



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΔΠΜΣ «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»**

Τομέας Τοπογραφίας – Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

---

---

**Εντοπισμός χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά  
απόβλητα με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων  
σε περιβάλλον GIS**

---

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αικατερίνη Κορυζή

*Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Περιβαλλοντική Τεχνολογία*

Επιβλέπων: Δημήτριος Αργιαλάς, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΠΜΣ «ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ»

Τομέας Τοπογραφίας – Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

---

---

**Εντοπισμός χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά  
απόβλητα με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων  
σε περιβάλλον GIS**

---

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αικατερίνη Κορυζή

*Χημικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Περιβαλλοντική Τεχνολογία*

Επιβλέπων: Δημήτριος Αργιαλάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

.....  
Δ. Αργιαλάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Β. Καραθανάση  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....  
Κ. Καράτζαλος  
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ. «Γεωπληροφορική» της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και διεξήχθη στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Τομέα Τοπογραφίας. Αντικείμενο της εργασίας είναι ο εντοπισμός χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων σε περιβάλλον GIS.

Πριν την παρουσίαση της εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίησή της.

Θερμότερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα Καθηγητή Δημήτριο Αργιαλά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα και τις γνωστικές βάσεις που έθεσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχ. Πολυχρόνη Κολοκούση, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε σε πρακτικά ζητήματα και στην επίλυση θεμάτων με τις εύστοχες υποδείξεις του.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σε όλους τους ανθρώπους που γνώρισα κατά τη διάρκεια παρακολούθησης του μεταπτυχιακού προγράμματος, για τη μετάδοση βασικών γνώσεων και εμπειριών.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στον σύζυγό μου για την ηθική συμπαράσταση και αμέριστη κατανόηση που έδειξε ολόκληρο το χρονικό διάστημα παρακολούθησης του μεταπτυχιακού προγράμματος.

## Περίληψη

Η παράνομη εδαφική διάθεση αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελεί ένα φλέγον περιβαλλοντικό και κοινωνικό ζήτημα που αντιμετωπίζει η χώρα μας, αλλά και πολλές χώρες παγκοσμίως, το οποίο είναι εντονότερο όταν αυτές υπολείπονται των απαραίτητων υποδομών ασφαλούς διάθεσης και ενός αποτελεσματικού μηχανισμού ελέγχου και επιβολής της ισχύουσας περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια διερεύνησης των δυνατοτήτων των δορυφορικών εικόνων Sentinel-2 για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με στερεά απόβλητα. Δεδομένης της χωρικής διακριτικής ικανότητας των τηλεπισκοπικών δεδομένων, η εργασία εστιάζει σε σχετικά μεγάλο μεγέθους χώρους διάθεσης, όπως είναι αυτοί των αστικών στερεών αποβλήτων. Η εφαρμογή των τεχνικών ανάλυσης της τηλεπισκόπησης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS, συνδυάζοντας τη χρησιμοποίηση τεχνικών χωρικής ανάλυσης με σκοπό την οριοθέτηση της έκτασης που ερευνάται η παρουσία τέτοιων χώρων και παράλληλα τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων εντοπισμού.

Τα αποτελέσματα της εργασίας ανέδειξαν ότι η δορυφορική τηλεπισκόπηση, μέσω της επιβλεπόμενης ταξινόμησης και της χρήσης φασματικών δεικτών, είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, καθώς παρέχει τη δυνατότητα γρήγορου εντοπισμού χώρων δυνητικά ρυπασμένων με αστικά απόβλητα, κυρίως σε ημι-φυσικές περιοχές, όταν δεν απαιτούνται υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και ανθρώπινους πόρους έναντι της εποπτείας με χερσαία ή εναέρια μέσα μεταφοράς. Επιπλέον, η φασματική σύγκριση επιφανειών με αστικά απόβλητα με ορισμένες κατηγορίες εδαφοκάλυψης μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, κυρίως για τις αδιαπέρατες επιφάνειες, μέσω της συμπληρωματικής χρήσης αξιόπιστων χωρικών δεδομένων και της ενσωμάτωσης τεχνικών χωρικής ανάλυσης του GIS στις τεχνικές ανάλυσης της τηλεπισκόπησης.

Οι προοπτικές χρήσης της δορυφορικής τηλεπισκόπησης συνδυαστικά με τη χρήση των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών είναι μεγάλες και δύνανται να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της περιβαλλοντικής επιθεώρησης και ελέγχου της εδαφικής διάθεσης των αστικών στερεών αποβλήτων. Παρόμοιες τηλεπισκοπικές εφαρμογές αναμένεται στο μέλλον να είναι απαραίτητες και ενσωματωμένες στη λειτουργία κάθε αναλυτικής διαδικασίας παρακολούθησης της ρύπανσης εδαφών.

**Λέξεις κλειδιά:** παράνομη εδαφική διάθεση αποβλήτων, εντοπισμός χώρων ρυπασμένων με απόβλητα, αστικά στερεά απόβλητα, τηλεπισκόπηση, ΣΓΠ, δορυφορικά δεδομένα Sentinel-2, επιβλεπόμενη ταξινόμηση, φασματικοί δείκτες, Ελλάδα

## “Detection of municipal solid waste dump sites using remote sensing data in a GIS environment”

### Abstract

Illegal dumping still presents a serious environmental and social issue for Greece and many countries around the world, which is more intense when the countries lack the necessary landfill infrastructure and an effective environmental surveillance and enforcement mechanism.

The present master diploma thesis aims at evaluating the use of Sentinel-2 satellite data to detect solid waste dump sites. Given the spatial resolution of the remote sensing data, the study focuses on relatively large in size dump sites, such as those for municipal solid waste disposal. The application of remote sensing analysis techniques was carried out in a GIS environment, incorporating the use of spatial analysis techniques to determine the investigation zone for municipal solid waste dump sites, while aiming at increasing the accuracy of the detection results.

The study's results have shown that satellite remote sensing, using supervised classification and spectral indices, is a very promising technology to support the detection of illegal municipal solid waste disposal sites, as it provides the capability to rapidly identify potential dump sites, mostly in semi-natural areas, when no high accuracy mapping demands are required, saving thus time and human resources compared to surveillance by ground inspection or airplane patrol. In addition, the spectral confusion among surfaces covered with municipal solid waste and certain land covers can be adequately solved, notably for impervious surfaces, through the supplementary use of reliable spatial data and the inclusion of GIS analysis techniques into remote sensing analysis techniques.

The prospects for using satellite remote sensing along with the use of GIS analysis techniques are large, which can enhance the effectiveness of environmental inspection and control in regards to land disposal of municipal solid waste. In the future, it is highly anticipated that similar remote sensing applications will be necessary and integrated in the operation of any soil pollution monitoring process.

**Keywords:** *illegal dumping, detection of solid waste dump sites, municipal solid waste, remote sensing, GIS, Sentinel-2 satellite data, supervised classification, spectral indices, Greece*

## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	14
2	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ .....	17
2.1	Τηλεπισκόπηση .....	17
2.1.1	Βασικές έννοιες .....	17
2.1.2	Δορυφορικό πρόγραμμα Copernicus .....	20
2.1.3	Δορυφορικό πρόγραμμα Landsat .....	24
2.1.4	Ταξινόμηση πολυφασματικής εικόνας.....	27
2.1.5	Φασματικοί δείκτες .....	32
2.1.6	Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	38
2.2	Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών.....	39
2.2.1	Βασικές έννοιες .....	39
2.2.2	Χωρικά δεδομένα .....	41
2.2.3	Κύριες λειτουργίες.....	43
2.2.4	Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	49
2.3	Στερεά απόβλητα .....	51
2.3.1	Ευρωπαϊκή πολιτική για τα απόβλητα.....	51
2.3.2	Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο .....	52
2.3.3	Εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης αποβλήτων .....	54
2.3.4	Διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων.....	55
2.3.5	Εδαφική διάθεση στερεών αποβλήτων .....	58
2.3.6	Επισκόπηση χρήσης τηλεπισκόπησης ως εργαλείο εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με στερεά απόβλητα .....	62
3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ .....	66
3.1	Μεθοδολογική προσέγγιση .....	66
3.1.1	Πεδίο εφαρμογής .....	66
3.1.2	Μεθοδολογική ανάλυση .....	67
3.2	Περιοχή μελέτης.....	69
3.3	Τηλεπισκοπικά δεδομένα .....	71

3.3.1	Δεδομένα Sentinel-2.....	71
3.3.2	Δεδομένα Landsat 8 .....	72
3.3.3	Προεπεξεργασία δεδομένων.....	73
3.4	Καθορισμός φασματικής υπογραφής επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα.....	76
3.4.1	Δεδομένα χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα .....	76
3.4.2	Δείγματα αναφοράς .....	80
3.4.3	Φασματικά χαρακτηριστικά εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα .....	82
3.4.4	Σύγκριση με βασικές κατηγορίες κάλυψης γης .....	84
3.5	Ταξινόμηση εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα .....	86
3.5.1	Αλγόριθμος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου .....	86
3.5.2	Αλγόριθμος ευκλείδειας απόστασης .....	92
3.5.3	Αλγόριθμος χαρτογράφου φασματικής γωνίας.....	97
3.6	Καθορισμός ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα.....	102
3.6.1	Χωρικά δεδομένα .....	102
3.6.2	Χωρική ανάλυση.....	104
3.7	Εφαρμογή φασματικών δεικτών.....	113
3.8	Παρουσίαση τελικών αποτελεσμάτων εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα.....	120
3.9	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	133
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	135
5	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....	139
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	140

## Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Έγχρωμο σύνθετο RGB432 περιοχής μελέτης .....	70
Εικόνα 2: Επιλογή εικόνων Sentinel-2 .....	72
Εικόνα 3: Μωσαϊκό περιοχής μελέτης - εικόνες Sentinel-2 .....	73
Εικόνα 4: Μωσαϊκό περιοχής μελέτης – εικόνες Landsat 8 .....	75
Εικόνα 5: Χώροι διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων στην περιοχή μελέτης .....	78
Εικόνα 6: Δείγματα αναφοράς .....	81
Εικόνα 7: Παράθυρο δημιουργίας ‘Band set’ του εργαλείου SCP .....	82
Εικόνα 8: Παράθυρο εισαγωγής δειγμάτων αναφοράς του εργαλείου SCP .....	83
Εικόνα 9: Φασματικά χαρακτηριστικά αστικών στερεών αποβλήτων των δειγμάτων αναφοράς.....	83
Εικόνα 10: Σύγκριση φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα με βασικές κατηγορίες κάλυψης γης .....	85
Εικόνα 11: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου .....	89
Εικόνα 12: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας .....	90
Εικόνα 13: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας .....	90
Εικόνα 14: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου .....	91
Εικόνα 15: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου .....	91
Εικόνα 16: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης.....	94
Εικόνα 17: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας.....	95
Εικόνα 18: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας .....	95
Εικόνα 19: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου .....	96
Εικόνα 20: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου .....	96
Εικόνα 21: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο χαρτογράφου φασματικής γωνίας (SAM) .....	99
Εικόνα 22: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας .....	100
Εικόνα 23: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας.....	101
Εικόνα 24: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου .....	101
Εικόνα 25: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου .....	101



Εικόνα 26: Κοίτες ποταμών με παρόμοια φασματική απόκριση με εκτάσεις αστικών στερεών αποβλήτων .....	106
Εικόνα 27: Αρχική ζώνη εντοπισμού – Πελοπόννησος .....	109
Εικόνα 28: Ζώνη εντοπισμού, απομόνωση οδικού δικτύου – παράδειγμα περιοχής Γκιώνας .....	109
Εικόνα 29: Ζώνη εντοπισμού, απομόνωση οικισμών – παράδειγμα πόλης Θήβας .....	110
Εικόνα 30: Ζώνη εντοπισμού, απομόνωση αμμωδών ακτών – παράδειγμα περιοχής Ζαχάρω .....	110
Εικόνα 31: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας.....	111
Εικόνα 32: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας .....	111
Εικόνα 33: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου .....	112
Εικόνα 34: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου .....	112
Εικόνα 35: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας .....	118
Εικόνα 36: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας.....	118
Εικόνα 37: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου .....	119
Εικόνα 38: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου .....	119
Εικόνα 39: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας .....	121
Εικόνα 40: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Δυτικής Αχαΐας .....	122
Εικόνα 41: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ανατολικής Αιγιάλειας (Αιγείρας) .....	123
Εικόνα 42: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ηλείας (Τριανταφυλλιάς) .....	124
Εικόνα 43: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου .....	125
Εικόνα 44: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου .....	126
Εικόνα 45: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής.....	127
Εικόνα 46: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας .....	128
Εικόνα 47: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ιστιαίας .....	129
Εικόνα 48: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Χαλκίδας .....	130
Εικόνα 49: Τελικά αποτελέσματα σε ΧΥΤΑ που δεν χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα αναφοράς .....	131
Εικόνα 50: Τελικά αποτελέσματα ΧΑΔΑ που υφίσταται παρουσία αστικών στερεών αποβλήτων .....	132

## Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Κύριες φασματικές ζώνες στην τηλεπισκόπηση .....	18
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φασματικών καναλιών Sentinel-2 .....	23
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά φασματικών καναλιών Landsat-8 .....	26
Πίνακας 4: Χρησιμοποιούμενοι φασματικοί δείκτες .....	34
Πίνακας 5: Βασικό νομοθετικό πλαίσιο για τα απόβλητα .....	53
Πίνακας 6: Επισκόπηση δορυφορικών τηλεπισκοπικών αισθητήρων για τον εντοπισμό παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων τα τελευταία 15 χρόνια .....	62
Πίνακας 7: Επισκόπηση τεχνικών τηλεπισκοπικής ανάλυσης για τον εντοπισμό παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων τα τελευταία 15 χρόνια .....	63
Πίνακας 8: Δεδομένα Sentinel-2 .....	71
Πίνακας 9: Δεδομένα Landsat-8 .....	72
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά προϊόντος προεπεξεργασίας για κάθε κανάλι .....	75
Πίνακας 11: Υφιστάμενοι ΧΥΤΑ στην περιοχή μελέτης .....	76
Πίνακας 12: Αριθμός ΧΑΔΑ στην περιοχή μελέτης (ημερομηνία 2/12/2016) .....	77
Πίνακας 13: Εντοπισμένοι ΧΑΔΑ στην περιοχή μελέτης .....	79
Πίνακας 14: Μέση φασματική υπογραφή εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα .....	84
Πίνακας 15: Επιλεγόμενες κατηγορίες κάλυψης γης για τη σύγκριση με τη φασματική υπογραφή εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα .....	84
Πίνακας 16: Επιλεγόμενα κανάλια εικόνων Sentinel-2 για την ταξινόμηση .....	86
Πίνακας 17: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου παραλληλεπίπεδου .....	88
Πίνακας 18: Επιλεγόμενο εύρος τιμών φασματικής αναφοράς εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα για την εφαρμογή του αλγόριθμου του παραλληλεπίπεδου .....	88
Πίνακας 19: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου ευκλείδειας απόστασης .....	93
Πίνακας 20: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου χαρτογράφου φασματικής γωνίας (SAM) .....	98
Πίνακας 21: Επιλεγόμενες κατηγορίες OSM πολυγωνικής γεωμετρίας .....	103
Πίνακας 22: Επιλεγόμενες κατηγορίες Corine Land Cover 2012 πολυγωνικής γεωμετρίας .....	103
Πίνακας 23: Ποτάμια που έχουν κοίτες με αποθέσεις που έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με επιφάνεια αστικών στερεών αποβλήτων .....	106
Πίνακας 24: Αποτελέσματα ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού .....	107
Πίνακας 25: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών .....	114
Πίνακας 26: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τεχνικών ανάλυσης που εφαρμόστηκαν για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα .....	117
Πίνακας 27: Αποτελέσματα αξιολόγησης αποτελεσμάτων .....	133

## Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1: Ζώνες ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.....	18
Σχήμα 2: Φασματική υπογραφή νερού, εδάφους και βλάστησης .....	19
Σχήμα 3: Οικογένεια δορυφόρων Sentinel .....	22
Σχήμα 4: Φασματικά κανάλια Sentinel-2 .....	23
Σχήμα 5: Προϊόντα Sentinel-2 .....	24
Σχήμα 6: Ιστορική αναδρομή αποστολών προγράμματος Landsat .....	25
Σχήμα 7: Φασματικά κανάλια Landsat-8 και σύγκρισή τους με Landsat-7 & Sentinel-2.....	26
Σχήμα 8: Μέθοδος παραλληλεπίπεδου σε διδιάστατο φασματικό χώρο .....	29
Σχήμα 9: Μέθοδος ελάχιστης απόστασης από τον μέσο όρο σε διδιάστατο φασματικό χώρο .....	30
Σχήμα 10: Μέθοδος χαρτογράφου φασματικής γωνίας σε διδιάστατο φασματικό χώρο.....	31
Σχήμα 11: Συστατικά στοιχεία ΣΓΠ .....	40
Σχήμα 12: Δεδομένα διανυσματικής και κανονικοποιημένης δομής .....	41
Σχήμα 13: Εργαλείο Select χωρικής ανάλυσης διανυσματικών δεδομένων .....	45
Σχήμα 14: Εργαλεία χωρικής ανάλυσης διανυσματικών δεδομένων .....	47
Σχήμα 15: Εργαλείο Raster Calculator χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων .....	48
Σχήμα 16: Εργαλείο Extract by mask χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων .....	48
Σχήμα 17: Χαρτογραφική σύνθεση θεματικών επιπέδων .....	49
Σχήμα 18: Ιεράρχηση επιλογών διαχείρισης αποβλήτων .....	52
Σχήμα 19: Μέση ποιοτική σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων.....	55
Σχήμα 20: Κατανομή παραγωγής αστικών στερεών αποβλήτων σε επίπεδο Περιφέρειας .....	56
Σχήμα 21: Διαχρονική εξέλιξη διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων.....	57
Σχήμα 22: Χρονική εξέλιξη εξάλειψης των ΧΑΔΑ .....	59
Σχήμα 23: Απεικόνιση ΧΑΔΑ που δεν συμμορφώνονται με απόφαση ΔΕΕ (λήξη 2ου εξαμήνου 2016) .....	60
Σχήμα 24: Ευκλείδεια απόσταση δειγμάτων αναφοράς .....	92
Σχήμα 25: Φασματική γωνία δειγμάτων αναφοράς .....	98
Σχήμα 26: Βαθμός συμμετοχής στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης των επιμέρους κριτηρίων προσδιορισμού ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα .....	108

## Συνομογραφίες

ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΔΕΕ	Δικαστήριο Ευρωπαϊκής Ένωσης
ΔΠΜΣ	Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
ΕΓΣΑ	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΕΣΔΑ	Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
Ν.	Νόμος
ΟΤΑ	Οργανισμός Τοπικής Αυτοδιοίκησης
ΠΔΠ	Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον
ΠΕΣΔΑ	Περιφερειακό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων
ΣΓΠ	Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΥΠΕΚΑ	νυν ΥΠΕΝ
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας
ΥΠΕΣ	Υπουργείο Εσωτερικών
ΦΕΚ	Φύλλο Εφημερίδας της Κυβερνήσεως
ΦοΔΣΑ	Φορέας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων
ΧΑΔΑ	Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων
ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής
BI	Brightness Index
BSI	Bare Soil Index
CI	Crust Index
CLC	Corine Land Cover
DN	Digital Number
EBBI	Enhanced Built-Up and Bareness Index
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Επιτροπή
ΕΕΑ	European Environment Agency
EROS	Earth Resources Observation and Science
ESA	European Space Agency
GIS	Geographic Information System
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GSI	Top Soil Grain Size Index
ISODATA	Iterative Self-Organised Data Analysis
LRS	Land Remote Sensing
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MSI	Multi Spectral Instrument

NASA	National Aeronautics and Space Administration (of USA)
NBAI	Normalized Built up Area Index
NDBaI	Normalized Difference Bareness index
NDBBBI	Normalized difference index for the blue band in built-up and barren land
NDBI	Normalized difference built-up index
NDSDI	Normalized Difference Sand Dune Index
NDSI	Normalized Difference Soil Index
NDTeI	Texture Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near-Infrared
NMDI	Normalized Multi-Band Drought Index
OLI	Operational Land Imager
OSM	OpenStreetMap
PGI	Plastic Greenhouse Index
PSI	Plastic Surface Index
REI	Road Extraction Index
RIBS	Ratio Index for Bright Soil
ROI	Region of Interest
SAM	Spectral Angle Mapper
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
SNAP	Sentinel Application Platform
SWIR	ShortWave Infrared
Tbres	Brightness Temperature Index
TCB	Tasseled Cap Brightness
TIR	Thermal Infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
ToA	Top of Atmosphere
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
V	Visible
WGS	World Geodetic System

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ. «Γεωπληροφορική» της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και διεξήχθη στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Τομέα Τοπογραφίας. Αντικείμενο της εργασίας είναι ο εντοπισμός χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων σε περιβάλλον GIS.

Ο τομέας της διαχείρισης των αποβλήτων είναι στο επίκεντρο της περιβαλλοντικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά τα τελευταία σαράντα χρόνια μέσω πλήθους δράσεων και νομοθετικών πράξεων, με τις οποίες καθορίστηκαν οι κοινές γενικές αρχές και κατευθύνσεις διαχείρισης και οι διαδικασίες ελέγχου για την εξασφάλιση υψηλού επιπέδου προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας στην Ευρώπη. Παρά την σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, η διαχείριση των αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελεί μείζον ζήτημα και μια αναγνωρισμένα σημαντική περιβαλλοντική πρόκληση στην Ευρώπη αλλά και σε διεθνές επίπεδο, καθιστώντας πλέον αναγκαία την αλλαγή της σχέσης μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης, κατανάλωσης φυσικών πόρων και δημιουργίας αποβλήτων. Τα τελευταία χρόνια υφίσταται σαφής προσανατολισμός προς την κυκλική οικονομία με μακροπρόθεσμο στόχο να μειώνονται οι ποσότητες των παραγόμενων αποβλήτων και, εφόσον η παραγωγή αποβλήτων είναι αναπόφευκτη, να προωθούνται αυτά ως πόροι και να επιτυγχάνονται υψηλότερα επίπεδα ανακύκλωσης και ασφαλής διάθεση των αποβλήτων. Στοιχειώδεις προαπαιτούμενο αυτών των φιλόδοξων κατευθύνσεων είναι η πλήρης εφαρμογή της νομοθεσίας, εντείνοντας για τη χώρα μας την ανάγκη υλοποίησης των απαραίτητων έργων διαχείρισης, αλλά και της ενίσχυσης της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και ελέγχου και των μηχανισμών επιβολής για την πρόληψη και την αντιμετώπιση συμβάντων παραβατικότητας σχετικών με την εδαφική διάθεση των αποβλήτων.

Ειδικότερα, η παράνομη εδαφική διάθεση στερεών αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελεί ένα φλέγον ζήτημα που αντιμετωπίζει η χώρα μας, αλλά και πολλές χώρες παγκοσμίως, το οποίο είναι εντονότερο όταν αυτές υπολείπονται των απαραίτητων υποδομών ασφαλούς διάθεσης και ενός αποτελεσματικού μηχανισμού ελέγχου και επιβολής της ισχύουσας νομοθεσίας. Η πάγια πρακτική για τον εντοπισμό χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης στερεών αποβλήτων είναι η εποπτεία με χερσαία μέσα μεταφοράς από τις τοπικές αρχές βάσει σχετικών πληροφοριών ή καταγγελιών.

Κινητήρια δύναμη για την επιλογή της συγκεκριμένης θεματικής ήταν η διερεύνηση της εφαρμογής τεχνολογιών και σχετικά μη συμβατικών μεθόδων στον τομέα της παρακολούθησης και εποπτείας του περιβάλλοντος που σχετίζονται με την παραβατική συμπεριφορά στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Η εργασία ειδικότερα επιχειρεί να αναδείξει τις δυνατότητες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης συνδυαστικά με τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών ως εργαλεία ενδυνάμωσης της αποτελεσματικότητας της περιβαλλοντικής επιθεώρησης και ελέγχου της εδαφικής διάθεσης των αστικών στερεών αποβλήτων. Στο μέλλον αναμένεται ότι παρόμοιες τηλεπισκοπικές εφαρμογές θα είναι απαραίτητες και ενσωματωμένες στη λειτουργία κάθε αναλυτικής διαδικασίας παρακολούθησης της ρύπανσης εδαφών.

Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών σήμερα δεν αποτελεί δαπανηρή λύση όπως παλαιότερα, και μάλιστα η τρέχουσα τάση είναι τα νέα δορυφορικά συστήματα να αυξήσουν κατά το δυνατό τη χωρική διακριτική ικανότητα. Η εξέλιξη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια και τηλεπισκοπικά δεδομένα, με ικανοποιητικό εύρος χωρικής, ραδιομετρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας, διατίθενται πλέον ελεύθερα στην αγορά, σε τακτικά χρονικά διαστήματα, όπως αυτά του ευρωπαϊκού δορυφορικού προγράμματος Copernicus. Επιπλέον, η δωρεάν διάθεση δημόσιων χωρικών δεδομένων είναι πολλά υποσχόμενη στη χώρα μας, ως αποτέλεσμα της συμμόρφωσης με τις διατάξεις της Οδηγίας INSPIRE της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2007/2/EK), που σχετίζεται με τις υποδομές χωρικής πληροφορίας και τα ανοιχτά δεδομένα στα κράτη μέλη της. Ήδη έχουν γίνει βήματα για την πρόσβαση στο σύνολο των δεδομένων αυτών στο ευρύ κοινό, αν και ακόμα υπολείπεται η χώρα σημαντικά των υπόλοιπων κρατών μελών. Στα δημόσια ανοιχτά δεδομένα προστίθεται και πληθώρα πηγών ανοιχτών χωρικών δεδομένων, όπως το OpenStreetMap, επιτρέποντας τη χωρική ανάλυση φαινομένων που σχετίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος χωρίς σημαντικό κόστος.

Ειδικότερα στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της χρησιμότητας των δορυφορικών δεδομένων Sentinel-2 για τον εντοπισμό περιοχών ρυπασμένων με στερεά απόβλητα. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη χωρική διακριτική ικανότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων, και δεδομένου ότι για την εφαρμογή και αξιολόγηση της ικανότητας εντοπισμού χώρων διάθεσης απαιτείται να είναι διαθέσιμος ένας ικανός αριθμός γνωστών χώρων σχετικά μεγάλου μεγέθους, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε χώρους διάθεσης με αστικά στερεά απόβλητα, νόμιμων και μη. Η μεγάλη διασπορά των χώρων αυτών ανά την Ελλάδα, οι οποίοι αποτέλεσαν τα δεδομένα αναφοράς, καθόρισε και την έκταση της περιοχής μελέτης ώστε να μπορεί να εξυπηρετηθεί η δειγματοληψία γνωστών χώρων διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε ήταν το ηπειρωτικό τμήμα πέντε περιφερειών της χώρας: οι Περιφέρειες Αττικής, Στερεάς Ελλάδας, Πελοποννήσου, Δυτικής Ελλάδας και Θεσσαλίας.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή τεχνικών ανάλυσης της τηλεπισκόπησης ήταν το ArcGIS, δεδομένης μάλιστα και της ανάγκης διαχείρισης μεγάλου όγκου τηλεπισκοπικών δεδομένων. Τα μεθοδολογικά βήματα που υιοθετήθηκαν για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα ήταν:

(α) η επιβλεπόμενη ταξινόμηση για την ανάδειξη εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα, εξετάζοντας τρεις αλγόριθμους ταξινόμησης, χρησιμοποιώντας τη φασματική υπογραφή της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα,

(β) η χωρική ανάλυση της περιοχής μελέτης για την οριοθέτηση της περιοχής που είναι πιθανή η παρουσία χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, η οποία αναφέρεται στην παρούσα και ως ζώνη εντοπισμού, αποσκοπώντας παράλληλα στη μείωση της έκτασης που ερευνάται η παρουσία τέτοιων χώρων και στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης και

(γ) την εφαρμογή φασματικών δεικτών για τη μείωση της φασματικής σύγχυσης με την απομάκρυνση ειδών εδαφοκάλυψης που έχουν παρόμοια φασματική απόκριση με τις εκτάσεις που καταλαμβάνουν τα αστικά στερεά απόβλητα και επομένως τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων εντοπισμού.

Η παρούσα εργασία έχει δομηθεί ως ακολούθως:

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό μέρος, το οποίο παρουσιάζει το αντικείμενο, το πεδίο εφαρμογής και τους στόχους της εργασίας, αναφέροντας επιγραμματικά τα μεθοδολογικά εργαλεία που επιλέχθηκαν και τη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την εκπόνησή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που είναι σχετική με το αντικείμενο της εργασίας. Περιγράφονται αναλυτικά τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, που ήταν η τηλεπισκόπηση και τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών. Επιπλέον παρατίθενται βασικές πληροφορίες για τον τομέα διαχείρισης των αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα και της υφιστάμενης κατάστασης στη χώρα σχετικά με τα αστικά στερεά απόβλητα και την εδαφική διάθεση στερεών αποβλήτων.

Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει το πεδίο εφαρμογής, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, τα δεδομένα της μελέτης, και την υλοποίηση των τεχνικών ανάλυσης της τηλεπισκόπησης και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών που επιλέχθηκαν για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας. Παρουσιάζει την περιοχή μελέτης, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα και την προεπεξεργασία τους, καθώς και τα χωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά για τη χωρική ανάλυση της περιοχής μελέτης. Περιγράφει τα δείγματα αναφοράς, τον καθορισμό της φασματικής υπογραφής της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα αστικά στερεά απόβλητα, τη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τρεις αλγόριθμους, τη χωρική ανάλυση για την οριοθέτηση της έκτασης που ερευνάται η πιθανότητα εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα και τους φασματικούς δείκτες που εφαρμόστηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα συμπεράσματα της εργασίας καλύπτονται στο τέταρτο κεφάλαιο και οι προοπτικές για τη μελλοντική συνέχιση της εργασίας αναφέρονται στο πέμπτο κεφάλαιο.



## 2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

### 2.1 Τηλεπισκόπηση

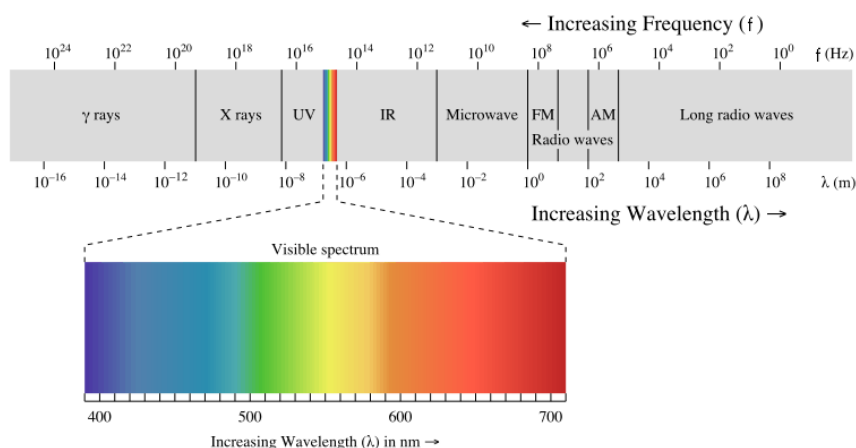
#### 2.1.1 Βασικές έννοιες

Η τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) είναι η επιστήμη και η τεχνολογία παρατήρησης και μελέτης των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας από απόσταση, βάσει της αλληλεπίδρασης των υλικών που βρίσκονται επάνω σε αυτή με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Προέδρου 1997). Συγκεκριμένα, η τηλεπισκόπηση έχει αντικείμενο τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων εξ' αποστάσεως για ένα αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο που βρίσκεται στη γήινη επιφάνεια, μέσω της μέτρησης και αποτύπωσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης (Gupta 1991, Mather 1999, Αργιαλάς 1999, Lillesand et al 2004).

Η τηλεπισκόπηση έχει ως κύριο πλεονέκτημα τη γρήγορη συλλογή και επεξεργασία μεγάλου όγκου γεωγραφικών δεδομένων, με μηδενικό ή μικρό σχετικά κόστος, λόγω της δυνατότητας ταχείας σάρωσης περιοχών μεγάλης έκτασης (Κάβουρας κ.α., 2016). Άλλα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα πληροφόρησης περιοχών με δύσκολη πρόσβαση, η δυνατότητα διαχρονικών λήψεων για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων και τη συνεχή παρακολούθηση, η δυνατότητα αποτύπωσης και συσχέτισης ιδιοτήτων και φαινομένων πολύ μεγάλων περιοχών. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η δυσκολία διάκρισης και οριοθέτησης των αντικειμένων στην πραγματικότητα, κυρίως όταν τα φυσικά αντικείμενα έχουν ασαφή όρια.

Η συλλογή τηλεπισκοπικών δεδομένων πραγματοποιείται από τηλεπισκοπικούς αισθητήρες (remote sensors) που τοποθετούνται σε επανδρωμένα ή μη πτητικά μέσα, όπως δορυφόροι, αεροσκάφη, ελικόπτερα, drones. Οι αισθητήρες αυτοί διακρίνονται με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους στους παθητικούς που καταγράφουν την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται φυσικά από την επιφάνεια της γης και τους ενεργούς αισθητήρες που καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από το ίδιο το όργανο καταγραφής και που αποτελεί τεχνητή πηγή ακτινοβολίας (Πασχαρίδης 2015, Schowengerdt 2007).

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι πολύ μεγάλου εύρους με μήκη κύματος χιλιάδων χιλιομέτρων έως κλάσματος διαστάσεων ενός ατόμου. Χωρίζεται σε επτά επιμέρους ζώνες βάσει ορισμένων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με αύξουσα σειρά συχνότητας (και φθίνουσα μήκους κύματος) οι ζώνες αυτές είναι: (1) Ραδιοκύματα, (2) Μικροκύματα, (3) Υπέρυθρη ακτινοβολία, (4) Ορατή ακτινοβολία, (5) Υπεριώδης ακτινοβολία, (6) ακτίνες X και (7) ακτίνες γ (Serway et al 1990). Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, μόνο ένα μικρό εύρος μήκους κύματος καταλαμβάνει το ορατό φάσμα.



**Σχήμα 1: Ζώνες ηλεκτρομαγνητικού φάσματος**

(Πηγή: Wikimedia Commons)

Οι παθητικοί αισθητήρες λειτουργούν κυρίως στην ορατή και υπέρυθρη περιοχή του φάσματος, ενώ οι ενεργητικοί αισθητήρες, όπως τα ραντάρ, λειτουργούν στην μικροκυματική περιοχή του φάσματος.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα στοιχεία των κύριων φασματικών ζωνών (καναλιών) που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση. Να σημειωθεί ότι δεν υφίστανται ακριβή όρια των ζωνών, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις των ορίων τους μεταξύ των βιβλιογραφικών αναφορών. Οι ζώνες V, NIR και SWIR (από 0.4 έως περίπου 3 μm) είναι η φασματική περιοχή της ηλιακής-ανακλαστικής ακτινοβολίας. Η ζώνη MWIR είναι η περιοχή μετάβασης από την ηλιακή-ανακλαστική στην θερμική ακτινοβολία. Άνω των 5 μm κυριαρχεί η αυτο-εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία από τη γήινη επιφάνεια (Schowengerdt 2007).

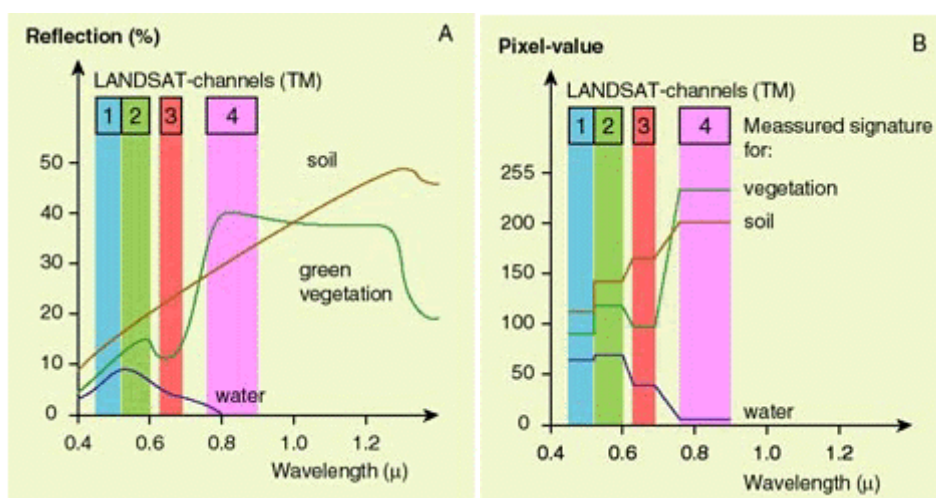
**Πίνακας 1: Κύριες φασματικές ζώνες στην τηλεπισκόπηση**

Ζώνη	Περιοχή μήκους κύματος	Πηγή ακτινοβολίας	Ιδιότητα επιφανείας
Ορατή (V)	0.4-0.7 μm	Ηλιακή	Ανάκλαση
Εγγύς υπέρυθρη (NIR)	0.7-1.1 μm	Ηλιακή	Ανάκλαση
Μικρού μήκους υπέρυθρη (SWIR)	1.1-1.35 μm 1.4-1.8 μm 2-2.5 μm	Ηλιακή	Ανάκλαση
Μεσαίου μήκους υπέρυθρη (MWIR)	3-4 μm 4.5-5 μm	Ηλιακή, θερμική	Ανάκλαση, θερμοκρασία
Θερμική ή μεγάλου μήκους υπέρυθρη (TIR ή LWIR)	8- 9.5 μm 10-14 μm	Θερμική	Θερμοκρασία
Μικροκυματική	1 mm – 1m	Θερμική (παθητική) Τεχνητή (ενεργητική)	Θερμοκρασία (παθητική) Τραχύτητα (ενεργητική)

Πηγή: Schowengerdt, 2007

Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται η δορυφορική τηλεπισκόπηση με παθητικά συστήματα καταγραφής του ορατού και υπέρυθρου φάσματος. Στα παθητικά συστήματα, η καταγραφή της ακτινοβολίας γίνεται σε περισσότερα από ένα κανάλια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και το προϊόν της καταγραφής (δεδομένα) είναι μια πολυφασματική δορυφορική εικόνα που αποτελείται από πολλές εικόνες της ίδιας περιοχής της επιφάνειας της γης καταγεγραμμένες την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε διαφορετικό μήκος κύματος. Τα δεδομένα από τους δορυφόρους παραλαμβάνονται γεωαναφερόμενα σε κανονικοποιημένη δομή (raster) και οι τιμές τους είναι ψηφιακοί αριθμοί (Digital Number values). Πριν από τη χρήση τους απαιτείται προεπεξεργασία που αποβλέπει σε γεωμετρικές, ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις και στη συνέχεια μετατροπή των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων σε τιμές ακτινοβολίας.

Με αυτά τα τηλεπισκοπικά δεδομένα μελετάται η φασματική απόκριση ενός αντικειμένου, περιοχής ή φαινομένου σε σχέση με το μήκος κύματος που ονομάζεται φασματική υπογραφή (spectral signature). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η διάκριση ενός είδους αντικειμένου, περιοχής ή φαινομένου σε σχέση με άλλα είδη. Στο σχήμα 2 ([www.esa.int/](https://www.esa.int/)) δίνεται ένα τυπικό γράφημα της φασματικής υπογραφής του νερού, του εδάφους και της βλάστησης (γράφημα Α) και πώς καταγράφεται στους αισθητήρες του δορυφόρου LANDSAT (γράφημα Β). Η βλάστηση εμφανίζει μεγάλη ανάκλαση στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου στο κανάλι 4 και μικρή ανάκλαση στην περιοχή του ορατού στο κανάλι 3. Αυτό επιτρέπει τη διάκριση των περιοχών με βλάστηση από τα χέρσα εδάφη. Η διαφορά της ανάκλασης στα κανάλια 3 και 4 είναι μεγάλη για τις περιοχές με βλάστηση και ασήμαντη για τα χέρσα εδάφη.



Σχήμα 2: Φασματική υπογραφή νερού, εδάφους και βλάστησης

(Πηγή: <https://www.esa.int/>)

Οι βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα μιας δορυφορικής εικόνας ενός παθητικού συστήματος καταγραφής αναφέρονται ως διακριτικές ικανότητες του αισθητήρα, που αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην επιλογή των εικόνων ανάλογα με την εφαρμογή (Περάκης κ.α. 2015, Δαλέζιος 2015, Levin 1999):

- Χωρική διακριτική ικανότητα: Αναφέρεται στο ελάχιστο μέγεθος της επιφάνειας που μπορεί να διακρίνει ο αισθητήρας, δηλαδή το μέγεθος του εικονοστοιχείου της εικόνας. Για

παράδειγμα για ένα αισθητήρα με διακριτική ικανότητα 10 m, το εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει περιοχή 10 m x 10 m στο έδαφος.

- Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα: Αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να καταγράψει τις διαβαθμίσεις της έντασης της ακτινοβολίας, δηλαδή τον αριθμό των bits που περιέχει η τιμή του εικονοστοιχείου. Όσο υψηλότερη είναι η ραδιομετρική ανάλυση ενός αισθητήρα τόσο πιο ευαίσθητος είναι στην ανίχνευση μικρών διαφορών στην ανακλώμενη ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Για παράδειγμα για εικόνες 8bits, το εικονοστοιχείο μιας εικόνας δύναται να λάβει 256 (0 έως 255) τιμές έντασης ενός φασματικού καναλιού.
- Φασματική διακριτική ικανότητα: Αναφέρεται στον αριθμό των φασματικών καναλιών και το φασματικό εύρος κάθε καναλιού. Προσδιορίζει την ικανότητα του αισθητήρα να διακρίνει τις πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ των μηκών κύματος, άρα περιγράφει πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορούν να διακριθούν περιοχές γειτονικής φασματικής συμπεριφοράς σε μια εικόνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα σε ένα κανάλι, τόσο μικρότερο είναι το εύρος της φασματικής περιοχής της ακτινοβολίας που καταγράφεται στο κανάλι αυτό.
- Χρονική διακριτική ικανότητα: Είναι η ικανότητα του τηλεπισκοπικού συστήματος να απεικονίσει την ίδια περιοχή με την ίδια γωνία παρατήρησης πολλές φορές χρονικά. Ουσιαστικά αναφέρεται στο χρόνο επαναδιέλευσης του δορυφόρου από την ίδια περιοχή.

Τα πολυφασματικά δεδομένα της τηλεπισκόπησης έχουν πολυ-επιστημονικές εφαρμογές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή συνδυαστικά με άλλες τεχνολογίες και μεθοδολογικά εργαλεία, όπως τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών. Με τα δεδομένα είναι δυνατό να γίνουν κατάλληλοι συνδυασμοί φασματικών καναλιών και επεξεργασία τους με βάση διάφορες μεθοδολογίες επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας, λιγότερο ή περισσότερο αυτοματοποιημένες (πχ ενίσχυση, ταξινόμηση). Σκοπός των τεχνικών επεξεργασίας της εικόνας είναι η διευκόλυνση της φωτοερμηνείας της, αυξάνοντας τη διαφοροποίηση μεταξύ των περιοχών του πεδίου κατόπτευσης. Με τον τρόπο αυτό εξάγονται χρήσιμες πληροφορίες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε θεματικές απεικονίσεις, όπως η αποτύπωση ή διαφοροποίηση καλύψεων γης και ο εντοπισμός φαινομένων του περιβάλλοντος (πχ ύπαρξη νερού, ασθένεια βλάστησης, ρύπανση).

Για τη συλλογή πολυφασματικών εικόνων, υφίστανται πολλά κρατικά και εμπορικά δορυφορικά συστήματα με παθητικά συστήματα καταγραφής, με πιο διαδεδομένα τα δορυφορικά συστήματα Landsat, Sentinel, SPOT, IKONOS, QuickBird και WorldView. Ελεύθερα τηλεπισκοπικά δεδομένα διαθέτουν τα προγράμματα Copernicus (Sentinel) και Landsat.

### **2.1.2 Δορυφορικό πρόγραμμα Copernicus**

Το δορυφορικό πρόγραμμα Copernicus είναι ένα από τα μεγαλύτερα επιστημονικά προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Παρατήρηση της Γης (Earth Observation) και αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου προγράμματος «Παγκόσμια Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας» (GMES -Global Monitoring for Environment and Security).

Πρόκειται για ένα σύνθετο σύστημα υποδομών συλλογής δεδομένων από δορυφορικές και επιτόπιες παρατηρήσεις της γης και παρέχει τυποποιημένα δεδομένα μέσω ενός συνόλου υπηρεσιών που αφορούν έξι θεματικούς τομείς: χερσαίο περιβάλλον, θαλάσσιο περιβάλλον, ατμόσφαιρα, κλιματική αλλαγή, διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και ασφάλεια.

Οι παρατηρήσεις του προγράμματος έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών σε διάφορους τομείς, όπως η προστασία του περιβάλλοντος, η περιφερειακή και τοπική χωροταξία, η γεωργία, η δασοπονία, η αλιεία, η υγεία, η πολιτική προστασία, οι υποδομές, οι μεταφορές και ο τουρισμός.

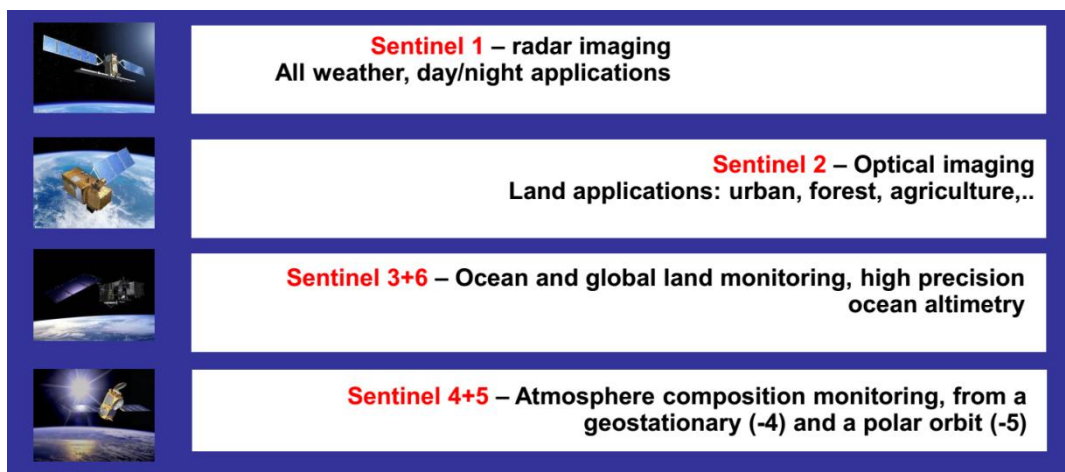
Το πρόγραμμα διασφαλίζει την ανεξάρτητη πρόσβαση της Ευρώπης σε περιβαλλοντικές γνώσεις και βασικές τεχνολογίες παρατήρησης και γεωπληροφόρησης. Τα δεδομένα του προγράμματος διατίθενται ελεύθερα και δωρεάν στους χρήστες, υπό ορισμένους όρους ως προς το επιχειρησιακό μοντέλο του παρόχου, οι οποίοι είναι δημόσιοι φορείς και οργανισμοί, εμπορικοί χρήστες και ιδιώτες και οργανώσεις μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα.

Επικεφαλής του συντονισμού και διαχείρισης του προγράμματος είναι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) για τη διαστημική υποδομή και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (EEA) και άλλους φορείς για την επιτόπια υποδομή. Το πρόγραμμα χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και τον ESA, με επιδότηση 8,4 δις ευρώ για την περίοδο 2014-2020.

Οι γενικοί στόχοι του προγράμματος (Κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 377/2014) είναι:

- γεωσκόπηση για τη στήριξη της προστασίας του περιβάλλοντος και των προσαθειών πολιτικής προστασίας και ασφάλειας
- υποστήριξη στρατηγικής «Ευρώπη 2020» για μια έξυπνη, βιώσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη
- προαγωγή της ανάπτυξης ενός ανταγωνιστικού ευρωπαϊκού κλάδου για το διάστημα και τις υπηρεσίες
- μεγιστοποίηση των ευκαιριών των ευρωπαϊκών επιχειρήσεων για ανάπτυξη και παροχή καινοτόμων γεωσκοπικών συστημάτων και υπηρεσιών
- διασφάλιση αυτόνομης πρόσβασης σε περιβαλλοντικές γνώσεις και βασικές τεχνολογίες γεωσκόπησης και υπηρεσίες γεωπληροφόρησης, παρέχοντας έτσι στην Ευρώπη ανεξάρτητη ικανότητα λήψης αποφάσεων και δράσης
- στήριξη και συμβολή στις ευρωπαϊκές πολιτικές και προαγωγή των παγκόσμιων πρωτοβουλιών, όπως το GEOSS (Global Earth Observation System of Systems)

Το διαστημικό σκέλος του προγράμματος το συντονίζει ο οργανισμός ESA που έχει αναπτύξει μια νέα οικογένεια δορυφόρων με την επωνυμία «Sentinel», ειδικά για τις επιχειρησιακές ανάγκες του προγράμματος Copernicus (βλέπε σχήμα 3). Μέχρι σήμερα έχουν εκτοξευθεί οι Sentinel 1 A & B , 2 A & B και 3A.



Σχήμα 3: Οικογένεια δορυφόρων Sentinel

(Πηγή: <https://earth.esa.int/>)

### Sentinel-2

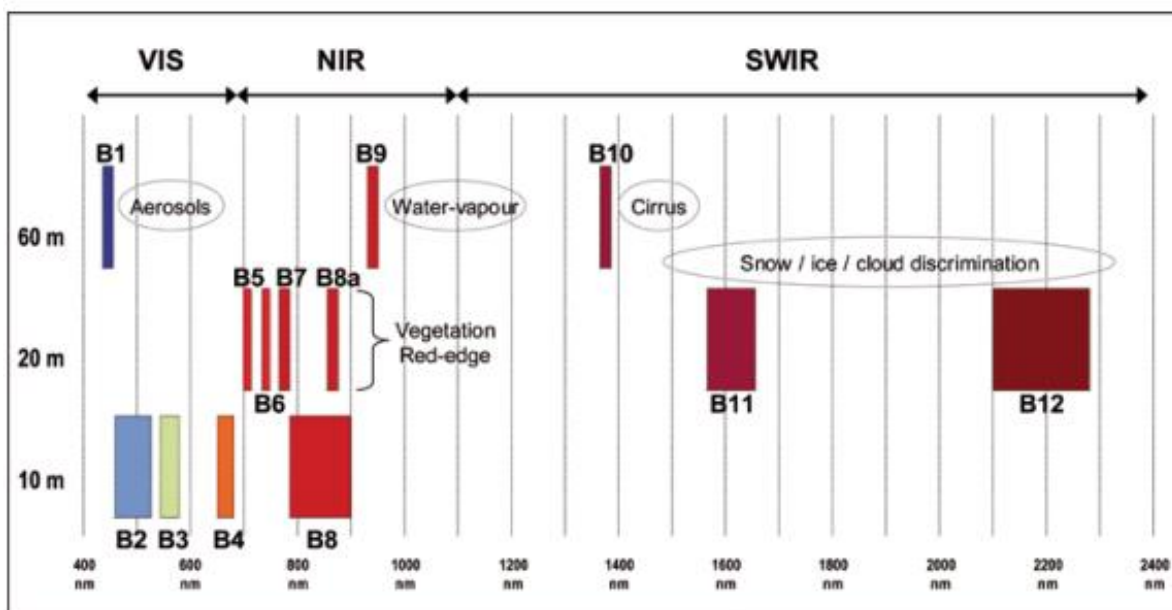
Η αποστολή Sentinel-2 περιλαμβάνει δύο «δίδυμους» δορυφόρους που περιστρέφονται σε σχηματισμό για τη βέλτιστη κάλυψη της γης και φέρουν ένα καινοτόμο όργανο πολυφασματικής απεικόνισης υψηλής ανάλυσης για την παρακολούθηση του χερσαίου περιβάλλοντος.

Ο πρώτος δορυφόρος (Sentinel-2A) εκτοξεύθηκε στις 23 Ιουνίου 2015 και ο δεύτερος δορυφόρος (Sentinel-2B) στις 7 Μαρτίου 2017. Επειδή υπάρχει επικάλυψη των δορυφορικών δεδομένων με τον δορυφόρο Landsat 8, η NASA και η ESA σε συνεννόηση οδήγησαν τους δορυφόρους σε επαναδιέλευση 3 ημερών (από τον Ισημερινό).

Το αντικείμενο της αποστολής είναι η παροχή δεδομένων χερσαίου περιβάλλοντος για την μελέτη των αλλαγών της κάλυψης γης - χρήσεων γης, την παρακολούθηση των δασικών και αγροτικών περιοχών και της βιοποικιλότητας και την ανίχνευση ρύπανσης σε λιμναία και παράκτια ύδατα. Επιπλέον θα παρέχει πληροφορίες για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και την διατροφική ασφάλεια του πλανήτη.

Κύρια χαρακτηριστικά της αποστολής είναι:

- Συστηματική παγκόσμια κάλυψη χερσαίων επιφανειών από το γεωγρ. πλάτος 56°S στο 84°N, συμπεριλαμβανομένων παράκτιων περιοχών, νησιών, της Μεσογείου και επιλεγμένων περιοχών (πχ Ανταρκτική)
- Ταχύτατη επανεπίσκεψη: κάθε 5 μέρες υπό τις ίδιες συνθήκες οπτικής προβολής
- Υψηλή ακρίβεια και ανάλυση μέσω του πολυφασματικού σαρωτή Multi Spectral Instrument (MSI):
  - 13 φασματικά κανάλια (ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο) από 443 nm έως 2190 nm
  - χωρική ανάλυση 10 m, 20 m & 60 m
  - εύρος ανοίγματος σάρωσης 290 km



**Σχήμα 4: Φασματικά κανάλια Sentinel-2**

(Πηγή: Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services)

Ειδικότερα, ο πολυφασματικός σαρωτής περιλαμβάνει 4 κανάλια στα 10 m (3 στο ορατό & 1 στο εγγύς υπέρυθρο), 6 κανάλια στα 20 m (4 κανάλια στην κόκκινη ακμή για την ακριβή μέτρηση της βλάστησης & 2 κανάλια στο μέσο υπέρυθρο) και 3 κανάλια στα 60 m για ατμοσφαιρική διόρθωση.

Στον πίνακα 2 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αξιοποιήθηκαν τα κανάλια του ορατού και εγγύς υπέρυθρου καθώς και τα κανάλια του μέσου υπέρυθρου.

**Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φασματικών καναλιών Sentinel-2**

Κανάλι	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Εύρος καναλιού (nm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	Visible - Aerosols	443	60
2	Visible -Blue	490	10
3	Visible -Green	560	10
4	Visible -Red	665	10
5	NIR- Vegetation Red-Edge	705	20
6	NIR- Vegetation Red-Edge	740	20
7	NIR- Vegetation Red-Edge	783	20
8	NIR	842	10
8A	NIR- Vegetation Red-Edge	865	20
9	NIR- Water vapors	945	60
10	SWIR-Cirrus	1375	60
11	SWIR-1	1610	20
12	SWIR-2	2190	20

Πηγή: Sentinel-2 Handbook, ίδια επεξεργασία

Τα προϊόντα του Sentinel-2, τα οποία είναι ελεύθερα διαθέσιμα διαδικτυακά στους χρήστες (βλέπε σχήμα 5), είναι τηλεπισκοπικές εικόνες 100x100 km<sup>2</sup> γεωαναφερμένες στο προβολικό σύστημα UTM/WGS84 οι οποίες είναι ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένες (Level 1C). Για την ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων και την μετατροπή των τιμών σε τιμές ανάκλασης εδάφους (Level 2A) απαιτείται η χρήση του Sentinel-2 toolbox το οποίο έχει ενσωματωθεί στο ελεύθερο λογισμικό Sentinel Application Platform (SNAP) του ESA.

Name	High-Level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1C	Top-Of-Atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and online distribution	~600 MB (each 100km x 100km <sup>2</sup> )
Level-2A	Bottom-Of-Atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic and on-User side (using Sentinel-2 Toolbox)	~800 MB (each 100km x 100km <sup>2</sup> )

**Σχήμα 5: Προϊόντα Sentinel-2**

(Πηγή: <https://sentinel.esa.int>)

### 2.1.3 Δορυφορικό πρόγραμμα Landsat

Το πρόγραμμα Landsat είναι η επιχείρηση με την μακρύτερη λειτουργία για την απόκτηση τηλεπισκοπικών εικόνων με παθητικό σύστημα καταγραφής, που παρέχει δεδομένα πάνω από τέσσερις δεκαετίες. Αποτελεί μια κοινή πρωτοβουλία δορυφορικών αποστολών παρατήρησης της γης της NASA και του οργανισμού Γεωλογικής Έρευνας των ΗΠΑ (U.S. Geological Survey - USGS). Το πρόγραμμα ανακοινώθηκε το 1966 με την αρχική ονομασία Earth Resources Observation and Science (EROS) και αντικείμενο τη συλλογή δεδομένων των πλουτοπαραγωγικών πηγών της γης μέσω δορυφορικών συστημάτων που φέρουν τηλεπισκοπικά όργανα παρατήρησης.

Το 1975 το πρόγραμμα μετονομάστηκε σε LANDSAT με ευρύτερο αντικείμενο την παρατήρηση της γης για την υποστήριξη κυβερνητικών φορέων, της εμπορικής και βιομηχανικής κοινότητας, των πολιτών καθώς και της εκπαιδευτικής κοινότητας των ΗΠΑ, αλλά και παγκοσμίως. Τα δεδομένα του προγράμματος είναι πολύτιμη πηγή πληροφόρησης για την παγκόσμια έρευνα της παρατήρησης των αλλαγών της επιφάνειας της γης, με ευρύ πεδίο εφαρμογών στη γεωργία, τη δασοπονία, τη γεωλογία, τη χωροταξία και την εκπαίδευση. Το δορυφορικό πρόγραμμα Landsat πλέον αποτελεί συστατικό μέρος των αποστολών (Remote Sensing Missions) του USGS Land Remote Sensing (LRS) Program.

Σήμερα τα δεδομένα των εικόνων Landsat αποτελούν ένα πλούσιο αρχειακό υλικό το οποίο θεωρείται μοναδικό ειδικά για μελέτες διαχρονικής παρατήρησης. Τα δεδομένα είναι ελεύθερα διαθέσιμα διαδικτυακά, ενώ φορείς, επιστήμονες και πολίτες σε κάθε γωνιά του πλανήτη μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτές τις πληροφορίες με άπειρους τρόπους. Μεταξύ των εμπορικών πελατών του Landsat είναι η Google, που χρησιμοποιεί τις φωτογραφίες για το γνωστό πρόγραμμα Google Earth, αλλά και ο ασφαλιστικός κλάδος, που για παράδειγμα χρησιμοποιεί τα δεδομένα για να εκτιμήσει τον κίνδυνο πυρκαγιών.





**Σχήμα 6: Ιστορική αναδρομή αποστολών προγράμματος Landsat**

(Πηγή: <https://landsat.usgs.gov>)

Στο σχήμα 6 δίνεται μια ιστορική αναδρομή των αποστολών του προγράμματος. Ο πρώτος δορυφόρος με το όνομα ERTS-1, που αναδρομικά ονομάστηκε Landsat-1, εκτοξεύτηκε τον Ιούλιο του 1972 και στην συνέχεια ακολούθησαν αρκετές αποστολές με σημαντικότερο τον δορυφόρο Landsat 5 ο οποίος συνέλεξε εικόνες για 29 χρόνια, μέχρι τον Ιανουάριο του 2013 που τέθηκε εκτός λειτουργίας. Οι δορυφόροι Landsat-1, 2 και 3 είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά στη λειτουργία τους και ονομάστηκαν δορυφόροι πρώτης γενιάς. Ο Landsat -6, αν και εκτοξεύτηκε, έπεσε λίγο μετά την εκτόξευση στη θάλασσα εξαιτίας κάποιας βλάβης. Ο τελευταίος σε λειτουργία είναι ο Landsat-8, ενώ το 2020 αναμένεται η εκτόξευση του Landsat-9. Αξίζει να σημειωθεί πως ο δορυφόρος Landsat-7 παρέχει δεδομένα μέχρι και σήμερα, λειτουργώντας μέχρι στιγμής 19 χρόνια. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον Landsat-8 που είναι και ο πιο σύγχρονος.

### Landsat-8

Ο δορυφόρος Landsat-8 εκτοξεύτηκε στις 11 Φεβρουαρίου 2013 από την αεροπορική βάση Vandenberg στην Καλιφόρνια. Κινείται σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Γη σε ύψος περίπου 705 km, με κύκλο επαναληψιμότητας 16 μέρες. Σχεδιάστηκε κατά τέτοιον τρόπο ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των δορυφορικών εικόνων του με αυτές των προηγούμενων δορυφόρων Landsat, γι αυτό μετράει σχεδόν στις ίδιες φασματικές ζώνες όπως οι προηγούμενοι δορυφόροι Landsat.

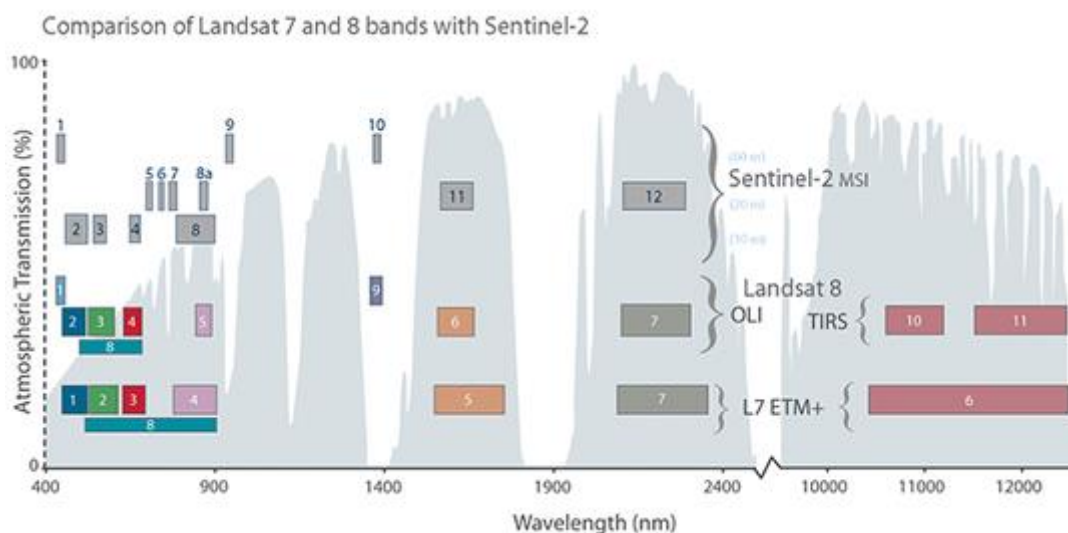
Ο δορυφόρος μεταφέρει δύο όργανα καταγραφής:

- i) Operational Land Imager (OLI)
- ii) Thermal Infrared Sensor (TIRS)

Ο OLI και ο TIRS συλλέγουν δεδομένα από κοινού, προκειμένου να παρέχουν εικόνες της επιφάνειας της γης, παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων των παράκτιων περιοχών, των πολικών πάγων, των νησιών και των ηπειρωτικών περιοχών. Φέρουν σαρωτές επιμήκους σάρωσης τύπου “push-broom”, με εύρος ανοίγματος σάρωσης 185 km.

Οι αισθητήρες στο σύνολο παρέχουν δεδομένα σε 11 φασματικά κανάλια, στο ορατό, εγγύς υπέρυθρο, μέσο υπέρυθρο και θερμικό τμήμα του φάσματος, με χωρική ανάλυση 15m -100m, ανάλογα με την φασματική συχνότητα στην οποία βρίσκονται. Ο OLI έχει δύο νέα φασματικά

κανάλια σε σχέση με τους προηγούμενους δορυφόρους, ένα προσαρμοσμένο ειδικά για την ανίχνευση νεφών (κανάλι 9) και ένα για παρατηρήσεις της παράκτιας ζώνης (κανάλι 1). Ο αισθητήρας TIRS συλλέγει δεδομένα σε δύο φασματικά κανάλια στο τμήμα του θερμικού υπέρυθρου, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δορυφόρους του προγράμματος Landsat στους οποίους υπήρχε μόνο ένα φασματικό κανάλι στο συγκεκριμένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα δεδομένα του Sentinel-2 έχουν φασματικά κανάλια παρόμοια με αυτά του Landsat-8, εξαιρουμένων των θερμικών καναλιών, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Φασματικά κανάλια Landsat-8 και σύγκρισή τους με Landsat-7 & Sentinel-2

(Πηγή: <https://eros.usgs.gov/sentinel-2>)

Στον πίνακα 3 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών του Landsat8. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αξιοποιήθηκε το θερμικό κανάλι 10. Το κανάλι 11 δεν αξιοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την υπόδειξη του οργανισμού Γεωλογικής Έρευνας των ΗΠΑ (USGS) να αποφεύγεται η χρήση του σε ποσοτικές εκτιμήσεις εξαιτίας της αβεβαιότητας των τιμών από την επίδραση του stray light.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά φασματικών καναλιών Landsat-8

Κανάλι	Εύρος καναλιού (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	Visible – Coastal Aerosol	30
2	Visible -Blue	30
3	Visible -Green	30
4	Visible -Red	30
5	NIR	30
6	SWIR-1	30
7	SWIR-2	30
8	Panchromatic	15
9	Cirrus	30
10	TIRS-1	100
11	TIRS-2	100

Πηγή: Landsat 8 Data Users Handbook, ίδια επεξεργασία

Το προϊόν του Landsat-8 που είναι ελεύθερα διαθέσιμο διαδικτυακά στους χρήστες είναι τηλεπισκοπικές εικόνες 185 km (cross-track) x 180 km (long-track) γεωαναφερμένες στο προβολικό σύστημα UTM/WGS84, οι οποίες είναι γεωμετρικά και ραδιομετρικά διορθωμένες (προϊόν L1TP). Για τα θερμικά κανάλια έχει γίνει επαναδειγματοληψία και λαμβάνονται με χωρική ανάλυση 30m. Τα δεδομένα των εικονοστοιχείων των εικόνων είναι σε ψηφιακές τιμές (DN) οι οποίες θα πρέπει να μετατραπούν σε φυσικές τιμές. Ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες, εξαιρουμένων των θερμικών καναλιών, παραλαμβάνονται κατόπιν σχετικού online αιτήματος στην USGS/EROS χωρίς κόστος. Για τα θερμικά κανάλια, προβλέπεται συγκεκριμένη μεθοδολογία που είναι διαθέσιμη από την USGS για τη μετατροπή των τιμών των εικονοστοιχείων σε θερμοκρασία ατμόσφαιρας και εδάφους. Για την εφαρμογή των εξισώσεων το αρχικό δορυφορικό προϊόν συνοδεύεται από σχετικό αρχείο και περιέχει τους απαραίτητους συντελεστές.

## 2.1.4 Ταξινόμηση πολυφασματικής εικόνας

### 2.1.4.1 Γενικά

Η έννοια της ταξινόμησης της πολυφασματικής εικόνας υποδηλώνει τη διαδικασία κατηγοριοποίησης των εικονοστοιχείων σε ομάδες- κλάσεις, με κοινά χαρακτηριστικά από πλευράς φασματικής απόκρισης ή/και υψής. Χρησιμοποιώντας τη φασματική πληροφορία των εικονοστοιχείων, η ταξινόμηση επιχειρεί την ομαδοποίησή τους βάσει κάποιου αλγορίθμου σε μια φασματική ομάδα (spectral class). Η ομάδα είναι μια περιοχή στο φασματικό χώρο στην οποία ανήκουν οι φασματικές υπογραφές πολλών εικονοστοιχείων. Το πλήθος των ομάδων είναι ίσο με το πλήθος των τύπων επιφανειών που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης. Οι ομάδες αυτές, που συχνά αναφέρονται και ως θεματικές κατηγορίες, μπορούν να εκφράζουν τύπους εδαφοκάλυψης, τύπους φυτοκάλυψης, τύπους πετρώματος, και άλλες οντότητες γεωλογικού, εδαφολογικού, χωροταξικού ή περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος (πχ ασθένεια βλάστησης, θαλάσσια ρύπανση).

Η αρχική πληροφορία που περιέχεται σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας μπορεί να περιγραφεί σαν ένα διάνυσμα  $n$ -διαστάσεων, όπου  $n$  είναι ο αριθμός των φασματικών καναλιών. Για κάθε εικονοστοιχείο ο αλγόριθμος ταξινόμησης χρησιμοποιεί τις τιμές που έχει στα  $n$  φασματικά κανάλια και εξάγει μία αριθμητική τιμή, η οποία αντιστοιχεί σε μία από τις ομάδες. Η προκύπτουσα ταξινομημένη εικόνα αποτελείται από ένα μωσαϊκό εικονοστοιχείων, καθένα από τα οποία ανήκουν σε μια συγκεκριμένη ομάδα-κατηγορία. Εικονοστοιχεία που δεν είναι δυνατόν να ενταχθούν σε καμία ομάδα-κατηγορία παραμένουν αταξινομητα, δηλαδή μη αναγνωρισμένα.

Υφίσταται πληθώρα κατηγοριοποιήσεων των χρησιμοποιούμενων μεθόδων ταξινόμησης στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως:

- Επιβλεπόμενες και μη επιβλεπόμενες
- Σκληρές (ανελαστικές) ή μαλακές (ασαφείς)
- Παραμετρικές ή μη παραμετρικές
- Σε επίπεδο εικονοστοιχείου (per pixel), υπο-εικονοστοιχείου (per sub-pixel) ή χωρικής ομάδας (per field) ή αντικειμένου (per object)

- Ταξινομήσεις υφής
- Γνωσιακές ταξινομήσεις

Διάφορες άλλες μέθοδοι ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί εκτός των παραπάνω που αποτελούν συνδυασμό ή παραλλαγές των παραπάνω κατηγοριών και αναφέρονται ως υβριδικές μέθοδοι.

Η πιο ευρέως διαδεδομένη κατηγοριοποίηση των μεθόδων ταξινόμησης είναι η επιβλεπόμενη ταξινόμηση (supervised classification) και η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (unsupervised classification).

Η επιλογή της μεθόδου ταξινόμησης εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων ανάλογα με τη μελέτη περίπτωσης, οι βασικότεροι από τους οποίους είναι ο στόχος της ταξινόμησης, τα διαθέσιμα λογισμικά προγράμματα και τα διαθέσιμα δεδομένα.

#### **2.1.4.2 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση**

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση (Συλλαίος 2007, Περάκης κ.α. 2015) ο χρήστης γνωρίζει εκ των προτέρων τις ομάδες-κατηγορίες που θα ταξινομηθεί η εικόνα και ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται σύμφωνα με δειγματοληπτικές περιοχές που έχουν επιλεγεί από πριν για κάθε ομάδα-κατηγορία. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται περιοχές εκπαίδευσης που καθορίζονται μέσω φωτοερμηνείας, εργασίας πεδίου ή από άλλα χωρικά δεδομένα. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των περιοχών εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο για την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων σε μία από τις ομάδες με βάση την φασματική ομοιότητά τους με τις περιοχές εκπαίδευσης. Συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούνται για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι τα εξής:

- Ορίζονται αρχικά οι ομάδες-κατηγορίες περιοχών που θα χωριστεί η εικόνα
- Εντοπίζονται δειγματοληπτικές περιοχές για κάθε ομάδα-κατηγορία. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό γιατί θα καθορίσει την ακρίβεια της ταξινόμησης.
- Προσδιορίζεται η φασματική υπογραφή κάθε ομάδας-κατηγορίας από τις δειγματοληπτικές περιοχές.
- Ταξινομείται κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας βάσει ενός αλγορίθμου σε μια από τις ομάδες-κατηγορίες που ορίστηκαν (ή παραμένει αταξιλόγητο).

Οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι της επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι η μέθοδος του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, η μέθοδος της ελάχιστης απόστασης από τον μέσο όρο (ευκλείδεια απόσταση, απόσταση Mahalanobis), η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας και ο χαρτογράφος της φασματικής γωνίας (SAM). Σε περιπτώσεις που υπάρχει πληθώρα συνδυασμών φασματικών υπογραφών, ποικιλομορφία στο περιεχόμενο και την υφή μιας επιφάνειας προτιμώνται αλγόριθμοι όπως τα νευρωνικά δίκτυα και τα δέντρα αποφάσεων.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Στην ταξινόμηση αυτή η φασματική υπογραφή μιας ομάδας δημιουργείται από το συνδυασμό των φασματικών υπογραφών όλων των εικονοστοιχείων που περιλαμβάνονται στις περιοχές εκπαίδευσης της ομάδας. Η προκύπτουσα υπογραφή περιέχει τις συνεισφορές όλων των υλικών που περιέχονται στα εικονοστοιχεία εκπαίδευσης, με το μειονέκτημα ότι αγνοούνται οι επιπτώσεις των μικτών εικονοστοιχείων. Σε ότι αφορά τις μεθόδους επιβλεπόμενης ταξινόμησης,

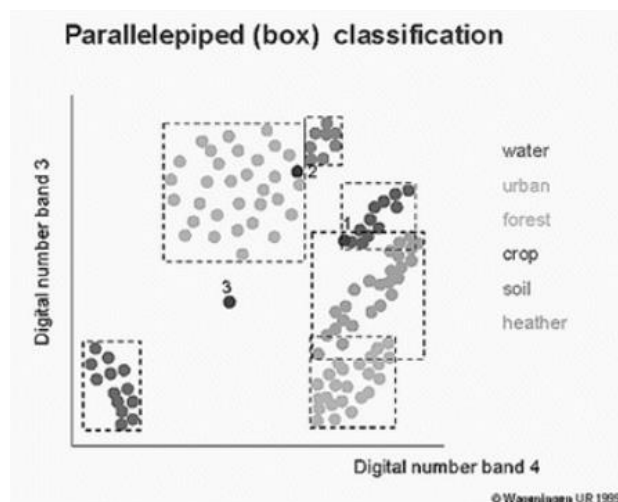
χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, της ευκλείδειας απόστασης και του χαρτογράφου της φασματικής γωνίας που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

#### **A. Αλγόριθμος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου**

Σε αυτή τη μέθοδο ταξινόμησης, οι ομάδες στο φασματικό χώρο αναπαριστώνται με n-διάστατα ορθογώνια παραλληλόγραμμα στις δυο διαστάσεις (δυο φασματικές ζώνες), ή με ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, όταν αξιοποιούνται στην ταξινόμηση τρία ή περισσότερα φασματικά κανάλια που είναι και το συνηθέστερο.

Είναι η απλούστερη μέθοδος ταξινόμησης καθώς ο χρήστης ορίζει μια κατώτερη και ανώτερη τιμή για κάθε ομάδα. Με βάση τις δειγματοληπτικές περιοχές εκπαίδευσης, ορίζεται το εύρος τιμών που μπορεί να είναι:

- το μέγιστο και το ελάχιστο του ιστογράμματος των ομάδων των δειγμάτων εκπαίδευσης,
- οι ακραίες τιμές του διαστήματος  $[\mu_n - \sigma_n, \mu_n + \sigma_n]$ , όπου  $\mu_n$  είναι η μέση τιμή των δειγμάτων εκπαίδευσης του φασματικού καναλιού n και  $\sigma_n$  είναι η τυπική απόκλιση των εικονοστοιχείων των δειγμάτων για το φασματικό κανάλι n.
- οποιαδήποτε άλλες οριακές ραδιομετρικές τιμές κρίνει κατάλληλες ο χρήστης.



**Σχήμα 8: Μέθοδος παραλληλεπίπεδου σε διδιάστατο φασματικό χώρο**

(Πηγή: Wageningen UR, 1999)

Ο αλγόριθμος αποφασίζει αν το εικονοστοιχείο ανήκει στην εκάστοτε ομάδα όταν και μόνο όταν εμπίπτει στο εύρος τιμών που έχει οριστεί για κάθε ομάδα. Τα εικονοστοιχεία που δεν εμπίπτουν στα οριζόμενα εύρη τιμών των υπό μελέτη ομάδων καταχωρούνται ως αταξινομήτα.

Θετικό αυτής της μεθόδου είναι η μαθηματική του απλότητα και το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη τη διασπορά των φασματικών αναφορών, καθώς υπολογίζεται το εύρος των τιμών κάθε ομάδας. Όμως βασικό της μειονέκτημα είναι όταν τα εύρη των ομάδων αλληλεπικαλύπτονται και τότε τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται στο επικαλυπτόμενο τμήμα καταχωρούνται αυθαίρετα σε κάποια από τις επικαλυπτόμενες ομάδες.

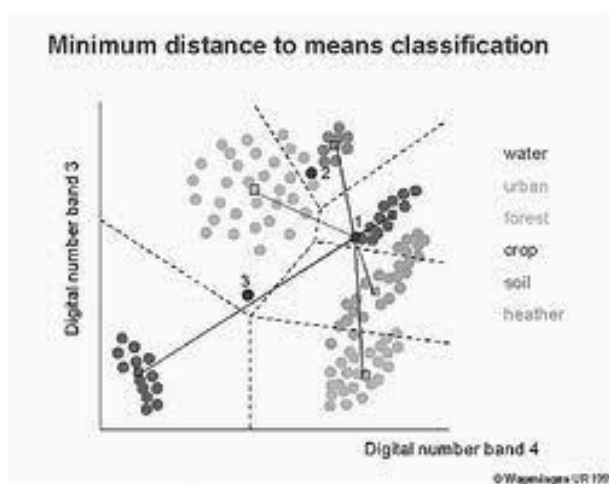
## B. Αλγόριθμος ευκλείδειας απόστασης

Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει αρχικά τα μέσα διανύσματα για κάθε κανάλι από τα δεδομένα των δειγμάτων εκπαίδευσης. Σε ένα φασματικό χώρο  $n$  διαστάσεων, υπολογίζεται η απόσταση του εικονοστοιχείου  $p_n$  με κάθε μέσο διάνυσμα  $\mu_n$ , δηλαδή με τη μέση τιμή των δειγμάτων της εκάστοτε ομάδας του φασματικού καναλιού  $n$ . Κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται σε μια ομάδα με βάση την απόσταση μεταξύ της τιμής του εικονοστοιχείου και του μέσου διανύσματος της κάθε ομάδας. Μετά τον υπολογισμό της απόστασης από κάθε ομάδα, το άγνωστο εικονοστοιχείο αποδίδεται στην εγγύτερη ομάδα.

Με τον αλγόριθμο της ευκλείδειας απόστασης, ο υπολογισμός αυτός της απόστασης πραγματοποιείται με την ευκλείδεια απόσταση, που σε ένα  $n$ -διάστατο φασματικό χώρο για μια ομάδα ορίζεται ως:

$Dist = [(p_1 - \mu_1)^2 + (p_2 - \mu_2)^2 \dots + (p_n - \mu_n)^2]^{1/2}$ , όπου  $p_n$ , η τιμή εικονοστοιχείου του καναλιού  $n$  και  $\mu_n$  η μέση τιμή δειγμάτων του καναλιού  $n$ .

Τα εικονοστοιχεία ταξινομούνται στην εκάστοτε ομάδα-κατηγορία με την οποία έχουν την μικρότερη απόσταση θέτοντας ένα κατώφλι. Εάν τα εικονοστοιχεία βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από αυτήν που έχει ορίσει ο χρήστης τότε παραμένουν αταξινομήτα.



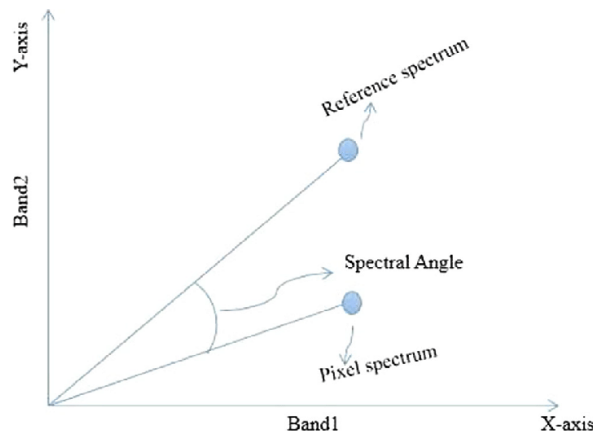
Σχήμα 9: Μέθοδος ελάχιστης απόστασης από τον μέσο όρο σε δισδιάστατο φασματικό χώρο

(Πηγή: Wageningen UR, 1999)

Πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι η μαθηματική απλότητά του, ενώ βασικό του μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη τη διασπορά των φασματικών προτύπων απόκρισης των ομάδων-κατηγοριών, δημιουργώντας πρόβλημα σε ομάδες οι οποίες βρίσκονται κοντά ή μακριά στην άλλη στον πολυφασματικό χώρο προτύπων και εμφανίζουν μεγάλη διασπορά (Αργιαλάς, 1999).

### Γ. Αλγόριθμος χαρτογράφου φασματικής γωνίας (SAM)

Η ταξινόμηση με τον αλγόριθμο του χαρτογράφου φασματικής γωνίας (Spectral Angle Mapper – SAM) βασίζεται στον υπολογισμό της φασματικής ομοιότητας των εικονοστοιχείων σε σχέση με το φάσμα από τα δείγματα αναφοράς (περιοχές εκπαίδευσης). Εξετάζει κάθε εικονοστοιχείο και αξιολογεί την ομοιότητα που εμφανίζουν οι φασματικές υπογραφές, συγκρίνοντας τις φασματικές γωνίες ανάμεσα στο φάσμα του εκάστοτε εικονοστοιχείου με το φάσμα από τα δείγματα αναφοράς. Όσο μικρότερη είναι η φασματική γωνία τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το εικονοστοιχείο να ανήκει σε μια συγκεκριμένη ομάδα-κατηγορία.



Σχήμα 10: Μέθοδος χαρτογράφου φασματικής γωνίας σε δισδιάστατο φασματικό χώρο

(Πηγή: Ramesh 2016)

Ο αλγόριθμος θεωρεί κάθε εικονοστοιχείο σαν ένα διάνυσμα στο φασματικό χώρο  $n$  διαστάσεων, με  $n$  τον αριθμό των φασματικών καναλιών. Κάθε διάνυσμα έχει συγκεκριμένο μήκος και κατεύθυνση. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μόνο την κατεύθυνση η οποία αναπαριστά τα φασματικά χαρακτηριστικά και όχι το μήκος του διανύσματος, οπότε δεν επηρεάζεται από τις διάφορες τιμές φωτεινότητας καθώς τις αντιμετωπίζει όλες εξίσου. Η φασματική γωνία του εικονοστοιχείου μετράται με τη γωνία που σχηματίζει το αντίστοιχο διάνυσμα στο φασματικό χώρο με το φάσμα αναφοράς στις ίδιες  $n$ -διαστάσεις. Το φάσμα αναφοράς υπολογίζεται ως το μέσο διάνυσμα αναφοράς ανά κανάλι για κάθε ομάδα-κατηγορία. Ειδικότερα, ο υπολογισμός της φασματικής γωνίας πραγματοποιείται εφαρμόζοντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left( \sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

όπου  $t_i$  το διάνυσμα του εικονοστοιχείου,  $r_i$  το μέσο διάνυσμα αναφοράς και  $nb$  ο αριθμός των καναλιών.

Τα εικονοστοιχεία ταξινομούνται με βάση τη μικρότερη γωνία που σχηματίζουν τα μέσα διανύσματά τους με το διάνυσμα αναφοράς της κάθε ομάδας-κατηγορίας.

### **2.1.4.3 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση**

Στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (Συλλαίος 2007, Περάκης κ.α. 2015) πραγματοποιείται αυτοματοποιημένη ταξινόμηση των ομάδων, ή αλλιώς θεματικών κατηγοριών, μιας περιοχής χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Οι ομάδες προσδιορίζονται με βάση στατιστικά κριτήρια της ομοιότητας των φασματικών τους χαρακτηριστικών αυθαίρετου δείγματος εικονοστοιχείων και στη συνέχεια ο αλγόριθμος αποδίδει τα εικονοστοιχεία στις ομάδες αυτές. Ειδικότερα τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Προσδιορίζονται οι ομάδες-κατηγορίες από τον αλγόριθμο (ο χρήστης δύναται να ορίσει το πλήθος των ομάδων) χωρίς να είναι εξαρχής γνωστό το φυσικό περιεχόμενο των ομάδων – κατηγοριών
- Τα εικονοστοιχεία κατατάσσονται στις διάφορες ομάδες-κατηγορίες εφαρμόζοντας μια μέθοδο π.χ. της ιεραρχικής ή μη ιεραρχικής ταξινόμησης.
- Ο χρήστης, μετά το πέρας της ταξινόμησης, ερμηνεύει και ορίζει το φυσικό περιεχόμενο που αντιπροσωπεύει κάθε ομάδα-κατηγορία.

Από τις μεθόδους της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης η πιο γνωστή είναι η μέθοδος K-Means, κατά την οποία υπολογίζονται αυθαίρετα οι μέσοι όροι των ομάδων στο φασματικό χώρο και κατόπιν με επαναληπτικό τρόπο ταξινομούνται τα εικονοστοιχεία σε ομάδες με τη χρησιμοποίηση της ελάχιστης απόστασης (συνήθως είναι η Ευκλείδεια). Μια άλλη γνωστή μέθοδος είναι η μέθοδος ισοδεδομένων ISODATA (Iterative Self-Organised Data Analysis), η οποία αποτελεί μια παραλλαγή και εξέλιξη της K-Means και η οποία περιλαμβάνει τη συνένωση, διαχωρισμό ή απόρριψη των ομάδων στο φασματικό χώρο σε κάθε επανάληψη που γίνεται στην εφαρμογή της K-Means μεθόδου. Η μέθοδος ISODATA επίσης απαιτεί ορισμένες παραμετροποιήσεις που γίνονται από τον χρήστη.

Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση θεωρείται γενικά λιγότερο ακριβής, και χρησιμοποιείται κυρίως όταν η γνώση για την περιοχή μελέτης πριν την ταξινόμηση είναι περιορισμένη.

### **2.1.5 Φασματικοί δείκτες**

Οι φασματικοί δείκτες είναι προϊόν των αναλύσεων των φασματικών πληροφοριών της εικόνας μέσω της εφαρμογής μαθηματικών σχέσεων που προκύπτουν από συνδυασμούς δύο ή περισσότερων φασματικών καναλιών. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν ποσοτικά ένα βιοφυσικό φαινόμενο και έχουν επιπλέον στόχο να αυξηθεί η διαχωριστικότητα των ομάδων, ή αλλιώς θεματικών κατηγοριών, που έχει ορίσει ο χρήστης και να βελτιωθεί το αποτέλεσμα της ταξινόμησης της εικόνας. Αριθμητικές πράξεις όπως η πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμός και διαίρεση στις τιμές των εικονοστοιχείων από δύο ή περισσότερα φασματικά κανάλια μιας εικόνας σχηματίζουν μια νέα εικόνα που αναπαριστά μια νέα θεματική απεικόνιση. Δείκτες μπορούν να κατασκευαστούν πολλοί, ανάλογα με το ποιο φαινόμενο επιδιώκεται να αναδειχθεί και εξαχθεί, αλλά και από τη διαθέσιμη φασματική πληροφορία του δορυφορικού συστήματος που φέρει παθητικό σύστημα καταγραφής.

Υφίσταται πληθώρα συγγραμμάτων με αντικείμενο την εφαρμογή φασματικών δεικτών για την ανάδειξη βιοφυσικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής μελέτης, όπως για παράδειγμα η



βλάστηση, το έδαφος και οι δομημένες περιοχές (Built-up areas). Μόνο για τη βλάστηση έχουν δημοσιευτεί πάνω από 150 δείκτες στην επιστημονική βιβλιογραφία, αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό έχει μελετηθεί σημαντικά (ENVI User's Guide).

Υπάρχουν δύο είδη δεικτών με την πλέον συχνή εφαρμογή, οι λόγοι των καναλιών και οι κανονικοποιημένοι δείκτες.

Λόγοι καναλιών (band ratios): Η διαίρεση των τιμών των εικονοστοιχείων ενός φασματικού καναλιού με τις αντίστοιχες τιμές ενός άλλου φασματικού καναλιού είναι μία από τους πιο γνωστούς μετασχηματισμούς που εφαρμόζεται για την ενίσχυση μιας πολυφασματικής εικόνας. Οι λόγοι αυτοί χρησιμεύουν στον τονισμό ανεπαίσθητων διακυμάνσεων στις φασματικές αποκρίσεις των διαφόρων επιφανειακών καλύψεων. Η προκύπτουσα εικόνα ενισχύει διακυμάνσεις στις κλίσεις των καμπυλών φασματικής ανάκλασης μεταξύ δύο διαφορετικών φασματικών ευρών. Για την ανάδειξη μιας θεματικής κατηγορίας έναντι μίας ή περισσότερων θεματικών κατηγοριών, στον αριθμητή συνήθως μπαίνει το κανάλι που εμφανίζει υψηλή ανακλαστικότητα και στον παρανομαστή το κανάλι που εμφανίζει τη χαμηλή ανακλαστικότητα. Για παράδειγμα ο λόγος του κόκκινου (Red) καναλιού προς το μπλε (Blue) κανάλι είναι ένας δείκτης εδάφους καθώς αναδεικνύει ορισμένους τύπους εδαφών.

Ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών λόγων για μια πολυφασματική εικόνα με  $n$  φασματικά κανάλια δίνεται από τον τύπο:

$$p = n * (n-1), \text{ όπου } p \text{ είναι ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών}$$

Για παράδειγμα, για έξι (6) φασματικά κανάλια του Sentinel 2, υπάρχουν 30 διαφορετικοί πιθανοί συνδυασμοί λόγων.

Κανονικοποιημένοι δείκτες (normalized difference indices): Αποτελούν μια παραλλαγή των λόγων καναλιών, αξιοποιώντας τη διαφορά ανακλαστικότητας δύο φασματικών καναλιών για την ανάδειξη μιας θεματικής κατηγορίας. Το ένα φασματικό κανάλι έχει υψηλή ανακλαστικότητα ενώ το δεύτερο κανάλι χαμηλή ανακλαστικότητα. Ο πιο διαδεδομένος κανονικοποιημένος δείκτης είναι ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) που χρησιμοποιείται για την ανάδειξη της βλάστησης και είναι ο λόγος ανάμεσα στη διαφορά ανάκλασης του εγγύς υπέρυθρου (NIR) και του κόκκινου (Red) καναλιού διαιρούμενος με το άθροισμα αυτών. Ο δείκτης αυτός έχει προέλθει από το λόγο NIR / Red, ο οποίος δίνει υψηλές τιμές ανακλαστικότητας για τη βλάστηση καθώς η βλάστηση ανακλά πολύ στο εγγύς υπέρυθρο και λίγο στο κόκκινο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκαν φασματικοί δείκτες για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, κυρίως μέσω της ανάδειξης μη επιθυμητών τύπων κάλυψης γης (βλάστηση, αστικές περιοχές, δρόμοι, γυμνό έδαφος) που διευκόλυναν στη συνέχεια τη δυνατότητα απομόνωσης και απομάκρυνσής τους με την εφαρμογή κατωφλίων. Οι δείκτες που δημιουργήθηκαν και δοκιμάστηκαν παρατίθενται στο πίνακα 4. Στη συνέχεια αναλύονται οι δείκτες που είχαν τη μεγαλύτερη επίδοση για το διαχωρισμό της κατηγορίας επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα από άλλες κατηγορίες επιφανειών.

**Πίνακας 4: Χρησιμοποιούμενοι φασματικοί δείκτες**

Όνομασία δείκτη	Τύπος	Πηγή
<b>Δείκτες Βλάστησης</b>		
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR-Red) / (NIR+Red)$	Ruse et al 1974
MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)	$\frac{2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}}{2}$	Qi et al 1994
<b>Δείκτες εδάφους</b>		
Normalized Multi-Band Drought Index (NMDI)	$(NIR-(SWIR1-SWIR2)) / (NIR+(SWIR1-SWIR2))$	Wang et al 2007
Brightness Index (BI)	$SQRT (RED^2 + NIR^2)$	Khan et al. 2005
Bare Soil Index (BSI)	$((Red+SWIR1) - (NIR+Blue)) / ((Red+SWIR1) + (NIR+Blue))$	Pal et al 2017
Normalized Difference Bareness index (NDBa1)	$(NIR-TIRS) / (NIR+TIRS)$	Li et al 2014
Normalized Difference Bareness index (NDBa2)	$(SWIR1-TIRS) / (SWIR1+TIRS)$	Li et al 2014
Normalized Difference Sand Dune Index (NDSDI)	$(Red-SWIR2) / (Red+SWIR2)$	Mfondoum et al 2016
Crust Index (CI)	$(Red-Blue) / (Red+Blue)$	Mfondoum et al 2016
Texture Index (NDTel)	$(SWIR1-SWIR2) / (SWIR1+SWIR2)$	Mfondoum et al 2016
Top Soil Grain Size Index (GSI)	$(Red-Blue) / (Red+Blue+Green)$	Mfondoum et al 2016
Normalized Difference Soil Index (NDSI)	$(Green-SWIR1) / (Green+SWIR1)$	Qiu et al 2017
<i>*σε ορισμένα συγγράμματα αναφέρεται και ως Normalized Difference Snow Index ή Water Index</i>		
Normalized Difference Soil Index (NDSI2)	$(SWIR2-Green) / (SWIR2+Green)$	Deng et al 2015
Tasseled Cap Brightness (TCB)	$(0.3037*Blue)+(0.2793*Green)+(0.4743*Red)+(0.5585*NIR)+(0.5082*SWIR1)+(0.1863*SWIR2)$	Li et al 2014
Ratio Index for Bright Soil (RIBS)	NNDSI/NTCB	Qiu et al 2017
<i>*αναφέρεται και ως Ration Normalised Difference Soil Index (RNDSI)</i>		
Ratio	- Red/Blue - Blue/SWIR1 - SWIR1/SWIR2	

Όνομασία δείκτη	Τύπος	Πηγή
Mean difference to scene	- SWIR1 - SWIR2	
<b>Δείκτες αδιαπέρατων επιφανειών</b>		
Normalized difference built-up index (NDBI)	$(SWIR1 - NIR) / (SWIR1 + NIR)$	Zha et al 2003
Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI)	$(SWIR1-NIR)/(10*(SWIR1+TIRS)^{1/2})$	As-syakur et al 2012
Normalized Built up Area Index (NBAI)	$(SWIR2-NIR/Blue) / (SWIR2+NIR/Blue)$	Pal et al 2017
Normalized difference index for the blue band in built-up and barren land (NDBBBI)	$(Blue-SWIR1) / (Blue+SWIR1)$	Baraldi et al 2006
Road Extraction Index (REI)	$NIR - (Blue/NIR) + (Blue*NIR)$	Wang et al 2016
Mean difference to scene	Blue	
T <sub>bres</sub> (Brightness Temperature Index)	$(T_b - T_{bmin}) / (T_{bmax} - T_{bmin})$	Novelli et al, 2015
<b>Δείκτες επιφανειών με πλαστικά</b>		
Plastic Surface Index (PSI)	$(Red - (T_{bres} + SWIR2) / 2) / (Red + (T_{bres} + SWIR2) / 2)$	Novelli et al, 2015
Plastic Greenhouse Index (PGI)	$(Blue \times (NIR - RED)) / (1 - \text{mean}(Blue + Green + NIR))$	Yang et al 2017

## NDVI

Ο πλέον γνωστός και πιο συχνά εφαρμοζόμενος δείκτης για τον εντοπισμό της βλάστησης είναι ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Είναι ένας κανονικοποιημένος δείκτης που αξιοποιεί τη διαφορά ανακλαστικότητας της βλάστησης στο ερυθρό (RED) και στο εγγύς υπέρυθρο (NIR) τμήμα του φάσματος. Ο δείκτης λαμβάνει τιμές από -1 έως +1, με τιμές άνω του 0.2 να υποδηλώνουν την ύπαρξη βλάστησης, ενώ αρνητικές τιμές δηλώνουν την ύπαρξη νερού. Το τυπικό εύρος τιμών του δείκτη σε διάφορους τύπους εδαφοκάλυψης είναι το εξής (USGS, Remote Sensing Phenology):

- Πυκνή βλάστηση ή τροπικά δάση: 0.6 - 0.9
- Θάμνοι, λιβάδια, καλλιέργειες: 0.2 - 0.5
- Γυμνό έδαφος, άμμος ή χιόνι : -0.1 - 0.1
- Βαθιά νερά: -1

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι στο εύρος 0.1-0.2 του δείκτη είναι πιθανή η ύπαρξη εδάφους με πολύ αραιή βλάστηση.

## MSAVI

Ο δείκτης MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) που προτάθηκε από τον Qi το 1994, είναι ένας τροποποιημένος δείκτης του SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) και προσδιορίζεται κι αυτός όπως ο NDVI σε συνάρτηση με το κόκκινο (RED) και το εγγύς υπέρυθρο (NIR) κανάλι, αλλά με μια πιο περίπλοκη μαθηματική έκφραση. Κύριος σκοπός του είναι να διορθώσει την επίδραση του εδάφους σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη βλάστησης μέσω της τροποποίησης της συμπεριφοράς των ισοκαμπυλών βλάστησης (isovegetation lines), λαμβάνοντας υπόψη ότι οι γραμμές αυτές δεν είναι παράλληλες και δεν συγκλίνουν σε ένα και μόνο σημείο.

Όμως εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης αυτός όπως και όλοι οι δείκτες βλάστησης βασίζονται στην υπόθεση ότι υφίσταται μόνο μία γραμμή εδάφους (soil line) σε μια εικόνα, ενώ στην πραγματικότητα υφίστανται εδάφη με διαφορετικές γραμμές εδάφους. Επιπλέον η εδαφική υγρασία δύναται να επηρεάζει τις ισοκαμπύλες βλάστησης (SNAP MSAVI algorithm specification).

Κατά την εφαρμογή των δεικτών οι δείκτες NDVI και MSAVI είχαν παραπλήσια αποτελέσματα με μια ελαφρά υπεροχή του MSAVI.

## NMDI

Ο δείκτης NMDI (Normalized Multi-Band Drought Index) επιχειρεί να ανιχνεύσει το επίπεδο της περιεχόμενης υγρασίας στα διάφορα στοιχεία του τοπίου, αξιοποιώντας το εγγύς (NIR) και μέσο (SWIR) υπέρυθρο τμήμα του φάσματος που ανταποκρίνονται σε διαφοροποιήσεις των τιμών της υγρασίας του εδάφους και της βλάστησης. Χρησιμοποιείται σε μελέτες που ασχολούνται με τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας, την ξηρασία στη βλάστηση αλλά και την ανίχνευση πυρκαγιών των δασών. Ο δείκτης αυτός αξιοποιεί και τα δύο κανάλια του μέσου υπέρυθρου, που έχουν υψηλή απορρόφηση από το νερό, βελτιώνοντας την ευαισθησία του στον προσδιορισμό του επιπέδου ξηρασίας. Οι τιμές του δείκτη μειώνονται όταν αυξάνεται η εδαφική υγρασία. Τα τυπικά εύρη τιμών είναι:

- Ξηρό έδαφος: 0.7-1
- Έδαφος μέσης υγρασίας: 0.6-0.7
- Υγρό έδαφος: <0.6

Ο δείκτης αυτός κρίνεται χρηστικός για τη διαφοροποίηση τύπων εδαφοκάλυψης που η εδαφική υγρασία είναι πολύ χαμηλή όπως οι αδιαπέρατες επιφάνειες ή είναι πολύ υψηλή.

## Tbres

Ο δείκτης  $T_{bres}$  (Brightness Temperature Index) αξιοποιεί το θερμικό κανάλι το οποίο αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που εκπέμπεται από τις διάφορες κατηγορίες εδαφοκάλυψης που απαρτίζουν μια εικόνα. Είναι ένας κανονικοποιημένος δείκτης της θερμοκρασίας φωτεινότητας με τον οποίο δύναται μεταξύ άλλων να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση κατηγοριών εδαφοκάλυψης που παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς το βαθμό εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας. Ο δείκτης μάλιστα είναι χρηστικός για ορισμένες κατηγορίες εδαφοκάλυψης που έχουν παρόμοια φασματική απόκριση στα υπόλοιπα μήκη κύματος της πολυφασματικής εικόνας (Novelli et al,

2015). Έχει αξιοποιηθεί σε εφαρμογές για τη διαχείριση υδάτων, στη διάκριση των αστικών περιοχών και γενικά αδιαπέρατων επιφανειών που έχουν σχετικά υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με άλλες κατηγορίες εδαφοκάλυψης, στο φαινόμενο της θερμικής νησίδας και στον εντοπισμό των πλαστικών που χρησιμοποιούνται σε αγροτικές περιοχές.

### **NDBaI**

Ο κανονικοποιημένος δείκτης NDBaI (Normalized Difference Bareness Index) στοχεύει στην ανάδειξη των άγονων εδαφών και τη διαφοροποίησή τους από άλλες κατηγορίες εδαφοκάλυψης. Με βάση μελέτες που έχουν γίνει, καλύτερα αποτελέσματα υφίστανται όταν αξιοποιείται η διαφορά ανακλαστικότητας μεταξύ του θερμικού και του εγγύς (NIR) ή του μέσου (SWIR1) υπέρυθρου τμήματος του φάσματος.

### **Mean Difference to scene - BLUE**

Ο δείκτης «Mean difference to scene» για ένα φασματικό κανάλι αναφέρεται στη διαφορά της μέσης τιμής μιας ομάδας-κλάσης με τη μέση τιμή του συνόλου της εικόνας. Με τον δείκτη αυτό επιτυγχάνεται η καλύτερη ανίχνευση μια ομάδας-κλάσης όταν η μέση τιμή της ομάδας αυτής σε ένα φασματικό κανάλι είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από τη μέση τιμή της εικόνας στο κανάλι αυτό. Ειδικότερα με την εφαρμογή του δείκτη στο μπλε (BLUE) κανάλι αναδεικνύονται οι επιφάνειες με αδιαπέρατα υλικά όπως είναι οι αστικές περιοχές.

### **NDBI**

Ο κανονικοποιημένος δείκτης NDBI (Normalized difference built-up index) αξιοποιεί τη διαφορά ανακλαστικότητας στο εγγύς (NIR) και το μέσο (SWIR1) υπέρυθρο κανάλι για την ανάδειξη των περιοχών με δόμηση, όπως είναι οι αστικές περιοχές, που έχουν υψηλότερη ανάκλαση στο μέσο υπέρυθρο έναντι του εγγύς υπέρυθρου.

### **NDBBBI**

Ο δείκτης NDBBBI είναι κατάλληλος για την ανάδειξη περιοχών με δόμηση. Πρόκειται για ένα κανονικοποιημένο δείκτη διαφορών ανάμεσα στο μπλε κανάλι, το οποίο αποτελεί κατεχογήν κανάλι ανάδειξης αστικών περιοχών και του μέσου υπέρυθρου, το οποίο αποτελεί το κανάλι ανάδειξης γυμνού εδάφους.

Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των δεικτών που χρησιμοποιούν το μέσο υπέρυθρο κανάλι και έχουν στόχο την ανάδειξη δομημένων επιφανειών ή άγονων εδαφών έχουν ορισμένες αβεβαιότητες σε περιοχές με ορισμένα είδη βλάστησης που η ανακλαστικότητά τους αυξάνεται στο μέσο υπέρυθρο όταν η περιεκτικότητα των φύλλων τους σε νερό είναι μειωμένη (Χυ 2010).

## 2.1.6 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών έχει συμβάλει στην ταυτόχρονη ανάπτυξη της τηλεπισκόπησης με πολύτιμη συνεισφορά της σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους, ένας από τους οποίους είναι και το περιβάλλον.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση ειδικότερα έχει αποδειχτεί αποτελεσματικό και χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και σημαντική πηγή πληροφοριών για τις περιβαλλοντικές πιέσεις μιας περιοχής. Οι δυνατότητες λήψης εικόνων για μεγάλες περιοχές, επιλογής εικόνων κατάλληλης χωρικής ανάλυσης και συλλογής δεδομένων σε σταθερή βάση είναι μερικά από τα στοιχεία που ενισχύουν τη χρήση της τεχνολογίας αυτής για τη διαρκή παρατήρηση και εποπτεία του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από δορυφόρους είναι δυνατό να αποκτηθεί γρήγορα μια γενική εικόνα της κατάστασης πάνω από μεγάλες εδαφικές περιοχές, να αναγνωριστούν περιοχές υψηλής επικινδυνότητας μιας περιβαλλοντικής παραμέτρου και να χαρτογραφηθούν τα όρια και η έκταση βιοφυσικών στοιχείων του περιβάλλοντος (ΤΕΕ 2017).

Ενδεικτικά και μη εξαντλητικά θέματα που μελετά η δορυφορική τηλεπισκόπηση στον τομέα του περιβάλλοντος είναι τα εξής:

- Διαχρονική καταγραφή κάλυψης γης
- Αποτύπωση και παρακολούθηση μεταβολών στα ευαίσθητα οικοσυστήματα και τα ενδιαιτήματα
- Διαχρονική παρατήρηση αλλαγών της ακτογραμμής και εκτίμηση τρωτότητας παράκτιων περιοχών
- Παρατήρηση διάβρωσης εδάφους
- Χαρτογράφηση αλατότητας εδαφών
- Παρατήρηση φαινομένων θαλάσσιας ρύπανσης, όπως ο ευτροφισμός, η θερμική ρύπανση και η ρύπανση από πετρελαιοειδή
- Παρακολούθηση αστικού μικροκλίματος όπως το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island)
- Αποτύπωση πλουμίων από βιομηχανικά ατυχήματα μεγάλης έκτασης
- Παρακολούθηση / εκτίμηση φυσικών καταστροφών (πυρκαγιών, πλημμυρών, κλπ)

Συμπερασματικά, η δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορεί να συμβάλει σε σημαντικό βαθμό στη λήψη πρωτογενών στοιχείων, όσο και στην αξιοποίησή τους με στόχο την άντληση πληροφορίας για περιβαλλοντικά ζητήματα. Σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπως τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο μεθοδολογικό εργαλείο για την παρακολούθηση και την προστασία του περιβάλλοντος.

## 2.2 Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών

### 2.2.1 Βασικές έννοιες

Η επιστήμη της Γεωγραφικής Πληροφορίας (Geographic Information Science – GIScience) ασχολείται με τη συστηματοποίηση της κατανόησης και αναπαράστασης του γεωγραφικού χώρου, και με τη συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση, ερμηνεία, παρουσίαση και διαχείριση των στοιχείων του τα οποία καλούνται γεωχωρικά δεδομένα (geospatial data). Η τεχνολογική διάσταση της επιστήμης αυτής είναι η Γεωπληροφορική που προσφέρει το πλαίσιο συσχέτισης πολλών επιστημονικών αντικειμένων και η ευρέως καθιερωμένη τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών-ΣΓΠ (Geographic Information Systems -GIS), η οποία πλέον αποτελεί σύνηθες λογισμικό με πολλές δυνατότητες διαχείρισης γεωχωρικών δεδομένων (Κάβουρας κ.α. 2016). Ο όρος ΣΓΠ είχε πρωτοεισαχθεί από τις αρχές του '60 και εδραιώθηκε την δεκαετία του '90 όταν κατέστη δυνατή όχι μόνο η ψηφιακή καταγραφή του χώρου αλλά και η αξιοποίηση της γεωχωρικής πληροφορίας για την ανάλυση και διαχείριση του χώρου.

Το 1985 ο Goodchild έδωσε τον εξής γενικό ορισμό για το ΣΓΠ: «Ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφορίας που αναφέρεται σε φαινόμενα που εξελίσσονται στο γεωγραφικό χώρο». Είναι ένα δυναμικό σύστημα πληροφοριών που μέσω κατάλληλης ανάλυσης και επεξεργασίας αξιοποιεί δεδομένα από πολλά επιστημονικά πεδία, τα οποία αναβαθμίζει σε προχωρημένες γνώσεις για την παραγωγή πληροφορίας υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιώντας την εξελιγμένη τεχνολογία της πληροφορικής (Νικολακόπουλος κ.α. 2015).

Η μεγάλη αλλαγή που επιτεύχθηκε είναι ότι το ΣΓΠ συνδέει τη χωρική και περιγραφική πληροφορία και παράλληλα δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης πράξεων (αριθμητικών και λογικών) μεταξύ των δεδομένων. Με τη διαχείριση τεράστιου όγκου δεδομένων, σύνθετων πληροφοριών και σχέσεων του χώρου, την ενσωμάτωση μαθηματικών και στατιστικών μεθοδολογιών στις χαρτογραφικές τεχνικές, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, κατέστησε την τεχνολογία αυτή πλέον ισχυρό εργαλείο στη διαδικασία σχεδιασμού και επέφερε ριζικές αλλαγές στην ανάλυση και προσέγγιση των χωρικών φαινομένων. Ο μετασχηματισμός αυτός των χωρικών δεδομένων σε χρήσιμες πληροφορίες αποτελεί μια από τις βασικές λειτουργίες της τεχνολογίας αυτής, οι οποίες υποστηρίζουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, που σχετίζονται με πληθώρα εφαρμογών, όπως μεταξύ άλλων στο σχεδιασμό και τη διαχείριση χωρικών δεδομένων σχετικών με το περιβάλλον.

Η τηλεπισκόπηση και τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών παρουσιάζουν υψηλή συνέργεια μεταξύ τους. Ένα ΣΓΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ποικίλων τύπων δεδομένων, όπως είναι τα τηλεπισκοπικά δεδομένα, τα οποία παράλληλα αντιπροσωπεύουν μια δυνητική πηγή νέων δεδομένων ή αλλιώς μια κατηγορία συλλογής δεδομένων για ένα ΣΓΠ. Επιπλέον, οι μέθοδοι χωρικής επεξεργασίας και ανάλυσης που παρέχει ένα ΣΓΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω ανάλυση των τηλεπισκοπικών δεδομένων. Αντίστροφα, τα χωρικά δεδομένα ενός ΣΓΠ μπορούν να ληφθούν ως βοηθητικά δεδομένα για την τηλεπισκόπηση. Μπορούν για παράδειγμα να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ανάλυση

μιας πολυφασματικής εικόνας, προκειμένου να εξαχθούν πιο πλήρεις ή/ και ακριβείς πληροφορίες από τα φασματικά δεδομένα.

Τα ΣΓΠ δομούνται από πέντε επιμέρους συστατικά στοιχεία (Κάβουρας κ.α. 2016):

- 1) το σύστημα του υπολογιστή, το οποίο θα πρέπει να έχει επαρκή υπολογιστική ισχύ, κατάλληλη μνήμη για την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων και σύστημα απεικόνισης υψηλής ποιότητας
- 2) το λογισμικό (software), που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα προγράμματα και εργαλεία για τις διαδικασίες διαχείρισης των δεδομένων, το οποίο υποστηρίζεται από ένα Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Χωρικών Δεδομένων για την οργάνωση και αποθήκευση των δεδομένων
- 3) τα δεδομένα, τα οποία είναι χωρικά και συνδέονται με περιγραφικά δεδομένα που έχουν σχέση με τις ποιοτικές και ποσοτικές ιδιότητες του χώρου
- 4) τις λειτουργίες του ΣΓΠ που αφορούν τις διαδικασίες διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων, και περιλαμβάνουν την εισαγωγή, την αποθήκευση, την επεξεργασία, την ανάλυση και την απόδοσή τους χαρτογραφικά
- 5) το ανθρώπινο δυναμικό, δηλαδή οι χρήστες που είναι υπεύθυνοι για την εφαρμογή του ΣΓΠ



**Σχήμα 11: Συστατικά στοιχεία ΣΓΠ**

(Πηγή: Κάβουρας κ.α. 2016)

Η ανάπτυξη των ΣΓΠ στηρίζεται κυρίως στο εμπορικό λογισμικό πολυεθνικών εταιριών, οι οποίες επενδύουν μεγάλα ποσά στην εξέλιξη των λογισμικών αυτών και τα οποία πλέον είναι πιο φιλικά προς τους χρήστες τους μέσω του γραφικού περιβάλλοντος. Διακινούνται διάφορα πακέτα λογισμικού ΣΓΠ που λειτουργούν σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα (πχ. Windows, MacOS, Linux). Χαρακτηριστικά παραδείγματα εμπορικών λογισμικών είναι τα ESRI ArcGIS, Geomedia και MapInfo. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ελεύθερα λογισμικά (free software)/ λογισμικά ανοιχτού κώδικα (open source software). Πιο διαδεδομένα είναι το Quantum GIS και το Grass GIS

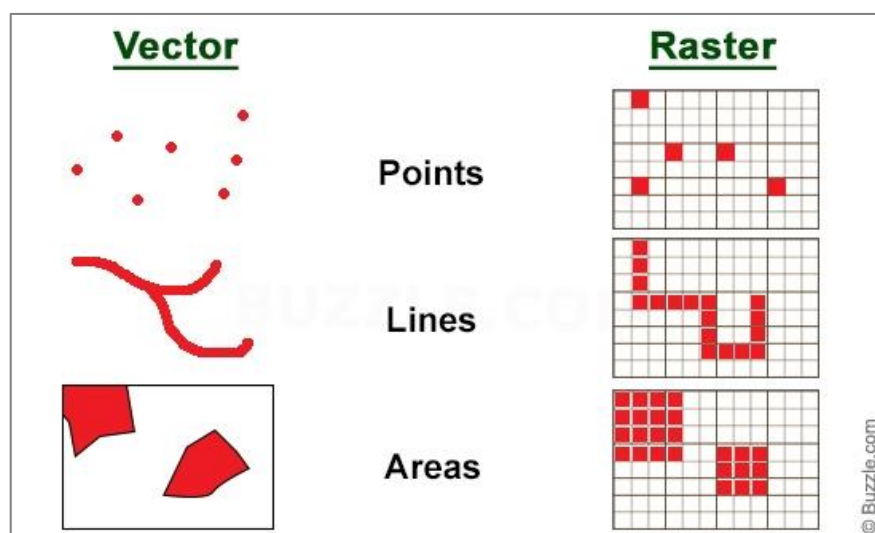


που διακινούνται ελεύθερα υπό το καθεστώς Άδεια Ελεύθερης Τεκμηρίωσης GNU και λειτουργούν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα. Ομοίως το λογισμικό των βάσεων χωρικών δεδομένων μπορεί να είναι εμπορικό (πχ ArcGIS- Geodatabase) ή ελεύθερο/ανοιχτού κώδικα (PostgreSQL/PostGIS). Η επιλογή του λογισμικού εξαρτάται κατά πολύ από το είδος και τις απαιτήσεις του πεδίου εφαρμογής.

## 2.2.2 Χωρικά δεδομένα

Τα χωρικά δεδομένα περιλαμβάνουν τη γεωγραφική θέση με βάση ένα σύστημα αναφοράς συντεταγμένων και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα αυτά συνήθως συνοδεύονται από περιγραφικά δεδομένα που έχουν σχέση με τις ποιοτικές και ποσοτικές ιδιότητες του χώρου (attributes).

Τα χωρικά δεδομένα αναπαρίστανται με δύο βασικές δομές (βλέπε σχήμα 12): την διανυσματική δομή (vector structure) και την κανονικοποιημένη δομή (raster structure). Οι δύο δομές μπορούν να αποδίδονται ταυτόχρονα σε κοινές απεικονίσεις ενώ σε πολλά λογισμικά προσφέρεται η δυνατότητα μετάβασης από τη μία δομή στην άλλη.



Σχήμα 12: Δεδομένα διανυσματικής και κανονικοποιημένης δομής

### 1. Δεδομένα διανυσματικής δομής

Τα δεδομένα διανυσματικής δομής αναπαριστούν το χώρο με τη χρήση διανυσμάτων που είναι εξαιρετικά αποδοτικός τρόπος αναπαράστασης για χωρικές οντότητες με διακριτά όρια. Για το λόγο αυτό η δομή αυτή είναι στενά συνδεδεμένη με το μοντέλο αντικειμένων (object based model), σύμφωνα με τον οποίο ο χώρος περιγράφεται ως αποτελούμενος από αντικείμενα που διαθέτουν γεωμετρικές ιδιότητες και θεματικά χαρακτηριστικά. Γενικά η δομή αυτή προτιμάται λόγω της υψηλής ποιότητας της χαρτογραφικής απόδοσης που προσφέρουν τα χωρικά δεδομένα, της οικονομίας σε χώρο αποθήκευσης, αλλά και της μεγάλης ποικιλίας διαθέσιμων λειτουργιών χωρικής ανάλυσης (Κάβουρας κ.α. 2016).

Επιπλέον με τη δομή αυτή είναι δυνατή η καταγραφή των τοπολογικών σχέσεων μεταξύ των χωρικών οντοτήτων, η οποία βοηθά τον έλεγχο της ορθότητας των δεδομένων και βελτιώνει το χρόνο απόκρισης σε χωρικά ερωτήματα.

Στο δισδιάστατο χώρο αναπαράστασης, η διανυσματική δομή απεικονίζει τα χωρικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά αρχέτυπα σημείο, γραμμή και πολύγωνο. Η γεωμετρία που υιοθετείται για τον συμβολισμό μιας χωρικής οντότητας εξαρτάται από την κλίμακα απεικόνισης και το σκοπό της εφαρμογής που αναπτύσσεται. Για παράδειγμα σε μια μεγάλη κλίμακα οι πόλεις αποτυπώνονται ως πολύγωνα, ενώ σε μικρότερες κλίμακες χρησιμοποιείται η γεωμετρία του σημείου.

**Σημείο:** Το σημείο είναι η απλούστερη μέθοδος απεικόνισης χωρικών οντοτήτων και θεωρείται μηδενικής διάστασης, ενώ προσδιορίζεται μέσω ενός ζεύγους συντεταγμένων. Ένα σημείο αναπαριστά είτε μια χωρική οντότητα με πολύ μικρό μέγεθος σε σχέση με την κλίμακα αναπαράστασης (πχ βιομηχανία, αεροδρόμιο), είτε πολύ συγκεκριμένη θέση στο χώρο (σημείο παρακολούθησης ποιότητας υδάτων).

**Γραμμή:** Χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση χωρικών οντοτήτων μίας διάστασης, αποτελείται από ένα σύνολο διαδοχικών τόξων, ενώ κάθε τόξο προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες των κορυφών του. Κοινά παραδείγματα αναπαράστασης με γραμμή είναι το οδικό και το υδρογραφικό δίκτυο, τα σύνορα και η ακτογραμμή.

**Πολύγωνο:** Το πολύγωνο αναπαριστά χωρικές οντότητες δύο διαστάσεων και η επιφάνειά του προσδιορίζεται από την κλειστή τεθλασμένη γραμμή που σχηματίζει το περίγραμμά του. Ορισμένα συνήθη παραδείγματα οντοτήτων που μοντελοποιούνται με πολύγωνα είναι τα διοικητικά όρια, οι πόλεις, οι λίμνες, οι καλλιέργειες και τα δάση.

Η αναπαράσταση των χωρικών οντοτήτων στο χώρο αναφέρονται ως θεματικά επίπεδα πληροφορίας (layers). Ως θεματικό επίπεδο ορίζεται ένα σύνολο γεωχωρικών δεδομένων που περιγράφουν χωρικές οντότητες που εντάσσονται στο ίδιο γεωμετρικό αρχέτυπο, έχουν τα ίδια περιγραφικά χαρακτηριστικά και αφορούν το ίδιο χωρικό φαινόμενο (Τσούλος κ.α. 2015).

## II. Δεδομένα κανονικοποιημένης δομής

Τα δεδομένα κανονικοποιημένης δομής αναπαριστούν το χώρο με κানাβο ή πίνακα ισομεγεθών φατνίων που αναφέρονται και ως εικονοστοιχεία (pixels). Η δομή αυτή είναι στενά συνδεδεμένη με το μοντέλο πεδίων (field based model), το οποίο προσεγγίζει το χώρο ως ένα συνεχές χωρικό μέσο που υποδιαιρείται σε μοναδιαίες μονάδες, τα πεδία, στα οποία αποδίδεται η τιμή μιας ιδιότητας του χώρου (Κάβουρας κ.α. 2016). Η δομή αυτή προτιμάται σε συνεχή φαινόμενα τα οποία δεν έχουν σαφώς καθορισμένα όρια, και δίνεται η δυνατότητα της αναπαράστασης της μεταβολής της τιμής του φαινομένου από θέση σε θέση, όπως για παράδειγμα το υψόμετρο του εδάφους ή η συγκέντρωση ενός αέριου ρύπου. Τέτοιες δομές δημιουργούνται από τη σάρωση αναλογικών χαρτών, καθώς και τη χωρική ανάλυση διανυσματικών δεδομένων. Δεδομένα κανονικοποιημένης δομής χρησιμοποιούνται και στις περιπτώσεις που η πηγή προέλευσης των δεδομένων είναι αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες.

Το εικονοστοιχείο που αποτελεί τη μοναδιαία υποδιαίρεση του χώρου χαρακτηρίζεται από:

- Ένα ζεύγος συντεταγμένων που προσδιορίζουν τη θέση του στον πίνακα που αναπαριστά τον υπό μελέτη χώρο (αριθμός γραμμής και αριθμός στήλης)
- Μία τιμή που αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό ή την ιδιότητα των χωρικών δεδομένων στη θέση αυτή, όπως για παράδειγμα την κατηγορία εδαφοκάλυψης, το είδος βλάστησης, τη θερμοκρασία αέρος ή τη συγκέντρωση μιας παραμέτρου ποιότητας υδάτων.

Τα εικονοστοιχεία έχουν συγκεκριμένο σχήμα και μέγεθος. Το ευρέως χρησιμοποιούμενο σχήμα είναι το τετράγωνο, καθότι είναι συμβατό με τις περισσότερες συσκευές συλλογής και απεικόνισης χωρικών δεδομένων. Το μέγεθος των εικονοστοιχείων αναφέρεται στη χωρική διακριτική ικανότητα που καθορίζει το αποτέλεσμα της απεικόνισης του χώρου, και η οποία εξαρτάται από την πηγή προέλευσης των δεδομένων ή/ και καθορίζεται με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οντοτήτων προς απεικόνιση, η κανονικοποιημένη δομή χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα εικονοστοιχεία για την αναπαράστασή τους. Στην απλοποιημένη τους μορφή, ιδεατά τα σημειακά γεωγραφικά αντικείμενα, αναπαρίστανται με τη βοήθεια ενός και μόνο φατνίου, τα γραμμικά με μια σειρά από διαδοχικά φατνία, και τα πολυγωνικά αντικείμενα από μια ομάδα γειτονικών φατνίων (Κάβουρας κ.α. 2016).

Επειδή η δομή αυτή έχει περιορισμένες δυνατότητες σύνδεσης με περιγραφικά χαρακτηριστικά, όταν απαιτείται να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση περισσότερων χαρακτηριστικών, δημιουργούνται πολλά επίπεδα αναπαράστασης (layers), δηλαδή πολλοί πίνακες εικονοστοιχείων για την αναπαράσταση της ίδιας περιοχής.

Επιπλέον, στα πλαίσια μιας εφαρμογής για την χαρτογραφική απόδοση ενός χωρικού φαινομένου δύναται να συνδυαστούν θεματικά επίπεδα και από τις δύο δομές χωρικών δεδομένων.

### **2.2.3 Κύριες λειτουργίες**

Το ΣΓΠ παρέχει στους χρήστες τις εξής κύριες λειτουργίες που αποτελούν και τα στάδια μιας εφαρμογής που λαμβάνουν χώρα κατά σειρά:

#### **2.2.3.1 Εισαγωγή**

Αφορά την τροφοδότηση του συστήματος με τα χωρικά δεδομένα, τα οποία είναι ψηφιακά σε διανυσματική ή/και κανονικοποιημένη δομή. Η συλλογή των δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τη φύση τους και την απαιτούμενη αξιοπιστία.

Με βάση την πηγή προέλευσής τους, τα δεδομένα διακρίνονται στα πρωτογενή, δηλαδή τα δεδομένα που προέρχονται από άμεσες παρατηρήσεις, όπως για παράδειγμα τοπογραφικές μετρήσεις, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και στα δευτερογενή, δηλαδή τα δεδομένα που έχουν υποστεί επεξεργασία και διατίθενται από κρατικούς φορείς, οργανισμούς ή ιδιώτες

(πχ ΕΛΣΤΑΤ) ή προέρχονται από αναλογικούς χάρτες. Για τα δεδομένα από αναλογικούς χάρτες, η εισαγωγή περιλαμβάνει τη διαδικασία ψηφιοποίησης των δεδομένων.

### **2.2.3.2 Επεξεργασία και διαχείριση**

Τα δεδομένα υπόκεινται σε κατάλληλη επεξεργασία που τα καθιστά κατάλληλα για παραπέρα ανάλυση και χρήση. Οι πιο συνήθεις διαδικασίες επεξεργασίας που ακολουθούνται είναι (Τσούλος κ.α. 2015):

- ο μετασχηματισμός στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων
- τροποποιήσεις της μορφής των δεδομένων, όπως η μετάβαση από μια δομή σε μια άλλη ή η αλλαγή του μορφότυπου των δεδομένων
- η ανάπτυξη τοπολογικών σχέσεων μεταξύ των δεδομένων
- η γενίκευση των δεδομένων και μετατροπές κλίμακας
- ο εντοπισμός και η διόρθωση τοπολογικών σφαλμάτων και θεμάτων ασυμβατότητας

Η διαχείριση των δεδομένων πραγματοποιείται με τα Συστήματα Διαχείρισης Βάσεων Χωρικών Δεδομένων, τα οποία μεταξύ άλλων προσφέρουν αποτελεσματική αποθήκευση, οργάνωση, ανάκτηση και ενημέρωση των χωρικών και περιγραφικών δεδομένων, καθώς και αποφυγή πολλαπλών καταγραφών ίδιων δεδομένων. Επιπλέον δύνανται να διαχειρίζονται δεδομένα που καλύπτουν πολλές κλίμακες και χρονικές περιόδους.

Με τη χρήση των Συστημάτων Διαχείρισης Βάσεων Χωρικών Δεδομένων αξιοποιούνται τα εργαλεία διαχείρισης και συντήρησης μιας βάσης, όπως η δυνατότητα επεξεργασίας από πολλούς χρήστες, τα εργαλεία χωρικών ευρετηρίων και χωρικών ερωτήσεων, η δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας και οι έλεγχοι ακεραιότητας και ποιότητας.

### **2.2.3.3 Χωρική ανάλυση**

Η χωρική ανάλυση (spatial analysis) αφορά στην εφαρμογή μεθόδων επεξεργασίας των χωρικών δεδομένων, με σκοπό την άντληση χρήσιμων πληροφοριών για την απόδοση ή αξιολόγηση ενός χωρικού φαινομένου. Πραγματοποιούνται χωρικές αναζητήσεις και σύνθεση διάφορων θεματικών επιπέδων και εφαρμόζονται αριθμητικές και στατιστικές μεθοδολογίες για τη δημιουργία νέων δεδομένων με χωρικά και μη χωρικά χαρακτηριστικά και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μεθόδων είναι η γεωγραφική θέση, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα περιγραφικά στοιχεία. Για τα δεδομένα διανυσματικής δομής βασική παράμετρος είναι και οι τοπολογικές σχέσεις των δεδομένων. Ειδικότερα, οι μέθοδοι χωρικής ανάλυσης περιλαμβάνουν λειτουργίες (Κάβουρας κ.α. 2016) για:

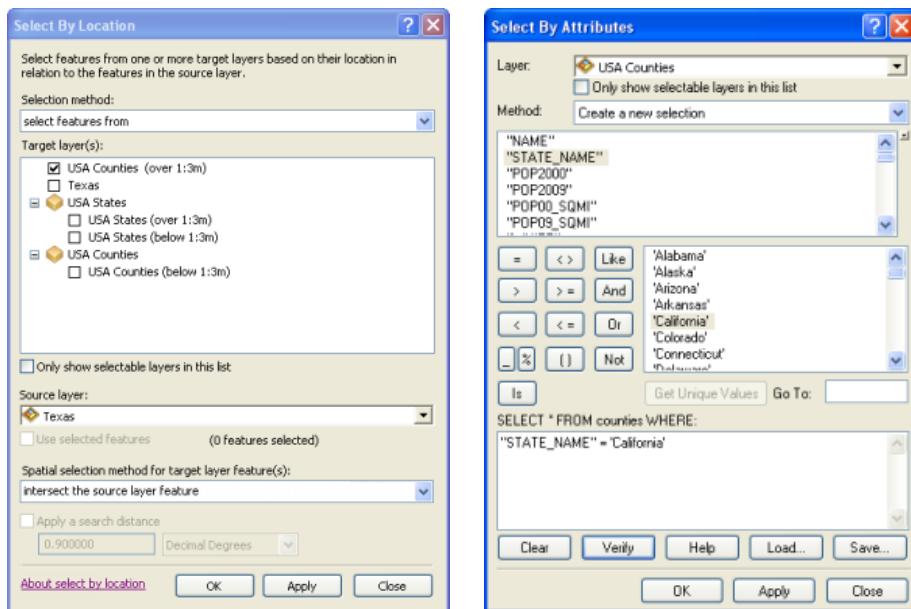
- τον υπολογισμό στατιστικών δεικτών που αφορούν σε χωρικά δεδομένα, όπως ο χωρικός μέσος, η τυπική απόσταση και ο χωρικός αυτοσυσχετισμός
- την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής γεωμετρίας

- την επίλυση προβλημάτων που βασίζονται στον υπολογισμό αποστάσεων
- την εκτίμηση της μορφής επιφανειών βάσει ενός συνόλου παρατηρήσεων
- την ανάλυση του πεδίου ως προς τα πρωτογενή και τα δευτερογενή χαρακτηριστικά του
- τον συνδυασμό πολλών χαρτογραφικών επιθεμάτων (χαρτογραφική επίθεση)

Τα πιο διαδεδομένα και συχνά εφαρμοζόμενα εργαλεία χωρικής ανάλυσης για διανυσματικά δεδομένα είναι οι τεχνικές εξαγωγής (extract), οι αναλύσεις εγγύτητας (proximity) και οι λειτουργίες επίθεσης (overlay).

Η Επιλογή (Select) είναι ένα πολύ βασικό εργαλείο ανάλυσης, με το οποίο δίνεται η δυνατότητα απομόνωσης και εξαγωγής οντοτήτων ενός θεματικού επιπέδου βάσει κριτηρίων αξιοποιώντας:

- (i) Selection by location: τα γεωμετρικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά των οντοτήτων του ίδιου θεματικού επιπέδου ή τις τοπολογικές σχέσεις με οντότητες άλλου θεματικού επιπέδου, θέτοντας χωρικά ερωτήματα
- (ii) Selection by attributes: τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των οντοτήτων του θεματικού επιπέδου, θέτοντας λογικά ερωτήματα χρησιμοποιώντας τη γλώσσα SQL (Structured Query Language).

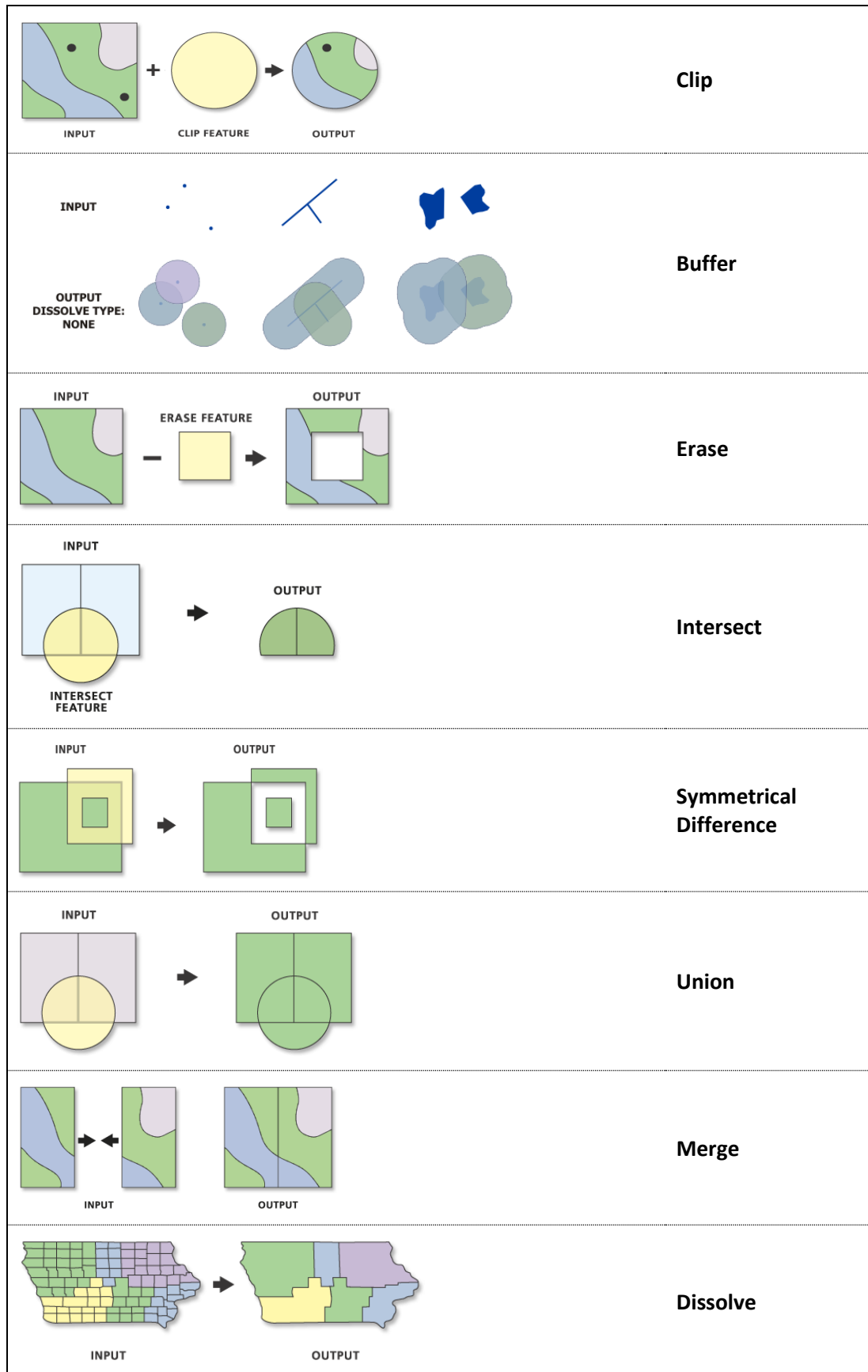


Σχήμα 13: Εργαλείο Select χωρικής ανάλυσης διανυσματικών δεδομένων

(Πηγή: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/tools/>)

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά επιπρόσθετες τεχνικές χωρικής ανάλυσης που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας (Τσούλος κ.α. 2015, Χαλκιάς κ.α. 2015, Tool Reference for ArcMap):

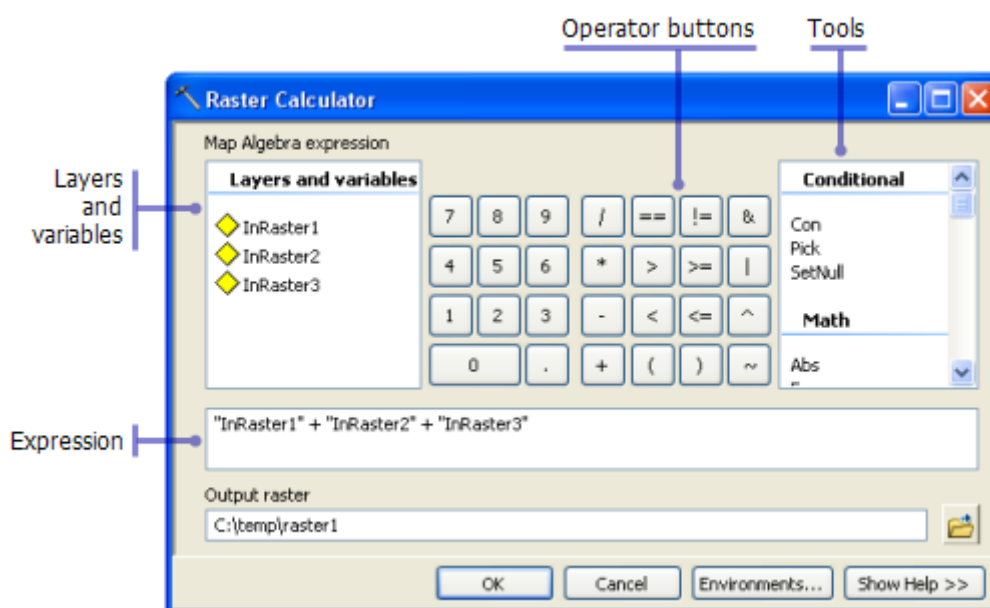
- Η Αποκοπή (Clip) χρησιμοποιείται όταν οι οντότητες ενός επιπέδου επεξεργασίας αποκόπτονται στα όρια του θεματικού επιπέδου που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό. Το γεωμετρικό αρχέτυπο των οντοτήτων μπορεί να είναι σημείο, γραμμή ή πολύγωνο, ανάλογα με την εφαρμογή. Συνήθως το θεματικό επίπεδο για την αποκοπή (αναφέρεται και ως μάσκα), είναι οντότητες πολυγωνικής γεωμετρίας.
- Η Ζώνη Επιρροής (Buffer) δημιουργεί περιμετρικές ζώνες γύρω από τις οντότητες, που το γεωμετρικό τους αρχέτυπο μπορεί να είναι σημείο, γραμμή ή πολύγωνο. Το αποτέλεσμα είναι πολύγωνα που αντιστοιχούν στις ζώνες επιρροής και οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επιβολή περιορισμών ή κανόνων.
- Η Απαλοιφή (Erase) χρησιμοποιείται όταν από ένα επίπεδο επεξεργασίας οντοτήτων πολυγωνικής γεωμετρίας είναι απαραίτητη η διαγραφή της επιφανείας που επικαλύπτουν οντότητες πολυγωνικής γεωμετρίας ενός άλλου θεματικού επιπέδου.
- Η Τομή (Intersect) δίνει τη δυνατότητα, μετά το συνδυασμό θεματικών επιπέδων με οντότητες πολυγωνικής γεωμετρίας, να διατηρούνται στο παραγόμενο θεματικό επίπεδο μόνο εκείνες οι οντότητες (μέρος ή σύνολο αυτών) οι οποίες βρίσκονται στο χώρο που επικαλύπτονται τα θεματικά επίπεδα.
- Η Συμμετρική Διαφορά (Symmetrical Difference) εφαρμόζεται, μετά το συνδυασμό θεματικών επιπέδων με οντότητες πολυγωνικής γεωμετρίας, για να διατηρούνται στο παραγόμενο επίπεδο μόνο οι οντότητες οι οποίες δεν βρίσκονται στον κοινό χώρο μεταξύ των επιπέδων.
- Η Ένωση (Union) πραγματοποιεί τη γεωμετρική ένωση οντοτήτων πολυγωνικής γεωμετρίας από ένα ή περισσότερα θεματικά επίπεδα και στο παραγόμενο επίπεδο διατηρείται το σύνολο των οντοτήτων. Το εργαλείο όταν εκτελείται σε ένα θεματικό επίπεδο, ενώνει τις οντότητες που επικαλύπτονται μεταξύ τους.
- Η Συνένωση (Merge) αξιοποιείται για τη συνένωση δύο ή περισσότερων θεματικών επιπέδων οντοτήτων του ίδιου γεωμετρικού αρχέτυπου σε ένα θεματικό επίπεδο. Πραγματοποιεί και συνένωση της περιγραφικής πληροφορίας των οντοτήτων, όταν αυτή διαφέρει μεταξύ των θεματικών επιπέδων.
- Η Ομαδοποίηση (Dissolve) συνενώνει οντότητες πολυγωνικής γεωμετρίας ενός θεματικού επιπέδου τα οποία έχουν ένα κοινό όριο ή γραμμές που έχουν ένα κοινό κόμβο και επιπλέον έχουν την ίδια τιμή σε κάποια ιδιότητα. Το εργαλείο χρησιμοποιείται όταν λόγω της αλλαγής της ταξινόμησης των ιδιοτήτων πρέπει να αλλάξει η γεωμετρία. Δηλαδή όταν δύο γειτονικά πολύγωνα με την αρχική ταξινόμηση θεωρούνταν διαφορετικά και με τη νέα ταξινόμηση ανήκουν στην ίδια κατηγορία, πρέπει να καταργηθούν τα ενδιάμεσα όρια και να συνενωθούν σε ένα ενιαίο πολύγωνο.



Σχήμα 14: Εργαλεία χωρικής ανάλυσης διανυσματικών δεδομένων

(Πηγή: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/tools/>)

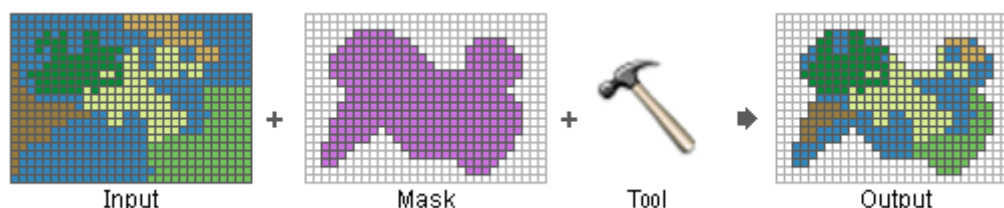
Όσον αφορά τα δεδομένα κανονικοποιημένης δομής, όπως τα δεδομένα τηλεπισκόπησης, τα ΣΓΠ προσφέρουν πληθώρα λειτουργιών χωρικής ανάλυσης. Ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία χωρικής ανάλυσης είναι η χαρτογραφική άλγεβρα (Raster Calculator), με την οποία είναι δυνατή η εφαρμογή αριθμητικών και λογικών πράξεων μεταξύ θεματικών επιπέδων κανονικοποιημένων δεδομένων όπως είναι οι πολυφασματικές εικόνες. Με τις αριθμητικές λειτουργίες εκτελούνται πράξεις τιμών από ένα επίπεδο με αυτές ενός άλλου ή άλλων επιπέδων στην αντίστοιχη θέση, ενώ με τις λογικές διενεργούνται λογικές συσχετίσεις μεταξύ των κανονικοποιημένων δεδομένων των θεματικών επιπέδων. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα είναι η δυνατότητα σύνταξης πολλαπλών λειτουργιών στο περιβάλλον του Raster Calculator, που είναι πολύ χρήσιμη όταν ζητείται η αυτόματη υλοποίηση πολύπλοκων διαδικασιών ή η αλληλουχία επεξεργασιών (Χαλκιάς κ.α. 2015, Tool Reference for ArcMap).



Σχήμα 15: Εργαλείο Raster Calculator χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων

(Πηγή: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/>)

Εκτός από το Raster calculator, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκαν και οι λειτουργίες εξαγωγής και ειδικότερα το εργαλείο «Extraction by mask», το οποίο λειτουργεί παρόμοια με το εργαλείο Clip για τα διανυσματικά δεδομένα. Το θεματικό επίπεδο που χρησιμοποιείται για την αποκοπή μπορεί να είναι κανονικοποιημένης δομής ή διανυσματικής δομής πολυγωνικής γεωμετρίας.



Σχήμα 16: Εργαλείο Extract by mask χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων

(Πηγή: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/>)



Τα τελευταία χρόνια τα ΣΓΠ περιλαμβάνουν και τεχνικές επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων της τηλεπισκόπησης, όπως η ενίσχυση, η φίλτραση, η κατάτμηση και η ταξινόμηση. Σε πολλές περιπτώσεις είτε περιλαμβάνονται σε εξειδικευμένα λογισμικά ανάλυσης τηλεπισκοπικών δεδομένων που είναι συμβατά με λογισμικά ΣΓΠ (πχ. ENVI και ArcGIS) είτε εισάγονται με τη μορφή plugin (πχ. SCP plugin του QGIS).

#### 2.2.3.4 Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση

Ο κλασικός τρόπος αναπαράστασης του γεωγραφικού χώρου είναι μέσω θεματικών επιπέδων πληροφορίας (layers). Κατά τη χαρτογραφική σύνθεση ενοποιείται και αποδίδεται, σύμφωνα με τους κανόνες της χαρτογραφικού συμβολισμού και της χαρτογραφικής σχεδίασης, το σύνολο των θεματικών επιπέδων των δεδομένων που συλλέχθηκαν και αποτέλεσαν αντικείμενο επεξεργασίας και ανάλυσης (Τσούλος κ.α. 2015).



Σχήμα 17: Χαρτογραφική σύνθεση θεματικών επιπέδων

(Πηγή: Κάβουρας κ.α. 2016)

#### 2.2.4 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Τα ΣΓΠ αποτελούν ένα πολύ σημαντικό δυναμικό εργαλείο διαχείρισης της χωρικής πληροφορίας με ποικίλλες εφαρμογές σε πολλά επιστημονικά πεδία, δεδομένου μάλιστα ότι μπορούν να ενσωματώσουν, να προσαρμόσουν, να αναλύσουν και να αντλήσουν πληροφορία από διάφορες πηγές δεδομένων με χωρική συσχέτιση, και στη συνέχεια να μετασχηματίσουν τα αρχικά δεδομένα σε χρήσιμες πληροφορίες για ένα υπό μελέτη χωρικό φαινόμενο. Ειδικότερα στον τομέα του περιβάλλοντος, τα ΣΓΠ έχουν αποδείξει ότι αποτελούν ένα σαφώς αποτελεσματικό μέσο περιβαλλοντικής πληροφόρησης των αρμόδιων φορέων, των επιστημόνων και των πολιτών. Πλήθος περιβαλλοντικών μελετών, από μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων έως πιο σύνθετες όπως τα σχέδια διαχείρισης υδατικών πόρων λεκανών απορροής ποταμών, έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία αυτή για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, ενώ παράλληλα τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία αυτή συχνά αποτελεί τεχνική προδιαγραφή σε προκηρύξεις έργων περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.

Οι δυνατότητες ενός ΣΓΠ, όπως η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, η διαχείριση της περιβαλλοντικής πληροφορίας με ευελιξία χωρικής και χρονικής κλίμακας και τα ισχυρά εργαλεία χωρικής ανάλυσης για την αξιολόγηση περιβαλλοντικών θεμάτων είναι μερικά από τα στοιχεία που ενισχύουν τη χρήση της τεχνολογίας αυτής ως εργαλείο λήψης απόφασης, περιβαλλοντικών ελέγχων και καταστολής της περιβαλλοντικής παραβατικότητας.

Μάλιστα η εξασφάλιση της διαλειτουργικότητάς τους με σχετικά μητρώα και υπηρεσίες, κατ' εφαρμογή των διατάξεων της Οδηγίας 2007/2/EC INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe), όπως αυτή έχει ενσωματωθεί στο εθνικό δίκαιο με το Νόμο 3882/2010 (ΦΕΚ 166 Α ) και τις εκτελεστικές του διατάξεις, και θα έχει πλήρη εφαρμογή το 2019, αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος συλλογής δεδομένων και παράλληλα θα υποστηρίξει τη συνεχή ενημέρωση των δεδομένων, άρα και τη δυναμική της περιβαλλοντικής πληροφορίας.

Επιπλέον είναι σημαντικό να τονιστεί ότι χάρη στα ΣΓΠ είναι δυνατή η συνδυασμένη χρήση δορυφορικών δεδομένων και χωρικών δεδομένων από άλλες πηγές με στόχο την ανάλυση και συνεπώς την προστασία του περιβάλλοντος (ΤΕΕ 2017).

Ενδεικτικά, μη εξαντλητικά, περιβαλλοντικά θέματα που μελετώνται με τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών είναι τα εξής:

- η χαρτογραφική αποτύπωση περιβαλλοντικής πληροφορίας, όπως χρήσεις γης, περιοχές οικολογικού ενδιαφέροντος, αναδασωτέες εκτάσεις, περιοχές αστικού πρασίνου, περιβαλλοντικές υποδομές, ποιότητα ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, ποιότητα υδάτων, ποιότητα ακουστικού περιβάλλοντος
- ο περιβαλλοντικός πολεοδομικός σχεδιασμός, ο χωροταξικός σχεδιασμός με όρους βιώσιμης ανάπτυξης και η χωροθέτηση έργων φιλικών προς το περιβάλλον όπως τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- η χωροθέτηση υποδομών όπως τα έργα διαχείρισης αποβλήτων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι χώροι υγειονομικής ταφής, οι μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων και τα σημεία προσωρινής αποθήκευσης των αστικών στερεών αποβλήτων εντός του πολεοδομικού ιστού
- η αποτύπωση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων έργων και δραστηριοτήτων
- υδρολογικές εφαρμογές στο περιβάλλον (πχ χαρτογράφηση λεκανών απορροής, προσδιορισμός πλημμυρικά επικίνδυνων περιοχών)
- η λήψη αποφάσεων σχετικών με το περιβάλλον (πχ μέτρα για σενάρια ρύπανσης υπόγειου υδροφορέα)
- η εκτίμηση και η διαχείριση περιβαλλοντικών κινδύνων και φυσικών καταστροφών, όπως ο κίνδυνος εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς
- η πρόληψη και η καταστολή της περιβαλλοντικής παραβατικότητας μέσω συνεχούς παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων που έχει ορίσει ο χρήστης, όπως για παράδειγμα οι φυσικοχημικές και οικολογικές παράμετροι ποτάμιων συστημάτων

## 2.3 Στερεά απόβλητα

### 2.3.1 Ευρωπαϊκή πολιτική για τα απόβλητα

Ο τομέας της διαχείρισης των αποβλήτων είναι στο επίκεντρο της περιβαλλοντικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά τα τελευταία σαράντα χρόνια μέσω πλήθους δράσεων και νομοθετικών πράξεων, με τις οποίες καθορίστηκαν οι κοινές γενικές αρχές και κατευθύνσεις διαχείρισης και οι διαδικασίες ελέγχου για την εξασφάλιση υψηλού επιπέδου προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας στην Ευρώπη (ΥΠΕΚΑ 2014).

Παρά την σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, η διαχείριση των αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελεί μείζον ζήτημα για την ΕΕ και συνιστά αναγνωρισμένα μια σημαντικότερη περιβαλλοντική πρόκληση σε διεθνές επίπεδο, καθιστώντας πλέον αναγκαία την αλλαγή της σχέσης μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης, κατανάλωσης φυσικών πόρων και δημιουργίας αποβλήτων. Ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι να μειώνονται οι ποσότητες των παραγόμενων αποβλήτων και, εφόσον η παραγωγή αποβλήτων είναι αναπόφευκτη, να προωθούνται αυτά ως πόροι και να επιτυγχάνονται υψηλότερα επίπεδα ανακύκλωσης και ασφαλής διάθεση των αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ 2014).

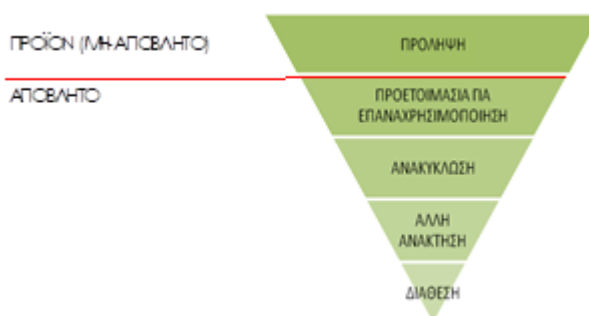
Το θέμα αυτό αναπτύχθηκε εκτενέστερα στο 6ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον (ΠΔΠ) «Περιβάλλον 2010: Το μέλλον μας, η επιλογή μας» (απόφαση 1600/2002/ΕΚ), που αποτέλεσε το στρατηγικό πλαίσιο για την περιβαλλοντική πολιτική της ΕΕ για την περίοδο 2002–2012. Στο πρόγραμμα προβάλλεται η αντίληψη ενσωμάτωσης των πολιτικών των σχετικών με τους πόρους, τα προϊόντα και τα απόβλητα, θέτοντας ως στόχο τη *«βελτίωση της αποτελεσματικότητας των πόρων και της διαχείρισης των πόρων και των αποβλήτων για να επιτευχθούν βιώσιμες μορφές παραγωγής και κατανάλωσης, αποσυνδέοντας τη χρήση των πόρων και την παραγωγή των αποβλήτων από τον ρυθμό της οικονομικής μεγέθυνσης και αποσκοπώντας στο να εξασφαλιστεί ότι η κατανάλωση ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων πόρων δεν υπερβαίνει τη φέρουσα ικανότητα περιβάλλοντος»*.

Το 2005 η ΕΕ υιοθέτησε τη στρατηγική για την πρόληψη και την ανακύκλωση των αποβλήτων (COM(2005)666), μια από τις 7 θεματικές στρατηγικές του 6ου ΠΔΠ, και καθόρισε ως μακροπρόθεσμο στόχο ότι η ΕΕ θα καταστεί κοινωνία της ανακύκλωσης, η οποία θα επιδιώκει να αποφεύγει την παραγωγή των αποβλήτων και θα τα αξιοποιεί ως πόρο. Η ΕΕ συνδυάζει τη στρατηγική αυτή με δύο άλλες πρωτοβουλίες: την ολοκληρωμένη πολιτική προϊόντων και τη στρατηγική για την αειφόρο χρήση των φυσικών πόρων. Η παράλληλη υλοποίησή τους προσβλέπει στον καλύτερο καθορισμό των ισορροπιών που απαιτούνται για τη διαχείριση των πόρων, των προϊόντων και των αποβλήτων.

Το 2008, στα πλαίσια της επίτευξης των προαναφερθέντων στόχων και της πλήρους εφαρμογής της στρατηγικής για την πρόληψη και την ανακύκλωση των αποβλήτων, αναθεωρήθηκε η Οδηγία Πλαίσιο για τα απόβλητα, όπως αυτή είχε εκάστοτε τροποποιηθεί, με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ. Στο πεδίο εφαρμογής της αναθεωρημένης Οδηγίας περιλαμβάνονται πλέον τα επικίνδυνα απόβλητα και τα χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, καταργώντας αντίστοιχα τις σχετικές οδηγίες.

Το 2010, η στρατηγική «Ευρώπη 2020» για μια έξυπνη, βιώσιμη και χωρίς αποκλεισμούς οικονομία της ΕΕ έως το 2020 (COM(2010)2020) εντάσσει, ως ένα από τα επτά βασικά εργαλεία άσκησης πολιτικής, την εμβληματική πρωτοβουλία «Μια Ευρώπη που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τους πόρους». Η πρωτοβουλία αυτή προάγει την αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από τη χρήση των πόρων και τη μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα με αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων. Προς την κατεύθυνση αυτή, το τρέχον 7ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον (ΠΔΠ) «Ευημερία εντός των ορίων του πλανήτη μας» (απόφαση 1386/2013/ΕΕ) που καλύπτει το διάστημα έως και το 2020, θέτει ως ένα από τους εννιά στόχους προτεραιότητας την «μετατροπή της ΕΕ σε μια πράσινη και ανταγωνιστική οικονομία χαμηλών επιπέδων ανθρακούχων εκπομπών και αποδοτικής χρήσης των πόρων».

Προκειμένου να δοθεί πιο μακροπρόθεσμη κατεύθυνση, η ΕΕ καθορίζει στο 7<sup>ο</sup> ΠΔΠ το όραμα για το 2050: «Το 2050, ζούμε καλά, μέσα στα οικολογικά όρια του πλανήτη. Η ευημερία μας και η υγεία του περιβάλλοντος προέρχονται από μια καινοτόμο, κυκλική οικονομία, όπου τίποτα δεν πάει χαμένο και όπου οι φυσικοί πόροι τυγχάνουν διαχείρισης με τρόπους που ενισχύουν την αντοχή της κοινωνίας μας. Η ανάπτυξη μας, που χαρακτηρίζεται από χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, έχει από καιρό αποσυνδεθεί από τη χρήση των πόρων, δίνοντας το ρυθμό για μια παγκόσμια βιώσιμη οικονομία». Το 2015, η ΕΕ υιοθετεί σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία (COM(2015) 614 final), το οποίο μεταξύ άλλων σημειώνει ότι η διαχείριση των αποβλήτων παίζει κεντρικό ρόλο στην κυκλική οικονομία και θα πρέπει να υποστηριχθεί η υλοποίηση της ιεράρχησης των αποβλήτων.



**Σχήμα 18: Ιεράρχηση επιλογών διαχείρισης αποβλήτων**

Στοιχειώδεις προαπαιτούμενο των παραπάνω φιλόδοξων κατευθύνσεων, που έχουν σαφή προσανατολισμό προς την κυκλική οικονομία, είναι η πλήρης εφαρμογή της νομοθεσίας, εντείνοντας για τη χώρα μας την ανάγκη ενίσχυσης της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και ελέγχου και των μηχανισμών επιβολής για την πρόληψη και την αντιμετώπιση συμβάντων παραβατικότητας, που σχετίζονται συνήθως με την ασφαλή διάθεση των αποβλήτων.

### 2.3.2 Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο

Το εθνικό δίκαιο που διέπει τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα κατά βάση απορρέει από τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής νομοθεσίας και συνοψίζεται στον πίνακα 5. Συγκεκριμένα ο πίνακας περιλαμβάνει τις νομοθετικές διατάξεις που καθορίζουν το γενικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων, επικίνδυνων και μη για λόγους πληρότητας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα αστικά

στερεά απόβλητα δεν έχουν ειδικό θεσμικό πλαίσιο, διατάξεις που καθορίζουν άλλα ρεύματα αποβλήτων (πχ βιομηχανικά απόβλητα, απόβλητα υγειονομικών μονάδων, μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων, κλπ) δεν αναφέρονται καθότι είναι εκτός του αντικειμένου της παρούσας εργασίας.

**Πίνακας 5: Βασικό νομοθετικό πλαίσιο για τα απόβλητα**

<b>Νομοθετική διάταξη</b>	<b>Βασικά στοιχεία ενδιαφέροντος</b>
N. 4042/2012 (ΦΕΚ 24Α)	Πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων –ενσωμάτωση Οδηγίας 2008/98/ΕΚ Προδιαγραφές για κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης και προγραμμάτων πρόληψης Ποσοτικοί στόχοι για αστικά στερεά απόβλητα και απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων
N. 2939/2001 (ΦΕΚ 179Α)	Γενικό πλαίσιο εναλλακτικής διαχείρισης ειδικών ρευμάτων αποβλήτων (συσκευασιών, συσσωρευτών, κλπ) και ενσωμάτωση οδηγίας 94/62/ΕΚ <i>Τροποποιήθηκε από Ν. 3854/10 και ΥΑ 9268/469/07</i>
ΚΥΑ 51373/4684/2015 (ΦΕΚ 2706Β)	Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) και του Εθνικού Στρατηγικό Σχέδιο Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων
ΚΥΑ 62952/5384/2016 (ΦΕΚ 4326 Β)	Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ)
ΚΥΑ ΗΠ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ 1909Β)	Μέτρα και όροι για τη διαχείριση μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων Καθορισμός φορέων διαχείρισης και των υποχρεώσεων τους <i>Τροποποιήθηκε από Ν. 4042/2012</i>
ΚΥΑ ΗΠ 13588/725/2006 (ΦΕΚ 383 Β)	Μέτρα και όροι για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων Συμπληρωματικές διατάξεις σχετικά με τη διασυνοριακή μεταφορά. Καθορισμός φορέων διαχείρισης και των υποχρεώσεων τους <i>Τροποποιήθηκε από Ν. 4042/2012 και ΚΥΑ 62952/5384/2016</i>
ΚΥΑ 24944/1159/2006 (ΦΕΚ 791 Β)	Γενικές τεχνικές προδιαγραφές διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων <i>Τροποποιήθηκε από ΚΥΑ 62952/5384/2016</i>
ΚΥΑ 4641/232/2006 (ΦΕΚ 168 Β)	Τεχνικές προδιαγραφές μικρών χώρων υγειονομικής ταφής σε νησιά και απομονωμένους οικισμούς
ΚΥΑ 29407/3508/2002 (ΦΕΚ 1572Β)	Προδιαγραφές για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων Κριτήρια και διαδικασίες αποδοχής αποβλήτων Θέσπιση στόχων για μείωση της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών που οδηγούνται για ταφή
ΚΥΑ 114218/1997 (ΦΕΚ 1016 Β)	Γενικές τεχνικές προδιαγραφές διαχείρισης στερεών αποβλήτων <i>Τροποποιήθηκε από ΚΥΑ 56366/4351/2014</i>

Πηγή: ΥΠΕΝ, ΕΛΙΝΥΑΕ, ίδια επεξεργασία

### 2.3.3 Εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης αποβλήτων

Για τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα είναι σε ισχύ το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ), κατ'εφαρμογή των άρθρων 22 και 33 του Νόμου Πλαισίου για τα Απόβλητα (Ν. 4042/2012 ΦΕΚ 24 Α), το οποίο κυρώθηκε το Δεκέμβριο 2015 με την ΚΥΑ 51373/4684/2015 (ΦΕΚ 2706Β), εφαρμόζεται στο σύνολο των αποβλήτων που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ και έχει χρονικό ορίζοντα εφαρμογής έως και το 2020.

Το εθνικό σχέδιο αποσκοπεί στο να δοθούν οι κατάλληλες στρατηγικές κατευθύνσεις ώστε μέσω ενός συνεκτικού πλέγματος σχεδίων, προγραμμάτων, δράσεων και έργων να εφαρμόζεται η εθνική πολιτική διαχείρισης αποβλήτων και να επιτυγχάνονται οι θεσμοθετημένοι στόχοι.

Η εθνική πολιτική για τα απόβλητα αποτελεί μέρος της πολιτικής για τη βιώσιμη ανάπτυξη της χώρας, με την οποία διασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος, η υγεία και ευημερία των πολιτών. Αποβλέπει στη μετάβαση σε μια οικονομία που χρησιμοποιεί αποδοτικά τους πόρους, είναι φιλική στο περιβάλλον και στοχεύει στην αντιμετώπιση των αποβλήτων ως πόρο.

Απώτερος σκοπός της εθνικής πολιτικής είναι η ολοκληρωμένη και ορθολογική διαχείριση των αποβλήτων που έγκειται στη συμπληρωματικότητα των επιλογών διαχείρισης, με γνώμονα την αειφορική χρήση των πόρων, προκειμένου να μειώνονται οι παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων και, όπου δημιουργούνται απόβλητα, να υφίστανται διαχείριση με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειώνονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία και παράλληλα να συνεισφέρουν θετικά στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη. Ιδιαίτερη σημασία για την επίτευξη αυτού του σκοπού έχει η προώθηση της ιεράρχησης των αποβλήτων, όπου προτεραιότητα δίνεται στην πρόληψη παραγωγής ως βέλτιστη επιλογή, ακολουθούμενη από την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση, τις άλλες μορφές ανάκτησης (π.χ. ανάκτηση ενέργειας) και την ασφαλή διάθεση ως τελευταία επιλογή διαχείρισης.

Προς εφαρμογή των κατευθύνσεων του υφιστάμενου εθνικού σχεδίου, τα Περιφερειακά Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ) κυρώθηκαν την περίοδο 2016-2017, τα οποία εξειδικεύουν την ολοκληρωμένη διαχείριση του συνόλου των αποβλήτων που παράγονται σε κάθε Περιφέρεια σύμφωνα με τους στόχους και τις προβλέψεις του εθνικού σχεδίου.

Περιφέρεια	ΠΕΣΔΑ
Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης	ΚΥΑ 63083/5402/ 30.12.2016 (ΦΕΚ 4317 Β)
Αττικής	ΚΥΑ 61490/5302/ 23.12.2016 (ΦΕΚ 4175 Β)
Βορείου Αιγαίου	ΚΥΑ 4533/261/ 07.02.2017 (ΦΕΚ 321 Β)
Δυτικής Ελλάδας	ΚΥΑ 61491/5301/ 23.12.2016 (ΦΕΚ 4175 Β)
Δυτικής Μακεδονίας	ΚΥΑ 61489/5303/ 22.12.2016 (ΦΕΚ 4151 Β)
Ηπείρου	ΚΥΑ 44015 /4029/ 05.10.2016 (ΦΕΚ 3196 Β)
Θεσσαλίας	ΚΥΑ 47393/4273/ 13.10.2016 (ΦΕΚ 3299 Β)
Ιονίων Νήσων	ΚΥΑ 63085/5401/ 30.12.2016 (ΦΕΚ 4317 Β)
Κεντρικής Μακεδονίας	ΚΥΑ 58971/5144/ 14.12.2016 (ΦΕΚ 4010 Β)
Κρήτης	ΚΥΑ 44014 /4028/ 05.10.2016 (ΦΕΚ 3196 Β)

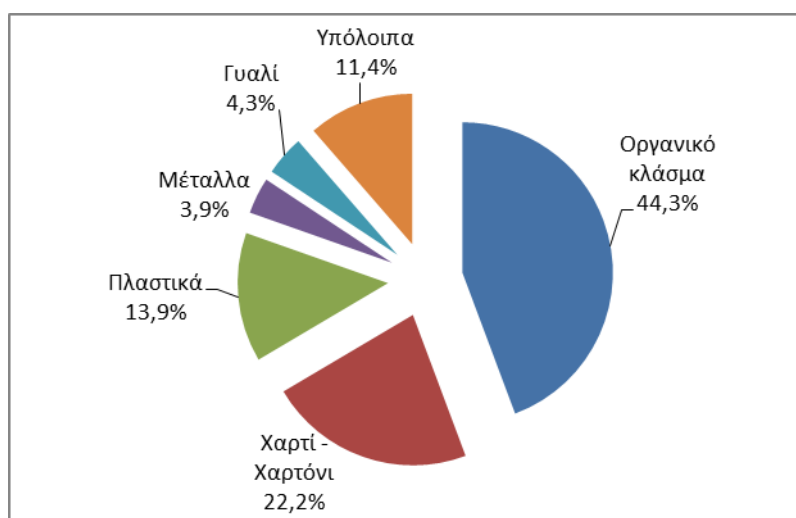
Περιφέρεια	ΠΕΣΔΑ
Νοτίου Αιγαίου	ΚΥΑ 63083/5402/ 30.12.2016 (ΦΕΚ 4317 Β)
Πελοποννήσου	ΚΥΑ 27716/1612/ 14.06.2017 (ΦΕΚ 2044 Β)
Στερεάς Ελλάδας	ΚΥΑ 63891/5427/ 16.01.2017 (ΦΕΚ 31 Β)

Τα ΠΕΣΔΑ υλοποιούνται από τον οικείο Περιφερειακό Φορέα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (Φο.Δ.Σ.Α.) και, εάν αυτός δεν υφίσταται ή δεν λειτουργεί, από την οικεία Περιφέρεια. Στα ΠΕΣΔΑ καθορίζονται οι περιοχές που συγκροτούν τις ενότητες διαχείρισης των αποβλήτων, οι μέθοδοι διαχείρισης που πρέπει να εφαρμόζονται σε κάθε διαχειριστική ενότητα, ενώ εξειδικεύονται συγκεκριμένοι στόχοι, μέτρα, όροι και περιορισμοί για την επίτευξη των στρατηγικών και ποσοτικών στόχων του Ν.4042/2012 και του εθνικού σχεδίου.

### 2.3.4 Διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων

Τα αστικά στερεά απόβλητα είναι μία κατηγορία στερεών αποβλήτων. Περιλαμβάνουν τα απόβλητα που παράγονται στα νοικοκυριά, καθώς και άλλα απόβλητα που λόγω της φύσης ή της σύνθεσης προσομοιάζουν με τα οικιακά απόβλητα, όπως τα απόβλητα από εμπορικές επιχειρήσεις, κοινωφελείς οργανισμούς (π.χ. λιμάνια, αεροδρόμια, σιδηροδρομικοί σταθμοί) και βιομηχανίες. Πηγή παραγωγής τους αποτελεί κατά κύριο λόγο η οικιακή δραστηριότητα (55-65%).

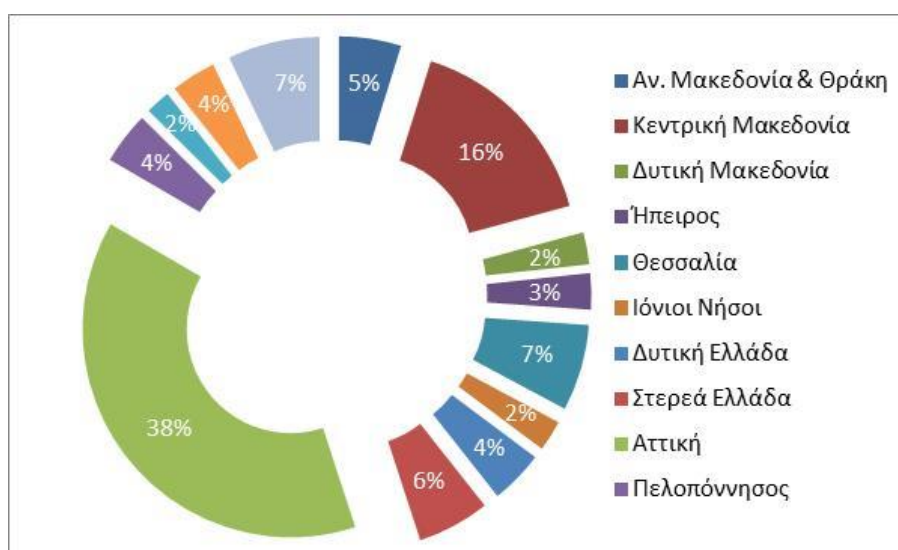
Τόσο τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των αστικών στερεών αποβλήτων επηρεάζονται από το γενικότερο χαρακτήρα της περιοχής (αστική, γεωργική, ορεινή, νησιωτική κλπ), την απασχόληση ανά τομέα (γεωργία, βιομηχανία, υπηρεσίες κ.λπ.) καθώς και το κατά κεφαλή ΑΕΠ της χώρας. Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης που υλοποιήθηκε για την κατάρτιση του εθνικού σχεδίου διαχείρισης αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ 2014), η μέση ποιοτική σύσταση των αστικών στερεών αποβλήτων σε επίπεδο χώρας διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 19: Μέση ποιοτική σύσταση αστικών στερεών αποβλήτων

(Πηγή: ΥΠΕΚΑ 2014)

Η παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων ανέρχεται στους 5.6 εκατ. τόνους ετησίως σύμφωνα με τη μελέτη του εθνικού σχεδίου, η οποία υπολογίστηκε με βάση τις καταγεγραμμένες ποσότητες από τις υφιστάμενες υποδομές, λαμβάνοντας υπόψη και τις ποσότητες που εκτρέπονται από τα συστήματα ανακύκλωσης/ ανάκτησης για το έτος 2011 και η οποία εκτιμάται ότι είναι κατά βάση σταθερή τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω των επιπτώσεων της οικονομικής κρίσης της χώρας. Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται η κατανομή της παραγωγής αστικών στερεών αποβλήτων σε επίπεδο περιφέρειας, όπου φαίνεται, όπως και ήταν αναμενόμενο, ότι είναι άμεσα συσχετιζόμενη με την αντίστοιχη περιφερειακή κατανομή του πληθυσμού, με μεγαλύτερο παραγωγό την Αττική και ακολουθεί η Κεντρική Μακεδονία.



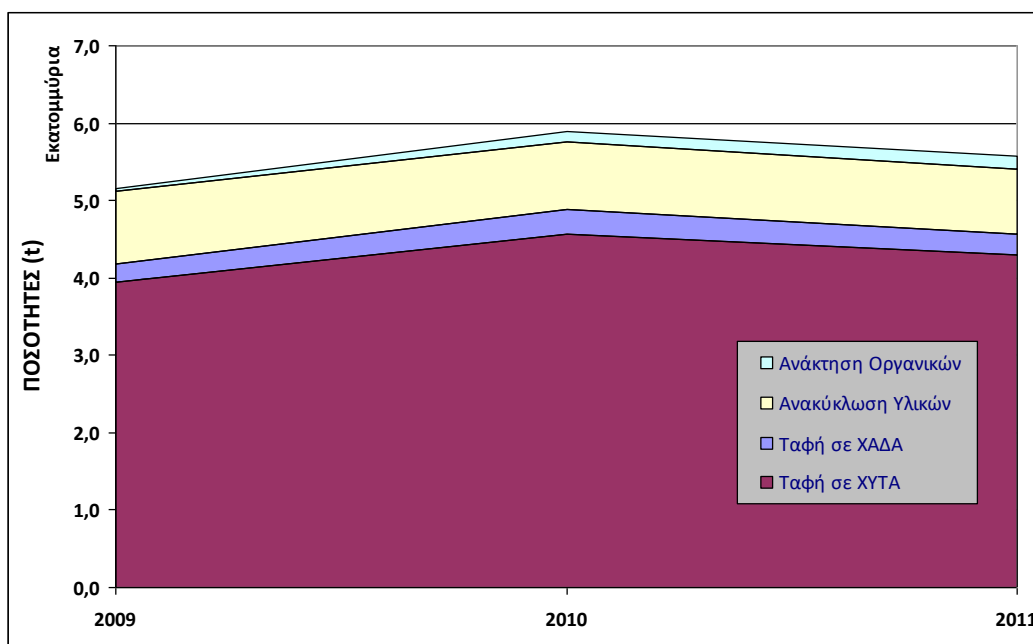
Σχήμα 20: Κατανομή παραγωγής αστικών στερεών αποβλήτων σε επίπεδο Περιφέρειας

(Πηγή: ΥΠΕΚΑ 2014, ίδια επεξεργασία)

Η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων σήμερα εξακολουθεί να αποτελεί μείζον ζήτημα για τη χώρα, καθότι απέχει κατά πολύ από τις προβλέψεις του προηγούμενου εθνικού σχεδιασμού που είχε εξειδικευτεί στα περιφερειακά σχέδια. Η βασική αιτία είναι η μεγάλη καθυστέρηση στην υλοποίηση των δικτύων και των υποδομών διαχείρισης που είναι απαραίτητα για την πλήρη συμμόρφωση με τη νομοθεσία.

Η εδαφική διάθεση παραμένει ο βασικός κορμός της διαχείρισης, σε ποσοστό 82% σύμφωνα με την αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης, όπως έχει αυτή αποτυπωθεί στο εθνικό σχέδιο (έτος αναφοράς 2011). Αν και η ανακύκλωση αποβλήτων συσκευασίας καθώς και άλλων ρευμάτων εναλλακτικής διαχείρισης έχει αξιολογηθεί ως ικανοποιητική, το οργανικό κλάσμα που αποτελεί το μεγαλύτερο κατά βάρος ρεύμα των αστικών στερεών αποβλήτων οδηγείται ως επί το πλείστον για ταφή. Μάλιστα ένα μικρό ποσοστό της εδαφικής διάθεσης αφορά τη χρήση χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης (ΧΑΔΑ).





Σχήμα 21: Διαχρονική εξέλιξη διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων

(Πηγή: ΥΠΕΚΑ 2014)

Με το τρέχον εθνικό σχέδιο, το οποίο θέτει νέους στόχους, στρατηγικές και δράσεις, ενσωματώνοντας παράλληλα τις νέες επιταγές της ευρωπαϊκής νομοθεσίας, υφίσταται πλέον επιτακτική ανάγκη στην ανάληψη δράσεων για την υλοποίηση των απαραίτητων υποδομών, αλλά και τη στροφή προς ανώτερες ιεραρχικά λύσεις διαχείρισης. Ειδικότερα, τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού της διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων με χρονικό ορίζοντα έως και το 2020 είναι τα εξής:

- (i) Η εφαρμογή προγραμμάτων πρόληψης με έμφαση στα απόβλητα τροφίμων και τη συσκευασία.
- (ii) Η καθιέρωση της χωριστικής συλλογής ανακυκλώσιμων υλικών σε διακριτά ρεύματα που είναι ουσιώδους σημασίας για την αύξηση των ποσοστών προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωσης των αστικών στερεών αποβλήτων.
- (iii) Η οργάνωση της χωριστής συλλογής του οργανικού κλάσματος, για να ενισχυθούν οι στόχοι εκτροπής των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων από την ταφή.
- (iv) Η προώθηση κομποστοποίησης υψηλής ποιότητας και η ανάπτυξη μικρής κλίμακας αποκεντρωμένων μονάδων ανάκτησης προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων.
- (v) Η ολοκλήρωση των αναγκαίων υποδομών σε μονάδες επεξεργασίας υπολειπόμενων σύμμεικτων αστικών στερεών αποβλήτων.
- (vi) Κάλυψη του συνόλου της χώρας με υποδομές υγειονομικά ασφαλούς διάθεσης μέσω της επέκτασης ή/και κατασκευής νέων χώρων υγειονομικής ταφής

- (vii) Η αξιοποίηση ενεργοβόρου εγχώριας βιομηχανίας για την απορρόφηση παραγόμενων εναλλακτικών καυσίμων και διερεύνηση δυνατοτήτων συνεπεξεργασίας/ συναποτέφρωσης
- (viii) Η αντιμετώπιση των καταγεγραμμένων υστερήσεων και δυσλειτουργιών του συστήματος διακυβέρνησης στον τομέα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων
- (ix) Η εφαρμογή οριζόντιων μέτρων για την αντιμετώπιση προβλημάτων πλημμελούς λειτουργίας των υφιστάμενων χώρων υγειονομικής ταφής

Η κατ' ελάχιστο βασική προτεραιότητα κατά την ανάπτυξη των δικτύων ανάκτησης είναι η διασφάλιση της επίτευξης των τιθέμενων στόχων, όπως αυτοί απορρέουν από τις κείμενες διατάξεις της νομοθεσίας.

Ο σχεδιασμός των δικτύων (τεχνολογικό σχήμα, παραγόμενα δευτερογενή υλικά, πλήθος μονάδων, κ.λπ.) εξειδικεύεται στα ΠΕΣΔΑ και είναι σύμφωνος με τις κατευθύνσεις των στρατηγικών του ΕΣΔΑ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος, καταβάλλοντας συστηματικές προσπάθειες για την αντιμετώπιση χρόνιων αδυναμιών και ελλείψεων στις υποδομές αλλά και την αναβάθμιση της διαχείρισης αποβλήτων. Αρκετά από τα έργα ανάκτησης και επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων που προβλέπονται στους ΠΕΣΔΑ έχουν ενταχθεί και χρηματοδοτούνται από τα επιχειρησιακά προγράμματα του ΕΣΠΑ καθώς και από άλλα χρηματοδοτικά εργαλεία.

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του 5<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Εταιρίας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΕΕΔΣΑ) με τίτλο «Η Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και η Συμβολή της στην Κυκλική Οικονομία» που πραγματοποιήθηκε το Δεκέμβριο 2017 (ΕΕΔΣΑ 2017), για τη αποτελεσματική υλοποίηση των ΠΕΣΔΑ είναι απαραίτητος ένας Κεντρικός συντονισμός όχι μόνο με τη μορφή των κατευθυντήριων οδηγιών του ΕΣΔΑ αλλά με τη μορφή παρακολούθησης της υλοποίησης τους αλλά και των απαραίτητων τροποποιήσεων με σκοπό την επίτευξη οικονομικών κλίμακας. Επιπλέον η θεσμοθέτηση κινήτρων και αντικινήτρων όπως η εφαρμογή του ειδικού τέλους ταφής είναι απαραίτητα μέσα για την άρση των εμποδίων στην διαχείριση και την εκτροπή από την ταφή.

### **2.3.5 Εδαφική διάθεση στερεών αποβλήτων**

Σύμφωνα με τις επιταγές της εθνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας για τα απόβλητα, η χώρα θα πρέπει να λαμβάνει τα αναγκαία μέτρα για να εξασφαλίσει ότι η διάθεση των αποβλήτων πραγματοποιείται χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η υγεία του ανθρώπου και χωρίς να χρησιμοποιούνται διαδικασίες ή μέθοδοι που ενδέχεται να βλάπτουν το περιβάλλον.

#### **A. Αστικά απόβλητα**

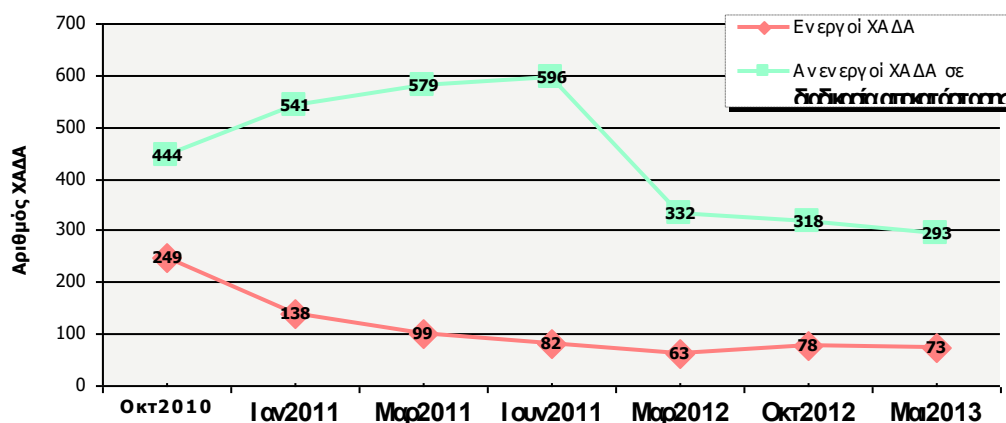
Με βάση τα στοιχεία του εθνικού σχεδίου διαχείρισης αποβλήτων (ΕΣΔΑ 2015), έχουν καλυφθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό οι βασικές υποδομές για την ασφαλή διάθεση των αστικών στερεών

αποβλήτων, οι οποίες εξυπηρετούν το 95% του πληθυσμού μέσω χώρων υγειονομικής ταφής. Όμως παραμένει ένα ποσοστό διάθεσης σε ΧΑΔΑ (χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων), οι οποίοι λειτουργούν χωρίς προδιαγραφές υγειονομικής διάθεσης, κυμαίνονται δε από τοπικές αποθέσεις αποβλήτων έως εκτάσεις δεκάδων στρεμμάτων με στοιχειώδεις υποδομές και ημι-οργανωμένη διαχείριση.

Η παύση της λειτουργίας και η αποκατάσταση των χώρων αυτών αποτελεί μια από τις βασικές προτεραιότητες των ελληνικών αρχών, η οποία έχει καθυστερήσει σε βάθος δεκαπενταετίας. Λόγω των εγγενών αδυναμιών της μη εκούσιας συμμόρφωσης της χώρας, παρά τις συστάσεις και προειδοποιητικές επιστολές της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το 2005 υπήρξε καταδικαστική απόφαση από το Δικαστήριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΔΕΕ), στο πλαίσιο της οποίας η χώρα αναγνώρισε την ύπαρξη 1125 ΧΑΔΑ. Αποτέλεσμα της καταδικαστικής απόφασης ήταν η εκτέλεση χρονοδιαγράμματος συμμόρφωσης μέχρι το τέλος του 2008, το οποίο κατόπιν προειδοποιητικής εντολής της ΕΕ έγινε αναθεώρησή του έως το τέλος του 2011. Μάλιστα στα πλαίσια της συμμόρφωσης είχε αναρτηθεί στον ιστότοπο του ΥΠΕΝ (τέως ΥΠΕΚΑ), χάρτης και αναλυτικά στοιχεία των ενεργών ΧΑΔΑ, κατόπιν αιτήματος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το πρόγραμμα παύσης λειτουργίας και αποκατάστασης των ΧΑΔΑ περιλαμβάνει (ΥΠΕΚΑ 2014):

- καταγραφή και εκτίμηση επικινδυνότητας ΧΑΔΑ,
- προώθηση σχετικών νομοθετικών ρυθμίσεων και διοικητικών διαδικασιών,
- σχεδιασμό εναλλακτικών λύσεων υποκατάστασης των ΧΑΔΑ είτε με μεταφορά αποβλήτων σε υφιστάμενες υποδομές είτε με κατασκευή νέων υποδομών ή συνοδών εγκαταστάσεων, και
- χρηματοδότηση των έργων αποκατάστασης.

Το 2013 αν και η χώρα είχε σημειώσει σημαντική πρόοδο, δεν ολοκλήρωσε πλήρως το πρόγραμμα συμμόρφωσης με τη λήξη της προθεσμίας, καταγράφοντας 73 ενεργούς ΧΑΔΑ και 293 ΧΑΔΑ προς αποκατάσταση, με αποτέλεσμα η ΕΕ να παραπέμψει εκ νέου την Ελλάδα στο ΔΕΕ με εισήγηση χρηματικής ποινής (ΔΕΕ, υπόθεση C-378/13).

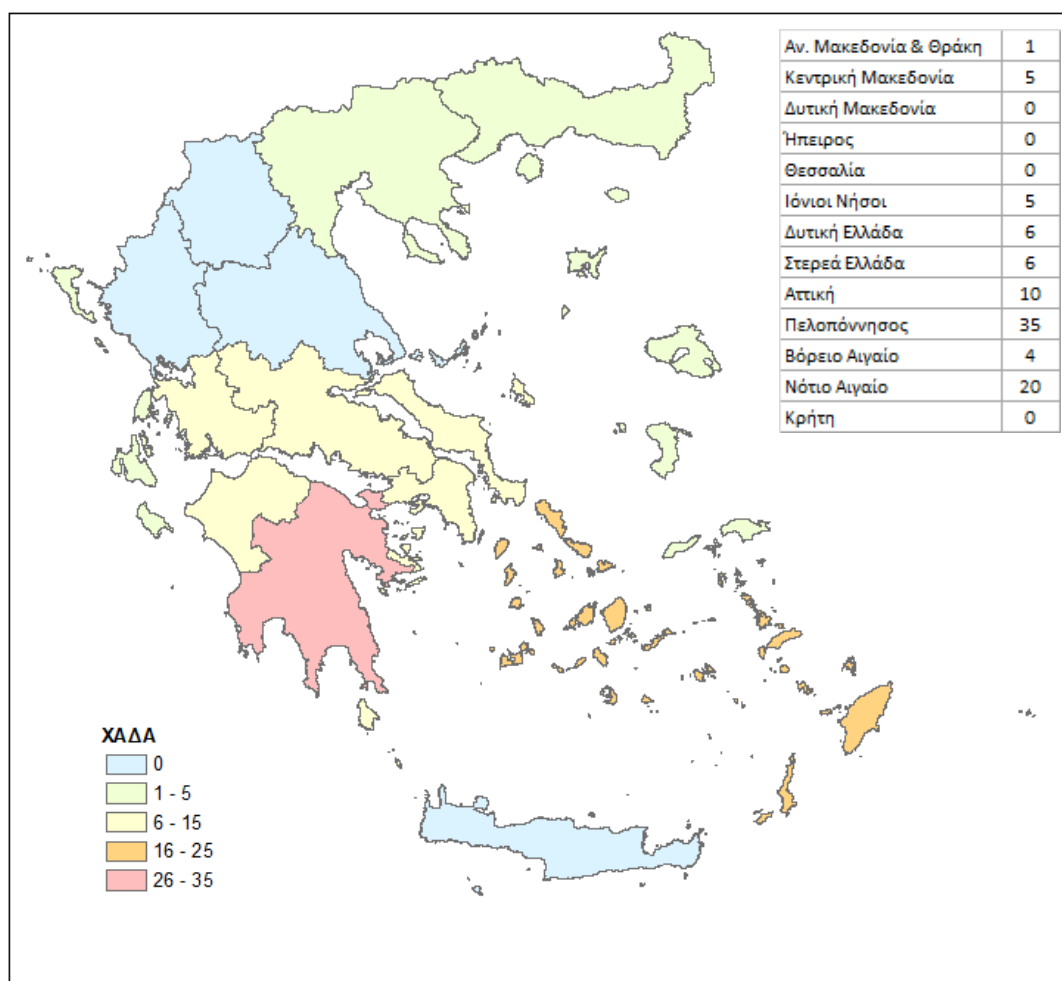


Σχήμα 22: Χρονική εξέλιξη εξάλειψης των ΧΑΔΑ

(Πηγή: ΥΠΕΚΑ 2014)

Το Δεκέμβριο 2014 η απόφαση του ΔΕΕ για την υπόθεση C-378/13 ήταν καταδικαστική για τη χώρα και από τον Ιούνιο του 2015 επιβλήθηκε ημερήσιο πρόστιμο, το οποίο προβλέπεται να μειώνεται με την παύση λειτουργίας και την αποκατάσταση κάθε ΧΑΔΑ, υπό τον όρο ότι δεν δημιουργούνται νέοι. Παρά τις προσπάθειες των ελληνικών αρχών που έγιναν για την εξάλειψη των ΧΑΔΑ μέχρι το πρώτο εξάμηνο του 2015 για την αποφυγή των οικονομικών κυρώσεων, το πρόβλημα δεν μπόρεσε να αντιμετωπιστεί επιτυχώς και εντοπίζεται σε περιοχές που δεν εξυπηρετούνται ακόμα από τις προβλεπόμενες υποδομές ή τις μεταβατικές λύσεις διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων.

Σύμφωνα με τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία που αφορούν τη λήξη του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου 2016 (βλέπε σχήμα 23), σήμερα τα κύρια προβλήματα για την επίτευξη της ασφαλούς διάθεσης εντοπίζονται κυρίως στην Πελοπόννησο και στην νησιώτικη Ελλάδα (ΕΕ 2017). Να σημειωθεί ότι τα στοιχεία αυτά μεταβάλλονται διαρκώς, γιατί καταβάλλεται συντονισμένη προσπάθεια για την άμεση παύση τους από τις Περιφέρειες, τους ΦοΔΣΑ, το ΥΠΕΝ και το ΥΠΕΣ.



Σχήμα 23: Απεικόνιση ΧΑΔΑ που δεν συμμορφώνονται με απόφαση ΔΕΕ (λήξη 2ου εξαμήνου 2016)

(Πηγή: ΕΕ 2017)

Προϋπόθεση για την εξάλειψη της ανεξέλεγκτης διάθεσης είναι να έχει κάθε δήμος πρόσβαση σε νόμιμη εγκατάσταση διαχείρισης αποβλήτων. Για την επιτάχυνση της απενεργοποίησης των ΧΑΔΑ, πριν την ολοκλήρωση των προβλεπόμενων υποδομών διαχείρισης, υφίστανται σε ισχύ διαδικασίες μεταβατικών λύσεων διαχείρισης, είτε με προσωρινά έργα διαχείρισης είτε με μεταφορά των αποβλήτων σε νόμιμα λειτουργούσες εγκαταστάσεις γειτονικών περιοχών. Η επιλογή της προσφορότερης εναλλακτικής λύσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής σε συνάρτηση με το χρονοδιάγραμμα υλοποίησης των υποδομών του εκάστου ΠΕΣΔΑ προς τελική εξυπηρέτηση των Δήμων.

Συμπερασματικά, το ΥΠΕΝ με βάση σχετικές του ανακοινώσεις θεωρεί ότι η παύση της παραβατικής συμπεριφοράς στη διάθεση των αποβλήτων είναι διαδικασία επίπονη που απαιτεί συστηματική παρακολούθηση και έλεγχο, και επιπλέον αλλαγή νοοτροπίας της τοπικής αυτοδιοίκησης. Στην κατεύθυνση αυτή, στις προτάσεις του 5<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της ΕΕΔΣΑ το Δεκέμβριο 2017, περιλαμβάνεται μεταξύ άλλων και η διασφάλιση της ασφαλούς εδαφικής διάθεσης μέσω (α) της εντατικοποίησης ελέγχων στους Δήμους, αυστηρή εφαρμογή κλεισίματος ΧΑΔΑ και αποκατάσταση του περιβάλλοντος χωρίς τη δημιουργία νέων ΧΑΔΑ και (β) της μετακύλισης του προστίμου της ΕΕ στους Δήμους για τους οποίους υπάρχει καταδικαστική απόφαση του Δικαστηρίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ύπαρξη ΧΑΔΑ.

## **B. Βιομηχανικά απόβλητα**

Εκτός από τα αστικά στερεά απόβλητα, θέματα παραβατικότητας σχετικά με την εδαφική διάθεση παρουσιάζουν και τα απόβλητα βιομηχανικής προέλευσης. Η έλλειψη υποδομών διαχείρισης των βιομηχανικών αποβλήτων στη χώρα έχει προκαλέσει τη συσσώρευσή τους στους χώρους των εγκαταστάσεων που φορές μετατρέπεται σε μόνιμη, καθώς και τη μη σύννομη διαχείρισή τους που οδηγεί φορές στην ανεξέλεγκτη διάθεση και δημιουργία ρυπασμένων χώρων με βιομηχανικά απόβλητα.

Μάλιστα, σε ότι αφορά τα επικίνδυνα βιομηχανικά απόβλητα, η Ελλάδα καταδικάστηκε το Σεπτέμβριο 2016 από το ΔΕΕ (ΔΕΕ, υπόθεση C-584/14) με χρηματική ποινή, μετά τη διαπίστωση, μεταξύ άλλων, ότι η συνήθης πρακτική είναι η προσωρινή αποθήκευση των επικίνδυνων αποβλήτων η οποία, ελλείψει κατάλληλων χώρων υγειονομικής ταφής, έχει μετατραπεί σε μόνιμη.

Για την καταγραφή και αξιολόγηση της επικινδυνότητας των ρυπασμένων χώρων, εκπονήθηκε για λογαριασμό του ΥΠΕΝ σχετικό έργο το οποίο επικεντρώθηκε στις περιφερειακές ενότητες που υπάρχει αυξημένη ένταση της βιομηχανικής δραστηριότητας και ολοκληρώθηκε το 2016. Σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων, ο προγραμματισμός και η υλοποίηση και των έργων εξυγίανσης θα πρέπει να ολοκληρωθεί έως το 2020.

### 2.3.6 Επισκόπηση χρήσης τηλεπισκόπησης ως εργαλείο εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με στερεά απόβλητα

Η παράνομη εδαφική διάθεση αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελεί ένα φλέγον περιβαλλοντικό και κοινωνικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η χώρα μας, αλλά και πολλές χώρες παγκοσμίως, το οποίο είναι εντονότερο όταν αυτές υπολείπονται των απαραίτητων υποδομών ασφαλούς διάθεσης και ενός αποτελεσματικού συστήματος ελέγχου και επιβολής της ισχύουσας νομοθεσίας. Η πάγια πρακτική για τον εντοπισμό χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων είναι η εποπτεία με χερσαία μέσα μεταφοράς από τις τοπικές αρχές βάσει σχετικών πληροφοριών ή καταγγελιών. Άλλη πρακτική είναι η εποπτεία με εναέρια μέσα μεταφοράς, η οποία απαντάται σε αναπτυγμένες χώρες που διαθέτουν σύγχρονα μέσα περιβαλλοντικής παρακολούθησης, αν και χρησιμοποιείται σε μικρότερο βαθμό λόγω του υψηλού της κόστους. (Glanville et al 2015, Slonecher et al 2010, Ishihara et al 2002)

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση είναι μια πολλά υποσχόμενη πρακτική εποπτείας καθώς δίνει τη δυνατότητα λήψης εικόνων μεγάλων χωρικών εκτάσεων σε σταθερή βάση και σε περιοχές συχνά δύσβατες με χερσαία μέσα μεταφοράς, η οποία δεν είναι δαπανηρή λύση όπως παλαιότερα και μάλιστα τηλεπισκοπικά δεδομένα με ικανοποιητικό εύρος χωρικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας διατίθενται πλέον ελεύθερα στην αγορά. Τα τελευταία 15 χρόνια, η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση και καταγραφή παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων, αν και η έρευνα για την ανάπτυξη τεχνικών ανάλυσης των τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι περιορισμένη σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Glanville et al 2015). Πολλές από τις μελέτες χρησιμοποιούν συνδυαστικά χωρικά δεδομένα μέσω τεχνικών ανάλυσης του ΣΓΠ. Στους πίνακες 6 και 7 παρουσιάζεται μια σύνοψη των τηλεπισκοπικών αισθητήρων και των τεχνικών τηλεπισκοπικής ανάλυσης που έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί για τον εντοπισμό ή/και χαρτογραφική αποτύπωση χώρων παράνομης διάθεσης αποβλήτων χρησιμοποιώντας δεδομένα από δορυφορικά συστήματα καταγραφής.

**Πίνακας 6: Επισκόπηση δορυφορικών τηλεπισκοπικών αισθητήρων για τον εντοπισμό παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων τα τελευταία 15 χρόνια**

Αισθητήρας	Χαρακτηριστικά αισθητήρα		
	Φασματικό εύρος	Μέγεθος εικονοστοιχείου	Χρονική διακριτική ικανότητα
<i>Οπτικοί αισθητήρες (μέτρια χωρική διακριτική ικανότητα)</i>			
LANDSAT TM	0.45-0.52 μm (κανάλι 1) 0.52-0.60 μm (κανάλι 2) 0.63-0.69 μm (κανάλι 3) 0.76-0.90 μm (κανάλι 4) 1.55-1.75 μm (κανάλι 5) 10.4-12.5 μm (κανάλι 6-θερμικό) 2.08-2.35 μm (κανάλι 7)	30 m 120 m (θερμικό)	16 μέρες
<i>Οπτικοί αισθητήρες (μεσαία χωρική διακριτική ικανότητα)</i>			
FORMOSAT-2	0.45-0.90 μm (παγχρωματικό) 0.45-0.52 μm (μπλε) 0.52-0.60 μm (πράσινο)	2 m (παγχρωματικό) 8 m (πολυφασματικό)	1 μέρα

Αισθητήρας	Χαρακτηριστικά αισθητήρα		
	Φασματικό εύρος	Μέγεθος εικονοστοιχείου	Χρονική διακριτική ικανότητα
	0.63-0.69 μm (κόκκινο) 0.76-0.90 μm (εγγύς υπέρυθρο)		
ALOS AVNIR-2	0.42-0.50 μm (μπλε) 0.52-0.60 μm (πράσινο) 0.61-0.69 μm (κόκκινο) 0.76-0.89 μm (εγγύς υπέρυθρο)	10 m	46 μέρες
<i>Μικροκυματικοί αισθητήρες (μεσαία χωρική διακριτική ικανότητα)</i>			
ALOS PALSAR	1.3 GHz ή 23 cm	10 m 100 m	46 μέρες
<i>Οπτικοί αισθητήρες (υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα)</i>			
ALOS PRISM	0.52-0.77 μm	2.5 m	46 μέρες
QUICKBIRD	0.45-0.90 μm (παγχρωματικό) 0.45-0.52 μm (μπλε) 0.52-0.60 μm (πράσινο) 0.63-0.69 μm (κόκκινο) 0.76-0.90 μm (εγγύς υπέρυθρο)	0.65 m (παγχρωματικό) 2.62 m (πολυφασματικό)	1-3.5 μέρες
IKONOS	0.45-0.90 μm (παγχρωματικό) 0.45-0.52 μm (μπλε) 0.51-0.60 μm (πράσινο) 0.63-0.70 μm (κόκκινο) 0.76-0.85 μm (εγγύς υπέρυθρο)	0.82 m (παγχρωματικό) 3.2 m (πολυφασματικό)	3 μέρες

Πηγή: Glanville et al 2015

**Πίνακας 7: Επισκόπηση τεχνικών τηλεπισκοπικής ανάλυσης για τον εντοπισμό παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων τα τελευταία 15 χρόνια**

Αισθητήρας	Τηλεπισκοπική τεχνική						Σχετιζόμενη GIS τεχνική/ εργαλείο		
	Isodata Unsupervised classification	Least square Linear mixture	Manual classification	Maximum Likelihood Classification	Pixel Purity Index	Principle component transformation	Certainty factor model	Spatial analysis tools	Weighted Linear combination
ALOS AVNIR-2			x						
ALOS PALSAR			x						
ALOS PRISM			x						
FORMOSAT-2		x			x		x		
IKONOS			x	x				x	x
LANDSAT TM	x					x			
QUICKBIRD			x						

Πηγή: Glanville et al 2015

Γενικά το μέγεθος των χώρων παράνομης διάθεσης αποβλήτων είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή της κατάλληλης χωρικής διακριτικής ικανότητας. Σχετικά μεγάλοι χώροι διάθεσης δύνανται να εντοπιστούν με αισθητήρες μέτριας χωρικής διακριτικής ικανότητας (πχ μέγεθος εικονοστοιχείου 4-12 m). Είναι αποδεδειγμένο ότι η υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα των αισθητήρων βελτιώνει κατά πολύ τα αποτελέσματα εντοπισμού, και είναι ενδεδειγμένη για μικρούς χώρους παράνομης διάθεσης, της τάξης των 6 x 4 m.

Σε ότι αφορά τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανάλυσης, ο οπτικός εντοπισμός χρησιμοποιείται σε αρκετές μελέτες, ο οποίος φαίνεται να είναι σχετικά αποτελεσματικός αν και υφίσταται περιορισμένη ποσοτικοποίηση της ακρίβειας της μεθόδου. Εντούτοις, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η πρακτική αυτή απαιτεί σημαντικό χρόνο και ανθρώπινους πόρους και δεν θεωρείται αποτελεσματική για την τακτική παρακολούθηση της παράνομης εδαφικής διάθεσης.

Πλέον των παγχρωματικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών που χρησιμοποιούνται βασικά για τον οπτικό εντοπισμό, τα πιο συχνά εφαρμοζόμενα τηλεπισκοπικά δεδομένα για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα είναι οι πολυφασματικές εικόνες.

Αρκετές μελέτες χρησιμοποιούν τεχνικές ανάλυσης που βασίζονται στον προσδιορισμό διαχρονικών μεταβολών σχετικών με την παράνομη εδαφική διάθεση αποβλήτων. Οι μεταβολές αυτές αφορούν κυρίως θερμικές ανωμαλίες ή την καταπόνηση της βλάστησης. Για τη θερμική ανίχνευση χρησιμοποιούνται αισθητήρες του μεσαίου και μεγάλου μήκους υπέρυθρου τμήματος του φάσματος (στο εύρος 3000-5000 και 8000-14000 nm αντίστοιχα) (Glanville et al 2015, Slonecker et al 2010, Lega et al 2014, Beaumont et al 2014, Faisal et al 2012). Τα πλέον χρησιμοποιούμενα τηλεπισκοπικά δεδομένα για την αποτύπωση των διαχρονικών διαφορών της θερμοκρασίας εδάφους είναι αυτά του προγράμματος Landsat, τα οποία όμως έχουν μέτρια χωρική διακριτική ικανότητα (100 m). Όσον αφορά την καταπόνηση της βλάστησης, υφίστανται μελέτη που αναπτύσσει μια μέθοδο εντοπισμού χώρων παράνομης διάθεσης μέσω της φασματικής υπογραφής της καταπονημένης βλάστησης η οποία σχετίζεται με την παρουσία αστικών στερεών αποβλήτων στο έδαφος (Silvestri et al 2008). Άλλο χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό παράνομων χώρων είναι η διαχρονική μεταβολή της δασικής κάλυψης, λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα σημαντικός αριθμός των χώρων αυτών δύναται να εντοπιστεί σε δασικές εκτάσεις (Ishihara et al 2002).

Η σχετικά σταθερή φασματική υπογραφή των παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων είναι το βασικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται από τις περισσότερες τεχνικές ανάλυσης για τον εντοπισμό παράνομων χώρων διάθεσης βάσει της υφιστάμενης βιβλιογραφίας (Glanville et al 2015, Slonecker et al 2010, Chinatsu 2009, Νεκτάριος 2013, Μαλλιαρός 2001). Τα αποτελέσματα εντοπισμού είναι αρκετά ικανοποιητικά σε περιοχές με σχετικά ομοιογενή εδαφική κάλυψη. Γενικά η ετερογένεια της εδαφικής κάλυψης δυσχεραίνει την ακρίβεια εντοπισμού, ιδιαίτερα όταν υπάρχει παρουσία γυμνών εδαφών.

Η χρήση τεχνικών ανάλυσης του ΣΓΠ έχουν ενσωματωθεί σε μεθόδους παρακολούθησης και εντοπισμού παράνομων χώρων διάθεσης αποβλήτων για τη βελτίωση της ακρίβειας και αποδοτικότητας των αποτελεσμάτων εφαρμογής των τεχνικών τηλεπισκοπικής ανάλυσης (Glanville et al 2015, Chi Farn Chen et al 2006). Το ΣΓΠ αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο



αξιοποίησης χωρικών δεδομένων για τον περιορισμό της χωρικής έκτασης της περιοχής που ερευνάται η πιθανή ύπαρξη χώρων ρυπασμένων με απόβλητα. Η αποτελεσματική χρησιμοποίηση χωρικών δεδομένων όπως για τον προσδιορισμό της οδικής προσβασιμότητας σε χώρους διάθεσης αποβλήτων και των εκτάσεων με αστική κάλυψη έχει αποδειχθεί χρήσιμη στην βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

## 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

### 3.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

#### 3.1.1 Πεδίο εφαρμογής

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η χρήση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης ως εργαλείο για την παρακολούθηση της ρύπανσης εδαφών με απόβλητα, αναγνωρίζοντας ότι η τεχνολογία αυτή είναι πολλά υποσχόμενη δεδομένων των δυνατοτήτων λήψης τηλεπισκοπικών εικόνων για μεγάλες περιοχές και της διαθεσιμότητας των δεδομένων αυτών σε σταθερή βάση.

Για τον καθορισμό του πεδίου εφαρμογής του αντικειμένου της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικά κριτήρια:

- (i) Η δυνατότητα χρήσης δωρεάν δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων με ικανοποιητική χωρική διακριτική ικανότητα
- (ii) Η διαθεσιμότητα επαρκών δεδομένων με γνωστούς χώρους διάθεσης αποβλήτων ή χώρους ρυπασμένων με απόβλητα για την εφαρμογή και αξιολόγηση της ικανότητας εντοπισμού

Η επιλογή των τηλεπισκοπικών δεδομένων βασίζεται κατά κύριο λόγο στις ανάγκες της έρευνας, στη φύση του υπό μελέτη προβλήματος, στην κλίμακα και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, αλλά και στη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Η χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας είναι ένας από τους πιο πλέον καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των τηλεπισκοπικών δεδομένων (Lu et al 2007). Η αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας βελτιώνει τις ερμηνευτικές δυνατότητες, ενώ από την άλλη μεριά όσο αυξάνεται η χωρική ανάλυση τόσο αυξάνεται και η ποικιλία των κατηγοριών κάλυψης γης και των αντικειμένων που δύνανται στη συνέχεια να προκαλέσουν προβλήματα κατά την ταξινόμηση.

Στην παρούσα μελέτη, μελετάται η χρησιμότητα των πολυφασματικών εικόνων της δορυφορικής αποστολής του Sentinel-2 του ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus για τον εντοπισμό περιοχών ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα. Τα δεδομένα αυτά επιλέχθηκαν διότι είναι ελεύθερα διαθέσιμα με την καλύτερη δυνατή χωρική διακριτική ικανότητα. Συγκεκριμένα αξιοποιήθηκαν τα τρία κανάλια του ορατού φάσματος (μπλε, πράσινο, κόκκινο) και το κανάλι του εγγύς υπέρυθρου (NIR), τα οποία έχουν χωρική διακριτική ικανότητα 10 m, καθώς και τα δύο κανάλια του μέσου υπέρυθρου (SWIR) με χωρική διακριτική ικανότητα 20 m. Επειδή η αποστολή Sentinel-2 ξεκίνησε το 2015, στα πλαίσια της παρούσας δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή τεχνικών τηλεπισκοπικής ανάλυσης που βασίζονται στην ανίχνευση διαχρονικών μεταβολών της κάλυψης γης σχετικών με την παράνομη εδαφική διάθεση των αστικών στερεών αποβλήτων. Να σημειωθεί ότι επικουρικά για την εφαρμογή ορισμένων φασματικών δεικτών αξιοποιήθηκε και το θερμικό κανάλι του δορυφόρου Landsat 8.

Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη χωρική διακριτική ικανότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων, και δεδομένου ότι για την εφαρμογή και αξιολόγηση της ικανότητας εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με απόβλητα απαιτείται να είναι διαθέσιμος ένας ικανός αριθμός γνωστών

εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα σχετικά μεγάλου μεγέθους, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται σε χώρους διάθεσης με αστικά στερεά απόβλητα, νόμιμων και μη. Επειδή τόσο οι χώροι υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) όσο και οι χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων (ΧΑΔΑ) είναι διάσπαρτοι ανά την Ελλάδα, η έκταση της περιοχής μελέτης αναγκαστικά θα έπρεπε να είναι η μεγαλύτερη δυνατή, ώστε να ληφθεί υπόψη ικανός αριθμός δειγμάτων. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν πέντε περιφέρειες, συμπεριλαμβανομένης της Περιφέρειας Πελοποννήσου, η οποία εμφανίζει τον μεγαλύτερο αριθμό χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων διότι, έως το 2017, δεν είχαν ολοκληρωθεί τα έργα υποδομής για τη νόμιμη εδαφική διάθεση των αποβλήτων.

### 3.1.2 Μεθοδολογική ανάλυση

Η ανάλυση πραγματοποιείται σε περιβάλλον GIS για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα μέσω:

1. Της επιβλεπόμενης ταξινόμησης εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα σε επίπεδο εικονοστοιχείου χρησιμοποιώντας τη φασματική υπογραφή επιφανειών με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα.
2. Της χωρικής ανάλυσης της περιοχής μελέτης για την οριοθέτηση ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα
3. Της εφαρμογής φασματικών δεικτών σε επίπεδο εικονοστοιχείου για τη μείωση της φασματικής σύγχυσης και τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης

#### Ταξινόμηση

Ο εντοπισμός των χώρων που είναι ρυπασμένα με αστικά απόβλητα πραγματοποιείται μέσω της ταξινόμησης της πολυφασματικής εικόνας του Sentinel-2 που απαρτίζει την περιοχή μελέτης. Η μέθοδος της ταξινόμησης είναι επιβλεπόμενη (supervised classification), η οποία βασίζεται στα φασματικά χαρακτηριστικά των επιλεγόμενων κατηγοριών κάλυψης γης. Επιλέχθηκαν δύο κατηγορίες κάλυψης γης, η κατηγορία επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα και η κατηγορία που περιλαμβάνει τα υπόλοιπα είδη εδαφοκάλυψης.

Για την επιλογή των δειγμάτων αναφοράς (περιοχών εκπαίδευσης) λαμβάνεται υπόψη η χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας, η διαθεσιμότητα σε δεδομένα αναφοράς, και η επάρκεια σε δεδομένα. Δεδομένης της χωρικής διακριτικής ικανότητας των τηλεπισκοπικών δεδομένων, τα δείγματα αναφοράς επιλέγονται να είναι οι χώροι υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων (ΧΥΤΑ), δεδομένου ότι είναι γνωστοί χώροι διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων και το μέγεθος των επιφανειών με αστικά απόβλητα καταλαμβάνει σχετικά μεγάλη έκταση.

Η δειγματοληψία των δεδομένων αναφοράς αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή ταξινόμηση. Όταν η κατηγορία της εδαφοκάλυψης φέρει ανομοιογενή στοιχεία υφίσταται δυσκολία κατά την επιλογή επαρκών δειγμάτων. Το πρόβλημα αυτό περιπλέκεται περισσότερο όταν τα διαθέσιμα τηλεπισκοπικά δεδομένα είναι χαμηλής ή μεσαίας χωρικής διακριτικής

ικανότητας, διότι αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης μεικτών εικονοστοιχείων. Για την ελαχιστοποίηση κατά το δυνατό μεικτών εικονοστοιχείων, η δειγματοληψία λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια που καταλαμβάνει αμιγώς αστικά απόβλητα και όχι στη συνολική έκταση των χώρων με αστικά απόβλητα, διότι ο εκάστοτε χώρος περιλαμβάνει μεταξύ άλλων εκτάσεις με χώμα, δρόμους, οχήματα και ίσως και κτίρια. Για τον προσδιορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων αναφοράς αξιοποιήθηκε η εφαρμογή “Semi-Automatic Classification Plugin” μέσα από το λογισμικό QGIS.

Η επιλογή της μεθόδου ταξινόμησης εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων ανάλογα με τη μελέτη περίπτωσης, οι βασικότεροι από τους οποίους είναι ο στόχος της ταξινόμησης, τα διαθέσιμα λογισμικά προγράμματα και τα διαθέσιμα δεδομένα. Κάθε μια μέθοδος ταξινόμησης έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το ζήτημα του ποια προσέγγιση ταξινόμησης είναι κατάλληλη για μια συγκεκριμένη μελέτη δεν είναι εύκολο να απαντηθεί. Διαφορετικά αποτελέσματα ταξινόμησης μπορούν να επιτευχθούν ανάλογα με τον ταξινομητή που επιλέγεται (Lu et al 2007). Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη έκταση της περιοχής μελέτης για να ληφθούν ικανά δείγματα αναφοράς (περιοχές εκπαίδευσης), και κατά συνέπεια του μεγάλου όγκου των τηλεπισκοπικών δεδομένων, το λογισμικό πρόγραμμα που ήταν διαθέσιμο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την πραγματοποίηση της ταξινόμησης ήταν το ArcGIS. Έπειτα από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας ως προς την χρήση μεθόδων ταξινόμησης, και δεδομένων των δυνατοτήτων του διαθέσιμου λογισμικού προγράμματος, εφαρμόστηκαν τρεις αλγόριθμοι ταξινόμησης: (α) του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, (β) της ευκλείδειας απόστασης και (γ) του χαρτογράφου της φασματικής γωνίας.

#### Ζώνη εντοπισμού

Για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, αλλά και για τη μείωση της έκτασης της περιοχής μελέτης που ερευνάται η πιθανότητα εντοπισμού χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων, θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν χωρικά δεδομένα για την οριοθέτηση της επικρατέστερης περιοχής που είναι πιθανή η ύπαρξη χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, η οποία στα πλαίσια της παρούσας αναφέρεται και ως «ζώνη εντοπισμού».

Στο πλαίσιο αυτό αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του ΣΓΠ και συγκεκριμένα του λογισμικού προγράμματος ArcGIS για τη χωρική ανάλυση της περιοχής μελέτης με στόχο τον καθορισμό της ζώνης εντοπισμού, θέτοντας ως βασικό κριτήριο την οδική προσβασιμότητα των χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά χωρικά δεδομένα για τον αποκλεισμό κατηγοριών κάλυψης γης που δεν είναι δυνατή η παρουσία χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, όπως οι οικισμοί, οι βιομηχανίες, εμπορικές περιοχές, το οδικό δίκτυο και άλλες τεχνητές υποδομές.

#### Φασματικοί δείκτες

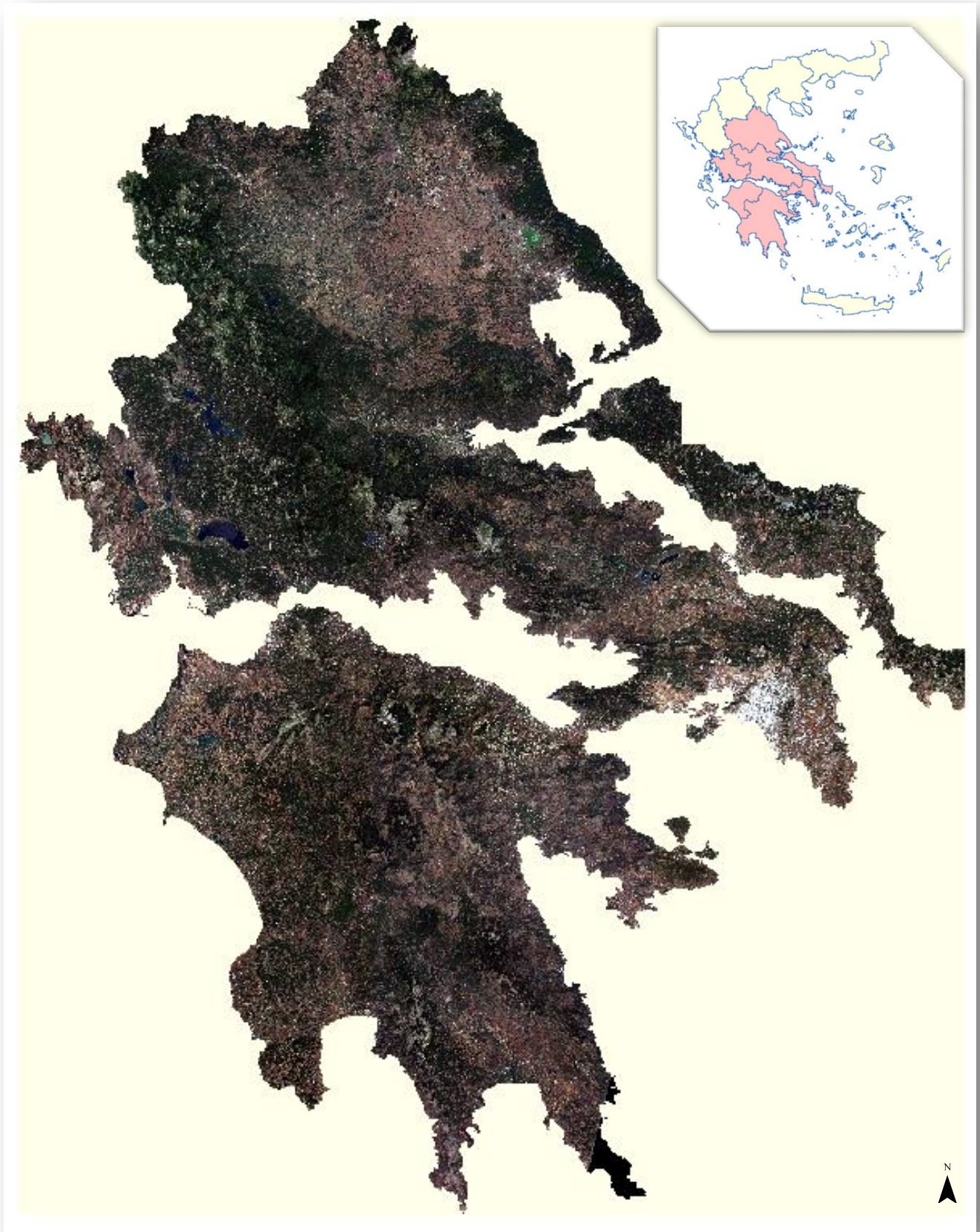
Ως τελικό στάδιο βελτίωσης των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης αποτέλεσε η μείωση κατά το δυνατό της φασματικής σύγχυσης μέσω της εφαρμογής φασματικών δεικτών. Η φασματική σύγχυση είναι η κύρια αιτία της ανακρίβειας μιας ταξινόμησης που βασίζεται στα φασματικά χαρακτηριστικά μιας εικόνας. Η έννοια της φασματικής σύγχυσης αναφέρεται στο γεγονός ότι αρκετές κατηγορίες κάλυψης γης έχουν παρόμοια φασματική απόκριση, η οποία εξαρτάται σε

μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της εικόνας του παθητικού συστήματος καταγραφής του δορυφόρου ή αλλιώς τις διακριτικές ικανότητες του αισθητήρα (χωρική, φασματική και ραδιομετρική διακριτική ικανότητα). Η φασματική σύγχυση τείνει να είναι πιο αισθητή όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μικτών εικονοστοιχείων και κατά συνέπεια όσο χαμηλότερη είναι η χωρική ανάλυση της εικόνας.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιείται η τηλεπισκόπηση με παθητικά συστήματα καταγραφής του ορατού και υπέρυθρου φάσματος του δορυφόρου Sentinel-2. Σε μια τέτοια πολυφασματική εικόνα, η φασματική σύγχυση είναι αναπόφευκτη, ανεξάρτητα από την επιλεγόμενη μέθοδο ταξινόμησης. Στο πλαίσιο αυτό, μετά την ταξινόμηση της εικόνας της περιοχής μελέτης, για τη βελτίωση της διάκρισης επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες κάλυψης γης, εξετάστηκε μια σειρά φασματικών δεικτών. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν ποσοτικά ένα βιοφυσικό φαινόμενο και έχουν επιπλέον στόχο να αυξηθεί η διαχωριστικότητα των κατηγοριών κάλυψης γης που έχουν οριστεί και επομένως να βελτιωθεί το αποτέλεσμα της ταξινόμησης της εικόνας. Δείκτες μπορούν να κατασκευαστούν πολλοί, ανάλογα με το ποιο φαινόμενο επιδιώκεται να αναδειχθεί και εξαχθεί, αλλά και από τη διαθέσιμη φασματική πληροφορία της εικόνας. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν δείκτες για την ανάδειξη μη επιθυμητών τύπων κάλυψης γης, όπως το γυμνό έδαφος και οι αστικές περιοχές, που διευκόλυνε στη συνέχεια τη δυνατότητα απομόνωσης και απομάκρυνσής τους με την εφαρμογή κατωφλίων.

### 3.2 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε με γνώμονα την εξυπηρέτηση της δειγματοληψίας εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα από γνωστούς χώρους υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων (ΧΥΤΑ), αλλά και την ανάγκη ύπαρξης χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, όπως οι χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης που είναι γνωστοί με την ονομασία ΧΑΔΑ. Επιπλέον κρίθηκε ως προτιμητέα επιλογή για την τηλεπισκοπική ανάλυση η περιοχή να είναι ενιαία και να ταυτίζεται με διοικητικά όρια της τοπικής αυτοδιοίκησης. Στο πλαίσιο αυτό, επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης το ηπειρωτικό τμήμα πέντε περιφερειών της χώρας (δεύτερος βαθμός τοπικής αυτοδιοίκησης) και ειδικότερα οι Περιφέρειες Αττικής, Στερεάς Ελλάδας, Πελοποννήσου, Δυτικής Ελλάδας και Θεσσαλίας. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης σε έγχρωμο σύνθετο RGB432.



Εικόνα 1: Έγχρωμο σύνθετο RGB432 περιοχής μελέτης

### 3.3 Τηλεπισκοπικά δεδομένα

Τόσο τα δεδομένα εισόδου, όσο και τα αποτελέσματα της εργασίας, είναι αναφερόμενα στο προβολικό σύστημα UTM zone 34 του συστήματος αναφοράς WGS 84, που είναι και το προβολικό σύστημα αναφοράς των εικόνων του Sentinel 2. Για τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα σε άλλο προβολικό σύστημα, όπως τα δεδομένα που λήφθηκαν από την ανοιχτή πηγή γεωχωρικών δεδομένων <http://geodata.gov.gr>, έγιναν οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί.

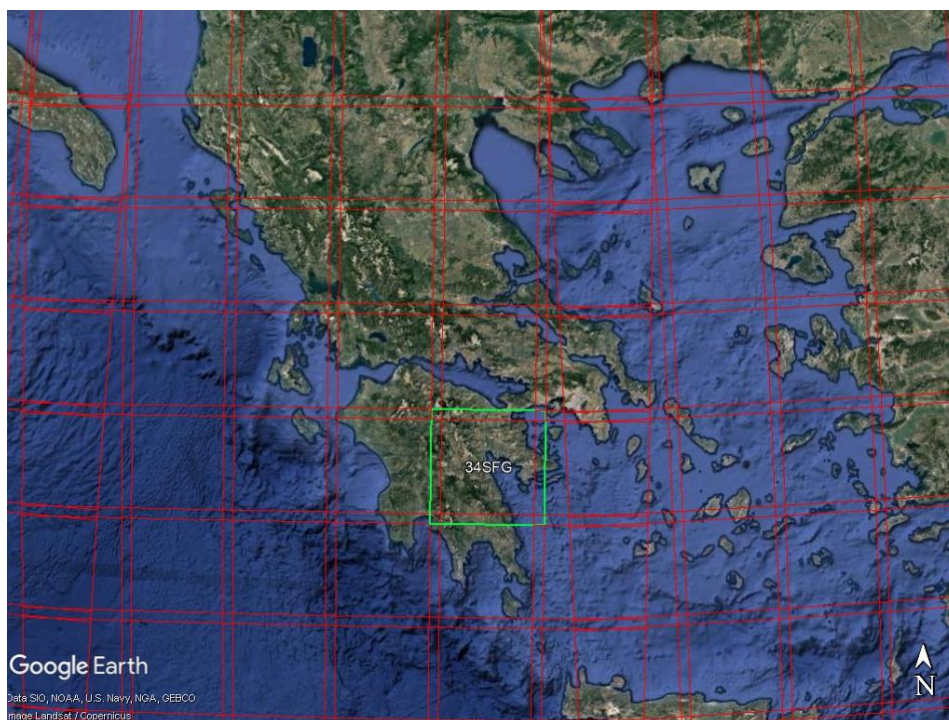
#### 3.3.1 Δεδομένα Sentinel-2

Οι πολυφασματικές εικόνες της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2 αποκτήθηκαν μέσω του Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>), οι οποίες είναι σε επίπεδο επεξεργασίας Level-1C (τύπος προϊόντος S2MI1C). Για την κάλυψη της περιοχής μελέτης απαιτήθηκαν 14 εικόνες, επιλέγοντας ως περίοδο λήψης το καλοκαίρι 2017 με μηδενική κατά το δυνατό νεφοκάλυψη, ώστε να μη περιορίζεται η αναγνώριση των χαρακτηριστικών του εδάφους, αλλά και να συμπίπτουν κατά το δυνατό ημερομηνιακά μεταξύ τους. Οι τελευταίες 4 εικόνες του πίνακα 8 αξιοποιήθηκαν κυρίως για την κάλυψη των διοικητικών ορίων των περιφερειών.

Πίνακας 8: Δεδομένα Sentinel-2

α/α	Δορυφόρος	Κωδικός περιοχής λήψης	Ημερομηνία καταγραφής SCENE_CENTER_TIME (generation time)	Νεφοκάλυψη (cloud coverage assessment)
1	S2A	34SEF	28-06-2017, 09:28:15	0.0
2	S2A	34SEG	28-06-2017, 09:28:15	0.0
3	S2A	34SEH	28-06-2017, 09:28:15	0.0
4	S2A	34SEJ	28-06-2017, 09:28:15	0.0
5	S2B	34SFF	23-07-2017, 09:28:53	0.0
6	S2B	34SFG	23-07-2017, 09:28:53	0.0
7	S2A	34SFH	28-06-2017, 09:28:15	0.0
8	S2A	34SFJ	28-06-2017, 09:28:15	0.0
9	S2B	34SGG	30-06-2017, 09:18:01	0.0
10	S2B	34SGH	30-06-2017, 09:18:01	0.0
11	S2A	34SDH	28-06-2017, 09:28:15	0.0
12	S2A	34SDJ	01-07-2017, 09:35:24	0.0
13	S2B	34TEK	02-08-2017, 09:28:56	0.0
14	S2A	34TFK	28-06-2017, 09:28:15	0.0142

Πηγή: Αρχείο metadata εικόνων



Εικόνα 2: Επιλογή εικόνων Sentinel-2

### 3.3.2 Δεδομένα Landsat 8

Η λήψη των δορυφορικών εικόνων Landsat 8 πραγματοποιείται μέσω της ιστοσελίδας του οργανισμού Γεωλογικής Έρευνας των ΗΠΑ (United States Geological Survey - USGS) με την χρήση της πλατφόρμας Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>), οι οποίες είναι σε επίπεδο επεξεργασίας Level-1TP. Για την κάλυψη της περιοχής μελέτης απαιτήθηκαν 7 εικόνες, χρησιμοποιώντας τα ίδια κριτήρια επιλογής με αυτά για τις εικόνες Sentinel-2, δηλαδή περίοδο λήψης τα μέσα του καλοκαιριού 2017 με όσο το δυνατό μικρό ποσοστό νεφοκάλυψης και μικρή απόκλιση ως προς την ημερομηνία λήψης.

Πίνακας 9: Δεδομένα Landsat-8

α/α	Κωδικός περιοχής λήψης	Ημερομηνία καταγραφής SCENE_CENTER_TIME (data acquired)	Νεφοκάλυψη (cloud cover)	Ποιότητα εικόνας (image quality)
1	182034	07-07-2017, 08:58:44	0.08	9
2	183033	28-06-2017, 09:04:30	1.69	9
3	183035	28-06-2017, 09:05:17	2.28	9
4	184032	21-07-2017, 09:10:23	4.30	9
5	184033	21-07-2017, 09:10:47	4.69	9
6	184034	21-07-2017, 09:11:11	0.07	9
7	185033	26-6- 2017, 09:16:51	1.54	9

Πηγή: USGS, αρχείο metadata εικόνων



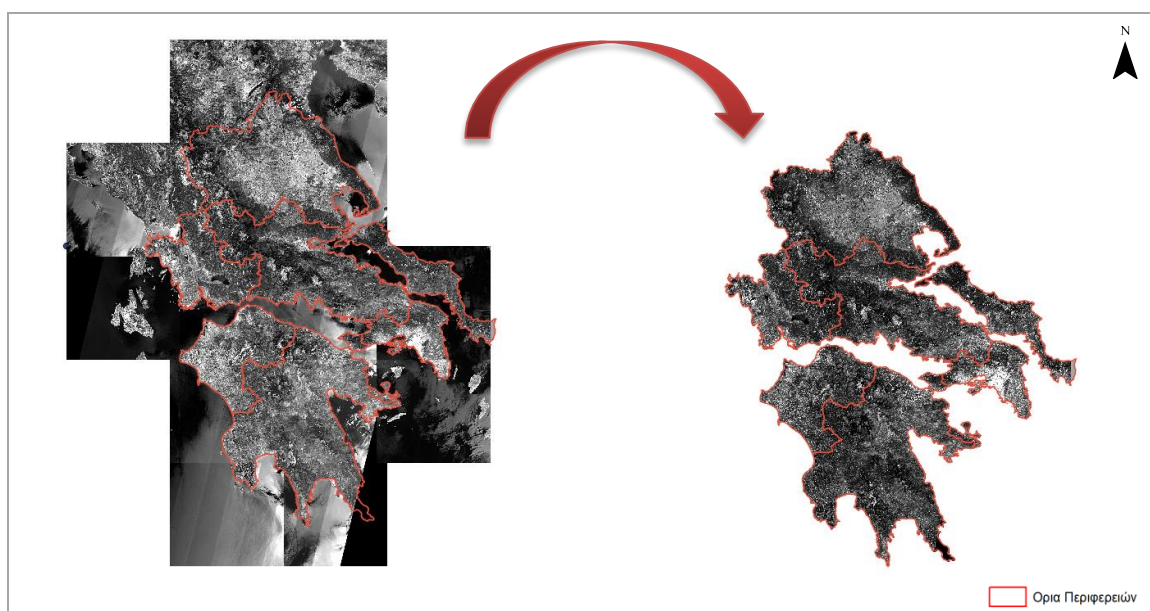
### 3.3.3 Προεπεξεργασία δεδομένων

#### A. Sentinel-2

Για την προεπεξεργασία των δεδομένων και τη μετατροπή τους σε τιμές ανακλαστικότητας εδάφους (surface reflectance) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SeNtinel Application Platform (SNAP) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency–ESA), και συγκεκριμένα το ειδικό εργαλείο Sen2Cor.

Επιπλέον για τα κανάλια 11 και 12 που έχουν χωρική διακριτική ικανότητα 20 m, πραγματοποιήθηκε επαναδειγματοληψία στα 10 m με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor). Να σημειωθεί ότι σε ότι αφορά την επαναδειγματοληψία, υπάρχουν τρεις μέθοδοι: του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor), της διγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation) και της κυβικής συνέλιξης (cubic convolution). Σε συνεχή φαινόμενα εφαρμόζεται η διγραμμική παρεμβολή ή η κυβική συνέλιξη, ενώ σε διακριτά φαινόμενα προτιμάται η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα. Δεδομένου ότι οι εκτάσεις με αστικά στερεά απόβλητα αποτελεί ένα διακριτό φαινόμενο κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστεί η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα.

Ως στάδιο της προεπεξεργασίας ήταν η συνένωση 14 δορυφορικών εικόνων για κάθε κανάλι ξεχωριστά, διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ArcGIS με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ενιαίου αρχείου (μωσαϊκού) για κάθε κανάλι. Στη συνέχεια ακολούθησε η περικοπή τους στα όρια της περιοχής μελέτης (βλέπε Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Μωσαϊκό περιοχής μελέτης - εικόνες Sentinel-2

Ως αρχείο αναφοράς για την περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε το αρχείο των Περιφερειών της χώρας από την ανοιχτή πηγή γεωχωρικών δεδομένων <http://geodata.gov.gr>, στο οποίο προηγουμένως έγινε κατάλληλη επεξεργασία (πχ select, clip, erase) για την απομόνωση του ηπειρωτικού τμήματος των πέντε Περιφερειών και την ένωσή τους. Σε ότι αφορά την επικάλυψη επιλέχθηκαν με σειρά προτεραιότητας οι εικόνες που συμπίπτουν ημερολογιακά (28/6, 30/6, 1/7) αλλά και που αποτελούν το μεγαλύτερο τμήμα των επικαλυπτόμενων περιοχών.

## B. Landsat-8

Σε ότι αφορά τα δεδομένα του Landsat-8 αξιοποιήθηκε αποκλειστικά το θερμικό κανάλι 10. Να σημειωθεί ότι το θερμικό κανάλι 11 δεν αξιοποιήθηκε διότι υφίσταται αβεβαιότητα στις τιμές που παρέχει κατόπιν σχετικής υπόδειξης του οργανισμού USGS να αποφεύγεται η χρήση του σε ποσοτικές εκτιμήσεις.

Ως κύριο στάδιο της προεπεξεργασίας ήταν η μετατροπή των ψηφιακών τιμών (DN) των εικονοστοιχείων του καναλιού 10 σε φυσικές τιμές και ειδικότερα σε τιμές φασματικής ακτινοβολίας (Top of Atmosphere Spectral Radiance) και σε τιμές φωτεινότητας θερμοκρασίας (Top of Atmosphere Brightness Temperature) με βάση συγκεκριμένη μεθοδολογία που είναι διαθέσιμη από τον οργανισμό USGS\*.

Αρχικά, οι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων μετατράπηκαν σε τιμές φασματικής ακτινοβολίας (Top of Atmosphere Spectral Radiance) με βάση την εξίσωση [1]:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad [1]$$

όπου,

$L_{\lambda}$  : η τιμή φασματικής ακτινοβολίας (ToA spectral radiance) του εικονοστοιχείου σε Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)

$M_L, A_L$  : οι συντελεστές βαθμονόμησης του καναλιού που λαμβάνονται από το αρχείο μεταδεδομένων

$Q_{cal}$  : η ψηφιακή τιμή του εικονοστοιχείου σε DN

Στη συνέχεια, οι τιμές ακτινοβολίας των εικονοστοιχείων ανάγονται σε τιμές φωτεινότητας θερμοκρασία (Top of Atmosphere Brightness Temperature) χρησιμοποιώντας τις θερμικές σταθερές βαθμονόμησης που παρέχονται από το αρχείο μεταδεδομένων, εκτελώντας την εξίσωση [2]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad [2]$$

όπου,

T : η τιμή φωτεινότητας θερμοκρασίας (ToA Brightness Temperature) του εικονοστοιχείου σε Kelvin (K)

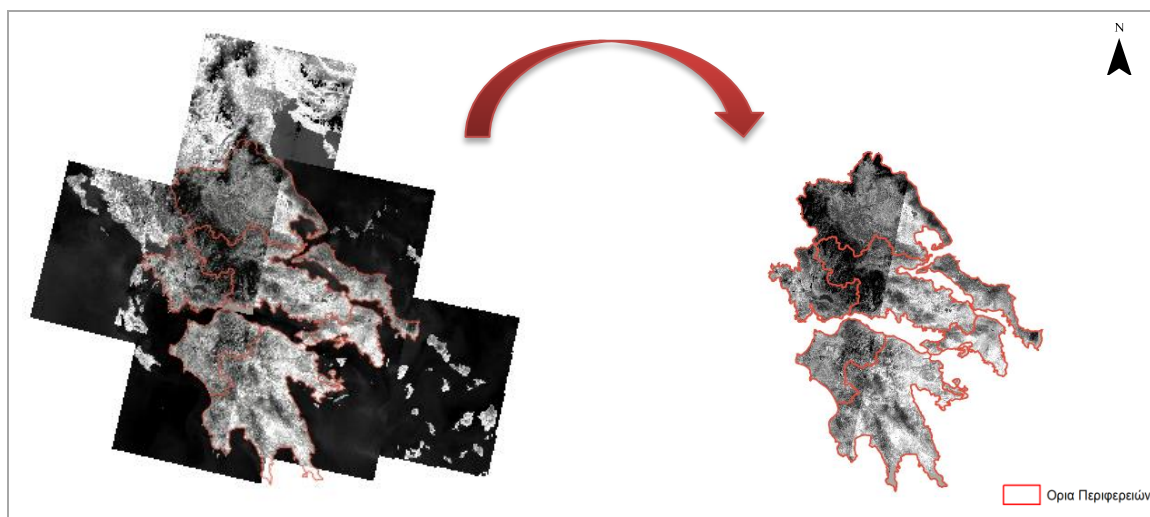
$L_{\lambda}$  : η τιμή φασματικής ακτινοβολίας (ToA spectral radiance) του εικονοστοιχείου σε Watts/( m<sup>2</sup> \* srad \* μm)

$K_1, K_2$  : Θερμικές σταθερές καναλιού από το αρχείο μεταδεδομένων

\* USGS. Using the USGS Landsat 8 Product. Available online: [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)

Δεδομένου ότι η χωρική διακριτική ικανότητα του θερμικού καναλιού λαμβάνεται στα 30 m, πραγματοποιήθηκε επαναδειγματοληψία στα 10 m επιλέγοντας τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor) για τον ίδιο λόγο που αναφέρεται και για την επαναδειγματοληψία των καναλιών 11 και 12 του Sentinel-2.

Επιπλέον, όπως και για τις εικόνες του Sentinel-2, πραγματοποιήθηκε συνένωση των 7 δορυφορικών εικόνων για το θερμικό κανάλι 10 και στη συνέχεια περικοπή στα όρια της περιοχής μελέτης, διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ArcGIS (βλέπε Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Μωσαϊκό περιοχής μελέτης – εικόνες Landsat 8

#### Γ. Τελικό προϊόν προεπεξεργασίας

Για κάθε κανάλι, το προϊόν μετά την προεπεξεργασία είναι δεδομένα σε κανονικοποιημένη δομή γεωαναφερμένα στο προβολικό σύστημα UTM/WGS84 με χωρική ανάλυση 10 m που καλύπτουν συνολική έκταση 58921 km<sup>2</sup>. Τα χαρακτηριστικά της εικόνας κάθε καναλιού είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά προϊόντος προεπεξεργασίας για κάθε κανάλι

Raster information	
Column & Rows	33371, 42258
Cell size (X,Y)	10,10
Format	TIFF
Pixel type	floating point
Extent:	
Top	4450300
Left	476050
Right	809760
Bottom	4027720
Spatial Reference	
WGS 1984_UTM_zone34N	
Data	
Pixels	589211285
Area (km <sup>2</sup> )	58921

## 3.4 Καθορισμός φασματικής υπογραφής επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα

### 3.4.1 Δεδομένα χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα

Όπως έχει αναφερθεί και στη μεθοδολογική ανάλυση, η επιλογή ενός επαρκούς και αντιπροσωπευτικού αριθμού δειγμάτων εκπαίδευσης είναι καθοριστικός παράγοντας για την ορθή ταξινόμηση. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα γνωστών νόμιμων χώρων διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων (ΧΥΤΑ), καθώς και χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης (ΧΑΔΑ) τα οποία λήφθηκαν από τις κάτωθι πηγές πληροφόρησης:

- Περιφερειακά σχέδια διαχείρισης αποβλήτων (έτος 2016)  
<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=938&language=el-GR>
- Εθνικό σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων (έτος 2015)  
<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=238&language=el-GR>
- Μελέτη αναθεώρησης εθνικού σχεδίου διαχείρισης αποβλήτων (έτος 2014)
- Έγγραφο Ευρωπαϊκής Επιτροπής (ΕΕ) 2017 για τους ΧΑΔΑ που δεν συμμορφώνονται με την απόφαση στη λήξη του τέταρτου εξαμήνου (3/6/2016-2/12/2016), Ref. Ares(2017)2301295
- ΥΠΕΚΑ - Χωρικά δεδομένα ΧΑΔΑ (2012),  
(<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=WbSHRYDeNOs%3D&tabid=238&language=el-GR>)
- LIFE RECLAIM - Landfill mining pilot application for recovery of invaluable metals, materials, land and energy (έτος 2015) (<http://reclaim-gis.gr/index.php?lang=EN>)

Οι νόμιμοι χώροι διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν δείγματα εκπαίδευσης για τον καθορισμό της φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα. Τα δείγματα εκπαίδευσης αποτέλεσαν και δείγματα ελέγχου για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα των χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αξιοποιήθηκαν για την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων ως προς τη δυνατότητα εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα.

Με έτος αναφοράς το τέλος του 2016, οι υφιστάμενοι χώροι υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) στην περιοχή μελέτης αριθμούν τους 20, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 11 και την εικόνα 5.

Πίνακας 11: Υφιστάμενοι ΧΥΤΑ στην περιοχή μελέτης

α/α	Περιφέρεια	Περιφερειακή Ενότητα	Επωνυμία	Θέση (συντετ. ΕΓΣΑ' 87)	
				X	Y
1	Αττικής	Δυτικής Αττικής	ΧΥΤΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	469695	4213261
2	Δυτικής Ελλάδας	Αιτωλ/νίας	ΧΥΤΑ ΣΤΡΑΤΟΥ	264223	4289592
3		Αιτωλ/νίας	ΧΥΤΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ	281818	4252528
4		Αιτωλ/νίας	ΧΥΤΑ ΝΑΥΠΑΚΤΟΥ	299342	4256500

α/α	Περιφέρεια	Περιφερειακή Ενότητα	Επωνυμία	Θέση (συντετ. ΕΓΣΑ' 87)	
				Χ	Υ
5	Δυτικής Ελλάδας	Αιτωλ/νίας	ΧΥΤΑ ΠΑΛΛΑΙΡΟΥ	230287	4302118
6		Αχαΐας	ΧΥΤΑ ΠΑΤΡΑΣ	306309	4234680
7		Αχαΐας	ΧΥΤΑ ΔΥΤ. ΑΧΑΪΑΣ	292818	4210381
8		Αχαΐας	ΧΥΤΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΑΙΓΙΑΛΕΙΑΣ (ΑΙΓΕΙΡΑΣ)	353718	4220797
9		Ηλείας	ΧΥΤΑ ΗΛΕΙΑΣ (ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ)	271057	4181924
10	Θεσσαλίας	Λάρισας	ΧΥΤΑ ΛΑΡΙΣΑΣ	364796	4406526
11		Μαγνησίας	ΧΥΤΑ ΒΟΛΟΥ	402038	4360270
12		Μαγνησίας	ΧΥΤΑ ΝΟΤΙΟΥ ΠΗΛΙΟΥ	433941	4345449
13		Τρικάλων-Καρδίτσας	ΧΥΤΑ ΔΥΤ. ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ	318105	4387639
14	Πελοποννήσου	Κορινθίας	ΧΥΤΑ ΞΥΛΟΚΑΣΤΡΟΥ	363330	4197600
15	Στερεάς Ελλάδας	Βοιωτίας	ΧΥΤΑ ΛΕΙΒΑΔΙΑΣ	394667	4256700
16		Βοιωτίας	ΧΥΤΑ ΘΗΒΑΣ	445971	4242795
17		Ευβοίας	ΧΥΤΑ ΙΣΤΙΑΙΑΣ	429120	4312475
18		Ευβοίας	ΧΥΤΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΒΟΙΑΣ (ΧΑΛΚΙΔΑΣ)	468505	4259233
19		Φθιώτιδας	ΧΥΤΑ ΛΑΜΙΑΣ	367954	4308529
20		Φθιώτιδας	ΧΥΤΑ ΔΟΜΟΚΟΥ	354790	4333967

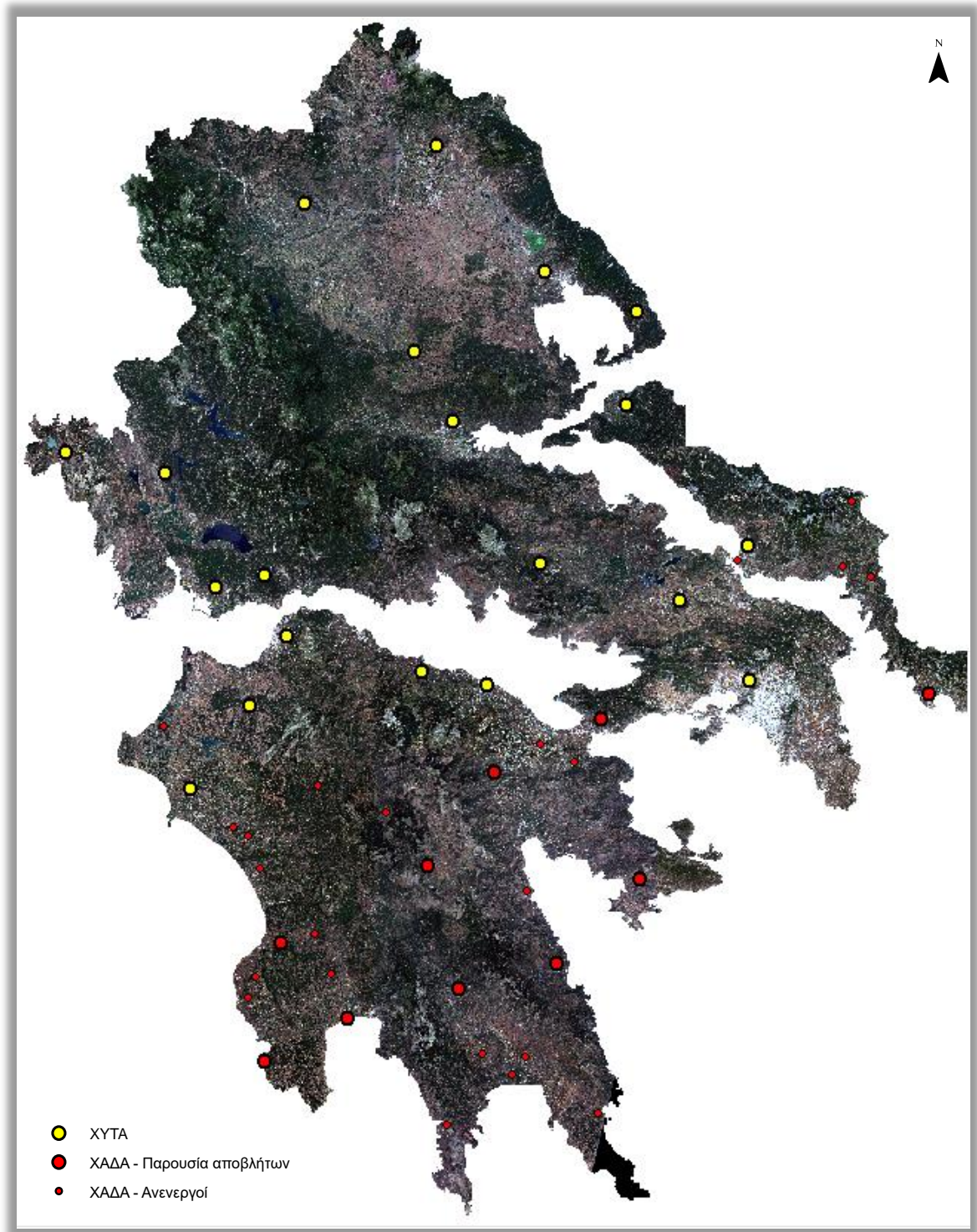
Πηγή: ΠΕΣΔΑ 2016, ΕΣΔΑ 2015, ΥΠΕΚΑ 2014

Σε ότι αφορά τους χώρους ανεξέλεγκτης διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων, οι περισσότεροι βρίσκονται στην Περιφέρεια Πελοποννήσου διότι έως το 2017 λειτουργούσαν ελάχιστα έργα υποδομής για τη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων. Σύμφωνα με τα τελευταία επίσημα στοιχεία, που έχουν ημερομηνία αναφοράς το Δεκέμβριο του 2016, ήταν καταγεγραμμένοι τέσσερις ενεργοί ΧΑΔΑ στην Περιφέρεια Πελοποννήσου και ένας στην Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. Σχεδόν για το σύνολο των υπόλοιπων καταγεγραμμένων ΧΑΔΑ που δεν συμμορφώνονται με την απόφαση του ΔΕΕ (υπόθεση C-378/13), υπάρχει απόφαση παύσης λειτουργίας καθώς και άδεια αποκατάστασης, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η αποκατάσταση βρίσκεται ήδη σε στάδιο ολοκλήρωσης. Στον πίνακα 12 δίνεται για την περιοχή μελέτης συγκεντρωτικός κατάλογος των ΧΑΔΑ που δεν συμμορφώνονται με την απόφαση του ΔΕΕ.

**Πίνακας 12: Αριθμός ΧΑΔΑ στην περιοχή μελέτης (ημερομηνία 2/12/2016)**

α/α	Περιφέρεια	Ενεργοί	Ανενεργοί (μη αποκατεστημένοι)
1	Αττικής	-	6
2	Δυτικής Ελλάδας	-	6
3	Θεσσαλίας	-	-
4	Πελοποννήσου	4	31
5	Στερεάς Ελλάδας	1	5
<b>Σύνολο</b>		<b>5</b>	<b>47</b>

Πηγή: ΕΕ 2017



**Εικόνα 5: Χώροι διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων στην περιοχή μελέτης**

(Πηγή: ΠΕΣΔΑ, ΥΠΕΚΑ- Χωρικά δεδομένα ΧΑΔΑ 2012, ΕΕ 2017, LIFE RECLAIM 2015, ιδία επεξεργασία με Google Earth- καλοκαίρι 2017)

Να σημειωθεί ότι τα παραπάνω στοιχεία μεταβάλλονται διαρκώς, γιατί καταβάλλεται συντονισμένη προσπάθεια για την άμεση παύση τους από τους αρμόδιους φορείς. Για παράδειγμα, στο ηπειρωτικό τμήμα της Περιφέρειας Αττικής έχει αποκατασταθεί το σύνολο των ανενεργών ΧΑΔΑ, ενώ στην Περιφέρεια Πελοποννήσου έχει ολοκληρωθεί η αποκατάσταση αρκετών ΧΑΔΑ και έχουν παραμείνει τρεις από τους τέσσερις ΧΑΔΑ. Με βάση τη διαθέσιμη γεωχωρική πληροφορία (ΥΠΕΚΑ χωρικά δεδομένα ΧΑΔΑ 2012, LIFE RECLAIM 2015, Google Earth), για τους σκοπούς της παρούσας, εντοπίστηκαν 31 ΧΑΔΑ, οι οποίοι παρατίθενται στον πίνακα 13 και απεικονίζονται στην εικόνα 5. Με βάση τη φωτοερμηνεία που έλαβε χώρα στο Google Earth, από αυτούς 4 ΧΑΔΑ είναι ενεργοί (Λιμενικά, Κυπαρισσίας, Σκουρτζιά-Ασπρόχωμα και Καρύστου), 6 είναι μη αποκατεστημένοι και 21 φαίνεται να είναι αποκατεστημένοι ή υπό καθεστώς ολοκλήρωσης της αποκατάστασής τους (βλέπε πίνακα 13 και εικόνα 5).

**Πίνακας 13: Εντοπισμένοι ΧΑΔΑ στην περιοχή μελέτης**

Περιφερειακή ενότητα	ΟΤΑ	Δημοτική ενότητα	Τοπωνύμιο	Παρουσία αποβλήτων
<b>Δυτική Ελλάδα</b>				
Ηλείας	Ανδρίτσαινας-Κρεστένων	Σκιλλούντος	Βαρκαριές	-
	Ανδραβίδας - Κυλλήνης	Λεχαιών	Δροσελή	-
	Ζαχάρως	Ζαχάρως	Αγ. Παρασκευή	-
	Πύργου	Βώλακος	Λίμνες	-
<b>Πελοποννήσου</b>				
Αργολίδος	Ερμιονίδας	Κρανιδίου	Σταυρός	✓
Αρκαδίας	Νότιας Κυνουρίας	Λεωνιδίου (Τυρός)	Βασκίνα	✓
	Τρίπολης	Τρίπολης	Πλάτωμα	✓
	Γορτυνίας	Βυτίνας	Βεδούχια	-
	Βόρειας Κυνουρίας	Βόρειας Κυνουρίας (Αστρος)	Τανός-Καϊάφας	-
Κορινθίας	Λουτρακίου-Αγ. Θεοδώρων	Λουτρακίου-Περαχώρας	Σκουρτζιά- Ασπρόχωμα	✓
	Νεμέας	Νεμέας	Λεκάνια	✓
	Βέλου-Βόχα	Βόχας	Μεσιανή Λάκκα	-
	Κορινθίων	Κορινθίων	Σαρωνικού	-
Λακωνίας	Σπάρτης	Σπάρτης	Προβατομάνα (Αφισσού)	✓
	Ανατολικής Μάνης	Οιτύλου	Προφ. Ηλίας	-
	Ευρώτα	Σκάλας	Αμπουλας	-
	Ευρώτα	Ελους	Σωτηραίικα	-
	Ευρώτα	Κροκεών	Λουμπάρδα	-

Περιφερειακή ενότητα	ΟΤΑ	Δημοτική ενότητα	Τοπωνύμιο	Παρουσία αποβλήτων
Μεσσηνίας	Μεσσήνης	Μεσσήνης	Λιμενικά	✓
	Μεσσήνης	Αριστομένουσ	Πίσω Βρύση	-
	Μεσσήνης	Ιθώμης	Καβάλα	-
	Οιχαλίας	Δωρίου	Πρ. Ηλίας	-
	Οιχαλίας	Ανδανίας	Αραποσύκια	-
	Τριφυλλίας	Κυπαρισσίας	Αλιμάκι-Λυκόχωρος	✓
	Τριφυλλίας	Γαργαλιάνων	Μπασίκου	-
	Τριφυλλίας	Φιλιατρών	Μαύρη Λίμνη	-
	Πύλου-Νέστορος	Νέστορος (Π.Νερό)	Γέφυρα Μανούσου	✓
<b>Στερεάς Ελλάδας</b>				
Ευβοίας	Καρύστου	Καρύστου	Κούτικας	✓
	Κύμης-Αλιβερίου	Διστίων	Λακαπετρέσα	-
	Κύμης-Αλιβερίου	Ταμινέων	Κόκκινο Χωράφι	-
	Κύμης-Αλιβερίου	Κύμης	Κοτρωνάκια	-

Πηγή: ΕΕ 2017, ΥΠΕΚΑ Χωρικά δεδομένα ΧΑΔΑ 2012, LIFE RECLAIM 2015, ίδια επεξεργασία με Google Earth -καλοκαίρι 2017

### 3.4.2 Δείγματα αναφοράς







Τα δείγματα αναφοράς (περιοχές εκπαίδευσης) δύνανται να συλλεχθούν από δεδομένα πεδίου, αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες κατά το δυνατόν υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αξιοποιήθηκε το Google Earth, που διαθέτει εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης, για τη φωτοερμηνεία εκτάσεων με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα στους νόμιμους χώρους διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων, ή αλλιώς ΧΥΤΑ, και τη δειγματοληψία των περιοχών εκπαίδευσης.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από το Google Earth της πιο κοντινής ημερομηνίας λήψης σε σχέση με την περίοδο λήψης των δορυφορικών εικόνων του Sentinel-2 που ήταν το καλοκαίρι 2017 (28/6-2/8 2017). Από τους διαθέσιμους 20, επιλέχθηκαν οι 10 ΧΥΤΑ, για τους οποίους οι εικόνες Google Earth ήταν ημερομηνιακά κοντά ή έστω είχαν ημερομηνία λήψης εντός του 2017, οι οποίοι και αποτέλεσαν τα δείγματα αναφοράς. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται τα δείγματα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών εκτάσεων με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα.

Πριν την χρησιμοποίηση των δειγμάτων αναφοράς, για τους σκοπούς της εργασίας πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός τους στο προβολικό σύστημα UTM zone 34 του συστήματος αναφοράς WGS 84, που είναι και το προβολικό σύστημα αναφοράς των εικόνων του Sentinel-2.



Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται τα δείγματα αναφοράς, η δειγματοληψία των οποίων είναι σημειωμένη με κόκκινο χρώμα.

 <p><b>ΧΥΤΑ Πάτρας, 30/7/2017</b></p>	 <p><b>ΧΥΤΑ Δ. Αχαΐας, 12/8/2017</b></p>
 <p><b>ΧΥΤΑ Τριανταφυλλιάς, 11/9/2017</b></p>	 <p><b>ΧΥΤΑ Αιγείρας, 1/8/2017</b></p>
 <p><b>ΧΥΤΑ Θήβας, 23/4/2017</b></p>	 <p><b>ΧΥΤΑ Χαλκίδας, 29/6/2017</b></p>
 <p><b>ΧΥΤΑ Ιστιαίας, 25/3/2017</b></p>	 <p><b>ΧΥΤΑ Βόλου, 27/4/2017</b></p>
 <p><b>ΧΥΤΑ Ναυπάκτου, 30/7/2017</b></p>	 <p><b>ΧΥΤΑ Δ. Αττικής, 29/6/2017</b></p>

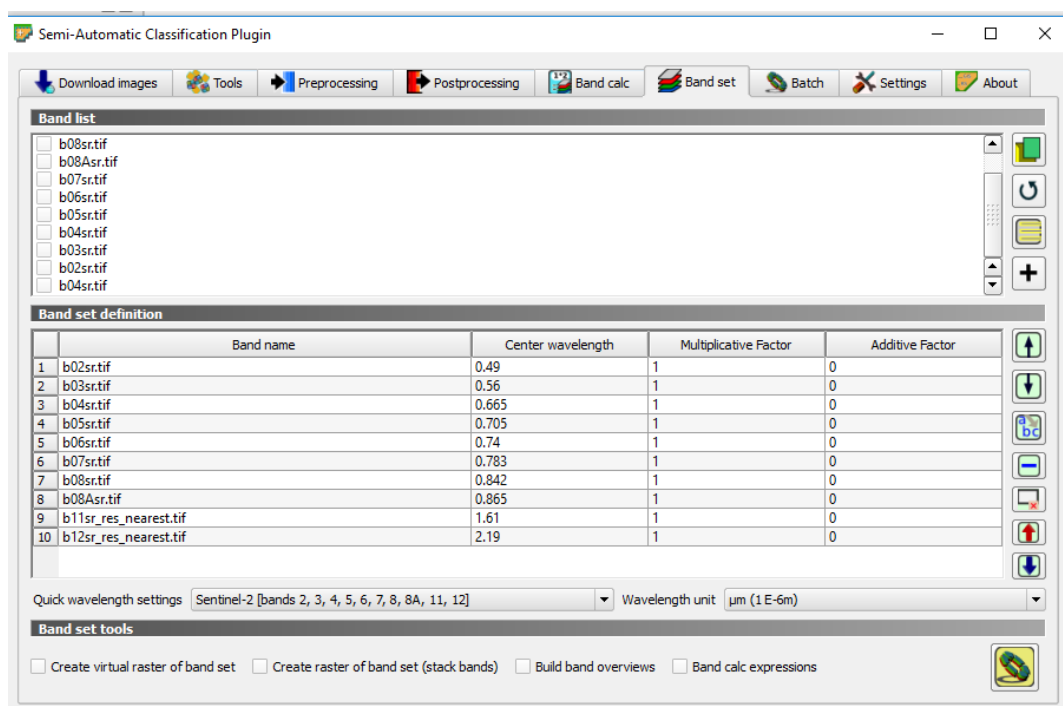
Εικόνα 6: Δείγματα αναφοράς

### 3.4.3 Φασματικά χαρακτηριστικά εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα

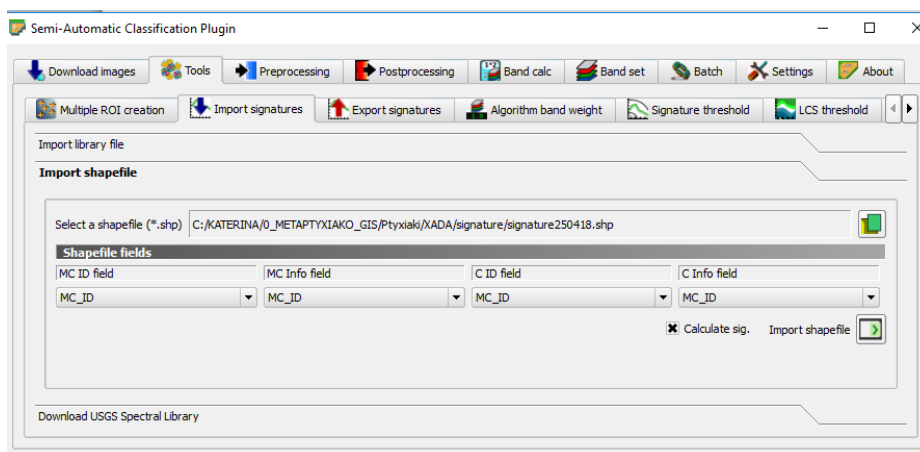
Για τον προσδιορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα QGIS, το οποίο παρέχει εργαλεία για την τηλεπισκοπική ανάλυση. Συγκεκριμένα αξιοποιήθηκε το “Semi-Automatic Classification Plugin” (εν συντομία SCP plugin), το οποίο αφορά ένα πρόσθετο εργαλείο (plugin) ανοιχτού λογισμικού του Luca Congedo και στηρίζεται στη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων. Να σημειωθεί ότι δεν κατέστη δυνατή η χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου για την ταξινόμηση της εικόνας εξαιτίας του περιορισμού μνήμης που είχε το λογισμικό λόγω του μεγάλου όγκου των τηλεπισκοπικών δεδομένων.

Αρχικά εισήχθησαν τα κανάλια των προεπεξεργασμένων εικόνων του Sentinel-2 στην εφαρμογή SCP plugin για τη δημιουργία “band set” (βλέπε εικόνα 7) και στη συνέχεια εισήχθησαν τα δείγματα αναφοράς που είχαν ληφθεί από τις εικόνες Google Earth (βλέπε εικόνα 8) και αποθηκευτεί σε μορφή shp. Για κάθε ένα από τα δείγματα υπολογίστηκε η φασματική τους υπογραφή.

Επιπλέον αξιοποιήθηκε έλεγχος της ομοιογένειας και της καλής λήψης των δειγμάτων μέσω της επιλογής “Spectral Distance – Spectral Details” του SCP.

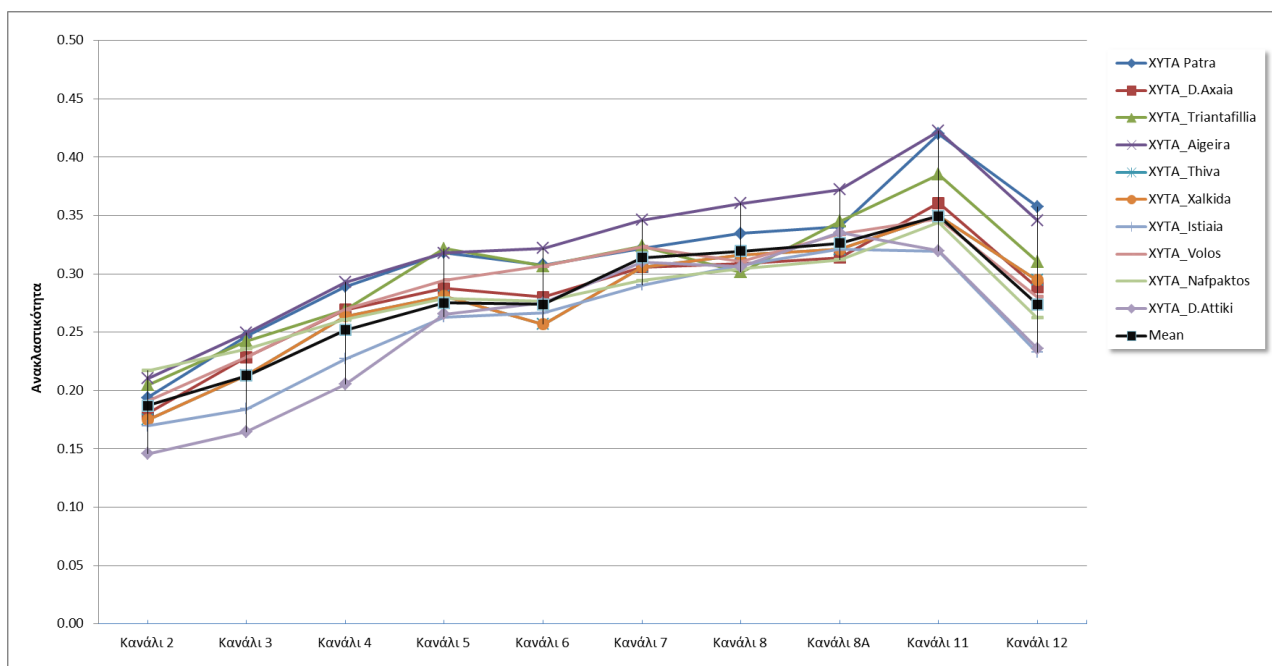


Εικόνα 7: Παράθυρο δημιουργίας ‘Band set’ του εργαλείου SCP



Εικόνα 8: Παράθυρο εισαγωγής δειγμάτων αναφοράς του εργαλείου SCP

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η φασματική υπογραφή των δειγμάτων αναφοράς, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέσης φασματικής υπογραφής των αστικών στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 9: Φασματικά χαρακτηριστικά αστικών στερεών αποβλήτων των δειγμάτων αναφοράς

Στον πίνακα 14 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της μέσης φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα για τα κανάλια που αξιοποιήθηκαν στη συνέχεια στο στάδιο της ταξινόμησης της πολυφασματικής εικόνας της περιοχής μελέτης. Τα κανάλια που επιλέχθηκαν για την ταξινόμηση ήταν του ορατού φάσματος: μπλε (κανάλι 2), πράσινο (κανάλι 3) και κόκκινο (κανάλι 4) και του υπέρυθρου φάσματος: εγγύς υπέρυθρο -NIR (κανάλι 8) και μέσο υπέρυθρο SWIR (κανάλια 11 και 12).

Πίνακας 14: Μέση φασματική υπογραφή εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα

Band	2	3	4	8	11	12
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	0.490	0.560	0.665	0.842	1.610	2.190
Min	0.118	0.139	0.174	0.265	0.279	0.193
Max	0.245	0.280	0.325	0.374	0.424	0.358
Mean	<b>0.187</b>	<b>0.213</b>	<b>0.252</b>	<b>0.319</b>	<b>0.350</b>	<b>0.274</b>
Standard deviation ( $\sigma$ )	0.031	0.030	0.031	0.034	0.032	0.038

### 3.4.4 Σύγκριση με βασικές κατηγορίες κάλυψης γης

Πριν τη διεξαγωγή των τεχνικών ανάλυσης, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί σύγκριση των φασματικών χαρακτηριστικών της κατηγορίας κάλυψης γης με αστικά στερεά απόβλητα με τα φασματικά χαρακτηριστικά βασικών κατηγοριών κάλυψης γης. Οι κατηγορίες κάλυψης γης που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 15.

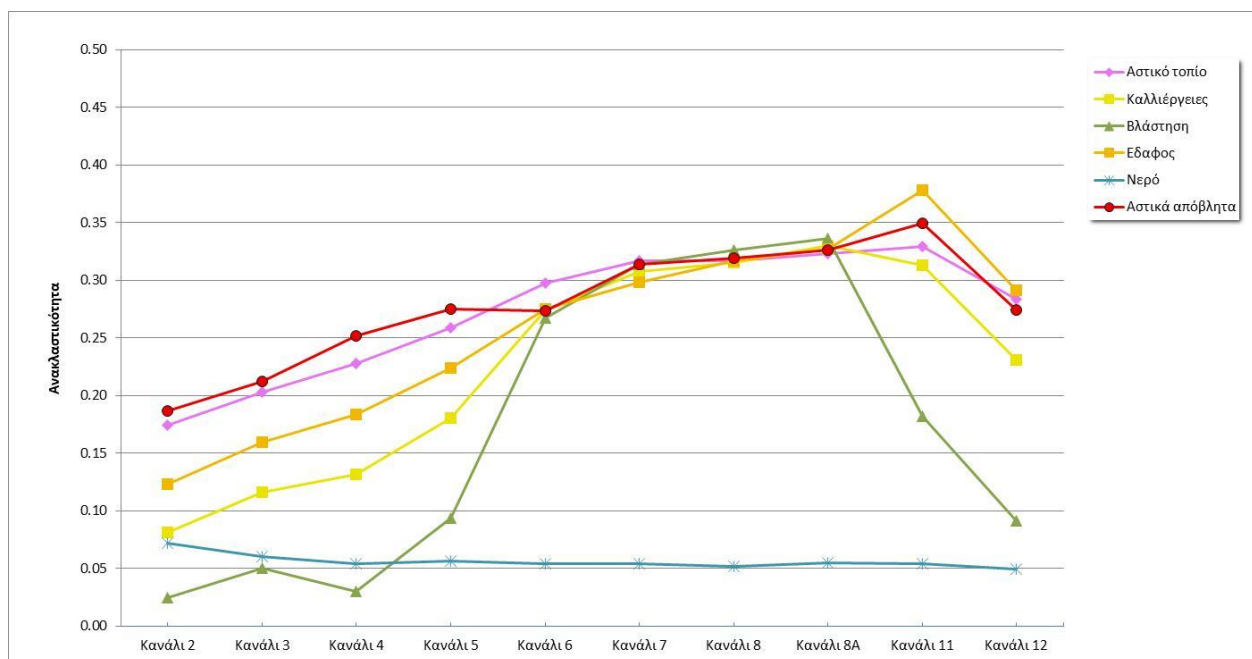
Πίνακας 15: Επιλεγόμενες κατηγορίες κάλυψης γης για τη σύγκριση με τη φασματική υπογραφή εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα

Κατηγορία κάλυψης γης	Περιγραφή κατηγορίας
Αστικό τοπίο	Αδιαπέρατες επιφάνειες (αστικός ιστός, βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες, οδικό δίκτυο)
Καλλιέργειες	Αγροτικές εκτάσεις
Έδαφος	Έδαφος με ελάχιστη ή αμελητέα βλάστηση
Βλάστηση	Εκτάσεις με φυσική βλάστηση (δασικές εκτάσεις, εκτάσεις με μεσαία και χαμηλή βλάστηση)
Νερό	Υδάτινες επιφάνειες

Όπως και για την κατηγορία εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα, η φασματική υπογραφή των ανωτέρω κατηγοριών κάλυψης γης υπολογίστηκε με το εργαλείο SCP plugin στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα QGIS. Για κάθε κατηγορία κάλυψης γης προσδιορίστηκαν περιοχές ενδιαφέροντος (Regions of Interest- ROI) στην εικόνα, οι οποίες αποτέλεσαν τις δειγματοληπτικές περιοχές που αντιπροσωπεύουν αναγνωρίσιμες καλύψεις γης για κάθε μία από τις κατηγορίες που ορίστηκαν.

Τα ROI δημιουργήθηκαν μέσα από το εργαλείο SCP plugin, χρησιμοποιώντας ως βοηθητικό υπόβαθρο το Google Map που αποτελεί OpenLayer plugin στο QGIS. Για να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική η δειγματοληψία, πάρθηκαν δείγματα της εκάστοτε κατηγορίας σε όλη την περιοχή μελέτης. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ομοιογένειας και της καλής λήψης των δειγμάτων με την επιλογή «Spectral Distance – Spectral Details».

Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται σε μορφή διαγράμματος η φασματική υπογραφή των βασικών κατηγοριών κάλυψης γης, καθώς και της κατηγορίας επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα.



**Εικόνα 10: Σύγκριση φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα με βασικές κατηγορίες κάλυψης γης**

Κατά τη σύγκριση των φασματικών χαρακτηριστικών επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα με τις βασικές κατηγορίες κάλυψης γης δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στα κανάλια 2, 3, 4, 8, 11 και 12, καθώς χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της ταξινόμησης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της εικόνας 10 είναι εμφανές ότι η κατηγορία νερό παρουσιάζει σαφή διάκριση από την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα. Ομοίως η φασματική υπογραφή της κατηγορίας βλάστηση είναι διαφοροποιημένη με εξαίρεση την περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (κανάλι 8). Ακολουθεί η κατηγορία καλλιέργειες που εμφανίζει να είναι ικανοποιητικά διαφοροποιημένη από την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα στο ορατό τμήμα του φάσματος.

Αντίθετα, η φασματική υπογραφή της κατηγορίας αστικό τοπίο, που αφορά αδιαπέρατες τεχνητές επιφάνειες, φαίνεται να είναι πολύ κοντά αριθμητικά με την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα. Αντίστοιχα η κατηγορία έδαφος εμφανίζει μια παραπλήσια φασματική συμπεριφορά στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Σε όλες τις κατηγορίες πλην της κατηγορίας νερό, υφίσταται παραπλήσιο εύρος τιμών στο εγγύς υπέρυθρο.

### 3.5 Ταξινόμηση εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα

Η μέθοδος ταξινόμησης που επιλέχθηκε είναι αυτή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε επίπεδο εικονοστοιχείου. Κατά την επιβλεπόμενη ταξινόμηση ορίζονται εκ των προτέρων οι ομάδες-κατηγορίες που θα ταξινομηθεί η εικόνα και ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται σύμφωνα με τα δείγματα αναφοράς που έχουν επιλεγεί από πριν για κάθε ομάδα-κατηγορία.

Να σημειωθεί ότι η ταξινόμηση αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ως τεχνική τηλεπισκοπικής ανάλυσης για τον εντοπισμό εκτάσεων που υφίσταται παρουσία αστικών στερεών αποβλήτων. Επειδή ο διαχωρισμός άλλων κατηγοριών κάλυψης γης δεν εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσας, καθορίστηκαν δύο κατηγορίες ταξινόμησης, (α) η κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα (επιφάνειες με αστικά στερεά απόβλητα) και (β) η κατηγορία που περιλαμβάνει το σύνολο των κατηγοριών κάλυψης γης (εκτάσεις λοιπών ειδών εδαφοκάλυψης).

Υφίστανται πολλές μέθοδοι επιβλεπόμενης ταξινόμησης, όπως αναλυτικά έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.1.4. Στην παρούσα, δεδομένου του μεγάλου όγκου των τηλεπισκοπικών δεδομένων που καθόρισε το λογισμικό πρόγραμμα που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση της ταξινόμησης, το οποίο ήταν το ArcGIS, εξετάστηκαν τρεις αλγόριθμοι ταξινόμησης: (i) του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου (parallelepiped), (ii) της ευκλείδειας απόστασης (euclidean distance), και (iii) της μεθόδου με τη χρήση του χαρτογράφου φασματικής γωνίας (spectral angle mapping).

Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση ήταν αυτά του ορατού φάσματος (μπλε, πράσινο και κόκκινο) και του υπέρυθρου τμήματος του φάσματος (NIR, SWIR-1 & SWIR-2).

Πίνακας 16: Επιλεγόμενα κανάλια εικόνων Sentinel-2 για την ταξινόμηση

Band	2	3	4	8	11	12
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	0.490	0.560	0.665	0.842	1.610	2.190

#### 3.5.1 Αλγόριθμος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου

Σε αυτή τη μέθοδο ταξινόμησης, ένα εικονοστοιχείο ταξινομείται με το εύρος των φασματικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε ομάδας-κατηγορίας. Ο αλγόριθμος του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου αποφασίζει αν το εικονοστοιχείο ανήκει σε μια ομάδα-κατηγορία όταν και μόνο όταν εμπίπτει στο εύρος τιμών που έχει οριστεί για την εκάστοτε ομάδα-κατηγορία. Ειδικότερα, το εύρος τιμών που εφαρμόστηκε έγινε αποκλειστικά για την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα και η ταξινόμηση ακολουθεί τη λογική Boolean.

Το εύρος τιμών δύναται να καθοριστεί από την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή της φασματικής υπογραφής των επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα ή/και τις ακραίες τιμές της μέσης τιμής της λαμβάνοντας υπόψη την τυπική απόκλιση (εν συντομία ελάχιστη μέση και μέγιστη μέση τιμή).

Τα εικονοστοιχεία που οι τιμές τους βρίσκονται μεταξύ του άνω και κάτω ορίου τιμών κάθε καναλιού ταξινομούνται στην κατηγορία των εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα και τα υπόλοιπα παραμένουν αταξινόμητα, δηλαδή εμπίπτουν στην κατηγορία που περιλαμβάνει το σύνολο των κατηγοριών κάλυψης γης.

Με απώτερο στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων ταξινόμησης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στο άνω και κάτω όριο τιμών, χρησιμοποιώντας εκτός από την ελάχιστη και μέγιστη μέση τιμή (που καθορίζεται από την τυπική απόκλιση από την μέση τιμή), την ελάχιστη και μέγιστη τιμή της φασματικής αναφοράς.

Οι δοκιμές του αλγόριθμου του παραλληλεπίπεδου που πραγματοποιήθηκαν στο ArcGIS, αξιοποιώντας το εργαλείο Raster Calculator χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων (βλέπε Σχήμα 15), είναι οι εξής ακόλουθοι:

**(α) Δοκιμή με την ελάχιστη μέση (mean -  $\sigma$ ) και τη μέγιστη μέση τιμή (mean +  $\sigma$ )**

```
Con(("B02sr_all.tif">= 0.156) & ("B02sr_all.tif"<= 0.218) & ("B03sr_all.tif">= 0.179) &
("B03sr_all.tif" <= 0.246) & ("B04sr_all.tif">= 0.219) & ("B04sr_all.tif"<= 0.286) &
("B08sr_all.tif">= 0.297) & ("B08sr_all.tif" <= 0.341) & ("B11sr_all.tif">= 0.315) &
("B11sr_all.tif"<= 0.384) & ("B12sr_all.tif">= 0.234) & ("B12sr_all.tif" <= 0.314), 1, 0)
```

**(β) Δοκιμή με την ελάχιστη (min) και τη μέγιστη τιμή (max)**

```
Con(("B02sr_all.tif">= 0.118) & ("B02sr_all.tif"<= 0.245) & ("B03sr_all.tif">= 0.139) &
("B03sr_all.tif" <= 0.280) & ("B04sr_all.tif">= 0.174) & ("B04sr_all.tif"<= 0.325) &
("B08sr_all.tif">= 0.265) & ("B08sr_all.tif" <= 0.374) & ("B11sr_all.tif">= 0.279) &
("B11sr_all.tif"<= 0.424) & ("B12sr_all.tif">= 0.193) & ("B12sr_all.tif" <= 0.358), 1, 0)
```

**(γ) Δοκιμή με την ελάχιστη μέση τιμή (mean- $\sigma$ ) και τη μέγιστη τιμή (max)**

```
Con(("B02sr_all.tif">= 0.156) & ("B02sr_all.tif"<= 0.245) & ("B03sr_all.tif">= 0.183) &
("B03sr_all.tif" <= 0.280) & ("B04sr_all.tif">= 0.221) & ("B04sr_all.tif"<= 0.325) &
("B08sr_all.tif">= 0.265) & ("B08sr_all.tif" <= 0.374) & ("B11sr_all.tif">= 0.318) &
("B11sr_all.tif"<= 0.424) & ("B12sr_all.tif">= 0.236) & ("B12sr_all.tif" <= 0.358), 1, 0)
```

όπου "B02sr\_all.tif" είναι η τιμή ανακλαστικότητας εδάφους κάθε εικονοστοιχείου για το κανάλι 2, "B03sr\_all.tif" είναι η τιμή ανακλαστικότητας εδάφους κάθε εικονοστοιχείου για το κανάλι 3 κ.ο.κ.

Οι ως άνω τιμές που αναγράφονται στον αλγόριθμο υποδηλώνουν την ελάχιστη ή τη μέγιστη ή την ελάχιστη μέση ή την μέγιστη μέση τιμή της φασματικής υπογραφής στο εκάστοτε κανάλι. Για παράδειγμα, η τιμή 0.118 υποδηλώνει την ελάχιστη τιμή της φασματικής υπογραφής για το κανάλι 2.

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης παρατίθενται και για τις τρεις δοκιμές στον πίνακα 17. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, επιλέχθηκε για το κάτω όριο η ελάχιστη μέση τιμή και για το άνω

όριο η μέγιστη τιμή της φασματικής αναφοράς (βλέπε δοκιμή γ και πίνακα 18), επιτυγχάνοντας βαθμό πληρότητας των δειγμάτων αναφοράς στο 90%.

**Πίνακας 17: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου παραλληλεπίπεδου**

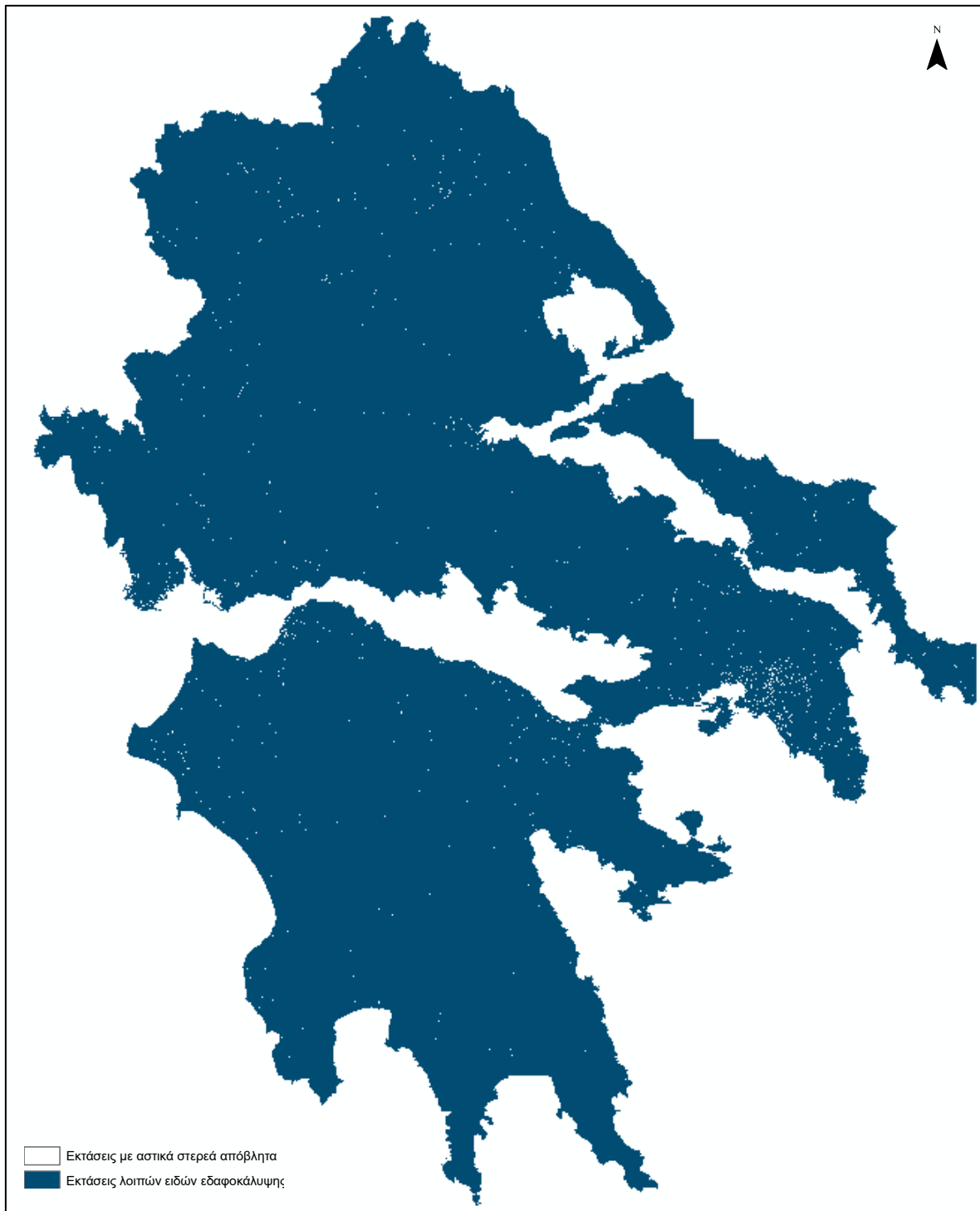
Δοκιμή	Εύρος τιμών	Περιοχή μελέτης (pixel)	Εφαρμογή αλγόριθμου παραλληλεπίπεδου	
			Κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα	
			pixel	% περιοχής μελέτης
α	Ελάχιστη μέση και μέγιστη μέση τιμή [(mean-σ) – (mean +σ)]	589,211,285	634,925	0.11%
β	Ελάχιστη και μέγιστη τιμή [min – max]		12,978,213	2.20%
γ	Ελάχιστη μέση τιμή και μέγιστη τιμή [(mean-σ) – max]		2,727,064	0.46%

**Πίνακας 18: Επιλεγόμενο εύρος τιμών φασματικής αναφοράς εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα για την εφαρμογή του αλγόριθμου του παραλληλεπίπεδου**

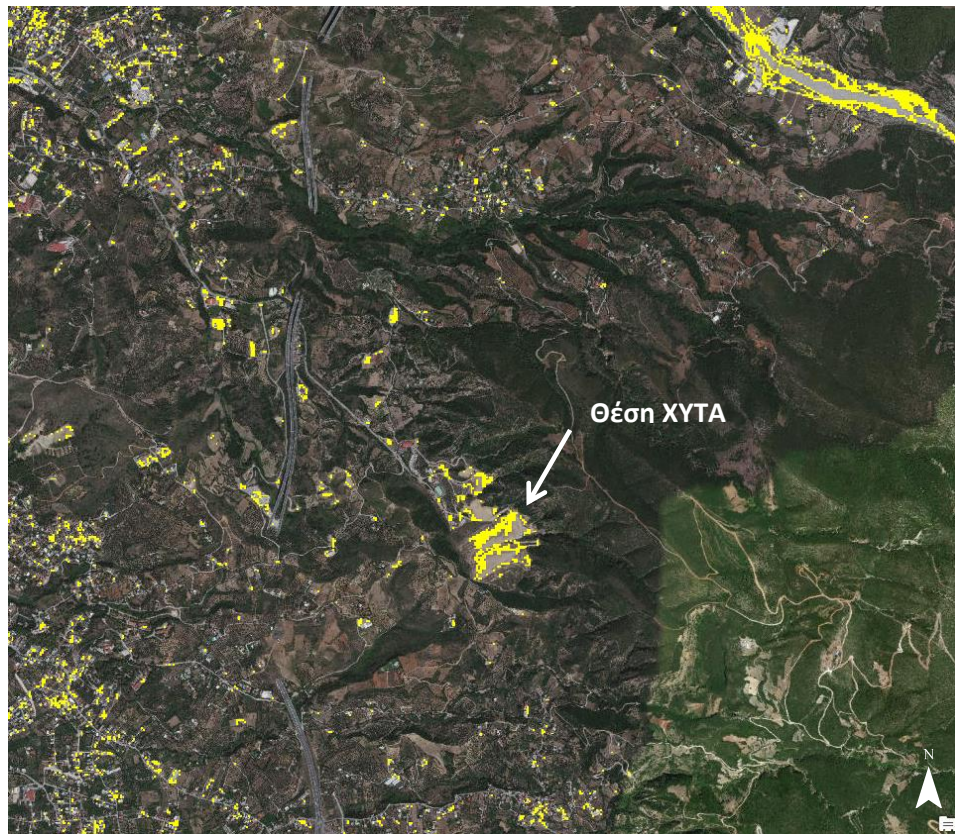
Band	2	3	4	8	11	12
Min	0.156	0.183	0.221	0.265	0.318	0.236
Max	0.245	0.280	0.325	0.374	0.424	0.358

Στην εικόνα 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τον αλγόριθμο του παραλληλεπίπεδου στην περιοχή μελέτης. Στις εικόνες 12-15 παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα τα αποτελέσματα στις περιοχές τεσσάρων χώρων υγειονομικής αστικών στερεών αποβλήτων σε υπόβαθρο της Wolrd Imagery, στις οποίες είναι εμφανώς σημειωμένη η θέση των χώρων.

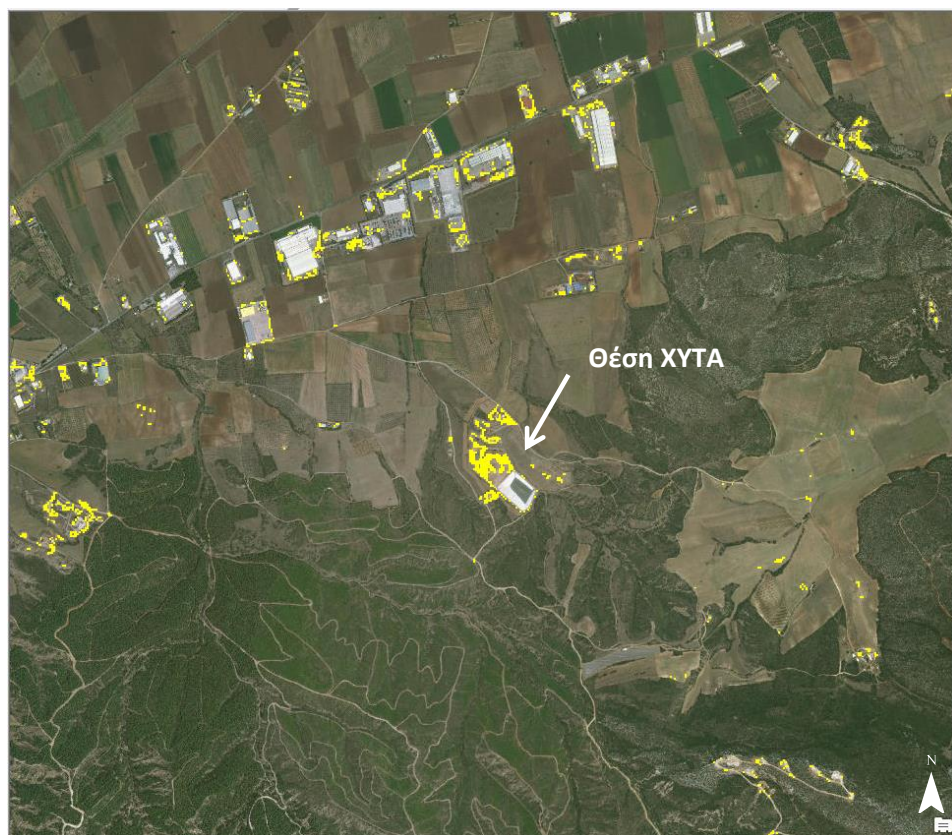




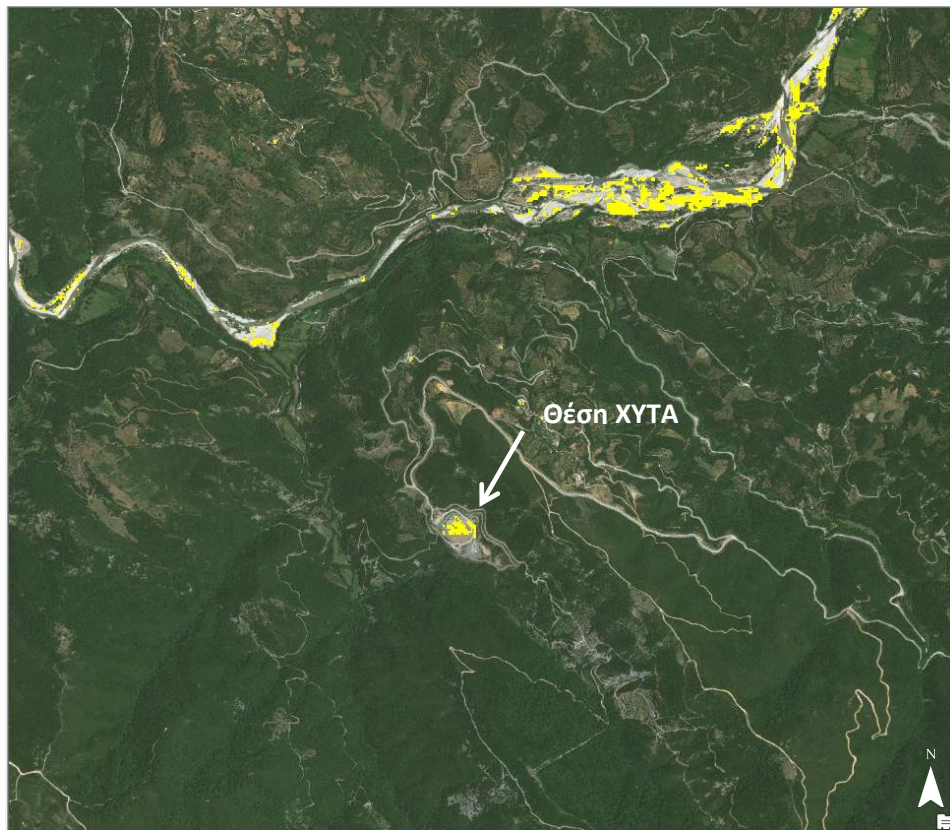
**Εικόνα 11: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου (εύρος τιμών: ελάχιστη μέση τιμή και μέγιστη τιμή φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα)**



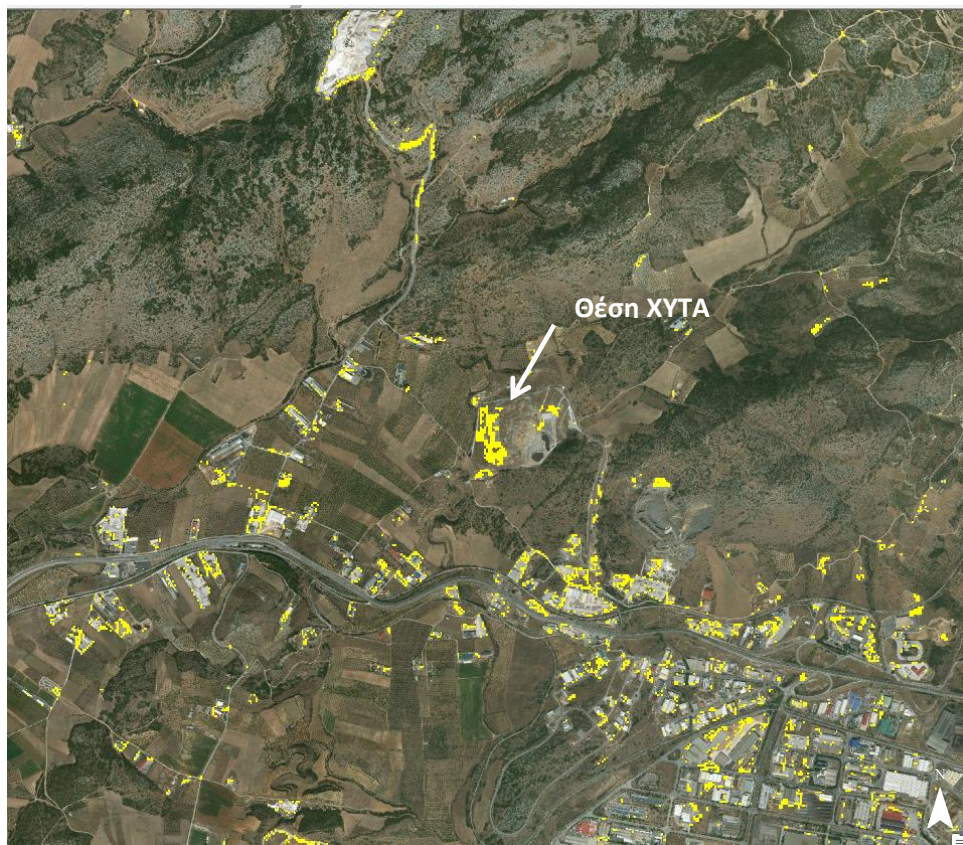
Εικόνα 12: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας



Εικόνα 13: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας



Εικόνα 14: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου



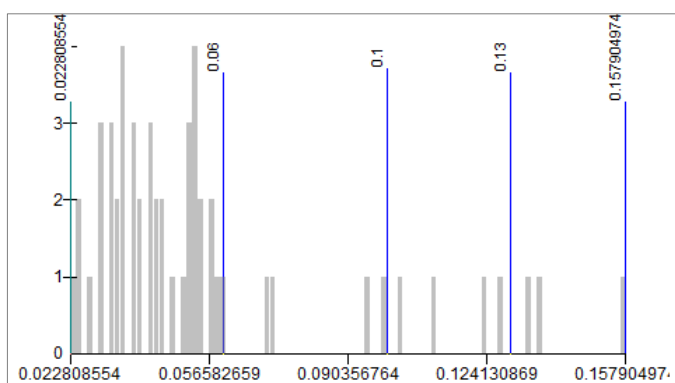
Εικόνα 15: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο παραλληλεπίπεδου στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου

### 3.5.2 Αλγόριθμος ευκλείδειας απόστασης

Η ταξινόμηση με την ευκλείδεια απόσταση υπολογίζει τα μέσα διανύσματα σε κάθε κανάλι από τα δεδομένα των δειγμάτων αναφοράς της εκάστοτε ομάδας-κατηγορίας. Για την εφαρμογή του αλγόριθμου μετράται η απόσταση του εκάστοτε εικονοστοιχείου με το μέσο διάνυσμα, δηλαδή τη μέση τιμή των δειγμάτων της εκάστοτε ομάδας-κατηγορίας σε κάθε κανάλι. Η μέτρηση της απόστασης πραγματοποιείται με τη μέτρηση της ευκλείδειας απόστασης.

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε αποκλειστικά για την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα και ακολουθεί τη λογική Boolean. Τα εικονοστοιχεία ταξινομούνται στην κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα θέτοντας ένα κατώφλι, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν αταξινομήτα, δηλαδή εμπίπτουν στην κατηγορία που περιλαμβάνει το σύνολο των κατηγοριών κάλυψης γης.

Για τα εικονοστοιχεία των δειγμάτων αναφοράς της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα η ευκλείδεια απόσταση υπολογίστηκε ότι κυμαίνεται στο εύρος 0.02-0.16 με μέση τιμή 0.06.



Σχήμα 24: Ευκλείδεια απόσταση δειγμάτων αναφοράς

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές με κατώφλια 0.06, 0.10, 0.13 και 0.16.

Η μέση τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα λήφθηκε από τον πίνακα 14.

Ο αλγόριθμος της ευκλείδειας απόστασης που εφαρμόστηκε στο ArcGIS, αξιοποιώντας το εργαλείο Raster Calculator χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων (βλέπε Σχήμα 15), θέτοντας κατώφλι 0.06 είναι ο εξής ακόλουθος:

**Δοκιμή αλγόριθμου ευκλείδειας απόστασης στο GIS με κατώφλι 0.06:**

```
Con(SquareRoot(Square("B02sr_all.tif"-0.187)+Square("B03sr_all.tif"-0.213)+
Square("B04sr_all.tif"-0.252)+Square("B08sr_all.tif"-0.319)+
Square("B11sr_all.tif"-0.350)+ Square("B12sr_all.tif"-0.274))<=0.06, 1, 0)
```

όπου "B02sr\_all.tif" είναι η τιμή ανακλαστικότητας εδάφους κάθε εικονοστοιχείου για το κανάλι 2, "B03sr\_all.tif" είναι η τιμή ανακλαστικότητας εδάφους κάθε εικονοστοιχείου για το κανάλι 3 κ.ο.κ.

Οι τιμές που αναγράφονται στον αλγόριθμο υποδηλώνουν τη μέση τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα στο εκάστοτε κανάλι. Για παράδειγμα, η τιμή 0.187 υποδηλώνει τη μέση τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα για το κανάλι 2.

Εφαρμόζοντας κατώφλι 0.06 αφαιρούνται εξολοκλήρου δύο δείγματα (ΧΥΤΑ Πάτρας, ΧΥΤΑ Αιγείρας), τα οποία απέχουν την μεγαλύτερη απόσταση από τη μέση τιμή της φασματικής υπογραφής.

Ενώ το κατώφλι 0.10 επιτυγχάνει βαθμό πληρότητας των δειγμάτων αναφοράς στο 90% και το κατώφλι 0.13 δείγματα φτάνει στο 98%, τα αποτελέσματα του διαχωρισμού της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα είναι εξαιρετικά φτωχά, όπως φαίνεται και στον πίνακα 19.

**Πίνακας 19: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου ευκλείδειας απόστασης**

Δοκιμή	Κατώφλι	Περιοχή μελέτης (pixel)	Εφαρμογή αλγόριθμου ευκλείδειας απόστασης	
			Κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα	
			pixel	% περιοχής μελέτης
α	0.06	589,211,285	1,740,557	0.30%
β	0.10		9,887,734	1.68%
γ	0.13		25,055,171	4.25%
δ	0.16		40,981,934	6.95%

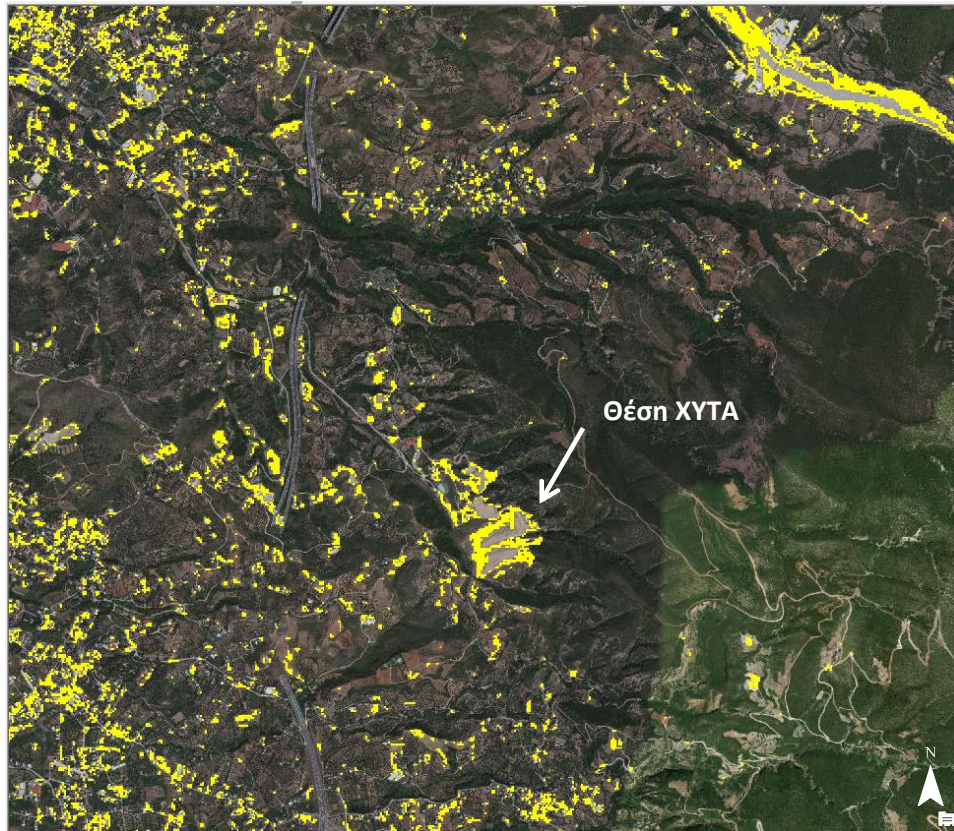
Για κατώφλι άνω των 0.10, η αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα μειώνεται κατά πολύ και τα αποτελέσματα της ταξινόμησης αξιολογούνται ως μη αποδεκτά.

Στην εικόνα 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τον αλγόριθμο της ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή μελέτης για κατώφλι 0.10 που επιτυγχάνει ικανοποιητικό βαθμό πληρότητας των δειγμάτων αναφοράς. Στις εικόνες 17-20 παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα τα αποτελέσματα στις περιοχές τεσσάρων χώρων υγειονομικής αστικών στερεών αποβλήτων σε υπόβαθρο της World Imagery, στις οποίες είναι εμφανώς σημειωμένη η θέση των χώρων.

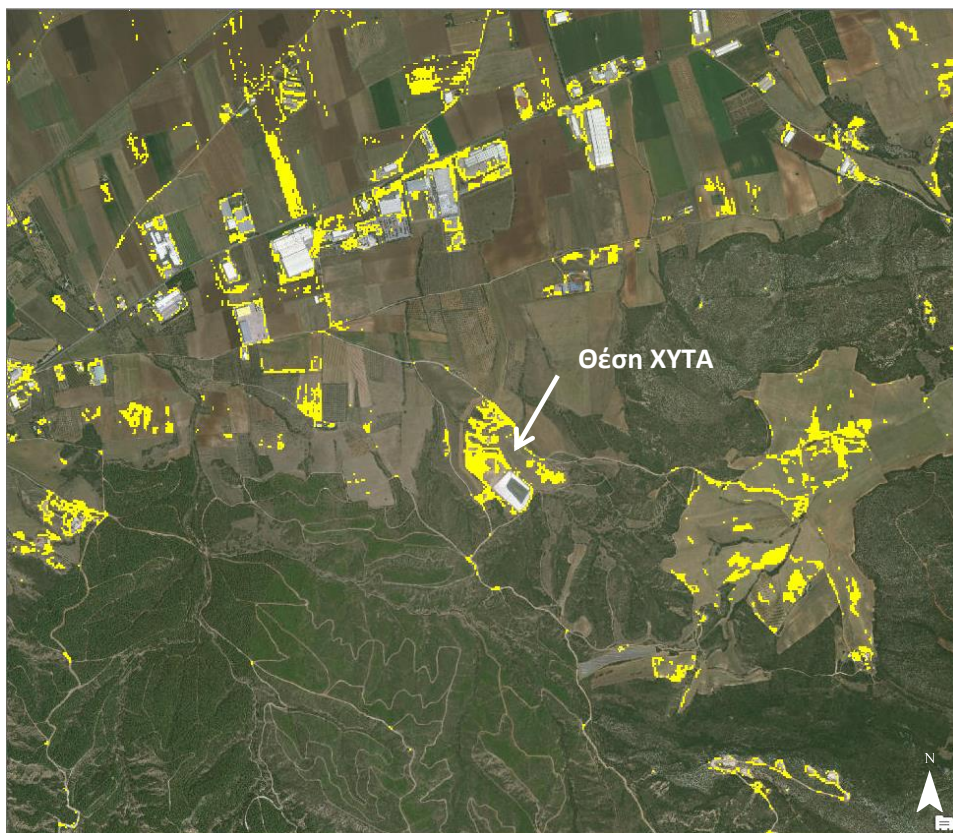
Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά συγκριτικά με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου του παραλληλεπίπεδου, ενδεχομένως διότι ο αλγόριθμος της ελάχιστης απόστασης δεν έχει ευαισθησία στους βαθμούς διακύμανσης των φασματικών δεδομένων. Μάλιστα με τη διαφοροποίηση του φασματικού εύρους της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα στον αλγόριθμο του παραλληλεπίπεδου κατέστη δυνατή σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.



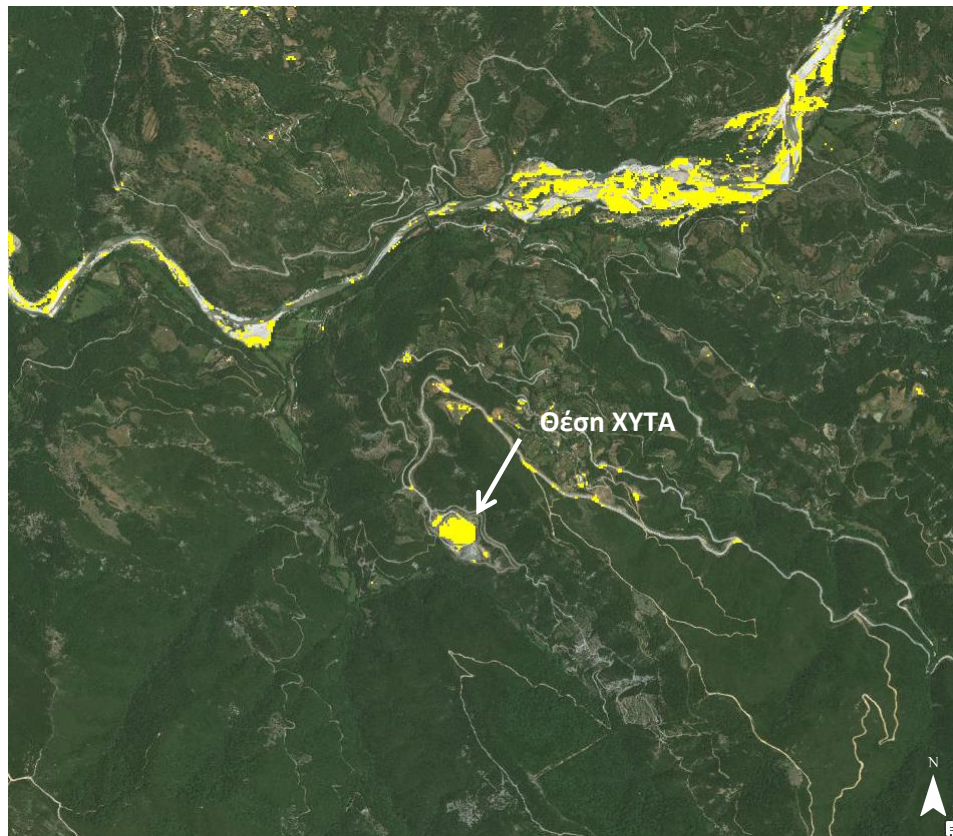
**Εικόνα 16: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης  
(κατώφλι 0.10)**



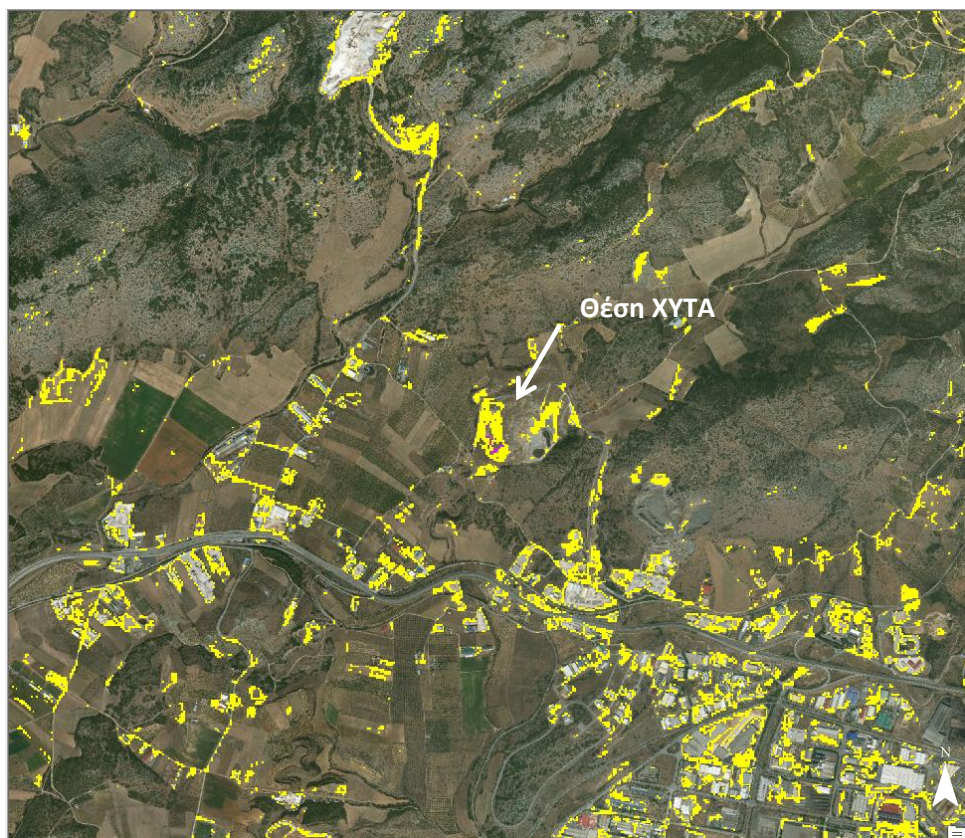
Εικόνα 17: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας



Εικόνα 18: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας



Εικόνα 19: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου



Εικόνα 20: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο ευκλείδειας απόστασης στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου



### 3.5.3 Αλγόριθμος χαρτογράφου φασματικής γωνίας

Η ταξινόμηση με τον αλγόριθμο του χαρτογράφου φασματικής γωνίας εξετάζει κάθε εικονοστοιχείο και αξιολογεί την ομοιότητα που εμφανίζουν οι φασματικές υπογραφές των υπό εξέταση ομάδων-κατηγοριών, συγκρίνοντας τις φασματικές γωνίες ανάμεσα στο φάσμα ανάκλασης του εκάστοτε εικονοστοιχείου με το φάσμα από τα δείγματα αναφοράς. Τα εικονοστοιχεία ταξινομούνται με βάση τη μικρότερη γωνία που σχηματίζουν με το κάθε διάνυσμα αναφοράς της εκάστοτε ομάδας-κατηγορίας. Όσο μικρότερη είναι η φασματική γωνία τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το εικονοστοιχείο να ανήκει σε μια συγκεκριμένη ομάδα-κατηγορία.

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε κι εδώ αποκλειστικά για την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα, ακολουθώντας τη λογική Boolean για την ταξινόμηση. Τα εικονοστοιχεία ταξινομούνται στην κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα θέτοντας ένα κατώφλι, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν αταξινόμητα, δηλαδή εμπίπτουν στην κατηγορία που περιλαμβάνει το σύνολο των κατηγοριών κάλυψης γης.

Η φασματική γωνία του εικονοστοιχείου μετράται με τη γωνία που σχηματίζει το αντίστοιχο διάνυσμα στο φασματικό χώρο με το φάσμα αναφοράς της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα. Το φάσμα αναφοράς υπολογίζεται ως το μέσο διάνυσμα αναφοράς ανά κανάλι για την κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα.

Η μέση τιμή της φασματικής υπογραφής κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα λήφθηκε από τον πίνακα 14.

Ο υπολογισμός της φασματικής γωνίας κάθε εικονοστοιχείου πραγματοποιήθηκε στο GIS, αξιοποιώντας το εργαλείο Raster Calculator χωρικής ανάλυσης κανονικοποιημένων δεδομένων (βλέπε Σχήμα 15), με το οποίο εφαρμόστηκε ο παρακάτω αλγόριθμος:

#### **Αλγόριθμος προσδιορισμού φασματικής γωνίας στο GIS:**

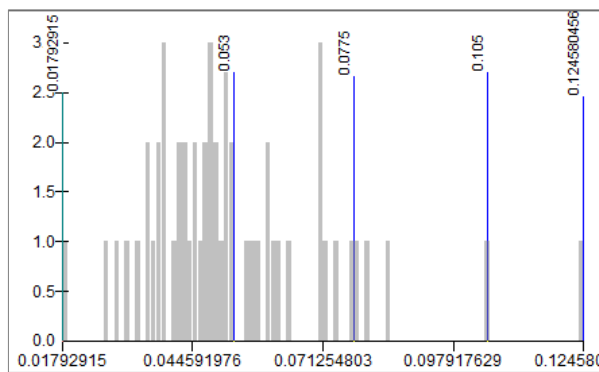
$$\text{acos}((0.187 * "B02sr\_all.tif") + (0.213 * "B03sr\_all.tif") + (0.252 * "B04sr\_all.tif") + (0.319 * "B08sr\_all.tif") + (0.350 * "B11sr\_all.tif") + (0.274 * "B12sr\_all.tif")) / (0.6657 * \text{SquareRoot} (\text{Square} ("B02sr\_all.tif") + \text{Square} ("B03sr\_all.tif") + \text{Square} ("B04sr\_all.tif") + \text{Square} ("B08sr\_all.tif") + \text{Square} ("B11sr\_all.tif") + \text{Square} ("B12sr\_all.tif")))$$

όπου "B02sr\_all.tif" είναι η τιμή ανακλαστικότητας εδάφους κάθε εικονοστοιχείου για το κανάλι 2, "B03sr\_all.tif" είναι η τιμή ανακλαστικότητας εδάφους κάθε εικονοστοιχείου για το κανάλι 3 κ.ο.κ.

Οι ως άνω τιμές που αναγράφονται στον αλγόριθμο υποδηλώνουν τη μέση τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα στο εκάστοτε κανάλι. Για παράδειγμα, η τιμή 0.187 υποδηλώνει τη μέση τιμή της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα για το κανάλι 2.

Τα εικονοστοιχεία ταξινομούνται στην κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα ορίζοντας ένα κατώφλι μέγιστης γωνίας. Τα εικονοστοιχεία που υπερβαίνουν αυτό το όριο παραμένουν αταξινόμητα, ήτοι στην κατηγορία που περιλαμβάνει το σύνολο των λοιπών κατηγοριών

κάλυψης γης. Η φασματική γωνία των δειγμάτων αναφοράς των επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα υπολογίστηκε ότι είναι στο εύρος τιμών 0.018-0.125 με μέση τιμή 0.053.



Σχήμα 25: Φασματική γωνία δειγμάτων αναφοράς

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με κατώφλια 0.053, 0.078, 0.105 και 0.124. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγόριθμου χαρτογράφου φασματικής γωνίας παρατίθενται στον πίνακα 20.

Πίνακας 20: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου χαρτογράφου φασματικής γωνίας (SAM)

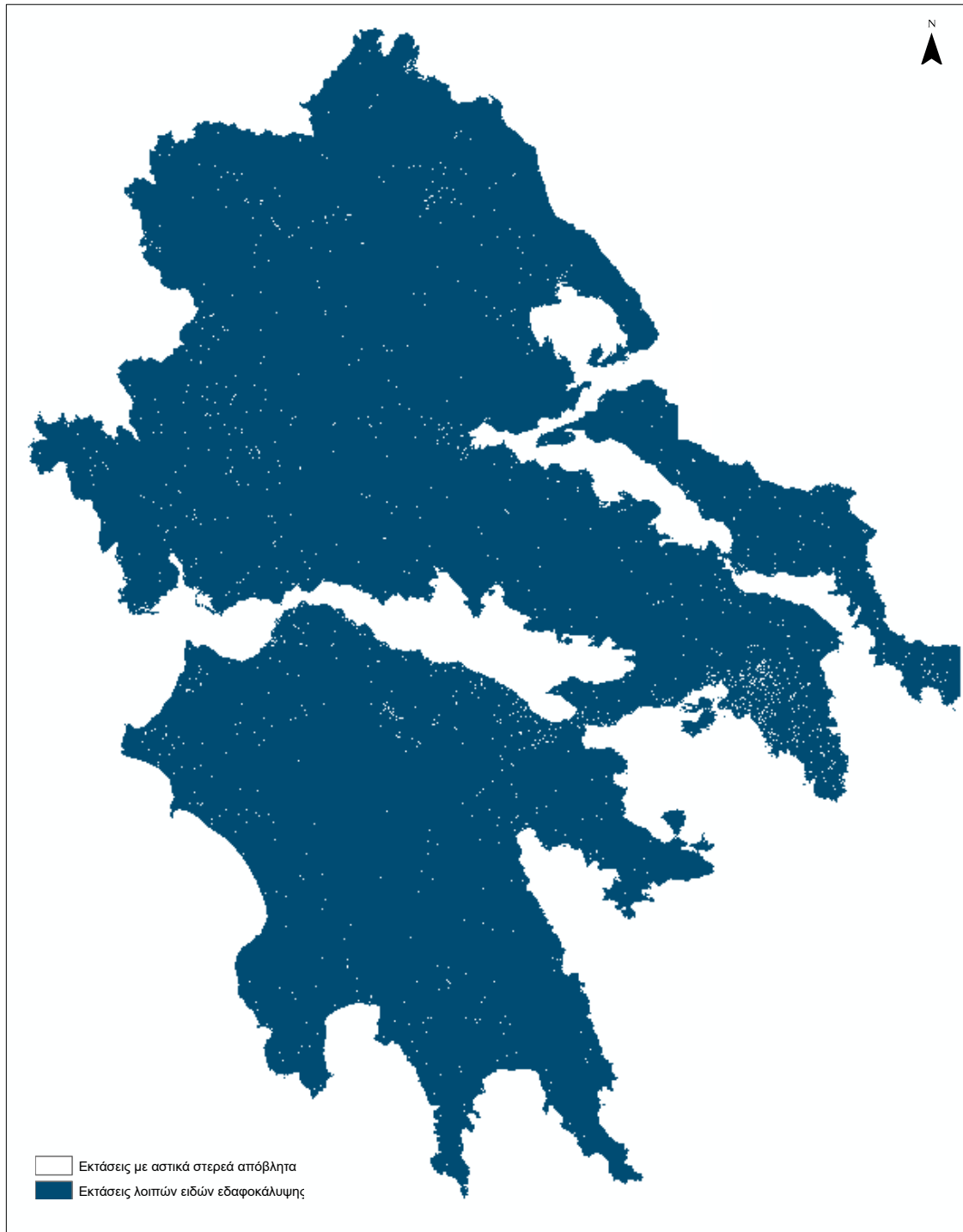
Δοκιμή	Κατώφλι	Περιοχή μελέτης (pixel)	Εφαρμογή αλγόριθμου SAM	
			Κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα	
			pixel	% περιοχής μελέτης
α	0.053	589,211,285	1,493,514	0.25%
β	0.078		5,025,670	0.85%
γ	0.105		10,969,930	1.86%
δ	0.124		16,187,058	2.75%

Το κατώφλι 0.053 δεν είναι αποδεκτό διότι μειώνεται απαγορευτικά ο βαθμός πληρότητας των δειγμάτων αναφοράς. Για κατώφλια άνω του 0.053, ενώ βελτιώνεται σημαντικά ο βαθμός πληρότητας των δειγμάτων, μειώνεται κατά πολύ η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.

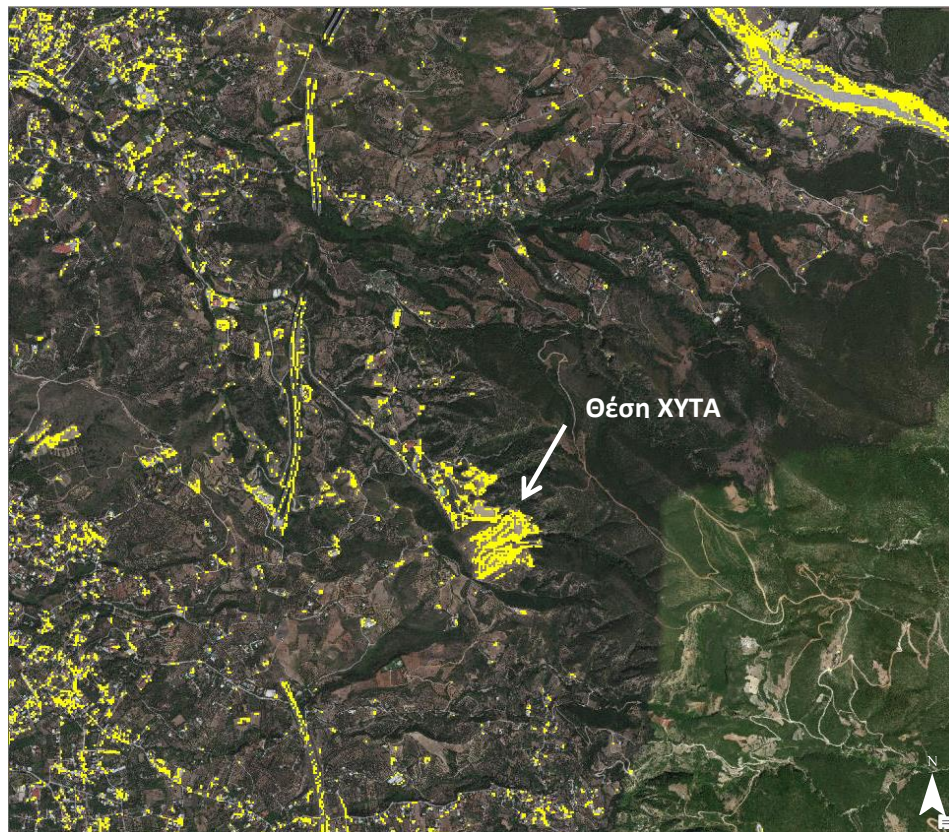
Στην εικόνα 21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τον αλγόριθμο του χαρτογράφου φασματικής γωνίας στην περιοχή μελέτης για κατώφλι 0.078 που επιτυγχάνει 90% πληρότητα στα δείγματα αναφοράς, για λόγους σύγκρισης με τα αποτελέσματα των άλλων αλγόριθμων. Στις εικόνες 22-25 παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα τα αποτελέσματα στις περιοχές τεσσάρων χώρων υγειονομικής αστικών στερεών αποβλήτων σε υπόβαθρο της World Imagery, στις οποίες είναι εμφανώς σημειωμένη η θέση των χώρων.

Με βάση τα αποτελέσματα, ο αλγόριθμος SAM φαίνεται ότι είναι λιγότερο αποτελεσματικός από τον αλγόριθμο της ευκλείδειας απόστασης σε ότι αφορά την πληρότητα των δειγμάτων αναφοράς. Όμως αυξάνοντας το κατώφλι της φασματικής γωνίας, ο βαθμός συμπερίληψης είναι κατά πολύ μικρότερος από αυτόν του αλγορίθμου της ευκλείδειας απόστασης.

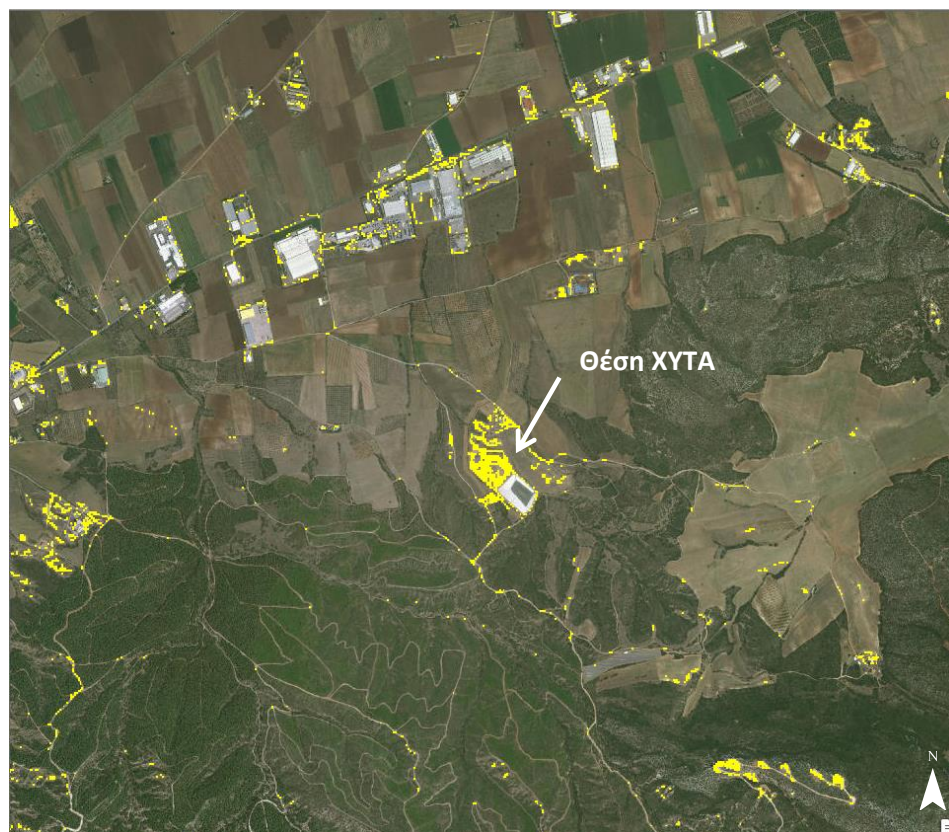
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του SAM με αυτά του αλγορίθμου του παραλληλεπίπεδου, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου του παραλληλεπίπεδου είναι σαφώς πιο ικανοποιητικά. Ως εκ τούτου, για την υλοποίηση των επόμενων μεθοδολογικών βημάτων ανάδειξης εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα, λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα του αλγορίθμου του παραλληλεπίπεδου.



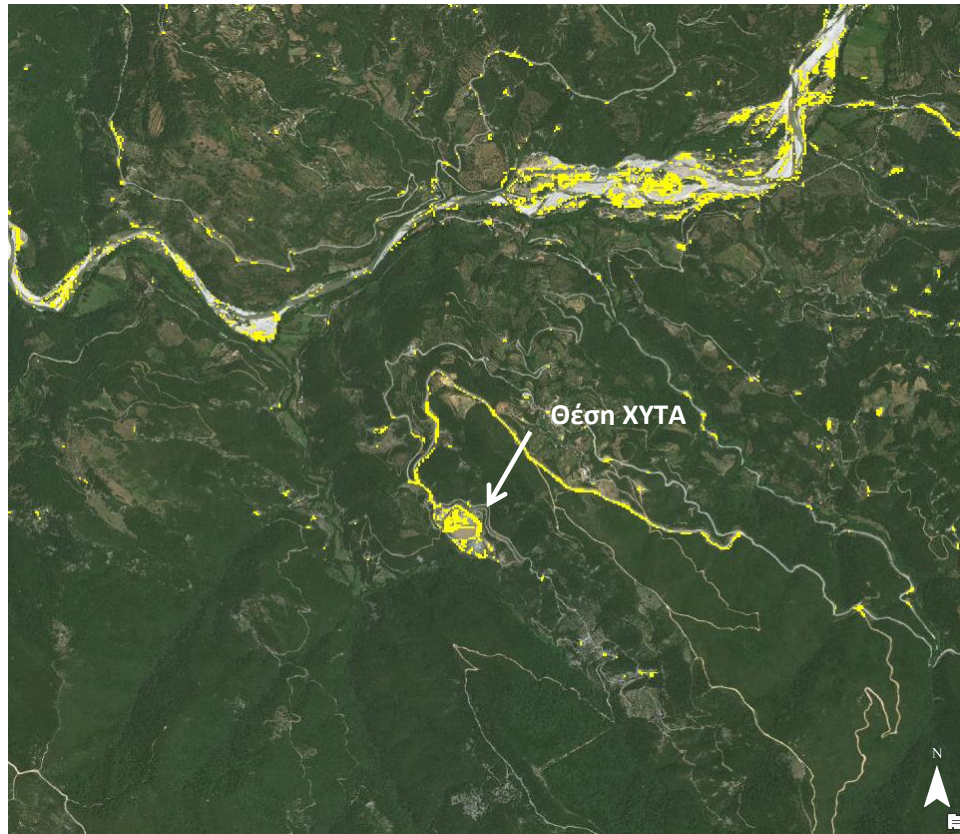
**Εικόνα 21: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο χαρτογράφου φασματικής γωνίας (SAM) (κατώφλι 0.078)**



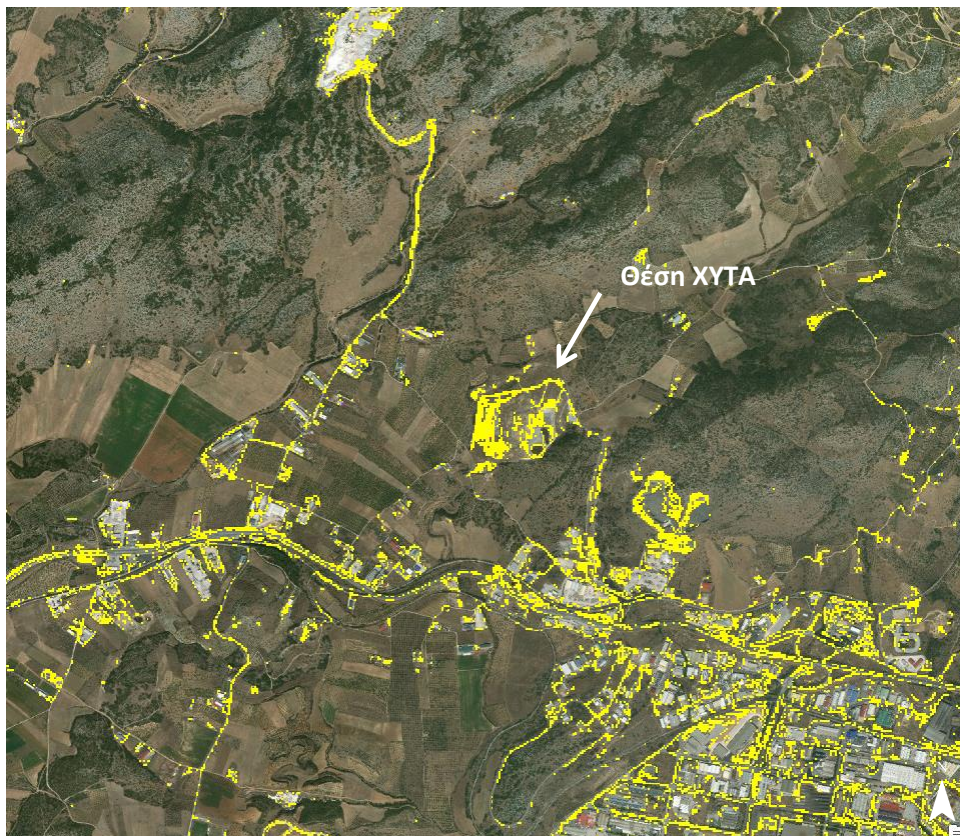
Εικόνα 22: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας



Εικόνα 23: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας



Εικόνα 24: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου



Εικόνα 25: Αποτελέσματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο SAM στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου

### 3.6 Καθορισμός ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα

Μετά την ταξινόμηση της πολυφασματικής εικόνας ακολουθεί η αξιοποίηση των δυνατοτήτων του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) ως εργαλείου διαχείρισης χωρικής πληροφορίας για την οριοθέτηση της επικρατέστερης περιοχής που είναι πιθανή η ύπαρξη χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, η οποία στα πλαίσια της παρούσας αναφέρεται ως «ζώνη εντοπισμού». Ο στόχος αυτού του μεθοδολογικού σταδίου είναι διττός, καθώς αποσκοπεί (α) στη μείωση της έκτασης της περιοχής μελέτης που ένας χρήστης ερευνά την περιβαλλοντική παραβατικότητα σε ότι αφορά ρυπασμένες εκτάσεις με αστικά στερεά απόβλητα, και (β) στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, ιδιαίτερα σε περιοχές που υφίστανται κατηγορίες κάλυψης γης με φασματικά χαρακτηριστικά παρόμοια με τις επιφάνειες αστικών στερεών αποβλήτων.

Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε χωρική ανάλυση της περιοχής μελέτης αξιοποιώντας το λογισμικό ArcGIS, το οποίο έχει αποδείξει ότι είναι ένα ισχυρό εργαλείο χωρικής επεξεργασίας και ανάλυσης και δύναται να διαχειριστεί ένα μεγάλο όγκο χωρικών δεδομένων.

Το βασικό κριτήριο καθορισμού της ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα ήταν η οδική προσβασιμότητα. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά χωρικά δεδομένα για τον αποκλεισμό κατηγοριών κάλυψης γης που δεν είναι δυνατή η παρουσία χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, όπως οι οικισμοί, οι βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες, το οδικό δίκτυο και άλλες τεχνητές υποδομές.

#### 3.6.1 Χωρικά δεδομένα

Τα βασικά χωρικά δεδομένα για τον καθορισμό της ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα ήταν τα δεδομένα του οδικού δικτύου της χώρας. Τα δεδομένα αυτά είναι ελεύθερα διαθέσιμα από το OpenStreetMap (OSM) και ελήφθησαν από τη διαδικτυακή διεύθυνση <http://download.geofabrik.de/europe/greece.html> για το 2017. Το OSM είναι μια συνεργατική προσπάθεια στα πρότυπα της Wikipedia, και έχει ως στόχο την δημιουργία ενός ελεύθεως προσβάσιμου περιβάλλοντος γεωχωρικών δεδομένων το οποίο επιτρέπει σε προγραμματιστές, χαρτογράφους κ.λ.π. να εκπληρώνουν τις διεργασίες που επιθυμούν, χωρίς να περιορίζονται από τους όρους χρήσης της. Το OSM έχει ελεύθερα δεδομένα που διατίθενται με άδεια Open Data Commons Open Database License (ODbL), τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς για οποιονδήποτε σκοπό, εφόσον μνημονευθεί το OpenStreetMap.

Επιπλέον, από το OSM για το έτος 2017 αποκτήθηκαν χωρικά δεδομένα σχετικά με τους οικισμούς, τις βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες, καθώς και άλλες κατηγορίες κάλυψης γης όπως πάρκινγκ, φάρμες, μαρίνες, και εκτάσεις του στρατού. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν οι κατηγορίες δεδομένων πολυγωνικής γεωμετρίας του πίνακα 21, των οποίων τα δεδομένα αριθμούν συνολικά 187 χιλιάδες οντότητες.

**Πίνακας 21: Επιλεγόμενες κατηγορίες OSM πολυγωνικής γεωμετρίας**

α/α	Κατηγορίες OSM πολυγωνικής γεωμετρίας
1	Building
2	Bus station
3	Cemetery
4	Commercial
5	Dum
6	Farm
7	Fuel
8	Hamlet
9	Industrial
10	Marina
11	Military
12	Park
13	Parking
14	Quarry
15	Recreation ground
16	Residential
17	Retail
18	Service
19	Town
20	Village

Συμπληρωματικά αξιοποιήθηκαν τα χωρικά δεδομένα πολυγωνικής γεωμετρίας του Corine Land Cover 2012 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>) σχετικά με τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης, εστιάζοντας αποκλειστικά στην κατηγορία τεχνητές επιφάνειες (artificial surfaces). Στον πίνακα 22 παρατίθενται οι κατηγορίες κάλυψης γης που χρησιμοποιήθηκαν:

**Πίνακας 22: Επιλεγόμενες κατηγορίες Corine Land Cover 2012 πολυγωνικής γεωμετρίας**

CLC CODE	LABEL1	LABEL2	LABEL3
111	Artificial surfaces	Urban fabric	Continuous urban fabric
112	Artificial surfaces	Urban fabric	Discontinuous urban fabric
121	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Industrial or commercial units
122	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Road and rail networks and associated land
123	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Port areas

CLC CODE	LABEL1	LABEL2	LABEL3
124	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Airports
131	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Mineral extraction sites
133	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Construction sites
141	Artificial surfaces	Artificial, non-agricultural vegetated areas	Green urban areas
142	Artificial surfaces	Artificial, non-agricultural vegetated areas	Sport and leisure facilities

Να σημειωθεί ότι σε ότι αφορά την κατηγορία ορυχεία/ λατομεία, πραγματοποιήθηκε προληπτικός έλεγχος τυχόν επικάλυψης χώρων διάθεσης αποβλήτων, νόμιμων ή μη, και όπου ήταν απαραίτητο έγιναν οι κατάλληλες διορθώσεις.

Για το χαρτογραφικό υπόβαθρο της εργασίας αναζητήθηκαν τα διοικητικά όρια των Περιφερειών και η ακτογραμμή της Ελλάδας από την ανοιχτή πηγή γεωχωρικών δεδομένων <http://geodata.gov.gr>. Στη διεύθυνση αυτή αναζητήθηκαν και τα χωρικά δεδομένα για το υδρογραφικό δίκτυο της χώρας, τα οποία είναι γραμμικής γεωμετρίας.

### 3.6.2 Χωρική ανάλυση

Ως στάδιο προεπεξεργασίας της χωρικής ανάλυσης ήταν ο μετασχηματισμός των χωρικών δεδομένων στο προβολικό σύστημα UTM zone 34 του συστήματος αναφοράς WGS 84, που είναι και το προβολικό σύστημα αναφοράς των εικόνων του Sentinel-2. Στη συνέχεια ακολούθησε η περικοπή τους στα όρια της περιοχής μελέτης. Ως βάση αναφοράς της περιοχής μελέτης αποτέλεσαν τα διοικητικά όρια των Περιφερειών της χώρας, αφού προηγουμένως έγινε κατάλληλη επεξεργασία για την απομόνωση του ηπειρωτικού τμήματος των πέντε Περιφερειών και ένωση των Περιφερειών.

Τα χωρικά δεδομένα διακρίνονται (α) στο οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, τα οποία είναι δεδομένα γραμμικής γεωμετρίας και (β) σε επιλεγμένες κατηγορίες κάλυψης γης τα οποία είναι δεδομένα πολυγωνικής γεωμετρίας.

Η χωρική ανάλυση που έλαβε χώρα για τον καθορισμό της ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα (εν συντομία αναφέρεται και ως ζώνη εντοπισμού) εξυπηρετεί δύο βασικά κριτήρια:

- (i) Την οδική προσβασιμότητα σε χώρους διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων. Ως πλέον κατάλληλη κατηγορία οδικού δικτύου που σχετίζεται με την πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων χώρων επιλέχθηκε η κατηγορία των επαρχιακών δρόμων (tertiary roads & tracks με βάση την ορολογία του OpenStreetMap). Για τον προσδιορισμό της οδικής προσβασιμότητας, επιλέχθηκε περιμετρική ζώνη (buffer zone) 300 μέτρων γύρω από τους επαρχιακούς δρόμους.



(ii) Τον αποκλεισμό κατηγοριών κάλυψης γης που δεν αναμένεται η παρουσία χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα. Οι κατηγορίες που επιλέχθηκαν αφορούν τεχνητές επιφάνειες και είναι:

- Οικισμοί (πόλεις, χωριά)
- Βιομηχανίες και ορυχεία
- Εμπορικά κέντρα και λοιπές υποδομές (π.χ. ΣΕΑ, parking, βενζινάδικα, σιδηροδρομικοί σταθμοί, φράγματα)
- Οδικό δίκτυο

Αρχικά δημιουργήθηκε buffer 300 m περιμετρικά του επαρχιακού οδικού δικτύου, το οποίο είχε προηγουμένως απομονωθεί από το οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης. Η περιμετρική ζώνη των 300 m αναφέρεται στη συνέχεια ως αρχική ζώνη εντοπισμού.

Στη συνέχεια ακολούθησε η ενοποίηση σε ένα αρχείο του συνόλου των δεδομένων πολυγωνικής γεωμετρίας που αφορούσε κατηγορίες κάλυψης γης στις οποίες δεν αναμένεται η παρουσία χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα. Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα γραμμικής γεωμετρίας για το οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, το οποίο αξιοποιείται ως ανεπιθύμητη κατηγορία κάλυψης γης, μετατράπηκαν σε δεδομένα πολυγωνικής γεωμετρίας με την επιβολή buffer των 10 m.

Το επόμενο στάδιο της χωρικής ανάλυσης ήταν ο αποκλεισμός των επιλεγμένων κατηγοριών κάλυψης γης μέσω της απαλοιφής της επιφανείας της αρχικής ζώνης εντοπισμού που επικαλύπτουν οι οντότητες των κατηγοριών αυτών.

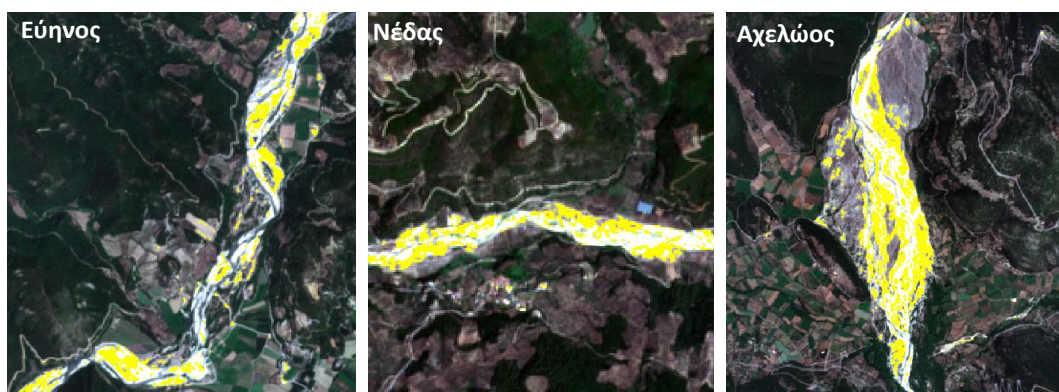
Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης φάνηκε ότι οι αμμώδεις ακτές εμφανίζουν κοντινά φασματικά χαρακτηριστικά με αυτά των επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα. Οι εκτάσεις αυτές καταλαμβάνουν ποσοστό της τάξης του 12-13% επί της ζώνης εντοπισμού (2.5-3% επί των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης). Για την απαλοιφή των αμμωδών ακτών από την ζώνη εντοπισμού χρησιμοποιήθηκε η ακτογραμμή της περιοχής μελέτης στην οποία περιμετρικά δημιουργήθηκε buffer 100 m. Να σημειωθεί ότι διαπιστώθηκαν σφάλματα ακρίβειας χαρτογραφικής απόδοσης των διαθέσιμων δεδομένων της ακτογραμμής σε κλίμακα μικρότερη του 1:100.000. Για το λόγο αυτό το buffer αυξήθηκε κατά 50 m.

Επιπλέον παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα της ταξινόμησης ότι εκτάσεις που φέρουν αμμοχάλικα έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με αυτά των επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα, με κύριες κοίτες ποταμών και χειμαρρικά ρέματα όταν υφίστανται αποθέσεις φερτών υλικών (άμμος, χάλικες, λίθοι, ιλύς). Δεν έγινε αντίστοιχη αφαίρεση επιφανειών ποταμών διότι υφίστανται ποικίλλες παραλλαγές του πλάτους των κοιτών των ποταμών, γεγονός που καθιστά μη αποτελεσματική τη χρήση ενός ενιαίου buffer για τον αποκλεισμό των ποταμών στο σύνολό τους. Μάλιστα η χρήση ενός ενιαίου buffer θα συμπεριλάμβανε περιοχές που δεν είναι τμήματα ποταμών, ενώ παραμένει πιθανό το ενδεχόμενο ύπαρξης χώρων ρυπασμένων με απόβλητα σε εγγύτητα με τις κοίτες ποταμών. Επιπλέον τα δεδομένα γραμμικής γεωμετρίας του υδρογραφικού δικτύου που ήταν διαθέσιμα αποδίδονται σε κλίμακα μικρότερη του 1:50000, με αποτέλεσμα να υφίστανται σημαντικές αποκλίσεις της απόδοσης των ποταμών σε μεγαλύτερη κλίμακα. Πραγματοποιήθηκε όμως έλεγχος της ζώνης εντοπισμού για την αποτίμηση των κοιτών

ποταμών που φέρουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με επιφάνειες αστικών στερεών αποβλήτων. Ο έλεγχος περιλάμβανε αρχικά τη χαρτογράφηση των κοιτών που υφίστανται αποθέσεις εντός της ζώνης εντοπισμού σε κλίμακα 1:10000. Οι ποταμοί που καταγράφηκαν τμήματα κοιτών με αποθέσεις φερτών υλικών αριθμούν τους 57 (βλέπε πίνακα 23). Οι εκτάσεις αυτές που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα καταλαμβάνουν ποσοστό της τάξης του 11-12% επί της ζώνης εντοπισμού (2-2.5% επί των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης).

**Πίνακας 23: Ποτάμια που έχουν κοίτες με αποθέσεις που έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με επιφάνεια αστικών στερεών αποβλήτων**

α/α	Όνομασία ποταμού	α/α	Όνομασία ποταμού
1	ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ Π.	25	ΛΕΣΚΟΒΙΤΙΚΟ Ρ.
2	ΑΛΑΡΓΙΝΟ Ρ.	26	ΛΗΔΑΣ Π. ΞΕΡΙΑΣ
3	ΑΛΦΕΙΟΣ Π.	27	ΜΕΓΑΝΕΙΤΑΣ Ρ.
4	ΑΡΑΧΘΟΣ Π.	28	ΜΟΡΝΟΣ Π.
5	ΑΣΩΠΟΣ Π.	29	ΝΕΔΑ Π.
6	ΑΧΕΛΩΟΣ Π.	30	ΝΗΛΕΥΣ Π.
7	ΒΕΛΙΚΑ Ρ.	31	ΞΕΡΙΑΣ Π.
8	ΒΙΣΤΡΙΤΣΑ Ρ.	32	ΞΕΡΙΑΣ Ρ.
9	ΒΟΛΙΝΑΙΟΣ Ρ.	33	ΞΕΡΙΛΑΣ Ρ.
10	ΒΟΥΡΑΪΚΟΣ Π.	34	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ
11	ΓΙΡΜΑΝΔΙΤΗΣ Ρ.	35	ΠΑΡΑΠΕΙΡΟΣ Ρ.
12	ΓΛΑΥΚΟΣ Π.	36	ΠΕΙΡΟΣ Π.
13	ΕΡΥΜΑΝΘΟΣ Π.	37	ΠΗΝΕΙΟΣ Π.
14	ΕΥΗΝΟΣ Π.	38	ΡΑΙΖΑΝΗ Ρ.
15	ΕΥΡΩΤΑΣ Π.	39	ΡΕΤΣΑΝΟΡΕΜΑ
16	ΖΕΡΒΑΣ Ρ.	40	ΣΚΙΤΣΑ Ρ.
17	ΙΝΑΧΟΣ Π.	41	ΣΠΕΡΧΕΙΟΣ Π. (ΑΛΑΜΑΝΑ)
18	ΚΕΡΥΝΙΤΗΣ Ρ.	42	ΤΑΝΟΣ Π.
19	ΚΛΕΙΝΟΒΙΤΙΚΟΣ Π.	43	ΤΑΥΡΩΠΟΣ Π.
20	ΚΟΥΜΠΟΥΡΓΙΑΝΙΤΙΚΟ Ρ.	44	ΤΙΤΑΡΗΣΙΟΣ Π.
21	ΚΡΑΘΙΣ Π.	45	ΦΟΥΡΝΙΑ Ρ.
22	ΚΡΙΘΑΡΟΡΡΕΜΑ	46	ΧΑΡΑΔΡΟΣ Ρ. (ΒΕΛΒΙΤΣΑΝΟΣ)
23	ΚΡΙΚΕΛΙΩΤΗΣ Ρ.	47	ΠΟΡΤΑΚΙΟΣ Π.
24	ΛΑΔΩΝ ΠΗΝΕΙΑΙΟΣ Π.	48-57	Άγνωστο όνομα



**Εικόνα 26: Κοίτες ποταμών με παρόμοια φασματική απόκριση με εκτάσεις αστικών στερεών αποβλήτων**

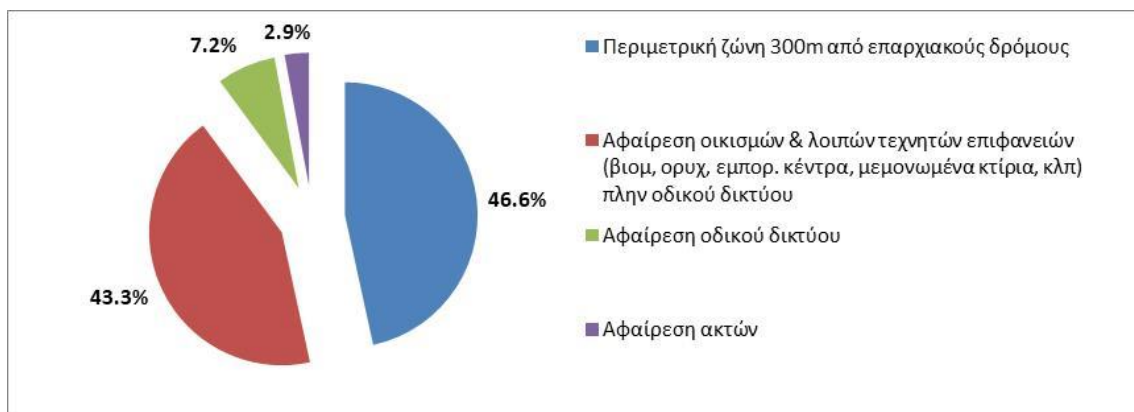
Το τελικό στάδιο της χωρικής ανάλυσης ήταν η εφαρμογή του εργαλείου «Extract by polygon» του ArcGIS στα αποτελέσματα της ταξινόμησης της περιοχής μελέτης με τον αλγόριθμο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου στον οποίο είχε τεθεί φασματικό εύρος η ελάχιστη μέση τιμή και η μέγιστη τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα (βλέπε πίνακα 18). Τα αποτελέσματα μετά την εξαγωγή της ζώνης εντοπισμού παρατίθενται στον πίνακα 24, όπου φαίνεται ότι μειώθηκε η συμπερίληψη ανεπιθύμητων κατηγοριών κάλυψης γης κατά 82.5% επί των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.

**Πίνακας 24: Αποτελέσματα ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού**

Στάδια	Περιοχή μελέτης (pixel)	Κατηγορία αστικά στερεά απόβλητα (pixel)	% μείωση συμπερίληψης επί των αποτελεσμάτων ταξινόμησης	% μείωση συμπερίληψης επί της περιοχής μελέτης
<b>Ταξινόμηση εικόνας</b> <i>(εφαρμογή αλγόριθμου παραλληλεπίπεδου, με φασματικό εύρος την ελάχιστη μέση τιμή και τη μέγιστη τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας αστικά στερεά απόβλητα)</i>	589,211,285	2,727,064	-	99.54%
<b>Αρχική ζώνη εντοπισμού</b> <i>(buffer 300m από επαρχιακούς δρόμους)</i>		1,678,949	38.43%	99.72%
<b>Ζώνη εντοπισμού</b> <i>(buffer 300m από επαρχιακούς δρόμους &amp; αποκλεισμός επιλεγμένων κατηγοριών κάλυψης γης)</i>		477,269	82.50%	99.92%

Στο σχήμα 26 παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης της εικόνας της περιοχής μελέτης των επιμέρους κριτηρίων που εφαρμόστηκαν στην χωρική ανάλυση για τον καθορισμό της ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η εφαρμογή ζώνης περιμετρικά των επαρχιακών δρόμων βελτίωσε σε παραπλήσιο ποσοστό (~47%) τα αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν με την αφαίρεση επιφανειών κατηγοριών κάλυψης γης που δεν αναμένεται η παρουσία χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα (~53%).

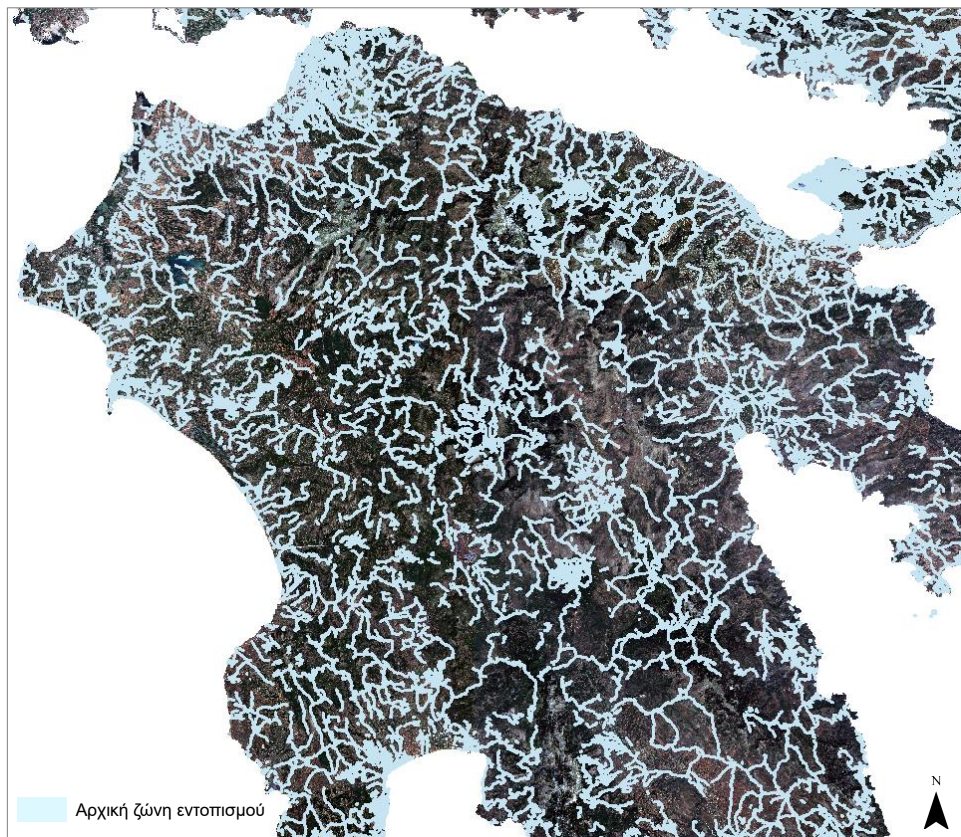


**Σχήμα 26: Βαθμός συμμετοχής στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης των επιμέρους κριτηρίων προσδιορισμού ζώνης εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα**

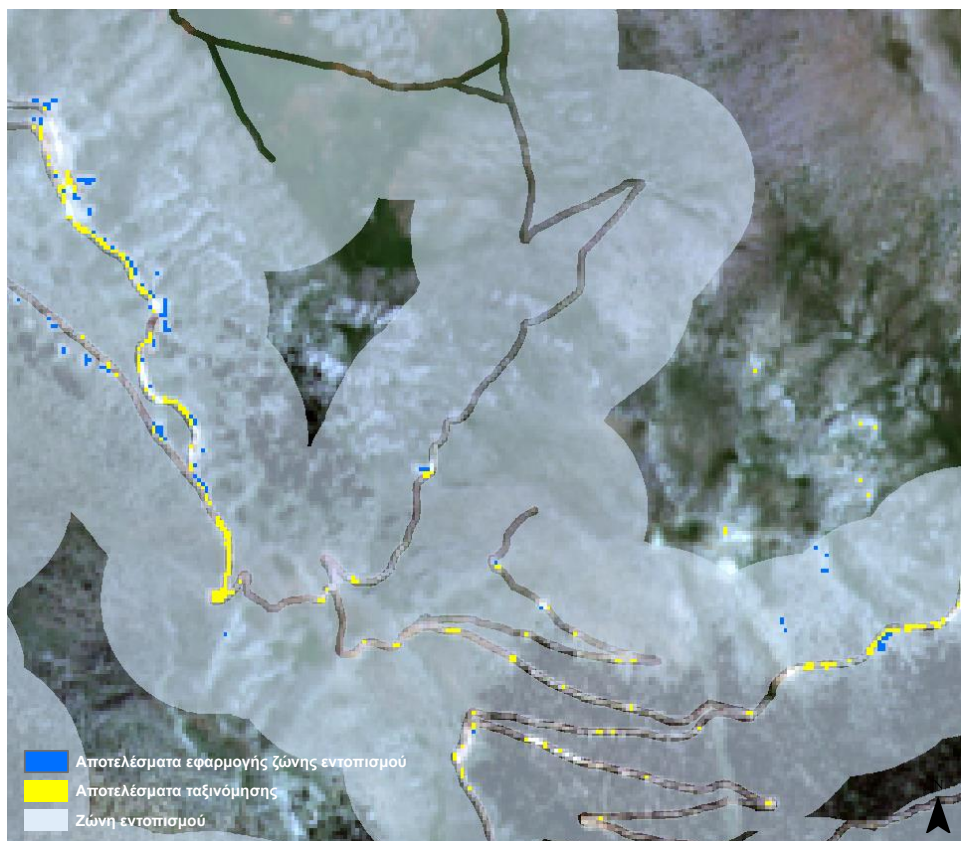
Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται εποπτικά σε υπόβαθρο της World Imagery η δημιουργία ζώνης 300 m περιμετρικά επαρχιακών δρόμων, που αναφέρεται ως αρχική ζώνη εντοπισμού. Στις εικόνες 28-30 δίνονται παραδείγματα απομόνωσης ανεπιθύμητων κατηγοριών κάλυψης γης, όπως οικισμοί, δρόμοι και ακτές, αξιοποιώντας τα ελεύθερα χωρικά δεδομένα του OpenStreetMap και Corine Land Cover 2012.

Στις εικόνες 31-34 παρουσιάζονται με μπλε χρώμα τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή της ζώνης εντοπισμού στις περιοχές τεσσάρων χώρων υγειονομικής αστικών στερεών αποβλήτων σε υπόβαθρο της World Imagery, στις οποίες είναι εμφανώς σημειωμένη η θέση των χώρων.

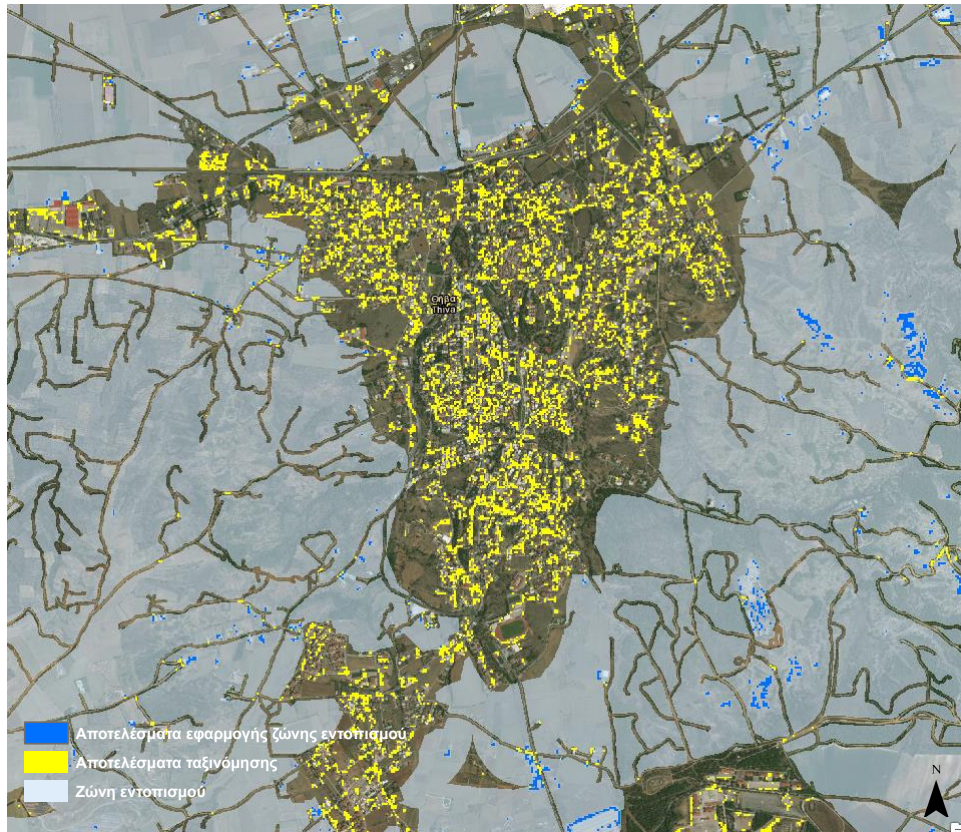
Για τη συγκριτική αξιολόγηση με το πρώτο μεθοδολογικό βήμα που ήταν η ταξινόμηση της εικόνας με τον αλγόριθμο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, στις εικόνες παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα τα αποτελέσματα της ταξινόμησης της εικόνας που απαλείφονται μετά την εφαρμογή της ζώνης εντοπισμού.



Εικόνα 27: Αρχική ζώνη εντοπισμού – Πελοπόννησος



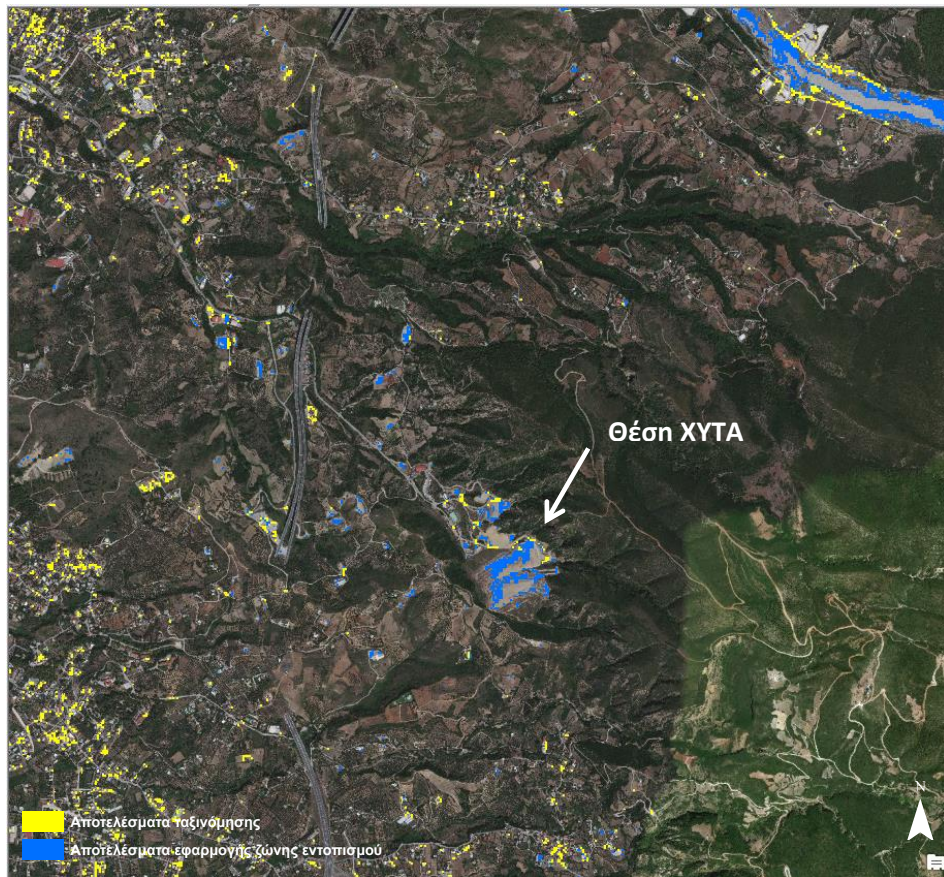
Εικόνα 28: Ζώνη εντοπισμού, απομόνωση οδικού δικτύου – παράδειγμα περιοχής Γκιώνας



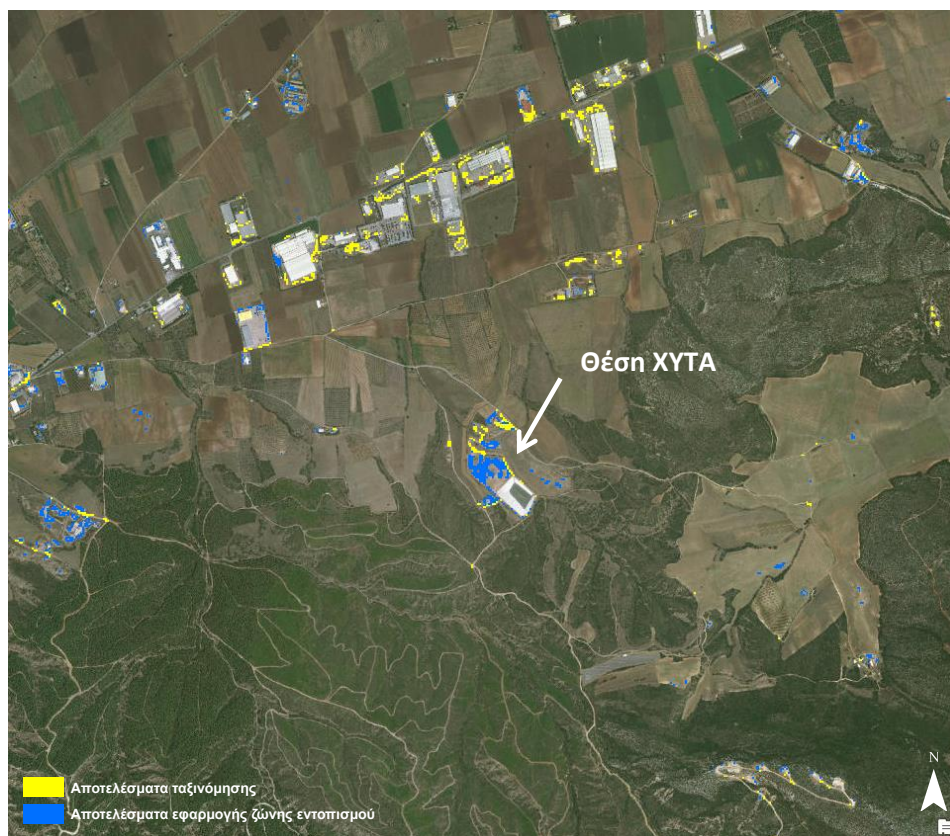
Εικόνα 29: Ζώνη εντοπισμού, απομόνωση οικισμών – παράδειγμα πόλης Θήβας



Εικόνα 30: Ζώνη εντοπισμού, απομόνωση αμμωδών ακτών – παράδειγμα περιοχής Ζαχάρω



Εικόνα 31: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας



Εικόνα 32: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας



Εικόνα 33: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου



Εικόνα 34: Αποτελέσματα εφαρμογής ζώνης εντοπισμού στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου



### 3.7 Εφαρμογή φασματικών δεικτών

Η εφαρμογή φασματικών δεικτών αποτελεί το τελικό στάδιο ανάλυσης για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης και έχει στόχο τη μείωση κατά το δυνατό της φασματικής σύγχυσης που προκαλείται από κατηγορίες κάλυψης γης που εμφανίζουν να έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με αυτά των εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα.

Οι φασματικοί δείκτες κατά κανόνα χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν ποσοτικά ένα βιοφυσικό φαινόμενο και ειδικότερα στα πλαίσια της παρούσας εφαρμόζονται για την ανάδειξη μη επιθυμητών τύπων κάλυψης γης και την απομάκρυνσή τους στη συνέχεια με την εφαρμογή κατάλληλων κατωφλίων.

Συγκεκριμένα, η εφαρμογή φασματικών δεικτών εστίασε στην ανάδειξη των παρακάτω κατηγοριών κάλυψης γης, οι οποίες έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με επιφάνειες αστικών στερεών αποβλήτων, όπως προέκυψαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης:

- (i) Αδιαπέρατες επιφάνειες (αστικός ιστός, δρόμοι)
- (ii) Γυμνό έδαφος
- (iii) Επιφάνειες με αμμοχάλικα (πχ κοίτες ποταμών)
- (iv) Εκτάσεις με πλώδη βλάστηση, χορτολίβαδα

Οι δείκτες που επιλέχθηκαν για δοκιμές επικεντρώνονται στον διαχωρισμό των παραπάνω κατηγοριών και κατασκευάστηκαν στο λογισμικό ArcGIS χρησιμοποιώντας τη χαρτογραφική άλγεβρα (Raster calculator). Δοκιμάστηκαν τουλάχιστον 25 δείκτες, οι περισσότεροι από τους οποίους ήταν δείκτες εδάφους (soil indices), όπως αυτοί συγκεντρωτικά παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4 της παρούσας.

Βάσει της αξιολόγησης των δοκιμών, επιλέχθηκαν 5 βασικοί δείκτες, οι οποίοι διαπιστώθηκε ότι είχαν τις μεγαλύτερες επιδόσεις και τη μικρότερη δυνατή επικάλυψη μεταξύ τους, και αξιοποιήθηκαν επιπρόσθετα 8 δείκτες για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων (βλέπε πίνακα 25).

Το εύρος τιμών εφαρμογής των δεικτών υπολογίστηκε με βάση τα δείγματα αναφοράς επιφανειών με αστικά απόβλητα στους χώρους υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων.

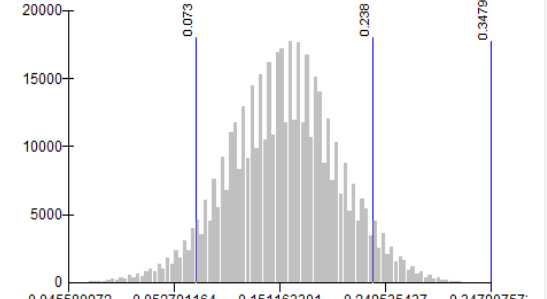
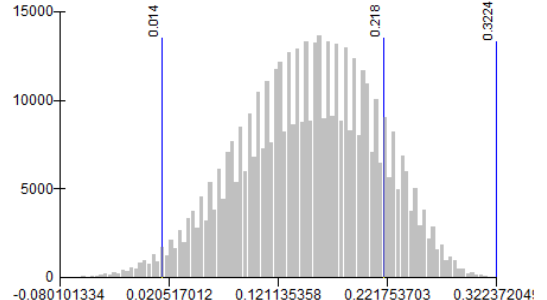
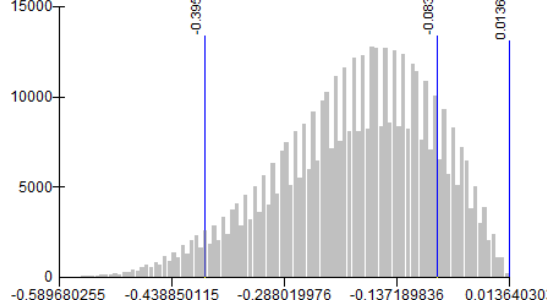
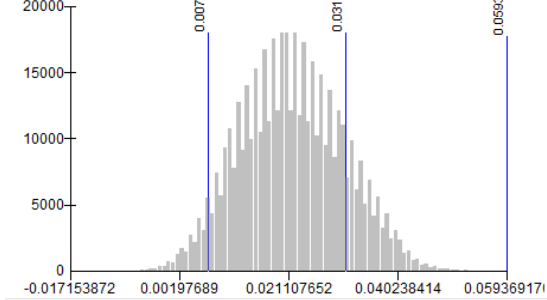
Να σημειωθεί ότι κρίθηκε απαραίτητη η χρήση του θερμικού τμήματος του φάσματος για την εφαρμογή ορισμένων φασματικών δεικτών που βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας φαίνεται ότι συντελούν αποτελεσματικά στο διαχωρισμό κατηγοριών εδαφοκάλυψης που παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς το βαθμό εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, ενώ έχουν παρόμοια φασματική απόκριση στα υπόλοιπα μήκη κύματος της πολυφασματικής εικόνας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η χρήση του θερμικού καναλιού 10 του δορυφόρου Landsat 8, που χρησιμοποιήθηκε μετά από κατάλληλη προεπεξεργασία (βλέπε ενότητα 3.3.3). Για τους δείκτες που χρησιμοποιούν το θερμικό κανάλι, οι τιμές των καναλιών του Sentinel-2 (πχ εγγύς και μέσο υπέρυθρο) είναι Top of Atmosphere Reflectance. Πράγματι, με βάση τα αποτελέσματα των

δοκιμών, θεωρήθηκε απαραίτητη η αξιοποίηση δύο δεικτών που χρησιμοποιούν το θερμικό κανάλι, ο  $T_{bres}$  (Brightness Temperature Index) και ο NDBI (Normalized Difference Bareness Index).

Πίνακας 25: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών

Δείκτης	Κατανομή δείκτη στη ζώνη εντοπισμού	Εύρος τιμών δείκτη για επιφάνειες με αστικά στερεά απόβλητα	% μείωση συμπερίληψης επί των αποτελεσμάτων ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού
MSAVI		0.032 - 0.130	25%
NMDI		0.524-0.717	34%
Tbres		0.672 - 0.808	38%
Mean diff. scene (Blue)		0.112 - 0.180	26%

Δείκτης	Κατανομή δείκτη στη ζώνη εντοπισμού	Εύρος τιμών δείκτη για επιφάνειες με αστικά στερεά απόβλητα	% μείωση συμπερίληψης επί των αποτελεσμάτων ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού
NDBI		0 - 0.146	15%
NDBaI		(-0.956) - (-0.942)	17%
NDBBBI		(-0.390) - (-0.186)	17%
NDSI		(-0.319) - (-0.166)	21%
NDSDI		(-0.146) - 0.103	16%

Δείκτης	Κατανομή δείκτη στη ζώνη εντοπισμού	Εύρος τιμών δείκτη για επιφάνειες με αστικά στερεά απόβλητα	% μείωση συμπερίληψης επί των αποτελεσμάτων ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού
CI		0.073 - 0.238	11%
NDSI2		0.014 - 0.218	16%
REI		(-0.395) - (-0.083)	21%
PGI		0.007 - 0.031	22%

Οι δείκτες εφαρμόζονται στα αποτελέσματα της ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού. Η εφαρμογή των δεικτών MSAVI και NMDI διαχωρίζει τα εικονοστοιχεία άλλων κατηγοριών εδαφοκάλυψης κατά 50%, και με την εφαρμογή του  $T_{bres}$  η αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού αυξάνεται κατά πολύ και ανέρχεται στο 70%. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή του Mean Diff to Scene στο μπλε κανάλι και του NDBI, η μείωση της συμπερίληψης αγγίζει το 80%, ενώ με την αξιοποίηση των υπόλοιπων δεικτών φτάνει στο 87.4%. Η δυνατότητα διαχωρισμού με την αξιοποίηση επιπρόσθετων δεικτών μειώνεται κατά πολύ λόγω επικαλύψεων μεταξύ τους.

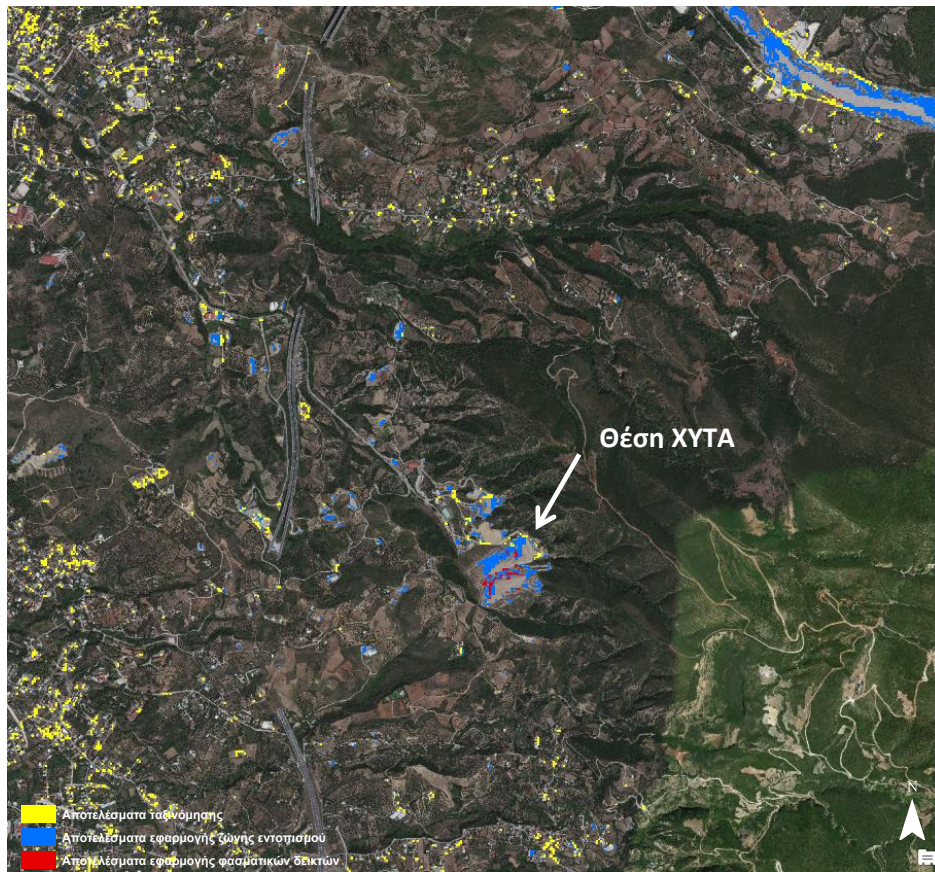
Στον πίνακα 26 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των τεχνικών ανάλυσης που εφαρμόστηκαν για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα.

**Πίνακας 26: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τεχνικών ανάλυσης που εφαρμόστηκαν για τον εντοπισμό χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα**

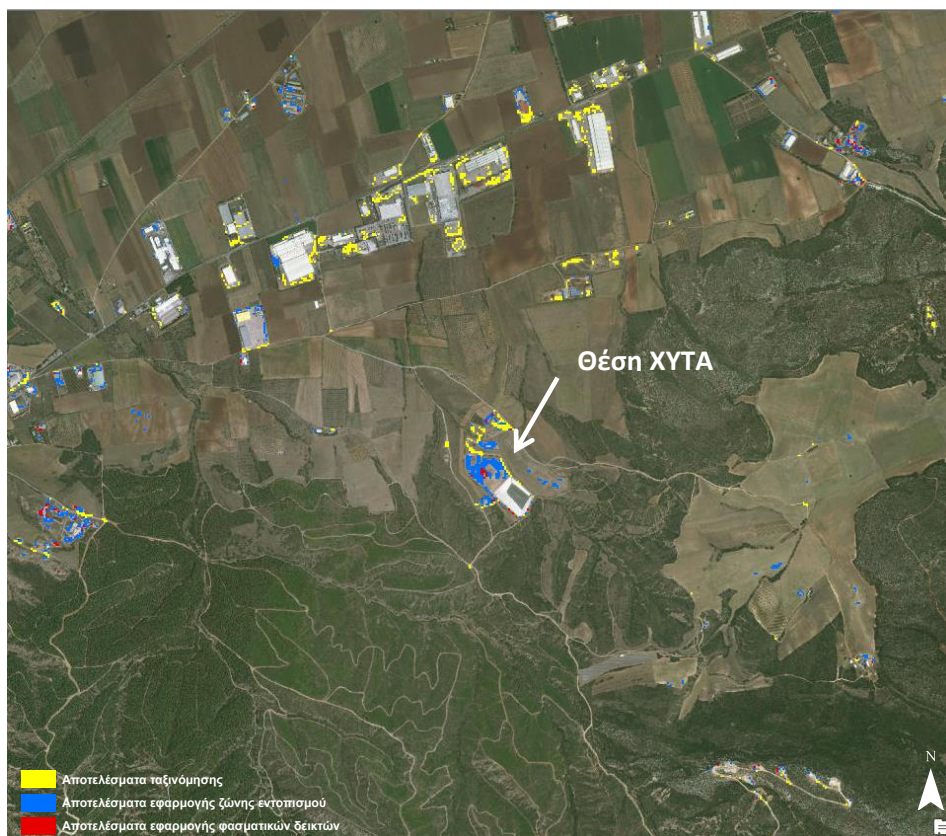
Στάδιο	pixel	% μείωση συμπερίληψης κατηγορίας που περιλαμβάνει το σύνολο των ειδών εδαφοκάλυψης πλην των εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα		
		στην περιοχή μελέτης	στα αποτελέσματα ταξινόμησης	στα αποτελέσματα ταξινόμησης στη ζώνη εντοπισμού
Περιοχή μελέτης	589,211,285			
1-Ταξινόμηση εικόνας (εφαρμογή αλγόριθμου παραλληλεπίπεδου)	2,727,064	99.54%	-	-
2- Εφαρμογή ζώνης εντοπισμού	477,269	99.92%	82.50%	-
3- Εφαρμογή φασματικών δεικτών	<b>59,945</b>	<b>99.99%</b>	<b>97.80%</b>	<b>87.40%</b>

Στις εικόνες 35-38 παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή των φασματικών δεικτών στις περιοχές τεσσάρων χώρων υγειονομικής αστικών στερεών αποβλήτων σε υπόβαθρο της World Imagery, στις οποίες είναι εμφανώς σημειωμένη η θέση των χώρων.

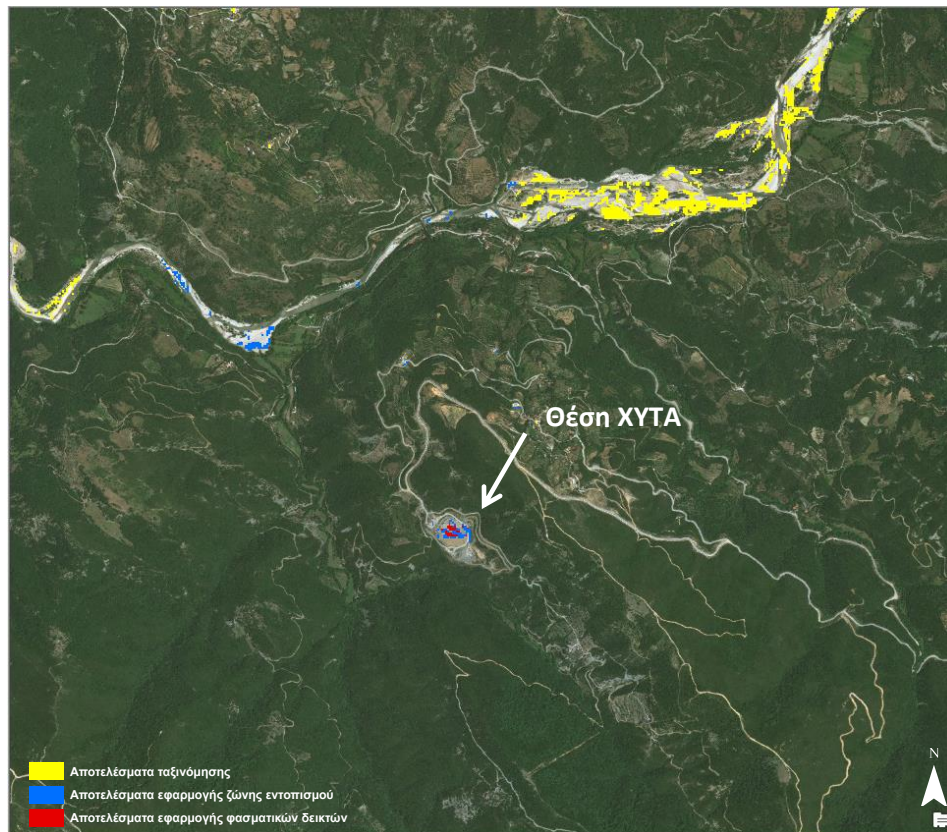
Για τη συγκριτική αξιολόγηση με τα προηγούμενα μεθοδολογικά βήματα εντοπισμού, στις εικόνες παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα τα αποτελέσματα της αρχικής ταξινόμησης της εικόνας, τα οποία απαλείφονται μετά την εφαρμογή της ζώνης εντοπισμού και των φασματικών δεικτών και με μπλε χρώμα τα αποτελέσματα της εφαρμογής ζώνης εντοπισμού τα οποία απαλείφονται με την εφαρμογή των φασματικών δεικτών.



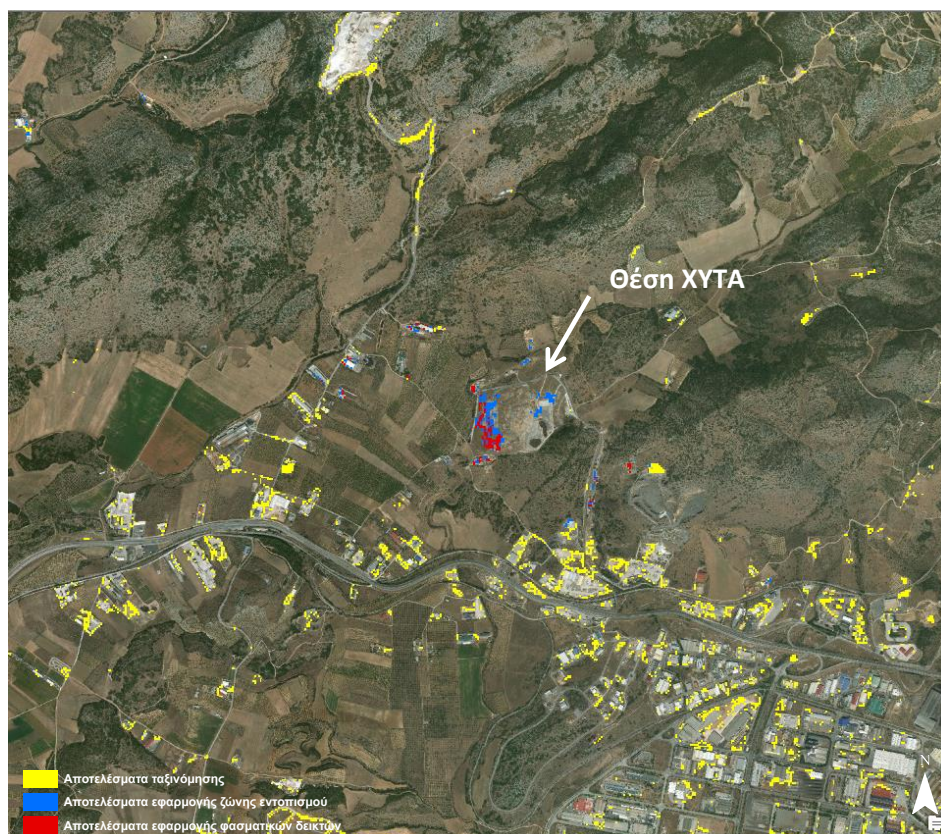
Εικόνα 35: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας



Εικόνα 36: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας



Εικόνα 37: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου



Εικόνα 38: Αποτελέσματα εφαρμογής φασματικών δεικτών στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου

### 3.8 Παρουσίαση τελικών αποτελεσμάτων εντοπισμού χώρων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα

Τα τελικά αποτελέσματα της εργασίας στις περιοχές που είναι εγκαταστημένοι οι 10 ΧΥΤΑ, οι οποίοι αποτέλεσαν τα δείγματα αναφοράς, παρουσιάζονται στις εικόνες 39-48 σε υπόβαθρο της Google Earth. Στην εικόνα 49 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα στις περιοχές 6 ΧΥΤΑ που δεν χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα αναφοράς\*.

Σε ότι αφορά τους χώρους ανεξέλεγκτης διάθεσης, η εικόνα 50 δείχνει τα τελικά αποτελέσματα για τους ΧΑΔΑ που υφίσταται παρουσία αστικών στερεών αποβλήτων (ενεργούς ή ανενεργούς μη αποκατεστημένους), που είχε πραγματοποιηθεί με φωτοερμηνεία εικόνων του Google Earth κατά το δυνατό στην περίοδο λήψης των δορυφορικών εικόνων Sentinel-2.

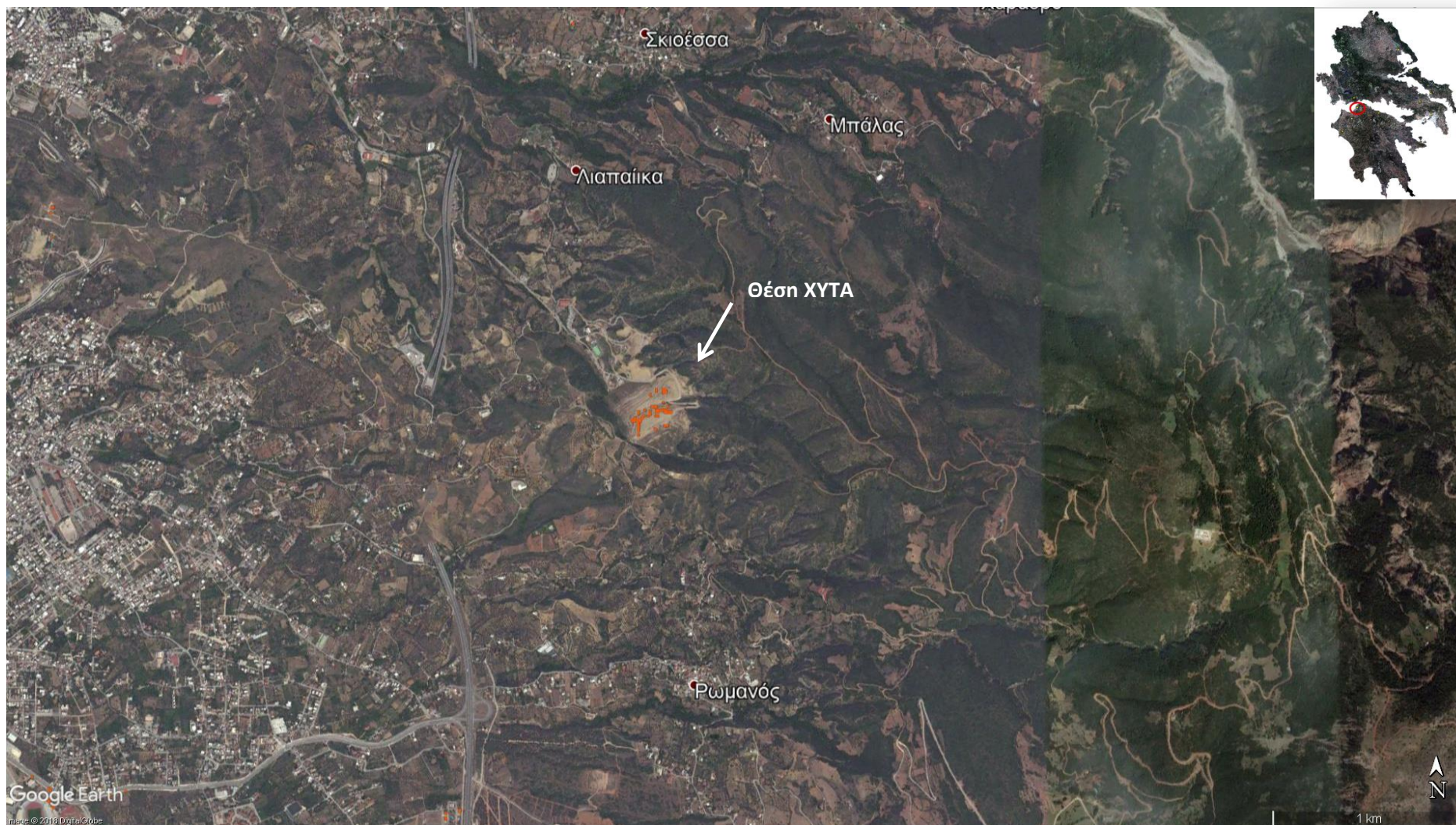
Τα αποτελέσματα στο σύνολο των εικόνων είναι σημειωμένα με κόκκινο χρώμα.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ήταν επιτυχής ο εντοπισμός του συνόλου των χώρων διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων, νόμιμων και μη νόμιμων. Παραταύτα δεν μπόρεσαν να απαλειφθούν πλήρως επιφάνειες άλλων κατηγοριών κάλυψης γης που εμφανίζουν να έχουν την ίδια φασματική απόκριση με τις επιφάνειες που καλύπτονται από αστικά στερεά απόβλητα. Το πρόβλημα αυτό εντείνεται κυρίως σε ορισμένα είδη γυμνού εδάφους (βλέπε εικόνες 40, 41, 45 και 46), καθώς και στις κοίτες ποταμών που φέρουν φερτά υλικά και ξεροχειμάρρους (βλέπε εικόνες 47 και 48).

---

\* Να σημειωθεί ότι οι εκτάσεις που καλύπτουν 4 από τους καταγεγραμμένους 20 ΧΥΤΑ αφαιρέθηκαν κατά την εφαρμογή της ζώνης εντοπισμού επειδή δεν υπήρχαν επαρχιακοί δρόμοι ή δεν ήταν καταγεγραμμένοι κοντά στους εν λόγω ΧΥΤΑ στα δεδομένα του οδικού δικτύου του OpenStreetMap.

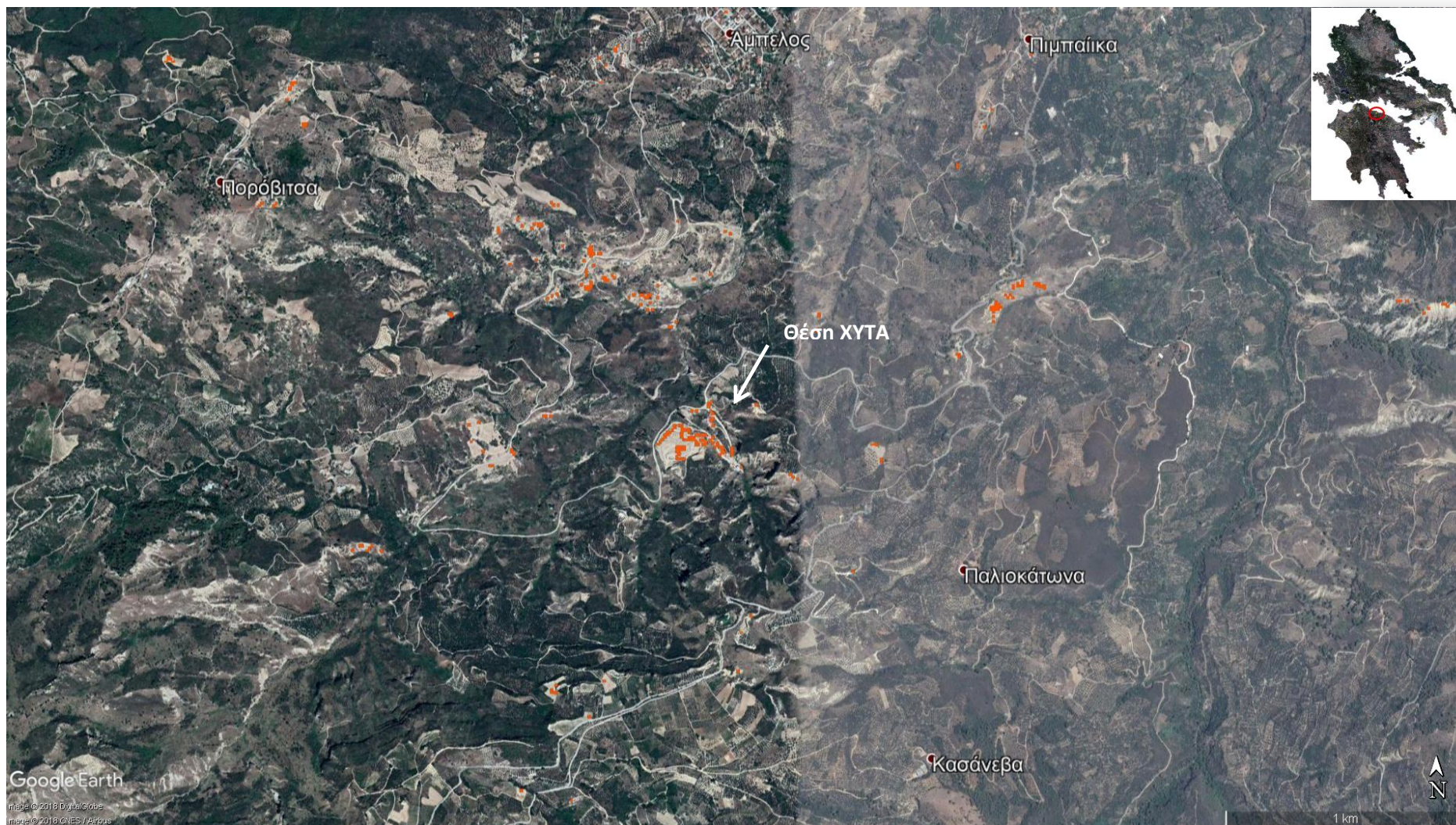




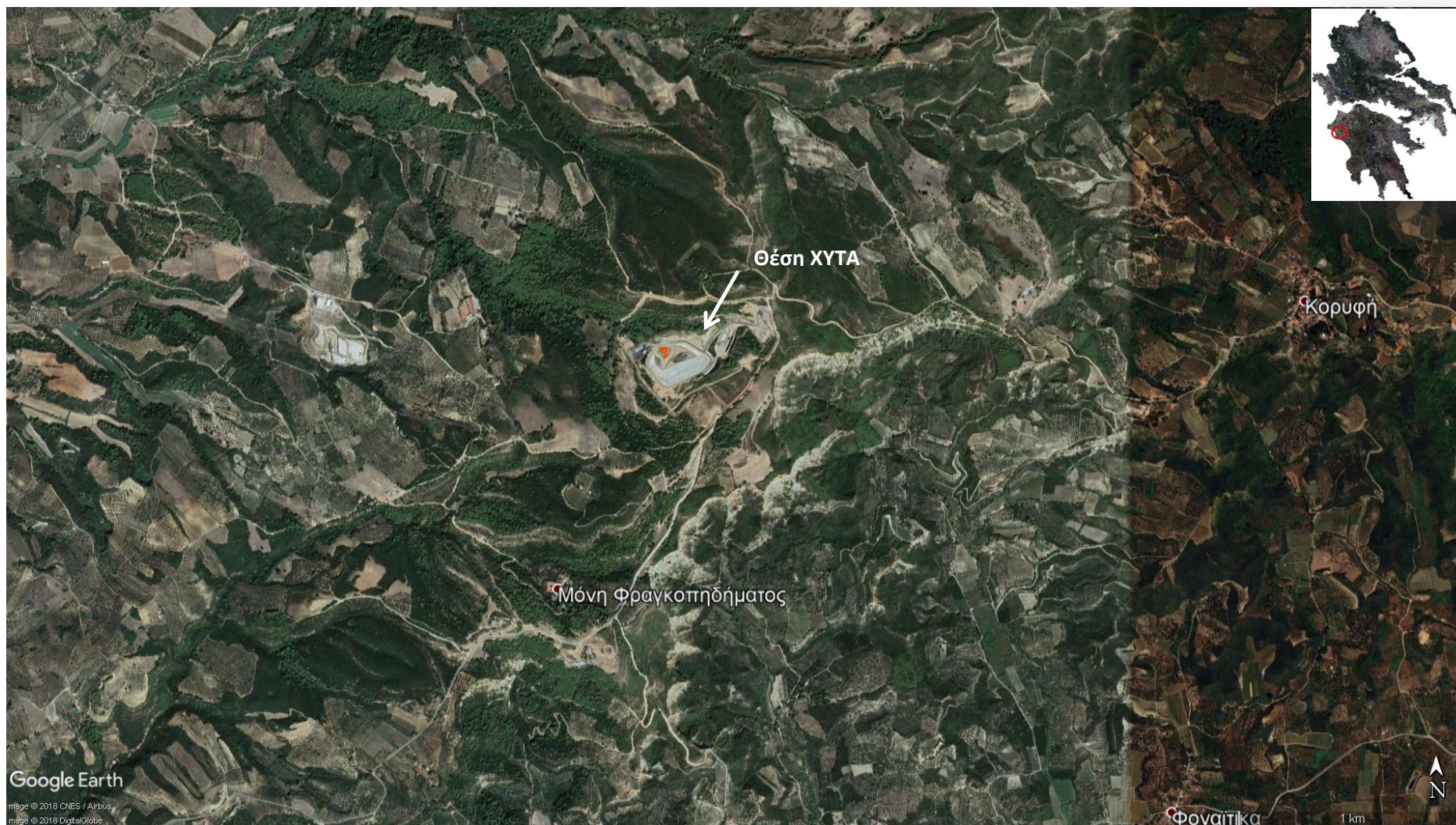
Εικόνα 39: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Πάτρας



Εικόνα 40: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Δυτικής Αχαΐας



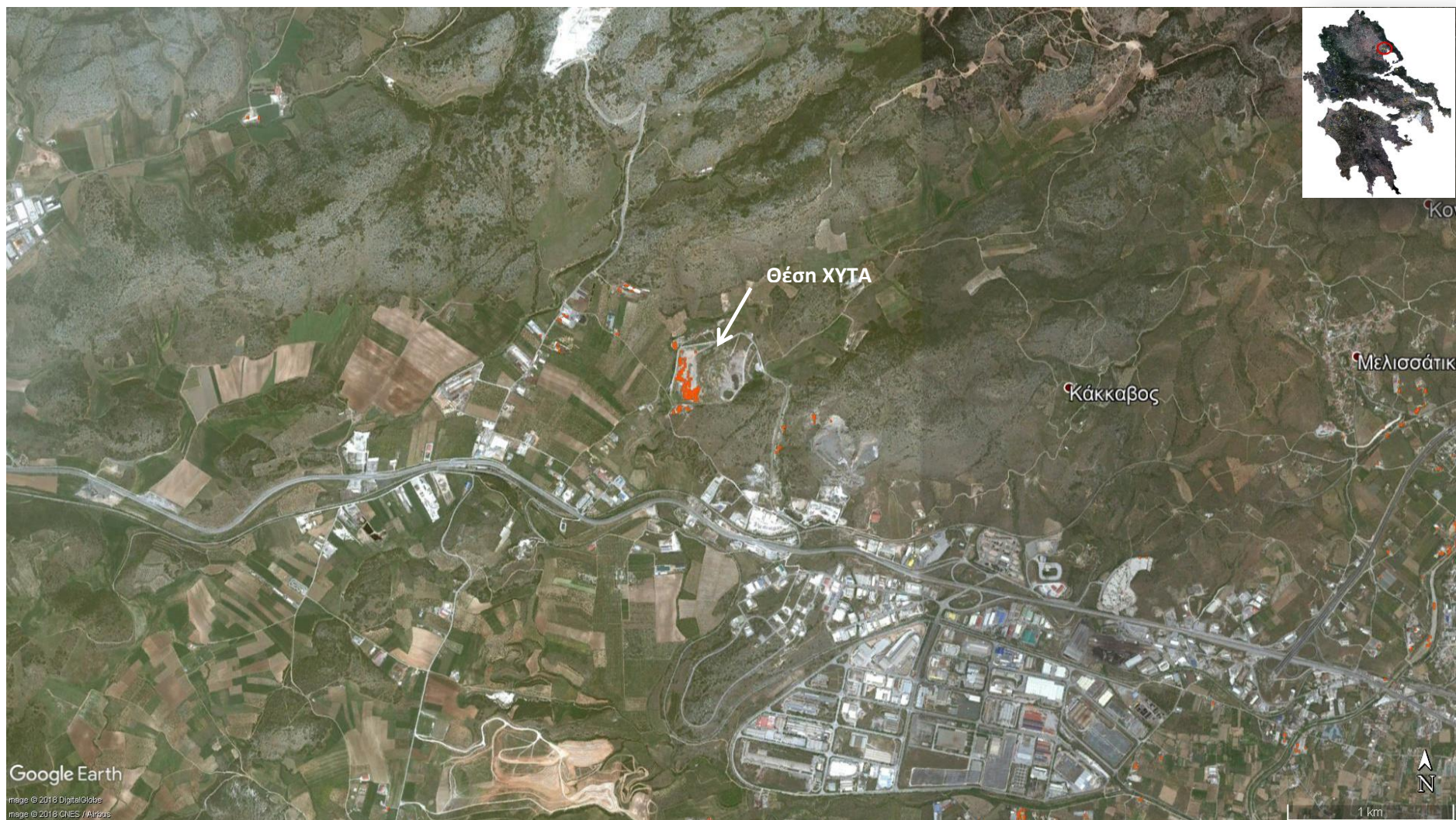
Εικόνα 41: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ανατολικής Αιγιαλείας (Αιγείρας)



Εικόνα 42: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ηλείας (Τριανταφυλλιάς)



Εικόνα 43: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ναυπάκτου



Εικόνα 44: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Βόλου

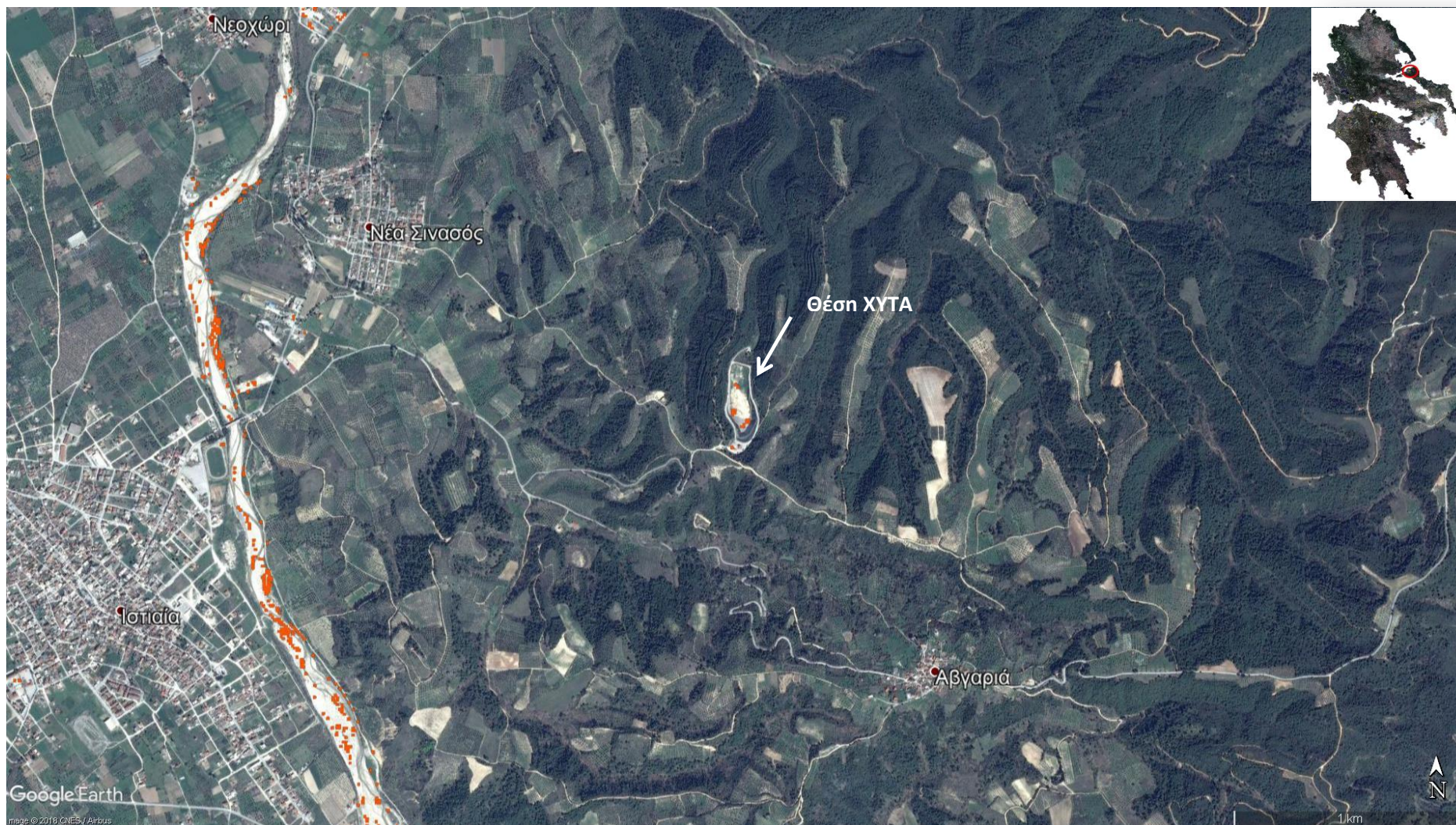


Εικόνα 45: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής

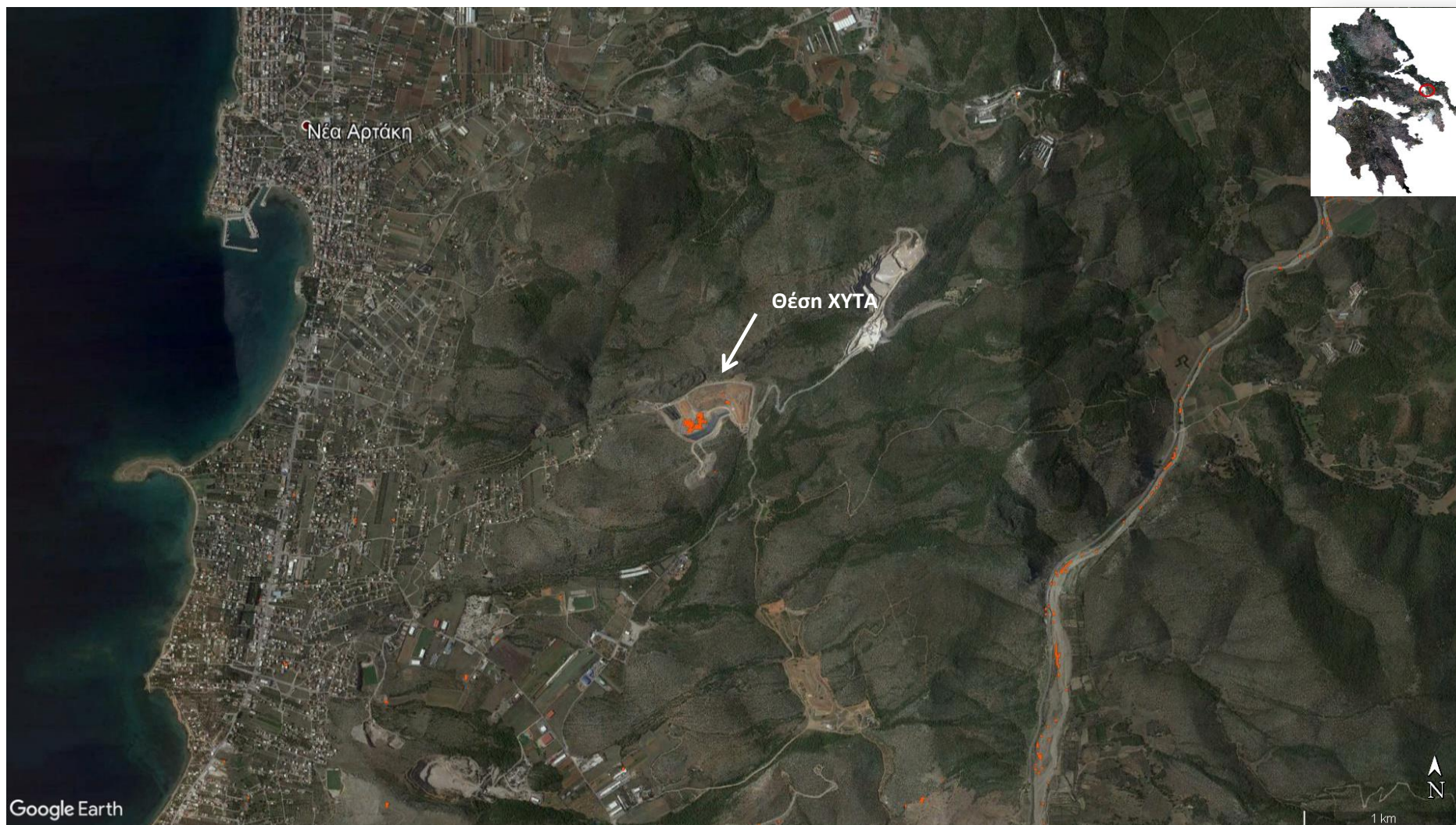


Εικόνα 46: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Θήβας





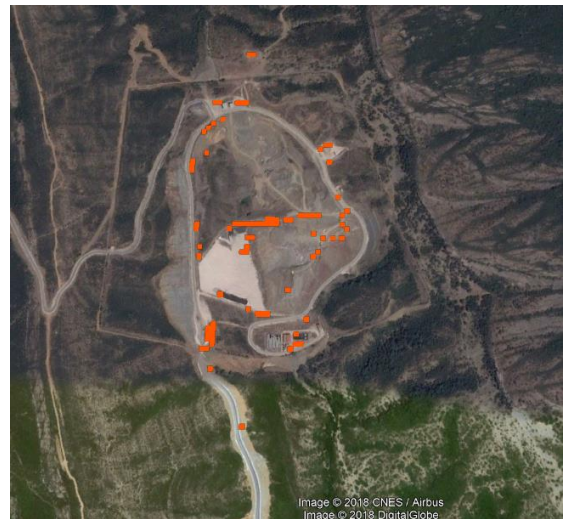
Εικόνα 47: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Ιστιαίας



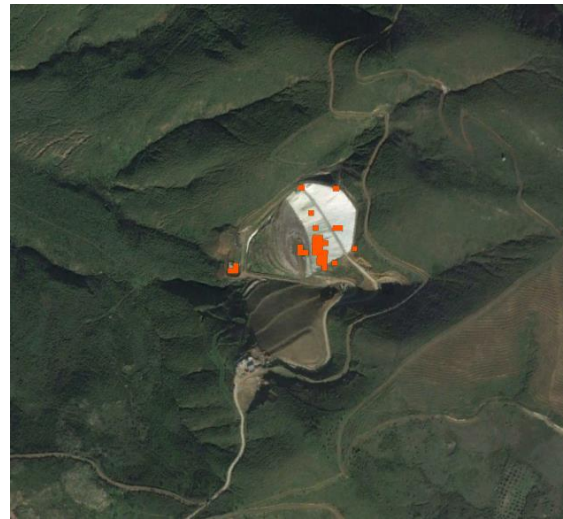
Εικόνα 48: Τελικά αποτελέσματα στην περιοχή ΧΥΤΑ Χαλκίδας



ΧΥΤΑ Μεσολογγίου



ΧΥΤΑ Στράτου



ΧΥΤΑ Λειβαδιάς



ΧΥΤΑ Λαμίας



ΧΥΤΑ Νότιου Πηλίου



ΧΥΤΑ Τρικάλων - Καρδίτσας

Εικόνα 49: Τελικά αποτελέσματα σε ΧΥΤΑ που δεν χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα αναφοράς



Εικόνα 50: Τελικά αποτελέσματα ΧΑΔΑ που υφίσταται παρουσία αστικών στερεών αποβλήτων

### 3.9 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τους καθιερωμένους δείκτες ποιότητας: Πληρότητα (completeness), Ορθότητα (correctness) και Ολική Ποιότητα (overall quality).

Η πληρότητα προσδιορίζει το ποσοστό των δεδομένων ελέγχου που έχουν ανιχνευθεί από την ταξινόμηση, η ορθότητα το ποσοστό των δεδομένων ελέγχου που έχουν ανιχνευθεί σωστά και η ποιότητα προσδιορίζει ένα γενικευμένο που συνδυάζει τις μετρήσεις για την πληρότητα και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Η πληρότητα των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε στην έκταση που καταλαμβάνουν τα απόβλητα στους ΧΥΤΑ βάσει φωτοερμηνείας των εικόνων Google Earth.

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε στη συνολική έκταση των ΧΥΤΑ. Τα εικονοστοιχεία που ανιχνεύουν την έκταση που καταλαμβάνουν τα απόβλητα λαμβάνονται ως True Positive (TP), ενώ εικονοστοιχεία που ανιχνεύουν τον υπόλοιπο ενεργό χώρο του ΧΥΤΑ λαμβάνονται ως False Positive (FP).

Στον πίνακα 27 παρατίθενται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 27: Αποτελέσματα αξιολόγησης αποτελεσμάτων**

Δεδομένα ελέγχου	Δείκτης Πληρότητας	Δείκτης Ορθότητας	Δείκτης Ολικής Ποιότητας
Δείγματα ΧΥΤΑ	74.2%	58.1%	49.2%

Από τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι ενώ ο βαθμός πληρότητας είναι ικανοποιητικός, η ορθότητα των αποτελεσμάτων είναι μερικώς ικανοποιητική παρά τον αποκλεισμό ανεπιθύμητων κατηγοριών κάλυψης γης και τη χρήση ενός εκτενούς πακέτου φασματικών δεικτών για τη μείωση της φασματικής σύγχυσης.

Οι κύριοι λόγοι που η ορθότητα των αποτελεσμάτων είναι μέτρια είναι οι εξής:

- Υφίσταται αβεβαιότητα στη φωτοερμηνεία των εικόνων Google Earth διότι η ημερομηνία λήψης των εικόνων δεν συμπίπτει απόλυτα με την ημερομηνία λήψης των δορυφορικών εικόνων.
- Ο ενεργός χώρος των ΧΥΤΑ ενδεχομένως έχει διάσπαρτα αστικά στερεά απόβλητα μη ορατά με φωτοερμηνεία με αποτέλεσμα να υφίσταται αβεβαιότητα ως προς τα εικονοστοιχεία που λαμβάνονται ως False Positive. Αυτό το επιχείρημα ενισχύεται από το γεγονός ότι σχεδόν σε όλα τα δείγματα δεν υφίστανται εικονοστοιχεία False Positive εκτός του χώρου διάθεσης σε ακτίνα τουλάχιστον 300 m.
- Η περιοχή μελέτης είναι μεγάλη σε έκταση και περιλαμβάνει πολλές υποκατηγορίες εδαφοκάλυψης με αποτέλεσμα να δυσχεραίνει κατά πολύ η αποτελεσματικότητα

διαχωρισμού εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα από άλλες κατηγορίες εδαφοκάλυψης όπως το γυμνό έδαφος. Η συνδυαστική χρήση αλγόριθμων ταξινόμησης και φασματικών δεικτών είναι δυνατά εργαλεία διαχωρισμού κατηγοριών εδαφοκάλυψης, αλλά έχουν πεπερασμένες δυνατότητες διαχωρισμού σε μεγάλες εκτάσεις, όπως η περιοχή μελέτης (58921 km<sup>2</sup>).

- Η αξιοποίηση άλλων αλγόριθμων ταξινόμησης ή/και φασματικών δεικτών είναι πιθανό να βελτιώσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Σε ότι αφορά την πληρότητα των αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι ο εντοπισμός εκτάσεων που υφίσταται παρουσία αστικών στερεών αποβλήτων δεν αφορά την αποτύπωση και χαρτογράφηση της συνολικής έκτασης που καταλαμβάνουν τα αστικά στερεά απόβλητα, τα τελικά αποτελέσματα εξυπηρετούν ικανοποιητικά το αντικείμενο και σκοπό της εργασίας.

Σε ότι αφορά γενικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, πλέον της ακρίβειας της φωτοερμηνείας των εικόνων, υφίσταται αβεβαιότητα της ποιότητας της δειγματοληψίας κι επομένως της φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα για τους παρακάτω επιπλέον λόγους:

- (iii) Η ετερογένεια των αστικών στερεών αποβλήτων
- (iv) Η δυσκολία οριοθέτησης επιφανειών με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα σε σχέση με την εδαφική κάλυψη του χώρου διάθεσης
- (v) Η ύπαρξη μικτών εικονοστοιχείων (κυρίως με την κατηγορία εδάφους)
- (vi) Οι σκιάσεις λόγω κλίσεων της μάζας των αποβλήτων ή/και του εδάφους

Ο διαχωρισμός των εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα από τις αδιαπέρατες επιφάνειες δεν είναι απαραίτητος να πραγματοποιηθεί με τηλεπισκοπικά δεδομένα, καθώς μπορεί να επιλυθεί με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω της αξιοποίησης τεχνικών χωρικής ανάλυσης και τη χρήση αξιόπιστων χωρικών δεδομένων, όπως αυτών του Κτηματολογίου (όρια οικισμών, δρόμοι, βιομηχανίες, κλπ).

Η συνεργιστική χρήση της τηλεπισκόπησης είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο, καθώς παρέχει τη δυνατότητα γρήγορου εντοπισμού χώρων δυνητικά ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, κυρίως σε ημι-φυσικές περιοχές, όταν δεν απαιτούνται υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και προσπάθεια έναντι της απλής φωτοερμηνείας δορυφορικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών.

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε η χρησιμότητα των δεδομένων της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2, τα οποία είναι ελεύθερα διαθέσιμα τηλεπισκοπικά δεδομένα, για τον εντοπισμό εκτάσεων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα. Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε ήταν η χρήση τεχνικών ανάλυσης της τηλεπισκόπησης σε περιβάλλον GIS, μέσω της επιβλεπόμενης ταξινόμησης και της εφαρμογής φασματικών δεικτών, σε συνδυασμό με την χωρική ανάλυση συμπληρωματικών χωρικών δεδομένων από άλλες ελεύθερα διαθέσιμες πηγές για τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Κατά τη διαδικασία εκπόνησης της εργασίας προέκυψαν ορισμένα βασικά συμπεράσματα, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

Ένας χώρος που είναι ρυπασμένος με αστικά στερεά απόβλητα θα πρέπει να είναι ικανής έκτασης για τον εντοπισμό του μέσω δορυφορικών εικόνων που είναι ελεύθερα διαθέσιμες στην αγορά. Επειδή η επιφάνεια που αναμένεται να καλύπτεται με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα αναμένεται να είναι μικρή, είναι αναγκαστικά απαραίτητη η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων υψηλής κατά το δυνατό χωρικής ανάλυσης. Ειδικότερα, η χρήση των πολυφασματικών εικόνων του Sentinel-2, που είναι χωρικής ανάλυσης 10 m/pixel, ενδείκνυται για τον εντοπισμό οντοτήτων τουλάχιστον της τάξης των 20 m x 20 m. Επομένως οι εικόνες αυτές είναι ικανής χωρικής ανάλυσης για τον εντοπισμό ρυπασμένων χώρων που έχουν σχετικά μεγάλες επιφάνειες με αστικά στερεά απόβλητα, όπως είναι οι νόμιμοι χώροι διάθεσης, οι οποίοι αποτέλεσαν και τα δείγματα αναφοράς για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

Η αντιπροσωπευτικότητα και η ποιότητα της δειγματοληψίας είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στην ταξινόμηση αφού ουσιαστικά καθορίζει την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Γενικά ισχύει ο κανόνας ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των δειγμάτων μιας κατηγορίας τόσο καλύτερος είναι και ο καθορισμός των φασματικών χαρακτηριστικών της κατηγορίας. Στην περίπτωση της παρούσας, ο αριθμός και η θέση των νόμιμων χώρων διάθεσης που αποτέλεσαν τα δείγματα αναφοράς καθόρισαν και την έκταση της περιοχής μελέτης, που ήταν οι πέντε περιφέρειες της χώρας.

Η ημερομηνία λήψης του δείγματος θα πρέπει κατά το δυνατόν να συμπίπτει με την ημερομηνία λήψης της δορυφορικής εικόνας, ιδίως σε μεγάλους χώρους υγειονομικής ταφής που το μέτωπο ταφής μεταβάλλεται διαρκώς, για την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων δειγματοληψίας κι επομένως εσφαλμένου καθορισμού των φασματικών χαρακτηριστικών εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα. Η δειγματοληψία στην παρούσα έγινε με φωτοερμηνεία εκτάσεων με αμιγώς αστικά στερεά απόβλητα από εικόνες της Google Earth κοντινής κατά το δυνατόν ημερομηνίας με την ημερομηνία λήψης των δορυφορικών εικόνων του Sentinel-2, που είχε ως αποτέλεσμα να περιοριστεί ο αριθμός των δειγμάτων στους 10 από τους διαθέσιμους 20 χώρους νόμιμης διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων. Η λήψη δειγμάτων αναφοράς από συστηματικές μετρήσεις πεδίου σε ικανό αριθμό χώρων διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων, σε συνδυασμό με τα ίδια τα δεδομένα των τηλεπισκοπικών εικόνων, αναμένεται να μειώσουν την αβεβαιότητα της δειγματοληψίας μέσω φωτοερμηνείας και θα βελτιώσουν κατά πολύ την ακρίβεια της φασματικής υπογραφής των εκτάσεων που καταλαμβάνουν αμιγώς τα αστικά στερεά απόβλητα.

Για δορυφορικές εικόνες χωρικής ανάλυσης των 10 m υφίστανται αναγκαστικά μικτά εικονοστοιχεία στο δείγμα που επηρεάζουν αρνητικά το διαχωρισμό εκτάσεων με απόβλητα από κατηγορίες κάλυψης γης που παρουσιάζουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά, όπως το γυμνό έδαφος. Η επιλεκτική χρήση εικονοστοιχείων που να αξιολογούνται ως «καθαρά» εικονοστοιχεία δύναται να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού. Σε κάθε περίπτωση η λήψη δείγματος από τη συνολική επιφάνεια του χώρου διάθεσης αποβλήτων και όχι από την επιφάνεια που καταλαμβάνει η μάζα των αποβλήτων δυσχεραίνει κατά πολύ την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού. Ως εκ τούτου η δυνατότητα εντοπισμού μικρών εκτάσεων με διάσπαρτα αστικά στερεά απόβλητα δεν κρίνεται εφικτή με τηλεπισκοπικά δεδομένα με χωρική ανάλυση 10 m.

Για τη διάκριση της έκτασης που καταλαμβάνεται από αστικά στερεά απόβλητα από άλλες κατηγορίες κάλυψης γης πραγματοποιήθηκε επιβλεπόμενη ταξινόμηση με τρεις αλγόριθμους: τον αλγόριθμο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, τον αλγόριθμο της ευκλείδειας απόστασης και τον αλγόριθμο του χαρτογράφου φασματικής γωνίας. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των τριών αλγορίθμων, κρίθηκαν πιο ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, στον οποίο εφαρμόστηκε παραλλαγή του φασματικού εύρους, που καθορίστηκε με την ελάχιστη μέση και τη μέγιστη τιμή της φασματικής υπογραφής της κατηγορίας των επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα. Ο λόγος που η ταξινόμηση με τον αλγόριθμο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου ήταν πιο αποτελεσματική φαίνεται να είναι το γεγονός ότι λαμβάνεται υπόψη η διακύμανση των τιμών των φασματικών δεδομένων.

Να σημειωθεί ότι η επιβλεπόμενη ταξινόμηση περιλαμβάνει και άλλες μεθόδους ή συνδυασμό αυτών, όπως η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας και τα νευρωνικά δίκτυα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξαιτίας της ανάγκης διαχείρισης μεγάλου όγκου τηλεπισκοπικών δεδομένων, το διαθέσιμο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ArcGIS, το οποίο και ουσιαστικά καθόρισε τις μεθόδους ταξινόμησης που κατασκευάστηκαν με το εργαλείο της χαρτογραφικής άλγεβρας. Η χρήση λογισμικών πακέτων πιο εξειδικευμένων σε τεχνικές ανάλυσης της τηλεπισκόπησης ενδεχομένως θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα κατά την ταξινόμηση της εικόνας για την ανάδειξη εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα.

Η ταξινόμηση της εικόνας με τον αλγόριθμο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου επιτυγχάνει διαχωρισμό των ανεπιθύμητων επιφανειών κάλυψης γης σε ποσοστό 99.5%. Παρά το υψηλό ποσοστό διαχωρισμού, υφίσταται αναμφισβήτητα μη αποτελεσματικός διαχωρισμός των αδιαπέρατων επιφανειών (αστικός ιστός, δρόμοι), του γυμνού εδάφους και εκτάσεων με αμμοχάλικα (πχ κοίτες ποταμών, αμμουδιές), καθώς και, αν και σε μικρότερο βαθμό, χερσότοπων και εκτάσεων πλώδους βλάστησης (καλλιεργούμενες ή μη). Σαφής διαχωρισμός πραγματοποιείται για τις κατηγορίες βλάστηση και ύδατα.

Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων του GIS για την ανάλυση συμπληρωματικών χωρικών δεδομένων φάνηκε ότι είναι καθοριστικής σημασίας για τη μείωση της έκτασης της περιοχής μελέτης που ερευνάται η περιβαλλοντική παραβατικότητα σε ότι αφορά ρυπασμένες εκτάσεις με αστικά στερεά απόβλητα, συμβάλλοντας παράλληλα στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, ιδιαίτερα σε περιοχές που υφίστανται κατηγορίες κάλυψης γης με φασματικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά των εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα. Η χρήση των



ελεύθερα διαθέσιμων χωρικών δεδομένων κάλυψης γης του OpenStreetMap 2017 και Corine Land Cover 2012 κατέστησε δυνατή τη μείωση της συμπερίληψης ανεπιθύμητων ειδών εδαφοκάλυψης κατά τουλάχιστον 80%, που αφορά κυρίως τεχνητές επιφάνειες. Η αξιοποίηση στο εγγύς μέλλον των χωρικών δεδομένων του Κτηματολογίου, που θα είναι πληρέστερα ως προς την κατηγορία τεχνητές επιφάνειες, αναμένεται να βελτιώσει κατά πολύ τα αποτελέσματα εντοπισμού. Ομοίως θα ήταν θεμιτή, αν ήταν διαθέσιμη, η χρήση χαρτογραφημένων επιφανειών των εσωτερικών υδάτων (ποταμών και λιμνών) πολυγωνικής γεωμετρίας, καθώς και των αμμωδών ακτών, δεδομένου ότι συνιστούν τουλάχιστον το 5% των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ταξινόμηση με την εφαρμογή του αλγορίθμου του παραλληλεπίπεδου.

Να σημειωθεί εδώ ότι ο εντοπισμός αποθέσεων αποβλήτων αστικού τύπου σε κοίτες ποταμών δεν είναι ρεαλιστικά εφικτός με τηλεπισκοπικά δεδομένα χωρικής ανάλυσης των 10 m, διότι οι επιφάνειες με φερτά υλικά των ποταμών και ξεροχειμάρρων εμφανίζει παραπλήσια φασματική απόκριση με αυτή των επιφανειών που καταλαμβάνουν τα αστικά στερεά απόβλητα. Ενδεχομένως το πρόβλημα αυτό να δύναται να αντιμετωπιστεί με τηλεπισκοπικά δεδομένα υψηλότερης χωρικής ή/ και φασματικής ανάλυσης που αναμένεται να βελτιώσουν τον προσδιορισμό της φασματικής υπογραφής εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα.

Στα πλαίσια της παρούσας ήταν διαθέσιμη η χρήση πολυφασματικών εικόνων. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου αξιοποιήθηκαν τα 4 βασικά κανάλια του ορατού φάσματος (μπλε, πράσινο και κόκκινο κανάλι), το εγγύς υπέρυθρο και τα 2 κανάλια του μέσου υπέρυθρου τμήματος του φάσματος. Το μπλε και πράσινο κανάλι και τα μέσα υπέρυθρα κανάλια φάνηκε ότι είναι τα πλέον σημαντικά για τη διάκριση επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα από επιφάνειες άλλων κατηγοριών κάλυψης γης.

Η εφαρμογή φασματικών δεικτών, που αποτέλεσε το τελικό στάδιο των χρησιμοποιούμενων τεχνικών ανάλυσης, διαπιστώθηκε ότι είναι μια απαραίτητη διαδικασία για τη μείωση της φασματικής σύγχυσης εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα με άλλα είδη εδαφοκάλυψης και φάνηκε ότι συνεισφέρει σημαντικά στη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης. Τα είδη δεικτών που είναι απαραίτητα θα πρέπει να επικεντρώνονται στην ανάδειξη αδιαπέρατων επιφανειών, του γυμνού εδάφους και των εκτάσεων με χαμηλή βλάστηση.

Να σημειωθεί ότι για την εφαρμογή ορισμένων φασματικών δεικτών κρίθηκε απαραίτητη η χρήση του θερμικού τμήματος του φάσματος για την ανάδειξη επιφανειών που παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς το βαθμό εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, ενώ έχουν παρόμοια φασματική απόκριση στα υπόλοιπα μήκη κύματος της πολυφασματικής εικόνας. Για το λόγο αυτό αξιοποιήθηκε το θερμικό κανάλι 10 του δορυφόρου Landsat 8.

Οι φασματικοί δείκτες που είχαν τη μεγαλύτερη επίδοση ήταν οι  $T_{bres}$  και NMDI που διαχωρίζουν εικονοστοιχεία ανεπιθύμητων κατηγοριών εδαφοκάλυψης σε ποσοστό 38% και 34% αντίστοιχα. Με τη συνδυαστική χρήση 5 δεικτών:  $T_{bres}$ , NMDI, Mean Diff Scene (Blue), MSAVI και NDBI, το ποσοστό διαχωρισμού ανεπιθύμητων κατηγοριών εδαφοκάλυψης ανέρχεται στο 80%. Η αξιοποίηση επιπρόσθετων δεικτών μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού στο 85-88%.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, διαφαίνεται ότι η εφαρμογή των φασματικών δεικτών ενώ βελτίωσε σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, η διάκριση

επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα από ορισμένα είδη εδαφοκάλυψης, και κυρίως το γυμνό έδαφος, είναι μερικώς ικανοποιητική.

Σε εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν ενδείκνυται η χρήση πολυφασματικών εικόνων για το διαχωρισμό εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα, τουλάχιστον για χωρική διακριτική ικανότητα 10 m. Όμως, σε εφαρμογές που δεν είναι αναγκαία υψηλή ακρίβεια, όπως σε ένα σώμα περιβαλλοντικής επιθεώρησης και ελέγχου, η χρήση της τηλεπισκόπησης είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για τον γρήγορο εντοπισμό χώρων δυνητικά ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, έναντι της απλής φωτοερμηνείας. Η αποτελεσματικότητα αλλά και η ακρίβεια εντοπισμού δύναται να βελτιωθεί όταν η εφαρμογή των εργαλείων ταξινόμησης και των φασματικών δεικτών εξειδικευτεί σε περιοχές μικρότερης έκτασης, όπως σε επίπεδο περιφερειακής ενότητας ή σε επίπεδο δήμου. Σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαία ενδελεχή έρευνα και μελέτη για τη βελτίωση της απόδοσης εφαρμογής τηλεπισκοπικών δεδομένων προκειμένου να ανιχνευτούν αξιόπιστα χώροι ρυπασμένοι με αστικά στερεά απόβλητα.

## 5 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε ότι οι δυνατότητες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης συνδυαστικά με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών είναι μεγάλες και δύνανται να συνδράμουν θετικά στην αποτελεσματικότητα της περιβαλλοντικής επιθεώρησης και ελέγχου της εδαφικής διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων. Παρόμοιες τηλεπισκοπικές εφαρμογές αναμένεται στο μέλλον να είναι απαραίτητες και ενσωματωμένες στη λειτουργία κάθε αναλυτικής διαδικασίας παρακολούθησης της ρύπανσης εδαφών.

Η ανάλυση πολυφασματικών δεδομένων μεσαίας χωρικής διακριτικής ικανότητας παρέχει τη δυνατότητα γρήγορου εντοπισμού χώρων δυνητικά ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα, κυρίως σε ημι-φυσικές περιοχές, όταν δεν απαιτούνται υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και ανθρώπινους πόρους έναντι της εποπτείας με χερσαία μέσα μεταφοράς ή της οπτικής παρακολούθησης με απλή φωτοερμηνεία δορυφορικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών. Η φασματική σύγχυση επιφανειών που καλύπτονται με αστικά στερεά απόβλητα με άλλα είδη εδαφοκάλυψης, όπως είναι οι αδιαπέρατες επιφάνειες, μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά μέσω της αξιοποίησης τεχνικών χωρικής ανάλυσης και της χρήσης αξιόπιστων χωρικών δεδομένων όπως του Κτηματολογίου (όρια οικισμών, δρόμοι, βιομηχανίες, κλπ).

Για τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της τηλεπισκοπικής ανάλυσης, θα ήταν ενδιαφέρον και χρήσιμο να διερευνηθούν σε βάθος τα ακόλουθα:

- Προσδιορισμός της φασματικής υπογραφής επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα με συστηματικές μετρήσεις πεδίου σε ικανό αριθμό χώρων (χώροι υγειονομικής ταφής, χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης) και σύγκριση με φασματική υπογραφή επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα που προσδιορίζεται με δείγματα αναφοράς μέσω της φωτοερμηνείας δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Αξιοποίηση τεχνικών φασματικού διαχωρισμού (spectral unmixing) με σκοπό την εξαγωγή «καθαρών» εικονοστοιχείων εκτάσεων με αστικά στερεά απόβλητα και αξιολόγηση της βελτιστοποίησης της ικανότητας διαχωρισμού επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα από επιφάνειες εδαφοκάλυψης που έχουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά.
- Ενδελεχή εξέταση άλλων αλγορίθμων ταξινόμησης για τη διάκριση επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα από άλλα είδη εδαφοκάλυψης και σύγκριση των αλγορίθμων μεταξύ τους για να φανούν τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα του κάθε αλγορίθμου.
- Χρησιμοποίηση δορυφορικών εικόνων υψηλότερης χωρικής διακριτικής ικανότητας ή/και υπερφασματικών εικόνων για την αξιολόγηση της δυνατότητας βελτίωσης των αποτελεσμάτων διαχωρισμού εκτάσεων ρυπασμένων με αστικά στερεά απόβλητα με επιφάνειες που παρουσιάζουν παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά.
- Διεξοδική μελέτη και αξιολόγηση φασματικών δεικτών για την αποτελεσματική διαφοροποίηση επιφανειών με αστικά στερεά απόβλητα από το γυμνό έδαφος, επιφάνειες με αμμοχάλικα και εκτάσεις με ποώδη βλάστηση/ χορτολίβαδα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ➤ Ελληνική Βιβλιογραφία:

- Αργιαλάς, Δ., (1999). Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα
- Δαλέζιος, Ν., (2015), Αγρομετεωρολογία: ανάλυση και προσομοίωση. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/3730>
- ΕΕΔΣΑ (2017), Η Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και η Συμβολή της στην Κυκλική Οικονομία, 5<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρίας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, Δεκέμβριος 2017, Αθήνα
- ΕΛΙΝΥΑΕ, Ελληνική Νομοθεσία για το Περιβάλλον,  
[http://www.elinyae.gr/el/category\\_details.jsp?cat\\_id=977](http://www.elinyae.gr/el/category_details.jsp?cat_id=977)
- Κάβουρας, Μ., Δάρρα, Α., Κονταξάκη, Σ., Τομαή, Ε., (2016), Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας - Αρχές και Τεχνολογίες. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/6392>
- Μαλλιάρος, Δημήτρης, Α., (2001), Ανάλυση χώρων διάθεσης των απορριμμάτων με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης. Η περίπτωση της νήσου Λέσβου, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Τεχνολογικών Επιστημών, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης
- Νικολακόπουλος, Κ., Κατσάνου, Κ., Λαμπράκης, Ν., (2015), Υδρολογία με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και δεδομένων τηλεπισκόπησης, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/2520>
- Παρχαρίδης, Ι., (2015), Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/3960>
- Πάυλος Δήμος – Νεκτάριος, (2013), Εντοπισμός, διερεύνηση των μη ελεγχόμενων χώρων υγειονομικής ταφής στο Νομό Μαγνησίας με χρήση τηλεπισκόπησης δορυφόρου Landsat, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης
- Περάκης, Κ., Μωυσιάδης, Α., Φαρασλής, Ι., (2015), Η τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/1840>
- ΠΕΣΔΑ, Περιφερειακά Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων,  
<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=938&language=el-GR>
- Πρόεδρου, Μ., (1997), Παρατηρώντας τη Γη από το Διάστημα, Περισκόπιο της Επιστήμης. Μάρτιος 1997, σελ. 12
- Συλλαίος, Ν., Γήτας, Ι και Συλλαίος, Γ. (2007), Εισαγωγή στην Τηλεπισκόπηση και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Γιχαούδης-Γιαπούλης, Θεσσαλονίκη

- ΤΕΕ, Τμήμα Δυτικής Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Δικηγορικός Σύλλογος, (2017), Εσπερίδα με θέμα: «Τεχνολογίες παρακολούθησης και προστασίας του περιβάλλοντος: μια διεπιστημονική προσέγγιση», Κρήτη
- Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., Στάμου, Λ., (2015), Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/2506>
- ΥΠΕΚΑ, (2014), Μελέτη αναθεώρησης του Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Αποβλήτων, Ένωση Προσώπων “ΕΨΙΛΟΝ ΑΕ, DELPHI Engineering – Οικοσφαιρική”, Αθήνα
- ΥΠΕΚΑ, Κατάλογος ΧΑΔΑ 2012, <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=WbSHRYDeNOs%3D&tabid=238&language=el-GR>
- Χαλκιάς, Χ., Γκούσια, Μ., (2015), Γεωγραφική ανάλυση με την αξιοποίηση της γεωπληροφορικής, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, <http://hdl.handle.net/11419/4546>

➤ **Ξένη βιβλιογραφία:**

- ArcGIS, Spectral Indices Gallery <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
- As-syakur, Abd. Rahman, & Wayan Sandi Adnyana, I & Arthana, I Wayan & Nuarsa, I Wayan, (2012), Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area, Remote Sensing, vol. 4, issue 10, pp. 2957-2970, doi: 10.3390/rs4102957
- Baraldi, a., Puzzolo, V., Blonda, P., Bruzzone, L. and Tarantino Ch., (2006), Automatic Spectral Rule-Based Preliminary Mapping of Calibrated Landsat TM and ETM+ Images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 9
- Beaumont B., Radoux J.& Defourny P., (2014), Assessment of airborne and spaceborne thermal infrared remote sensing for detecting and characterizing landfills, WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 180
- Chi-Farn Chen, Ching-Yueh Chang, (2006), Monitoring of illegal dumping using spatial data mining and remote sensing, Asian Conference on Remote Sensing(ACRS) 2006, Conference Paper
- Chinatsu, Yonezawa, (2009), Possibility of Monitoring of Waste Disposal Site Using Satellite Imagery, Journal of Integrated Field Science, Vol 6, p. 23-28, 2009
- COM(2005)666, Ανακοίνωση της Επιτροπής της 21ης Δεκεμβρίου 2005 με τίτλο «Ένα βήμα μπροστά για την αειφόρο χρήση των πόρων - θεματική στρατηγική για την πρόληψη της δημιουργίας και την ανακύκλωση των αποβλήτων»
- COM(2010)2020, ΕΥΡΩΠΗ 2020 Στρατηγική για έξυπνη, διατηρήσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη

- COM(2015) 614 final, Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών, Το κλείσιμο του κύκλου – Ένα σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία
- Copernicus, European Union's Earth Observation Programme, <http://www.copernicus.eu/main/overview>
- Corine Land Cover 2012, <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>
- Deng, Y., Wu, Ch., Li, M. & Chen, R., (2015), RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 39, pp 40–48
- Driedger A., Dürr H., Mitchell K., Flannery J., Brancazi E., Van Cappellen P. (2013), Plastic Debris: Remote Sensing and Characterization, Great Lakes Beach Association Conference Poster
- ESA (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services [https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2\\_SP-1322\\_2.pdf](https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf)
- ESA (2015). Sentinel 2 User Handbook , [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
- ESA, Sentinel Online, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>
- Faisal Kamil, AlAhmad Mohamed & Shaker Ahmed, (2012), Remote Sensing Techniques As A Tool For Environmental Monitoring, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B8
- Ferrara, V. (2008), Brownfield identification: different approaches for analysing data detected by means of remote sensing, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 107, 2008
- Glanville Katharine and Chang Hsing-Chung, (2015), Remote Sensing Analysis Techniques and Sensor Requirements to Support the Mapping of Illegal Domestic Waste Disposal Sites in Queensland, Australia, Remote Sens. 2015, 7, pp 13053-13069, doi:10.3390/rs71013053
- Gupta, R. P., (1991), Remote Sensing Geology. xvi 356 pp. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. Geological Magazine, 129(6), pp. 794-795. doi:10.1017/S0016756800008542
- Harris Geospatial Solutions, Alphabetical List of Spectral Indices, <https://www.harrisgeospatial.com/docs/AlphabeticalListSpectralIndices.html>
- Index Database, A Database for Remote Sensing Indices, <https://www.indexdatabase.de/db/r.php>
- Ishihara Nobuaki, Ochi Shiro, Yasuoka Yoshifumi, Tamura Masayuki, (2002), Monitoring of Illegal Dumping Using Satellite Images, Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) 2002
- Khan, N.M., Rastoskuev, V.V., Sato, Y., Shiozawa, S., (2005), Assessment of hydro saline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators, Agric. Water Management, 77, pp 96–109.
- Lega, M., Ferrara, C., Persechino, G., Bishop P., (2014), Remote sensing in environmental police investigations: aerial platforms and an innovative application of thermography to detect several illegal activities, Environmental Monitoring Assessment 186:8291–8301

- Levin, N., (1999), Fundamentals of Remote Sensing. Remote Sensing Laboratory, Geography Department, Tel Aviv University, GIS unit, The society for the Protection of Nature in Israel, <http://geography.huji.ac.il/personal/Noam%20Levin/1999-fundamentals-of-remotesensing.pdf>
- Li, S., Chen, X., (2014), A New Bare-Soil Index for Rapid Mapping Developing Areas Using Landsat 8 Data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-4, 2014
- LIFE RECLAIM (2015), Landfill mining pilot application for recovery of invaluable metals, materials, land and energy, <http://reclaim-gis.gr/index.php?lang=EN>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. and Chipman, J. W., (2004), Remote Sensing and Image Interpretation, 5th Edition, John Wiley, New York.
- Lu, D. & Weng, Q., (2007), A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance, International Journal of Remote Sensing, 28(5), pp.823-870
- Mather, P. M., (1999), Computer Processing of Remotely-sensed Images, 2nd Edition. John Wiley and Sons, Chichester.
- Mfondoum, A. H. N., Etouna, J., Nongsi, B. K., Moto, F. A. M. and Deussieu, F. G. N., (2016), Assessment of Land Degradation Status and Its Impact in Arid and Semi-Arid Areas by Correlating Spectral and Principal Component Analysis Neo-Bands, International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, Volume 5, Issue 2, pp. 1539-1560, doi: 10.23953/cloud.ijarsg.7
- NASA, Landsat Science, Landsat 8 Mission Details <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/mission-details/>
- Nguyen Ba Duy, Tran Thi Huong Giang, (2012), Study on vegetation indices selection and changing detection thresholds selection in Land cover change detection assessment using change vector analysis, International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany
- Novelli, A. & Tarantino, Eu., (2015) Combining ad hoc spectral indices based on LANDSAT-8 OLI/TIRS sensor data for the detection of plastic cover vineyard, Remote Sensing Letters, 6:12, pp 933-941, doi: 10.1080/2150704X.2015.1093186
- OpenStreetMap, <http://download.geofabrik.de/europe/greece.html>
- Pal, Mahesh & Antil, Kapil. (2017), Comparison of Landsat 8 and Sentinel 2 Data for Accurate Mapping of Built-Up Area And Bare Soil, Conference: The 38th Asian Conference on Remote Sensing, New Delhi, India, October 2017
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, Y. and Sorooshian, S., (1994), A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, Remote Sensing of Environment, 48, pp 119-126
- Qiu, B., Zhang, K., Tang, Z., Chen, Ch. & Wang, Z., (2017), Developing soil indices based on brightness, darkness, and greenness to improve land surface mapping accuracy, GIScience & Remote Sensing, 54:5, 759-777, <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1328758>

- Ramesh, N. A., Shetty, A., Ramesh, H., (2017), EXhype: A tool for mineral classification using hyperspectral data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 124, pp 106-118
- Rouse, J.W, Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D.W., (1974), Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.' Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, vol. 1, p. 48-62,  
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>
- Rstoolbox, Spectral indices <http://bleutner.github.io/RStoolbox/rstbx-docu/spectralIndices.html>
- Schowengerdt, Robert A., (2007), Remote sensing: models and methods for image processing. (3rd edition), Academic Press
- Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- Serway, R., Jewett, W.J, (1990). Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς, Τόμος II, Έκδοση Α.Κ.Ρεσβάνη
- Silvestri S. & Omri M. (2008), A method for the remote sensing identification of uncontrolled landfills: formulation and validation, International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No. 4, 20 February 2008, pp 975–989
- Slonecker, T., Fisher Gary, B., Aiello Danielle, P., Haack B., (2010), Visible and Infrared Remote Imaging of Hazardous Waste: A Review, Remote Sens. 2010, Vol2, pp. 2474-2508, doi:10.3390/rs2112474
- USGS (2016). Landsat 8 Data Users Handbook, Ver.2,  
<https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- USGS, Remote Sensing Phenology, <https://phenology.cr.usgs.gov/index.php>
- Valdez, M.C. & Chen C.F., (2012) , Using Normalized Multi-Band Drought Index For High Spatial Resolution Soil Moisture Mapping, The 33rd Asian Conference on Remote Sensing, Thailand
- W&L Geology Department, Lecture notes, Spectral Ratios,  
[http://geology.wlu.edu/harbor/geol260/lecture\\_notes/Notes\\_rs\\_ratios.html](http://geology.wlu.edu/harbor/geol260/lecture_notes/Notes_rs_ratios.html)
- Wang, J., Qin, Q., Gao, Z., Zhao, J. and Ye, X., (2016) A New Approach to Urban Road Extraction Using High-Resolution Aerial Image, ISPRS International Journal of Geo-Information, 5, 114; doi:10.3390/ijgi5070114
- Wang, L., and Qu, J. J., (2007), NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing, Geophys. Res. Lett., 34, L20405, doi: 10.1029/2007GL031021.
- Xu, Hanqiu, (2010), Analysis of Impervious Surface and its Impact on Urban Heat Environment using the Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI), Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 76. pp 557–565, doi:10.14358/PERS.76.5.557.
- Yang, Dedi & Chen, Jin & Zhou, Yuan & Chen, Xiang & Chen, Xuehong & Cao, Xin, (2017), Mapping plastic greenhouse with medium spatial resolution satellite data: Development of a new



spectral index. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 128, pp 47-60, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.002

Zha, Y., Gao, J. & Ni, S., (2003), Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, International Journal of Remote Sensing 24(3), pp 583-594, doi: 10.1080/01431160304987.

Απόφαση 1386/2013/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 20ής Νοεμβρίου 2013, σχετικά με γενικό ενωσιακό πρόγραμμα δράσης για το περιβάλλον έως το 2020 «Ευημερία εντός των ορίων του πλανήτη μας»

Απόφαση 1600/2002/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 22ας Ιουλίου 2002, για τη θέσπιση του έκτου κοινοτικού προγράμματος δράσης για το περιβάλλον

ΔΕΕ, Απόφαση της 2ας Δεκεμβρίου 2014, «Παράβαση κράτους μέλους — Οδηγία 75/442/ΕΟΚ — Διαχείριση αποβλήτων — Απόφαση του Δικαστηρίου διαπιστώνουσα παράβαση — Μη εκτέλεση — Άρθρο 260, παράγραφος 2, ΣΛΕΕ — Χρηματικές κυρώσεις — Κατ' αποκοπήν ποσό και χρηματική ποινή».

ΔΕΕ, Απόφαση της 7ης Σεπτεμβρίου 2016, «Παράβαση κράτους μέλους — Περιβάλλον — Οδηγία 2006/12/ΕΚ — Οδηγία 91/689/ΕΟΚ — Οδηγία 1999/31/ΕΚ — Διαχείριση αποβλήτων — Απόφαση του Δικαστηρίου διαπιστώνουσα παράβαση — Μη εκτέλεση — Άρθρο 260, παράγραφος 2, ΣΛΕΕ — Χρηματικές κυρώσεις — Χρηματική ποινή — Κατ' αποκοπήν ποσό»

ΕΕ (2017), Απόφαση της 2ας Δεκεμβρίου 2014 στην υπόθεση C-378/13, ΧΑΔΑ που δεν συμμορφώνονται με την απόφαση στη λήξη του τέταρτου εξαμήνου (3/6/2016-2/12/2016), Ref. Ares (2017)2301295 - 04/05/2017

Κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 377/2014 για τη θέσπιση του προγράμματος Copernicus και την κατάργηση του κανονισμού (ΕΕ) αριθ. 911/2010