρήση υπερφασματικών εικόνων. Κάνοντας χρήση της χαμηλής ενέργειας περιοχής απορρόφησης στα 1730 nm, ανέπτυξαν μια εξίσωση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με υπερφασματικά δεδομένα που περιέχουν τα μήκη κύματος της περιοχής απορρόφησης (εξίσωση 1).

$$HI = (\lambda_B - \lambda_A) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B \quad (1)$$

Όπου: λ_A ; R_A , λ_B ; R_B , λ_C ; R_C είναι ζεύγη μήκους κύματος/ανακλαστικότητας για κάθε σημείο αναφοράς όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Τα ακριβή μήκη κύματος μπορούν να μεταβληθούν βάσει των καναλιών του εκάστοτε αισθητήρα.

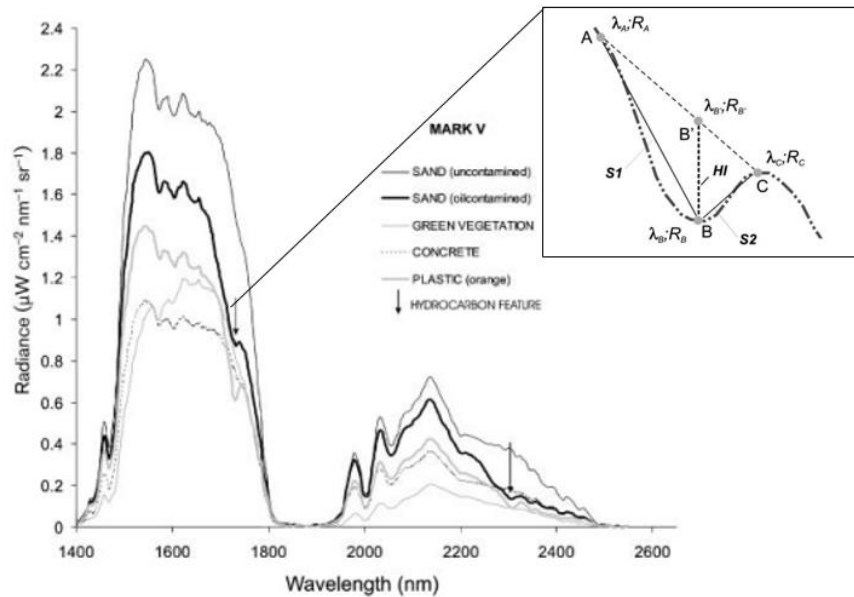


Figure 17: Υπογραφές εδάφους εμποτισμένον με πετρέλαιο και πλαστικών όπου φαίνεται η περιοχή απορρόφησης 1730 nm (Πηγή: modified from Kühn et al, 2004)

Καταλήγουν πως ο δείκτης HI παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα, με την προϋπόθεση τα υπερφασματικά δεδομένα να είναι υψηλής ραδιομετρικής ποιότητας και χωρικής ανάλυσης, με υψηλό SNR, να έχουν ληφθεί από βαθμονομημένους αισθητήρες και χωρίς επιρροή από την ατμόσφαιρα η οποία δεν μπορεί να διορθωθεί επιτυχώς.

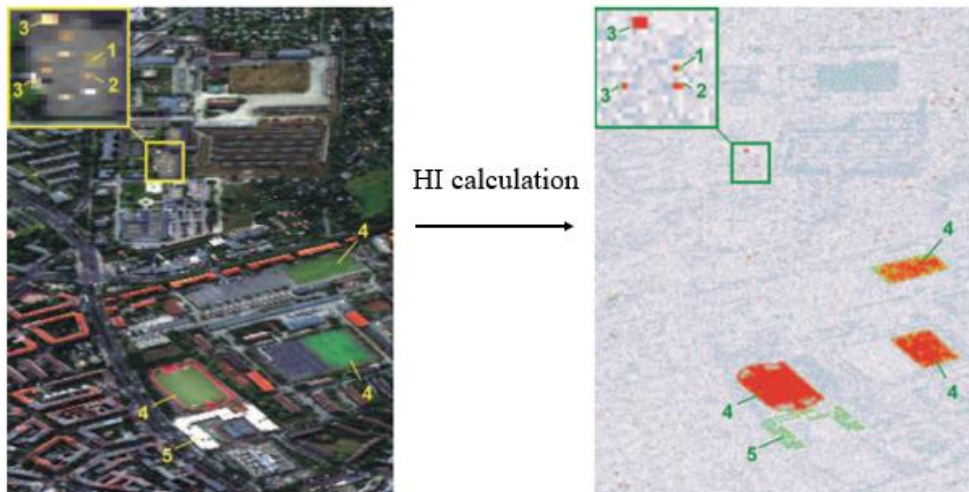


Figure 18: HyMap RGB σύνθετο και χάρτης υδρογονανθράκων μετά την εφαρμογή του HI (Πηγή: modified from Kühn et al, 2004)

Οι Garaba και Dierssen (2018) χρησιμοποίησαν ένα PANalytical ASD FieldSpec 4 φασματομέτρο για να καταγράψουν τις φασματικές υπογραφές στεγνών και υγρών δειγμάτων μικροπλαστικών τα οποία είχαν συλλεχθεί στον Βόρειο Ατλαντικό, δείγματα μακροπλαστικών που είχαν ξεβραστεί σε ακτές και πλαστικών σφαιριδίων που χρησιμοποιούνται στην πλαστική βιομηχανία, σε ένα εύρος από 350 έως 2500 nm. Οι υπογραφές τους εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας εντοπισμού ΘΠΑ με τη χρήση οπτικών αισθητήρων. Ταυτοποίησαν χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης στα NIR και SWIR τμήματα του φάσματος – συγκεκριμένα ~931, 1215, 1417 και 1732 nm (fig.19).

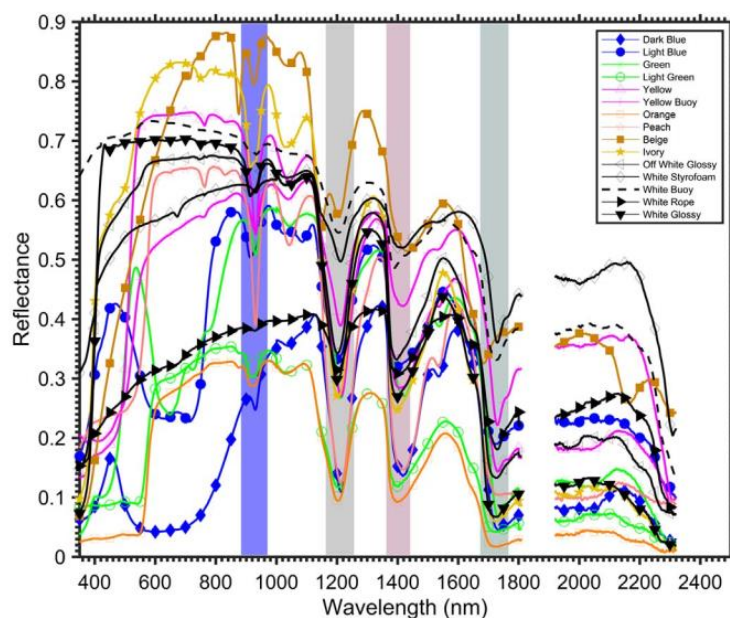


Figure 19: Ανακλαστικότητα μακροπλαστικών με τις χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης (Πηγή: Garaba and Dierssen, 2018)

Οι φασματικές υπογραφές των δειγμάτων μικροπλαστικών μπορούσαν να αντιπροσωπευτούν από μια συνολική μέση υπογραφή, η οποία είχε μέτρια ομοιότητα με κοινά πλαστικά, σε συμφωνία με αναφορές για τη σύνθεση των μικροπλαστικών στη θάλασσα (εικόνα 20). Σε αντίθεση τα μακροπλαστικά δείγματα είχαν πιο διακριτές υπογραφές οι οποίες δεν μετατράπηκαν σε μια μέση υπογραφή καθώς δεν θα ήταν σίγουρα αντιπροσωπευτική της σύνθεσης των επιφανειακών ΘΠΑ. Ο παράγοντας της υγρασίας βρέθηκε πως μειώνει την ένταση του σήματος, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλει το σχήμα της φασματικής υπογραφής. Λόγω των περιοχών απορρόφησης της ατμόσφαιρας, οι μάντες απορρόφησης 1215 και 1732 nm κρίθηκαν κατάλληλες για τηλεπισκοπικές εφαρμογές. Οι αυτές μάντες χρησιμοποιήθηκαν με τον HI από τους Kühn et al. (2004) (εξίσωση 2) για τη χαρτογράφηση συγκεντρώσεων πλαστικού σε χερσαίες υπερφασματικές εικόνες AVIRIS. Ο HI τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να ταιριάζει στα κανάλια των εικόνων AVIRIS.

$$HI_{1215} = L_{1197nm} - L_{1216nm} + 0.5 \times (L_{1235nm} - L_{1197nm}) \quad (2)$$

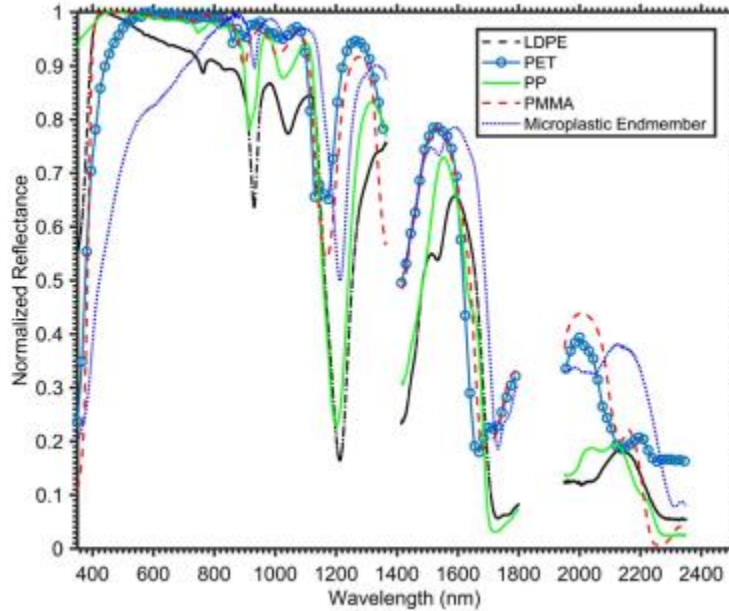


Figure 20: Κανονικοποιημένη μέση υπογραφή μικροπλαστικών και πλαστικών σφαιριδίων με τις χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης (Πηγή: Garaba and Diersse, 20018)

Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι ο HI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την χαρτογράφηση πλαστικών σε χερσαία περιβάλλοντα με τη χρήση υπερφασματικών εικόνων AVIRIS (εικόνα 21).

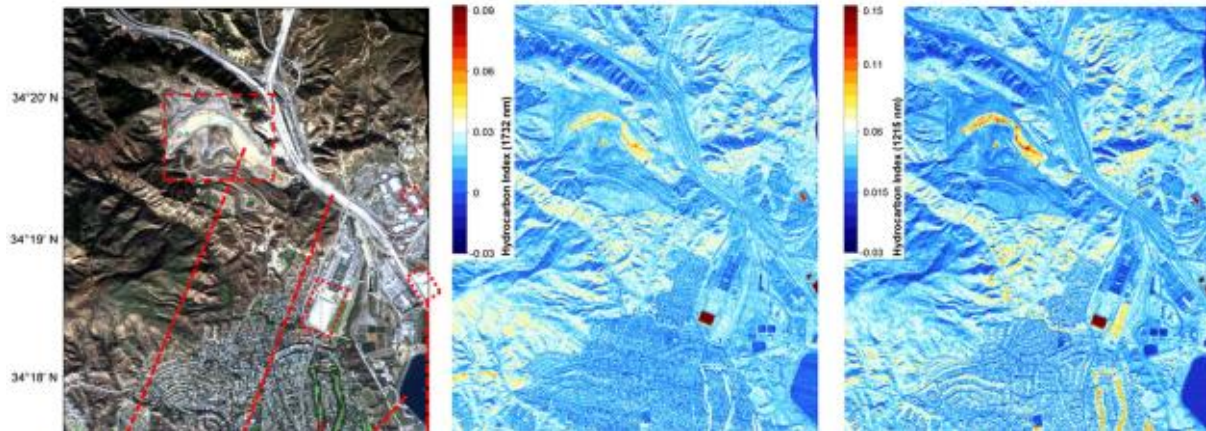


Figure 21: Έγχρωμο σύνθετο της περιοχής μελέτης και χάρτες που παρήχθησαν με τη χρήση του HI για τις 2 περιοχές απορρόφησης 1215 (δεξιά) και 1732 (αριστερά) (Πηγή: τροποποιημένο από Garaba et al, 2018)

Σε επόμενη έρευνα, οι Garaba et al. (2018) χρησιμοποίησαν ένα SASI-600 Imager (950 με 2450 nm) και πραγματοποιώντας πτήσεις με ένα αεροσκάφος Hercules C-130 κατέγραψαν εικόνες του GPGP. Ταυτόχρονα, καταγράφηκαν πολύ υψηλής ανάλυσης RGB εικόνες, οι οποίες γεωαναφέρθηκαν με τις υπερφασματικές εικόνες με σκοπό τον εντοπισμό ΘΠΑ από εκπαιδευμένους παρατηρητές. Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε ένα ghost net, τμήμα του οποίου

βρισκόταν πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι φασματικές υπογραφές των στόχων που ταυτοποιήθηκαν οπτικά συγκρίθηκαν με τις υπογραφές αναφοράς που είχαν καταγραφεί σε προηγούμενη μελέτη (Garaba and Dierssen, 2018), μέσω υπολογισμού της φασματικής γωνίας των υπογραφών. Επιπλέον, πραγματοποίησαν μια προσομοιωμένη ανάλυση φασματικού διαχωρισμού (εξίσωση 3), χρησιμοποιώντας τη μέση υπογραφή των pixel του νερού γύρω από το δίχτυ και αυτή του δικτυού σε διάφορες αναλογίες.

$$L_{mix} = f_{debris} \times L_{debris} + f_{seawater} \times L_{seawater} \quad (3)$$

Όπου: f είναι τα κλάσματα αφθονίας από 0 έως 1 για το πλαστικό και το νερό σε ένα μικτό pixel L_{mix} και L είναι οι ανακλαστικότητες για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Τέλος εκτίμησαν τη δυνατότητα εφαρμογής των ΗΙ που είχαν αναπτυχθεί έως τότε. Ταυτοποίησαν μια σειρά περιοχών απορρόφησης με αυτές στα 1215 και 1732 nm να παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η σύνθεση του δικτυού δεν ήταν δυνατό να ταυτοποιηθεί συγκρίνοντας με τις υπογραφές γνωστών πολυμερών από τη φασματική βιβλιοθήκη που είχε αναπτυχθεί. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φασματικού διαχωρισμού υποδεικνύουν πως οι περιοχές απορρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ΘΠΑ με αισθητήρες στο SWIR τμήμα του φάσματος. Μείωση στο κλάσμα πλαστικού ενός pixel συνεπάγεται μείωση της έντασης της περιοχής απορρόφησης. Καταλήγουν πως ένας απλοποιημένος αλγόριθμος ποσοτικοποίησης και εντοπισμού με τουλάχιστον τρία μήκη κύματος, συμπεριλαμβανομένης μίας εκ των περιοχών απορρόφησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις δύο χαρακτηριστικές περιοχές.

Σε μια παρόμοια μέθοδο, οι Acuña-Ruz et al (2018) πραγματοποίησαν επιβλεπόμενη ταξινόμηση μακροπλαστικών απορριμμάτων σε παραλίες με πολύ υψηλής ανάλυσης πολυφασματικές εικόνες WorldView 3 (WV3) και υπερφασματικές υπογραφές από μια σειρά φασματόμετρα. Τα μακροπλαστικά απορρίμματα (>25mm) συλλέχθηκαν από παραλίες στο αρχιπέλαγος Chiloé της Χιλής, οι οποίες αναλύθηκαν φασματικά χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά φασματομετρικά συστήματα (HyLogger 3 reflectance spectrometer, PS-300 Apogee και ASD Field Spec) σε ένα εύρος από 380 έως 2500 nm. Οι υπερφασματικές υπογραφές που συλλέχθηκαν (εικόνα 22) συγκεντρώθηκαν σε φασματική βιβλιοθήκη και μετατράπηκαν για να ταιριάζουν στα κανάλια του WorldView 3 δορυφορικού αισθητήρα κάνοντας χρήση του RSRCalculator (Duran-Alarcon et al, 2014).

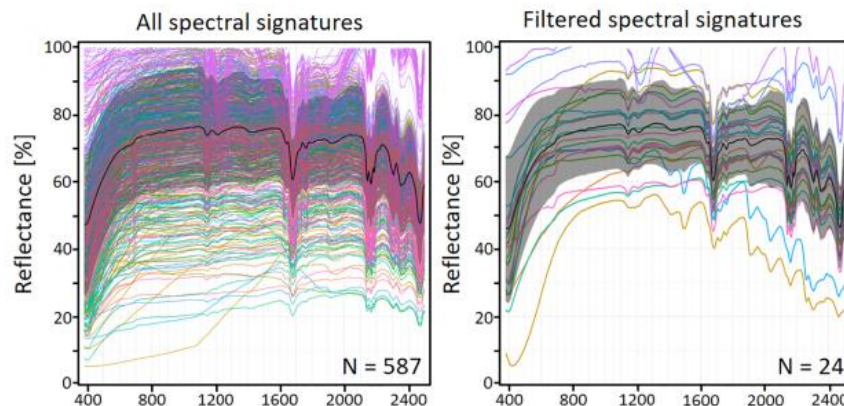


Figure 22: Φασματικές υπογραφές HyLogger 3, με χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης (Πηγή: Acuña-Ruz, 2018)

Με σκοπό την ανάπτυξη ενός επιβλεπόμενου μοντέλου ταξινόμησης, 90 pixel από κάθε κλάση (διογκωμένο πολυστυρένιο (EP) και «άλλα πλαστικά») επιλέχθηκαν από την εικόνα. Οι υπογραφές χρησιμοποιήθηκαν για να εκπαιδεύσουν μη-παραμετρικές μεθόδους όπως Ταξινόμηση Τυχαίου Δέντρου (RFC) και Support Vector Machine (SVM). Σε συμφωνία με άλλες μελέτες, εντοπίστηκαν χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης των πλαστικών στα 1670-1690 nm, 2130-2190 nm και 2430-2500 nm. Το EP είχε πολύ ιδιαίτερα φασματικά χαρακτηριστικά τα οποία επιτρέπουν τον διαχωρισμό του από άλλα πλαστικά και έτσι δημιουργήθηκαν δύο διακριτές κλάσεις: EP και μικτή για τα υπόλοιπα πλαστικά. Όλες οι μέθοδοι ταξινόμησης είχαν καλή απόδοση με ακρίβεια >75%, με την SVM μέθοδο να αποδίδει καλύτερα με ακρίβεια κοντά στο 90%.

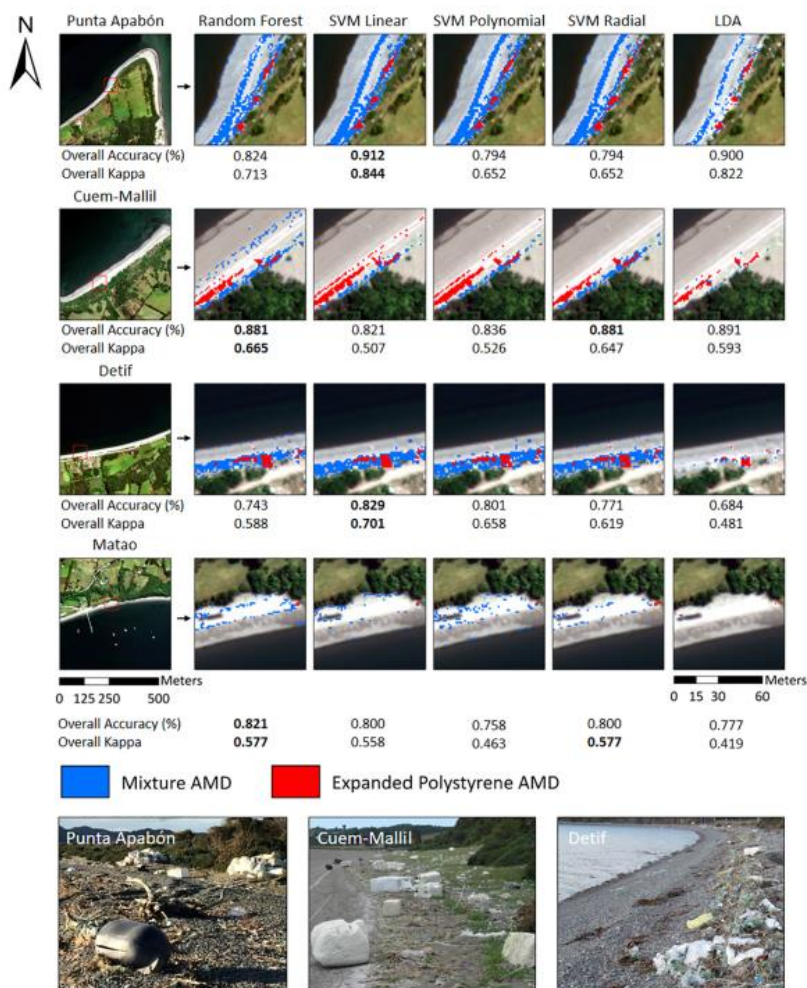


Figure 23: Εποπτευόμενη ταξινόμηση 4 παραλιών στην Χιλή (Πηγή: Acuña-Ruz, 2018)

Οι Goddijn-Murphy et al. (2018) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να ερμηνεύσουν την ανακλαστικότητα πλαστικών που επιπλέουν στην θαλάσσια επιφάνεια, βασιζόμενοι στην οπτική γεωμετρία και τις φασματικές υπογραφές των πλαστικών και του νερού. Το μοντέλο το χρώμα, τη διαφάνεια, ανακλαστικότητα και το σχήμα των ΘΠΑ. Οι ερευνητές έλαβαν υπόψη τους

διαφορετικούς τρόπους που τα πλαστικά που επιπλέουν στην επιφάνεια μεταβάλουν την ανακλαστικότητα της επιφάνειας υπό ναδίρ γωνία θέασης (εικόνα 25). Σε επόμενη μελέτη οι Goddijn-Murphy and Dufaur (2018) παρουσιάζουν μια εφαρμογή του μοντέλου κάνοντας χρήση της εξίσωσης μονού (εξίσωση 3) και διπλού καναλιού(εξίσωση 4) κατά Goddijn-Murphy et al. (2018), σε μια πειραματική διάταξη όπως φαίνεται στην εικόνα 24. Οι φασματικές υπογραφές κομματιών EPS και μπουκαλιών HDPE και PET καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας φασματόμετρο τύπου Analytical Spectral Devices FieldSpec Pro (350 – 2500 nm).

$$R_t(\lambda) = \varepsilon(f, \lambda)R_{w,0}(\lambda) + f(\rho_p(\lambda) - \varepsilon(f, \lambda)R_{w,0}(\lambda)) \quad (3)$$

$$f(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{R_t(\lambda_1) - R_t(\lambda_2)}{\Delta\rho_p(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (4)$$

Όπου: f είναι το κλάσμα αφθονίας πλαστικού σε σχέση με τη συνολική επιφάνεια και ως ε ορίζεται ένας «παράγοντας σκίασης», με σκοπό να ληφθεί υπόψη η μείωση του φωτός που φτάνει στην υδάτινη στήλη λόγω της σκίασης από τα πλαστικά που επιπλέουν στην επιφάνεια.

Αναφέρουν πως στην περίπτωση των πλαστικών μπουκαλιών – δύο παράλληλες επιφάνειες που αλληλεπιδρούν με το φως αντί για μία, η ναδίρ ανακλαστικότητα μπορεί να περιγραφεί ως το άθροισμα των ανακλαστικότητων των επάνω και κάτω επιφανειών (εικόνα 25).

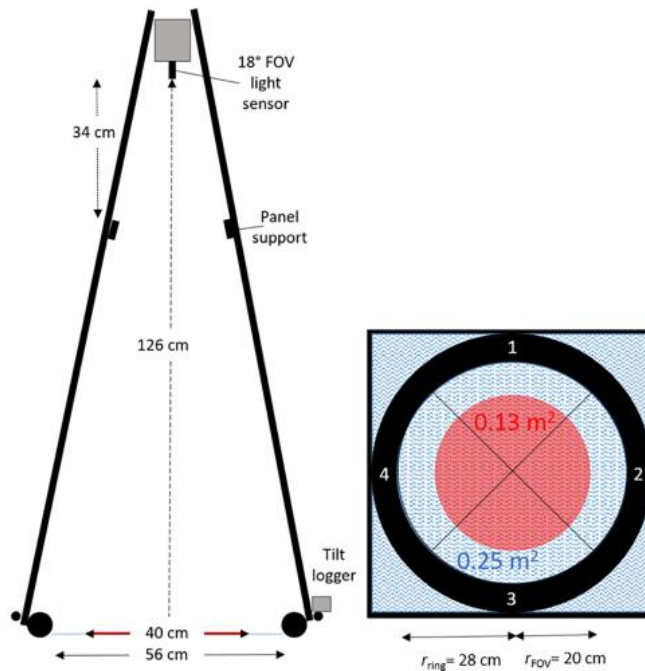


Figure 24: Πειραματική διάταξη με το πλαίσιο των στόχων στα δεξιά (Πηγή: Goddijn-Murphy and Dufaur, 2018)

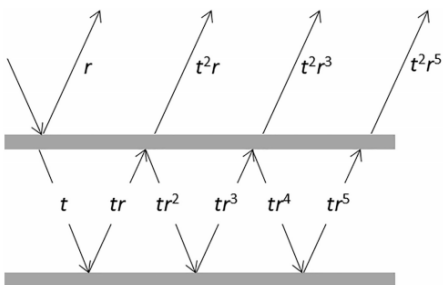


Figure 25: Ανάκλαση του φωτός περνώντας από δύο παράλληλες επιφάνειες ημιδιαφανούς πλαστικού (Πηγή: Goddijn-Murphy and Dufaur, 2018)

Το EPS βρέθηκε να έχει την υψηλότερη ανακλαστικότητα από τα τρία υλικά, ακολουθούμενο από το HDPE και το PET, ενώ όλα τα υλικά εμφάνισαν χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης στα 1680, 1730 και 1660 nm αντίστοιχα, ιδιαίτερα εμφανείς στο PET. Η επιρροή του μεγέθους στην ανακλαστικότητα των μπουκαλιών διερευνήθηκε χρησιμοποιώντας μπουκάλια 2 διαφορετικών μεγεθών και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως μεγαλύτερα μπουκάλια έχουν υψηλότερη ανακλαστικότητα. Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε οποιοδήποτε μήκος κύματος, με τα 850 nm να χρησιμοποιούνται στη μέθοδο μονής μάντας. Οι μετρήσεις πεδίου δεν κατέστη δυνατό να υπολογιστούν/αναπαραχθούν κάνοντας χρήση των συντελεστών ανακλαστικότητας που υπολογίστηκαν στο εργαστήριο. Τα αποτελέσματα επίσης δεν έδειξαν στοιχεία που να υποστηρίζουν την επιρροή του παράγοντα σκίασης στις τιμές ανακλαστικότητας. Η μέθοδος διπλής μάντας εφαρμόστηκε για $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$ – όπου η ανακλαστικότητα των πλαστικών είναι υψηλή και εκτός του ορατού φάσματος, και ως λ_2 η μάντα απορρόφησης του εκάστοτε υλικού. Παράλληλα, σε αυτά τα μήκη κύματος η ανακλαστικότητα του νερού είναι σχεδόν μηδενική. Σε γενικές γραμμές η ανακλαστικότητα των πλαστικών που επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού υπό φυσικό φως δεν αντιστοιχούσε ικανοποιητικά με τους συντελεστές ανακλαστικότητας που υπολογίστηκαν στο εργαστήριο. Ο τύπος πολυμερούς, ο βαθμός διαφάνειας, το σχήμα και η τραχύτητα της επιφάνειας των πλαστικών αντικειμένων ήταν καθοριστικοί παράγοντες στη σχέση μεταξύ της ανακλαστικότητας και του κλάσματος αφθονίας των πλαστικών και ως αποτέλεσμα δεν προτείνεται κάποιος γενικός αλγόριθμος εντοπισμού επιφανειακών ΘΠΑ.

Τέλος, οι Torouzelis et al. (2018), με τη βοήθεια φοιτητών και ερευνητών του τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών του Πανεπιστημίου Αιγαίου διοργάνωσαν ένα πείραμα κατά το οποίο κατασκεύασαν 3 10x10m στόχους από πλαστικά μπουκάλια PET, πλαστικές σακούλες σκουπιδιών LDPE μπλε χρώματος και νάυλον δίχτυα τα οποία υποστηρίζονταν από ένα πλαστικό πλέγμα. Οι στόχοι αγκυροβολήθηκαν στη θάλασσα περίπου 40 m από την ακτή στην τοποθεσία Τσαμάκια στη Μυτιλήνη της Λέσβου την 07/06/2018. Οι στόχοι χωροθετήθηκαν έτσι ώστε να επιπλέουν πάνω από λειμώνες *Posidonia oceanica* με σκοπό να προσομοιαστούν οι ιδιότητες οπτικά βαθειάς στήλης νερού (σχεδόν μηδενική NIR και SWIR ανακλαστικότητα) (εικόνα. 26). Οι καιρικές συνθήκες ήταν βέλτιστες με κύματα ύψους 1-2cm και χαμηλή ένταση ανέμου (2 m/s). Ένα μη επανδρωμένο εξακόπτερο drone S900 DJI χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή εικόνων των στόχων με μια σειρά καμερών: πολύ υψηλής ανάλυσης RGB εικόνες (Sony A5100), πολυφασματικές εικόνες 4 καναλιών (450, 500, 550 και

850 nm - Slantrange 3P; 550, 660, 735 και 790nm - Parrot Sequoia) και υψηλής ανάλυσης θερμικές εικόνες (FliR DUO R). Ταυτόχρονα, την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος, καταγράφηκαν πολυφασματικές εικόνες της περιοχής μελέτης και των στόχων από 3 διαφορετικούς δορυφόρους: Sentinel 2 (S2), WV3 και PlanetScope (PS). Οι πολύ υψηλής ανάλυσης RGB εικόνες από την Sony A5100 επεξεργάστηκαν για την παραγωγή ορθοφωτοχάρτη της περιοχής μελέτης, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την γεωαναφορά όλων των εικόνων που καταγράφηκαν κατά το πείραμα, συμπεριλαμβανομένων και των δορυφορικών εικόνων.

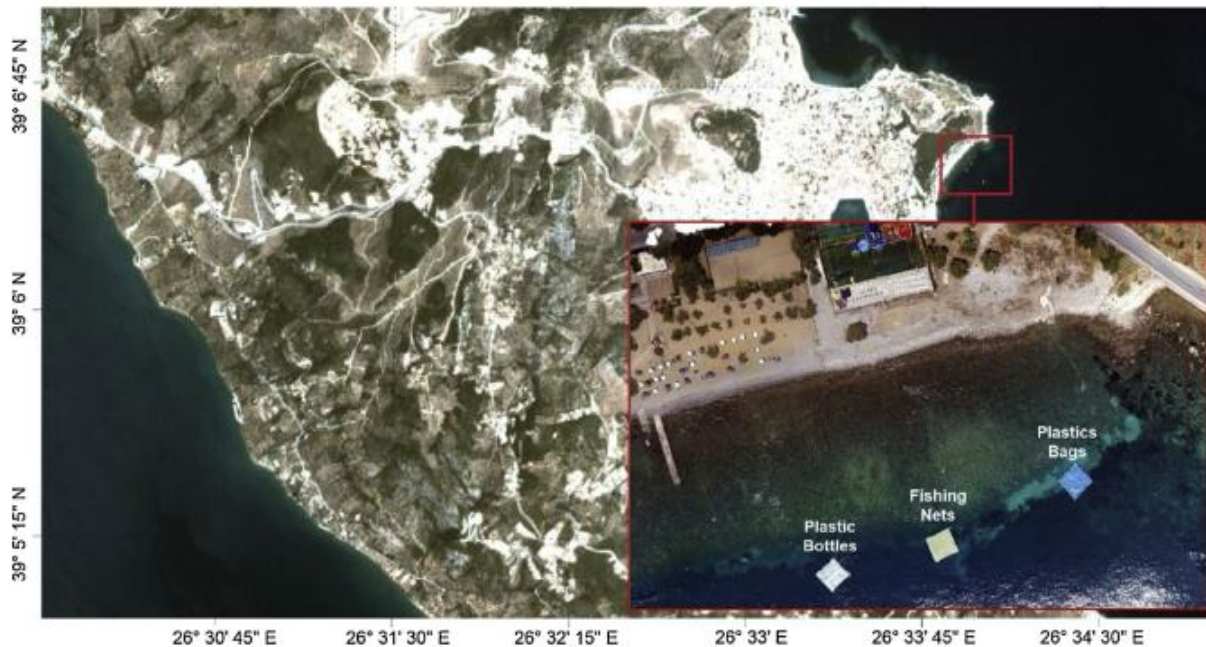


Figure 26: RGB εγχρωμα PlanetDove και Sony A5100 με τους τρεις στόχους (Πηγή: Topouzelis et al, 2018).

Το ποσοστό κάλυψης/κλάσμα αφθονίας των πλαστικών για κάθε pixel του στόχου εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τον πολύ υψηλής ανάλυσης ορθοφωτοχάρτη ο οποίος χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για τη βελτίωση της γεωαναφοράς της S2 εικόνας (εικόνα 27). Όλοι οι 10x10 m στόχοι διακρίνονταν εύκολα στις 10 μέτρων ανάλυσης μπάντες του S2, εκτός από τον στόχο με τις σακούλες οι οποίες δεν διακρίνονται ευκρινώς στο πράσινο και κόκκινο κανάλι του δορυφόρου (εικόνα 28), προσφέροντας στοιχεία για την δυνατότητα χρήσης δορυφορικών εικόνων S2 για τον εντοπισμό ΘΠΑ στην επιφάνεια της θάλασσας.

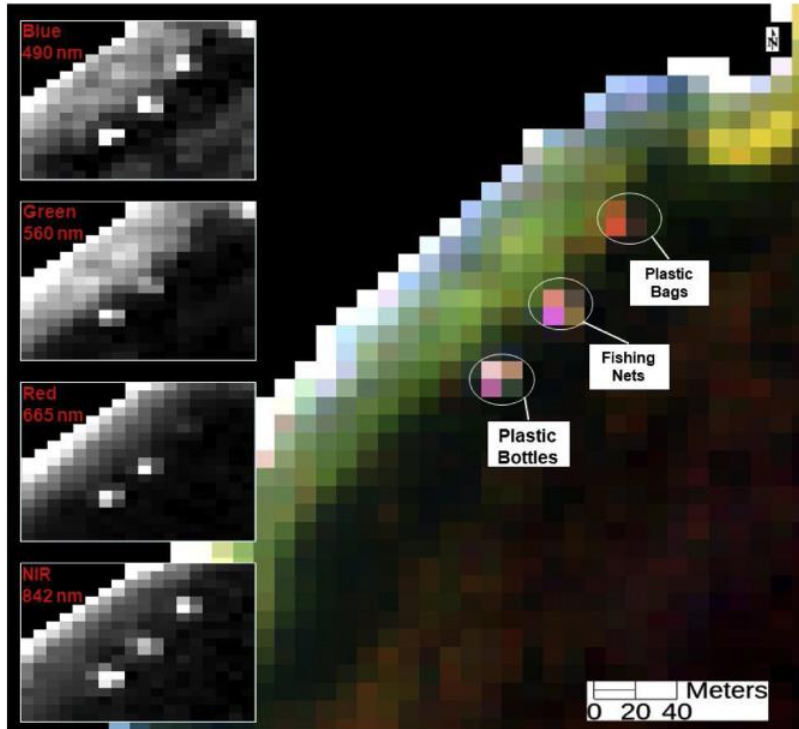


Figure 27: RGB σύνθετο και RGB και NIR greyscales των στόχων (Πηγή: Torouzelis et al, 2018)

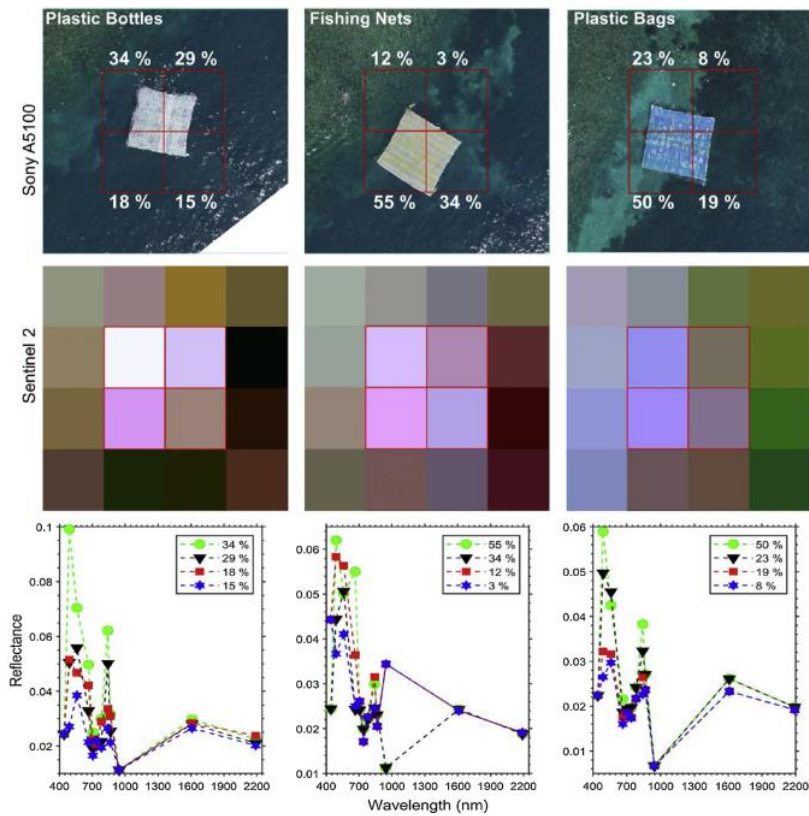


Figure 28: Κλάσματα αφθονίας πλαστικών και υπογραφές S2 – αριστερά προς δεξιά: PET μπουκάλια, δίχτυα, σακούλες HDPE (Πηγή: Torouzelis et al, 2018)

3. Εικόνες και Μεθοδολογία

3.1 Δορυφορικές εικόνες Sentinel 2 – Plastic Litter Project (PLP) 2019

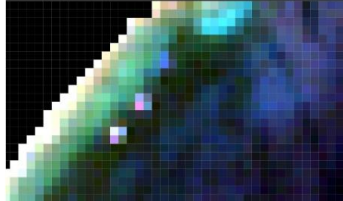
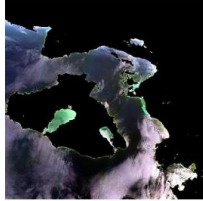
Από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο του 2019, πραγματοποιήθηκε ένα δεύτερο πείραμα από την ομάδα θαλάσσιας τηλεπισκόπησης (MRSG) στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου και με τη συμμετοχή φοιτητών και ερευνητών του τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών. Για το πείραμα, σε συνέχεια του PLP 2018, κατασκευάστηκαν μια σειρά πλαστικών στόχων και στόχων από φυσικά υλικά – καλάμια.

Οι στόχοι αποτελούνταν από ένα πλαίσιο 5x5 m κατασκευασμένο από σωλήνες PVC \varnothing 2.5 cm. Στην κάτω πλευρά του πλαισίου ήταν στερεωμένο ένα πλαστικό πλέγμα με μάτι 1.4 cm, το οποίο δημιουργούσε μια βάση για τα υλικά των στόχων. Για τους στόχους των μπουκαλιών, δύο τρύπες ανοίχτηκαν στο καπάκι και την βάση των πλαστικών μπουκαλιών, τα οποία συνδέθηκαν με πετονιά ψαρέματος δημιουργώντας λωρίδες των 16 μπουκαλιών, χωρίς τις ετικέτες. Οι μπλε HDPE σακούλες στερεώθηκαν στο πλαστικό πλέγμα με πετονιά ψαρέματος. Οι στόχοι φυσικών υλικών κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας κοινά καλάμια. Τα καλάμια απαντώνται ευρέως στα παράκτια Μεσογειακά οικοσυστήματα και συχνά αποτελούν σημαντικό τμήμα των φυσικών υλικών στην επιφάνεια της θάλασσας (Suaria et al, 2015). Τα καλάμια συλλέχθηκαν από κοντινές περιοχές, κόπηκαν σε κατάλληλο μήκος και αφέθηκαν να ξεραθούν ώστε να μειωθεί η περιεκτικότητα φωτοσυνθετικών ουσιών οι οποίες ενδέχεται να μετέβαλαν την φασματική απόκριση του στόχου. Στη συνέχεια τα καλάμια δέθηκαν μεταξύ τους με σκοινί σε τεταρτημόρια 2.5x2.5 m, τα οποία στη συνέχεια δένονταν στα πλαίσια σχηματίζοντας τους 5x5 m στόχους. Οι στόχοι ήταν δυνατό να συνδεθούν μεταξύ τους σχηματίζοντας μεγαλύτερους στόχους διαφορετικής σύνθεσης. Πέρα από το μέγεθος, μεταβαλλόταν επίσης η καλυπτικότητα των στόχων – κλάσμα της συνολικής επιφάνειας του στόχου που είναι καλυμμένη από πλαστικά. Για τον στόχο με τις πλαστικές σακούλες, τμήμα του πλαστικού πλέγματος πάνω στο οποίο ήταν δεμένες οι σακούλες αφαιρούνταν τελειώς από το πλαίσιο, αποκαλύπτοντας την επιφάνεια της θάλασσας. Για τους στόχους με τα πλαστικά μπουκάλια αυτό δεν ήταν δυνατό, καθώς χωρίς το πλαστικό πλέγμα οι τρύπες στα μπουκάλια επέτρεπαν μικρές ποσότητες νερού να εισχωρήσει γεμίζοντάς τα, αυξάνοντας δραματικά το βάρος του στόχου, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα απώλειας μπουκαλιών στο θαλάσσιο περιβάλλον και καταστροφή των στόχων στην προσπάθεια απομάκρυνσης από τη θάλασσα. Ως εκ τούτου, αφαιρέθηκαν μόνο σειρές από τα μπουκάλια με το πλέγμα να παραμένει στη θέση του, γεγονός που αναμφίβολα επηρεάζει την φασματική απόκριση του στόχου και ως αποτέλεσμα η υπογραφή δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί με ακρίβεια με το κλάσμα αφθονίας των πλαστικών. Συνολικά έγινε λήψη 5 Sentinel 2 πολυφασματικών εικόνων (εικόνα 29) υπό πολύ καλές κυματικές συνθήκες (<10 cm χωρίς αφρό), παράλληλα με σειρά πολύ υψηλής ανάλυσης RGB εικόνων με ένα DJI Phantom drone.

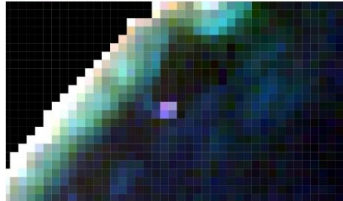
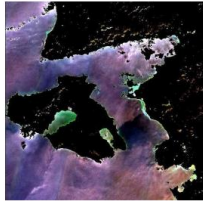
Οι πλαστικές σακούλες ήταν βρεγμένες κατά την εκτέλεση του πειράματος, ωστόσο δεν ήταν δυνατό να εκτιμηθεί με ακρίβεια το κατά πόσο ήταν βρεγμένα τα πλαστικά μπουκάλια, καθώς τμήμα της επιφάνειας των μπουκαλιών ερχόταν σε επαφή με το νερό και τα μπουκάλια μπορούν να περιστρέφονται με την κίνηση της θάλασσας. Τα βρεγμένα πλαστικά παρουσιάζουν μειωμένη απόκριση σε σχέση με στεγνά δείγματα (Garaba and Dierssen, 2018). Η χαμηλή απόκριση του στόχου με τις σακούλες στο PLP 2018, πέραν των φασματικών χαρακτηριστικών του υλικού,

οφείλεται εν μέρει στον παράγοντα της υγρασίας. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στα φασματικά χαρακτηριστικά του στόχου των PET μπουκαλιών, καθώς είχαν την εντονότερη απόκριση στις S2 εικόνες και οι φασματικές ομοιότητες μεταξύ των υπογραφών των στόχων υπονοούν πως είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μια κοινή μέση υπογραφή. Ο στόχος με τα δίχτυα δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη καθώς το πλαστικό πλέγμα, με την συμμετοχή της αντανάκλασης από τον πυθμένα, είναι κυρίως υπεύθυνο για την φασματική απόκριση. Ωστόσο μπορεί να χρησιμεύσει για την εκτίμηση της συμμετοχής του πλέγματος στην φασματική απόκριση του στόχου των μπουκαλιών.

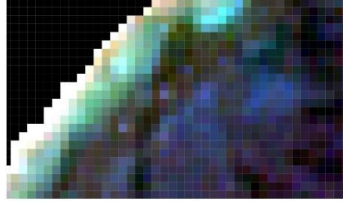
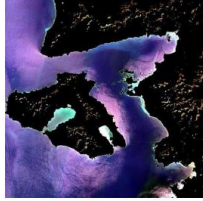
➤ 20180607
10x10m στόχοι: PET
μπουκάλια, μπλε LDPE
σακούλες & nylon
δίχτυα, 100% κάλυψη



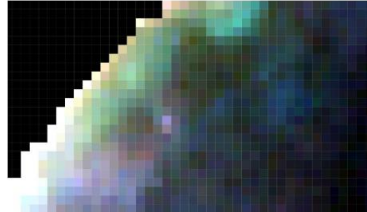
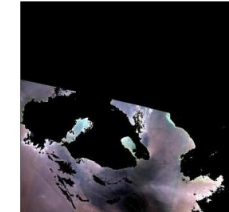
➤ 20190418
5x20m στόχος: PET &
LDPE, 100% κάλυψη



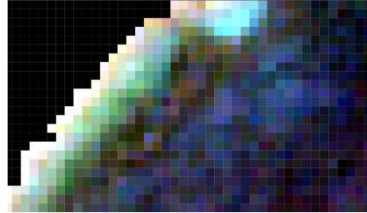
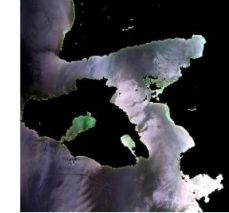
➤ 20190503
5x5m στόχοι: PET &
LDPE, 100% κάλυψη



➤ 20190518
5x10m στόχοι: PET &
LDPE, 80% κάλυψη



➤ 20190528
5x10m στόχοι: PET &
LDPE, 50% κάλυψη



➤ 20190607
10x10m στόχος: PET &
LDPE, 25% κάλυψη
5x10m στόχος: καλάμια,
100% κάλυψη

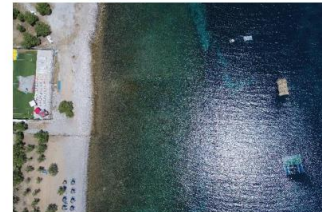
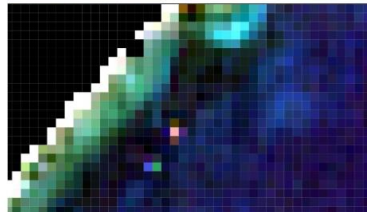
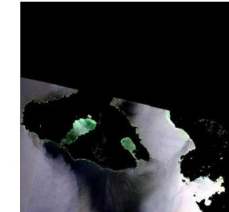


Figure 29: Sentinel 2 ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες της περιοχής μελέτης και των στόχων και υψηλής ανάλυσης RGB εικόνες αναφοράς, σύνολο 6 ημερομηνίες

3.2 Μεθοδολογία

3.2.1 Sentinel 2 BRDF παραμόρφωση

Οι Κρεμεζή και Καραθανάση (2019) έδειξαν πως η γεωμετρία των 12 ανιχνευτών (detectors) της συστάδας του αισθητήρα του Sentinel 2 δορυφόρου προκαλεί παραμόρφωση λόγω της δισδιάστατης συνάρτησης κατανομής ανακλαστικότητας (bidirectional reflectance distribution function -BRDF) στην εικόνα επηρεάζοντας την απόκριση των pixel, η οποία είναι πιο εμφανής πάνω σε υδάτινες σκηνές λόγω των οπτικών ιδιοτήτων του νερού. Ταυτοποίησαν πως οι κεντρικοί ανιχνευτές - #6 και #7, με γωνία θέασης πολύ κοντά στη ναδίρ, επηρεάζονται λιγότερο από το φαινόμενο της παραμόρφωσης το οποίο αυξάνει προς τους εξωτερικούς ανιχνευτές, με γωνίες θέασης μερικές μοίρες εκτός της ναδίρ, και κορυφώνεται στους ανιχνευτές #11 και #12. Το αποτύπωμα των ανιχνευτών στις 6 εικόνες ελέγχεται για να εξακριβωθεί το κατά πόσο η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην λωρίδα κάποιου ανιχνευτή ο οποίος παρουσιάζει έντονη παραμόρφωση η οποία χρήζει διόρθωσης.

3.2.2 Ατμοσφαιρική διόρθωση και διόρθωση για sunglint

Για την ατμοσφαιρική διόρθωση και τη διόρθωση για sunglint (ή απλά glint) των S2 L1C εικόνων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ACOLITE (v. 20190326.0), λογισμικό που χρησιμοποιείται ευρέως για την ατμοσφαιρική διόρθωση υδάτινων σκηνών. Το ACOLITE εφαρμόζει έναν τροποποιημένο αλγόριθμο συνταιριάσματος σκοτεινού φάσματος (dark spectrum fitting -DSF), ο οποίος χρησιμοποιεί τα «σκοτεινά» pixel της σκηνής για να εκτιμήσει την διάχυτη ατμοσφαιρική ακτινοβολία (ρ_{path}) (Vanhellemont, 2019). Ο αλγόριθμος υπολογίζει το ρ_{path} (το ποσό της ακτινοβολίας το οποίο φτάνει στον αισθητήρα λόγω ατμοσφαιρικής διάχυσης) κάνοντας δύο βασικές παραδοχές: 1) η ατμόσφαιρα είναι ως ένα βαθμό ομοιογενής, ώστε το ρ_{path} να μπορεί να θεωρηθεί σταθερό στο σύνολο της περιοχής μελέτης και 2) η περιοχή μελέτης περιέχει pixel με σχεδόν μηδενική ανακλαστικότητα, γεγονός που σημαίνει πως σε τουλάχιστον ένα κανάλι για αυτά τα pixel η ακτινοβολία που φτάνει στον αισθητήρα είναι αποκλειστικά η ρ_{path} . Το ACOLITE εφαρμόζει επίσης μάσκα υψηλών νεφών (cirrus clouds) μέσω του καναλιού του S2 στα 1300 nm και μάσκα στεριάς μέσω των SWIR ή NIR καναλιών.

Ο DSF αλγόριθμος επιλέγει τα pixel που δίνουν την χαμηλότερη εκτίμηση για το ρ_{path} και ως αποτέλεσμα τα pixel με έντονο sunglint αποφεύγονται από την εκτίμηση του ρ_{path} , γεγονός που σημαίνει πως το σήμα του glint επηρεάζει την τελική ανακλαστικότητα του νερού (Vanhellemont, 2019). Με την παραδοχή πως το νερό έχει μηδενική ανακλαστικότητα σε ένα κανάλι αναφοράς, το σήμα του glint (ρ_g) μπορεί να εκτιμηθεί θεωρώντας πως η ανακλαστικότητα του νερού στο κανάλι αναφοράς οφείλεται αποκλειστικά στο glint. Το ρ_g στη συνέχεια υπολογίζεται και για τα υπόλοιπα κανάλια λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο άμεσης ατμοσφαιρικής διαπερατότητας και την ανακλαστικότητα Fresnel στην διεπιφάνεια νερού-αέρα. Το ACOLITE εκτιμά το ρ_g στα δύο SWIR κανάλια του S2 και το κανάλι που δίνει το χαμηλότερο ρ_g χρησιμοποιείται για την διόρθωση για να αποφευχθούν αρνητικές τιμές στο άλλο SWIR κανάλι του δορυφόρου. Στην ουσία, κάθε pixel με μη μηδενική ανακλαστικότητα στα SWIR κανάλια διορθώνεται για glint, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η απόκριση των pixel των στόχων, καθώς και σε συνθήκες χωρίς glint τα πλαστικά έχουν έντονη απόκριση στο SWIR εύρος του φάσματος.

3.2.3 Ανάλυση φασματικών υπογραφών

Στις εικόνες όπου οι στόχοι ήταν ξεκάθαρα διακριτοί, οι υπογραφές των pixel των στόχων και του νερού αποτυπώθηκαν γραφικά με σκοπό την οπτική σύγκριση των υπογραφών, ενώ παράλληλα υπολογίστηκε η φασματική γωνία μεταξύ των υπογραφών (εξίσωση 8) ώστε να εκτιμηθεί η μεταξύ τους ομοιότητα. Για τα pixel νερού υπολογίζεται μια μέση υπογραφή από την περιοχή μελέτης, ενώ για τα pixel των στόχων μια μέση υπογραφή από τα pixel που εμφανώς επηρεάζονται από τους στόχους.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\sum x \cdot y}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \quad (8)$$

Όπου: x και y είναι διαφορετικές υπογραφές. Μια γωνία θ ίση με 0° υποδηλώνει πολύ έντονη φασματική ομοιότητα, με αυξανόμενες γωνίες να υποδηλώνουν μικρότερη ομοιότητα και γωνία 90° να υποδηλώνει σχεδόν μηδενική ομοιότητα. Η φασματική ομοιότητα καθορίζεται ως πολύ καλή ($0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$), καλή ($5^\circ < \theta \leq 10^\circ$), μέτρια ($10^\circ < \theta \leq 15^\circ$), ασθενής ($15^\circ < \theta \leq 20^\circ$) και πολύ ασθενής ($20^\circ < \theta$), κατά Garaba and Dierssen (2018).

3.2.4 Γραμμικός Φασματικός Διαχωρισμός

Ο γραμμικός φασματικός διαχωρισμός (linear spectral unmixing -LSU) χρησιμοποιείται κυρίως σε υπερφασματικά δεδομένα για την εκτίμηση του κλάσματος αφθονίας οπτικά ενεργών «συστατικών» ενός μικτού pixel, κάνοντας την υπόθεση πως η συνολική απόκριση κάθε μικτού pixel είναι αποτέλεσμα γραμμικού συνδυασμού των υπογραφών καθενός από τα επιμέρους συστατικά του pixel (Adams et al, 1986). Η εξίσωση 9 περιγράφει την γραμμική σχέση μεταξύ των κλασμάτων αφθονίας και των αντίστοιχων αποκρίσεων για κάθε συστατικό των pixel του στόχου και για μήκος κύματος λ .

$$R_{mix}(\lambda) = f_p \times R_p(\lambda) + f_w \times R_w(\lambda) \quad (9)$$

Όπου: R_{mix} είναι η ανακλαστικότητα του μικτού pixel για μήκος κύματος λ και f_p , R_p , f_w και R_w είναι το κλάσμα αφθονίας και η ανακλαστικότητα του πλαστικού για μήκος κύματος λ .

Στις περισσότερες περιπτώσεις, εισάγεται ένας περιορισμός ώστε το άθροισμα των κλασμάτων αφθονίας που απαρτίζουν το pixel να είναι ίσο με τη μονάδα, και στην περίπτωση που το pixel αποτελείται από 2 συστατικά, γνωρίζοντας το κλάσμα του ενός είναι αρκετό για να υπολογιστεί το κλάσμα του δεύτερου συστατικού (εξίσωση 10). Ο περιορισμός αυτός υποδηλώνει επίσης πως δεν υπάρχουν άγνωστα συστατικά στο pixel και πως κανένα συστατικό δεν μπορεί να έχει αρνητικό κλάσμα αφθονίας.

$$f_p = 1 - f_w \quad (10)$$

Τώρα στην περίπτωση που τα κλάσματα αφθονίας των συστατικών και η υπογραφή ενός από τα δύο συστατικά είναι γνωστή, η εξίσωση μπορεί να μετασχηματιστεί με σκοπό να υπολογιστεί η υπογραφή του δεύτερου συστατικού (εξίσωση 11).

$$R_p(\lambda) = \frac{R_{mix}(\lambda) - f_W \times R_W(\lambda)}{f_p} \quad (11)$$

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, σε μια κυκλική διαδικασία με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων:

- 1) Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα κλάσματα αφθονίας που είχαν υπολογιστεί από τους Torouzelis et al. (2018) στην εικόνα 20180607 με σκοπό τον υπολογισμό της υπογραφής των πλαστικών μπουκαλιών PET κάνοντας χρήση της εξίσωσης 11. Για το endmember του νερού χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές υπογραφές: 1) η μέση υπογραφή των pixel νερού της περιοχής μελέτης κοντά στους στόχους, 2) η μέση υπογραφή των pixel νερού γύρω από τους στόχους και 3) η προσαρμοσμένη στα κανάλια του Sentinel 2 υπογραφή για τα παράκτια ύδατα από την φασματική βιβλιοθήκη της USGS v.7 (Kokaly et al, 2017). Η φασματική βιβλιοθήκη της USGS περιέχει υπερφασματικές υπογραφές φυσικών και ανθρωπογενών υλικών, οι οποίες προσφέρονται επίσης προσαρμοσμένες στους αισθητήρες πολυφασματικών δορυφόρων σύμφωνα με την συνάρτηση φασματικής απόκρισης των καναλιών του αισθητήρα. Παρόλο που οι στόχοι επιπλέον κυρίως πάνω από λειμώνες *P. oceanica* η υδάτινη στήλη δεν είναι οπτικά βαθιά και επομένως η αντανάκλαση του πυθμένα ενδέχεται να επηρεάζει την συνολική απόκριση. Οι 3 διαφορετικές υπογραφές για το νερό χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί το κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γενική κοινή υπογραφή του νερού χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει προηγούμενη γνώση των οπτικών χαρακτηριστικών της υδάτινης στήλης.
- 2) Στη συνέχεια, η άνωθεν υπολογισμένη υπογραφή του PET καθώς και η υπογραφή από την φασματική βιβλιοθήκη χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση 9 για να υπολογιστούν τα κλάσματα αφθονίας των pixel των στόχων, τα οποία στη συνέχεια συγκρίθηκαν με αυτά που είχαν υπολογιστεί από τους Torouzelis et al. (2018). Για το spectral unmixing χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο εργαλείο του λογισμικού ENVI v.5.5.2.

3.2.5 Matched Filtering

Το matched filtering ως επεξεργασία είναι αρκετά παρεμφερής με το LSU, ωστόσο αντί για τα κλάσματα αφθονίας όλων (ή τουλάχιστον 2 αν δεν εφαρμόζεται ο περιορισμός της μονάδας) των συστατικών ενός pixel, υπολογίζεται μόνο το κλάσμα αφθονίας του/των endmember ενδιαφέροντος σε κάποιο μικτό pixel. Ο αλγόριθμος υπολογίζει το κλάσμα αφθονίας των endmember ενδιαφέροντος κάνοντας μερικό unmixing, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα υπόλοιπα συστατικά του pixel. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν δεν υπάρχει προηγούμενη γνώση των υπογραφών όλων των endmembers ενός pixel, γεγονός που ενδεχομένως την κάνει ιδανική για τον εντοπισμό ΘΠΑ στην επιφάνεια διαφορετικών τύπων υδάτων.

3.2.6 Προτεινόμενος δείκτης FDI

Με σκοπό τη διερεύνηση χρήσης πράξεων μεταξύ καναλιών για τον εντοπισμό ΘΠΑ στην θαλάσσια επιφάνεια, εφαρμόστηκαν μια σειρά δεικτών, ενώ προτείνεται και ένας νέος δείκτης “floating debris index” (FDI) (εξίσωση 12), ο οποίος αναλύεται περισσότερο στο κεφάλαιο 4.6. Διερευνήθηκε επίσης η δυνατότητα χρήσης του δείκτη HI (Kühn et al, 2004), ωστόσο χρήση του σε πολυφασματικά δεδομένα S2 δεν ήταν δυνατή καθώς η φασματική ανάλυση του αισθητήρα δεν είναι τέτοια ώστε να περιέχεται η αναγκαία περιοχή απορρόφησης σε κάποιο κανάλι. Επίσης η χρήση του HI βασίζεται στην μειωμένη απόκριση των πλαστικών στις χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης στο SWIR εύρος του φάσματος, γεγονός που πιθανότατα τον καθιστά δυσλειτουργικό για εφαρμογές εντοπισμού ΘΠΑ σε υδάτινα περιβάλλοντα, καθώς η ουσιαστικά μηδενική απόκριση του νερού στο SWIR θεωρητικά είναι χαμηλότερη από αυτή των πλαστικών.

$$FDI = \frac{(780nm - 833nm) + (860nm - 833nm)}{(780nm + 860nm)} \quad (12)$$

3.2.7 Χαρτογράφηση Φασματικής Γωνίας (SAM – ENVI)

Η χαρτογράφηση φασματικής γωνίας πραγματοποιείται μέσω ενός αλγορίθμου εποπτευόμενης ταξινόμησης, ο οποίος συγκρίνει τη φασματική γωνία μεταξύ υπογραφών φασμάτων αναφοράς και των υπογραφών των pixel της εικόνας έναντι ενός ορισμένου κατώφλιου, οι οποίες ορίζονται ως διανύσματα σε n -διάστατο χώρο, όπου n είναι ο αριθμός των καναλιών της εικόνας. Μικρές γωνίες υποδεικνύουν έντονη φασματική ομοιότητα και pixel πάνω από το ορισμένο κατώφλι δεν ταξινομούνται.

3.2.8 ENVI Anomaly Detection

Το εργαλείο anomaly detection του ENVI χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Reed-Xiaoli Detector (RXD) (εξίσωση 13) για να εντοπίσει pixel οι υπογραφές των οποίων παρουσιάζουν φασματικές ή χρωματικές διαφορές σε σχέση με αυτές των γειτονικών τους pixel. Ο αλγόριθμος εντοπίζει στόχους οι οποίοι είναι φασματικά διαφορετικοί από το γενικό υπόβαθρο, τόσο σε υπερφασματικά όσο και σε πολυφασματικά δεδομένα, και είναι αποτελεσματικός κυρίως για στόχους οι οποίοι είναι μικροί σε σχέση με το υπόβαθρο.

$$\delta_{RXD}(r) = (r - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu) \quad (13)$$

Όπου: r είναι το διάνυσμα του δείγματος, μ είναι ο μέσος όρος του δείγματος και $K_{L \times L}$ είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης του δείγματος

4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1 BRDF Παραμόρφωση

Από τις μάσκες των αποτυπωμάτων των ανιχνευτών οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στα S2 L1C προϊόντα, φαίνεται πως η περιοχή μελέτης βρίσκεται ακριβώς στην διεπαφή του 4^{ου} και 5^{ου} ανιχνευτή (εικόνα 30). Οι δύο αυτοί ανιχνευτές αποκλίνουν πολύ λίγο από τη ναδίρ γεωμετρία θέασης του 6^{ου} και 7^{ου} ανιχνευτή, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρή παραμόρφωση λόγω BRDF. Στην παρούσα μελέτη η παραμόρφωση BRDF που εισάγεται λόγω της γεωμετρίας του 4^{ου} και 5^{ου} θεωρήθηκε αμελητέα και δεν διορθώθηκε. Ωστόσο, περαιτέρω επεξεργασία (κεφάλαιο 4.6) έδειξε πως, λόγω του πολύ ασθενούς σήματος τόσο του νερού όσο και των πλαστικών στόχων και του SNR του S2 αισθητήρα, το φαινόμενο της παραμόρφωσης λόγω BRDF ενδεχομένως επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την δυνατότητα εντοπισμού επιφανειακών ΘΠΑ. Επομένως, το φαινόμενο δεν μπορεί να αγνοηθεί ακόμα και για τους κεντρικούς αισθητήρες και σε επόμενες μελέτες είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η BRDF διόρθωση.

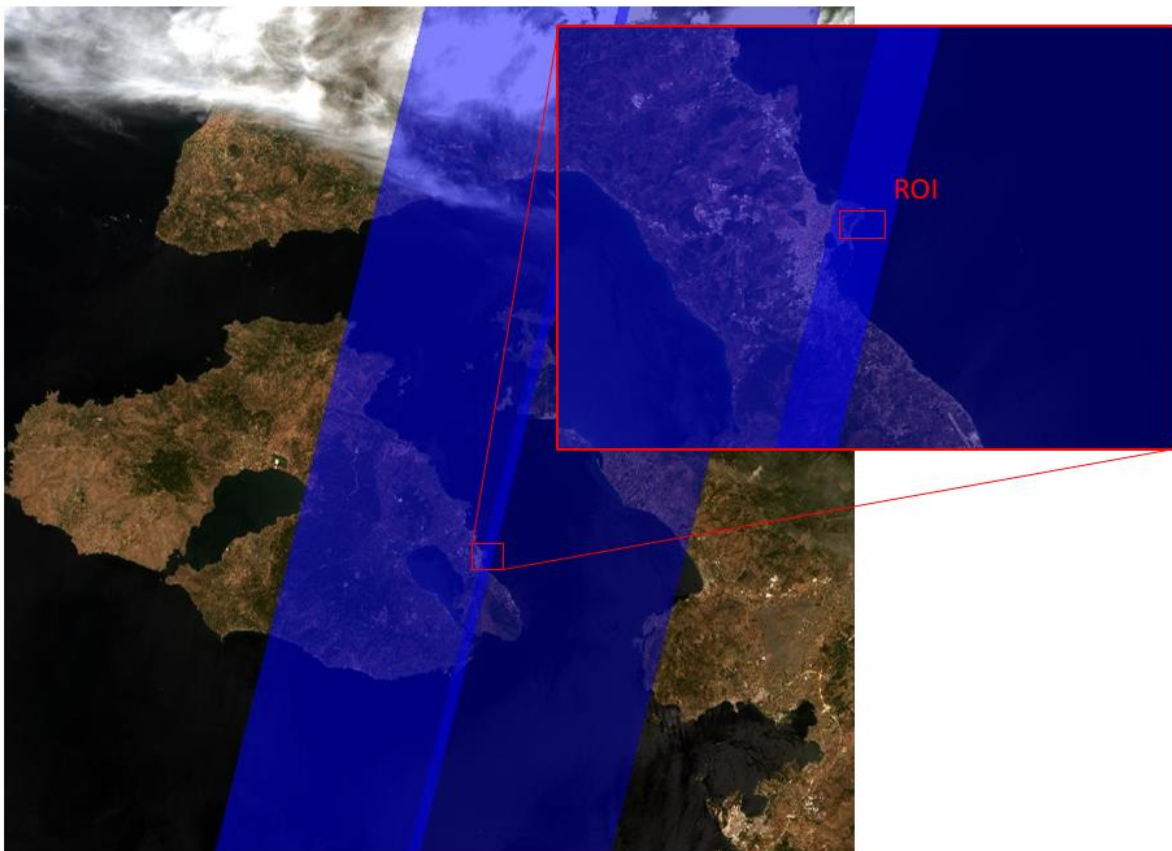


Figure 30: Τα αποτυπώματα του 4^{ου} και 5^{ου} ανιχνευτή με την περιοχή μελέτης να βρίσκεται στη διεπαφή των 2

4.2 Ατμοσφαιρική διόρθωση και διόρθωση για sunglint

4.2.1 Ατμοσφαιρική διόρθωση και μάσκα στεριάς

Όλες οι S2 L1C εικόνες επεξεργάστηκαν για ατμοσφαιρική διόρθωση χρησιμοποιώντας τον DSF αλγόριθμο του ACOLITE v. 20190326.0. Το μέγεθος των εικόνων μειώθηκε σε μια υπο-σκηνή η οποία περιείχε την περιοχή μελέτης (τους στόχους) με σκοπό τη μείωσή τους σε διαχειρίσιμο όγκο δεδομένων και τη μείωση του αρχικού χρόνου επεξεργασίας, καθώς και για την εκτίμηση της διαφοράς του αποτελέσματος διόρθωσης μεταξύ της ολόκληρης εικόνας και της μειωμένης εικόνας. Ωστόσο όλες οι εικόνες επεξεργάστηκαν και ως ολόκληρες σκηνές με σκοπό την εκτίμηση δυνατότητας εφαρμογής των προτεινόμενων μεθόδων εντοπισμού σε μια ευρύτερη περιοχή (εικόνα 31). Ο DSF αλγόριθμος λειτουργεί επιλέγοντας το σκοτεινότερο pixel μιας εικόνας/σκηνής σε ένα κανάλι αναφοράς και ως αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός των pixel μπορεί να επηρεάσει ελαφρώς τα αποτελέσματα της επεξεργασίας διόρθωσης. Ο μεγαλύτερος αριθμός pixel της ολόκληρης εικόνας σημαίνει πως είναι πιθανότερο να βρεθεί ένα «πιο σκοτεινό» pixel, με αποτέλεσμα το ρ_{path} να είναι υψηλότερο και η διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης να αφαιρεί μεγαλύτερο κομμάτι του σήματος. Η απόκριση του στόχου των PET μπουκαλιών στην μειωμένη εικόνα ήταν ελαφρώς εντονότερη, ωστόσο το σχήμα δεν επηρεάστηκε (εικόνα 32). Κάθε περαιτέρω επεξεργασία αρχικά πραγματοποιούνταν στις μειωμένες εικόνες και η διαδικασία επαναλήφθηκε στις ολόκληρες εικόνες, για όσες μεθόδους κρίθηκε ότι παρήγαγαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα κανάλια των εικόνων μετασχηματίστηκαν σε pixel 10m. Η μάσκα στεριάς εφαρμόστηκε κάνοντας χρήση του NIR καναλιού του δορυφόρου με κατώφλι 0.1 dl (κάθε pixel με NIR > 0.1 μασκάρονταν ως στεριά). Η χρήση των SWIR καναλιών για τη μάσκα στεριάς δεν παρήγαγε καλά αποτελέσματα καθώς αρκετά pixel νερού μασκάρονταν ως στεριά λόγω της αντανάκλασης πυθμένα και του sunglint.

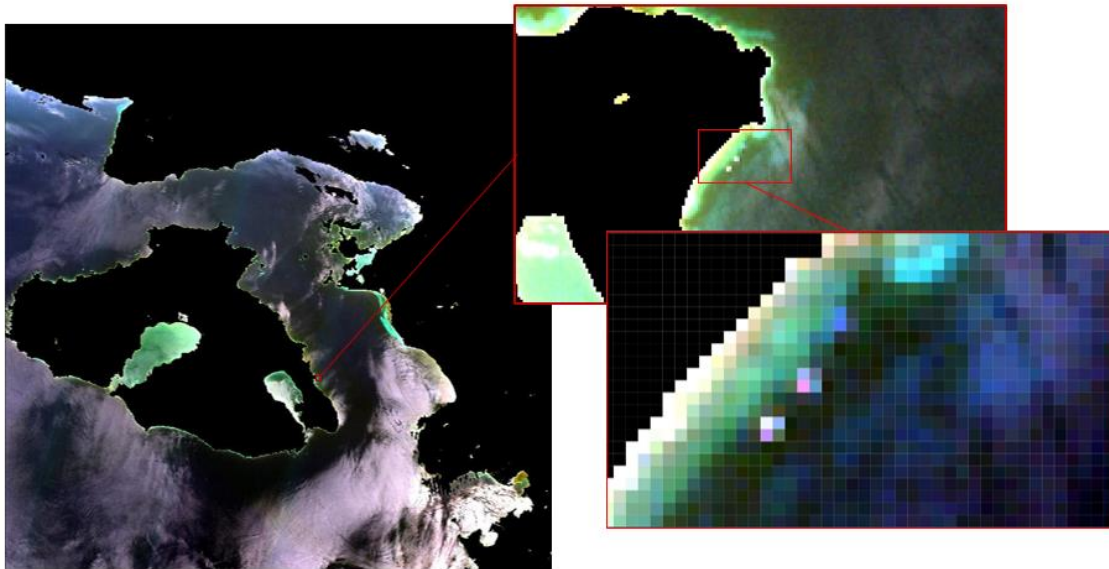


Figure 31: RGB true color composite of whole-scene and sub-scene processed 20180607 image.

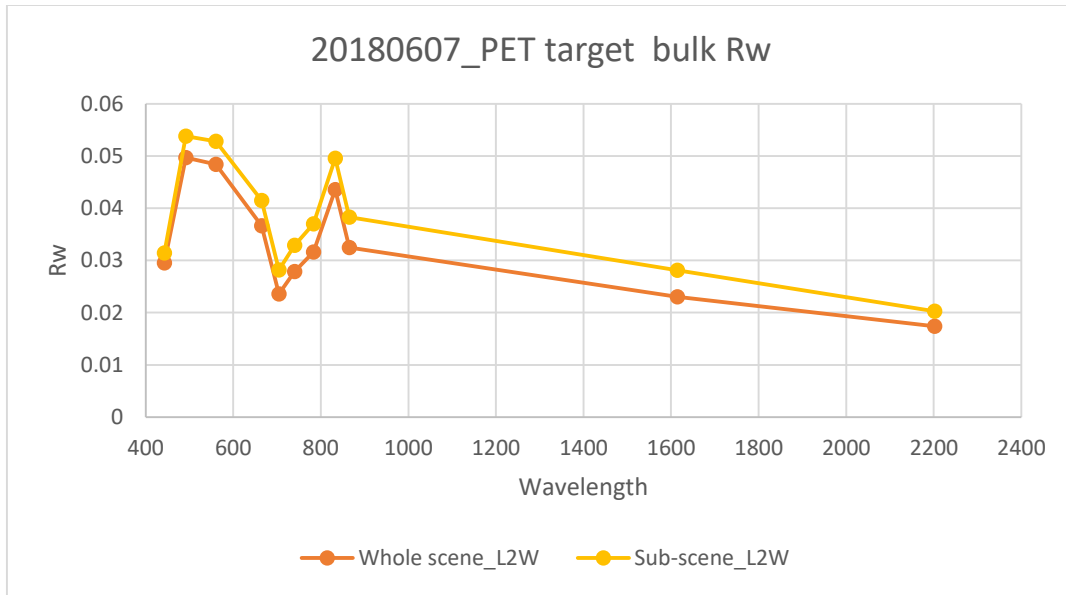


Figure 32: Υπογραφές του στόχου των PET μπουκαλιών

4.2.2 Εκτίμηση και διόρθωση sunglint

Η εκτίμηση για τα επίπεδα του glint στην κάθε εικόνα έγινε μέσω των στατιστικών δεδομένων του SWIR2 καναλιού και μέσω οπτικής παρατήρησης των ολόκληρων ατμοσφαιρικά διορθωμένων εικόνων (εικόνα 34).

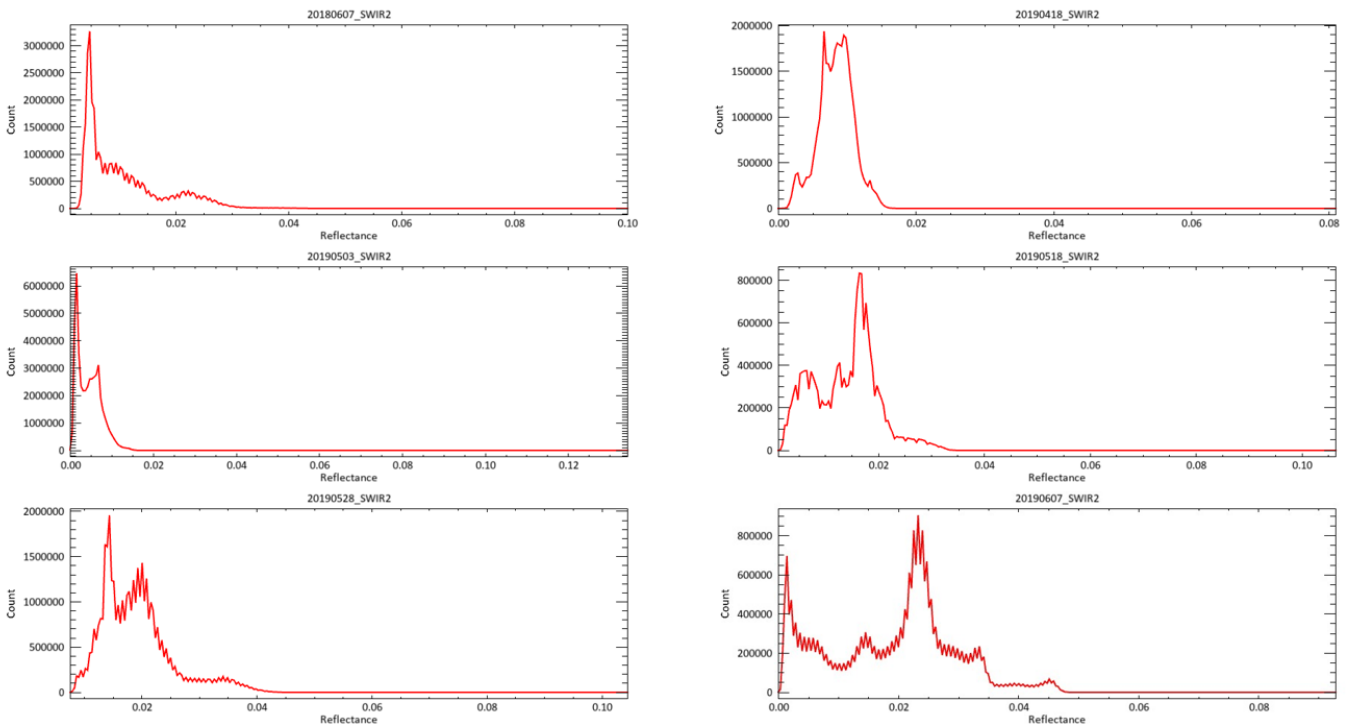


Figure 33: Ιστογράμματα του SWIR2 καναλιού για τις 6 εικόνες

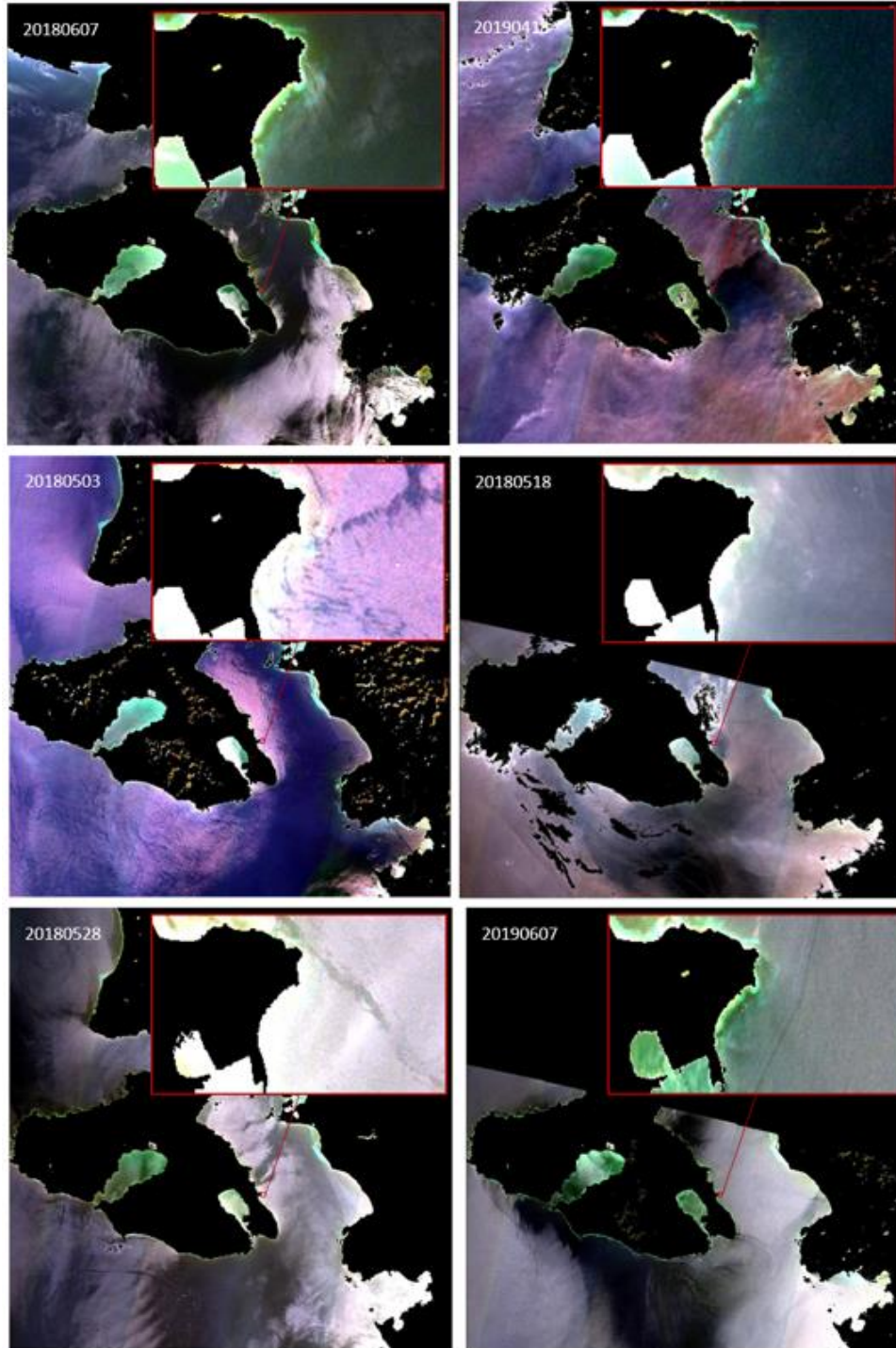


Figure 34: Έγχρωμο σύνθετο RGB ατμοσφαιρικά διορθωμένων εικόνων, 2% stretch

Το νερό υπό φυσιολογικές συνθήκες θεωρητικά έχει σχεδόν μηδενική ανακλαστικότητα στο SWIR εύρος του φάσματος. Η ανακλαστικότητα για τα παράκτια ύδατα στην SWIR2 μπάντα (2200 nm) του Sentinel 2 δίνεται ως 0.0163 από την φασματική βιβλιοθήκη της USGS (Kokaly et al, 2017). Η θολερότητα δεν έχει μεγάλη επιρροή στην απόκριση του νερού στο SWIR φάσμα (Siegel et al, 2000), και σε συνδυασμό με τις καλές καιρικές συνθήκες (χαμηλοί άνεμοι και

απουσία αφρού) δεν υπήρχαν ιδιαίτεροι παράγοντες οι οποίοι να επηρεάζουν την απόκριση του νερού. Θεωρητικά επομένως, η απόκριση στο SWIR φάσμα ενός pixel οπτικά βαθειάς στήλης νερού (καθώς η αντανάκλαση πυθμένα επηρεάζει το σήμα) οφείλεται αποκλειστικά στο glint. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τα στατιστικά στοιχεία για την SWIR2 μπάντα των 6 εικόνων μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση, που σε συνδυασμό με τα ιστογράμματα (εικόνα 33) βοηθούν στην εκτίμηση του ποσοστού του sunglint σε κάθε εικόνα.

Πίνακας 1: Στατιστικά SWIR2 καναλιού για τις μη διορθωμένες εικόνες

	Στατιστικά στοιχεία SWIR2 καναλιού				
	Min.	Max.	Mean	St.Dev.	%>0.0163
20180607	0.001268	0.100045	0.010739	0.00704	29%
20190418	<0	0.080993	0.008465	0.002521	0.30%
20190503	<0	0.134263	0.004685	0.002882	0.30%
20190518	0.001044	0.106798	0.014035	0.006102	36%
20190528	0.007504	0.104453	0.019203	0.006156	61%
20190607	<0	0.092811	0.019129	0.010642	63%

Παρατηρείται ότι στις 4 από τις 6 εικόνες (20180607, 20190518, 20190528 και 20190607) σημαντικό ποσοστό (29-63%) των pixel νερού έχουν τιμές ανακλαστικότητας υψηλότερες της θεωρητικής τιμής 0.0163, γεγονός που υποδηλώνει πως σημαντικός αριθμός των pixel νερού σε αυτές τις εικόνες είναι επηρεασμένα από glint. Παράλληλα, από τα ιστογράμματα γίνεται επίσης εμφανές πως σημαντικός αριθμός pixel νερού έχουν απόκριση μεγαλύτερη από 0.02, αρκετά πάνω της θεωρητικά αναμενόμενης. Οι εικόνες 20190528 και 20190607 είναι οι περισσότερο επηρεασμένες από glint, ενώ από τα έγχρωμα σύνθετα γίνεται εμφανές πως στην εικόνα 20190528 η περιοχή των στόχων είναι ιδιαίτερα επηρεασμένη. Στις υπόλοιπες εικόνες, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που συνολικά έχουν πολλά pixel επηρεασμένα από glint, η περιοχή των στόχων είναι αρκετά «καθαρή». Οι αρνητικές ελάχιστες τιμές σε 3 από τις 6 εικόνες οφείλονται στην ατμοσφαιρική διόρθωση και θα μπορούσαν να αποφευχθούν αν η διόρθωση εφαρμοζόταν σε μικρότερο εύρος της εικόνας, ώστε να μην υπάρχει επιρροή από μελανά pixel τα οποία μπορεί να μην είναι pixel νερού. Διόρθωση για glint πραγματοποιήθηκε σε όλες τις εικόνες με σκοπό την εκτίμηση της επιρροής της διαδικασίας στις υπογραφές των στόχων, ωστόσο περαιτέρω επεξεργασία πραγματοποιήθηκε τόσο στις διορθωμένες όσο και στις μη διορθωμένες εικόνες.

4.3 Ανάλυση φασματικών υπογραφών

Στις εικόνες 35 και 36 παρουσιάζονται οι μέσες φασματικές υπογραφές των pixel των στόχων από τις ημερομηνίες στις οποίες διακρίνονται ευκρινέστερα, χωρίς διόρθωση και με διόρθωση για glint αντίστοιχα. Τα pixel αυτά θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά καθώς, στο βαθμό που ήταν δυνατό, μπορούσε να επιβεβαιωθεί με τη βοήθεια των RGB εικόνων αναφοράς πως ήταν τα κυρίαρχα pixel επηρεασμένα από την απόκριση των στόχων.

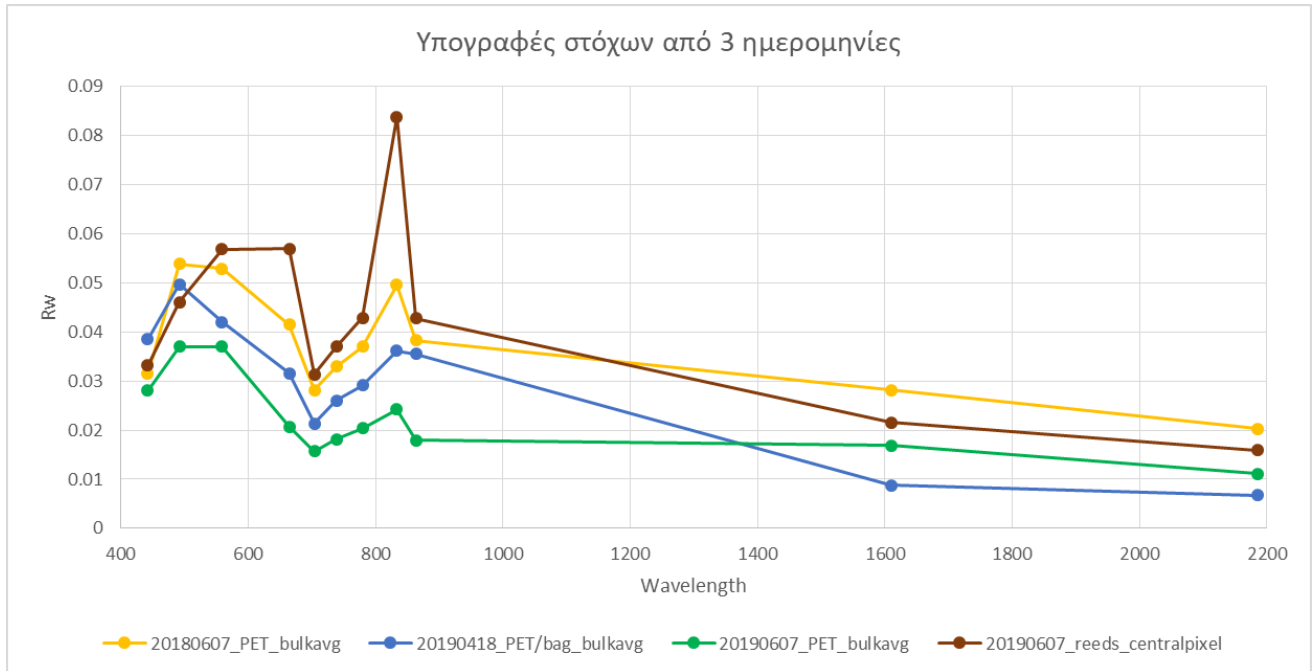


Figure 35: Φασματικές υπογραφές της μέσης τιμής των pixel των στόχων από 3 ημερομηνίες (20180607, 20190418 και 20190607)

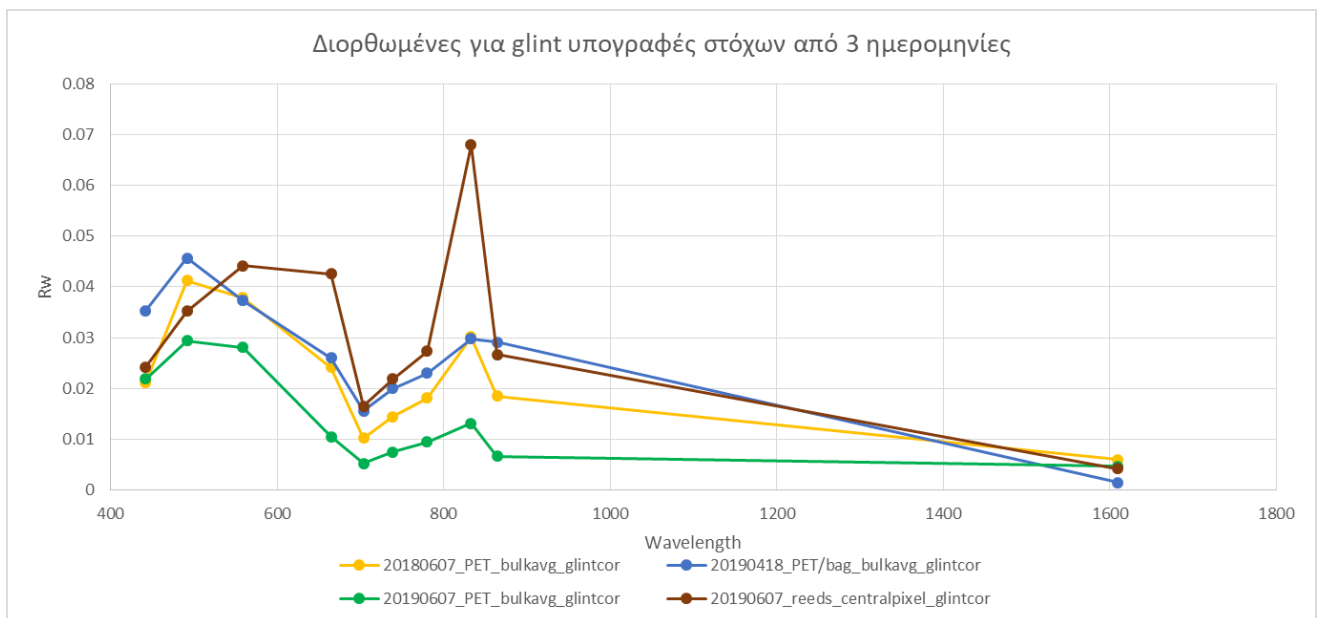


Figure 36: Φασματικές υπογραφές της μέσης τιμής των pixel των στόχων σε διορθωμένες για glint εικόνες από 3 ημερομηνίες (20180607, 20190418 και 20190607)

Ταυτόχρονα, στην εικόνα 37 παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές από τις ίδιες ημερομηνίες των pixel των στόχων που είχαν την εντονότερη απόκριση, αυτών δηλαδή που θεωρητικά περιέχουν το μεγαλύτερο κλάσμα αφθονίας PET. Αρχικά παρατηρούμε πως η διόρθωση για glint επηρεάζει κυρίως την ένταση του σήματος των στόχων, χωρίς να έχει ιδιαίτερη επίπτωση στο σχήμα της απόκρισης. Όπως ήταν αναμενόμενο, βάσει της λειτουργίας του αλγόριθμου διόρθωσης για glint, όσο πιο έντονη είναι η απόκριση των pixel των στόχων στο SWIR φάσμα, τόσο περισσότερο διορθώνεται το pixel για glint. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι καθώς τα πλαστικά έχουν έντονη απόκριση στο υπέρυθρο φάσμα σε σχέση με το νερό, ασχέτως της έντασης του σήματος του glint, όσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα ΘΠΑ σε ένα pixel, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μείωση του σήματος όταν πραγματοποιείται διόρθωση για glint. Τόσο οι μέσες τιμές των στόχων για τις 3 ημερομηνίες, όσο και τα κυρίαρχα pixel των στόχων έχουν παρόμοιες υπογραφές, με τις φασματικές γωνίες μεταξύ τους να είναι κάτω των 10°. Μικρές φασματικές γωνίες, που αντιστοιχούν σε έντονη ομοιότητα υπολογίστηκαν των pixel των στόχων με χαμηλό κλάσμα αφθονίας και αυτών με έντονο glint. Η φασματική υπογραφή του στόχου με τα καλάμια διαφέρει από τους στόχους των πλαστικών κυρίως στα τρία κανάλια του ορατού φάσματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτές οι μπάντες μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν για την διάκριση μεταξύ ΘΠΑ και φυσικών υλικών που επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας.

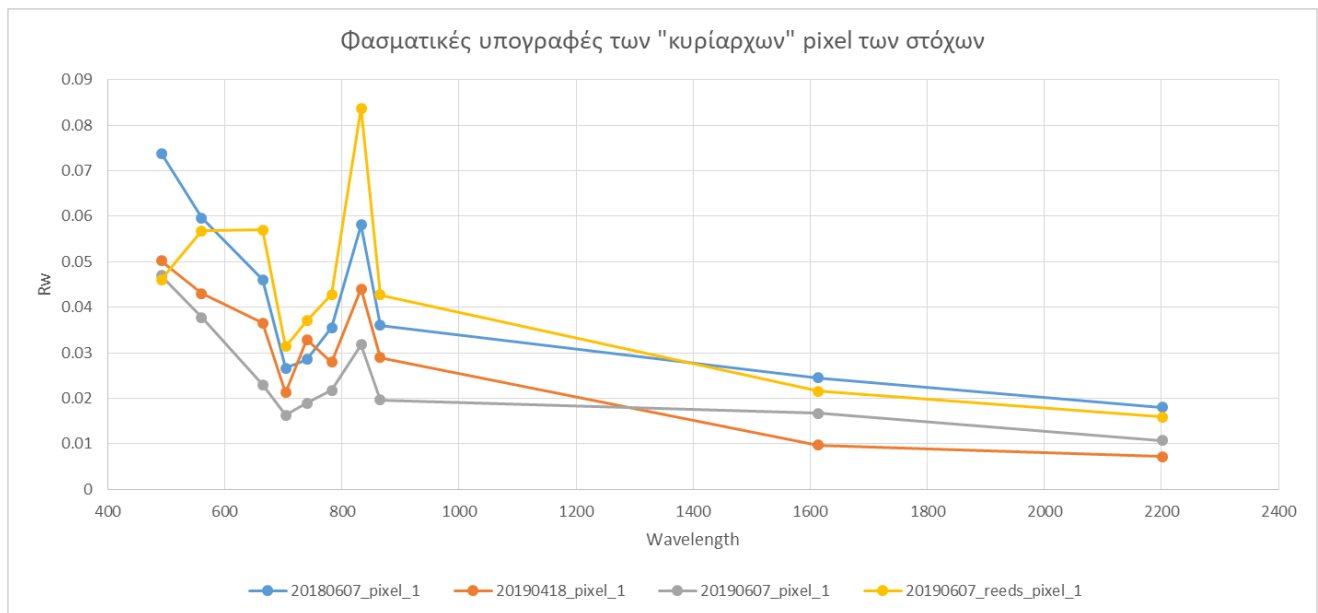


Figure 37: Φασματικές υπογραφές των pixel των στόχων με την εντονότερη απόκριση από 3 ημερομηνίες (20180607, 20190418 και 20190607)

Στις εικόνες 38 και 39, γίνεται σύγκριση της φασματικής υπογραφής του στόχου από την εικόνα 20180607 και των φασματικών υπογραφών pixel νερού από την περιοχή μελέτης για κάθε ημερομηνία. Γίνεται εμφανές πως στην εικόνα 20190528, τα pixel νερού είναι έντονα επηρεασμένα από glint, με την απόκριση στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος να είναι εντονότερη αυτής των στόχων. Η απόκριση του νερού στην εικόνα 20190518 οφείλεται σε οπτικά πυκνή ατμόσφαιρα, πιθανότατα λόγω υδρατμών, γεγονός που γίνεται εμφανές από την απόκριση των pixel στο coastal κανάλι του δορυφόρου.

Υπογραφές νερού και 2018 στόχου PET

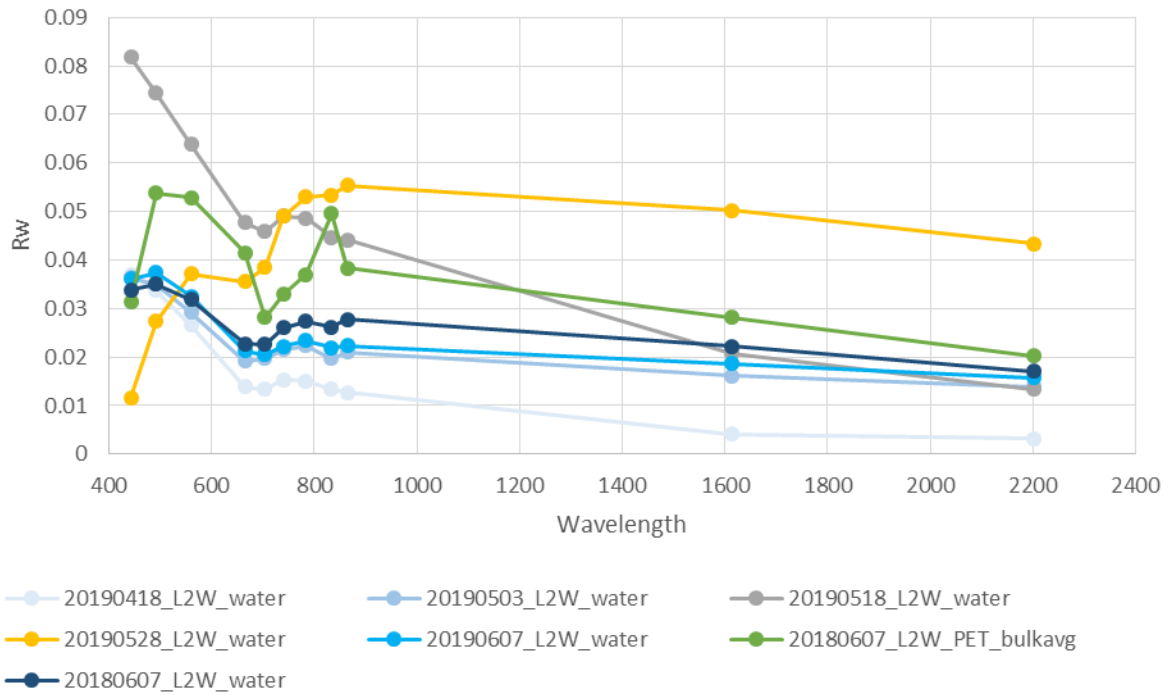


Figure 38: Σύγκριση φασματικών υπογραφών του στόχου 20180607 και νερού από όλες τις ημερομηνίες, χωρίς διόρθωση για glint

Διορθωμένες για glint υπογραφές νερού και 2018 στόχου PET

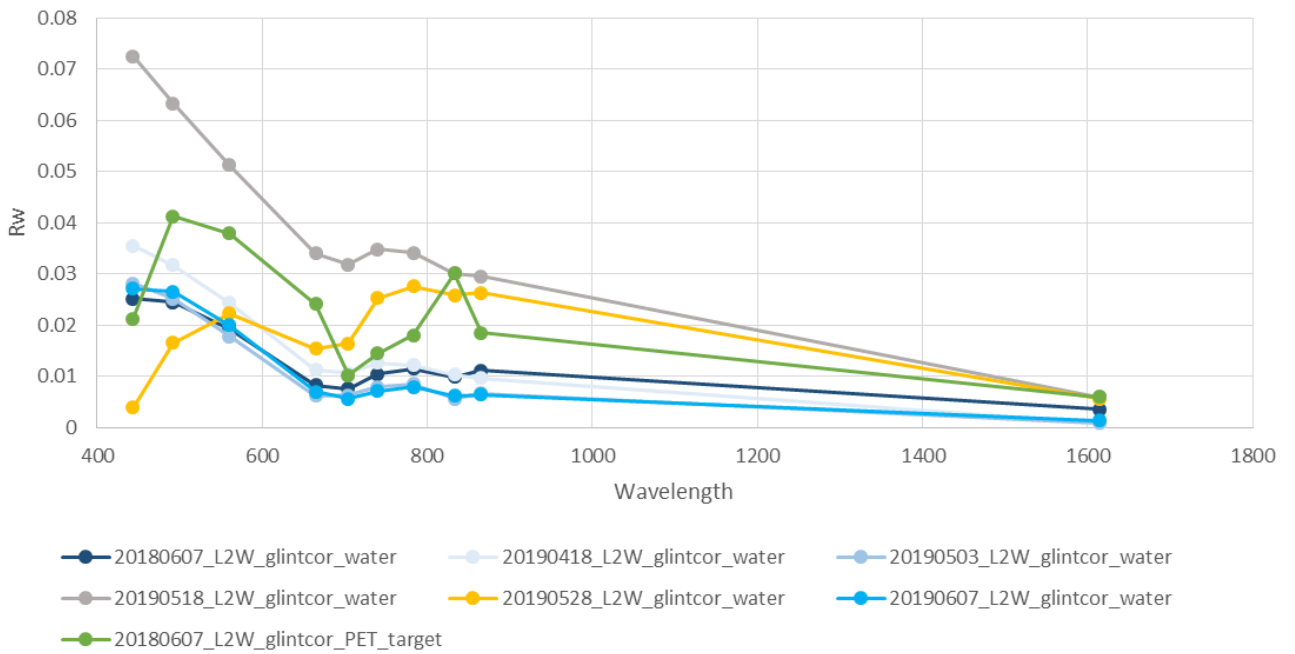


Figure 39: Σύγκριση φασματικών υπογραφών του στόχου 20180607 και νερού από όλες τις ημερομηνίες, με διόρθωση για glint

Η σύγκριση των φασματικών υπογραφών οδήγησε στην παρατήρηση πως η κλίση της καμπύλης της απόκρισης των στόχων είναι θετική από τα 780 στα 833nm και αρνητική από τα 833 στα 865nm, ενώ οι υπογραφές του νερού, συμπεριλαμβανομένης και της 20190528, έχουν τις αντίστροφες κλίσεις μεταξύ των συγκεκριμένων μηκών κύματος. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη του προτεινόμενου δείκτη FDI, ο οποίος αναλύεται περαιτέρω στο κεφάλαιο 4.5.

4.4 Γραμμικός φασματικός διαχωρισμός (LSU)

Αρχικά εφαρμόστηκε LSU με σκοπό τον υπολογισμό της θεωρητικής υπογραφής ενός καθαρού pixel πλαστικών μπουκαλιών PET. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα κλάσματα αφθονίας που είχαν υπολογιστεί από τους Torouzelis et al. (2018), τα οποία εισήχθησαν στην εξίσωση 11. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για 3 διαφορετικές υπογραφές νερού, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.2.4. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ παρεμφερή και για τις 3 υπογραφές νερού, οι οποίες ήταν πολύ παρόμοιες, και για αντικειμενικότητα και συνοχή χρησιμοποιήθηκε η υπογραφή για τα παράκτια ύδατα από τη φασματική βιβλιοθήκη της USGS. Λόγω της διαφοράς της χωρικής ανάλυσης μεταξύ των καναλιών και του μεγέθους των στόχων, η διαδικασία μπορούσε να εφαρμοστεί μόνο για τις τέσσερις μπάντες ανάλυσης 10 μέτρων (RGB & NIR), καθώς στις 20 μέτρων ανάλυσης μπάντες του S2 το κλάσμα των πλαστικών θα ήταν πολύ μικρό για να μπορεί να θεωρηθεί πως επηρεάζει επαρκώς την απόκριση του pixel. Στην εικόνα 40 παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές του PET για κάθε pixel του στόχου που παρήχθησαν από την διαδικασία, ενώ στην εικόνα 41 παρουσιάζεται η φασματική υπογραφή του PET από τη φασματική βιβλιοθήκη της USGS, για τις 4 μπάντες που χρησιμοποιήθηκαν. Θεωρητικά θα περιμέναμε οι 4 υπογραφές που προέκυψαν να είναι σχεδόν όμοιες, και να παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες με την υπογραφή του PET από την φασματική βιβλιοθήκη, γεγονός που δεν προκύπτει από τα αποτελέσματα. Οι 4 φασματικές υπογραφές είναι αρκετά ανόμοιες, με τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις να παρουσιάζονται στο μπλε και το κόκκινο κανάλι. Το γεγονός αυτό πιθανώς οφείλεται στην επιρροή της αντανάκλασης του πυθμένα στην συνολική απόκριση του pixel, καθώς ο στόχος επιπλέει πάνω από λειμώνες ποσειδωνίας, σε μη οπτικά βαθύ νερό. Η αντανάκλαση πυθμένα θα μπορούσε να αποκλειστεί ως ένα βαθμό από την διαδικασία χρησιμοποιώντας τις υπογραφές των pixel του στόχου από εικόνα στην οποία δεν υπάρχουν οι στόχοι, ωστόσο οι εικόνες με κοντινές ημερομηνίες είχαν πολύ διαφορετικές μεταξύ τους υπογραφές. Ταυτόχρονα, ενδεχόμενο σφάλμα στον αρχικό υπολογισμό των κλασμάτων αφθονίας των pixel μπορεί επίσης να επηρεάζει το αποτέλεσμα.

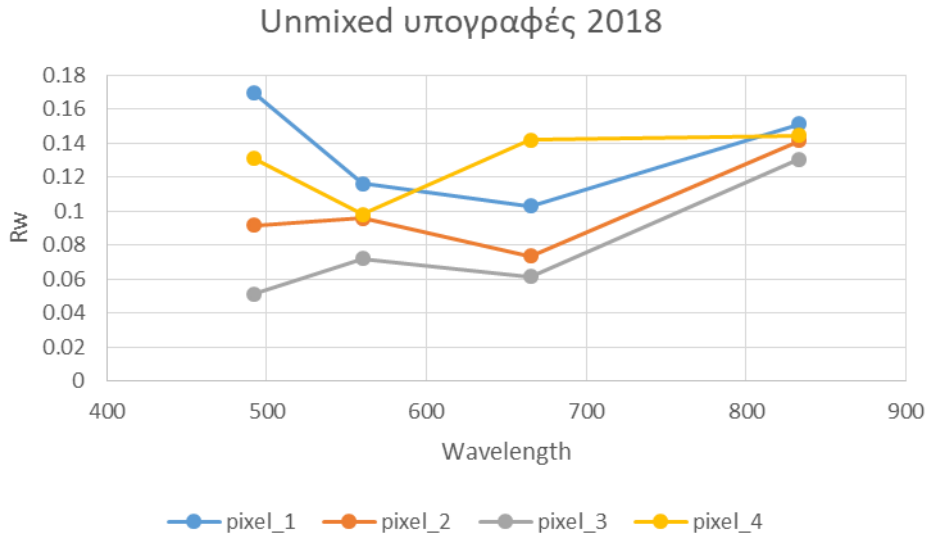


Figure 40: Φασματικές υπογραφές που προέκυψαν από το linear spectral unmixing για τα 4 κλάσματα αφθονίας

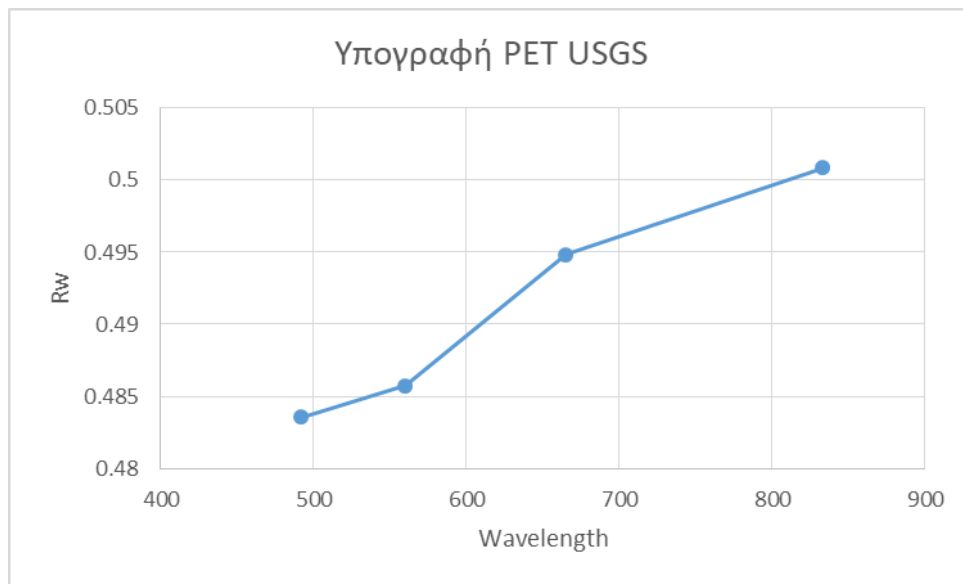


Figure 41: Υπογραφή PET για τις 4 μπάντες του Sentinel 2 από την φασματική βιβλιοθήκη της USGS

Παρατηρούμε ωστόσο πως και στις 4 υπογραφές η απόκριση στο NIR κανάλι είναι πολύ κοινή και για τα 4 διαφορετικά κλάσματα αφθονίας. Κάτι τέτοιο πιθανώς ερμηνεύεται από το γεγονός ότι το νερό απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία, και επομένως η όποια απόκριση των pixel των στόχων στο NIR κανάλι οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο PET. Καθώς καμία από τις 4 υπογραφές δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αυτούσια, ωστόσο όλες είχαν κοινή απόκριση στο NIR κανάλι, αυτή η απόκριση θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική του PET για το NIR κανάλι του Sentinel 2 και χρησιμοποιήθηκε για να προσαρμοστεί η φασματική υπογραφή του PET από την βιβλιοθήκη της USGS. Ουσιαστικά διατηρώντας το ίδιο σχήμα της υπογραφής, η υπογραφή «κατέβηκε» (μειώθηκε σε ένταση) ώστε η τιμή ανακλαστικότητας για το NIR κανάλι να

αντιστοιχεί στο μέσο όρο των 4 υπογραφών που προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία (εικόνα 42).

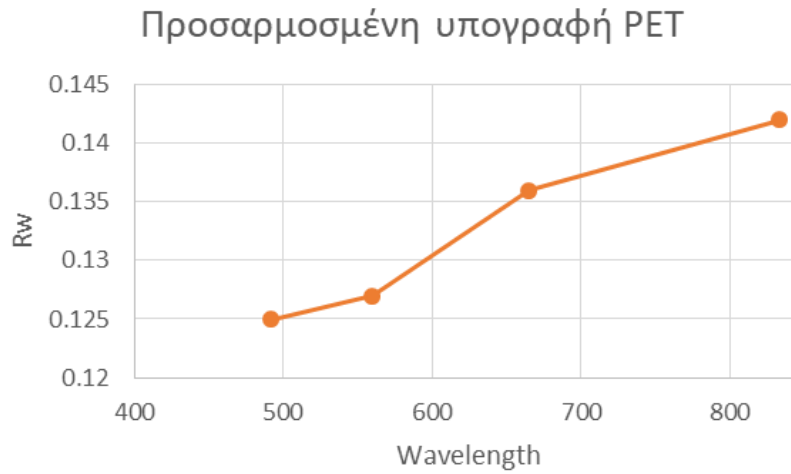


Figure 42: Προσαρμοσμένη υπογραφή PET από φασματική βιβλιοθήκη USGS

Με σκοπό την εκτίμηση της ικανότητας χρήσης της προσαρμοσμένης υπογραφής σε περαιτέρω επεξεργασία, πραγματοποιήθηκε ξανά η ανάλυση spectral unmixing (ENVI v. 5.5.2), αυτή τη φορά με αγνώστους τα κλάσματα αφθονίας και χρησιμοποιώντας την υπογραφή για τα παράκτια ύδατα από τη βιβλιοθήκη της USGS και την προσαρμοσμένη υπογραφή PET ως τα δύο endmembers (καθαροί στόχοι).

Πίνακας 2: Σύγκριση κλασμάτων αφθονίας των στόχων

	Κλάσματα αφθονίας PET στόχων 20180607					
	PET μπουκάλια		Δίκτυ/πλέγμα		HDPE σακούλες	
	Topouzelis et al.	Spec. Unmixing	Topouzelis et al.	Spec. Unmixing	Topouzelis et al.	Spec. Unmixing
Pixel 1	34%	34%	12%	18%	23%	11%
Pixel 2	29%	21%	3%	9%	8%	4%
Pixel 3	15%	8%	34%	11%	19%	6%
Pixel 4	18%	18%	55%	20%	50%	14%

Για τον στόχο με τα PET μπουκάλια, τα υπολογισθέντα κλάσματα αφθονίας πλαστικού για τα δύο από τα 4 pixel είναι ίδια με αυτά από Topouzelis et al. (2018), ενώ στα υπόλοιπα δύο pixel το κλάσμα αφθονίας υποεκτιμάται, ωστόσο ακολουθεί την γενική κατάταξη των κλασμάτων αφθονίας από το μεγαλύτερο στο μικρότερο στα pixel του στόχου. Στους υπόλοιπους στόχους τα κλάσματα αφθονίας υποεκτιμούνται σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός που είναι αναμενόμενο καθώς οι υπόλοιποι δύο στόχοι είχαν χαμηλότερη απόκριση από αυτή του στόχου PET. Ωστόσο και εδώ η γενική κατάταξη των κλασμάτων των pixel ταιριάζει με αυτή από Topouzelis et al. (2018) και την γενική απόκριση των pixel. Το γεγονός αυτό υπονοεί πως μια γενική προσαρμοσμένη υπογραφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ΘΠΑ, τουλάχιστον για τα συγκεκριμένα πολυμερή.

4.5 Matched Filtering (ENVI)

Συνεχίζοντας, εφαρμόστηκε ο matched filtering αλγόριθμος του ENVI (v. 5.5.2) κάνοντας χρήση της προσαρμοσμένης υπογραφής PET και της USGS PET. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε στα 4 10 μέτρων ανάλυσης κανάλια αλλά και στο σύνολο των 10 καναλιών (χωρίς το coastal 60m). Στην περίπτωση των 10 καναλιών, το κλάσμα αφθονίας πλαστικών υποεκτιμούνται σε μεγάλο βαθμό. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι η υπογραφή για το PET, τόσο η αρχική USGS όσο και η προσαρμοσμένη δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαφορά στη χωρική ανάλυση μεταξύ των καναλιών του Sentinel 2. Ωστόσο, αν η επιφάνεια των στόχων ήταν αρκετά μεγάλη ώστε να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόκριση των pixel στις 20 μέτρων ανάλυσης μπάντες, ενδέχεται η εφαρμογή να απέδιδε καλύτερα αποτελέσματα. Κάνοντας χρήση μόνο των τεσσάρων 10m καναλιών, ο αλγόριθμος αποδίδει πολύ καλύτερα. Όπως είναι αναμενόμενο η υψηλή υπογραφή από την USGS φασματική βιβλιοθήκη υποεκτιμά το κλάσμα πλαστικών στα pixel, ωστόσο η προσαρμοσμένη υπογραφή παράγει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος υπολογίζει κλάσματα αφθονίας τα οποία ταιριάζουν σε μεγάλο βαθμό με αυτά από Torouzelis et al. (2018). Ταυτόχρονα όμως, ο αλγόριθμος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την αντανάκλαση πυθμένα και τα pixel με έντονο glint, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμά το κλάσμα αφθονίας PET σε αυτά τα pixel, ακόμα και όταν δεν υπάρχει. Η αντανάκλαση πυθμένα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί και επομένως τα pixel πολύ ρηχού νερού είναι αναγκαίο να αφαιρεθούν από τη διαδικασία με χρήση μάσκας.

Πίνακας 3: Κλάσματα αφθονίας του PET στόχου 20180607 από Torouzelis et al. 2018, Spectral Unmixing και Matched Filtering με την προσαρμοσμένη υπογραφή

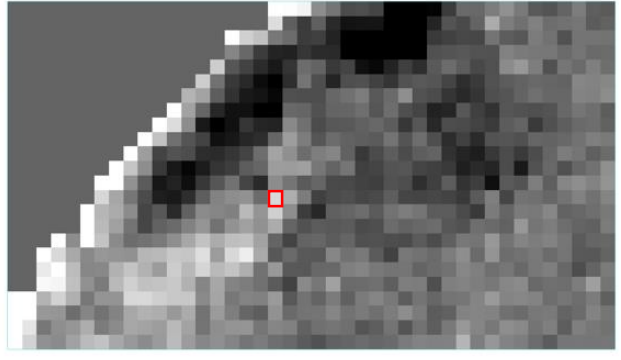
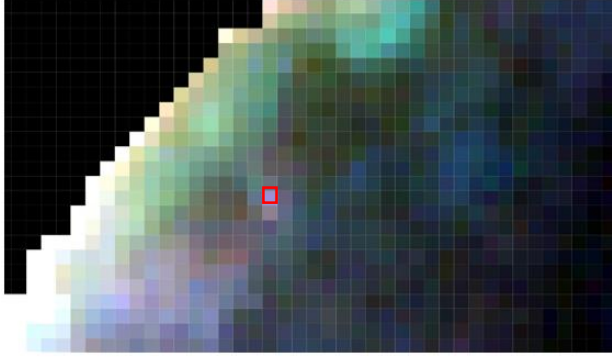
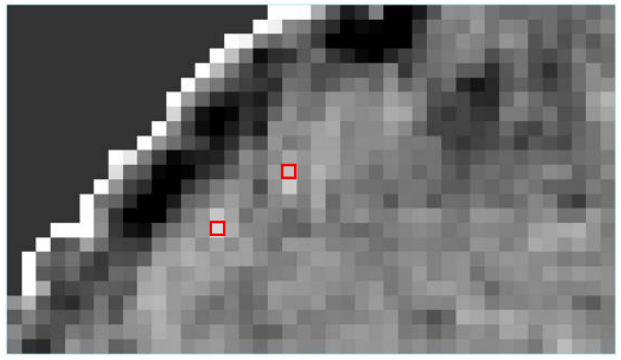
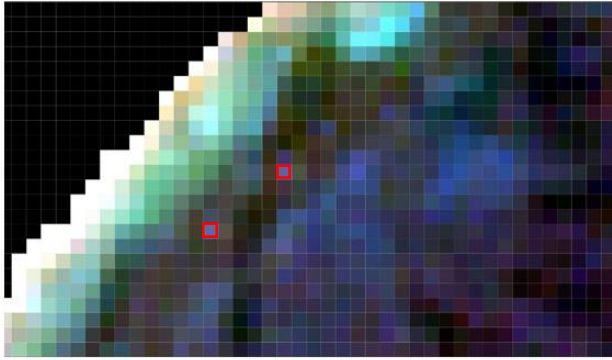
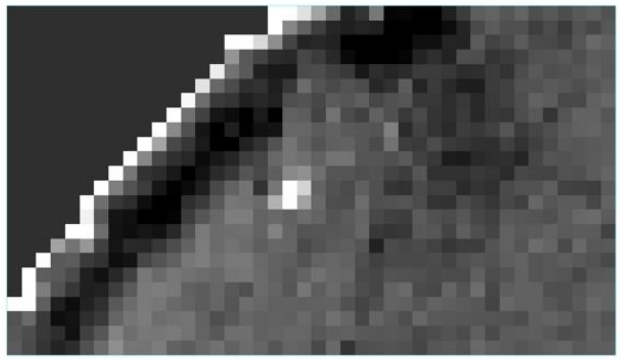
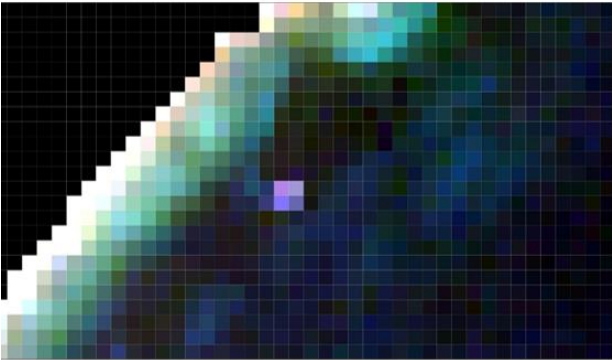
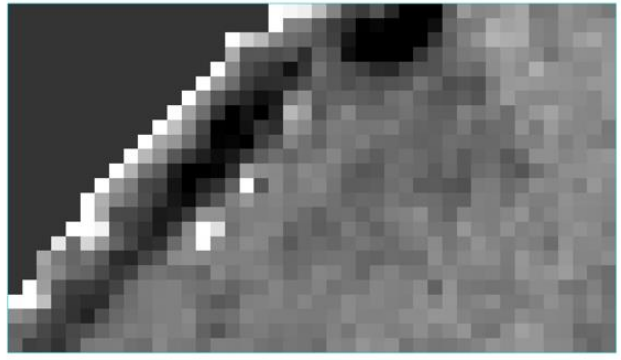
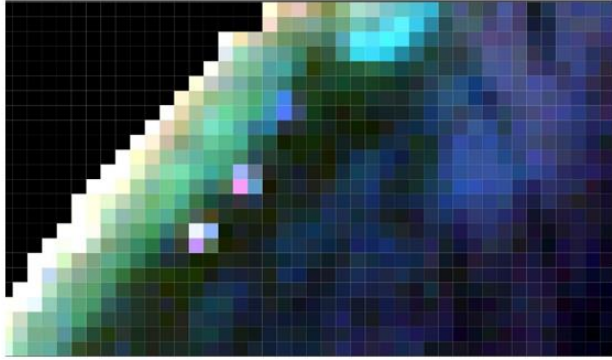
Κλάσματα αφθονίας PET στόχων 20180607			
	Topouzelis et al.	Spec. Unmixing	Matched filtering
Pixel 1	34%	34%	32%
Pixel 2	29%	21%	29%
Pixel 3	15%	8%	11%
Pixel 4	18%	18%	14%

Θέτοντας τα αντίστοιχα κατώφλια, μπορούν να παραχθούν εικόνες ταξινόμησης, όπου τα pixel με κλάσμα αφθονίας μεγαλύτερο του κατωφλιού παίρνουν τιμές 1 και τα υπόλοιπα 0. Στην εικόνα 43 φαίνονται τα αποτελέσματα για κλάσματα αφθονίας >0.1, 0.2 και 0.3, αφού έχει προηγηθεί μασκάρισμα των pixel που επηρεάζονται από αντανάκλαση πυθμένα. Για κλάσματα αφθονίας μεγαλύτερα του 0.1, παράγονται πολλά false positives από pixel με έντονο glint και όπως είναι αναμενόμενο, ο αριθμός των false positives μειώνεται με αυξανόμενο κατώφλι κλάσματος αφθονίας.



Figure 43: 20180607 RGB έγχρωμο και band math του matched filtering αποτελέσματος με κατώφλια 0.1, 0.2 και 0.3

Αντίστοιχα αποτελέσματα παράγονται και για τις υπόλοιπες εικόνες, με τα κλάσματα αφθονίας που υπολογίζονται να ταιριάζουν, ποιοτικά τουλάχιστον, με τα αναμενόμενα βάσει απόκρισης κλάσματα αφθονίας των pixel, στις εικόνες που οι στόχοι διακρίνονται καθαρά. Ωστόσο, όπως γίνεται εμφανές από την παραπάνω εικόνα, σε περιπτώσεις που υπάρχει έντονο glint η κατωφλίωση μόνο δεν βοηθάει στη διάκριση των στόχων από τα υπόλοιπα pixel (εικόνα 44). Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει στην εικόνα 20190518, όπου η πυκνή λόγω σωματιδίων ατμόσφαιρα παρερμηνεύεται ως pixel με κλάσμα πλαστικού. Όπως είναι λογικό, οι μικρότεροι και λιγότερο πυκνοί στόχοι αντιστοιχούν σε χαμηλότερα κλάσματα αφθονίας.



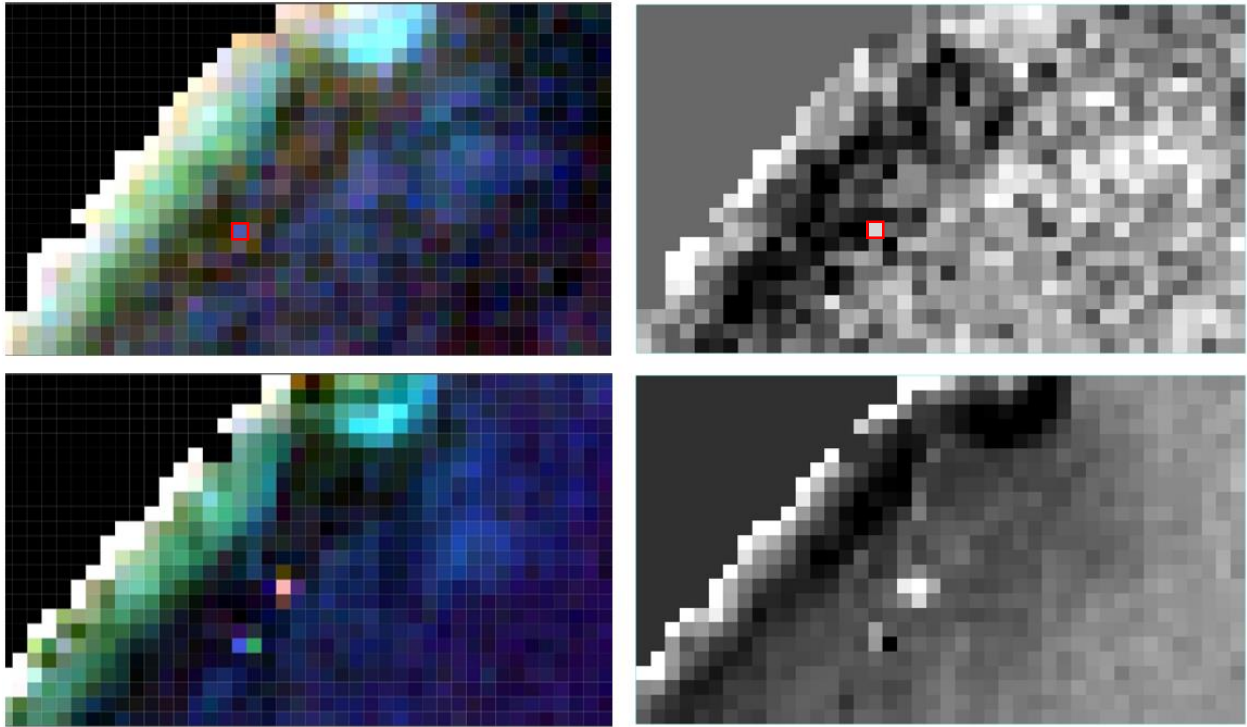


Figure 44: Αποτελέσματα *matched filtering* για τις 6 εικόνες, με κόκκινο πλαίσιο τα κυρίαρχα *pixel* των στόχων στις εικόνες που δεν διακρίνονται ξεκάθαρα

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε στις διορθωμένες για *glint* εικόνες με σκοπό να διερευνηθεί το κατά πόσο η διόρθωση για *glint* θα μείωνε τον αριθμό των *pixel* τα οποία λανθασμένα ερμηνεύονται σαν *pixel* με παρουσία πλαστικού. Τα κλάσματα αφθονίας των στόχων υποεκτιμούνταν σε ποσοστό περίπου 1 προς 3 σε σχέση με αυτά των μη διορθωμένων εικόνων. Ωστόσο χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο κατώφλι (0.1 αντί του 0.3), ο αριθμός των *pixel* που λανθασμένα ερμηνεύονται ως *pixel* πλαστικού μειώνεται σημαντικά – από περίπου 170,000 σε 5,000 (εικόνα 45).



Figure 45: 20180607 αποτελέσματα matched filtering σε διορθωμένη για glint εικόνα με κατώφλι 0.1

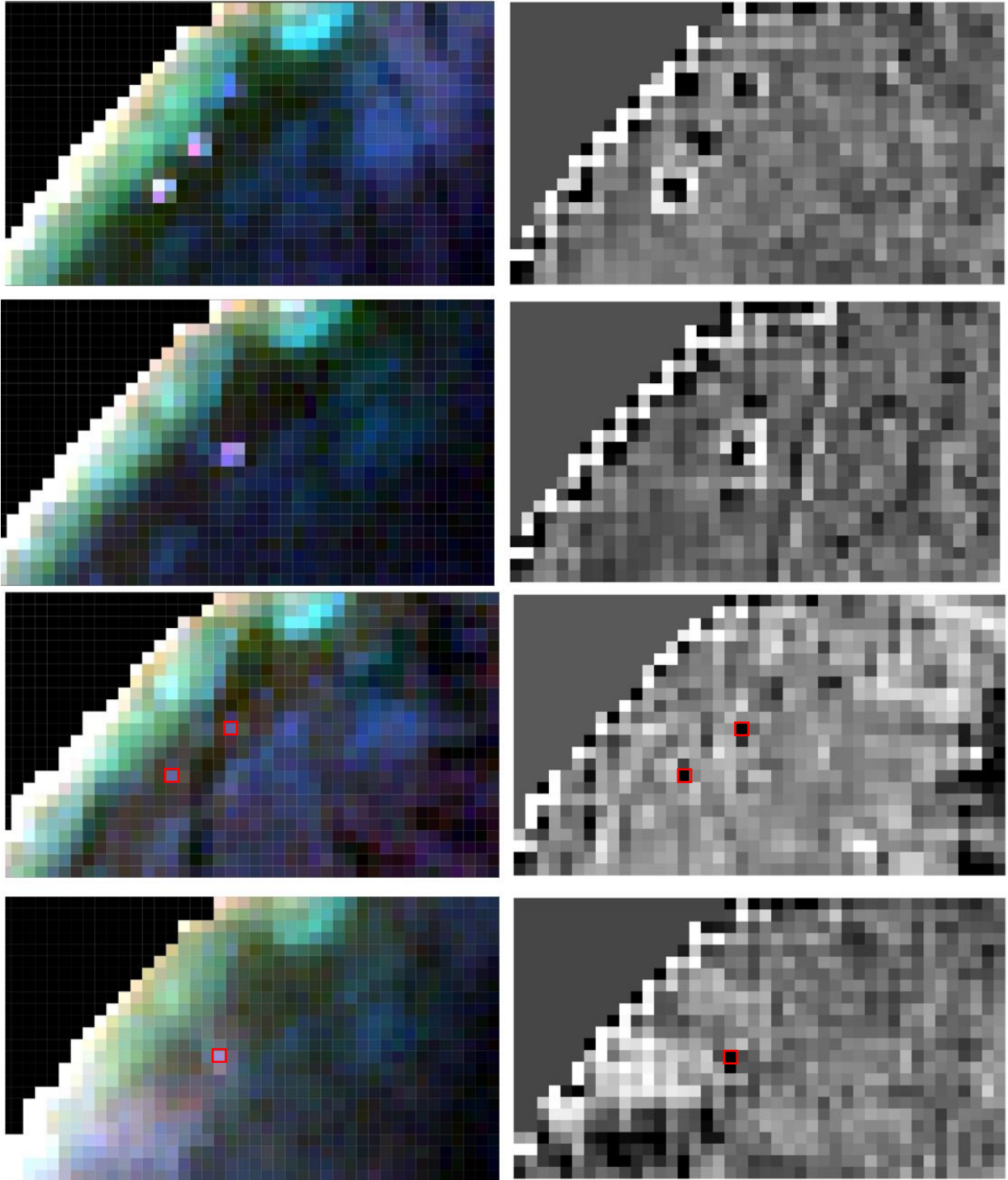
4.6 Προτεινόμενος δείκτης FDI

Από την ανάλυση των φασματικών υπογραφών των στόχων και του νερού, έγινε εμφανής μια χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ των δύο αποκρίσεων αποκρίσεων. Η κλίση της καμπύλης της φασματικής απόκρισης ήταν αντίθετη από τα 780 στα 833nm και από τα 833 στα 865nm μεταξύ των πλαστικών και του νερού. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη του προτεινόμενου δείκτη “floating debris index” (FDI) (εξίσωση 12). Ο δείκτης λειτουργεί εκμεταλλευόμενος τη διαφορά στην απόκριση των δύο υλικών και κυρίως τη χωρική ανάλυση των τριών αυτών καναλιών του Sentinel 2. Τόσο τα πλαστικά όσο και το νερό έχουν μια σχεδόν επίπεδη απόκριση στο Red edge και NIR εύρος του φάσματος, με τα πλαστικά να έχουν πολύ πιο έντονη απόκριση. Επομένως θεωρητικά θα περιμέναμε η διαφορά μεταξύ των υπογραφών να εντοπίζεται κυρίως στην ένταση του σήματος και όχι τόσο στο σχήμα. Η διαφορά μεταξύ των χωρικών αναλύσεων των 3 αυτών καναλιών ωστόσο οδηγεί στην έντονη καμπύλη της απόκρισης των στόχων. Καθώς οι 780 και 865nm μπάντες έχουν 20m χωρική ανάλυση, το κλάσμα αφθονίας πλαστικών για τα pixel των στόχων (αναλόγως το πως έχει «πέσει» ο στόχος στην εικόνα) είναι πολύ μικρό και επομένως και η επιρροή των πλαστικών στη συνολική απόκριση του pixel είναι χαμηλή, με

αποτέλεσμα οι υπογραφές των στόχων σε αυτά τα κανάλια να τείνουν περισσότερο προς αυτή του νερού. Αντίθετα τώρα, στην 833nm μπάντα του Sentinel 2, η 10m χωρική ανάλυση σημαίνει πως το κλάσμα αφθονίας πλαστικών, ασχέτως χωροθέτησης του στόχου στο pixel, θα είναι 4 φορές μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα η απόκριση του pixel να επηρεάζεται πολύ περισσότερο από το κλάσμα πλαστικών από ότι από το νερό. Ως αποτέλεσμα, η έντονη καμπύλη που δημιουργείται διαφοροποιεί σε μεγάλο βαθμό την υπογραφή των pixel. Στην περίπτωση ωστόσο που η συνολική επιφάνεια επιρροής των πλαστικών σε μια εικόνα είναι μεγαλύτερη των 20m, καθώς η χωρική ανάλυση των καναλιών δεν θα έπαιζε πλέον ιδιαίτερο ρόλο, ενδέχεται η φασματική απόκριση των πλαστικών να ήταν πολύ διαφορετική και η υπογραφή να μην εμφάνιζε τη χαρακτηριστική καμπύλη. Τα ακριανά pixel της περιοχής επιρροής των πλαστικών ωστόσο, καθώς στις χαμηλής ανάλυσης μπάντες θα υπήρχε έντονη επιρροή του νερού, η κλίση της καμπύλης πιθανότατα θα ήταν παρόμοια. Στην εικόνα 46 φαίνονται τα αποτελέσματα του δείκτη για τις 6 ημερομηνίες. Ο δείκτης θεωρητικά παίρνει αρνητικές τιμές για τα pixel με κλάσμα πλαστικών και θετικές για τα pixel νερού. Τουλάχιστον 1 pixel από κάθε στόχο (αυτό με το μεγαλύτερο κλάσμα αφθονίας) σε κάθε ημερομηνία έχει αρνητική τιμή fdi, με τις τιμές να κυμαίνονται από -0.01 στις εικόνες με μικρούς στόχους χαμηλής καλυπτικότητας έως -0.6 στον 10x10m στόχο της 20180607 εικόνας. Το glint φαίνεται πως επηρεάζει σε αρκετά μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα του δείκτη, γεγονός που είναι λογικό καθώς το glint επηρεάζει έντονα την απόκριση του νερού στο υπέρυθρο φάσμα. Ο 5x10 στόχος στην εικόνα 20190518 έχει πολύ χαμηλότερη τιμή fdi (<-0.1) σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το ίδιο μέγεθος στόχων στην εικόνα 20190528 (~ -0.02), ωστόσο οι στόχοι στις 2 εικόνες έχουν διαφορετική καλυπτικότητα (80 και 50% αντίστοιχα) οπότε δεν είναι δυνατό να γίνει μια ακριβής εκτίμηση της επιρροής του glint. Η καλυπτικότητα ωστόσο φαίνεται πως παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, καθώς η τιμή του δείκτη για τους 5x5 στόχους 100% καλυπτικότητας της εικόνας 20190503 είναι και αυτή < -0.1. Όπως είναι λογικό και εδώ το μέγεθος και η καλυπτικότητα των στόχων παίζουν μεγάλο ρόλο στο αποτέλεσμα του δείκτη. Τη χαμηλότερη τιμή του δείκτη είχε το pixel του στόχου με τα καλάμια, γεγονός που συνάδει με την έντονη απόκριση του στόχου στο NIR κανάλι. Όπως και με τον αλγόριθμο matched filtering, η οπτικά πυκνή ατμόσφαιρα στην εικόνα 20190518 οδηγεί σε pixel νερού με χαμηλό fdi.

Πίνακας 4: Ελάχιστη τιμή προτεινόμενου δείκτη pixel στόχου από τις 6 ημερομηνίες

Ημερομηνία	Ελάχιστο fdi pixel στόχου
20180607	-0.63
20190418	-0.42
20190503	-0.16
20190518	-0.15
20190528	-0.02
20190607	-0.40, στόχος με καλάμια: -0.89



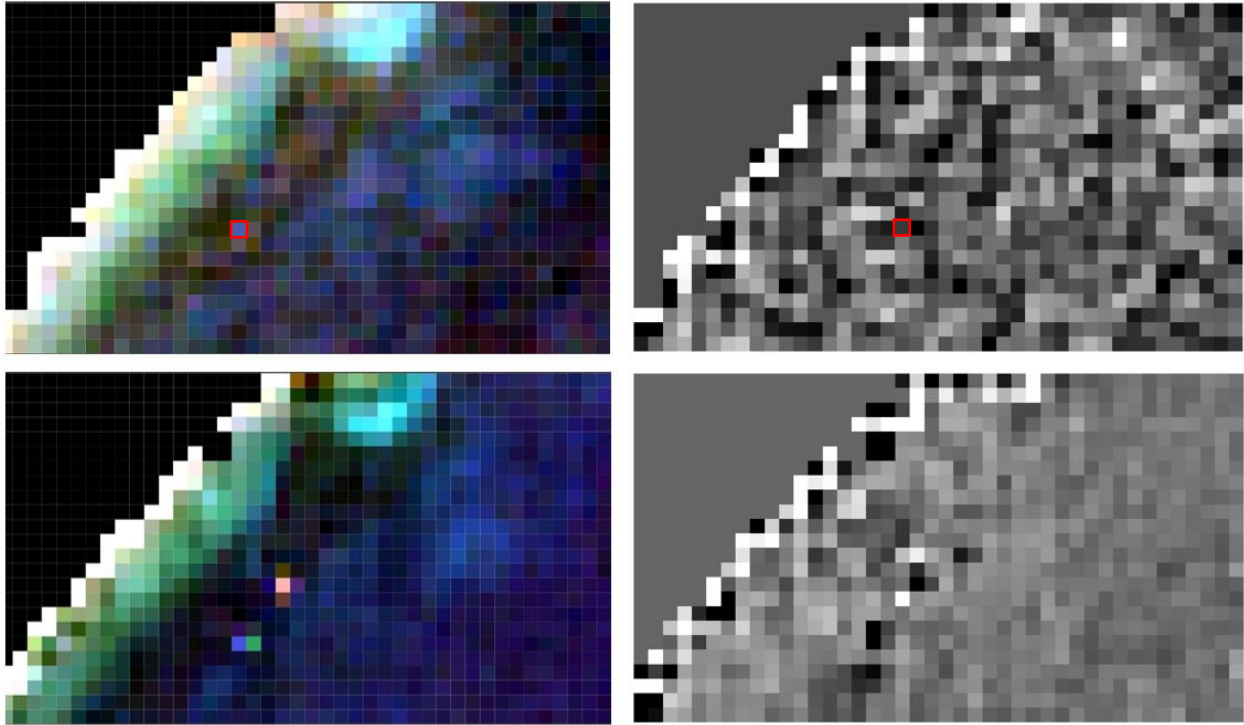


Figure 46: Εικόνες αποτελέσματος προτεινόμενου δείκτη για τις 6 ημερομηνίες, από πάνω προς τα κάτω, με κόκκινο πλαίσιο τα κυρίαρχα pixel των στόχων στις εικόνες που δεν διακρίνονται ξεκάθαρα

Θέτοντας κατώφλι στα αποτελέσματα του δείκτη, είναι δυνατό να εντοπιστούν τα κυρίαρχα pixel των στόχων (εικόνα 47), ωστόσο με τα τωρινά δεδομένα, δεν είναι δυνατό να οριστεί ένα γενικό κατώφλι που να αντιστοιχεί σε αντίστοιχο κλάσμα αφθονίας. Η εφαρμογή παράγει αρκετά false positives, τα οποία όπως και με το matched filtering είναι κυρίως σκιές από σύννεφα, ενώ παράλληλα μαρκάρονται τυχόν σκάφη που υπάρχουν στην εικόνα, καθώς και καυσαέρια και αφροί από απόνερα. Η εφαρμογή του δείκτη στις διορθωμένες για glint εικόνες οδηγεί σε λιγότερα pixel επηρεασμένα από glint να παίρνουν αρνητικές τιμές, ωστόσο αυξάνει και την τιμή του δείκτη για τα pixel των στόχων.

Η χρήση του fdi ωστόσο ανέδειξε ακόμα ένα βασικό πρόβλημα το οποίο αρχικά είχε κριθεί αμελητέο. Ο δείκτης δίνει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα για τα pixel νερού τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικούς ανιχνευτές (εικόνα 48), ενώ δεν υπάρχουν άλλοι παράγοντες οι οποίοι θα επηρέαζαν το αποτέλεσμα με τέτοιο τρόπο. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι με την χαμηλής έντασης απόκριση του νερού, η παραμόρφωση λόγω BRDF και κατ' επέκταση και ο θόρυβος της εικόνας, παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση των pixel και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη φασματική υπογραφή, ακόμα και για ανιχνευτές που θεωρητικά επηρεάζονται λιγότερο από το φαινόμενο της παραμόρφωσης. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα πως, τουλάχιστον για τις προτεινόμενες εφαρμογές, η διόρθωση για την BRDF παραμόρφωση είναι αναγκαία ανεξαρτήτως ανιχνευτή. Επίσης αναγκαίο κρίνεται να διερευνηθεί η επιρροή των ποσοστών θορύβου και του SNR των καναλιών του Sentinel 2 στον εντοπισμό ΘΠΑ με τις προτεινόμενες εφαρμογές.

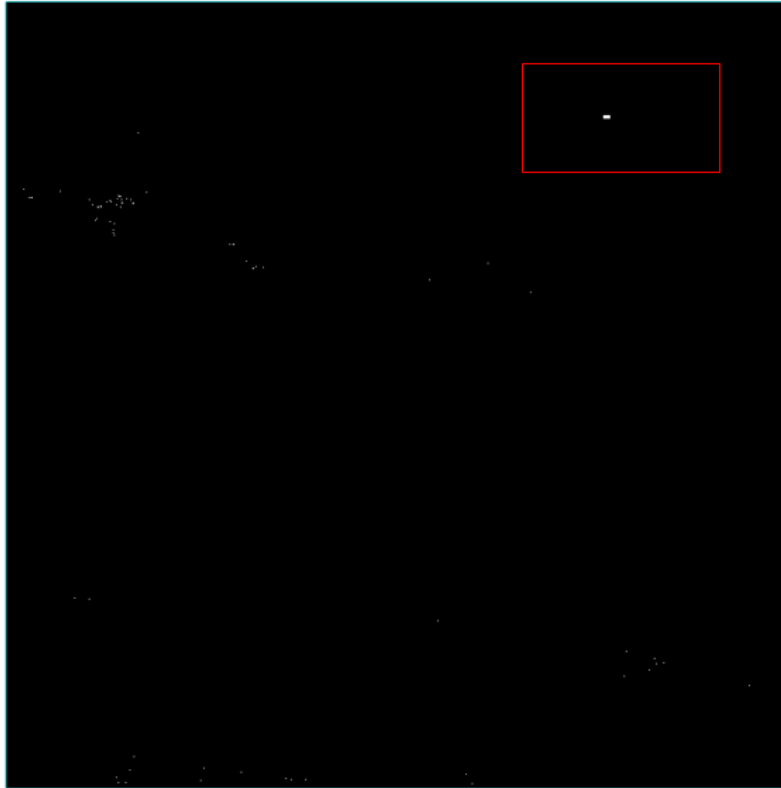


Figure 47: Κατωφλίωση $f_{di} < -0.6$ για την 20180607 με buffer στεριάς όπου μαρκάρονται τα 2 κυρίαρχα pixel του PET στόχου

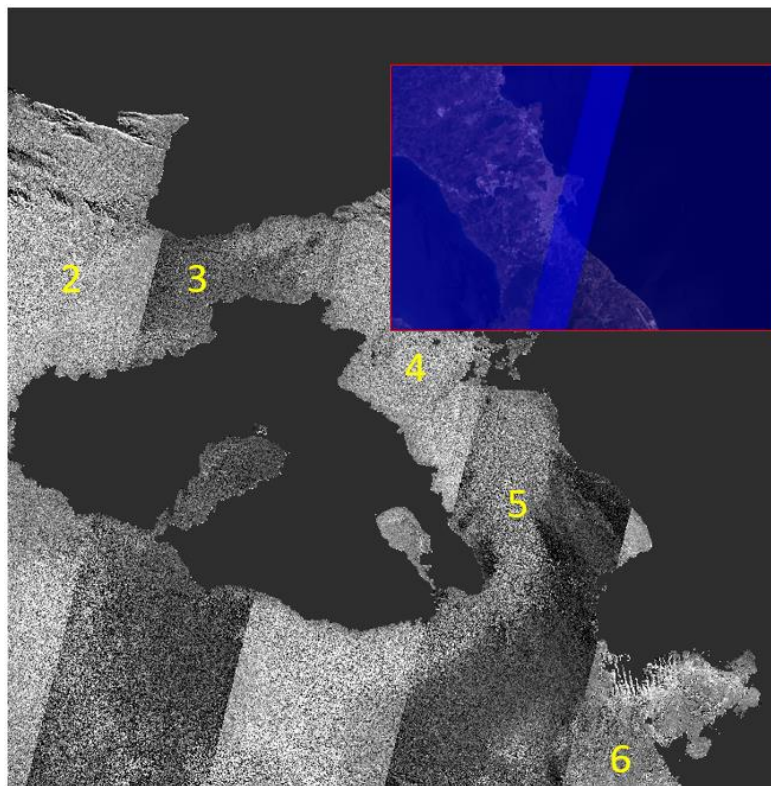


Figure 48: Δείκτης f_{di} για την 20180607 εικόνα όπου φαίνεται η επιρροή της παραμόρφωσης λόγω BRDF και του θορύβου

4.7 Προτεινόμενη συνδυαστική μέθοδος

Με σκοπό τη μείωση των false positives που εντοπίζονται από τις άνωθεν μεθόδους και στην προσπάθεια εγκαθίδρυσης μιας μεθόδου εντοπισμού με τουλάχιστον ένα σταθερό κατώφλι, προτείνεται μια συνδυαστική μέθοδος (εικόνα 49). Στην παρούσα μελέτη η μέθοδος εφαρμόστηκε σε διορθωμένες για glint εικόνες καθώς παρήγαγε λιγότερα false positives. Ωστόσο είναι αναγκαίο να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε μη διορθωμένες εικόνες, απορρίπτοντας με κάποιο τρόπο τα pixel τα οποία είναι περισσότερο επηρεασμένα από glint.

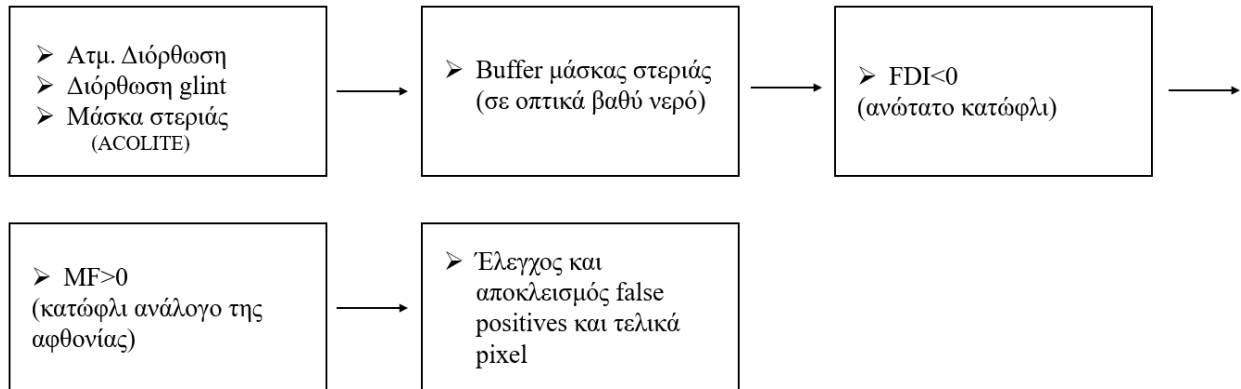
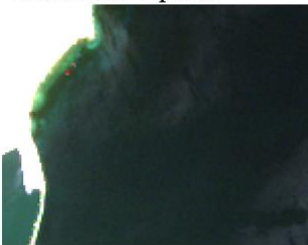


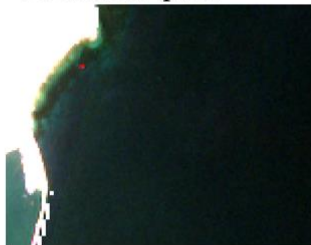
Figure 49: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης συνδυαστικής μεθόδου

Στην παρούσα εφαρμογή το κατώφλι του δείκτη fdi τέθηκε στο -0.1, ενώ το κατώφλι για το matched filtering ήταν 0.1 για τους μεγαλύτερους στόχους με υψηλή καλυπτικότητα (20180607, 20190418, 20190518), ενώ έπρεπε να προσαρμοστεί χαμηλότερα για τις εικόνες με μικρότερους στόχους και χαμηλή καλυπτικότητα (20190503, 20190528, 20190607). Τα συγκεκριμένα κατώφλια αντιστοιχούν σε διορθωμένες για glint εικόνες, ενώ θα ήταν αυστηρότερα για τις μη διορθωμένες εικόνες, καθώς οι υπογραφές των στόχων δεν θα είχαν αλλοιωθεί από τον αλγόριθμο διόρθωσης. Σε όλες τις εικόνες μαρκάρονται τουλάχιστον τα κυρίαρχα pixel των στόχων. Η διαδικασία παράγει αρκετά καλά αποτελέσματα στις εικόνες με χαμηλό glint, ενώ μαρκάρονται αρκετά false positives και άγνωστα pixel. Τα περισσότερα λάθος pixel αντιστοιχούν κυρίως σε σκιές από σύννεφα, σκάφη, απόνερα σκαφών, καυσαέρια σκαφών και αεροσκαφών. Στη παρούσα μελέτη τα false positives αφαιρέθηκαν χειροκίνητα, και ως αποτέλεσμα ο τελικός αριθμός των pixel δεν είναι ακριβής για κάθε εικόνα, καθώς πολλά pixel μπορεί να διέφυγαν της αφαίρεσης. Ωστόσο ο αυτόματος αποκλεισμός συγκεκριμένων τύπων false positives, όπως για παράδειγμα αυτά των σκιών από σύννεφα, μπορεί να ενσωματωθεί στη διαδικασία. Στην εικόνα 50 φαίνεται χαρακτηριστικά πως το επίπεδο του glint, αλλά και το κατώφλι του κλάσματος αφθονίας, επηρεάζει τον τελικό αριθμό των pixel που μαρκάρονται. Στις εικόνες 20190503 και 20190518 φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά false positives από σκάφη. Η προτεινόμενη διαδικασία είναι μια πολύ αρχική προσέγγιση, η οποία χρήζει περαιτέρω διερεύνησης για την κατάλληλη παραμετροποίηση και ορισμό γενικών κατωφλιών, με σκοπό την δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές εντοπισμού ΘΠΑ.

20180607
mf>0.1, ήπιο glint
σύνολο: 190 pixel



20190418
mf>0.1, ήπιο glint
σύνολο: 519 pixel



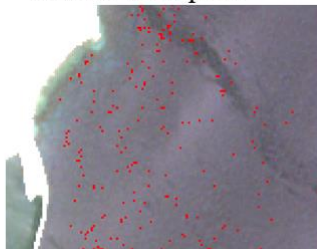
20190503
mf>0.05, ήπιο glint
σύνολο: 649 pixel



20190518
mf>0.1, ήπιο glint, aerosol
σύνολο: 398 pixel



20190528
mf>0.07, έντονο glint
σύνολο: 2692 pixel

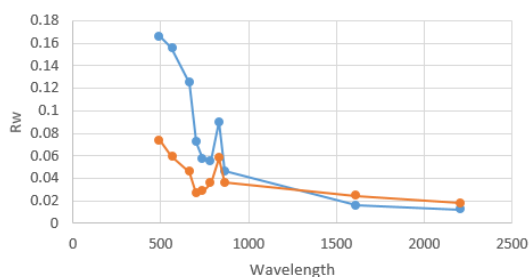


20190607
mf>0.05, έντονο glint
σύνολο: 6292 pixel



Figure 50: Αποτελέσματα προτεινόμενης μεθόδου σε διορθωμένες για glint εικόνες

Πολλές από τις υπογραφές των false positives, όπως για παράδειγμα από σκάφη, βρέθηκε ότι έχουν φασματικές γωνίες μεγαλύτερες των 10° , συγκρινόμενες με την υπογραφή του κυρίαρχου pixel του στόχου 20180607 (εικόνα 50). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πως πιθανώς να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κατώφλι φασματικής γωνίας για τον αποκλεισμό επιπλέον false positives.



$\theta = 15^\circ$

Figure 51: Σύγκριση υπογραφών false positive από σκάφος και του κυρίαρχου pixel του στόχου από την εικόνα 20180607

Μεταξύ των pixel που μαρκάρονται από τη διαδικασία βρίσκονται και μια σειρά άγνωστων pixel, οι υπογραφές των οποίων παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με αυτή των στόχων (εικόνα 52). Τα pixel αυτά ενδέχεται να είναι μικρά στατικά σκάφη ή θόρυβος, ενώ δεν αποκλείεται να πρόκειται για pixel τα οποία περιέχουν κάποιο κλάσμα ΘΠΑ.

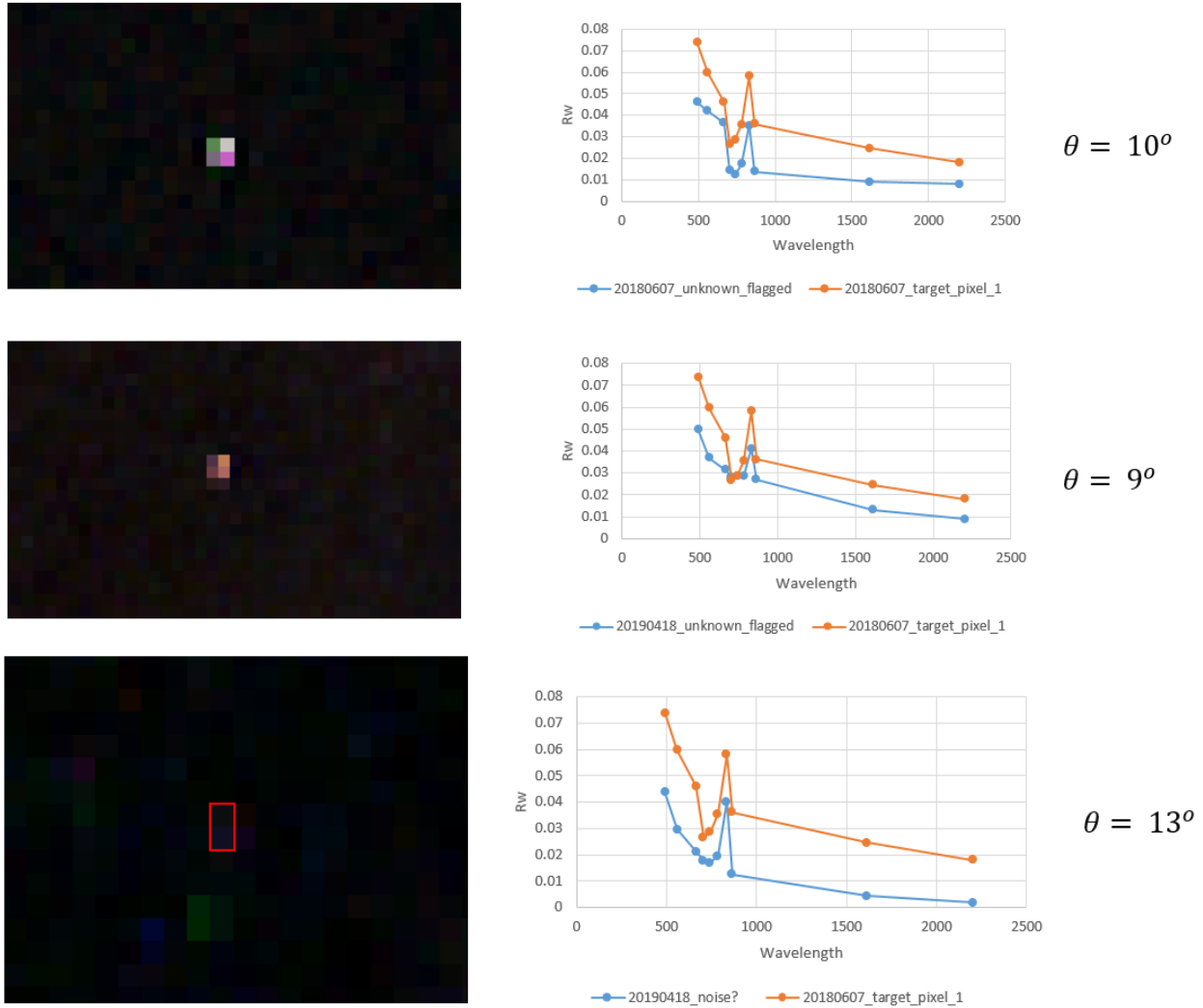


Figure 52: Άγνωστα pixel, σύγκριση φασματικών υπογραφών με το κυρίαρχο pixel του στόχου 20180607

4.8 Χαρτογράφηση φασματικής γωνίας (ENVI)

Η μέθοδος ταξινόμησης φασματικής γωνίας δεν απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς το αναγκαίο κατώφλι για ταξινόμηση των pixel των στόχων (με υπογραφές: προσαρμοσμένη υπογραφή PET, υπογραφή PET USGS και μέση τιμή στόχου 2018/ υπογραφή νερού USGS) ήταν τέτοιο που οδηγούσε στην ταξινόμηση πολλών pixel νερού. Το γεγονός αυτό ήταν ως ένα βαθμό αναμενόμενο καθώς είχαν ήδη εντοπιστεί pixel νερού επηρεασμένα από glint, που σχημάτιζαν μικρή φασματική γωνία με τις υπογραφές των στόχων. Ωστόσο, η μέθοδος

χαρτογράφησης φασματικής γωνίας είναι ενδεχομένως δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον αποκλεισμό false positives που προκύπτουν από άλλες μεθόδους εντοπισμού.

4.9 ENVI Anomaly Detection

Ο αλγόριθμος anomaly detection του ENVI παράγει καλά αποτελέσματα, ιδιαίτερα για μεγάλους στόχους υψηλής καλυπτικότητας, με την προϋπόθεση ο στόχος να μην βρίσκεται σε περιοχή επηρεασμένη από glint (εικόνα 53). Στην περίπτωση που ο στόχος βρίσκεται ανάμεσα σε pixel τα οποία είναι επηρεασμένα από glint, ο αλγόριθμος δεν αναγνωρίζει κάποια ανωμαλία στα pixel του στόχου σε σχέση με τα γειτονικά. Όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους η αντανάκλαση πυθμένα επηρεάζει τον αλγόριθμο. Το βασικό πλεονέκτημα του αλγόριθμου ωστόσο έγκειται στο γεγονός ότι αγνοεί τα pixel τα οποία έχουν επηρεαστεί από glint, και επομένως αν χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με κάποια από τις προηγούμενες μεθόδους μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των false positives. Για τον εντοπισμό των μικρότερων στόχων με χαμηλότερη καλυπτικότητα ήταν αναγκαία η προσαρμογή του αρχικού κατωφλιού 0.05 σε μεγαλύτερο εύρος, ενώ ο εντοπισμός των στόχων στην εικόνα 20180528 (υψηλό glint στην περιοχή των στόχων) δεν ήταν δυνατή χωρίς την αύξηση του κατωφλιού σε σημείο που να μαρκάρονται πολλά λάθος pixel. Η εφαρμογή του αλγορίθμου για τον εντοπισμό ΘΠΑ χρήζει περαιτέρω διερεύνησης για τον ορισμό κατωφλιών ανάλογων του κλάσματος αφθονίας και της δυνατότητας χρήσης συνδυαστικά με κάποια άλλη μέθοδο.

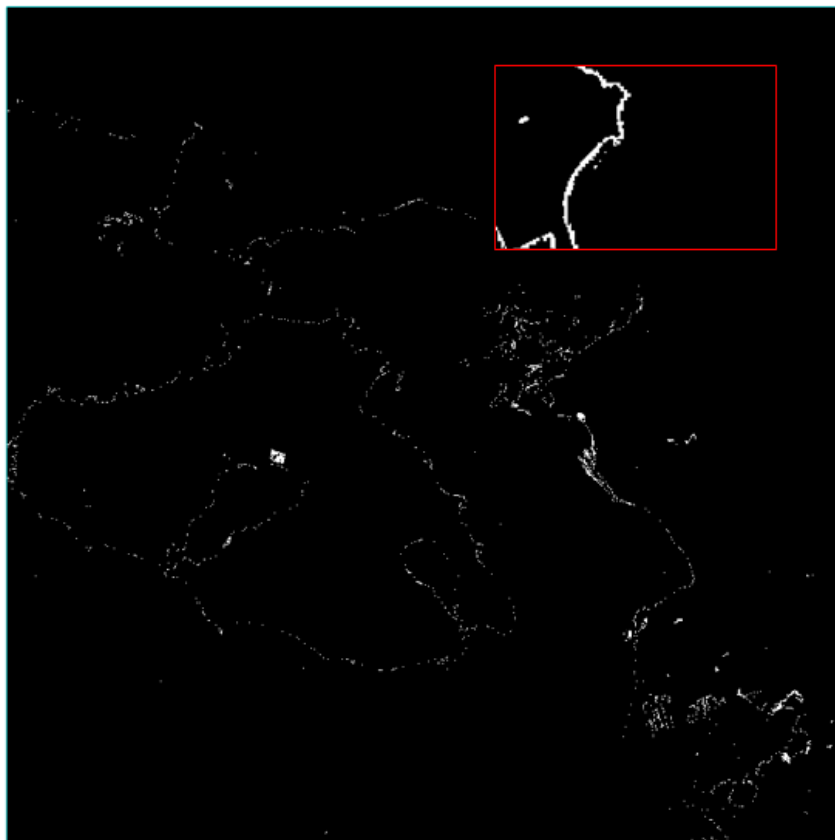


Figure 53: Αποτελέσματα anomaly detection για την 20180607 εικόνα με κατώφλι 0.05

5. Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

Η παρούσα μελέτη συνιστά μια εισαγωγική διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης πολυφασματικών εικόνων Sentinel 2 για τον εντοπισμό ΘΠΑ. Η πολύ διαφορετική απόκριση του νερού και των πλαστικών στο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, και ιδιαίτερα στο υπέρυθρο τμήμα, θεωρητικά τα καθιστά υλικά των οποίων οι υπογραφές μπορούν εύκολα να διαχωριστούν μέσω τηλεπισκοπικών μεθόδων. Μια σειρά μελετών έχουν αναδείξει την δυνατότητα χρήσης υπερφασματικών μετρήσεων για τον εντοπισμό και διαχωρισμό πλαστικών σε εργαστηριακές συνθήκες και στο περιβάλλον. Ωστόσο η χρήση πολυφασματικών δορυφορικών αισθητήρων για τον εντοπισμό πλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον εμπεριέχει κάποια βασικά εμπόδια. Αρχικά η, κατά τα άλλα υψηλή, χωρική ανάλυση των δορυφόρων με ανοιχτά προς το κοινό δεδομένα, όπως οι Sentinel και Landsat, εισάγει τον πρώτο περιορισμό στο μέγεθος των αντικειμένων τα οποία μπορούν να διακριθούν με βεβαιότητα. Το γεγονός αυτό μεταφράζεται σε ένα ελάχιστο ποσοστό της επιφάνειας ενός pixel το οποίο θα πρέπει να καλύπτεται από ΘΠΑ ώστε να μπορεί να διακριθεί από τα υπόλοιπα pixel νερού. Πέραν της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα, η φασματική ανάλυση των ανοιχτών δορυφορικών δεδομένων αποτελεί έναν ακόμη περιοριστικό παράγοντα σε ό,τι αφορά τον εντοπισμό ΘΠΑ. Τόσο ο Sentinel 2 όσο και άλλοι δορυφόροι όπως ο Landsat 8, πιθανότατα δεν διαθέτουν την κατάλληλη φασματική ανάλυση ώστε να μπορούν να διακριθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των φασματικών υπογραφών των πλαστικών στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές από την απόκριση των PET μπουκαλιών στα SWIR κανάλια του Sentinel 2 και συγκεκριμένα στα 1610 nm. Οι χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης των διάφορων πλαστικών φαίνεται πως δεν είναι δυνατό να εντοπιστούν ως έχει από τον Sentinel 2, καθώς είναι εκτός των καναλιών του δορυφόρου. Ταυτόχρονα, σε περίπτωση που μια πολύ μεγάλη επιφάνεια, ώστε να καλύπτει μεγάλο τμήμα ενός pixel 20m, είναι καλυμμένη από PET, ενδέχεται η περιοχή απορρόφησης να γίνεται αισθητή. Ωστόσο, οι περιοχές απορρόφησης και η συμβολή τους στο συνολικό σήμα των SWIR καναλιών είναι πιθανό να μπορεί να εκτιμηθεί κάνοντας χρήση της συνάρτησης φασματικής απόκρισης (SRF) της κάθε μπάντας.

Πέραν της φασματικής και χωρικής ανάλυσης των αισθητήρων, η γεωμετρία θέασης του δέκτη συμβάλει σημαντικά στην ικανότητα εντοπισμού σωμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας. Όπως ισχύει για πολλές τηλεπισκοπικές εφαρμογές στο υδάτινο περιβάλλον, το ποσοστό των pixel που επηρεάζονται από sunglint και η ένταση του σήματος καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση της θαλάσσιας επιφάνειας. Η σχεδόν ναδίρ γωνία θέασης του Sentinel 2 αισθητήρα τον κάνει ιδιαίτερα επιρρεπή στο sunglint, και σε συνδυασμό με την ώρα λήψης των δεδομένων (σχεδόν 12μμ) και με την εποχή διεξαγωγής των πειραμάτων (Άνοιξη – Καλοκαίρι), συμβάλουν ώστε ένα σημαντικό ποσοστό των pixel των εικόνων να επηρεάζεται από sunglint.

Σε γενικές γραμμές, τουλάχιστον κάποια από pixel όλων των στόχων είχαν διακριτές υπογραφές από το υπόβαθρο του νερού. Εξαιρέση αποτελούν οι 5x5 στόχοι των HDPE σακουλών και οι στόχοι της 20190528 εικόνας στην οποία η περιοχή που βρίσκονται οι στόχοι είναι έντονα επηρεασμένη από glint. Η φασματική υπογραφή του στόχου με τα καλάμια διαφέρει από τους στόχους των πλαστικών κυρίως στα τρία κανάλια του ορατού φάσματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτές οι μπάντες μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν για την διάκριση μεταξύ ΘΠΑ και φυσικών υλικών που επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας. Η απόκριση ενός pixel

επηρεασμένου από έντονο glint μπορεί να είναι παρόμοια με την απόκριση ενός pixel το οποίο περιέχει χαμηλό κλάσμα ΘΠΑ, με μικρές φασματικές γωνίες μέχρι και κάτω των 10ο, γεγονός που υποδηλώνει έντονη ομοιότητα. Η ομοιότητα αυτή έγινε εμφανής στις ταξινομήσεις φασματικής γωνίας, όπου το κατώφλι ταξινόμησης της υπογραφής των πλαστικών είναι αναγκαστικά τέτοιο ώστε πολλά pixel με glint να ταξινομούνται ως πλαστικά. Παρομοίως, η ύπαρξη πλαστικών σε pixel επηρεασμένο από glint υπερεκτιμάται από την λειτουργία match filtering του ENVI. Η διόρθωση του glint μέσω του ACOLITE και των SWIR καναλιών του S2 μειώνει την υπερεκτίμηση του glint, ωστόσο ταυτόχρονα υποεκτιμά και το κλάσμα πλαστικού στα πίζελ των στόχων, καθώς η έντονη απόκριση των πλαστικών στο SWIR φάσμα παρερμηνεύεται ως glint από τον αλγόριθμο και διορθώνεται. Επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα αφθονίας ΘΠΑ σε ένα pixel, τόσο περισσότερο θα διορθωθεί για glint.

Ο προτεινόμενος δείκτης fdi αν τεθεί υψηλό κατώφλι επηρεάζεται λιγότερο από το glint, ωστόσο η χρήση του ανέδειξε θέματα σχετικά με τον θόρυβο και το λόγο σήματος προς θόρυβο, καθώς και με τους διαφορετικούς ανιχνευτές του Sentinel 2 αισθητήρα. Η ένταση του σήματος τόσο του νερού όσο και των pixel με χαμηλό κλάσμα πλαστικών είναι αρκετά χαμηλή ώστε το SNR να παίζει σημαντικό ρόλο στην συνολική απόκριση. Ταυτόχρονα, λόγω της BRDF παραμόρφωσης μεταξύ των διαφορετικών detectors του αισθητήρα, pixel τα οποία θεωρητικά θα είχαν την ίδια απόκριση, έχουν διαφορετικό πρόσημο στον δείκτη λόγω του διαφορετικού detector.

Η συνδυαστική μέθοδος που προτείνεται εντοπίζει επιτυχώς τα pixel των στόχων που θεωρητικά περιέχουν τα υψηλότερα κλάσματα πλαστικού (>10%), ωστόσο επηρεάζεται από πολύ έντονο glint, ενώ μαρκάρει αρκετά false positives (σκιές συννέφων, αντανάκλαση βυθού, σκάφη και white caps από απόνερα, καυσαέρια σκαφών και αεροσκαφών) τα οποία μπορούν να αφαιρεθούν με σχετική ευκολία καθώς και άγνωστα pixel, με υπογραφή πολύ όμοια των στόχων. Τα pixel αυτά ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα θορύβου, white caps ή pixel τα οποία όντως περιέχουν κάποιο κλάσμα πλαστικού, γεγονός που χρίζει περαιτέρω διερεύνησης. Το γεγονός ότι το μέγεθος και η καλυπτικότητα των στόχων δεν ήταν σταθερή, προσφέρει μια πρώτη εκτίμηση για το ελάχιστο απαιτούμενο κλάσμα πλαστικών το οποίο μπορεί να εντοπιστεί, ωστόσο δεν επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων παραμέτρων όπως το glint στην ικανότητα εντοπισμού.

Η απόκριση των pixel με κλάσμα ΘΠΑ και επομένως η δυνατότητα εντοπισμού εξαρτώνται από (τουλάχιστον) μια σειρά βασικών παραγόντων:

- Προσαρμογή της μεθόδου σε εικόνες χωρίς διόρθωση για glint
- Το κλάσμα αφθονίας ΘΠΑ στο pixel (μέγεθος και καλυπτικότητα στόχου)
- Το ποσό του glint στην περιοχή μελέτης
- Το οπτικό βάθος της υδάτινης στήλης (αντανάκλαση πυθμένα)
- Τον λόγο σήματος προς θόρυβο του αισθητήρα
- Την παραμόρφωση λόγω BRDF

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση των δυνατοτήτων εντοπισμού, του ελάχιστου κλάσματος ΘΠΑ και των παραγόντων επιρροής, προτείνεται η ανάλυση της φασματικής υπογραφής στόχων σταθερού μεγέθους και καλυπτικότητας υπό διαφορετικές συνθήκες glint σε διαφορετικές εικόνες και ημερομηνίες λήψης με σκοπό:

- τη διερεύνηση της επιρροής και διόρθωση της παραμόρφωσης λόγω BRDF
- τη συσχέτιση απόδοσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τα επίπεδα glint και θορύβου
- τη προσαρμογή των κατωφλιών με βάση τα επίπεδα glint
- ανάπτυξη κριτηρίου χαρτογράφησης φασματικής γωνίας για τον αποκλεισμό false positives
- διερεύνηση της επιρροής του SNR του αισθητήρων, ταξινόμηση εικόνων βάσει SNR και ορισμό κατωφλιού ελάχιστου σήματος εντοπισμού
- περαιτέρω διερεύνηση αλγορίθμου anomaly detection (ENVI)

Ταυτόχρονα, η διεξαγωγή του ίδιου πειράματος με χρήση στόχων οι οποίοι θα αποτελούνται από υλικά και κλάσματα χαρακτηριστικά των ΘΠΑ σε ζώνες υψηλής συγκέντρωσης όπως το GPGP, θα βοηθούσε ιδιαίτερα στην εκτίμηση της δυνατότητας εντοπισμού και εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες. Τέλος, προτείνεται η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε δορυφορικές εικόνες υψηλότερης ανάλυσης, καθώς και η χρήση υπογραφών από άλλους δορυφόρους και πολυφασματικές/υπερφασματικές εικόνες από μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones).

Βιβλιογραφία

- A.L. Lusher, M. McHugh, R.C. Thompson, Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 67, Issues 1–2, 2013, Pages 94-99, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.028>.
- Adams, J.B., Smith, M.O., Johnson, P.E., 1986. Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 Site. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91, 8098–8112. <http://dx.doi.org/10.1029/JB091iB08p08098>.
- Andrady Anthony L. (2011) Microplastics in the marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 62, Issue 8, Pages 1596-1605, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>.
- Baekeland L. H. 1909. The Synthesis, Constitution, and Uses of Bakelite. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*. 1 (3), 149-161
- Ballerini, T., Le Pen, J.-R., Andrady, A., Cole, M., Galgani, F., Kedzierski, M., Pedrotti, M.L., ter halle, A., Van Arkel, K., Zettler, E., Amaral-Zettler, L., Bruzaud, S., Brandon, J., Durand, G., Enevoldsen, E., Eriksen, M., Fabre, P., Fossi, M.-C., Frère, L., Wong-WhaChung, P., 2018. Plastic pollution in the ocean: what we know and what we don't know about. *Plast. Ocean Platf. – Camp 29*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36720.92160>
- Bannert, D., Kühn, F., and Ho`rig, B., 1994, Ergebnisse spektorradiometrischer Untersuchungen an ölschieferaufschlüssen in Pakistan. 14. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF vom 5–10 Oktober 1994 in Dresden, pp. 171–178.
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985–1998. doi:10.1098/rstb.2008.0205
- Brown S, Nicholls R, Woodroffe C, Hanson S, Hinkel J, Kebede AS, et al. Sea-Level Rise Impacts and Responses: A Global Perspective In: Finkl CW, editor. *Coastal Hazards*. Netherlands: Springer; 2013. pp. 117–149.
- C.J. Moore, S.L. Moore, M.K. Leecaster, S.B. Weisberg A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre *Mar. Pollut. Bull.*, 42 (2001), pp. 1297-1300
- Carolyn J. Foley, Zachary S. Feiner, Timothy D. Malinich, Tomas O. Höök, A meta-analysis of the effects of exposure to microplastics on fish and aquatic invertebrates, *Science of The Total Environment*, Volumes 631–632, 2018, Pages 550-559, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.046>.
- CLOUTIS, E. A. (1989). Spectral Reflectance Properties of Hydrocarbons: Remote-Sensing Implications. *Science*, 245(4914), 165–168. doi:10.1126/science.245.4914.165

- Cox, C., and W. Munk (1954a), Measurement Of The Roughness Of The Sea Surface From Photographs Of The Sun's Glitter, *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 838–850.
- Cózar A, Sanz-Martín M, Martí E, González-Gordillo JI, Ubeda B, et al. (2015) Plastic Accumulation in the Mediterranean Sea. *PLOS ONE* 10(4): e0121762. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121762>
- Derek R. Peddle, H. Peter White, Raymond J. Soffer, John R. Miller, Ellsworth F. LeDrew, Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data, *Computers & Geosciences*, Volume 27, Issue 2, 2001, Pages 203-213, ISSN 0098-3004, [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00096-0).
- Diogo Neves, Paula Sobral, Joana Lia Ferreira, Tânia Pereira, Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 101, Issue 1, 2015, Pages 119-126, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.008>.
- Durán-Alarcón, C., Santamaría-Artigas, A., Valenzuela, N., Mattar, C., 2014. RSR Calculator, una herramienta para el proceso de calibración/validación. In: *Revista Española de Teledetección*. 42. pp. 111–117.
- European Space Agency (2015) Sentinel-2 MSI User Handbook, downloaded from: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- F. Kühn, K. Oppermann & B. Hörig (2004) Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons , *International Journal of Remote Sensing*, 25:12, 2467-2473, DOI: 10.1080/01431160310001642287
- FAO. 2016. The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Rome. 200 pp.
- Féret, J.B., Asner, G.P., 2011. Spectroscopic classification of tropical forest species using radiative transfer modeling. *Remote Sens. Environ.* 115 (9), 2415–2422. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.004>.
- Gallo, F., Fossi, C., Weber, R., Santillo, D., Sousa, J., Ingram, I., ... Romano, D. (2018). Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *Environmental sciences Europe*, 30(1), 13. doi:10.1186/s12302-018-0139-z
- Garaba, S. P., & Dierssen, H. M. (2018). An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro- and microplastics. *Remote Sensing of Environment*, 205, 224–235. doi:10.1016/j.rse.2017.11.023
- Garaba, S. P., Schulz, J., Wernand, M. R., & Zielinski, O. (2012). Sunlint Detection for Unmanned and Automated Platforms. *Sensors*, 12(9), 12545–12561. doi:10.3390/s120912545

- Geyer, Roland & Jambeck, Jenna & Law, Kara. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 3. e1700782. 10.1126/sciadv.1700782.
- Gold, M., Mika, K., Horowitz, C., Herzog, M., & Leitner, L. (2013). *Stemming the Tide of Plastic Marine Litter: A Global Action Agenda*. UCLA: Emmett Institute on Climate Change and the Environment. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/6j74k1j3>
- Goldstein MC, Goodwin DS. 2013. Gooseneck barnacles (*Lepas* spp.) ingest microplastic debris in the North Pacific Subtropical Gyre. *PeerJ* 1:e184 <https://doi.org/10.7717/peerj.184>
- Gordon, H.R., Brown, O.B., Jacobs, M.M., 1975. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Appl. Opt.* 14, 417–427.
- Hammer, J., Kraak, M. H. S., & Parsons, J. R. (2012). Plastics in the Marine Environment: The Dark Side of a Modern Gift. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 1–44. doi:10.1007/978-1-4614-3414-6_1
- Harmel, T., and M. Chami (2013), Estimation of the sunglint radiance field from optical satellite imagery over open ocean: multidirectional approach and polarization aspects, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1029/2012JC008221.
- Harmel, T., Chami, M., Tormos, T., Reynaud, N., & Danis, P.-A. (2018). Sun-glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, 204, 308–321. doi:10.1016/j.rse.2017.10.022
- Harmel, T., Chami, M., Tormos, T., Reynaud, N., & Danis, P.-A. (2018). Sun-glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, 204, 308–321. doi:10.1016/j.rse.2017.10.022
- Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. (2005). Technical note: Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107–2112. doi:10.1080/01431160500034086
- Hochberg, E. J., Andrefouet, S., & Tyler, M. R. (2003). Sea surface correction of high spatial resolution ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1724–1729. doi:10.1109/tgrs.2003.815408
- Hörig, B., Kühn, F., Oschütz, F., & Lehmann, F. (2001). HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. *International Journal of Remote Sensing*, 22(8), 1413–1422. doi:10.1080/01431160120909
- http://gsp.humboldt.edu/olm_2016/courses/GSP_216_Online/lesson2-1/atmosphere.html
- <http://olympus.magnet.fsu.edu/primer/java/reflection/specular/index.html> [Accessed: 17-10-2019]

<https://vdrs.com/staging/tomra-optical-sorting/> Accessed: 16/10/2019

Hu, C., X. Li, W. G. Pichel, and F. E. Muller-Karger (2009), Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01604.

HUETE, A. R. (2004). REMOTE SENSING FOR ENVIRONMENTAL MONITORING. *Environmental Monitoring and Characterization*, 183–206. doi:10.1016/b978-012064477-3/50013-8

Hulburt, E. O. (1934), Polarization of light at sea, *J. Opt. Soc. Am.*, 24, 35–42.

Hwang Lee, Won Joon Shim, Jung-Hwan Kwon, Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals, *Science of The Total Environment*, Volumes 470–471, 2014, Pages 1545-1552, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.023>.

J. Mansui, A. Molcard, Y. Ourmières, Modelling the transport and accumulation of floating marine debris in the Mediterranean basin, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 91, Issue 1, 2015, Pages 249-257, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.11.037>.

Jambeck, Jenna & Geyer, Roland & Wilcox, Chris & Siegler, Theodore & Perryman, Miriam & Andrady, Anthony & Narayan, Ramani & Law, Kara. (2015). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science (New York, N.Y.)*. 347. 768-771. 10.1126/science.1260352.

Jerlov, N.G., 1968. *Optical Oceanography*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

Kako S, Isobe A, Kataoka T, Hinata H. (2014) A decadal prediction of the quantity of plastic marine debris littered on beaches of the East Asian marginal seas, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 81, Issue 1, Pages 174-184, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.057>.

Karlsson, T. M., Grahn, H., van Bavel, B., & Geladi, P. (2016). Hyperspectral Imaging and Data Analysis for Detecting and Determining Plastic Contamination in Seawater Filtrates. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 24(2), 141–149. doi:10.1255/jnirs.1212

Katja Dörnhöfer, Natascha Oppelt, Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances, *Ecological Indicators*, Volume 64, 2016, Pages 105-122, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>.

Kay Critchell, Jonathan Lambrechts, Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes?, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 171, 2016, Pages 111-122, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.036>.

Kay, S., Hedley, J., & Lavender, S. (2009). Sun Glint Correction of High and Low Spatial Resolution Images of Aquatic Scenes: a Review of Methods for Visible and Near-Infrared Wavelengths. *Remote Sensing*, 1(4), 697–730. doi:10.3390/rs1040697

- Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., and Klein, A.J., 2017, USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035, 61 p., <https://doi.org/10.3133/ds1035>.
- Kooi, M., Nes, E., Scheffer, M., & Koelmans, A. A. (2017). Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics. *Environmental science & technology*, 51(14), 7963–7971. doi:10.1021/acs.est.6b04702
- Kremezi M. and Karathanassi V. (2019) Correcting the BRDF effects on Sentinel-2 Ocean Images. *Proceedings Volume 11174, Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019); 111741C (2019)* <https://doi.org/10.1117/12.2533653>
- Kühn F. and Hörig B. (1995) Environmental remote sensing for military exercise places. *Remote Sensing and GIS for Site Characterizations: Applications and Standards, ASTM STP 1279, American Society for Testing and Materials*, pp. 5–16.
- L.C.-M. Lebreton, S.D. Greer, J.C. Borrero, Numerical modelling of floating debris in the world's oceans, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 64, Issue 3, 2012, Pages 653-661, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.027>.
- Lavender, S.; Pinkerton, M.; Moore, G.; Aiken, J.; Blondeau-Patissier, D. Modification to the Atmospheric Correction of SeaWiFS Ocean Colour Images Over Turbid Waters. *Cont. Shelf Res.* 2005, 25, 539-555
- Law, K. L., Moret-Ferguson, S., Maximenko, N. A., Proskurowski, G., Peacock, E. E., Hafner, J., & Reddy, C. M. (2010). Plastic Accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Science*, 329(5996), 1185–1188. doi:10.1126/science.1192321
- Lebreton L, Slat B, Ferrari F, Sainte-Rose B, Aitken J, Marthouse R, Hajbane S, Cunsolo S, Schwarz A, Levivier A, Noble K, Debeljak P, Maral H, Schoeneich-Argent R, Brambini R, Reisser J, (2018) Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports* 4666
- Lebreton L, van der Zwet J.D, Jan-Willem S, Boyan A, Reisser J. (2017) River plastic emissions to the world's oceans *Nature Communications* 15611 8 1
- Luke A. Holmes, Andrew Turner, Richard C. Thompson, Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment, *Environmental Pollution*, Volume 160, 2012, Pages 42-48, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.052>.
- Lusher A, Hollman P, Mendoza-Hill J (2017) Microplastics in fisheries and aquaculture. Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, p 615
- Matsuoka T, Nakashima T, Nagasawa N. 2005. A review of ghost fishing: scientific approaches to evaluation and solutions. *Fisheries Science* 691

- Moller, D., Chao, Y., & Maximenko, N. (2016). Remote sensing of marine debris. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). doi:10.1109/igarss.2016.7731005
- Moroni, M., Mei, A., Leonardi, A., Lupo, E., & Marca, F. (2015). PET and PVC Separation with Hyperspectral Imagery. *Sensors*, 15(1), 2205–2227. doi:10.3390/s150102205
- N. Maximenko, J. Hafner, P. Niiler Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters *Mar. Pollut. Bull.*, 65 (2012), pp. 51-62
- Nash A.D, Impacts of marine debris on subsistence fishermen An exploratory study, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 24, Issue 3, 1992, Pages 150-156, ISSN 0025-326X, [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(92\)90243-Y](https://doi.org/10.1016/0025-326X(92)90243-Y).
- Nicola J. Beaumont, Margrethe Aanesen, Melanie C. Austen, Tobias Börger, James R. Clark, Matthew Cole, Tara Hooper, Penelope K. Lindeque, Christine Pascoe, Kayleigh J. Wyles, Global ecological, social and economic impacts of marine plastic, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 142, 2019, Pages 189-195, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>.
- OECD 2018. Improving Plastics Management:Trends, policy responses, and the role of international co-operation and trade. OECD Environment Policy Paper No. 12, 3
- Onjira, Pauline. (2014). Application of Remote sensing and Rainfall-Run-off Inundation Modeling to Near-Real Time Flood Monitoring in Kenya. 10.13140/RG.2.1.1283.3046.
- Ottaviani, M.; Spurr, R.; Stamnes, K.; Li, W.; Su, W.; Wiscombe, W. Improving the Description of Sunlight for Accurate Prediction of Remotely Sensed Radiances. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **2008**, 109, 2364-2375.
- Parkes, Alex. *Journal of the Society of Arts*; London Vol. 14, (Nov 17, 1865): 81.
- Pedrotti ML, Petit S, Elineau A, Bruzaud S, Crebassa J-C, Dumontet B, et al. (2016) Changes in the Floating Plastic Pollution of the Mediterranean Sea in Relation to the Distance to Land. *PLoS ONE* 11(8): e0161581. doi:10.1371/journal.pone.0161581
- Plastics Europe Market Research Group (PEMRG). 2019. Plastics – the Facts 2018 An analysis of European plastics production, demand and waste data. https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf
- Qiqing Chen, Annika Allgeier, Daqiang Yin, Henner Hollert, Leaching of endocrine disrupting chemicals from marine microplastics and mesoplastics under common life stress conditions, *Environment International*, Volume 130, 2019, 104938, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104938>.

- Raúl Aguirre Gómez, Spectral Reflectance Analysis of the Caribbean Sea, *Geofísica Internacional*, Volume 53, Issue 4, 2014, Pages 385-398, ISSN 0016-7169, [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)70073-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)70073-X).
- Serranti, S., Gargiulo, A., & Bonifazi, G. (2012). Hyperspectral imaging for process and quality control in recycling plants of polyolefin flakes. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20(5), 573. doi:10.1255/jnirs.1016
- Serranti, S., Palmieri, R., Bonifazi, G., & Cózar, A. (2018). Characterization of microplastic litter from oceans by an innovative approach based on hyperspectral imaging. *Waste Management*, 76, 117–125. doi:10.1016/j.wasman.2018.03.003
- Siegel, D.A.; Wang, M.; Maritorena, S.; Robinson, W. Atmospheric Correction of Satellite Ocean Color Imagery: The Black Pixel Assumption. *Appl. Opt.* 2000, 39, 3582-3591.
- Suaria, G., & Aliani, S. (2014). Floating debris in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 86(1-2), 494–504. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.06.025
- Suaria, G., Avio, C. G., Mineo, A., Lattin, G. L., Magaldi, M. G., Belmonte, G. Aliani, S. (2016). The Mediterranean Plastic Soup: synthetic polymers in Mediterranean surface waters. *Scientific Reports*, 6(1). doi:10.1038/srep37551
- Suaria, G., Melinte-Dobrinescu, M. C., Ion, G., & Aliani, S. (2015). First observations on the abundance and composition of floating debris in the North-western Black Sea. *Marine Environmental Research*, 107, 45–49. doi:10.1016/j.marenvres.2015.03.011
- Thevenon, F., Carroll C., Sousa J. (editors), 2014. *Plastic Debris in the Ocean: The Characterization of Marine Plastics and their Environmental Impacts, Situation Analysis Report*. Gland, Switzerland: IUCN. 52 pp
- Thompson Richard C., Moore Charles J., vom Saal Frederick S. and Swan Shanna H. (2009) *Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends* 364 *Phil. Trans. R. Soc. B*
- Tokiwa Y, Calabia BP, Ugwu CU, Aiba S. 2009. Biodegradability of Plastics. *International Journal of Molecular Sciences.*; 10(9):3722-3742.
- Ulrici, A., Serranti, S., Ferrari, C., Cesare, D., Foca, G., & Bonifazi, G. (2013). Efficient chemometric strategies for PET–PLA discrimination in recycling plants using hyperspectral imaging. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 122, 31–39. doi:10.1016/j.chemolab.2013.01.001
- Van Sebille E, Wilcox C, Lebreton L, Maximenko N, Hardesty B, Van Franeker J, Eriksen M, Siegel D, Galgani F, & Law Kara. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*. 10. 124006. 10.1088/1748-9326/10/12/124006.
- Vanhellemont, Q. (2019). Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, 225, 175–192. doi:10.1016/j.rse.2019.03.010

- Vázquez-Guardado, A., Money, M., McKinney, N., & Chanda, D. (2015). Multi-spectral infrared spectroscopy for robust plastic identification. *Applied Optics*, 54(24), 7396. doi:10.1364/ao.54.007396
- Vázquez-Guardado, A., Money, M., McKinney, N., & Chanda, D. (2015). Multi-spectral infrared spectroscopy for robust plastic identification. *Applied Optics*, 54(24), 7396. doi:10.1364/ao.54.007396
- Veenstra, T. S., & Churnside, J. H. (2012). Airborne sensors for detecting large marine debris at sea. *Marine Pollution Bulletin*, 65(1-3), 63–68. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.11.018
- Wang, M.; Bailey, S. Correction of Sun Glint Contamination on the SeaWiFS Ocean and Atmosphere Products. *Appl. Opt.* **2001**, 40, 4790-4798.
- Wang, M.; Isaacman, A.; Franz, B.; McClain, C. Ocean-Color Optical Property Data Derived from the Japanese Ocean Color and Temperature Scanner and the French Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances: A Comparison Study. *Appl. Opt.* **2002**, 41, 974-990.
- Wong, C. S., Green, D. R. & Cretney, W. J. (1974) Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean. *Nature* 247, 30–32.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647. doi:10.1021/acs.est.7b00423
- Ziccardi, L. M., Edgington, A. , Hentz, K. , Kulacki, K. J. and Kane Driscoll, S. (2016), Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: A state-of-the-science review. *Environ Toxicol Chem*, 35: 1667-1676. doi:10.1002/etc.3461