

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Αλλαγές Ειδών Κάλυψης Γης σε Προστατευόμενες Περιοχές
με τη Χρήση Τηλεπισκόπησης

Νικόλαος Καραθανάσης

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Σταύρος Κολιός

Μάιος, 2017

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Αλλαγές Ειδών Κάλυψης Γης σε Προστατευόμενες Περιοχές
με τη Χρήση Τηλεπισκόπησης**

Νικόλαος Καραθανάσης

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Σταύρος Κολιός**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος, 2017

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε μελέτη εντοπισμού και παρακολούθησης αλλαγών δύο περιοχών του Ευρωπαϊκού δικτύου Natura 2000, μέσω της επεξεργασίας εικόνων της σειράς των δορυφορικών συστημάτων Landsat. Οι περιοχές αυτές είναι η Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) «Κεντρικό Ζαγόρι και ανατολικό τμήμα όρους Μιτσικέλι, GR2130011» (Α περιοχή μελέτης) και η ΖΕΠ «Όρος Τύμφη (Γκαμήλα), GR2130009» (Β περιοχή μελέτης) και βρίσκονται στην Περιφέρεια Ηπείρου και πιο συγκεκριμένα, στη Βόρεια Πίνδο, η οποία αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προστατευόμενες φυσικές ορεινές περιοχές της Ευρώπης, με ιδιαίτερα γεωμορφολογικά, οικολογικά και πολιτιστικά χαρακτηριστικά.

Για το σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκαν τρεις δορυφορικές εικόνες Landsat, με ημερομηνίες λήψης 01/07/1984, 19/06/2000 και 04/07/2014, καθώς και άλλα ελεύθερα διαθέσιμα γεωχωρικά δεδομένα, όπως το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (ΨΥΜΕ) ASTER GDEM V2. Μετά από τις απαραίτητες διαδικασίες προεπεξεργασίας των δεδομένων, τον υπολογισμό φασματικών δεικτών και σε συνδυασμό με τα σχετικά αρχεία υψομετρικής πληροφορίας, αναπτύχθηκαν δέντρα αποφάσεων βάσει των οποίων ταξινομήθηκαν οι πολυφασματικές εικόνες που είχαν αποκοπεί στα όρια των περιοχών μελέτης. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε μετα-ταξινομική σύγκριση των ταξινομημένων εικόνων, για τον εντοπισμό και την καταγραφή των διαχρονικών αλλαγών, που συντελέστηκαν στα είδη κάλυψης γης των υπό μελέτη περιοχών.

Η συνολική ακρίβεια των ταξινομημένων εικόνων ξεπέρασε το 90%, ενώ τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και στις δύο περιοχές μελέτης συντελέστηκαν σημαντικές μεταβολές, στις καλύψεις γης, κατά την τελευταία τριακονταετία. Πιο συγκεκριμένα, και στην Α και στη Β περιοχή μελέτης αυξήθηκαν οι δασικές εκτάσεις και ειδικότερα οι περιοχές με πλατύφυλλα δέντρα. Αντιθέτως, για την Α περιοχή μελέτης μείωση παρουσίασαν η χαμηλή βλάστηση και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ενώ στη Β περιοχή μελέτης μειώθηκαν οι βραχώδεις εκτάσεις και οι περιοχές με γυμνό έδαφος και χαμηλή βλάστηση. Οι έντονες μεταβολές που παρατηρήθηκαν, οφείλονται κυρίως σε φυσικά αλλά και ανθρωπογενή αίτια όπως η πιθανή αλλαγή των καλλιεργειών, η συστηματική υπερβόσκηση, αλλά και η σταδιακή εγκατάλειψη των παραδοσιακών χρήσεων γης (π.χ. εκτατική γεωργία της ημιορεινής ζώνης), που έχουν διαμορφώσει το τοπίο των δύο περιοχών για αιώνες.

Στα κύρια συμπεράσματα συγκαταλέγεται ακόμη, η σταδιακή αναδάσωση των ανοικτών χώρων των περιοχών μελέτης που έχει συντελέσει σημαντικά στη μείωση του μωσαϊκού των αγροδασικών και των λιβαδικών οικοσυστημάτων τους, τα οποία αποτελούν σημαντικά ενδιαιτήματα για τα είδη προστατευόμενων πτηνών, που φιλοξενούν οι περιοχές αυτές.

Μέσα από την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή αναδεικνύεται τέλος, η σημαντικότητα της διαχρονικής παρακολούθησης των προστατευόμενων περιοχών, μέσω των ελεύθερα διαθέσιμων γεωχωρικών δεδομένων, τα οποία εξασφαλίζουν πολύτιμο χρόνο και πόρους, ενώ μπορούν να δώσουν την κομβική πληροφορία για την αποτίμηση των γενικών χωρικών μεταβολών και των αναπτυσσόμενων περιβαλλοντικών πιέσεων που τις συνοδεύουν, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να τεθούν οι στόχοι για τη λεπτομερέστερη εξέταση των εντοπιζόμενων επιπτώσεων/επιδράσεων και για τη διαμόρφωση των επιμέρους στρατηγικών διαχείρισης και προστασίας των περιοχών αυτών.

Summary

In this postgraduate dissertation, a study was carried out to identify and monitor changes in two areas of the European network Natura 2000, through the processing of images from the Landsat satellite systems series. These areas are the Special Protection Area (SPA) “Central Zagori and eastern part of mount Mitsikeli, GR2130011” (study area A) and the SPA “Mount Tymfi (Gkamila), GR2130009” (study area B) located in the Epirus Region, more specifically in Northern Pindos, which is one of Europe's most important protected mountainous areas with particular geomorphological, ecological and cultural characteristics.

Therefore, three Landsat satellite images were used, dated 01/07/1984, 19/06/2000 and 04/07/2014, as well as other freely available geospatial data, such as the Digital Elevation Model (DEM) ASTER GDEM V2. After the necessary data preprocessing procedures, the spectral indices calculation and in conjunction with the relevant altitude information data, decision trees were developed to classify the multispectral images of the selected study areas, after which, a post-classification comparison of the classified images was carried out to identify and record the intertemporal changes that occurred in the land cover types of the studied areas.

The overall accuracy of the classified images exceeded 90%, while the results showed that in both study areas, significant changes occurred in land covers over the last thirty years. More specifically, in both A and B study areas, the forest areas and especially the areas with broadleaf trees increased. In contrast, low vegetation and arable land were reduced for study area A, whereas in study area B, the rocky areas and areas with bare ground and low vegetation decreased. The intense changes observed are mainly due to natural as well as anthropogenic causes, such as the possible change of crops, systematic overgrazing and the gradual abandonment of traditional land uses (e.g. extensive farming of the semi-mountainous zone), which for centuries have shaped the landscape of the two regions.

The main conclusions also include the gradual reforestation of the open areas of the study areas, which has significantly contributed to the reduction of the agro-forest and grassland ecosystems mosaic, which are important habitats for the protected bird species that these areas host.

Finally, through this postgraduate dissertation, the significance of the longitudinal observation of the protected areas through the freely available geospatial data, which

provide valuable time and resources, whilst can provide key information for the evaluation of the general spatial changes and of the developing environmental pressures that accompany them, is displayed, thus providing the opportunity to set goals for the detailed examination of identified impacts/effects and forming the individual management and protection strategies for these areas.

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος» της Σχολής Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Σταύρο Κολιό, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, για την πολύτιμη καθοδήγησή του, για το χρόνο που διέθεσε, αλλά και για την κατανόηση και την παρότρυνση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της διατριβής αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους καθηγητές μου για τις γνώσεις που μου προσέφεραν, καθώς και το προσωπικό του Πανεπιστημίου για τις υπηρεσίες που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου, τα αδέρφια μου και το φιλικό μου περιβάλλον για την αμέριστη ηθική και ψυχολογική συμπαράσταση και την υπομονή που έδειξαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Summary.....	v
Ευχαριστίες.....	vii
Πίνακες / Εικόνες / Σχήματα.....	x
1 Εισαγωγή	1
1.1 Προστατευόμενες περιοχές.....	4
1.1.1 Το δίκτυο Natura 2000.....	5
1.2 Σκοποί και στόχοι.....	6
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	8
2.1 ΓΣΠ και τηλεπισκόπηση.....	8
2.2 Δορυφορική τηλεπισκόπηση.....	11
2.2.1 Ιστορική αναδρομή.....	14
2.3 Θεωρητικό πλαίσιο.....	18
2.3.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα – Φασματική υπογραφή – Ατμοσφαιρικά παράθυρα ..	18
2.3.2 Δορυφορικά τηλεπισκοπικά δεδομένα.....	22
2.3.3 Ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικών εικόνων – Ανίχνευση διαχρονικών αλλαγών	23
2.3.4 Προεπεξεργασία δεδομένων.....	25
2.3.5 Λόγοι καναλιών και φασματικοί δείκτες – Έγχρωμα σύνθετα.....	27
2.3.6 Φασματική ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων.....	29
2.3.7 Ταξινόμηση με δέντρα αποφάσεων.....	31
2.3.8 Εκτίμηση ακρίβειας ταξινόμησης.....	34
2.4 Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας.....	35
2.4.1 Συμπεράσματα.....	39
3 Μεθοδολογία	41
3.1 Σκοπός και στόχοι – Ερευνητικά ερωτήματα.....	41
3.2 Σχεδιασμός.....	42
3.3 Περιοχές μελέτης.....	44
3.3.1 Α περιοχή μελέτης (GR2130011).....	48
3.3.2 Β περιοχή μελέτης (GR2130009).....	53
3.4 Μέθοδος συλλογής δεδομένων.....	58
3.4.1 Πολυφασματικά δεδομένα Landsat TM, ETM+ και OLI.....	58
3.4.2 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους ASTER GDEM V2.....	63

3.4.3 Βοηθητικά ψηφιδωτά και διανυσματικά δεδομένα	64
3.5 Επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων	65
3.5.1 Προεπεξεργασία δεδομένων.....	66
3.5.2 Δημιουργία φασματικών δεικτών και έγχρωμων σύνθετων.....	68
3.5.3 Φασματική ταξινόμηση εικόνων με δέντρα αποφάσεων	70
3.5.4 Εκτίμηση ακρίβειας ταξινόμησης – Ανίχνευση και ανάλυση διαχρονικών αλλαγών	84
4 Αποτελέσματα.....	86
4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	86
4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	100
5 Συζήτηση – Συμπεράσματα – Εισηγήσεις.....	111
5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Α περιοχής μελέτης (GR2130011)	111
5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Β περιοχής μελέτης (GR2130009)	115
5.3 Συμπεράσματα – Εισηγήσεις.....	119
Παραρτήματα	123
Α Κατάσταση ακρωνυμίων και συμβολισμών.....	123
Βιβλιογραφία.....	126

Πίνακες / Εικόνες / Σχήματα

Πίνακες

Πίνακας 1	Μερικά από τα πιο σημαντικά παθητικά δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης και τα βασικά χαρακτηριστικά τους (Μηλιαρέσης, 2003; SIC, 2015; USGS, 2015a).....	18
Πίνακας 2	Τα σημαντικότερα ατμοσφαιρικά παράθυρα για τα παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης (Μερτίκας, 2009, p.58).....	21
Πίνακας 3	Μερικά βασικά στατιστικά στοιχεία της πληθυσμιακής εξέλιξης της Ηπείρου (ΕΣΥΕ, 1991; 2001; Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ, εκτιμήσεις 2011 όπως παρατίθενται στο Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012, pp.324 & 354).....	46
Πίνακας 4	Ποσοστιαία κατανομή της κάλυψης γης στην Α περιοχή μελέτης (GR2130011), σύμφωνα με τις Φυσικές Κλάσεις Οικοτόπων (Natural Habitat Classes – N01 έως N27), όπως περιλαμβάνονται στα Τυποποιημένα Έντυπα Δεδομένων (Standard Data Forms) των περιοχών του δικτύου Natura 2000 (EEA, 2015a).....	49
Πίνακας 5	Τύποι φυσικών οικοτόπων κοινοτικού ενδιαφέροντος (Παράρτημα Ι, Οδηγία 92/43/ΕΟΚ), που απαντώνται στην Α περιοχή μελέτης (GR2130011) (EEA, 2015a).....	50
Πίνακας 6	Ποσοστιαία κατανομή της κάλυψης γης στην Β περιοχή μελέτης (GR2130009), σύμφωνα με τις Φυσικές Κλάσεις Οικοτόπων (Natural Habitat Classes – N01 έως N27), όπως περιλαμβάνονται στα Τυποποιημένα Έντυπα Δεδομένων (Standard Data Forms) των περιοχών του δικτύου Natura 2000 (EEA, 2015b)	56
Πίνακας 7	Τύποι φυσικών οικοτόπων κοινοτικού ενδιαφέροντος (Παράρτημα Ι, Οδηγία 92/43/ΕΟΚ), που απαντώνται στην ΕΖΔ «Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου» (GR2130001) (EEA, 2015c).....	57
Πίνακας 8	Μερικά βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων δορυφορικών εικόνων (USGS, 2015b)	61
Πίνακας 9	Φασματικές περιοχές και χωρική ανάλυση των καναλιών των πολυφασματικών αισθητήρων TM, ETM+ και OLI/TIRS (USGS, 2015a)...	62
Πίνακας 10	Οι θεματικές τάξεις της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) και ο αριθμός των εικονοστοιχείων εκπαίδευσης, για κάθε εκπαιδευτικό δείγμα και για κάθε εξεταζόμενο έτος	70
Πίνακας 11	Οι θεματικές τάξεις της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) και ο αριθμός των εικονοστοιχείων εκπαίδευσης, για κάθε εκπαιδευτικό δείγμα και για κάθε εξεταζόμενο έτος	71
Πίνακας 12	Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984). Όπου Min: ελάχιστη τιμή,	

	Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση	73
Πίνακας 13	Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση	75
Πίνακας 14	Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση	76
Πίνακας 15	Τα κριτήρια διαχωρισμού για κάθε κόμβο διάσπασης του δέντρου αποφάσεων, με το οποίο ταξινομήθηκαν οι εικόνες της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	79
Πίνακας 16	Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση	80
Πίνακας 17	Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση	81
Πίνακας 18	Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση	82
Πίνακας 19	Τα κριτήρια διαχωρισμού για κάθε κόμβο διάσπασης του δέντρου αποφάσεων, με το οποίο ταξινομήθηκαν οι εικόνες της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	84
Πίνακας 20	Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	89
Πίνακας 21	Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	92
Πίνακας 22	Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	95

Πίνακας 23	Η επιφανειακή έκταση των κλάσεων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) για τα τρία εξεταζόμενα έτη και οι μεταβολές που παρουσιάζουν στην έκτασή τους μεταξύ των εξεταζόμενων ετών	97
Πίνακας 24	Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2000 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα	98
Πίνακας 25	Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 2000 και αυτής του 2014 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα	99
Πίνακας 26	Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2014 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα	99
Πίνακας 27	Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	102
Πίνακας 28	Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	104
Πίνακας 29	Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	106
Πίνακας 30	Η επιφανειακή έκταση των κλάσεων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) για τα τρία εξεταζόμενα έτη και οι μεταβολές που παρουσιάζουν στην έκτασή τους μεταξύ των εξεταζόμενων ετών	108
Πίνακας 31	Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2000 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα	109
Πίνακας 32	Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 2000 και αυτής του 2014 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο	

Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα 109

Πίνακας 33 Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2014 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα 110

Εικόνες

Εικόνα 1	Χρονοδιάγραμμα αποστολών του προγράμματος Landsat (USGS, 2015a)..	15
Εικόνα 2	Γεωγραφική τοποθέτηση των περιοχών μελέτης (υπόβαθρο: δορυφορική εικόνα της Google Maps, © 2017 TerraMetrics).....	44
Εικόνα 3	Γεωγραφική τοποθέτηση της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) και των άμεσα σχετιζόμενων με αυτή προστατευόμενων περιοχών. Στον παρόντα χάρτη δεν περιλαμβάνονται οι προστατευόμενες περιοχές που γειτνιάζουν με την περιοχή μελέτης. Όπου ΕΠΒΠ: Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου και ΠΖ: Περιφερειακές Ζώνες (υπόβαθρο: δορυφορική εικόνα της Google Maps, © 2016 TerraMetrics).....	48
Εικόνα 4	Φωτογραφίες – δείγματα χαρακτηριστικών φυσικών και ανθρωπογενών τοπίων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) (α, β: Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, pp.91–92; γ, δ: Τσιφτσής & Τσιριπίδης, 2015, pp.21 & 24)....	52
Εικόνα 5	Γεωγραφική τοποθέτηση της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) και των άμεσα σχετιζόμενων με αυτή προστατευόμενων περιοχών. Στον παρόντα χάρτη δεν περιλαμβάνονται οι προστατευόμενες περιοχές που γειτνιάζουν με την περιοχή μελέτης. Όπου ΕΠΒΠ: Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου, ΕΔΒΑ: Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου και ΠΖ: Περιφερειακές Ζώνες (υπόβαθρο: δορυφορική εικόνα της Google Maps, © 2016 TerraMetrics)	54
Εικόνα 6	Φωτογραφίες – δείγματα χαρακτηριστικών φυσικών τοπίων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) (α, γ: Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, p.91; β, δ: Τσιφτσής & Τσιριπίδης, 2015, pp.33 & 40).....	55
Εικόνα 7	Προεπισκόπηση των επιλεγμένων δορυφορικών εικόνων (USGS, 2015b)..	60
Εικόνα 8	Προεπισκόπηση των τεσσάρων ληφθέντων πινακίδων (tiles) του ASTER GDEM V2. Όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο, τόσο πιο λευκή είναι η απεικόνιση (USGS, 2015b).....	63
Εικόνα 9	Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	87
Εικόνα 10	Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών	88
Εικόνα 11	Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	90
Εικόνα 12	Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών	91
Εικόνα 13	Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	93

Εικόνα 14	Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών	94
Εικόνα 15	Παράθεση των τριών ταξινομημένων εικόνων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	96
Εικόνα 16	Παραδείγματα έντονων μεταβολών στις καλύψεις γης της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) (α: νότιο, β: δυτικό και γ: βορειοανατολικό τμήμα της ΖΕΠ).....	96
Εικόνα 17	Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	100
Εικόνα 18	Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών	101
Εικόνα 19	Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	102
Εικόνα 20	Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών	103
Εικόνα 21	Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	104
Εικόνα 22	Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών	105
Εικόνα 23	Παράθεση των τριών ταξινομημένων εικόνων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).....	106
Εικόνα 24	Παραδείγματα έντονων μεταβολών στις καλύψεις γης της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) (α: νοτιοδυτικό και β: βορειοδυτικό τμήμα της ΖΕΠ).....	107

Σχήματα

Σχήμα 1	Χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (λ = μήκος κύματος). α) Οι κύριες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (χωρίς κλίμακα), β) φασματικές περιοχές των πιο κοινών τηλεπισκοπικών συστημάτων (τροποποιημένο από Kadmon, 2001, p.124).....	19
Σχήμα 2	Φασματικές υπογραφές τριών κοινών τύπων κάλυψης γης και η φασματική δειγματοληψία του καταγραφικού συστήματος Landsat ETM+ (τροποποιημένο από Richards, 2013, p.11).....	21
Σχήμα 3	Τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών ψηφιακών εικόνων (τροποποιημένο από Richards, 2013, p.5).....	23
Σχήμα 4	Παράδειγμα δομής ενός δυαδικού δέντρου απόφασης.....	33
Σχήμα 5	Διάγραμμα μεθοδολογικής προσέγγισης της μεταπτυχιακής διατριβής.....	43
Σχήμα 6	Συγκριτικό γράφημα βασικών κατηγοριών χρήσης/κάλυψης γης. Όπου E: Έκταση σε km ² (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος - ΕΣΥΕ, 1999/2000 όπως παρατίθενται στο Geodata.gov.gr, 2015).....	45
Σχήμα 7	Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του TM. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.....	74
Σχήμα 8	Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του ETM+. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.....	75
Σχήμα 9	Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014), ως προς τα κανάλια 2, 3, 4, 5 και 6 του OLI. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.....	76
Σχήμα 10	Η σχηματική δομή (λογισμικό ENVI) του δέντρου αποφάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση των εικόνων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).....	78
Σχήμα 11	Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του TM. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.....	80
Σχήμα 12	Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του ETM+. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.....	81
Σχήμα 13	Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης	

	(δορυφορική σκηνή: 2014), ως προς τα κανάλια 2, 3, 4, 5 και 6 του OLI. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.....	82
Σχήμα 14	Η σχηματική δομή (λογισμικό ENVI) του δέντρου αποφάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση των εικόνων της B περιοχής μελέτης (GR2130009).....	83
Σχήμα 15	Συγκριτικό γράφημα με τα ποσοστά της κάθε κλάσης της A περιοχής μελέτης (GR2130011) στα τρία εξεταζόμενα έτη	97
Σχήμα 16	Συγκριτικό γράφημα με τα ποσοστά της κάθε κλάσης της B περιοχής μελέτης (GR2130009) στα τρία εξεταζόμενα έτη	108

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο όρος κάλυψη γης αναφέρεται στις παρατηρούμενες φυσικές και τεχνητές οντότητες που καλύπτουν την επιφάνεια της γης (Di Gregorio & Jansen, 2000; IPCC, 2000; Μηλιαρέσης, 2003; Wessels, et al., 2004; Χάρου, et al., 2012). Χαρακτηριστικά παραδείγματα φυσικών οντοτήτων αποτελούν η βλάστηση, οι υδάτινες επιφάνειες, οι βραχώδεις εκτάσεις κ.ά., ενώ στις τεχνητές οντότητες περιλαμβάνονται τα κτίσματα, οι καλλιέργειες κ.ά. (Di Gregorio & Jansen, 2000; Μηλιαρέσης, 2003).

Οι καλύψεις γης δεν αποτελούν σταθερά και αμετάβλητα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας, αλλά μεταβάλλονται διαρκώς στο χρόνο και στο χώρο. Οι αλλαγές στις χρήσεις γης, οι κλιματικές μεταβολές, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι πυρκαγιές και άλλες φυσικές καταστροφές είναι μερικά από τα σημαντικότερα ανθρωπογενή και φυσικά αίτια των μεταβολών αυτών (Riebsame, Meyer & Turner II, 1994; Lambin, et al., 2001; Sarkar & Kafatos, 2004; Geist, et al., 2006; Mölders, 2012). Επίσης, οι ανθρώπινες δραστηριότητες (όπως η γεωργία, η δασοκομία, η βιομηχανία κ.λπ.) και οι διάφορες κοινωνικοοικονομικές μεταβολές (π.χ. αστικοποίηση, εγκατάλειψη της αγροτικής γης κ.λπ.) έχουν συμβάλει δραστικά, ειδικά τους τελευταίους αιώνες, στην εντατικοποίηση των χρήσεων της γης και στη συνεχή τροποποίηση και αλλαγή των καλύψεων της (Riebsame, Meyer & Turner II, 1994; Lambin, et al., 2001; Geist, et al., 2006; Chauchard, Carcaillet & Guibal, 2007; Serra, Pons & Sauri, 2008; Dewan & Yamaguchi, 2009; EEA, 2010). Η χωρική και χρονική διάσταση των αλλαγών αυτών αντικατοπτρίζει έως ένα βαθμό την ένταση και τον τρόπο επέμβασης του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον, καθιστώντας έτσι τη μελέτη και παρακολούθηση των καλύψεων της γης ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια της περιβαλλοντικής και οικολογικής έρευνας (Lambin, Geist & Rindfuss, 2006; EEA, 2010; Λιαρικός, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012; Mölders, 2012).

Συγχρόνως, οι ίδιες οι αλλαγές των καλύψεων γης επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, με επακόλουθο πολλαπλές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και

οικονομικές επιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, διαφορετικοί τύποι κάλυψης γης επιδρούν διαφορετικά στους βιογεωχημικούς κύκλους των οικοσυστημάτων (υδρολογικός, κύκλος του άνθρακα, των θρεπτικών στοιχείων κλπ.) (EEA, 2010; Mölders, 2012). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αλλαγές στην κάλυψη της γης να συνεπάγονται και αλλαγές στο κλίμα, στη βιοποικιλότητα, στις ιδιότητες του εδάφους κλπ, οδηγώντας, πολλές φορές, σε υποβάθμιση και ρύπανση των υδάτων, του εδάφους και του αέρα (Riebsame, Meyer & Turner II, 1994; Wear, Turner & Naiman, 1998; IPCC, 2000; Chhabra, et al., 2006; EEA, 2010; Mölders, 2012; Olofsson, et al., 2013). Ειδικότερα, στις προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες αποτελούν διεθνώς το κύριο εργαλείο πολιτικής για τη διατήρηση και προστασία των ευαίσθητων οικοσυστημάτων, οι μεταβολές στις καλύψεις γης μπορεί να συντελέσουν στην απώλεια σημαντικών ενδιαιτημάτων και έτσι να επηρεάσουν άμεσα τα σπάνια και απειλούμενα είδη χλωρίδας και πανίδας και να επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα των περιοχών αυτών (Soulé, 1991; Turner, et al., 2003; Παπαστεργιάδου, et al., 2004; Chhabra, et al., 2006; Senapathi, et al., 2007; Bortels, et al., 2011; Kallimanis, et al., 2015).

Οι παραπάνω επιπτώσεις έχουν συνήθως τοπικό ή περιφερειακό χαρακτήρα, αλλά οι μεταβολές των καλύψεων γης είναι τόσο διαδεδομένες που, σωρευτικά, επηρεάζουν το παγκόσμιο κλίμα και τη βίωση (Riebsame, Meyer & Turner II, 1994; Lambin, et al., 2001; Lambin, Geist & Rindfuss, 2006). Πράγματι, οι αλλαγές των καλύψεων/χρήσεων γης θεωρούνται πλέον μία από τις σημαντικότερες (αν όχι η σημαντικότερη) αιτίες της αλλαγής του παγκόσμιου κλίματος και της υποβάθμισης της βιοποικιλότητας (Sala, et al., 2000; Chhabra, et al., 2006; EEA, 2010; Mölders, 2012; Olofsson, et al., 2013). Το γεγονός αυτό, καθώς και η αυξανόμενη πίεση που δέχεται το περιβάλλον τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν συντελέσει στο να έχει επικεντρωθεί ένα αρκετά μεγάλο επιστημονικό και ερευνητικό ενδιαφέρον στην καταγραφή και παρακολούθηση των καλύψεων της γης (Rees, Williams & Vitebsky, 2003; Srivastava, et al., 2012; Olofsson, et al., 2013).

Παράλληλα, η ανάπτυξη σύγχρονων εργαλείων χαρτογράφησης και χωρικής ανάλυσης, όπως η δορυφορική τηλεπισκόπηση και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), συνέβαλε καθοριστικά στην αμεσότερη και πληρέστερη διερεύνηση των καλύψεων γης και των αλλαγών τους (Πλατής, et al., 2004; Southworth & Gibbes, 2010; Λιαρίκος, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012). Έτσι, πολυφασματικά δεδομένα, όπως αυτά του δορυφορικού συστήματος Landsat, επιτρέπουν τη διαχρονική, χωρικά συνεχή και ακριβή χαρτογράφηση, ακόμα και μεγάλων και γεωγραφικά απομακρυσμένων περιοχών, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και με αρκετά

χαμηλό κόστος (Crapper & Hynson, 1983; Rees, Williams & Vitebsky, 2003; Southworth & Gibbes, 2010; Meliadis & Meliadis, 2011).

Πολλά είναι τα παραδείγματα ερευνών που χρησιμοποιούν την τηλεπισκόπηση και τα ΓΣΠ για τη διερεύνηση αλλαγών στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και αφορούν κυρίως στη μελέτη των διαχρονικών μεταβολών της βλάστησης (π.χ. Πλατής, et al., 2004; Sarkar & Kafatos, 2004; Chen, et al., 2011), στην καταγραφή των αλλαγών σε δασικές περιοχές (π.χ. Hudak & Wessman, 2000; Kuemmerle, et al., 2009; Griffiths, et al., 2014), καθώς και στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των καλύψεων/χρήσεων γης σε αστικές περιοχές (π.χ. Yang & Lo, 2002; Dewan & Yamaguchi, 2009), σε παράκτιες περιοχές (π.χ. Toullos, Yassoglou & Moutsoulas, 1990; Kolios & Stylios, 2013) κ.λπ.

Επίσης, η ανάγκη για την αποτελεσματική προστασία, τη συνεχή παρακολούθηση, καθώς και την αιεφόρο χρήση της γης των προστατευόμενων περιοχών έχει στρέψει το ενδιαφέρον των ερευνητών και στη διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων γης των περιοχών αυτών (Parmenter, et al., 2003; Papastergiadou, et al., 2007; Bortels, et al., 2011; Markogianni, Dimitriou & Kalivas, 2013; Kallimanis, et al., 2015). Η εφαρμογή τηλεπισκοπικών μεθόδων για το σκοπό αυτό μπορεί να δώσει την κομβική πληροφορία για την αποτίμηση των πιέσεων που δέχονται τα ευαίσθητα οικοσυστήματα, καθώς και για τις πιθανές μελλοντικές τάσεις αυτών των πιέσεων, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ορθή λήψη αποφάσεων και στη διαμόρφωση πολιτικών για την ολοκληρωμένη διαχείριση των προστατευόμενων περιοχών και εξασφαλίζοντας παράλληλα πολύτιμο χρόνο και πόρους (Papastergiadou, et al., 2007; Markogianni, Dimitriou & Kalivas, 2013; Kallimanis, et al., 2015).

Στα πλαίσια αυτά η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επιχειρεί τη διερεύνηση των αλλαγών στα είδη κάλυψης γης προστατευόμενων περιοχών με τη συνδυασμένη χρήση τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιείται επεξεργασία εικόνων, του δορυφορικού συστήματος Landsat (USGS, 2015a), καθώς και αξιοποιούνται πολλά και σύγχρονα εργαλεία στατιστικής μεθοδολογίας, ούτως ώστε να παραχθούν ποιοτικά και αξιόπιστα αποτελέσματα, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η χαρτογράφηση και ανάλυση των χωρικών και χρονικών μεταβολών κάλυψης γης αφορά επιλεγμένες περιοχές του Ευρωπαϊκού δικτύου Natura 2000 που βρίσκονται στην Περιφέρεια Ηπείρου, οι οποίες αν και παρουσιάζουν σημαντική και σπάνια χλωρίδα και πανίδα (Stevanovic, Tan & Iatrou, 2003; Λιαρίκος, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012), δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς και επισταμένως μέχρι σήμερα.

1.1 Προστατευόμενες περιοχές

Σύμφωνα με τη Σύμβαση για τη βιολογική ποικιλότητα, που υπογράφηκε στο Ρίο ντε Τζανέιρο (Βραζιλία) στις 5 Ιουνίου 1992, ως «προστατευόμενη περιοχή» νοείται «μια γεωγραφικά καθορισμένη περιοχή, η οποία καθορίζεται ή υπόκειται σε ρυθμίσεις και λειτουργεί έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ειδικοί στόχοι προστασίας» (Ν. 2204/1994). Ο θεσμός των προστατευόμενων περιοχών αποτελεί διεθνώς το κύριο νομικό εργαλείο για τη διατήρηση και προστασία περιοχών οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερα φυσικά, ιστορικά και πολιτιστικά χαρακτηριστικά (Soulé, 1991; Μπεριάτος, 2003).

Στην Ελλάδα η αναγνώριση φυσικών περιοχών ως προστατευόμενες ξεκίνησε το 1937 με το Ν. 856/1937 και τη δημιουργία των πρώτων Εθνικών Δρυμών (Papageorgiou & Vogiatzakis, 2006; ΕΚΒΥ, 2010; Βώκου, 2012). Αρχικά, η προσέγγιση που υιοθετήθηκε στα πρώτα στάδια του θεσμού των προστατευόμενων περιοχών ήταν η διατήρησή των περιοχών αυτών σε πλήρως φυσική κατάσταση και ο αποκλεισμός των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Μπεριάτος, 2003; ΕΚΒΥ, 2010). Στην πορεία, η προσέγγιση αυτή εγκαταλείφθηκε και πλέον ένα ευρύ νομοθετικό πλαίσιο ορίζει τις προϋποθέσεις, τους όρους και το βαθμό της ανθρώπινης παρέμβασης στις προστατευόμενες περιοχές με σκοπό την ενσωμάτωση τους στον περιβάλλοντα χώρο, συνδυάζοντας την προστασία με την κοινωνικοοικονομική και πολιτιστική ανάπτυξη των περιοχών αυτών και την αειφορική χρήση των φυσικών τους πόρων (Μπεριάτος, 2003; ΕΚΒΥ, 2010; Βώκου, 2012).

Σήμερα ο χαρακτηρισμός περιοχών ως προστατευόμενες βασίζεται είτε στην ισχύουσα εθνική νομοθεσία, όπως ενδεικτικά (ΕΚΒΥ, 2010):

- Εθνικοί Δρυμοί (Ν. 996/1971)
- Εθνικά Πάρκα (Ν. 1650/1986)
- Αισθητικά Δάση (Ν. 996/1971)
- Καταφύγια Άγριας Ζωής (Ν. 177/1975, όπως αυτός τροποποιήθηκε από το Ν. 2637/1998)
- Περιοχές Προστασίας της Φύσης (Ν. 1650/1986)
- Περιοχές Οικονομικής Ανάπτυξης (Ν. 1650/1986)

είτε στο πλαίσιο διεθνών ή ευρωπαϊκών συμβάσεων, όπως ενδεικτικά (ΕΚΒΥ, 2010):

- Υγρότοποι διεθνούς σημασίας σύμφωνα με τη Σύμβαση Ραμσάρ

- Ειδικά Προστατευόμενες Περιοχές σύμφωνα με τη Σύμβαση της Βαρκελώνης (Πρωτόκολλο 4)
- Μνημεία Παγκόσμιας Κληρονομιάς

είτε στο πλαίσιο ευρωπαϊκών οδηγιών (ΕΚΒΥ, 2010):

- Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000 (Οδηγία 79/409/ΕΟΚ και Οδηγία 92/43/ΕΟΚ).

1.1.1 Το δίκτυο Natura 2000

Το Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000 αποτελεί το βασικό νομικό και λειτουργικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για τη διατήρηση των φυσικών περιοχών και της βιοποικιλότητας (Papastergiadou, et al., 2007; Díaz-Varela, et al., 2008; Rannow & Neubert, 2014). Πρόκειται για ένα δίκτυο προστατευόμενων περιοχών που εκτείνεται σε ολόκληρη την Κοινότητα και έχει ως στόχο τη διαφύλαξη και προστασία των σημαντικών και απειλούμενων ειδών και ενδιαιτημάτων της ΕΕ (Papageorgiou & Vogiatzakis, 2006; Mallinis, et al., 2011; ΥΠΕΚΑ, 2015a).

Το δίκτυο Natura 2000 στην ουσία αποτελεί την εφαρμογή της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ «για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας» και περιλαμβάνει δύο κατηγορίες προστατευόμενων περιοχών (Apostolopoulou & Pantis, 2009; ΥΠΕΚΑ, 2015a):

- τις Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για την Ορνιθοπανίδα, όπως ορίζονται στην Οδηγία 79/409/ΕΟΚ (η οποία κωδικοποιήθηκε με την Οδηγία 2009/147/ΕΚ) «για τη διατήρηση των άγριων πτηνών»
- τους Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ) όπως ορίζονται στην Οδηγία 92/43/ΕΟΚ.

Ειδικότερα για τους ΤΚΣ, τα κράτη μέλη οφείλουν να κηρύξουν τις περιοχές αυτές ως Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (ΕΖΔ), το αργότερο έξι χρόνια μετά την οριστικοποίηση του καταλόγου των ΤΚΣ και να καθορίσουν τις προτεραιότητες για την διατήρηση ή την αποκατάσταση, σε ικανοποιητική κατάσταση διατήρησης, των τύπων οικοτόπων και ειδών κοινοτικού ενδιαφέροντος εντός αυτών (Οδηγία 92/43/ΕΟΚ; ΥΠΕΚΑ, 2015a).

Επίσης, σύμφωνα με το άρθρο 17 της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ, τα κράτη μέλη πρέπει να συντάσσουν, κάθε έξι έτη, εθνικές εκθέσεις για τον έλεγχο εφαρμογής των διατάξεων της Οδηγίας. Οι εκθέσεις αυτές, εκτός των άλλων, περιλαμβάνουν και «πληροφορίες σχετικά με τα μέτρα διατήρησης, καθώς και την εκτίμηση των επιπτώσεων αυτών των μέτρων στην

κατάσταση διατήρησης των τύπων οικοτόπων και ειδών» που αναφέρονται στα παραρτήματα της Οδηγίας (Οδηγία 92/43/ΕΟΚ, άρθρο 17 παρ. 1).

Το δίκτυο Natura 2000 στην Ελλάδα περιλαμβάνει πλέον 202 ΖΕΠ και 241 ΤΚΣ, από τους οποίους οι 239 έχουν ήδη μετονομαστεί σε ΕΖΔ (Βώκου, 2012; ΥΠΕΚΑ, 2015a). Η συνολική έκταση των περιοχών αυτών καταλαμβάνει το 27,3% της χερσαίας επιφάνειας της χώρας (Βώκου, 2012, p.115), ενώ σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζονται χωρικές επικαλύψεις μεταξύ των κατηγοριών του δικτύου, καθώς και μεταξύ άλλων κατηγοριών προστατευόμενων περιοχών (Μπεριάτος, 2003; ΕΚΒΥ, 2010; ΥΠΕΚΑ, 2015a).

Σε ότι αφορά το συντονισμό και την εποπτεία των διαχειριστικών πολιτικών που εφαρμόζονται για το σύνολο των περιοχών του δικτύου Natura 2000 της Ελλάδας, αλλά και για το σύνολο των υπολοίπων προστατευόμενων περιοχών της χώρας, αυτά συνιστούν αρμοδιότητες της «Επιτροπής Φύση 2000», η οποία αποτελείται από τακτικά και αναπληρωματικά επιστημονικά μέλη και συγκροτείται ανά τριετία από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ) (ΥΠΕΚΑ, 2015b). Η επιτροπή αυτή έχει γνωμοδοτικό χαρακτήρα και ενεργεί και ως Εθνική Επιτροπή Προστατευόμενων Περιοχών, όπου, εκτός των άλλων, παρακολουθεί και αξιολογεί το έργο και τις δραστηριότητες των Φορέων Διαχείρισης των Προστατευόμενων Περιοχών (ΦΔΠΠ) (Μπεριάτος, 2003; Βώκου, 2012; ΥΠΕΚΑ, 2015b). Σχετικά με τους ΦΔΠΠ, αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι σήμερα έχουν ιδρυθεί συνολικά 28, υπό την ευθύνη των οποίων βρίσκεται μόλις το 30% (περίπου) των περιοχών του δικτύου Natura 2000 της χώρας (Βώκου, 2012, p.119).

1.2 Σκοποί και στόχοι

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι ο εντοπισμός και η καταγραφή αλλαγών στα είδη κάλυψης γης προστατευόμενων περιοχών με τη συνδυασμένη χρήση τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία εικόνων, του δορυφορικού συστήματος Landsat (USGS, 2015a), για την ανάλυση και χαρτογράφηση των χωρικών και χρονικών μεταβολών κάλυψης γης σε επιλεγμένες περιοχές της Περιφέρειας Ηπείρου, οι οποίες ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν να εξεταστούν παρουσιάζουν διαφορετικά κύρια χαρακτηριστικά η κάθε μια (π.χ. εκτεταμένη δασοκάλυψη, αγροτικές και αγροτοδοασικές εκτάσεις, δασικές, λιβαδικές και αλπικές περιοχές – ορεινές εξάρσεις), με απώτερο σκοπό να αποτελέσουν παραδείγματα εφαρμογής και αξιολόγησης των τηλεπισκοπικών μεθόδων και των εργαλείων χωρικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι,

σε αυτό το πλαίσιο, ιδιαίτερο βάρος δίνεται στην αξιοποίηση πολλών και σύγχρονων εργαλείων στατιστικής μεθοδολογίας, ούτως ώστε να παραχθούν ποιοτικά και αξιόπιστα αποτελέσματα, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Με βάση τα παραπάνω, οι επιμέρους ερευνητικοί στόχοι μπορούν να συνοψιστούν στους εξής:

- Εντοπισμός και καταγραφή των βασικών τύπων κάλυψης γης των υπό μελέτη περιοχών.
- Εκτίμηση της ποσοτικής και ποσοστιαίας μεταβολής της επιφανειακής έκτασης των διαφόρων ειδών κάλυψης γης (μεταξύ των υπό μελέτη ετών).
- Ανάλυση των χωρικών μεταβολών τους στο χρόνο και των διαδοχικών εναλλαγών μεταξύ των καλύψεων γης, ούτως ώστε να αναδειχθούν οι βασικές τάσεις των αλλαγών.
- Ερμηνεία των αλλαγών αυτών, εκτιμώντας τις αλληλεπιδράσεις με το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και αξιολογώντας τις επιπτώσεις των διαχειριστικών πολιτικών που εφαρμόζονται στις υπό μελέτη περιοχές.
- Αξιολόγηση των ευρημάτων μέσω στατιστικών μεθόδων, οι οποίες θα αποτιμούν, με βάση στατιστικούς δείκτες, την ποιότητα και την ακρίβεια των αλλαγών και των αποτελεσμάτων.
- Προσδιορισμός των δυνατοτήτων και των περιορισμών που σχετίζονται με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Landsat στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση προστατευόμενων περιοχών.

Η επεξεργασία και ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων υλοποιήθηκε με τη χρήση των λογισμικών προγραμμάτων QGIS (2015) και ENVI (ITT Visual Information Solutions, 2009).

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η διασαφήνιση των κεντρικών εννοιών και του θεωρητικού πλαισίου των ερευνητικών εργαλείων και των αναλυτικών τεχνικών, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή και η ανάδειξη της σημαντικότητας και της χρησιμότητας τους στη διαχρονική χαρτογράφηση των προστατευόμενων περιοχών.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στις γενικές αρχές και έννοιες των ΓΣΠ και της τηλεπισκόπησης και στα βασικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών τηλεπισκοπικών συστημάτων. Επιπλέον, γίνεται μια συνοπτική ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των δορυφόρων Landsat και άλλων σημαντικών παθητικών καταγραφικών συστημάτων, που χρησιμοποιούνται στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των καλύψεων/χρήσεων γης και της βλάστησης. Έπειτα, περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των παθητικών δορυφορικών αισθητήρων και παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δορυφορικών δεδομένων και το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνικών ανάλυσης και επεξεργασίας τους, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, με έμφαση στη χρήση δορυφορικών δεδομένων για τη διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων γης και της βλάστησης προστατευόμενων περιοχών, προκειμένου να αξιολογηθούν, μεταξύ άλλων, οι δυνατότητες, η καταλληλότητα και η αποτελεσματικότητα των δορυφορικών τηλεπισκοπικών μεθόδων στην παρακολούθηση και αξιολόγηση των περιοχών αυτών.

2.1 ΓΣΠ και τηλεπισκόπηση

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) θεωρούνται τα πλέον σύγχρονα και ισχυρά εργαλεία διαχείρισης της χωρικής (γεωγραφικής) πληροφορίας (Lambin, 2001). Ένα ΓΣΠ αποτελείται από ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (Ηλεκτρονικό Υπολογιστή – Η/Υ και τα περιφερειακά του) και λογισμικό για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάκτηση, επεξεργασία, ανάλυση

και απεικόνιση ψηφιακών/ψηφιοποιημένων, γεωαναφερόμενων (ή μη), δεδομένων (Johnston, 1998; Kadmon, 2001). Τα δεδομένα αυτά διακρίνονται σε δυο βασικούς τύπους: στα χωρικά δεδομένα, όπως σημεία, γραμμές και περιοχές που αντιπροσωπεύουν την τοποθεσία και το σχήμα των γεωγραφικών χαρακτηριστικών και στα μη χωρικά ή περιγραφικά δεδομένα (πίνακες βάσης δεδομένων), τα οποία συνδέονται με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και περιγράφουν τις ιδιότητες τους (Lambin, 2001; Φιλιππίδης, 2006).

Πέρα από τη δυνατότητα σύνδεσης της χωρικής με την περιγραφική πληροφορία, άλλη μία χαρακτηριστική ιδιότητα των ΓΣΠ είναι η δυνατότητα που παρέχουν για ταυτόχρονη επεξεργασία και ανάλυση πολλαπλών στρωμάτων δεδομένων (επιπέδων χωρικής πληροφορίας), καθώς και συγχώνευση αυτών για την εξαγωγή χρήσιμων χωρικών πληροφοριών (Johnston, 1998; Kadmon, 2001; Χάρου, et al., 2012). Έτσι, τα ΓΣΠ μπορούν να εκτελέσουν πλήθος λειτουργιών που, εκτός των άλλων, περιλαμβάνουν τη χωρική ανάλυση και μοντελοποίηση και γενικότερα την επίλυση σύνθετων προβλημάτων που σχετίζονται με την έννοια του χώρου (Johnston, 1998; Kadmon, 2001; Lambin, 2001; Χάρου, et al., 2012).

Οι αναλυτικές αυτές ικανότητες των ΓΣΠ, καθώς και οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο της πληροφορικής (πιο ισχυροί και οικονομικοί Η/Υ και λογισμικά), τα έχουν καταστήσει άκρως απαραίτητα και χρήσιμα εργαλεία για ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων (Φιλιππίδης, 2006). Ειδικότερα, στην περιβαλλοντική και οικολογική έρευνα τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται πλέον εκτενώς σε εφαρμογές, όπως διαχείριση οικοσυστημάτων, αξιολόγηση της διατήρησης της βιοποικιλότητας, υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων και στην εκτίμηση επιπτώσεων, παρακολούθηση και πρόβλεψη περιβαλλοντικών αλλαγών, εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων κ.ά. (Johnston, 1998; Lambin, 2001; Φιλιππίδης, 2006).

Επιπροσθέτως, τα ΓΣΠ μπορούν να χρησιμοποιήσουν και να συνδυάσουν διαφορετικής φύσεως δεδομένα τα οποία προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως, για παράδειγμα, παρατηρήσεις πεδίου, τυπωμένοι χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες κ.λπ. (Kadmon, 2001; Φιλιππίδης, 2006). Όποια και αν είναι η προέλευση των δεδομένων, αυτά θα πρέπει να βρίσκονται ή να μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή κατάλληλη για χρήση από τα ΓΣΠ (Johnston, 1998; Φιλιππίδης, 2006). Η καταχώριση και αναπαράσταση των ψηφιακών αυτών δεδομένων μπορεί να γίνει σε δύο βασικές μορφές (Johnston, 1998; Lambin, 2001; Φιλιππίδης, 2006):

- α) είτε σε μορφή ψηφιδωτού (raster), όπου οι ιδιότητες των χωρικών (γεωγραφικών) στοιχείων αποθηκεύονται και απεικονίζονται σε μια διάταξη αναφερόμενων κελιών

(εικονοστοιχείων), το καθένα από τα οποία φέρει μία αριθμητική τιμή που αντιστοιχεί στην ιδιότητα που απεικονίζει,

- β) είτε σε μορφή διανύσματος (vector), όπου οι ιδιότητες των χωρικών (γεωγραφικών) στοιχείων απεικονίζονται ως σημεία, γραμμές και πολύγωνα.

Μία από τις σημαντικότερες πηγές δεδομένων για τα ΓΣΠ είναι η τηλεπισκόπηση. Η έννοια της τηλεπισκόπησης, γενικά, αναφέρεται στην παρατήρηση και μελέτη αντικειμένων και φαινομένων από απόσταση (Johnston, 1998; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Ειδικότερα, η τηλεπισκόπηση ως επιστήμη και ως τεχνική ασχολείται με τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από τα αντικείμενα της γης, για τη συλλογή, ανάλυση και ερμηνεία των πληροφοριών που αφορούν τη φύση και τις ιδιότητες των αντικείμενων αυτών (Lambin, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Φιλιππίδης, 2006; Μερτίκας, 2009; Χάρου, et al., 2012). Η ανίχνευση και καταγραφή της ακτινοβολίας αυτής πραγματοποιείται μέσω ειδικών οργάνων (π.χ. φωτογραφικές κάμερες, πολυφασματικοί σαρωτές, ραντάρ), τα οποία βρίσκονται σε απόσταση από τα υπό μελέτη αντικείμενα και μεταφέρονται συνήθως από αεροπλάνα ή από δορυφόρους (Johnston, 1998; Lambin, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Turner, et al., 2003; Φιλιππίδης, 2006; Μερτίκας, 2009; Χάρου, et al., 2012). Έτσι, τα τηλεπισκοπικά συστήματα παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία δεδομένων, με τη μορφή κυρίως αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων, τα οποία, εκτός των άλλων, μπορούν να εισαχθούν σε ένα ΓΣΠ (Lambin, 2001; Φιλιππίδης, 2006).

Η τηλεπισκόπηση ως μέθοδος συλλογής χωρικών δεδομένων παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, σε σχέση με άλλες μεθόδους (π.χ. εργασίες πεδίου), τα οποία σύμφωνα με τους Συλλαίος, Γήτας και Συλλαίος (2007 όπως αναφέρονται στο Χάρου, et al., 2012, p.13) μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ικανότητα χωρικής αντίληψης και προσέγγισης, ιδιαίτερα χρήσιμο σε εκτεταμένες, γεωγραφικά απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές
- δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών σε σύντομο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας έτσι τη σύγκριση ίδιων δεδομένων σε διάφορες περιοχές
- συνοπτική απεικόνιση εκτεταμένων περιοχών, κάτι που καθιστά εφικτή την ταυτοποίηση βιοφυσικών στοιχείων
- δυνατότητα διαχρονικών λήψεων, που επιτρέπει τη μελέτη δυναμικών φαινομένων και τη διεξαγωγή διαχρονικών συγκρίσεων

- λήψη πολυφασματικών εικόνων, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα να αναγνωριστούν διαφορές μεταξύ των βιοφυσικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολό, έως αδύνατο, με την ανάλυση μιας μόνο φασματικής ζώνης.

Ειδικότερα, σε ότι αφορά τις προστατευόμενες περιοχές, οι Forster, et al. (2014) επισημαίνουν το σημαντικό ρόλο που μπορεί να παίξει η τηλεπισκόπηση ως εργαλείο διαχρονικού ελέγχου και παρακολούθησης των περιοχών αυτών, διότι παρέχει μια ευρεία άποψη του τοπίου, καθώς και προσφέρει τη δυνατότητα να αποκτούνται δεδομένα με ένα συστηματικό, επαναλαμβανόμενο και χωρικά σαφή τρόπο. Επίσης, πολλές φορές, οι προστατευόμενες περιοχές μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες ή/και δύσκολες στην προσέγγιση τους, κάνοντας έτσι τις επίγειες μεθόδους παρατήρησης εξαιρετικά χρονοβόρες και οικονομικά ασύμφορες (Forster, et al., 2014).

Η χρήση, λοιπόν, της τηλεπισκόπησης και των ΓΣΠ δίνει τη δυνατότητα για συλλογή και ταξινόμηση δεδομένων με μεγαλύτερη συχνότητα, ακρίβεια και παροχή εξειδικευμένων πληροφοριών, τόσο για τις χωρικές ιδιότητες των στοιχείων της επιφάνειας της γης, όσο και για τα φασματικά χαρακτηριστικά τους (Πλατής, et al., 2004; Λιαρίκος, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012). Έτσι, οι δυνατότητες που προσφέρει ο συνδυασμός αυτών των δυο τεχνολογιών (π.χ. συνεχής καταγραφή της επιφάνειας της γης – δημιουργία και διατήρηση χωρικών βάσεων δεδομένων) μπορεί να συμβάλλουν καθοριστικά στη διαχρονική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών αλλαγών και γενικότερα στην ολοκληρωμένη και ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων σε τοπικό, περιφερειακό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο (Lambin, 2001; Λιαρίκος, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012; Χάρου, et al., 2012).

2.2 Δορυφορική τηλεπισκόπηση

Με την εκτόξευση του πρώτου μετεωρολογικού δορυφόρου το 1960, ξεκίνησε ουσιαστικά και η συστηματική παρατήρηση και καταγραφή της επιφάνειας της γης από το διάστημα (Joseph, 1996; Κούτσιας, 2008). Έκτοτε, η συνεχής εξέλιξη των θετικών επιστημών και της τεχνολογίας της πληροφορικής (αυξανόμενες δυνατότητες διαχείρισης του μεγάλου όγκου δορυφορικών δεδομένων, με παράλληλη μείωση του κόστους διαχείρισης), καθώς και ο διακρατικός ανταγωνισμός στις διαστημικές και δορυφορικές έρευνες, έχουν συντελέσει καθοριστικά στη ραγδαία ανάπτυξη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης (Κούτσιας, 2008; Μερτίκας, 2009). Πλέον, μία σειρά από χώρες έχουν αναπτύξει δορυφορικά συστήματα, τα οποία είναι ειδικά σχεδιασμένα για να καλύπτουν συγκεκριμένες ανάγκες παρακολούθησης και καταγραφής της γήινης επιφάνειας και ατμόσφαιρας (Johnston, 1998; Κούτσιας, 2008). Έτσι, η δορυφορική

τηλεπισκόπηση παρέχει σημαντικές πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στη μετεωρολογία, στην παρατήρηση ωκεανών και παράκτιων περιοχών, στην παρακολούθηση της ρύπανσης, στην υδρολογία, στη γεωλογική και τοπογραφική χαρτογράφηση, στην ανίχνευση κοιτασμάτων, στην αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών και φυσικά στην καταγραφή και παρακολούθηση της βλάστησης και των καλύψεων/χρήσεων γης (Lambin, 2001; Turner, et al., 2003; Melesse, et al., 2007; Κούτσιας, 2008; Μερτίκας, 2009).

Οι τηλεπισκοπικοί δορυφόροι διαθέτουν ειδικούς αισθητήρες/σαρωτές, οι οποίοι ανιχνεύουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα (Johnston, 1998; Lambin, 2001; Μερτίκας, 2009). Τα καταγραφικά αυτά συστήματα διακρίνονται κυρίως σε δύο βασικούς τύπους, στα παθητικά συστήματα και στα ενεργητικά συστήματα (Joseph, 1996; Johnston, 1998; Turner, et al., 2003; Southworth & Gibbes, 2010).

Οι παθητικοί αισθητήρες είναι πιο κοινοί και χρησιμοποιούν φυσικά διαθέσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, εκπεμπόμενη θερμότητα από την επιφάνεια της γης) για να ανιχνεύσουν τα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας (Joseph, 1996; Johnston, 1998; Lambin, 2001; Southworth & Gibbes, 2010; Richards, 2013). Χαρακτηριστικό παράδειγμα παθητικών συστημάτων αποτελούν οι πολυφασματικοί αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν την ακτινοβολία σε διαφορετικά διαστήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (φασματικά κανάλια) και έτσι μπορούν να παρέχουν πληροφορίες, μεταξύ άλλων, σχετικά με τις καλύψεις γης και τους τύπους βλάστησης (Johnston, 1998; Turner, et al., 2003; Southworth & Gibbes, 2010).

Από την άλλη, τα ενεργητικά συστήματα, όπως τα ραντάρ, εκπέμπουν τεχνητή ακτινοβολία στην κατεύθυνση ενδιαφέροντος και στη συνέχεια ανιχνεύουν και καταγράφουν την ενέργεια που επιστρέφει από το στόχο (Jensen, 1983; Joseph, 1996; Johnston, 1998; Turner, et al., 2003; Southworth & Gibbes, 2010; Richards, 2013). Επίσης, σε αντίθεση με τους παθητικούς αισθητήρες, οι ενεργητικοί μπορούν να συλλέγουν δεδομένα και κατά τη διάρκεια της νύχτα και σπανίως επηρεάζονται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Joseph, 1996; Johnston, 1998). Παρ' όλα αυτά, τα ενεργητικά συστήματα δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα φασματικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων και χρησιμοποιούνται κυρίως για τοπογραφικές, γεωλογικές και υδρολογικές εφαρμογές (Joseph, 1996; Turner, et al., 2003).

Περαιτέρω, τα δορυφορικά συστήματα διαχωρίζονται ανάλογα με τη λεπτομέρεια της πληροφορίας που παρέχουν σχετικά με τα στοιχεία της επιφάνειας της γης. Αυτό καθορίζεται από τέσσερα χαρακτηριστικά, τη χωρική, τη φασματική, τη ραδιομετρική και τη χρονική διακριτική ικανότητα (Jensen, 1983; Κούτσιας, 2008). Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, σε συνδυασμό με τις επιστημονικές ανάγκες, προσδιορίζουν κάθε φορά τον τύπο του καταγραφικού συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί σε κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή (Joseph, 1996; Κούτσιας, 2008). Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των τεσσάρων αυτών χαρακτηριστικών (Jensen, 1983; Joseph, 1996; Turner, et al., 2003; Κούτσιας, 2008):

- Η χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution) σχετίζεται με το μέγεθος του μικρότερου αντικειμένου που μπορεί να ανιχνευθεί και να καταγραφεί από τον αισθητήρα. Στις ψηφιακές απεικονίσεις, αναφέρεται στην περιοχή του εδάφους η οποία αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο (pixel) και μετράται συνήθως σε μέτρα. Όσο πιο μικρή είναι η περιοχή που αντιπροσωπεύεται από ένα εικονοστοιχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική διακριτική ικανότητα και η ποσότητα της πληροφορίας που περιέχεται σε μια εικόνα.
- Η φασματική διακριτική ικανότητα (spectral resolution) αναφέρεται στο φασματικό εύρος και τον αριθμό των καναλιών του καταγραφικού συστήματος, δηλαδή στο πλάτος και στον αριθμό των διαστημάτων μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στα οποία καταγράφει την πληροφορία ο δορυφορικός αισθητήρας. Περισσότερα κανάλια με μικρότερο φασματικό εύρος (μεγάλη φασματική διακριτική ικανότητα) επιτρέπουν αποτελεσματικότερη ανίχνευση και καταγραφή λεπτομερειών και μικρών διαφορών μεταξύ των αντικειμένων (π.χ. καλύτερη διάκριση τύπων βλάστησης και κάλυψης γης).
- Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (radiometric resolution) σχετίζεται με την ευαισθησία του αισθητήρα να ανιχνεύει διαφορές στην καταγραφόμενη ακτινοβολία. Με άλλα λόγια, καθορίζει τον αριθμό των διακριτών επιπέδων (τιμών φωτεινότητας) στα οποία καταγράφεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και κατά συνέπεια, μεγαλύτερη ραδιομετρική ανάλυση συνεπάγεται και καλύτερη απόδοση των λεπτομερειών. Στις ψηφιακές απεικονίσεις, η ραδιομετρική ανάλυση μετράται σε bit. Για παράδειγμα, ένα κανάλι μιας δορυφορικής εικόνας των 8 bit δύναται να έχει 256 (2^8) διαβαθμίσεις έντασης που όταν αναπαρασταθούν σε μια οθόνη μπορούν να αποδοθούν σε 256 διαβαθμίσεις του γκριζου.

- Η χρονική διακριτική ικανότητα (temporal resolution) αναφέρεται στη συχνότητα με την οποία ένας αισθητήρας λαμβάνει εικόνες από μια συγκεκριμένη περιοχή και διαμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος, όπως ο τύπος τροχιάς, η ζώνη σάρωσης, η χωρική διακριτική ικανότητα και ο αριθμός των δορυφόρων. Μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα (μεγαλύτερη συχνότητα λήψης εικόνων) επιτρέπει και τη πληρέστερη μελέτη δυναμικών φαινομένων (π.χ. διαχρονικές αλλαγές καλύψεων γης).

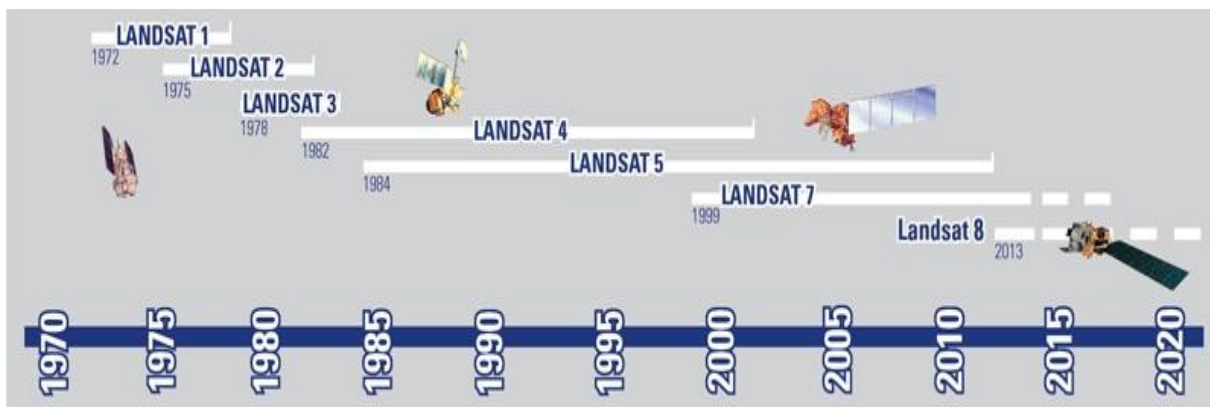
2.2.1 Ιστορική αναδρομή

Έτος ορόσημο για την επιστήμη της τηλεπισκόπησης αποτελεί το 1972, κατά το οποίο η NASA (National Aeronautics & Space Administration), σε συνεργασία με το υπουργείο Εσωτερικών των ΗΠΑ (Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής), έθεσε σε τροχιά τον πρώτο εμπορικό τηλεπισκοπικό δορυφόρο, στα πλαίσια του προγράμματος ERTS (Earth Resources Technology Satellite) (Johnston, 1998; Μηλιαρέσης, 2003; Κούτσιας, 2008). Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε για να παρέχει σχεδόν παγκόσμια κάλυψη της γήινης επιφάνειας σε τακτή βάση, με σκοπό τη συνεχή και συστηματική παρακολούθηση των φυσικών πόρων της γης (Ramankutty, et al., 2006; Μερτίκας, 2009).

Δύο χρόνια μετά την πρώτη εκτόξευση το πρόγραμμα μετονομάστηκε σε Landsat και κατόπιν το 1975 και το 1978 εκτοξεύτηκαν ο Landsat 2 και 3 (βλ. Εικόνα 1) αντίστοιχα (Johnston, 1998; Μερτίκας, 2009). Αυτοί οι πρώτοι δορυφόροι Landsat ήταν σχεδιασμένοι να φέρουν δύο καταγραφικά συστήματα: τη συσκευή Return Beam Vidicon – RBV και τον πολυφασματικό σαρωτή (Multispectral Scanner – MSS) (Johnston, 1998; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Εξαιτίας τεχνικών προβλημάτων, η χρήση του RBV περιορίστηκε και ο κύριος δέκτης για τους δορυφόρους Landsat 1, 2 και 3 έγινε ο αισθητήρας MSS, ο οποίος είχε χωρική ανάλυση 79 m και κατέγραφε την ακτινοβολία σε τέσσερις ανακλώμενες φασματικές ζώνες (κανάλια): στην πράσινη, στην κόκκινη και δύο στο εγγύς υπέρυθρο (Johnston, 1998; Μερτίκας, 2009; USGS, 2015a). Η λήψη εικόνων για κάθε περιοχή της επιφάνειας της γης επαναλαμβανόταν ανά 18 ημέρες (χρονική διακριτική ικανότητα) και καθένιας από αυτούς τους τρεις δορυφόρους σταμάτησε τη λειτουργία του περίπου 5 χρόνια μετά την εκτόξευση του (Johnston, 1998; USGS, 2015a).

Ακολούθως, τέθηκαν σε τροχιά οι Landsat 4 (1982 – 1993) και 5 (1984 – 2013), οι οποίοι μετέφεραν τον MSS, καθώς και έναν νέο, υψηλότερης ανάλυσης, αισθητήρα με το όνομα

Thematic Mapper (TM) (Johnston, 1998; Μερτίκας, 2009; USGS, 2015a). Ο TM διαθέτει τρία παραπάνω κανάλια από τον MSS, ένα στο ορατό φάσμα (μπλε), ένα στο μέσο υπέρυθρο και ένα στο θερμικό υπέρυθρο (Kadmon, 2001; Loveland & Dwyer, 2012). Αυτές οι επιπλέον φασματικές ζώνες παρέχουν στις εικόνες TM καλύτερη διάκριση των αντικειμένων της επιφάνειας της γης από αυτή του MSS (Johnston, 1998). Επιπροσθέτως, οι εικόνες TM έχουν χωρική ανάλυση 30 m στα 6 από τα 7 κανάλια (στις 6 ανακλώμενες φασματικές ζώνες) και 120 m στο θερμικό κανάλι (κανάλι 6) (USGS, 2015a).



Εικόνα 1. Χρονοδιάγραμμα αποστολών του προγράμματος Landsat (USGS, 2015a).

Σήμερα οι μόνοι δορυφόροι της σειράς που βρίσκονται σε λειτουργία (βλ. Εικόνα 1) είναι ο Landsat 7 (1999), ο οποίος μεταφέρει τον αισθητήρα ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) και ο Landsat 8 (2013) με τους αισθητήρες OLI (Operational Land Imager) και TIRS (Thermal Infrared Sensor) (USGS, 2015a). Ο ETM+ θεωρείται ως η βελτιωμένη έκδοση του TM (βλ. Πίνακα 1), καθώς, εκτός των άλλων, παρέχει καλύτερη χωρική ανάλυση στο θερμικό κανάλι (60 m), ενώ διαθέτει και ένα επιπλέον κανάλι, το παγχρωματικό, με μέγεθος εικονοστοιχείου 15 m (Μηλιαρέσης, 2003; Loveland & Dwyer, 2012). Από την άλλη πλευρά, ο OLI διαθέτει τέσσερα κανάλια στο ορατό, ένα στο εγγύς υπέρυθρο και τρία στο μέσο υπέρυθρο με χωρική ανάλυση 30 m, καθώς και ένα παγχρωματικό κανάλι στα 15 m (USGS, 2015a).

Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής αξιοποιούνται δορυφορικές εικόνες που προέρχονται από τα καταγραφικά όργανα TM, ETM+ και OLI, τα οποία και παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας.

Πλέον, το πρόγραμμα Landsat διοικείται από κοινού από τη NASA και το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης των ΗΠΑ (United States Geological Survey – USGS). Επίσης, από το 2008 τα δεδομένα του προγράμματος διατίθενται ελεύθερα στο Διαδίκτυο (USGS, 2015a). Το γεγονός

αυτό, σε συνδυασμό με τη συνεχή παροχή πολυφασματικών δεδομένων (μέτριας προς υψηλής χωρικής ανάλυσης) επί 40 και πλέον έτη, έχουν καταστήσει το αρχείο δεδομένων Landsat ένα ανεκτίμητο εργαλείο για την περιβαλλοντική και οικολογική έρευνα με τεράστια συμβολή στην ανίχνευση των διαχρονικών αλλαγών που συντελούνται στην επιφάνεια της γης (Turner, et al., 2003; Ramankutty, et al., 2006; Loveland & Dwyer, 2012).

Η επιτυχία των αποστολών των αμερικανικών δορυφόρων Landsat οδήγησε κι άλλες κυβερνήσεις ή εταιρείες διαφόρων χωρών να αναπτύξουν παρόμοια δορυφορικά προγράμματα τηλεπισκόπησης (Μερτίκας, 2009). Χαρακτηριστικά παραδείγματα, τέτοιων προγραμμάτων, αποτελούν το γαλλικό δορυφορικό σύστημα SPOT, το ινδικό IRS και τα δορυφορικά συστήματα ERS-1 και ERS-2 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency – ESA) (Ramankutty, et al., 2006; Μερτίκας, 2009). Ειδικότερα, η σειρά δορυφόρων SPOT παρέχει, επί τρεις δεκαετίες, δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης (20 m – 1,5 m), συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στη διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων/χρήσεων γης σε τοπική και περιφερειακή κλίμακα (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009; SIC, 2015).

Παρ' όλα αυτά, τα δεδομένα των δορυφόρων SPOT δεν διατίθενται ελεύθερα όπως αυτά των Landsat (Southworth & Gibbes, 2010), ενώ παράλληλα τα συστήματα Landsat παρέχουν μεγαλύτερη φασματική ανάλυση (περισσότερα κανάλια) και έτσι είναι πιο χρήσιμα σε γεωλογικές, δασολογικές εφαρμογές, καθώς και σε εφαρμογές χαρτογράφησης καλύψεων/χρήσεων γης σε κλίμακες 1:250.000 – 1:100.000 (Μηλιαρέσης, 2003).

Γενικότερα, τα καταγραφικά συστήματα μέτριας προς υψηλής χωρικής ανάλυσης είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα σε εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, που αφορούν μελέτες καλύψεων/χρήσεων γης, εντούτοις η μικρή χρονική διακριτική ικανότητα και η μικρή εδαφική κάλυψη (η εδαφική έκταση που καλύπτει μια εικόνα), των συστημάτων αυτών, καταστούν εξαιρετικά δύσκολη, έως αδύνατη, τη συνεπή παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων και τη συνεχή και συνοπτική χαρτογράφηση της γήινης επιφάνειας σε ηπειρωτικό και παγκόσμιο επίπεδο (Ramankutty, et al., 2006; Melesse, et al., 2007). Το κενό αυτό καλύπτουν καταγραφικά συστήματα μέτριας προς χαμηλής χωρικής ανάλυσης, όπως για παράδειγμα το AVHRR, το οποίο είναι εγκατεστημένο στη σειρά των αμερικανικών μετεωρολογικών δορυφόρων της NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) (Lambin, 2001; Ramankutty, et al., 2006). Με πρώτη εκτόξευση το 1978 και χρονική διακριτική ικανότητα 12 ωρών, ο αισθητήρας AVHRR παρέχει πολυφασματικά δεδομένα (4 – 5 κανάλια) χωρικής

ανάλυσης έως 1,1 km, τα οποία διατίθενται ελεύθερα και έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως: βιοφυσική χαρτογράφηση, παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών, χαρτογράφηση καλύψεων γης σε εκτεταμένες περιοχές κ.λπ. (Johnston, 1998; Μηλιαρέσης, 2003; Mölders, 2012).

Άλλο ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυφασματικού δέκτη, που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παρόμοιες με αυτές του AVHRR, είναι ο αισθητήρας MODIS, ο οποίος μεταφέρεται από τους δορυφόρους Terra (εκτοξεύθηκε το 1999) και Aqua (εκτοξεύθηκε το 2002) (Lambin, 2001; Turner, et al., 2003; Mölders, 2012).

Στο δορυφόρο Terra είναι εγκατεστημένος, εκτός των άλλων και ο αισθητήρας ASTER, ο οποίος, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1, έχει παρόμοια χωρική (15 – 90 m) και χρονική ανάλυση (16 ημέρες) με αυτών των Landsat, ωστόσο παρέχει μεγαλύτερη φασματική διακριτική ικανότητα (14 κανάλια) (SIC, 2015). Ακόμη, ο ASTER παρέχει στέρεο-δυνατότητα στο εγγύς υπέρυθρο και έχει χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση Ψηφιακών Υψομετρικών Μοντέλων Εδάφους (ΨΥΜΕ) παγκόσμιας κάλυψης (Μηλιαρέσης, 2003; Turner, et al., 2003), προϊόντα των οποίων χρησιμοποιούνται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ως υψομετρικά και τοπογραφικά υπόβαθρα.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν τεθεί σε τροχιά, κυρίως από ιδιωτικές εταιρείες, αρκετά δορυφορικά συστήματα, τα οποία παρέχουν πολύ υψηλή χωρική ανάλυση (< 4 m), όπως για παράδειγμα το IKONOS, το QuickBird, τα WorldView 1, 2 και 3 κ.ά., καθώς και υπερφασματικά συστήματα, όπως το Hyperion (έως 220 κανάλια) που μεταφέρεται από το δορυφόρο EO-1 (Earth Observing-1) της NASA (Turner, et al., 2003; Ramankutty, et al., 2006; Melesse, et al., 2007). Ωστόσο, το κόστος των προϊόντων, των συστημάτων αυτών, είναι ακόμα απαγορευτικό για τις περισσότερες έρευνες και έτσι τα δεδομένα τους χρησιμοποιούνται κυρίως για βαθμονόμηση ή αξιολόγηση προϊόντων καλύψεων γης, τα οποία προκύπτουν από άλλα καταγραφικά συστήματα, όπως αυτά των Landsat, SPOT κ.ά. (Ramankutty, et al., 2006; Southworth & Gibbes, 2010).

Πίνακας 1. Μερικά από τα πιο σημαντικά παθητικά δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης και τα βασικά χαρακτηριστικά τους (Μηλιαρέσης, 2003; SIC, 2015; USGS, 2015a).

Δορυφόρος / Αισθητήρας	Διάρκεια λειτουργίας	Φασματικά κανάλια*	Χωρική ανάλυση (m)	Χρονική ανάλυση (ημέρες)	Εδαφική Κάλυψη (km)
Landsat 4,5 TM	1982 – 2013	3VIS/1NIR/2SWIR/1TIR	30/120	16	170 × 185
Landsat 7 ETM+	1999 – σήμερα	3VIS/1NIR/2SWIR/1TIR/1PAN	30/60/15	16	170 × 185
Landsat 8 OLI	2013 – σήμερα	4VIS/1NIR/3SWIR/1PAN	30/15	16	170 × 185
SPOT 1,2,3 HRV	1986 – 2009	2VIS/1NIR/1PAN	20/20/10	26	60 × 60
Terra ASTER	1999 – σήμερα	3VIS/6SWIR/5TIR	15/30/90	4 – 16	60 × 60
NOAA AVHRR	1978 – σήμερα	1VIS/1NIR/1SWIR/2TIR	1100 – 4000	1/2	2400 × 6400
Terra / Aqua MODIS	1999 – σήμερα	10VIS/6NIR/4SWIR/16TIR	250 – 500 – 1000	1 – 2 (16)	2330 × 10
IKONOS	1999 – σήμερα	3VIS/1NIR/1PAN	4/4/1	2 – 5 (14)	11 × 11

* VIS (visible): ορατό φάσμα, NIR (near infrared): εγγύς υπέρυθρο, SWIR (shortwave infrared): μέσο υπέρυθρο, TIR (thermal infrared): θερμικό υπέρυθρο, PAN (panchromatic): παγχρωματικό κανάλι.

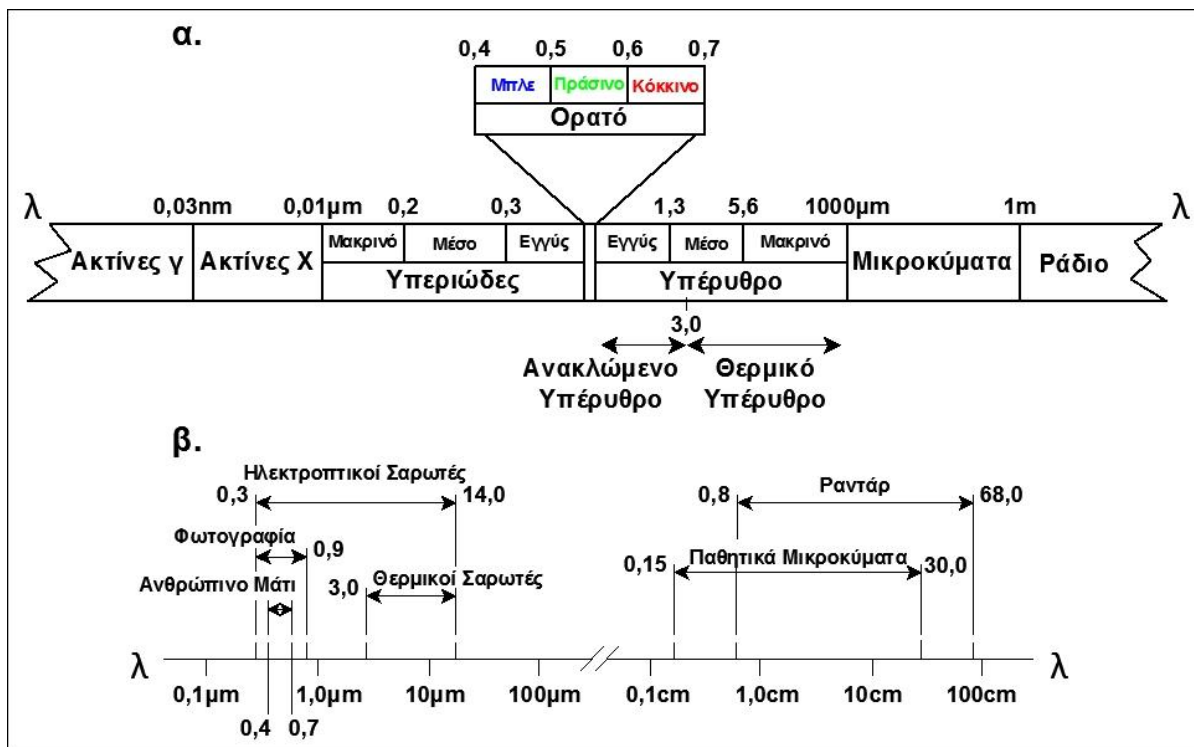
2.3 Θεωρητικό πλαίσιο

Αρχικά, στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικότερες αρχές που διέπουν τη λειτουργία των παθητικών δορυφορικών αισθητήρων και τα κύρια χαρακτηριστικά των ψηφιακών δορυφορικών δεδομένων. Στη συνέχεια περιγράφεται το γενικό θεωρητικό πλαίσιο των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων και της ανίχνευσης διαχρονικών αλλαγών, ακολουθώντας την αλληλουχία των σταδίων του μεθοδολογικού πλαισίου της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

2.3.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα – Φασματική υπογραφή – Ατμοσφαιρικά παράθυρα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι η ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σύμφωνα με το μήκος κύματος ή τη συχνότητα και περιλαμβάνει τις ακτίνες γ μέχρι και τα ραδιοκύματα (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες που παρουσιάζουν παρόμοια

χαρακτηριστικά, ενώ κάθε φασματική ζώνη (π.χ. ορατό) περιέχει μία σειρά υποδιαίρεσεων (π.χ. μπλε, πράσινο, κόκκινο) (Kadmon, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009).



Σχήμα 1. Χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (λ = μήκος κύματος). α) Οι κύριες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (χωρίς κλίμακα), β) φασματικές περιοχές των πιο κοινών τηλεπισκοπικών συστημάτων (τροποποιημένο από Kadmon, 2001, p.124).

Για την τηλεπισκόπηση και ιδιαίτερα για τους παθητικούς αισθητήρες, τα πιο σημαντικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι εκείνα που δημιουργούνται από την ακτινοβολία του Ήλιου και ειδικότερα το ορατό και το υπέρυθρο (Μερτίκας, 2009; Richards, 2013).

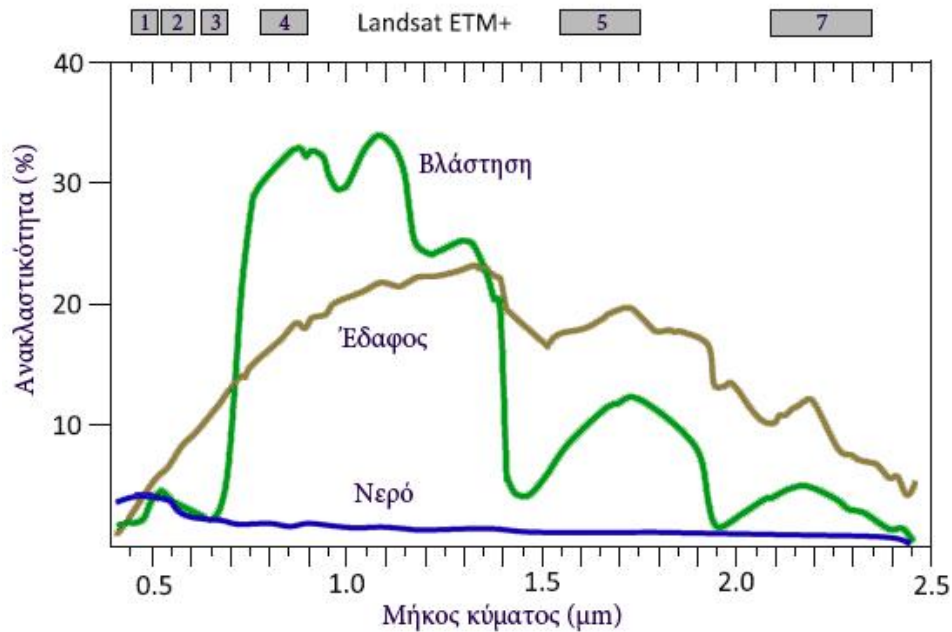
Το ορατό φάσμα, δηλαδή η ακτινοβολία που γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι, υποδιαιρείται σε τρία βασικά χρώματα, το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο (βλ. Σχήμα 1). Τα χρώματα αυτά, ονομάζονται πρωτεύοντα αθροιστικά χρώματα επειδή κανένα από αυτά δεν μπορεί να παραχθεί από σύνθεση δύο άλλων, ενώ όλα τα υπόλοιπα χρώματα μπορούν να δημιουργηθούν από το συνδυασμό των τριών αυτών πρωτευόντων χρωμάτων (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Το χρώμα ενός αντικειμένου ορίζεται από το μήκος κύματος του φωτός που ανακλά (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Έτσι, για παράδειγμα, η υγιής βλάστηση εμφανίζεται πράσινη επειδή η χλωροφύλλη ανακλά το πράσινο φως και απορροφά το μπλε και το κόκκινο (Johnston, 1998; Richards, 2013). Από την άλλη πλευρά, τα ενδιάμεσα χρώματα

σχηματίζονται όταν ένα αντικείμενο ανακλά περισσότερα χρώματα και σε διαφορετικό βαθμό (Μηλιαρέσης, 2003).

Η υπέρυθρος ακτινοβολία ξεκινά μετά από το ερυθρό τμήμα του ορατού φάσματος και περιλαμβάνει το εγγύς (0,7 – 1,3 μm), το μέσο (1,3 – 3 μm) και το μακρινό (3 – 15 μm) υπέρυθρο. Τα δύο πρώτα τμήματα της υπέρυθρης ακτινοβολίας έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με το ορατό φάσμα και αντιστοιχούν στην ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια της γης (ανακλώμενο υπέρυθρο). Αντιθέτως, το μακρινό υπέρυθρο αντιπροσωπεύει το τμήμα της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται από τη γη ως θερμική ενέργεια και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται επίσης θερμικό υπέρυθρο (Kadmon, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009).

Γενικότερα, το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται ή επανεκπέμπεται, από τα αντικείμενα της επιφάνειας της γης, στα διάφορα μήκη κύματος επηρεάζεται άμεσα από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τη σύσταση κάθε αντικειμένου (Lambin, 2001). Έτσι, κάθε υλικό παρουσιάζει ξεχωριστή κατανομή της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε σχέση με το μήκος κύματος λ (φασματική απόκριση) (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Η μορφή της καμπύλης της φασματικής απόκρισης ενός αντικειμένου σε σχέση με το μήκος κύματος λ ονομάζεται «φασματική υπογραφή» του αντικειμένου και είναι μοναδική για κάθε υλικό (Johnston, 1998; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009).

Η μελέτη της φασματικής υπογραφής των αντικειμένων μας επιτρέπει να επιλέγουμε τις φασματικές περιοχές (κανάλια) στις οποίες είναι ευκολότερη η διάκριση ενός αντικειμένου από κάποιο άλλο (Lambin, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η βλάστηση θα φαίνεται φωτεινότερη από το έδαφος στο κανάλι 4, ενώ στα κανάλια 5 και 7 θα συμβαίνει το αντίθετο.



Σχήμα 2. Φασματικές υπογραφές τριών κοινών τύπων κάλυψης γης και η φασματική δειγματοληψία του καταγραφικού συστήματος Landsat ETM+ (τροποποιημένο από Richards, 2013, p.11).

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, πριν καταγραφεί από τους δορυφορικούς αισθητήρες, διέρχεται μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα, με την οποία και αλληλεπιδρά. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή, τα αιωρούμενα σωματίδια και τα μόρια διαφόρων αερίων της ατμόσφαιρας παρεμποδίζουν τη διάδοση της ακτινοβολίας, σε ορισμένα μήκη κύματος, μέσω των μηχανισμών της σκέδασης και της απορρόφησης (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009).

Πίνακας 2. Τα σημαντικότερα ατμοσφαιρικά παράθυρα για τα παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης (Μερτίκας, 2009, p.58).

Φασματική ζώνη	Μήκος κύματος (μm)
Υπεριώδες και ορατό	0,30 – 0,75 και 0,77 – 0,91
Εγγύς και μέσο υπέρυθρο	1,55 – 1,75 και 2,05 – 2,40
Θερμικό υπέρυθρο	8,00 – 9,20 και 10,20 – 12,40

Έτσι, η ατμόσφαιρα επιλεκτικά επιτρέπει τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε πολύ συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος, οι οποίες για το λόγο αυτό ονομάζονται «ατμοσφαιρικά παράθυρα» (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009; Richards, 2013). Μερικά από τα πιο σημαντικά ατμοσφαιρικά παράθυρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Τα ατμοσφαιρικά παράθυρα σε συνδυασμό με τις φασματικές υπογραφές των αντικειμένων καθορίζουν το ποιες

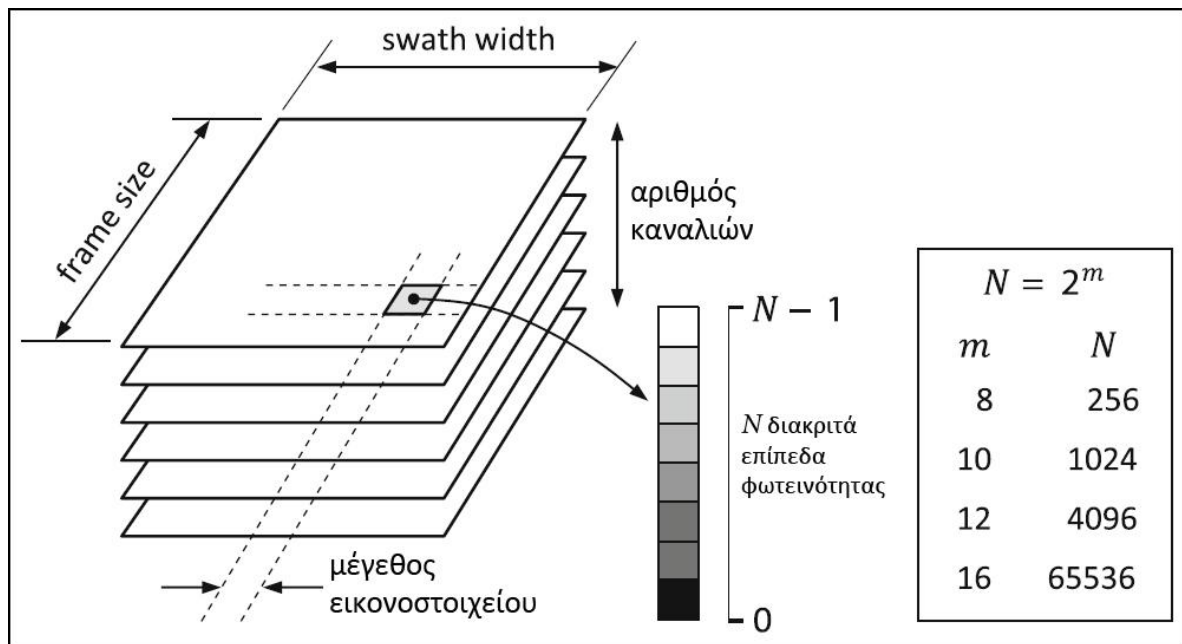
περιοχές του φάσματος είναι οι πιο χρήσιμες για τους σκοπούς της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και έτσι βάσει αυτών σχεδιάζονται και επιλέγονται τα επιμέρους τεχνικά χαρακτηριστικά των καταγραφικών συστημάτων.

2.3.2 Δορυφορικά τηλεπισκοπικά δεδομένα

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης καταγράφονται συνήθως σε ψηφιακή μορφή και επομένως είναι διαθέσιμα ως ψηφιακές εικόνες (Kadmon, 2001). Με άλλα λόγια, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που καταγράφεται σε ένα κανάλι ενός δορυφορικού αισθητήρα, αποδίδεται σε ψηφιακή εικόνα, η οποία περιέχει όλη την πληροφορία που έχει καταγραφεί στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή (κανάλι).

Μία ψηφιακή εικόνα αποτελείται από μία δισδιάστατη συστοιχία διακριτών στοιχείων, τα οποία ονομάζονται εικονοστοιχεία ή ψηφίδες (picture elements – pixels) και χαρακτηρίζονται από τη γεωγραφική θέση που κατέχουν μέσα στην εικόνα (Kadmon, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει τη μέση ένταση της ακτινοβολίας που μετράται από μια συγκεκριμένη περιοχή του εδάφους, η οποία ακτινοβολία μεταφράζεται σε ένα ψηφιακό αριθμό (Digital Number – DN) (Kadmon, 2001). Οι DN αποτελούν θετικές ακέραιες τιμές που εκφράζουν τη φωτεινότητα της κάθε περιοχής (Kadmon, 2001; Μερτίκας, 2009). Οι τιμές αυτές (τιμές φωτεινότητας) αποδίδονται με διαβαθμίσεις του γκριζου (Μηλιαρέσης, 2003; Μερτίκας, 2009). Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, στη ψηφιοποίηση της φωτεινότητας (κβαντοποίηση) των 8 bit αντιστοιχούν 256 (2^8) διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι, με το 0 να αντιστοιχεί στο μαύρο της εικόνας (μηδενική ανάκλαση – φωτεινότητα) και το 255 να αντιστοιχεί στο λευκό (μέγιστη ανακλαστικότητα – φωτεινότητα) (Μερτίκας, 2009).

Σε ότι αφορά την ποιότητα και το περιεχόμενο των δορυφορικών εικόνων, αυτά καθορίζονται από τα επιμέρους χαρακτηριστικά των καταγραφικών συστημάτων (Joseph, 1996; Κούτσιας, 2008; Μερτίκας, 2009; Richards, 2013). Τα κυριότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η χωρική, η φασματική, η ραδιομετρική και η χρονική διακριτική ικανότητα, τα οποία και έχουν παρουσιαστεί αναλυτικότερα στην ενότητα «2.2 Δορυφορική τηλεπισκόπηση».



Σχήμα 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών ψηφιακών εικόνων (τροποποιημένο από Richards, 2013, p.5).

Πέρα από τα φασματικά δεδομένα, πολλά δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης παρέχουν τη δυνατότητα σύνθεσης ΨΥΜΕ τοπικής, περιφερειακής ή και παγκόσμιας κλίμακας. Τα ΨΥΜΕ αποτελούν την πλέον σύγχρονη μορφή υψομετρικής πληροφορίας και έχουν την μορφή κανονικού τετραγωνικού δικτύου (ψηφιδωτό – πλέγμα με πλευρές σταθερής διάστασης) στις κορυφές του οποίου είναι γνωστό το υψόμετρο (Johnston, 1998; Μηλιαρέσης, 2003). Στην ουσία, ένα ΨΥΜΕ είναι μία ψηφιακή αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους, ενώ με τη βοήθεια λογισμικών ΓΣΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή σειράς ιδιοτήτων αναγλύφου, όπως είναι το υψόμετρο, η κλίση και η έκθεση του εδάφους (Johnston, 1998). Σήμερα υπάρχουν ΨΥΜΕ που παρέχουν παγκόσμια κάλυψη και διατίθενται ελεύθερα στο Διαδίκτυο. Τα σημαντικότερα ίσως από αυτά είναι το ASTER GDEM V2 (Global Digital Elevation Model Version 2) και το SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) GL1, καθώς παρέχουν τη μεγαλύτερη χωρική ανάλυση (διάσταση πλέγματος), η οποία είναι περίπου 30 m (1 arc sec) για το καθένα (USGS, 2015b).

2.3.3 Ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικών εικόνων - Ανίχνευση διαχρονικών αλλαγών

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της διάθεσης των δορυφορικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή, είναι η δυνατότητα επεξεργασίας και ανάλυσης των ψηφιακών εικόνων, μέσω των Η/Υ, για την άντληση διάφορων ποσοτικών πληροφοριών, καθώς και για τη βελτίωση της οπτικής τους εμφάνισης και την ενίσχυση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών για τη βέλτιστη και αποτελεσματικότερη ερμηνεία τους (Kadmon, 2001; Richards, 2013).

Στα πλαίσια των τηλεπισκοπικών μεθόδων, η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων πραγματοποιείται μέσω διαφόρων τεχνικών, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τις ανάγκες και τους σκοπούς της εκάστοτε έρευνας. Παρ' όλα αυτά, το σύνολο των τεχνικών αυτών μπορεί να ταξινομηθεί στις ακόλουθες τέσσερις βασικές κατηγορίες (Kadmon, 2001; Κούτσιας, 2008; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013):

- Προεπεξεργασία εικόνων, η οποία περιλαμβάνει την απαλοιφή των σφαλμάτων που περιέχονται στα δορυφορικά δεδομένα.
- Ενίσχυση/βελτίωση εικόνων, όπου εφαρμόζονται διάφοροι αλγόριθμοι για τη βελτίωση της οπτικής εμφάνισης των εικόνων, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η ερμηνεία τους. Κοινές τεχνικές βελτίωσης αποτελούν η «ενίσχυση αντίθεσης (φωτεινότητας)», η «διαστρωμάτωση πυκνότητας», το «φιλτράρισμα συχνοτήτων», το «χωρικό φιλτράρισμα» κ.ά.
- Πολυφασματικοί μετασχηματισμοί. Αναφέρονται στη συνδυασμένη επεξεργασία δεδομένων από πολλές φασματικές ζώνες (κανάλια) για τη δημιουργία «νέων δεδομένων», μέσω γραμμικών και μη γραμμικών αριθμητικών σχέσεων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η δημιουργία λόγων καναλιών και φασματικών δεικτών, η «ανάλυση κυρίων συνιστωσών», η σύνθεση χρωματικών/ψευδοχρωματικών εικόνων («έγχρωμα σύνθετα»), οι «χρωματικοί μετασχηματισμοί», η «συγχώνευση εικόνων» κ.ά.
- Ταξινόμηση εικόνων, με την οποία πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση των εικονοστοιχείων σε ομάδες, ή «τάξεις», με παρόμοια χαρακτηριστικά. Οι τάξεις αυτές μπορούν να εκφράζουν τύπους βλάστησης, καλύψεις γης, λιθολογικές ενότητες κ.ά.

Σε ότι αφορά την ανίχνευση διαχρονικών αλλαγών με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων, αυτή αναφέρεται στον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση των διαφορών που παρατηρούνται στα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος (π.χ. είδη βλάστησης, καλύψεις γης) μεταξύ δύο ή περισσότερων εικόνων, που λήφθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (διαχρονικές εικόνες) (Corpin & Bauer, 1996; Lu, et al., 2004). Για τον εντοπισμό και την ανάλυση των διαφορών αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: στις προ-ταξινομικές (pre-classification) και στις μετα-ταξινομικές (post-classification) τεχνικές (Χάρου, et al., 2012).

Οι προ-ταξινομικές τεχνικές συγκρίνουν διαχρονικές πολυφασματικές εικόνες ή εικόνες που προκύπτουν από αλγεβρικές πράξεις μεταξύ των καναλιών διαχρονικών εικόνων, εικόνες

φασματικών δεικτών (π.χ. δεικτών βλάστησης) ή μετασχηματισμούς των αρχικών εικόνων (π.χ. ανάλυση κυρίων συνιστωσών) (Coppin & Bauer, 1996; Mas, 1999; Lu, et al., 2004; Χάρου, et al., 2012). Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές δεν παρέχουν πληροφορία για το είδος της αλλαγής που έχει συντελεστεί (δηλαδή της μορφής «από – σε») (Χάρου, et al., 2012).

Αντιθέτως, στις μετα-ταξινομικές τεχνικές προηγείται η ταξινόμηση των διαχρονικών εικόνων (ταξινομείται η κάθε εικόνα χωριστά) και ακολούθως πραγματοποιείται σύγκριση των «νέων» ταξινομημένων εικόνων για να προσδιοριστούν οι αλλαγές που συντελέστηκαν στις διάφορες τάξεις (Coppin & Bauer, 1996; Mas, 1999; Lu, et al., 2004). Τα κύρια πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η δυνατότητα παροχής λεπτομερούς πληροφορίας σχετικά με το είδος της μεταβολής «από – σε» και η ελαχιστοποίηση των εξωτερικών επιδράσεων από τις ατμοσφαιρικές και περιβαλλοντικές διαφορές μεταξύ των διαχρονικών εικόνων (Coppin & Bauer, 1996; Lu, et al., 2004). Εντούτοις, η ακρίβεια των μετα-ταξινομικών συγκρίσεων εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των επιμέρους ταξινομήσεων, καθώς, όπως είναι φυσικό, οποιαδήποτε λάθη και ανακρίβειες της ταξινόμησης μεταφέρονται και στο αποτέλεσμα της σύγκρισης (Coppin & Bauer, 1996; Χάρου, et al., 2012).

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή η διερεύνηση των διαχρονικών αλλαγών, που συντελούνται στα είδη κάλυψης γης των υπό μελέτη περιοχών, πραγματοποιείται με τη χρήση μετα-ταξινομικών τεχνικών. Γενικότερα, η διαδικασία που ακολουθείται για την εφαρμογή των τεχνικών αυτών μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω στάδια (Mas, 1999; Lu, et al., 2004; Kolios & Stylios, 2013):

- α) Προεπεξεργασία δεδομένων.
- β) Εφαρμογή πολυφασματικών μετασχηματισμών (π.χ. επιλογή και δημιουργία φασματικών δεικτών) για την ενίσχυση της αρχικής φασματικής πληροφορίας.
- γ) Ταξινόμηση των εικόνων.
- δ) Αξιολόγηση της ακρίβειας ταξινόμησης.
- ε) Ανίχνευση και στατιστική ανάλυση των αλλαγών.

2.3.4 Προεπεξεργασία δεδομένων

Πριν την κύρια ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων προηγείται συνήθως η προεπεξεργασία τους προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα και οι αλλοιώσεις, που θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την ποιότητα της τελικής πληροφορίας και να οδηγήσουν σε λανθασμένα

αποτελέσματα και συμπεράσματα (Κούτσιας, 2008; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013). Το στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνει τις ραδιομετρικές και τις γεωμετρικές διορθώσεις.

Με τις ραδιομετρικές διορθώσεις επιχειρείται ο προσδιορισμός και η αντιστάθμιση των επιδράσεων εκείνων, που αλλοιώνουν τις ραδιομετρικές τιμές των εικονοστοιχείων (Kadmon, 2001; Paolini, et al., 2006). Αναλυτικότερα, οι ραδιομετρικές διορθώσεις μπορούν να διακριθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες (Μηλιαρέσης, 2003; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013):

- Στις διορθώσεις που εφαρμόζονται για να περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό τα σφάλματα, τα οποία δημιουργούνται από τη μη ιδανική λειτουργία των οργάνων καταγραφής (συστηματικός θόρυβος – «ζωνοποίηση» ψηφιακής εικόνας, τυχαίος θόρυβος κ.λπ.).
- Στις διορθώσεις που πραγματοποιούνται προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ραδιομετρικές αλλοιώσεις που οφείλονται στην επίδραση της ατμόσφαιρας, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του στόχου και του καταγραφικού συστήματος (ατμοσφαιρικές διορθώσεις).
- Στις διορθώσεις που γίνονται για να περιοριστεί η επίδραση της τοπογραφίας στα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά της εικόνας (ύπαρξη φαινομένων σκίασης σε εικονοστοιχεία, λόγω του αναγλύφου της απεικονιζόμενης περιοχής). Οι τοπογραφικές ραδιομετρικές διορθώσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια ΨΥΜΕ.

Από την άλλη, οι γεωμετρικές διορθώσεις εφαρμόζονται για την εξάλειψη των γεωμετρικών παραμορφώσεων, που εμφανίζουν οι πρωτογενείς δορυφορικές εικόνες και την αναγωγή των εικόνων στο επιθυμητό σύστημα γεωγραφικών ή προβολικών συντεταγμένων (π.χ. ΕΓΣΑ 87, WGS 84) (Kadmon, 2001).

Οι γεωμετρικές παραμορφώσεις προέρχονται από αποκλίσεις, που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της δορυφορικής λήψης και διακρίνονται σε συστηματικές και μη συστηματικές (Κούτσιας, 2008; Jones & Vaughan, 2010). Οι συστηματικές παραμορφώσεις οφείλονται στην επίδραση της περιστροφής της γης, στην καμπυλότητα της γης, στην πεπερασμένη αναλογία σάρωσης κ.ά., και γι' αυτό είναι σταθερές και προβλέψιμες και συνήθως διορθώνονται με βάση τις παραμέτρους της τροχιάς του δορυφόρου, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου καταγραφικού συστήματος, ενώ οι μη συστηματικές παραμορφώσεις μπορεί να προκύπτουν από δυσλειτουργίες του αισθητήρα και από αποκλίσεις του υψομέτρου, της ταχύτητας και της

θέσης του δορυφόρου και γι' αυτό είναι μη προβλέψιμες (Μηλιαρέσης, 2003; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013).

Γενικότερα, οι λεπτομερείς ραδιομετρικές και γεωμετρικές διορθώσεις αποτελούν πολύπλοκες και χρονοβόρες διαδικασίες και απαιτούν την ύπαρξη εξειδικευμένων πληροφοριών. Γι' αυτό το λόγο στις περισσότερες εφαρμογές οι διορθώσεις πραγματοποιούνται μόνο για τα βασικά σφάλματα (Richards, 2013). Επίσης, οι περισσότερες συστηματικές γεωμετρικές παραμορφώσεις και πολλά από τα βασικά ραδιομετρικά σφάλματα διορθώνονται συνήθως στα κέντρα διανομής δορυφορικών εικόνων, δηλαδή πριν τη διάθεση των δεδομένων στους τελικούς χρήστες (Jones & Vaughan, 2010).

Παρ' όλα αυτά, στις εφαρμογές ανίχνευσης διαχρονικών αλλαγών θα πρέπει πάντα να πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ραδιομετρικές και γεωμετρικές διορθώσεις, ούτως ώστε οι εκάστοτε δορυφορικές εικόνες να καθίστανται συγκρίσιμες και οι παρατηρούμενες αλλαγές να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατό περισσότερο τις πραγματικές μεταβολές, που συντελούνται στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης (Coppin & Bauer, 1996; Mas, 1999; Paolini, et al., 2006).

2.3.5 Λόγοι καναλιών και φασματικοί δείκτες – Έγχρωμα σύνθετα

Διάφορες μαθηματικές πράξεις (πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμός, διαίρεση κλπ.) μπορούν να εφαρμοστούν στις τιμές φωτεινότητας δύο ή περισσότερων φασματικών καναλιών μιας εικόνας, για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος και την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μία νέα μεταβλητή ή φασματικός δείκτης που μπορεί να αναπαραχθεί ως ένα νέο επίπεδο πληροφορίας – εικόνα (Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013).

Οι λόγοι φασματικών καναλιών αποτελούν μία από τις πιο χρήσιμες τεχνικές επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων, καθώς περιορίζουν ως ένα βαθμό την επίδραση του τοπογραφικού αναγλύφου και των σκιάσεων (ατμοσφαιρική διάχυση) στις προκύπτουσες εικόνες (Μηλιαρέσης, 2003; Richards, 2013). Επιπλέον, με τη διαίρεση των κατάλληλων καναλιών ενισχύεται η αντίθεση των αντικειμένων, της γήινης επιφάνειας, των οποίων οι φασματικές αποκρίσεις παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά στα συγκεκριμένα κανάλια (Μηλιαρέσης, 2003; Jones & Vaughan, 2010).

Για παράδειγμα, η υγιής βλάστηση παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο (near infrared – NIR) και πολύ χαμηλή στο κόκκινο τμήμα του φάσματος (Red), ενώ παράλληλα οι υπόλοιπες καλύψεις γης δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλες διαφορές ανάκλασης στις συγκεκριμένες φασματικές περιοχές (Rouse, et al., 1973; Jones & Vaughan, 2010). Έτσι, η εφαρμογή του λόγου των φασματικών καναλιών NIR / Red, επιτρέπει τη διάκριση των περιοχών με βλάστηση από τις χέρσες περιοχές, καθότι οι μεγάλες τιμές του λόγου θα αντιπροσωπεύουν εικονοστοιχεία με μεγάλο ποσοστό βλάστησης, ενώ οι μικρές τιμές θα αντιπροσωπεύουν εικονοστοιχεία με ελάχιστη ή καθόλου βλάστηση (Rouse, et al., 1973; Μηλιαρέσης, 2003).

Η κανονικοποιημένη μορφή του παραπάνω λόγου (NIR / Red) αναφέρεται ως «κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης» (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) και αποτελεί τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο φασματικό δείκτη για τη χαρτογράφηση και παρακολούθηση της βλάστησης και τον προσδιορισμό της κατάστασης της (Kadmon, 2001; Lambin, 2001; Richards, 2013). Ο NDVI ορίζεται από την παρακάτω σχέση (Rouse, et al., 1973):

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

και οι τιμές του κυμαίνονται από -1 (καθόλου βλάστηση) έως +1 (πυκνή βλάστηση).

Γενικότερα, με βάση τη φασματική συμπεριφορά των αντικειμένων της επιφάνειας της γης έχει δημιουργηθεί μία σειρά φασματικών δεικτών (σχέσεων μεταξύ φασματικών καναλιών) που, εκτός από τη βλάστηση (vegetation indices – δείκτες βλάστησης), αφορούν τη χαρτογράφηση / οριοθέτηση υδάτινων επιφανειών ή τον προσδιορισμό της υγρασίας του εδάφους (water indices – δείκτες νερού / υγρασίας), την ενίσχυση των χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων εδάφους (soil indices – δείκτες εδάφους) κ.ά. (Jones & Vaughan, 2010; Kolios & Stylios, 2013; Richards, 2013).

Πέραν της σύνθεσης διαφόρων φασματικών δεικτών, τα πολυφασματικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη δημιουργία έγχρωμων σύνθετων εικόνων. Τα έγχρωμα σύνθετα προκύπτουν από το συνδυασμό τριών φασματικών καναλιών, που προβάλλονται στην οθόνη του Η/Υ με ένα από τα τρία βασικά χρώματα (κόκκινο, πράσινο, μπλε) το κάθε ένα (Jones & Vaughan, 2010; Χάρου, et al., 2012; Richards, 2013). Επομένως, ένα έγχρωμο σύνθετο παρέχει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης παρατήρησης της φασματικής συμπεριφοράς των αντικειμένων της επιφάνειας της γης σε τρεις διαφορετικές φασματικές ζώνες (Jones & Vaughan, 2010).

Διάφοροι συνδυασμοί καναλιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάδειξη και τον προσδιορισμό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της απεικονιζόμενης περιοχής (Jones & Vaughan, 2010), ενώ το πλήθος των συνδυασμών αυτών εξαρτάται, όπως είναι φυσικό, από τον αριθμό των καναλιών του εκάστοτε καταγραφικού συστήματος.

Ακολούθως, παρουσιάζονται μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα έγχρωμων σύνθετων, με βάση τα κανάλια των αισθητήρων Landsat TM και ETM+ (Μηλιαρέσης, 2003; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013):

- Ο συνδυασμός των καναλιών 3, 2, 1 (κόκκινο, πράσινο, μπλε), που προβάλλονται στην οθόνη με τη χρωματική σειρά RGB (Red, Green, Blue), δημιουργεί μια έγχρωμη εικόνα (αντίστοιχη της έγχρωμης φωτογραφίας), στην οποία τα αντικείμενα της επιφάνειας της γης θα εμφανίζονται με τα «φυσικά» τους χρώματα (όπως τα βλέπει ο άνθρωπος με γυμνό μάτι).
- Στην ψευδοχρωματική σύνθεση RGB: 432 (εγγύς υπέρυθρο, κόκκινο, πράσινο) δημιουργείται μία έγχρωμη υπέρυθρη εικόνα, όπου η βλάστηση θα ξεχωρίζει με έντονο ερυθρό χρώμα. Επίσης, ευδιάκριτα θα είναι και τα όρια των υδάτινων επιφανειών, οι οποίες θα εμφανίζονται με μαύρο ή μπλε χρώμα.
- Με την ψευδοχρωματική σύνθεση RGB: 742 (μέσο υπέρυθρο, εγγύς υπέρυθρο, πράσινο) γίνεται δυνατή η διάκριση μεταξύ κωνοφόρων (σκούρο πράσινο) και πλατύφυλλων (ανοιχτό πράσινο) δέντρων.

2.3.6 Φασματική ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων

Η φασματική ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων αφορά τη διαδικασία κατηγοριοποίησης των εικονοστοιχείων μιας εικόνας σε δύο ή περισσότερες θεματικές τάξεις, με ομοιογενή φασματικά χαρακτηριστικά (Μερτίκας, 2009). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται συνήθως σε πολυφασματικές εικόνες και η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων βασίζεται στην ουσία στα στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών φωτεινότητας τους, δηλαδή στις φασματικές τους υπογραφές (Kadmon, 2001; Jones & Vaughan, 2010). Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης είναι μία «νέα» εικόνα με διακριτές θεματικές κλάσεις. Ο θεματικός αυτός «χάρτης» απεικονίζει στην ουσία τη χωρική κατανομή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας, τα οποία συνήθως αντιπροσωπεύουν καλύψεις γης ή τύπους βλάστησης ή είδη καλλιεργειών κ.λπ. (Kadmon, 2001; Jones & Vaughan, 2010).

Οι διαδικασίες φασματικής ταξινόμησης μπορούν να διακριθούν, με βάση τη μεθοδολογία προσέγγισης, σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στη μη επιβλεπόμενη και στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

Στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση γίνεται χρήση αλγορίθμων – ταξινομητών ομαδοποίησης (π.χ. k-means, ISODATA), μέσω λογισμικών τηλεπισκόπησης, οι οποίοι αντιστοιχίζουν τα εικονοστοιχεία μιας εικόνας, με βάση τις φασματικές τους ιδιότητες, στα επικρατέστερα φασματικά σύνολα που υπάρχουν στην εικόνα (Kadmon, 2001; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013). Στις διαδικασίες αυτές δεν απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση του αναλυτή σχετικά με τη φασματική πληροφορία που περιέχεται στην εικόνα (Μερτίκας, 2009; Richards, 2013), ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις ο αναλυτής μπορεί να προκαθορίσει τον επιθυμητό αριθμό των φασματικών κλάσεων εξόδου (Jones & Vaughan, 2010). Στο τελικό στάδιο όμως και αφού έχει ολοκληρωθεί η ταξινόμηση της εικόνας, ο αναλυτής θα πρέπει να προσδιορίσει τις καλύψεις γης, που αντιστοιχούν στις προκύπτουσες φασματικές κλάσεις, συγκρίνοντας την ταξινομημένη εικόνα με διάφορα διαθέσιμα δεδομένα αναφοράς, όπως, για παράδειγμα, παρατηρήσεις πεδίου, τυπωμένοι χάρτες, αεροφωτογραφίες κλπ. (Kadmon, 2001; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013).

Από την άλλη πλευρά, στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση ο αναλυτής καθορίζει εκ των προτέρων τον αριθμό και το είδος των θεματικών τάξεων, καθώς και τα φασματικά τους χαρακτηριστικά, με τη βοήθεια «δειγμάτων εκπαίδευσης» (training samples/areas), δηλαδή αντιπροσωπευτικών εμφανίσεων των τάξεων στην εικόνα (Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013). Τα δείγματα αυτά αποτελούν περιοχές της εικόνας, στις οποίες είναι γνωστή η κάλυψη γης και ο αναλυτής τις ορίζει χρησιμοποιώντας συνήθως δεδομένα πεδίου ή αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης (Johnston, 1998; Μερτίκας, 2009; Richards, 2013). Αφού επιλεγούν οι περιοχές εκπαίδευσης, πραγματοποιείται η στατιστική τους ανάλυση, βάσει ενός αλγορίθμου ταξινόμησης, για να προσδιοριστούν οι φασματικές ιδιότητες (φασματική υπογραφή) της κάθε κλάσης. Στη συνέχεια, ο ταξινομητής χρησιμοποιεί τις φασματικές υπογραφές των κλάσεων για να εντοπίσει εικονοστοιχεία με παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά και να τα αποδώσει στην αντίστοιχη κλάση (Kadmon, 2001; Μηλιαρέσης, 2003; Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013).

Οι αλγόριθμοι, που χρησιμοποιούνται στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση ποικίλουν και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες (Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013):

- α) στους παραμετρικούς ταξινομητές, οι οποίοι κάνουν την υπόθεση ότι τα δεδομένα παρουσιάζουν κανονικές κατανομές και έτσι μπορούν να ταξινομηθούν με βάση κάποια σύνολα παραμέτρων, όπως είναι ο μέσος και η συνδιασπορά της κάθε κλάσης
- β) και στους μη παραμετρικούς ταξινομητές, οι οποίοι δεν βασίζονται στην υπόθεση της κανονικής κατανομής των δεδομένων και επομένως δεν εξαρτώνται από παραμετρικές παραδοχές.

Παραδοσιακά, οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι οι παραμετρικοί και πιο συγκεκριμένα, οι ταξινομητές: της ελάχιστης απόστασης (Minimum Distance Classifier – MDC), του παραλληλεπιπέδου (Parallelepiped Classifier – PPC) και της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Classifier – MLC) (Jones & Vaughan, 2010; Richards, 2013). Ωστόσο, τις τελευταίες δύο δεκαετίες σημαντικό έδαφος έχουν κερδίσει οι μη παραμετρικοί αλγόριθμοι, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANN) και οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines – SVM), οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα ταξινόμησης (Srivastava, et al., 2012; Kolios & Stylios, 2013; Richards, 2013).

Γενικότερα, όμως, δεν υπάρχει μία συγκεκριμένη μεθοδολογία ή αλγόριθμος που να παρουσιάζει πάντα τη μεγαλύτερη ακρίβεια ταξινόμησης, καθώς η απόδοση της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως από τη μορφολογία και την έκταση της εξεταζόμενης περιοχής, τα χαρακτηριστικά της δορυφορικής εικόνας, τη μεθοδολογία προεπεξεργασίας των δεδομένων, την εγκυρότητα των δειγμάτων εκπαίδευσης και κυρίως από την εμπειρία και τις δεξιότητες του ίδιου του αναλυτή (Richards, 2013).

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι πολλές φορές στις διαδικασίες ταξινόμησης χρησιμοποιούνται διάφορα επιπρόσθετα στοιχεία, όπως, για παράδειγμα, φασματικοί δείκτες και δεδομένα που προέρχονται από ΨΥΜΕ (π.χ. υψόμετρο, κλίση και έκθεση του εδάφους), τα οποία, σε συνδυασμό με τα εκάστοτε διαθέσιμα φασματικά κανάλια, μπορούν να συμβάλλουν στον εμπλουτισμό της αρχικής πληροφορίας, οδηγώντας έτσι σε πιο ακριβή αποτελέσματα ταξινόμησης (Jones & Vaughan, 2010; Kolios & Stylios, 2013).

2.3.7 Ταξινόμηση με δέντρα αποφάσεων

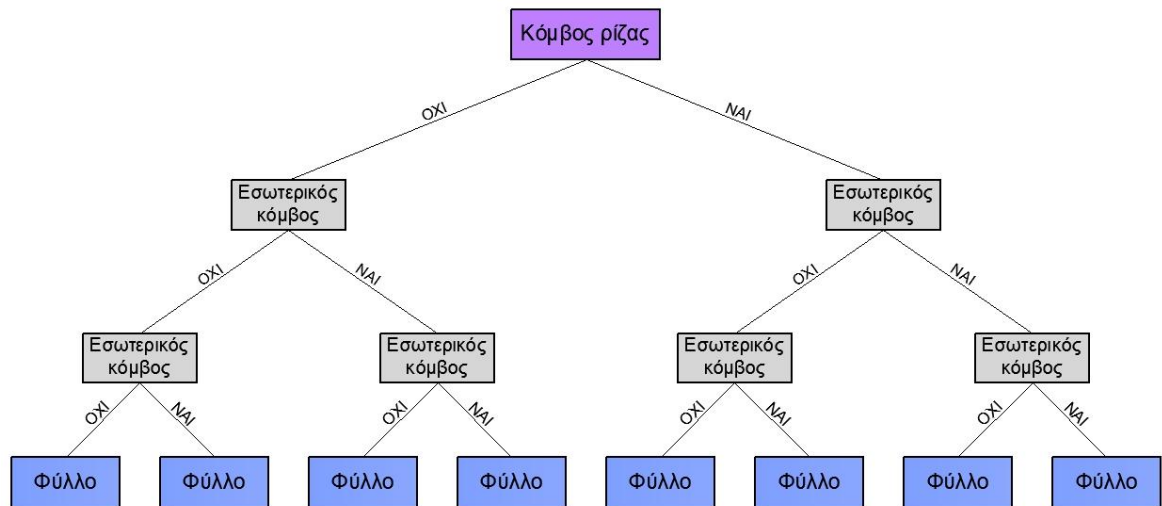
Οι συνήθεις αλγόριθμοι ταξινόμησης, όπως αυτοί που αναφέρθηκαν πιο πάνω, αποτελούν όλοι τους προσεγγίσεις ενός σταδίου (single stage classifiers), αυτό σημαίνει ότι λαμβάνουν πάντα

μόνο μία απόφαση για την κατηγοριοποίηση ενός εικονοστοιχείου σε μία από τις διαθέσιμες θεματικές τάξεις. Εναλλακτικά, υπάρχουν, επίσης, τεχνικές ταξινόμησης πολλαπλών σταδίων (multistage classifiers), στις οποίες, αντί της μίας σύνθετης απόφασης, λαμβάνεται μια σειρά απλούστερων αποφάσεων για να καθοριστεί η πιο κατάλληλη κλάση για ένα εικονοστοιχείο (Pal & Mather, 2003; Richards, 2013).

Ευρέως χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι πολλαπλών σταδίων, στις διαδικασίες ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων, είναι τα λεγόμενα δέντρα αποφάσεων (Decision Trees – DT) ή αλλιώς δέντρα ταξινόμησης (classification trees), τα οποία αποτελούν μη παραμετρικούς, ιεραρχικούς ταξινομητές (Richards, 2013). Ένα DT ορίζεται ως ένα σύνολο ιεραρχικών κανόνων, που διαχωρίζει διαδοχικά το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο σύνολο δεδομένων σε «καθαρότερα», πιο ομοιογενή υποσύνολα (Hansen, Dubayah & DeFries, 1996; Pal & Mather, 2003). Η δομή που προκύπτει κατά αυτόν τον τρόπο αναπαριστάται με τη βοήθεια ενός διαγράμματος, το οποίο παίρνει τη μορφή «ανάποδου» δέντρου (βλ. Σχήμα 4). Το «δέντρο» αυτό ξεκινά από έναν αρχικό κόμβο (κόμβος ρίζας) και διακλαδώνεται (από πάνω προς τα κάτω) σε ένα σύνολο εσωτερικών και τερματικών κόμβων (Sharma, Ghosh & Joshi, 2013). Ο αρχικός κόμβος περιέχει το σύνολο των δεδομένων, ενώ μαζί με τους εσωτερικούς κόμβους αποτελούν τους κόμβους απόφασης ή διάσπασης, στους οποίους πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των δεδομένων, με βάση κάποια προκαθορισμένα κριτήρια (Richards, 2013). Οι τερματικοί κόμβοι ή αλλιώς τα «φύλλα» αποτελούν τα σημεία στα οποία κατατάσσονται τα δεδομένα, αντιπροσωπεύουν, δηλαδή, τις εκάστοτε θεματικές τάξεις (Ghose, Pradhan & Ghose, 2010; Richards, 2013; Sharma, Ghosh & Joshi, 2013).

Τα πιο απλά και τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα DT είναι τα δυαδικά δέντρα αποφάσεων (Richards, 2013). Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται μία γενική άποψη της δομής ενός δυαδικού DT. Ο όρος δυαδικό αναφέρεται στο γεγονός ότι κάθε μη τερματικός κόμβος θα διαχωρίζεται πάντα σε δύο άλλους κόμβους (Ghose, Pradhan & Ghose, 2010; Richards, 2013).

Για παράδειγμα, μια πιθανή διάσπαση μπορεί να είναι $NDVI > 0,40$ και $NDVI < 0,40$ (Hansen, Dubayah & DeFries, 1996). Με βάση τη μέθοδο ανάπτυξης ενός δυαδικού DT, η ταξινόμηση ενός εικονοστοιχείου πραγματοποιείται ακολουθώντας τη διαδρομή, που καθορίζεται από τις απαντήσεις στις ερωτήσεις που σχετίζονται με τους κόμβους διάσπασης· κατευθύνεται, δηλαδή, είτε μέσω των κλαδιών «ΝΑΙ» (καταφατική απάντηση) είτε μέσω των κλαδιών «ΟΧΙ» (αρνητική απάντηση), έως ότου καταλήξει σε ένα φύλλο (βλ. Σχήμα 4) (Cortijo & Perez de la Blanca, 1997).



Σχήμα 4. Παράδειγμα δομής ενός δυαδικού δέντρου απόφασης.

Η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και αποτελεσματικού DT αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία και περιέχει αρκετές επαναλήψεις για την εκπαίδευση του δέντρου (ορισμός των κόμβων, προσθήκη ή αφαίρεση φύλλων κλπ.) (Brown de Colstoun, et al., 2003). Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος των DT παρουσιάζει μία σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων, τα οποία, εκτός των άλλων, περιλαμβάνουν το γεγονός ότι διαφορετικά σύνολα χαρακτηριστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε κόμβο απόφασης, επιτρέποντας έτσι την επιλογή μόνο των χαρακτηριστικών εκείνων που βελτιστοποιούν το διαχωρισμό μεταξύ των τύπων κάλυψης γης (Hansen, Dubayah & DeFries, 1996; Richards, 2013). Επιπλέον, σε κάθε στάδιο απόφασης, δύνανται να χρησιμοποιηθούν, διαφορετικοί τύποι δεδομένων, ακόμη και διαφορετικοί αλγόριθμοι (Richards, 2013), ενώ η απλή και κατανοητή ιεραρχική δομή των DT παρέχει τη δυνατότητα για την αξιολόγηση της συνεισφοράς των χαρακτηριστικών και των μεταξύ τους σχέσεων και αλληλεπιδράσεων, καθώς και επιτρέπει την παρέμβαση του αναλυτή για τη διόρθωση των διασπάσεων που σχετίζονται με ελαττωματικά ή αντιφατικά δεδομένα εκπαίδευσης (Hansen, Dubayah & DeFries, 1996; Hansen, et al., 2000).

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν καταστήσει τα DT μία σημαντική εναλλακτική προσέγγιση ταξινόμησης τηλεπισκοπικών δεδομένων, ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάλυση δεδομένων, που παρουσιάζουν πολύπλοκη δομή και στην επίλυση προβλημάτων, που σχετίζονται με μικτά εικονοστοιχεία (εικονοστοιχεία που αντιπροσωπεύουν περισσότερες από μία καλύψεις γης) και γενικότερα με την παρουσία μεγάλων φασματικών επικαλύψεων μεταξύ των θεματικών τάξεων (Hansen, Dubayah & DeFries, 1996; Cortijo & Perez de la Blanca, 1997; Hansen, et al., 2000; Jones & Vaughan, 2010).

Στο πλαίσιο αυτό, για την ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής επιλέχθηκε η μέθοδος των DT, καθώς οι εξεταζόμενες περιοχές παρουσιάζουν έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο και έντονες εναλλαγές μεταξύ των τύπων κάλυψης γης, με αποτέλεσμα την παρουσία αρκετών μικτών εικονοστοιχείων και φασματικών επικαλύψεων μεταξύ των κλάσεων.

2.3.8 Εκτίμηση ακρίβειας ταξινόμησης

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ταξινόμησης είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της. Το τελικό αυτό στάδιο είναι ουσιαστικής σημασίας, καθώς, βάσει του επιπέδου ακρίβειας, εκτιμάται η απόδοση της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης μεθόδου ταξινόμησης. Παράλληλα, η εκτίμηση της ακρίβειας ταξινόμησης παρέχει την πληροφορία που χρειάζεται για να προσδιοριστεί η αξιοπιστία και επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και να αξιολογηθεί η καταλληλότητα τους στη λήψη αποφάσεων (Κούτσιας, 2008; Richards, 2013).

Το γενικό πλαίσιο της διαδικασίας αυτής περιλαμβάνει τη σύγκριση μιας ταξινομημένης εικόνας με προκαθορισμένα δεδομένα αναφοράς (σημεία επαλήθευσης – validation points), τα οποία υποθετικά αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές κατηγορίες καλύψεων γης (π.χ. «στοιχεία υπαίθριας επιβεβαίωσης» – «ground truth points», γεωχωρικά δεδομένα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης κ.λπ.), έτσι ώστε να προσδιοριστεί το πλήθος των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν σε λάθος κλάση (Κούτσιας, 2008). Τα παραγόμενα αυτά σφάλματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Κούτσιας, 2008, p.300):

- α) σε σφάλματα παράλειψης, τα οποία αναφέρονται σε εικονοστοιχεία που ανήκουν στην θεματική τάξη ενδιαφέροντος, αλλά ο ταξινομητής εσφαλμένα δεν τα έχει προσδιορίσει και
- β) σε σφάλματα πρόσθεσης, τα οποία αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία από άλλες κλάσεις, αλλά ο ταξινομητής εσφαλμένα τα ταξινομεί στην ενδιαφερόμενη κλάση.

Η εκτίμηση της ακρίβειας των ταξινομήσεων πραγματοποιείται με τη δημιουργία πινάκων σύγχυσης ή αλλιώς σφάλματος (confusion / error matrix) (Κούτσιας, 2008; Richards, 2013). Στην ουσία, ο πίνακας σύγχυσης συγκρίνει τα εικονοστοιχεία αναφοράς με τα ταξινομημένα σημεία σε έναν πίνακα διαστάσεων ίσων με τον αριθμό των θεματικών τάξεων, όπου τα σφάλματα παράλειψης παρουσιάζονται στις στήλες του πίνακα, ενώ τα σφάλματα πρόσθεσης στις γραμμές αυτού (Κούτσιας, 2008, p.300).

Με βάση τον πίνακα σύγκρισης μπορεί να υπολογιστεί μια σειρά από περιγραφικά και αναλυτικά στατιστικά μεγέθη. Για τις ταξινομημένες εικόνες της παρούσας διατριβής υπολογίστηκαν οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες:

- Η συνολική ακρίβεια (overall accuracy), η οποία προκύπτει διαιρώντας το συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν σωστά (το άθροισμα των τιμών των κελιών που βρίσκονται στην κύρια διαγώνιο του πίνακα) με τον συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων αναφοράς (ENVI User's Guide, 2009).
- Ο συντελεστής K (Kappa coefficient), ο οποίος είναι η μέτρηση της διαφοράς μεταξύ των πραγματικών (όπως παρουσιάζονται στα διαγώνια στοιχεία του πίνακα σύγκρισης) και των τυχαίων συμφωνιών, που παρατηρήθηκαν ανάμεσα στα δεδομένα αναφοράς και της ταξινόμησης (ENVI User's Guide, 2009). Με άλλα λόγια, ο συντελεστής K παρέχει μια πιο αντικειμενική εκτίμηση της ακρίβειας ταξινόμησης εξαλείφοντας την τυχαία ορθότητα (Bortels, et al., 2011, p.218). Ο υπολογισμός του δείκτη αυτού πραγματοποιείται με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο (ENVI User's Guide, 2009):

$$K = \frac{N \times \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})},$$

όπου N είναι το πλήθος των παρατηρήσεων που περιλαμβάνονται στον πίνακα σύγκρισης, i είναι ο αριθμός των τάξεων, r είναι ο αριθμός των γραμμών του πίνακα, x_{ii} είναι το πλήθος των παρατηρήσεων στη γραμμή i και τη στήλη i (στην κύρια διαγώνιο), x_{i+} είναι το σύνολο των παρατηρήσεων στη γραμμή i (στο δεξιό μέρος του πίνακα) και x_{+i} είναι το σύνολο των παρατηρήσεων στη στήλη i (στο κάτω μέρος του πίνακα).

2.4 Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας

Η χαρτογράφηση των καλύψεων/χρήσεων γης και η ανίχνευση των διαχρονικών μεταβολών τους αποτελούν τις πιο κοινές και ίσως τις σημαντικότερες εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Δορυφορικά δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης, όπως αυτά των καταγραφικών συστημάτων AVHRR και MODIS, έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη σύνθεση παγκόσμιων χαρτών κάλυψης γης (Hansen, et al., 2000; Friedl, et al., 2002) και βλάστησης (Hansen, et al., 2003) και τη δημιουργία προϊόντων παγκόσμιας δεντροκάλυψης, που προορίζονται για την υποστήριξη μοντέλων του κύκλου του άνθρακα κ.ά. (DeFries, et al., 2000). Επίσης, σε ηπειρωτική κλίμακα, το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα CORINE Land Cover (CLC) με τους θεματικούς χάρτες CLC 1990, 2000, 2006 και 2012, αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα

παραδείγματα καταγραφής και παρακολούθησης καλύψεων/χρήσεων γης, με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Copernicus, 2016).

Συγχρόνως, μεγάλο επιστημονικό και ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των δασικών εκτάσεων, λόγω κυρίως των πιέσεων και των μεταβολών που υφίστανται οι περιοχές αυτές και των σημαντικών επιδράσεων τους στο παγκόσμιο κλίμα και τη βιοποικιλότητα. Διεθνή προγράμματα παρακολούθησης, που βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα, όπως, το «Landsat Pathfinder Humid Tropical Deforestation Project» της NASA και το «TREES project» του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχουν συμβάλει καθοριστικά στην καταγραφή και κατανόηση των αλλαγών που υφίστανται τα τροπικά δάση (Achard, et al., 2002; Ramankutty, et al., 2006), ενώ επίσης, ένας σημαντικός αριθμός τηλεπισκοπικών ερευνών καταδεικνύει το πρόβλημα της εκτεταμένης αποψίλωσης και της ελλιπούς διαχείρισης των περιοχών αυτών (Skole & Tucker, 1993; Sader, et al., 2001; Achard, et al., 2002). Παράλληλα, ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organization – FAO), των Ηνωμένων Εθνών, βασιζόμενος σε τηλεπισκοπικές και άλλες μεθόδους, εκδίδει ανά πενταετία εκθέσεις σχετικά με την κατάσταση και τη διαχρονική πορεία των δασών σε παγκόσμιο επίπεδο, οι οποίες αναδεικνύουν τα προαναφερθέντα προβλήματα των τροπικών δασών, ωστόσο σημειώνουν μία μικρή αλλά σταθερή επέκταση των εύκρατων και αρκτικών δασών (FAO, 2015).

Άλλες σημαντικές μελέτες επικεντρώνονται στα ορεινά δασικά οικοσυστήματα. Για παράδειγμα, οι Kuemmerle, et al. (2009) και Griffiths, et al. (2014), χρησιμοποιώντας δεδομένα Landsat, διερεύνησαν τις διαχρονικές αλλαγές στη δασική κάλυψη στα Καρπάθια Όρη και επισήμαναν τις μεγάλες μεταβολές που έλαβαν χώρα τις τελευταίες δεκαετίες, αναδεικνύοντας παράλληλα το σημαντικό ρόλο που μπορούν να παίξουν τα δορυφορικά δεδομένα στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και στην αντιμετώπιση των διαχειριστικών κενών της δασικής πολιτικής των μετα-σοσιαλιστικών κρατών.

Ένα κρίσιμο ζητούμενο, στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των ευαίσθητων οικοσυστημάτων, είναι η ακρίβεια με την οποία καταγράφονται οι καλύψεις γης και οι διαχρονικές μεταβολές τους (Gartzia, et al., 2013). Καθώς, η πλειοψηφία των ερευνών ανίχνευσης αλλαγών χρησιμοποιεί μετα-ταξινομικές τεχνικές (Olofsson, et al., 2013), ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί στη σύγκριση και αξιολόγηση αλγορίθμων και μεθόδων ταξινόμησης, καθώς και στην ανεύρεση τεχνικών βελτίωσης της ακρίβειας χαρτογράφησης. Σε πολλές έρευνες

σύγκρισης αλγορίθμων ταξινόμησης καλύψεων γης, τα DT παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια χαρτογράφησης από αυτή των παραδοσιακών ταξινομητών (π.χ. MLC, ISODATA) και αν όχι καλύτερα, παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των άλλων μη παραμετρικών ταξινομητών (π.χ. ANN, SVM) (Hansen, Dubayah & Defries, 1996; Boyd, Sanchez-Hernandez & Foody, 2006; Ghose, Pradhan & Ghose, 2010; Keshtkar, et al., 2013; Sharma, Ghosh & Joshi, 2013). Παράλληλα, αρκετές έρευνες (Sesnie, et al., 2008; Gartzia, et al., 2013; Keshtkar, et al., 2013), οι οποίες αξιοποιούν τις ευελιξίες που προσφέρουν οι μέθοδοι των DT, αναφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια χαρτογράφησης, όταν στις διαδικασίες ταξινόμησης συμπεριλαμβάνονται και βοηθητικά δεδομένα, όπως ΨΥΜΕ, δείκτες βλάστησης κλπ.

Τα DT, λοιπόν, παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα και μολονότι δεν αποτελούν τη δημοφιλέστερη μέθοδο ταξινόμησης, εντούτοις, έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε αρκετές εφαρμογές, όπως: ανίχνευση αλλαγών σε αστικό περιβάλλον (Chan, Chan & Yeh, 2001), χαρτογράφηση των καλύψεων γης (Hansen, et al., 2000) και της βλάστησης (Hansen, et al., 2003) σε παγκόσμιο επίπεδο, διερεύνηση διαχρονικών μεταβολών της δασικής κάλυψης σε ηπειρωτικό επίπεδο (Potarov, et al., 2015), παρακολούθηση των αλλαγών της βλάστησης σε υγροτόπους (Liu, et al., 2008) κλπ. Επίσης, τα δέντρα ταξινόμησης έχουν χρησιμοποιηθεί και σε πολλές μελέτες αποτύπωσης και διαχρονικής παρακολούθησης των καλύψεων γης, της βλάστησης και των τύπων οικοτόπων προστατευόμενων περιοχών (π.χ. Brown de Colstoun, et al., 2003; Parmenter, et al., 2003; Boyd, Sanchez-Hernandez & Foody, 2006; Sesnie, et al., 2008).

Γενικότερα, σε ότι αφορά τις προστατευόμενες περιοχές, η τηλεπισκόπηση και τα ΓΣΠ κερδίζουν συνεχώς έδαφος τις τελευταίες δεκαετίες ως εργαλεία παρακολούθησης και αξιολόγησης των περιοχών αυτών. Για παράδειγμα, από το 1992 το USGS και η Εθνική Υπηρεσία Πάρκων (National Park Service – NPS) των ΗΠΑ τρέχουν από κοινού το «Πρόγραμμα Χαρτογράφησης Βλάστησης USGS-NPS», το οποίο αφορά στην παραγωγή χαρτών βλάστησης, για τα εθνικά πάρκα της Αμερικής, με τη συνδυασμένη χρήση αεροφωτογραφιών και δεδομένων πεδίου (Brown de Colstoun, et al., 2003, p.319). Ομοίως, στα πλαίσια της σύμβασης Ramsar, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος ίδρυσε το πρόγραμμα «GlobWetland», με σκοπό τη συστηματική παρακολούθηση 50 και πλέον σημαντικών υγροτόπων, ανά τον κόσμο, όπου, εκτός των άλλων, πραγματοποιείται η διαχρονική καταγραφή των καλύψεων γης και της βλάστησης των περιοχών αυτών, με μεθόδους δορυφορικής τηλεπισκόπησης (Ramankutty, et al., 2006, p.30).

Παρ' όλα αυτά, όσον αφορά το Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000, οι Vanden Borre, et al. (2011) αναφέρουν ότι η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι ακόμη περιορισμένη, καθώς στα περισσότερα κράτη μέλη οι εκτιμήσεις της κατάστασης διατήρησης των τύπων οικοτόπων πραγματοποιούνται κυρίως μέσω μεθόδων εργασιών πεδίου. Συγχρόνως, σε ελλαδικό επίπεδο δεν εντοπίζεται κάποιο επίσημο μεθοδολογικό πλαίσιο για τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων στην παρακολούθηση και αξιολόγηση των περιοχών του δικτύου, ωστόσο αρκετές είναι οι τηλεπισκοπικές έρευνες, οι οποίες επικεντρώνονται στη διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων γης, της βλάστησης και των τύπων οικοτόπων των περιοχών αυτών.

Οι Meliadis, et al. (2010), χρησιμοποιώντας πολυφασματικά δεδομένα Landsat TM και διάφορα ψηφιακά δεδομένα ΓΣΠ (χάρτες ιδιοκτησίας της γης, τοπογραφικούς και δασικούς χάρτες κ.ά.), διερεύνησαν τις διαχρονικές αλλαγές (1989 – 1999) στην κάλυψη γης της Ζώνης Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) «Αντιχάσια Όρη και Μετέωρα» και τα βασικότερα αίτια των αλλαγών αυτών. Στα θετικά των ευρημάτων τους συγκαταλέγεται η αύξηση των δασικών καλύψεων, ενώ στα αρνητικά ο περιορισμός των λιβαδικών οικοσυστημάτων, τα οποία αποτελούν σημαντικά ενδιαιτήματα για πολλά είδη άγριας ορνιθοπανίδας, που φιλοξενεί η περιοχή. Ακόμη, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η απόδοση των δεδομένων Landsat ήταν ικανοποιητική για τη χαρτογράφηση της συγκεκριμένης περιοχής και επισημαίνουν ότι η συνδυασμένη χρήση τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην ορθολογική διαχείριση της ΖΕΠ και στην προστασία των λιβαδικών οικοτόπων (Meliadis, et al., 2010).

Παρομοίως, οι Bortels, et al. (2011) διερεύνησαν τις χαρτογραφικές δυνατότητες των δεδομένων Landsat TM, ETM+ και ASTER VNIR στη διαχρονική παρακολούθηση των καλύψεων γης του Εθνικού Πάρκου «Υγροτόπων Αμβρακικού», ενός από τους σημαντικότερους μεσογειακούς σταθμούς για τα μεταναστευτικά πτηνά, που, εκτός των άλλων, περιλαμβάνει και τέσσερις περιοχές Natura 2000. Η έρευνα φανέρωσε τη σημαντική μείωση των ελών και των βαλτότοπων και το μεγάλο κατακερματισμό των ενδιαιτημάτων των μεταναστευτικών πτηνών, που έλαβαν χώρα τη δεκαπενταετία 1989 – 2004, ενώ παράλληλα ανέδειξε τη σημαντικότητα της χρήσης των ελεύθερα διαθέσιμων δορυφορικών δεδομένων, ως μία οικονομική και αποτελεσματική πρακτική παρακολούθησης των υγροτόπων και αξιολόγησης των στρατηγικών διαχείρισης και προστασίας τους, σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

Από την άλλη, οι Πλατής, et al. (2004), χρησιμοποιώντας πολυφασματικά δεδομένα Landsat, μελέτησαν τις διαχρονικές μεταβολές (1989 – 2002) των τύπων βλάστησης της Περιοχής

Ειδικής Προστασίας «Λίμνη Άγρα», η οποία βρίσκεται στο Δήμο Έδεσσας και περιλαμβάνει μία Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) και μία ΖΕΠ. Η ανίχνευση των διαχρονικών αλλαγών πραγματοποιήθηκε μέσω δεικτών βλάστης και τα ευρήματα έδειξαν ότι οι παρατηρούμενες αλλαγές στις υδατικές επιφάνειες είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στις φυτικές διαπλάσεις, με επακόλουθο τις αρνητικές επιπτώσεις στην πανίδα, που απαντά στην περιοχή.

Χρήσιμα συμπεράσματα εξήχθησαν και στην έρευνα των Markogianni, Dimitriou και Kalivas (2013), όπου μέσω δορυφορικών δεδομένων και τεχνικών ΓΣΠ αναλύθηκαν οι διαχρονικές μεταβολές (1984 – 2009) στην κάλυψη γης και στη βλάστηση της υδρολογικής λεκάνης της ΕΖΔ «Περιοχή Λίμνης Ταυρωπού» (τεχνητή λίμνη Πλαστήρα, Νομός Καρδίτσας) και συσχετίστηκαν με διάφορες περιβαλλοντικές και τοπογραφικές παραμέτρους. Ως σημαντικότεροι παράγοντες, που επηρεάζουν τη βλάστηση της περιοχής, αναδείχθηκαν οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων, καθώς και η κλίση και η έκθεση του αναγλύφου. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ευρήματα που δείχνουν ότι στα υψηλότερα τμήματα της υδρολογικής λεκάνης οι δασικές καλύψεις αυξήθηκαν, κυρίως λόγω της εγκατάλειψης της ορεινής υπαίθρου (μετακίνηση πληθυσμού στα αστικά κέντρα), ενώ αντίστοιχα στα πεδινότερα τμήματα μειώθηκαν, λόγω της ανάπτυξης των τουριστικών δραστηριοτήτων γύρω από τη λίμνη (Markogianni, Dimitriou & Kalivas, 2013).

Έρευνες, όπως η παραπάνω, καταδεικνύουν ότι η διαχρονική μελέτη των καλύψεων γης, με τη χρήση τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ, μπορεί, επιπλέον, να συμβάλει στην πρόληψη των πιθανών μελλοντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην ορθολογικότερη ανάπτυξη των κοινωνικοοικονομικών δραστηριοτήτων στις προστατευόμενες περιοχές, συντελώντας έτσι στην αειφόρο διαχείριση τους.

2.4.1 Συμπεράσματα

Από όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι η διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων/χρήσεων γης αποτελεί βασικό εργαλείο στην περιβαλλοντική παρακολούθηση των προστατευόμενων περιοχών και στην αποτίμηση και αξιολόγηση των διαχειριστικών πρακτικών που εφαρμόζονται στις περιοχές αυτές. Για το σκοπό αυτό, η χρήση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και ιδιαίτερα των ελεύθερα διαθέσιμων δορυφορικών δεδομένων, όπως αυτά του προγράμματος Landsat, έχει αναδειχθεί ως μία αξιόπιστη και αποτελεσματική πρακτική χαρτογράφησης, με την οποία εξασφαλίζονται πολύτιμος χρόνος και πόροι και παράλληλα καθίσταται εφικτή η συνεχής και συστηματική παρακολούθηση, ακόμα και μεγάλων, δύσβατων

και γεωγραφικά απομακρυσμένων περιοχών. Επιπλέον, η αξιοποίηση των αναλυτικών δυνατοτήτων των ΓΣΠ και των σύγχρονων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων, συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη και ακριβέστερη παρακολούθηση των καλύψεων γης, ενώ παράλληλα μπορεί να δώσει την κομβική πληροφορία σχετικά με τις τάσεις, την έκταση και τη χωρική κατανομή των αλλαγών, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να τεθούν οι στόχοι για τη λεπτομερέστερη εξέταση των εντοπιζόμενων πιέσεων και για τη διαμόρφωση των επιμέρους στρατηγικών διαχείρισης και προστασίας των προστατευόμενων περιοχών.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία

Αρχικά, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στο σκοπό, στους στόχους και στα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής και παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια του μεθοδολογικού της πλαισίου. Στη συνέχεια και με βάση την αλληλουχία των σταδίων αυτών, ακολουθούν οι ενότητες που περιγράφουν αναλυτικά τις διαδικασίες που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων και τη διεκπεραίωση των στόχων της διατριβής.

3.1 Σκοπός και στόχοι – Ερευνητικά ερωτήματα

Όπως έχει προαναφερθεί, σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι ο εντοπισμός και η καταγραφή των τύπων κάλυψης γης και των αλλαγών τους, τα τελευταία 30 χρόνια (1984 – 2014), σε επιλεγμένες περιοχές του Ευρωπαϊκού δικτύου Natura 2000, που βρίσκονται στην Περιφέρεια Ηπείρου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρησιμοποιήθηκαν ελεύθερα διαθέσιμα δορυφορικά και γεωγραφικά δεδομένα και αξιοποιήθηκαν πολλά και σύγχρονα εργαλεία στατιστικής μεθοδολογίας, με στόχο να παραχθούν ποιοτικά και αξιόπιστα αποτελέσματα, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Απώτερος στόχος είναι οι διαχρονικές αυτές χαρτογραφήσεις να αποτελέσουν παραδείγματα εφαρμογής των τηλεπισκοπικών μεθόδων και των τεχνικών ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η αξιολόγηση της σημαντικότητας και χρησιμότητας των μεθόδων αυτών στην παρακολούθηση, στην προστασία και στη βιώσιμη ανάπτυξη των υπό μελέτη περιοχών.

Έτσι, τα κύρια ερευνητικά ερωτήματα, που καλείται να απαντήσει η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

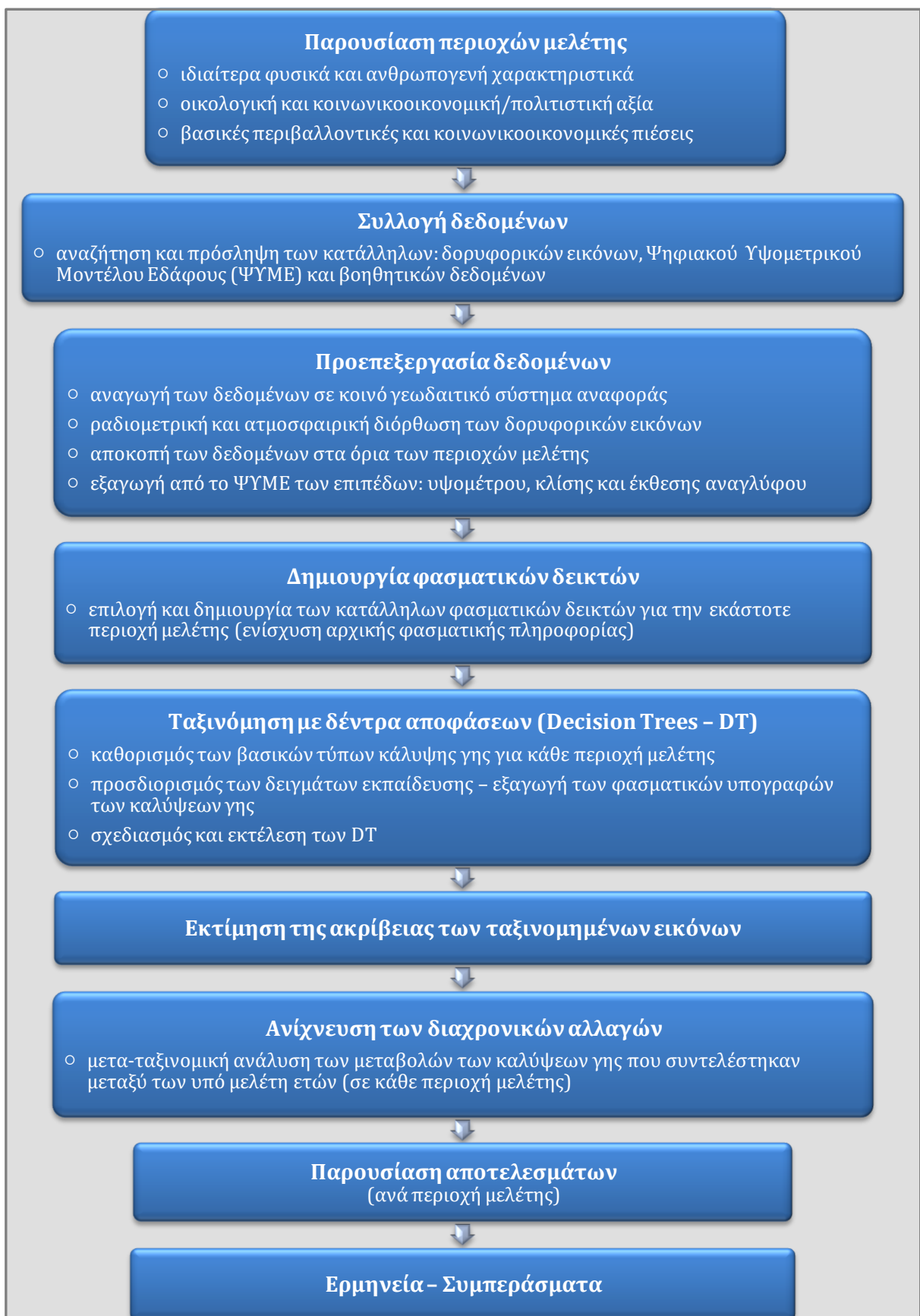
- Ποια είναι τα βασικά είδη κάλυψης γης και ποια η έκταση και το ποσοστό κάλυψης τους, για κάθε περιοχή μελέτης και για κάθε εξεταζόμενο έτος;
- Ποια η ποσοτική και ποσοστιαία μεταβολή της επιφανειακής έκτασης των διαφόρων ειδών κάλυψης γης (μεταξύ των υπό μελέτη ετών);

- Ποιο είναι το μέγεθος και η χωρική κατανομή των αλλαγών και ποιες οι διαδοχικές εναλλαγές μεταξύ των καλύψεων γης;
- Ποιες είναι οι βασικές τάσεις των αλλαγών και ποιες οι δυνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις τους;
- Πως ερμηνεύονται οι μεταβολές αυτές; ποιες οι αλληλεπιδράσεις με το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και ποιες οι επιπτώσεις των διαχειριστικών πολιτικών των υπό μελέτη περιοχών;
- Ποιες οι δυνατότητες και οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη χρήση των δεδομένων Landsat και την εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης της παρούσας διατριβής στη χαρτογράφηση και παρακολούθηση προστατευόμενων περιοχών;

3.2 Σχεδιασμός

Η μεθοδολογική προσέγγιση, για την επίτευξη των στόχων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, αποτελείται από μία σειρά αλληλένδετων σταδίων, τα οποία παρουσιάζονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής (βλ. Σχήμα 5). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στο γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο της μετα-ταξινομικής ανίχνευσης διαχρονικών αλλαγών, ενώ ως τεχνική ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε το δυαδικό δέντρο αποφάσεων.

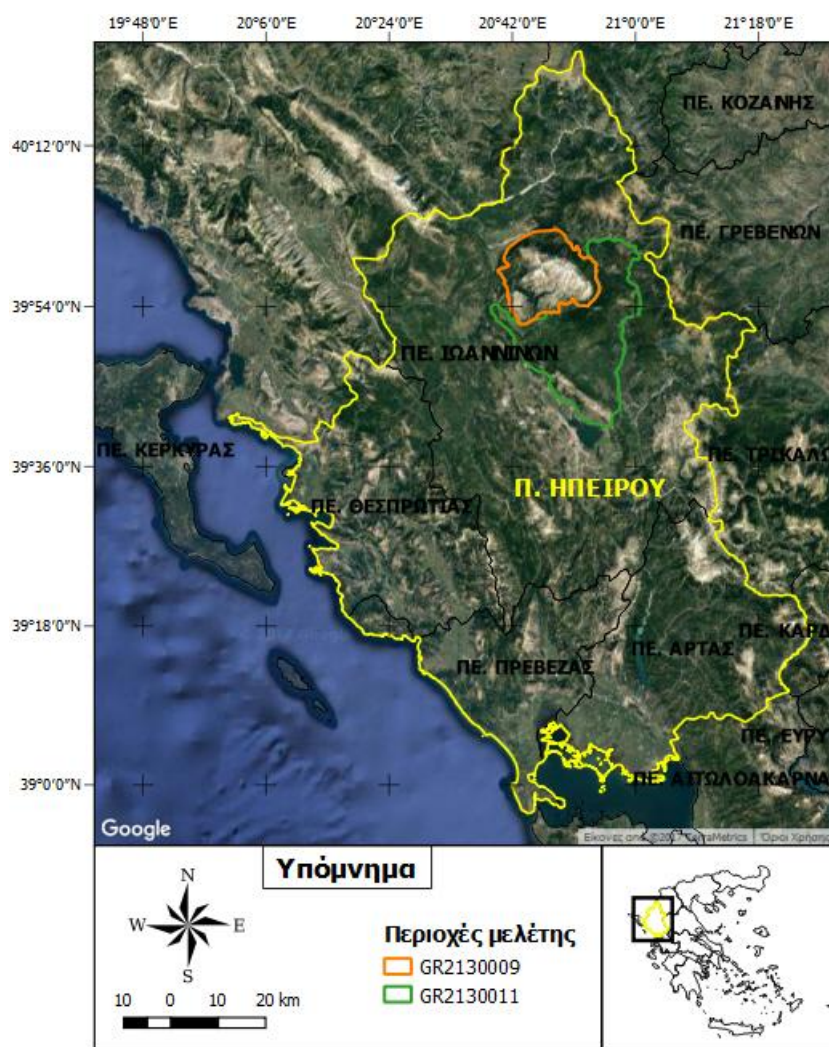
Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, καθώς και το σύνολο των εφαρμοζόμενων τεχνικών, υλοποιήθηκαν με τη χρήση των λογισμικών προγραμμάτων ENVI (ITT Visual Information Solutions, 2009) και QGIS (2015).



Σχήμα 5. Διάγραμμα μεθοδολογικής προσέγγισης της μεταπτυχιακής διατριβής.

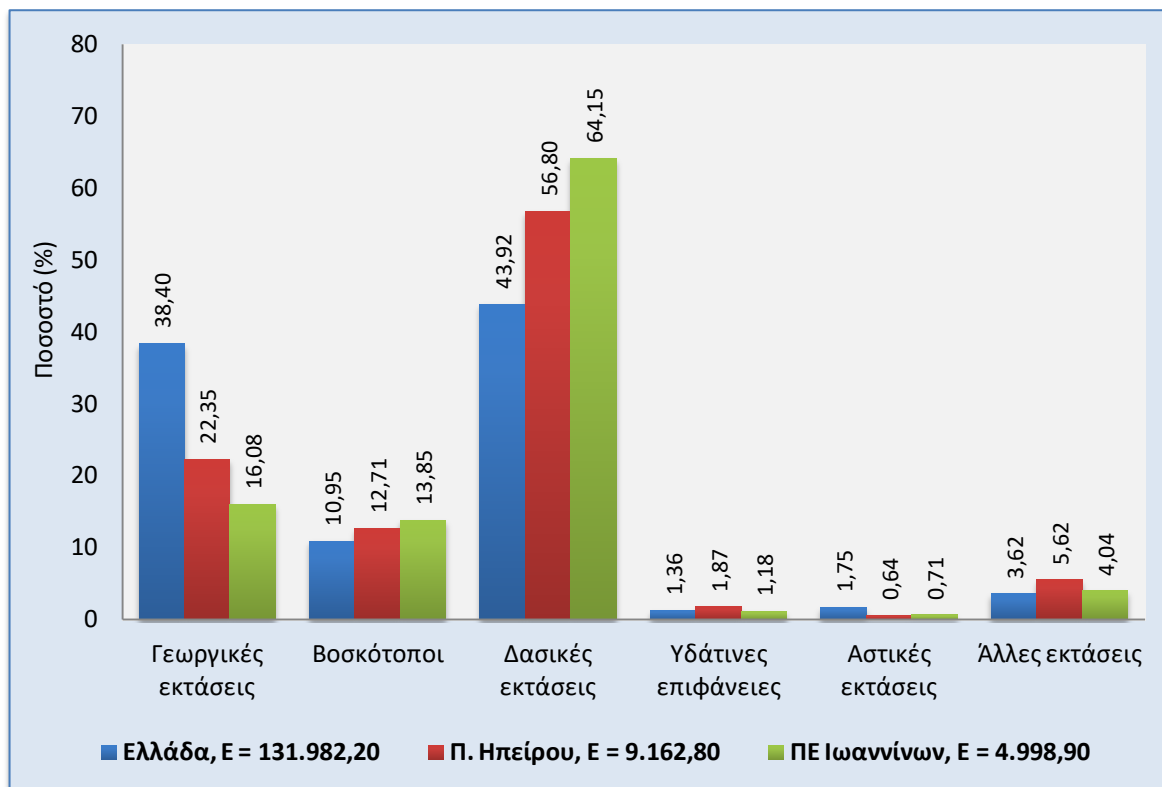
3.3 Περιοχές μελέτης

Οι περιοχές μελέτης, της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, ανήκουν στο οικολογικό δίκτυο Natura 2000, ενώ γεωγραφικά βρίσκονται στην Περιφέρεια Ηπείρου και πιο συγκεκριμένα στην Περιφερειακή Ενότητα (ΠΕ) Ιωαννίνων (βλ. Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Γεωγραφική τοποθέτηση των περιοχών μελέτης (υπόβαθρο: δορυφορική εικόνα της Google Maps, © 2017 TerraMetrics).

Η Περιφέρεια Ηπείρου καταλαμβάνει το βορειοδυτικό τμήμα της Ελλάδας και καλύπτει επιφάνεια ίση με 9.162,8 km², που αντιστοιχεί στο 6,7% της συνολικής έκτασης της χώρας (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, p.12). Πρόκειται για την πιο ορεινή Περιφέρεια της Ελλάδας, με τις ορεινές περιοχές της να καλύπτουν το 74% της συνολικής της έκτασης, ενώ το ποσοστό αυτό φτάνει το 85% για την ΠΕ Ιωαννίνων, η οποία καταλαμβάνει το 54% της έκτασης της Περιφέρειας (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012, pp.286 & 972).



Σχήμα 6. Συγκριτικό γράφημα βασικών κατηγοριών χρήσης/κάλυψης γης. Όπου E: Έκταση σε km² (Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος – ΕΣΥΕ, 1999/2000 όπως παρατίθενται στο Geodata.gov.gr, 2015).

Η γεωγραφική θέση της Ηπείρου και η πολυμορφία του αναγλύφου της συντελούν στο να παρουσιάζει ποικίλες κλιματικές καταστάσεις, με το κλίμα των ορεινών περιοχών της να χαρακτηρίζεται από δριμείς χειμώνες με πολλές χιονοπτώσεις και βροχοπτώσεις (τα μεγαλύτερα ύψη κατακρημνισμάτων στην Ελλάδα), γεγονός που δικαιολογεί και την πλούσια βλάστηση, που παρουσιάζουν οι περιοχές αυτές (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012; Λιαρίκος, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012). Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, η Ήπειρος και ειδικότερα η ΠΕ Ιωαννίνων, εμφανίζει μεγάλα ποσοστά δασικών εκτάσεων και βοσκοτόπων, σε σχέση με την ελληνική επικράτεια, ενώ τα ποσοστά των αστικών και των γεωργικών εκτάσεων είναι συγκριτικά περιορισμένα. Παρ' όλα αυτά, οι κύριες οικονομικές δραστηριότητες της Ηπείρου αφορούν στον τριτογενή τομέα και αναπτύσσονται κυρίως στα αστικά κέντρα της Περιφέρειας, με την πόλη των Ιωαννίνων να αποτελεί το σημαντικότερο οικονομικό της κέντρο (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012). Επίσης, η κτηνοτροφία κατέχει παραδοσιακά βασικό ρόλο στην οικονομία της Ηπείρου, με σημαντικές εξαγωγές κτηνοτροφικών προϊόντων προς άλλες περιοχές της Ελλάδας και του εξωτερικού (ΥΠΕΚΑ, 2013).

Σε ότι αφορά, τα πληθυσμιακά χαρακτηριστικά της Ηπείρου, μερικά βασικά από αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Βάσει των στοιχείων αυτών, αξίζει να σημειωθεί ότι η πληθυσμιακή εξέλιξη της Περιφέρειας χαρακτηρίζεται από την τάση εγκατάλειψης των ορεινών περιοχών και την παράλληλη αύξηση του πληθυσμού στις πεδινές περιοχές.

Πίνακας 3. Μερικά βασικά στατιστικά στοιχεία της πληθυσμιακής εξέλιξης της Ηπείρου (ΕΣΥΕ, 1991; 2001; Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ, εκτιμήσεις 2011 όπως παρατίθενται στο Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012, pp.324 & 354).

	Πληθυσμός			Διαχρονικές μεταβολές (%)		
	1991	2001	2011	91 – 01	01 – 11	91 – 11
Π. Ηπείρου	327.300	336.392	336.650	0,27	0,01	0,14
ΠΕ Ιωαννίνων	152.803	161.027	167.400	0,53	0,39	0,46
Πληθυσμός Π. Ηπείρου ανά υψομετρική ζώνη				Διαχρονικές μεταβολές (%)		
	1991	2001	2011	91 – 01	01 – 11	91 – 11
Πεδινές ζώνες	154.087	189.179	195.129	2,07	0,31	1,19
Ημιορεινές ζώνες	63.804	61.956	61.592	-0,29	-0,06	-0,18
Ορεινές ζώνες	109.285	85.257	79.929	-2,45	-0,64	-1,55

Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η Ήπειρος αποτελεί μία από τις πιο αραιοκατοικημένες (πυκνότητα πληθυσμού 37 άτομα/km² έναντι 82 άτομα/km² της χώρας) και χωρικά απομονωμένες περιοχές της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), ενώ συγχρόνως εμφανίζει πολύ υψηλά ποσοστά πληθυσμιακής γήρανσης (ΥΠΕΚΑ, 2013, p.7). Παράλληλα, η Ήπειρος παρουσιάζει αναπτυξιακή υστέρηση έναντι των υπολοίπων ελληνικών και ευρωπαϊκών Περιφερειών, με υψηλά ποσοστά ανεργίας και με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της να βρίσκεται σε μια από τις τελευταίες θέσεις σε όλη την Ευρώπη (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012).

Παρ' όλα αυτά, πρόκειται για μια Περιφέρεια με πλούσιο φυσικό, πολιτιστικό και ιστορικό περιβάλλον. Εξάλλου, η μακροχρόνια γεωγραφική απομόνωση της Ηπείρου και οι σημαντικοί ορεινοί της όγκοι, όπως αυτοί της Πίνδου (η μεγαλύτερη οροσειρά της Ελλάδας), συνετέλεσαν στη διαμόρφωση, αλλά και στη διατήρηση, του ξεχωριστού φυσικού και πολιτισμικού της πλούτου (ΥΠΕΚΑ, 2013).

Ειδικότερα, η Βόρεια Πίνδος αποτελεί μια από τις σημαντικότερες σε εθνικό, αλλά και σε ευρωπαϊκό, επίπεδο περιοχές, καθώς συνδυάζει με μοναδικό τρόπο το σπουδαίο φυσικό της περιβάλλον (άφθονα δάση, μοναδική χλωρίδα και πανίδα, γεωμορφές και τοπίο σπάνιας φυσικής ομορφιάς) με το ξεχωριστό ανθρωπογενές της στοιχείο (παραδοσιακοί ορεινοί οικισμοί, πολιτιστικά και ιστορικά μνημεία) (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012). Η βλάστηση στη Βόρεια Πίνδο χαρακτηρίζεται κυρίως από την παρουσία εκτεταμένων δασών δρυών, οξιάς και κωνοφόρων, ενώ η περιοχή αποτελεί το σημαντικότερο κέντρο ενδημικής χλωρίδας στα Βαλκάνια, λόγω του μεγάλου αριθμού βαλκανικών, ελληνικών και τοπικών ενδημικών φυτικών ειδών, που απαντώνται κυρίως στα σερπεντινικά της εδάφη (Stevanovic, Tan & Iatrou, 2003; Λιαρικός, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012). Επίσης, η Πίνδος και γενικότερα η Ήπειρος φιλοξενεί και ένα σημαντικό αριθμό σπάνιων και προστατευόμενων ειδών πανίδας, όπως ενδεικτικά καφέ αρκούδα, λύκος, αγριόγιδρο, χρυσαετός, ασπροπάρης (αιγυπτιακός γύπας) κλπ. (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, p.142).

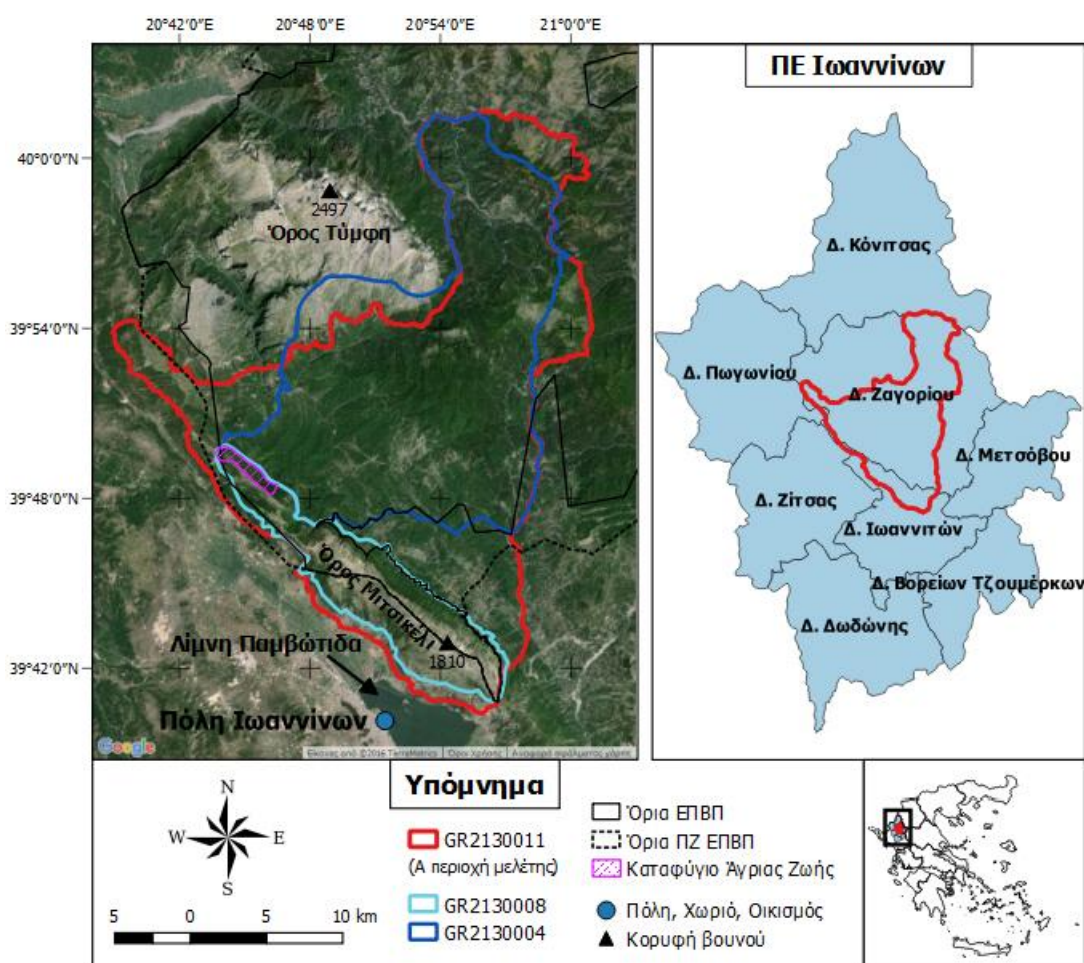
Η ιδιαίτερη φυσική, οικολογική και πολιτιστική αξία της Περιφέρειας μαρτυρείται και από το γεγονός, ότι στην επικράτειά της υπάρχει σημαντικός αριθμός θεσμοθετημένων προστατευόμενων περιοχών, στις οποίες, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνονται: 2 εθνικοί δρυμοί, 3 εθνικά πάρκα, 2 αισθητικά δάση, 2 διατηρητέα μνημεία της φύσης, ένας υγρότοπος διεθνούς σημασίας (Ramsar) και 27 περιοχές του δικτύου Natura 2000, εκ των οποίων οι 12 βρίσκονται στην ΠΕ Ιωαννίνων (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012, p.748).

Έτσι, σε αυτό το πλαίσιο, επιλέχθηκαν να μελετηθούν προστατευόμενες περιοχές της ΠΕ Ιωαννίνων, οι οποίες, αν και παρουσιάζουν ιδιαίτερα γεωμορφολογικά, οικολογικά και πολιτιστικά χαρακτηριστικά, εντούτοις δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς και επισταμένως μέχρι σήμερα, ειδικά σε ότι αφορά τις διαχρονικές μεταβολές των καλύψεων γης. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν διαφορετικά κύρια χαρακτηριστικά η κάθε μια (εκτεταμένη δασοκάλυψη, αγροτικές και αγροτοδασικές εκτάσεις, δασικές, λιβαδικές και αλπικές περιοχές – ορεινές εξάρσεις) και η σειρά με την οποία παρουσιάζονται, στις επόμενες υποενότητες, έχει ως εξής:

- Α περιοχή μελέτης: Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) «Κεντρικό Ζαγόρι και ανατολικό τμήμα όρους Μιτσικέλι» (GR2130011).
- Β περιοχή μελέτης: ΖΕΠ «Όρος Τύμφη (Γκαμήλα)» (GR2130009).

3.3.1 Α περιοχή μελέτης (GR2130011)

Η πρώτη (Α) περιοχή μελέτης (βλ. Εικόνα 3) είναι η περιοχή Natura 2000 με ονομασία «Κεντρικό Ζαγόρι και ανατολικό τμήμα όρους Μιτσικέλι» και κωδικό GR2130011. Η τοποθεσία αυτή χαρακτηρίστηκε ως ΖΕΠ το Μάρτιο του 2010 και η συνολική της έκταση ανέρχεται σε 534,08 km² (ΕΕΑ, 2015α). Πρόκειται για μια ορεινή και ημιορεινή περιοχή, με μέσο υψόμετρο τα 1.039 m (ελάχιστο υψόμετρο 480 m, μέγιστο υψόμετρο 1.872 m) και εκτείνεται από τους νοτιοανατολικούς πρόποδες του όρους Τύμφη (2.497 m) έως το όρος Μιτσικέλι (1.810 m), το οποίο αποτελεί το φυσικό σύνορο του Ζαγορίου και κατά συνέπεια της Βόρειας Πίνδου με το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων (Στάρα & Τσιακίρης, 2009α, p.4; ΕΕΑ, 2015α).



Εικόνα 3. Γεωγραφική τοποθέτηση της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) και των άμεσα σχετιζόμενων με αυτή προστατευόμενων περιοχών. Στον παρόντα χάρτη δεν περιλαμβάνονται οι προστατευόμενες περιοχές που γειτνιάζουν με την περιοχή μελέτης. Όπου ΕΠΒΠ: Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου και ΠΖ: Περιφερειακές Ζώνες (υπόβαθρο: δορυφορική εικόνα της Google Maps, © 2016 TerraMetrics).

Στην εν λόγω ΖΕΠ, περιλαμβάνονται δύο ΕΖΔ (βλ. Εικόνα 3), το «Κεντρικό τμήμα Ζαγορίου» (GR2130004) με έκταση 331,15 km², που περιλαμβάνεται κατά 90% περίπου και το «Όρος

Μιτσικέλυ» (GR2130008) με έκταση 84,36 km², που περιλαμβάνεται σχεδόν στο σύνολό του (Στάρα & Τσιακίρης, 2009b, p.7), ενώ παράλληλα η ΖΕΠ συνορεύει άμεσα με άλλες έξι περιοχές Natura 2000. Επιπλέον, στα όρια της περικλείει ένα Καταφύγιο Άγριας Ζωής με ονομασία «Άγιος Αθανάσιος – Σιπιτούρα» (έκταση: 7,10 km²), το οποίο έχει ανακηρυχθεί στο βόρειο άκρο του όρους Μιτσικελίου, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ΖΕΠ βρίσκεται εντός του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου (ΕΠΒΠ), εκτός από κάποιες εκτάσεις στα νότια και στα δυτικά του Μιτσικελίου (Στάρα & Τσιακίρης, 2009b, p.7).

Πίνακας 4. Ποσοστιαία κατανομή της κάλυψης γης στην Α περιοχή μελέτης (GR2130011), σύμφωνα με τις Φυσικές Κλάσεις Οικοτόπων (Natural Habitat Classes – N01 έως N27), όπως περιλαμβάνονται στα Τυποποιημένα Έντυπα Δεδομένων (Standard Data Forms) των περιοχών του δικτύου Natura 2000 (ΕΕΑ, 2015a).

Κωδικός	Περιγραφή κλάσης	Κάλυψη (%)
N16	Πλατύφυλλα φυλλοβόλα δάση	36,42
N17	Κωνοφόρα δάση	15,89
N19	Μικτά δάση	14,26
N23	Άλλες εκτάσεις (Αστικές – Τεχνητές εκτάσεις)	0,35
N09	Ξηροφυτικοί λειμώνες, Στέπες	7,07
N08	Ερεικώνες, Θαμνώνες, Μακκία βλάστηση και Garrigues, Φρύγανα	22,70
N04	Παράκτιες αμμώδεις περιοχές, Χλωώδης εκτάσεις	0,07
N21	Μη δασικές περιοχές καλλιεργημένες με δενδρώδη φυτά	2,68
N12	Εκτεταμένες καλλιέργειες σιτηρών	0,55
Συνολική κάλυψη οικοτόπων		100,00

Η Α περιοχή μελέτης αποτελεί μια τοποθεσία με μεγάλη δασοκάλυψη, καθώς, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4, πάνω από το 65% της επιφάνειας της καταλαμβάνεται από δασικούς οικοτόπους. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την περιοχή του Μιτσικελίου, η οποία κυριαρχείται από πρινώνες (πουρναροτόπια) θαμνώδους και υποβαθμισμένης μορφής (λόγω της μακροχρόνιας βόσκησης), οι περισσότερες εκτάσεις της ΖΕΠ καλύπτονται κυρίως από εκτεταμένα υψηλά και παραγωγικά δάση πλατύφυλλης δρυός, μαύρης πεύκης, ελάτης και οξιάς (βλ. Εικόνα 4), που κατά τόπους βρίσκονται σε μίξη, καθώς και από τη λευκόδερμη πεύκη (Στάρα & Τσιακίρης, 2009a). Οι δασικές αυτές εκτάσεις, καθώς και τα αγροδασικά και λιβαδικά οικοσυστήματα της περιοχής, αποτελούν σημαντικά ενδιαιτήματα για πολλά σπάνια και απειλούμενα είδη πτηνών, όπως είναι, μεταξύ άλλων, ο χρυσαετός, ο μαύρος πελαργός, ο μαύρος

δρυοκολάπτης και τα είδη χαρακτηρισμού της ΖΕΠ (δηλαδή τα είδη βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η θεσμοθέτηση της περιοχής ως ΖΕΠ), ο φιδαιτός και ο ασπροπάρης, ο οποίος σε πολλές περιοχές βρίσκεται στο χείλος της εξαφάνισης (ΕΕΑ, 2015a; The Return of the Neophron, 2015a). Παράλληλα, πολλές από τις περιοχές της ΖΕΠ αποτελούν και φυσικούς οικοτόπους κοινοτικού ενδιαφέροντος, οι τύποι και η εδαφική κάλυψη των οποίων παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Τύποι φυσικών οικοτόπων κοινοτικού ενδιαφέροντος (Παράρτημα Ι, Οδηγία 92/43/ΕΟΚ), που απαντώνται στην Α περιοχή μελέτης (GR2130011) (ΕΕΑ, 2015a).

Κωδικός	Όνομα τύπου οικοτόπου	Κάλυψη (%)
9530	*(Υπο)μεσογειακά πευκοδάση με ενδημικά μαυρόπευκα	19,70
9270	Ελληνικά δάση οξιάς με «Abies borisii-regis»	5,50
9130	Δάση οξιάς με «Asperulo-Fagetum»	2,70
4090	Ενδημικά ορεινά μεσογειακά χέρσα εδάφη με ακανθώδεις θάμνους	2,30
9540	Μεσογειακά πευκοδάση με ενδημικά είδη πεύκων της Μεσογείου	0,50
3290	Ποταμοί της Μεσογείου με περιοδική ροή από «Paspalo-Agrostidion»	0,30
9560	*Ενδημικά δάση με «Juniperus spp.»	0,20
9150	Μεσοευρωπαϊκά ασβεστόφιλα δάση οξιάς «Cephalanthero-Fagion»	0,20
5210	Δενδροειδή «matorrals» με «Juniperus spp.»	0,20
8210	Ασβεστολιθικά βραχώδη πρηνή με χασμοφυτική βλάστηση	0,10

* Τύποι οικοτόπων προτεραιότητας.

Σχετικά με τα ανθρωπογεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής, σημειώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος της ΖΕΠ βρίσκεται στον καλλικρατικό Δήμο Ζαγορίου (πληθυσμός: 3.740), ο οποίος παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού (3,8 άτομα/km²) (ΕΛΣΤΑΤ, εκτιμήσεις 2011 όπως παρατίθενται στο Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012, p.323), ενώ ένα σχετικά μικρό κομμάτι στα νότια της ΖΕΠ εμπίπτει στον καλλικρατικό Δήμο Ιωαννιτών (βλ. Εικόνα 3). Πρόκειται, λοιπόν, για μια κατεξοχήν φυσική περιοχή, ενώ γενικότερα η ευρύτερη περιοχή του Ζαγορίου χαρακτηρίζεται ως «Άγρια φύση της Ευρώπης», καθώς αποτελεί τη μοναδική ορεινή περιοχή που συνυπάρχουν μεγάλα θηλαστικά, όπως καφέ αρκούδα, λύκος, λύγκας, βίδρα, αγριόγατος, αγριόγιδο, ζαρκάδι, αγριογούρουνο κ.λπ. (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, p.68). Συγχρόνως, όμως, το Ζαγόρι χαρακτηρίζεται και από το ιδιαίτερο και ξεχωριστό ανθρωπογενές του περιβάλλον. Το σύμπλεγμα των 46 οικισμών του, που όλοι έχουν χαρακτηριστεί και προστατεύονται ως παραδοσιακοί, με τα μοναδικά κτίσματα και δομές της

διακριτής «Ζαγορίσιας αρχιτεκτονικής», τα παλιά τοξωτά γεφύρια (βλ. Εικόνα 4) και τα πολυάριθμα μνημεία κάθε εποχής, συνθέτει ένα τοπίο ιδιαίτερης αισθητικής και ιστορικής αξίας (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015).

Ο μοναδικός αυτός συνδυασμός του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, συνιστά σημαντικό πόλο έλξης τουριστικής δραστηριότητας, ιδιαίτερα των ήπιων και εναλλακτικών μορφών της, οι οποίες τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν τάσεις ανάπτυξης στην περιοχή, ενώ, υπό προϋποθέσεις, μπορούν να συμβάλλουν στη διατήρηση, στην προστασία και στην κοινωνικοοικονομική ανάκαμψη της περιοχής (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015). Ωστόσο, οι κύριες οικονομικές δραστηριότητες της Α περιοχής μελέτης σχετίζονται με τον πρωτογενή τομέα και περιλαμβάνουν τη γεωργία, την κτηνοτροφία και τη δασοκομία (The Return of the Neophron, 2015a).

Σε ότι αφορά στις οικολογικές απειλές και στις περιβαλλοντικές πιέσεις, που αναπτύσσονται στην περιοχή και εν δυνάμει μπορεί να αποτελούν αίτια/επιπτώσεις μεταβολών στις χρήσεις/καλύψεις γης της, αυτές συνοψίζονται στις εξής (Στάρα & Τσιακίρης, 2009a, p.22; The Return of the Neophron, 2015a):

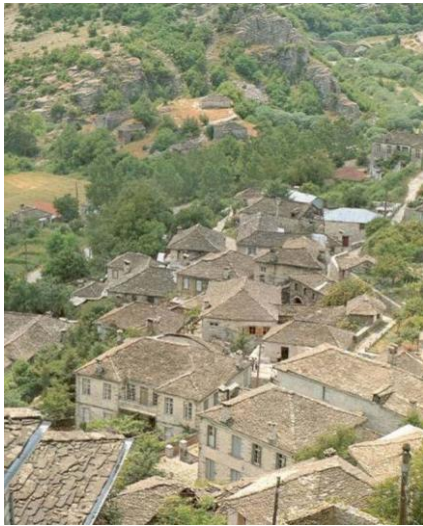
- Ανεξέλεγκτη υλοτομία (για καύσιμη ύλη και εμπόριο).
- Ακατάλληλη διαχείριση δασών (εντατική διαχείριση, υλοτόμηση των ώριμων δέντρων, η οποία δύναται να επηρεάσει αρνητικά την ποικιλότητα των ειδών).
- Μεταβολές στη συχνότητα και ένταση δασικών πυρκαγιών (αύξηση ή και μείωση).
- Επέκταση – εντατικοποίηση ετήσιων καλλιεργειών.
- Εντατική κτηνοτροφία – έντονη βόσκηση σε βαθμό υπερβόσκησης.
- Κυνήγι, λαθροθηρία και παράνομη χρήση δηλητηριασμένων δολωμάτων.
- Επέκταση του οδικού δικτύου και αποσπασματική διάνοιξη δρόμων.
- Οικιστική ανάπτυξη.
- Τουριστική ανάπτυξη – έργα υποδομής και αυξημένη διαταραχή από τους επισκέπτες, η οποία αναμένεται να ενταθεί τα επόμενα χρόνια.
- Αλλαγές στην έκταση και κατανομή των ενδιαιτημάτων λόγω κλιματικής αλλαγής.
- Εγκατάλειψη των παραδοσιακών χρήσεων γης (κτηνοτροφία και γεωργία), που έχουν διαμορφώσει το τοπίο για αιώνες, συνεπάγοντας τη σταδιακή αναδάσωση των ανοικτών χώρων, την ομογενοποίηση των αγροδασικών τοπίων και τη μείωση του μωσαϊκού των ενδιαιτημάτων, με επακόλουθο τις δυσμενείς επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα της περιοχής.



α. Το πέτρινο γεφύρι «Κόκκορη»



γ. Δάσος πλατύφυλλων στην περιοχή «Νεγάδες»



β. Παραδοσιακός οικισμός «Κήποι» Ζαγορίου



δ. Δάσος ελάτης κοντά στο «Σκαμνέλι» Ζαγορίου

Εικόνα 4. Φωτογραφίες – δείγματα χαρακτηριστικών φυσικών και ανθρωπογενών τοπίων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) (α, β: Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, pp.91-92; γ, δ: Τσιφτσής & Τσιριπίδης, 2015, pp.21 & 24).

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει κάποιος φορέας ο οποίος να είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του συνόλου της Α περιοχής μελέτης. Εντούτοις, το μεγαλύτερο μέρος της ΖΕΠ (περίπου το 60% της επιφάνειας της) περιλαμβάνεται στα όρια ευθύνης του Φορέα Διαχείρισης (ΦΔ) Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου και ένα μικρό τμήμα της, στα νότια-νοτιοδυτικά, εμπίπτει στα όρια ευθύνης του ΦΔ Λίμνης Παμβώτιδας (ΕΕΑ, 2015α).

Ο ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου αποτελεί Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου (ΝΠΙΔ), μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα και τελεί υπό την εποπτεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), ενώ ιδρύθηκε το 2002 με το Ν.

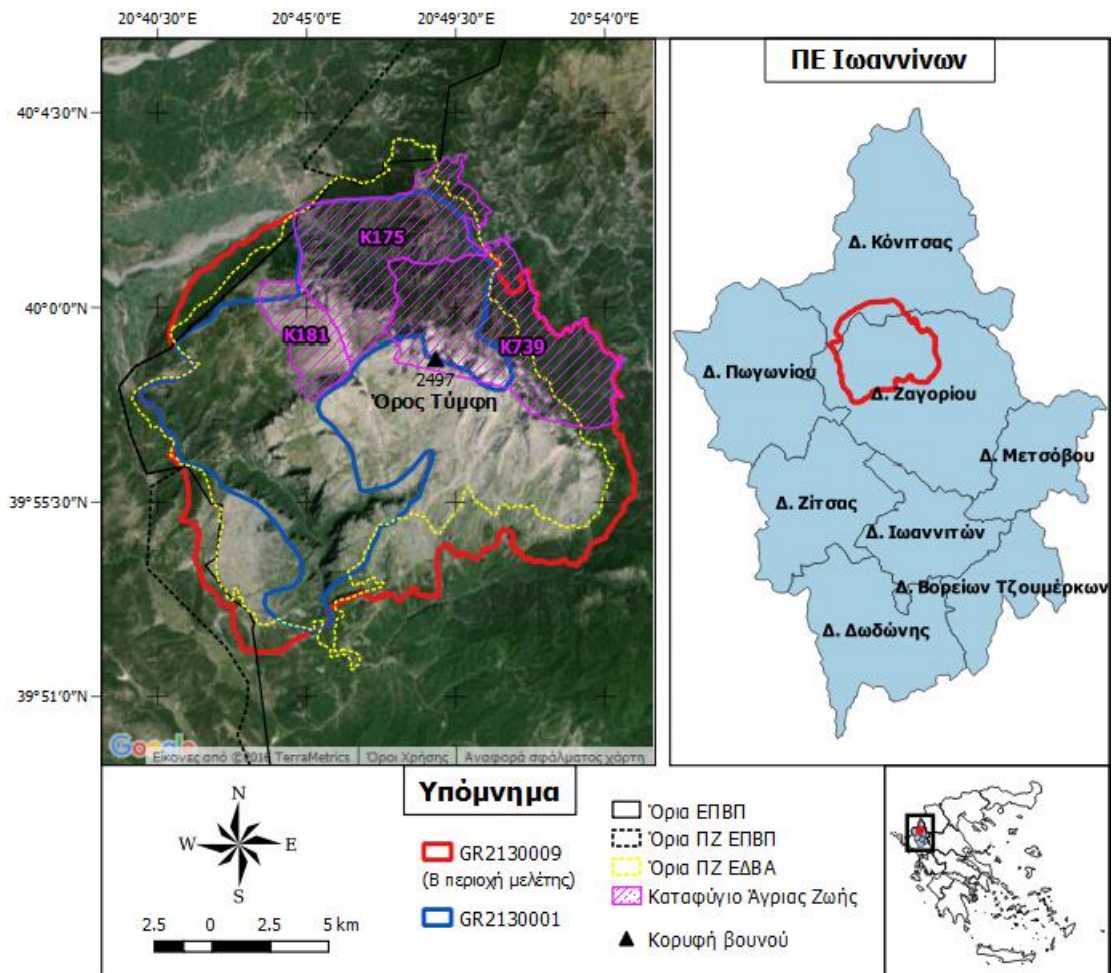
3044/2002, με κύρια αποστολή του τη διοίκηση και τη διαχείριση του ΕΠΒΠ, ήτοι την υλοποίηση δράσεων και τη λήψη μέτρων που είναι απαραίτητα για την προστασία, οργάνωση και λειτουργία της περιοχής, στοχεύοντας παράλληλα στην ανάδειξη όλων των αξιών της (Τσιφτσής & Τσιριπίδης, 2015, p.11).

Παρομοίως, ο ΦΔ Λίμνης Παμβώτιδας είναι ΝΠΙΔ, μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα και εποπτεύεται από το ΥΠΕΚΑ, ενώ ιδρύθηκε με το Ν. 3044/2002 και συστάθηκε το 2003, με κύρια αποστολή του τη διοίκηση και τη διαχείριση της περιοχής ευθύνης του (περιλαμβάνει σχεδόν ολόκληρο το λεκανοπέδιο Ιωαννίνων) και πιο συγκεκριμένα, την προστασία της λίμνης, τη διαφύλαξη της οικολογικής ισορροπίας της, με παράλληλη ανάπτυξη δραστηριοτήτων, που εναρμονίζονται με την προστασία της φύσης και υιοθετούν την αρχή της αειφορίας (Ιατρού, et al., 2003, pp.22–23).

3.3.2 Β περιοχή μελέτης (GR2130009)

Η δεύτερη (Β) περιοχή μελέτης (βλ. Εικόνα 5) είναι η περιοχή Natura 2000 με ονομασία «Όρος Τύμφη (Γκαμήλα)» και κωδικό GR2130009. Η τοποθεσία αυτή χαρακτηρίστηκε ως ΖΕΠ τον Οκτώβριο του 1987 και έχει έκταση 274,16 km², ενώ σχεδόν το σύνολο της εμπίπτει στα όρια ευθύνης του ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου (ΕΕΑ, 2015b). Πρόκειται για μια ορεινή περιοχή, με μέσο υψόμετρο τα 1.425 m (ελάχιστο υψόμετρο 405 m, μέγιστο υψόμετρο 2.497 m), η οποία παρουσιάζει εξαιρετικά έντονο ανάγλυφο με ιδιαίτερη γεωμορφολογία, καθώς περιλαμβάνει το φαράγγι του Βίκου (παραπόταμος του Βοϊδομάτη), τη χαράδρα του κυρίως ποταμού Αώου και τον ορεινό όγκο της Τύμφης (ΕΕΑ, 2015b).

Στα όρια της εν λόγω ΖΕΠ περιλαμβάνονται η ΕΖΔ «Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου» (GR2130001), με έκταση 127,94 km² (βλ. Εικόνα 5) και ένα μικρό τμήμα της ΕΖΔ «Κεντρικό τμήμα Ζαγορίου» (GR2130004) (The Return of the Neophron, 2015b), ενώ παράλληλα η ΖΕΠ συνορεύει άμεσα με άλλες δύο περιοχές Natura 2000. Επίσης, στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής βρίσκονται τρία Καταφύγια Άγριας Ζωής (Κ181: «Κέδρος – Παπίγκου», Κ175: «Χαράδρα Αώου», Κ739: «Βρυσχωρίου – Ηλιοχωρίου»), ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ΖΕΠ περιλαμβάνεται εντός του ΕΠΒΠ, εκτός από ένα μικρό τμήμα στα βορειοδυτικά της (βλ. Εικόνα 5) (The Return of the Neophron, 2015b).



Εικόνα 5. Γεωγραφική τοποθέτηση της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) και των άμεσα σχετιζόμενων με αυτή προστατευόμενων περιοχών. Στον παρόντα χάρτη δεν περιλαμβάνονται οι προστατευόμενες περιοχές που γειτνιάζουν με την περιοχή μελέτης. Όπου ΕΠΒΠ: Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου, ΕΔΒΑ: Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου και ΠΖ: Περιφερειακές Ζώνες (υπόβαθρο: δορυφορική εικόνα της Google Maps, © 2016 TerraMetrics).

Την ιδιαίτερη φυσική και οικολογική αξία της Β περιοχής μελέτης καταδεικνύει επίσης το γεγονός, ότι η περιοχή αυτή περιλαμβάνει έναν από τους δέκα Εθνικούς Δρυμούς της Ελλάδας (Εθνικός Δρυμός «Βίκου – Αώου», έτος ανακήρυξης: 1973). Επιπροσθέτως, η ευρύτερη περιοχή του Βίκου – Αώου εξαιτίας της μεγάλης γεωλογικής και γεωμορφολογικής της αξίας, τον Οκτώβριο του 2010, εντάχθηκε στο Παγκόσμιο Δίκτυο Γεωπάρκων της UNESCO (Γεωπάρκο «Βίκου – Αώου»), αποτελώντας έτσι το τέταρτο αναγνωρισμένο Γεωπάρκο της χώρας (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012). Πράγματι, οι έντονες εναλλαγές του τοπίου (βλ. Εικόνα 6), με την εντυπωσιακή χαράδρα του Αώου (μέγιστο βάθος άνω των χιλίων μέτρων), τους κάθετους γεωλογικούς σχηματισμούς του εξαιρετικά μοναδικού φαραγγιού του Βίκου (από τα βαθύτερα και στενότερα του κόσμου) και το ορεινό ασβεστολιθικό σύμπλεγμα της Τύμφης, συνθέτουν μία από τις πιο χαρακτηριστικές και εντυπωσιακές περιοχές σε εγχώριο αλλά και παγκόσμιο επίπεδο (Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012; ΕΕΑ, 2015b).



α. Η χαράδρα του Βίκου



γ. Το όρος Τύμφη



β. Ο ποταμός Αώος



δ. Αλπικά λιβάδια, βραχώδη πρανή και σάρες του ορεινού συγκροτήματος της Τύμφης

Εικόνα 6. Φωτογραφίες – δείγματα χαρακτηριστικών φυσικών τοπίων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) (α, γ: Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2015, p.91; β, δ: Τσιφτσής & Τσιριπίδης, 2015, pp.33 & 40).

Η ιδιαίτερη αυτή μορφολογία του εδάφους ευνοεί την ανάπτυξη πληθώρας χειμάρρων και ρεμάτων, τα οποία καταλήγουν στον ποταμό Αώο και τον παραπόταμο του, το Βοϊδομάτη. Πέρα από αυτά τα υδάτινα σώματα, που διαρρέουν την περιοχή, οι εκτάσεις της ΖΕΠ, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6, καλύπτονται κυρίως από πλατύφυλλα, κωνοφόρα και μικτά δάση, θαμνώδεις εκτάσεις και στα μεγαλύτερα υψόμετρα, από εκτεταμένα αλπικά και υπαλπικά λιβάδια, αλπικές λίμνες, απότομες κορυφές και βραχώδεις εξάρσεις (The Return of the Neophron, 2015b).

Πίνακας 6. Ποσοστιαία κατανομή της κάλυψης γης στην Β περιοχή μελέτης (GR2130009), σύμφωνα με τις Φυσικές Κλάσεις Οικοτόπων (Natural Habitat Classes – N01 έως N27), όπως περιλαμβάνονται στα Τυποποιημένα Έντυπα Δεδομένων (Standard Data Forms) των περιοχών του δικτύου Natura 2000 (EEA, 2015b).

Κωδικός	Περιγραφή κλάσης	Κάλυψη (%)
N08	Ερεικώνες, Θαμνώνες, Μακκία βλάστηση και Garrigues, Φρύγανα	14,00
N10	Υγροίλειμώνες, Μεσόφιλοι λειμώνες	8,00
N11	Αλπικοί και Υπαλπικοί λειμώνες	32,00
N16	Πλατύφυλλα φυλλοβόλα δάση	30,00
N17	Κωνοφόρα δάση	11,00
N19	Μικτά δάση	4,00
N23	Άλλες εκτάσεις (Αστικές – Τεχνητές εκτάσεις)	1,00
Συνολική κάλυψη οικοτόπων		100,00

Η Β περιοχή μελέτης, όπως και η Α, περιλαμβάνεται, σχεδόν στο σύνολό της, στον καλλικρατικό Δήμο Ζαγορίου (βλ. Εικόνα 5) και σε ότι αφορά τις ανθρωπογενείς επιδράσεις στην περιοχή, αυτές παρουσιάζονται αρκετά περιορισμένες, λόγω κυρίως της γεωγραφικής απομόνωσης και της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας της (EEA, 2015b; The Return of the Neophron, 2015b). Η πολυπλοκότητα αυτή του ανάγλυφου έχει, επίσης, ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ποικίλων μικροκλιματικών συνθηκών, οι οποίες, με τη σειρά τους, έχουν συντελέσει στην ανάπτυξη μιας εξαιρετικά μεγάλης ποικιλίας φυσικών οικοτόπων (EEA, 2015b). Στον Πίνακα 7, παρουσιάζονται οι τύποι και η εδαφική κάλυψη μερικών από αυτούς τους οικοτόπους και πιο συγκεκριμένα των φυσικών οικοτόπων κοινοτικού ενδιαφέροντος της ΕΖΔ «Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου», καθώς δεν βρέθηκαν στοιχεία που να αφορούν το σύνολο της Β περιοχής μελέτης.

Έτσι, από άποψη βιοποικιλότητας, η εν λόγω ΖΕΠ θεωρείται μία από τις πιο σημαντικές και καλά διατηρημένες φυσικές περιοχές της Ευρώπης (EEA, 2015b; The Return of the Neophron, 2015b), με πάνω από 1200 είδη χλωρίδας, εκ των οποίων κάποια είναι σπάνια και ενδημικά και με όλους τους τύπους βλάστησης, από τα παρόχθια δάση, τις ζώνες των φυλλοβόλων και κωνοφόρων δασών και τη χασμοφυτική βλάστηση στα βράχια των φαραγγιών, μέχρι τα δάση των ψυχρόβιων κωνοφόρων και τα αλπικά λιβάδια (Λιαρίκος, Μαραγκού & Παπαγιάννης, 2012, p.85). Η υψηλή φυσικότητα και μωσαϊκότητα των οικοσυστημάτων, της περιοχής, είναι και ο λόγος που η ΖΕΠ παρουσιάζει εξαιρετικά πλούσια πανίδα, με πολλά σπάνια και απειλούμενα είδη, όπως είναι τα μεγάλα θηλαστικά της Ευρώπης, τα οποία αναφέρονται στην υποενότητα

«3.3.1 Α περιοχή μελέτης (GR2130011)» και διάφορα είδη πτηνών, ερπετών, αμφιβίων, ασπόνδυλων και ψαριών του γλυκού νερού (EEA, 2015b). Ειδικότερα, σε ότι αφορά την ορνιθοπανίδα, η ΖΕΠ αποτελεί σημαντική τοποθεσία για αρκετά αναπαραγόμενα αρπακτικά, αλπικά και δασικά είδη και γενικότερα για ένα μεγάλο αριθμό προστατευόμενων πτηνών, όπως είναι ενδεικτικά, τα είδη χαρακτηρισμού της ΖΕΠ, η κοκκινοκαλιακούδα (της οικογενείας των Κορακιδών), ο χρυσαετός, ο φιδαιετός και ο ασπροπάρης (EEA, 2015b).

Πίνακας 7. Τύποι φυσικών οικοτόπων κοινοτικού ενδιαφέροντος (Παράρτημα Ι, Οδηγία 92/43/ΕΟΚ), που απαντώνται στην ΕΖΔ «Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου» (GR2130001) (EEA, 2015c).

Κωδικός	Όνομα τύπου οικοτόπου	Κάλυψη (%)
4090	Ενδημικά ορεινά μεσογειακά χέρσα εδάφη με ακανθώδεις θάμνους	27,51
9530	*(Υπο)μεσογειακά πευκοδάση με ενδημικά μαυρόπευκα	18,46
8210	Ασβεστολιθικά βραχώδη πρηνή με χασμοφυτική βλάστηση	6,00
9540	Μεσογειακά πευκοδάση με ενδημικά είδη πεύκων της Μεσογείου	4,48
9270	Ελληνικά δάση οξιάς με «Abies borisii-regis»	4,27
9560	*Ενδημικά δάση με «Juniperus spp.»	2,16
3280	Ποταμοί της Μεσογείου με μόνιμη ροή του «Paspalo-Agrostidion» και πυκνή βλάστηση με μορφή παραπετάσματος από «Salix Populus alba» στις όχθες τους	1,21
3290	Ποταμοί της Μεσογείου με περιοδική ροή από «Paspalo-Agrostidion»	0,50
92C0	Δάση «Platanus orientalis» και «Liquidambar orientalis» («Platanion orientalis»)	0,49
6230	*Χλωώδεις διαπλάσεις με «Nardus», ποικίλων ειδών, σε πυριτιούχα υποστρώματα των ορεινών ζωνών (και των υποορεινών ζωνών της ηπειρωτικής Ευρώπης)	0,46
8140	Λιθώνες της Ανατολικής Μεσογείου	0,28
9130	Δάση οξιάς με «Asperulo-Fagetum»	0,17

* Τύποι οικοτόπων προτεραιότητας.

Όλα τα παραπάνω, έχουν καταστήσει την περιοχή έναν από τους δημοφιλέστερους ορεινούς και φυσιολατρικούς προορισμούς της χώρας, με τον τουρισμό, ως οικονομική δραστηριότητα, τις τελευταίες δεκαετίες να αντικαθιστά σταδιακά τις παραδοσιακές οικονομικές δραστηριότητες της περιοχής (δασοκομία, κτηνοτροφία και εκτατική γεωργία της ημιορεινής ζώνης), οι οποίες, ανά τους αιώνες, έχουν συντελέσει σημαντικά στη διαμόρφωση της πολύτιμης ποικιλίας των ενδιαιτημάτων της (EEA, 2015b; The Return of the Neophron, 2015b). Παράλληλα, η συνεχής

επέκταση και βελτίωση των έργων υποδομής, για την ανάπτυξη δραστηριοτήτων τουρισμού και αναψυχής, αποτελεί μια σημαντική απειλή για τους οικοτόπους της περιοχής, καθώς μπορεί να οδηγήσει στον κατακερματισμό τους και στην υποβάθμιση της βιοποικιλότητας τους (The Return of the Neophron, 2015b).

Γενικότερα, σε ότι αφορά στις δυνητικές περιβαλλοντικές πιέσεις και απειλές που αφορούν στην εν λόγω περιοχή, αυτές είναι όμοιες με τις αντίστοιχες της Α περιοχής μελέτης, οι οποίες παρατίθενται συνοπτικά στο τέλος της υποενότητας «3.3.1 Α περιοχή μελέτης (GR2130011)».

3.4 Μέθοδος συλλογής δεδομένων

Για την υλοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα, η συλλογή των οποίων πραγματοποιήθηκε μέσω διαδικτυακών πηγών. Έτσι, βάσει του μεθοδολογικού πλαισίου και των στόχων της διατριβής, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες (με τα επιθυμητά τεχνικά χαρακτηριστικά) δορυφορικές εικόνες, το αντίστοιχης χωρικής ανάλυσης ΨΥΜΕ και τα απαραίτητα, για την αποτελεσματικότερη διεκπεραίωση των διαδικασιών ανάλυσης και ταξινόμησης, βοηθητικά δεδομένα (θεματικοί χάρτες CORINE, χάρτες βλάστησης, διανυσματικά δεδομένα ορίων περιοχών Natura 2000 κ.λπ.).

Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται, ανά κατηγορία δεδομένων, οι διαδικτυακές πηγές, τα χαρακτηριστικά, οι προδιαγραφές και τα κριτήρια επιλογής τους.

3.4.1 Πολυφασματικά δεδομένα Landsat TM, ETM+ και OLI

Η αναζήτηση και η λήψη των δορυφορικών εικόνων έγινε από τον ιστότοπο EarthExplorer (βλ. Εικόνα 7) του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής – United States Geological Survey (USGS, 2015b).

Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν τα δορυφορικά δεδομένα έχουν ως εξής:

- Τα δεδομένα να είναι ελεύθερα διαθέσιμα και, εάν είναι εφικτό, η κάθε δορυφορική εικόνα να καλύπτει εξ ολοκλήρου και τις δύο περιοχές μελέτης (γειτονικές τοποθεσίες), προς εξοικονόμηση όγκου δεδομένων και χρόνου επεξεργασίας.
- Οι δορυφορικές εικόνες να καλύπτουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό εύρος και να έχουν μεταξύ τους μια χρονική διαφορά τουλάχιστον 10 ετών, ούτως ώστε να είναι

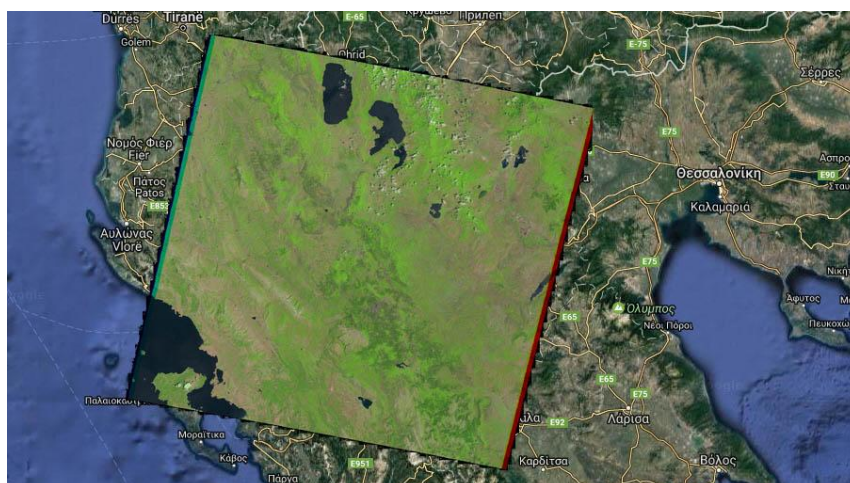
διακριτές οι χωρικές μεταβολές των καλύψεων γης και να είναι εφικτή η εξέταση της διαχρονικής εξέλιξης και των τάσεων των αλλαγών.

- Τα δεδομένα να είναι πολυφασματικά, με όσο το δυνατό υψηλότερη χωρική ανάλυση, για να είναι εφικτή η αποτελεσματική διάκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων κάλυψης γης.
- Η λήψη των εικόνων να έχει γίνει από δέκτες ίδιας ή παρόμοιας τεχνολογίας, έτσι ώστε οι εικόνες να παρουσιάζουν παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά (π.χ. χωρική και φασματική ανάλυση).
- Οι επιλεγμένες σκηνές να είναι διαυγείς (καθαρές ατμοσφαιρικές συνθήκες), με μηδενικό ή ελάχιστο ποσοστό νεφοκάλυψης, ούτως ώστε αυτές να χρήζουν περαιτέρω επεξεργασίας.
- Η λήψη των εικόνων να έχει πραγματοποιηθεί τους θερινούς μήνες, όπου οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι κατάλληλες (μειωμένη εμφάνιση σύννεφων και υγρασίας), τα φυτά παρουσιάζουν φαινολογική σταθερότητα, η ανάκλαση της φυσικής βλάστησης βρίσκεται στο μέγιστο και η υγρασία του εδάφους είναι σχετικά περιορισμένη (Yang & Lo, 2002; Díaz-Varela, et al., 2008).
- Οι διαχρονικές εικόνες να έχουν ληφθεί σε κοντινές ημερομηνίες του εποχιακού κύκλου, για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων στην ανακλαστικότητα που προκαλούνται από τις εποχιακές διαφορές στη φαινολογία των φυτών, στην υγρασία του εδάφους και στη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (Coppin & Bauer, 1996; Paolini, et al., 2006; Srivastava, et al., 2012).

Έτσι, βάσει των παραπάνω κριτηρίων επιλέχθηκαν τρεις πολυφασματικές εικόνες από δορυφόρους της σειράς Landsat, των οποίων τα δεδομένα παρουσιάζουν ικανοποιητική χωρική και φασματική ανάλυση για τη διάκριση των κύριων τύπων κάλυψης γης (Meliadis, et al., 2010), ενώ παράλληλα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη διαχρονική χαρτογράφηση προστατευόμενων περιοχών και γενικότερα τοποθεσιών παρόμοιας γεωγραφικής έκτασης με αυτές των περιοχών μελέτης της παρούσας διατριβής (π.χ. Liu, et al., 2008; Meliadis, et al., 2010; Bortels, et al., 2011; Kolios & Stylios, 2013).



Landsat 5 (TM) – 01/07/1984



Landsat 7 (ETM+) – 19/06/2000



Landsat 8 (OLI/TIRS) – 04/07/2014

Εικόνα 7. Προεπισκόπηση των επιλεγμένων δορυφορικών εικόνων (USGS, 2015b).

Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν μία δορυφορική εικόνα Landsat 5 TM (Thematic Mapper) του έτους 1984, μία εικόνα Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) του 2000 και μία

εικόνα Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor) του 2014 (βλ. Εικόνα 7). Σε κάθε φάκελο των αρχείων των εικόνων περιλαμβάνεται και ένα αρχείο μεταδεδομένων με κατάληξη MTL, το οποίο περιέχει μια σειρά από αναλυτικές πληροφορίες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά και τη λήψη της κάθε εικόνας. Στον Πίνακα 8, παρουσιάζονται μερικά από τα πιο βασικά στοιχεία των επιλεγμένων δορυφορικών εικόνων.

Πίνακας 8. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων δορυφορικών εικόνων (USGS, 2015b).

Δορυφορική εικόνα	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI/TIRS
Αναγνωριστικό σκηνής	LT51850321984183XXX02	LE71850322000171EDC00	LC81850322014185LGN00
Ημερομηνία λήψης	01/07/1984	19/06/2000	04/07/2014
Ποσοστό νεφοκάλυψης (%)	0,00	2,93	0,03
Ηλιακή ανύψωση (μοίρες)	60,28298038°	64,6959°	65,21412698°
Ηλιακό αζιμούθιο (μοίρες)	116,73280839°	125,1369476°	127,88386823°
WRS Path/Row*	185/032		
Βαθμός επεξεργασίας**	L1T		
Σύστημα αναφοράς***	WGS 84, UTM Zone 34		
Τύπος αρχείων εξόδου	GEOTIFF		

* Στοιχεία τροχιάς. WRS (Worldwide Reference System): Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς, Path: Ατραπός, Row: Γραμμή.

** L1T (Level 1 Terrain Corrected): πρότυπο διόρθωσης, που δηλώνει συστηματική ραδιομετρική και γεωμετρική ακρίβεια, καθώς και τη χρήση ΨΥΜΕ για μεγαλύτερη τοπογραφική ακρίβεια.

*** WGS 84 (World Geodetic System 1984): Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα 1984, UTM (Universal Transverse Mercator): Παγκόσμια Εγκάρσια Μερικατορική Προβολή, Zone 34: Ζώνη ελλαδικού χώρου 34.

Γενικότερα, σε ότι αφορά τους δορυφόρους Landsat 5, 7 και 8, αυτοί μοιράζονται τα ίδια χαρακτηριστικά τροχιάς, τα οποία είναι: πλήρης περιστροφή γύρω από τη γη κάθε 98,9 λεπτά, σάρωση του ίδιου σημείου κάθε 16 ημέρες (χρονική διακριτική ικανότητα), πλάτος σάρωσης 185 km και τροχιά, κυκλική, ηλιοσύγχρονη και σχεδόν πολική, σε υψόμετρο 705 km (USGS, 2015a). Επίσης, οι πολυφασματικοί σαρωτές Landsat TM και ETM+ παρουσιάζουν ίδια χωρική, φασματική και ραδιομετρική (8 bit – 256 διαβαθμίσεις του γκρι) διακριτική ικανότητα, με τις μόνες διαφορές να είναι ότι ο ETM+ διαθέτει και ένα επιπλέον κανάλι, το παγχρωματικό, με μέγεθος εικονοστοιχείου 15 m και παρέχει καλύτερη χωρική ανάλυση στο θερμικό κανάλι (βλ.

Πίνακα 9). Από την άλλη πλευρά, οι αισθητήρες Landsat OLI/TIRS παρέχουν υψηλότερη ραδιομετρική ανάλυση (12 bit – 4096 διαβαθμίσεις του γκρι) (Loveland & Dwyer, 2012), ενώ παράλληλα ο OLI διαθέτει ένα επιπλέον κανάλι στο ορατό και ένα στο μέσο υπέρυθρο, καθώς και ο TIRS έχει, αντί για ένα, δύο θερμικά κανάλια, στενότερου φασματικού εύρους (μεγαλύτερη φασματική ανάλυση) από τα αντίστοιχα θερμικά των TM και ETM+ (βλ. Πίνακα 9).

Πίνακας 9. Φασματικές περιοχές και χωρική ανάλυση των καναλιών των πολυφασματικών αισθητήρων TM, ETM+ και OLI/TIRS (USGS, 2015a).

Αριθμός καναλιού	Landsat 5 (TM)		Landsat 7 (ETM+)		Landsat 8 (OLI/TIRS)	
	Φασματική περιοχή* (μm)	Χωρική ανάλυση (m)	Φασματική περιοχή* (μm)	Χωρική ανάλυση (m)	Φασματική περιοχή* (μm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	0,45 – 0,52 (Blue)	30	0,45 – 0,52 (Blue)	30	0,43 – 0,45 (Deep blue)	30
2	0,52 – 0,60 (Green)	30	0,52 – 0,60 (Green)	30	0,45 – 0,51 (Blue)	30
3	0,63 – 0,69 (Red)	30	0,63 – 0,69 (Red)	30	0,53 – 0,59 (Green)	30
4	0,76 – 0,90 (NIR)	30	0,77 – 0,90 (NIR)	30	0,64 – 0,67 (Red)	30
5	1,55 – 1,75 (SWIR)	30	1,55 – 1,75 (SWIR)	30	0,85 – 0,88 (NIR)	30
6	10,40 – 12,50 (TIR)	120	10,40 – 12,50 (TIR)	60	1,57 – 1,65 (SWIR)	30
7	2,08 – 2,35 (SWIR)	30	2,08 – 2,35 (SWIR)	30	2,11 – 2,29 (SWIR)	30
8			0,52 – 0,90 (PAN)	15	0,50 – 0,68 (PAN)	15
9					1,36 – 1,38 (SWIR)	30
10					10,60 – 11,19 (TIR)	100
11					11,50 – 12,51 (TIR)	100

* Deep blue: Βαθύ μπλε, Green: Πράσινο, Red: Κόκκινο, NIR (near infrared): εγγύς υπέρυθρο, SWIR (shortwave infrared): μέσο υπέρυθρο, TIR (thermal infrared): θερμικό υπέρυθρο, PAN (panchromatic): παγχρωματικό κανάλι.

Στον Πίνακα 9, παρουσιάζονται αναλυτικά η φασματική δειγματοληψία των Landsat TM, ETM+ και OLI/TIRS και η χωρική διακριτική ικανότητα των καναλιών τους. Βάσει αυτών των στοιχείων επιλέχθηκαν τα κανάλια, των οποίων οι αντίστοιχες εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Τα κανάλια αυτά είναι τα 1, 2, 3, 4, 5 και 7 των TM και ETM+ και τα 2, 3, 4, 5, 6 και 7 του OLI, τα οποία αντιστοιχούν (με τη σειρά που

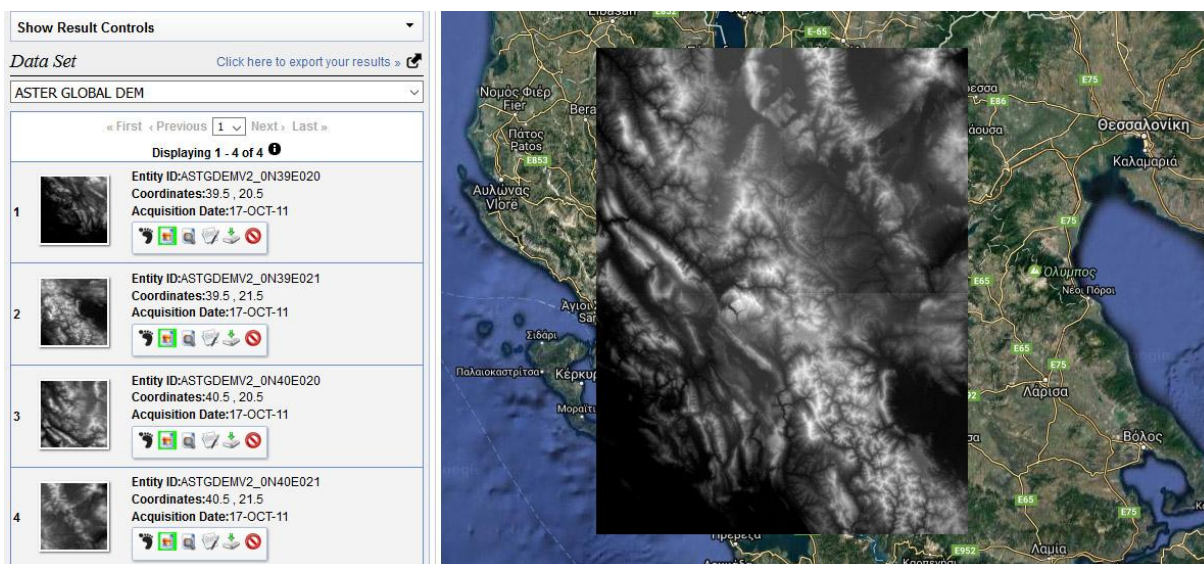
αναφέρονται) σε παρόμοιες φασματικές ζώνες και έχουν ίδια χωρική ανάλυση (30 m), καθιστώντας τα έτσι κατάλληλα για τη σύγκριση των διαχρονικών εικόνων.

3.4.2 Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους ASTER GDEM V2

Το ΨΥΜΕ που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως επιπρόσθετη πληροφορία στη διαμόρφωση κριτηρίων κατά τις διαδικασίες ταξινόμησης, είναι το ASTER GDEM V2 (Global Digital Elevation Model Version 2), προϊόντα του οποίου ελήφθησαν από τον ιστότοπο EarthExplorer (βλ. Εικόνα 8) (USGS, 2015b). Τα κύρια κριτήρια, στα οποία βασίστηκε η επιλογή του συγκεκριμένου ΨΥΜΕ, είναι η χωρική του ανάλυση, αντίστοιχη αυτής των δορυφορικών δεδομένων Landsat και το γεγονός ότι διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο.

Για την πλήρη κάλυψη των περιοχών μελέτης της παρούσας διατριβής ήταν απαραίτητη η λήψη τεσσάρων γειτονικών πινακίδων – εικόνων (tiles), οι οποίες παρουσιάζονται συνενωμένες στην Εικόνα 8. Τα αναγνωριστικά σκηής των πινακίδων αυτών είναι τα ακόλουθα (USGS, 2015b):

- ASTGDEM2_0N39E020
- ASTGDEM2_0N39E021
- ASTGDEM2_0N40E020
- ASTGDEM2_0N40E021



Εικόνα 8. Προεπισκόπηση των τεσσάρων ληφθέντων πινακίδων (tiles) του ASTER GDEM V2. Όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο, τόσο πιο λευκή είναι η απεικόνιση (USGS, 2015b).

Ο αισθητήρας ASTER είναι εγκατεστημένος στο δορυφόρο Terra (βλ. υποενότητα «2.2.1 Ιστορική αναδρομή») και αποτελεί προϊόν συνεργασίας μεταξύ της NASA (National Aeronautics

& Space Administration), του Ιαπωνικού Υπουργείου Οικονομίας, Εμπορίου και Βιομηχανίας (Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry – METI) και του οργανισμού J-spacesystems (Japan Space Systems). Η πρώτη έκδοση του ASTER GDEM κυκλοφόρησε τον Ιούνιο του 2009, ενώ τον Οκτώβριο του 2011 ακολούθησε η δεύτερη έκδοση (ASTER GDEM V2), η οποία παρουσιάζει βελτιώσεις στην κάλυψη, στη χωρική ανάλυση και στην υψομετρική ακρίβεια (J-spacesystems, 2012).

Γενικότερα, η δημιουργία των ΨΥΜΕ αυτών βασίστηκε στην αυτοματοποιημένη στερεοσκοπική συσχέτιση 1,5 εκατομμυρίων δορυφορικών εικόνων των καναλιών 3N (εγγύς υπέρυθρο, λήψη στο ναδίρ) και 3B (εγγύς υπέρυθρο, λήψη υπό γωνία) του αισθητήρα ASTER (J-spacesystems, 2012). Η δεύτερη έκδοση (ASTER GDEM V2), όπως και η πρώτη, καλύπτει την επιφάνεια της γης μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 83° βόρεια και 83° νότια και αποτελείται από 22.600 πινακίδες διαστάσεων 1° × 1° (J-spacesystems, 2012). Τα δεδομένα (πινακίδες) διατίθενται σε μορφή αρχείου GEOTIFF, με χωρική διακριτική ικανότητα 1 arc sec (περίπου 30 m) και είναι γεωαναφερμένα στο ελλειψοειδές WGS 84, χρησιμοποιώντας την προβολή UTM, ενώ τα υψομετρικά δεδομένα είναι διορθωμένα ως προς το μοντέλο γεωειδούς EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) (Rexer & Hirt, 2014, p.215).

Σε ότι αφορά την υψομετρική τους ακρίβεια, αυτή παρουσιάζεται αρκετά ικανοποιητική για τοπογραφική χαρτογράφηση κλίμακας έως 1:100.000 (κατάλληλη για χαρτογράφηση με δεδομένα Landsat) (Μηλιαρέσης, 2003), ενώ σύμφωνα με τους Rexer και Hirt (2014), το ASTER GDEM V2 παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην υψομετρική αναπαράσταση ορεινών εδαφών με έντονο ανάγλυφο (αντίστοιχων με αυτών των περιοχών μελέτης της παρούσας διατριβής), από αυτή των ΨΥΜΕ SRTM V2.1 και V4.1 (Shuttle Radar Topography Mission Version 2.1/4.1).

3.4.3 Βοηθητικά ψηφιδωτά και διανυσματικά δεδομένα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, ως «βοηθητικά δεδομένα» νοούνται τα επιπρόσθετα γεωχωρικά δεδομένα, των οποίων η χρήση κρίθηκε απαραίτητη για την επεξεργασία και ερμηνεία των δορυφορικών εικόνων, την αποτελεσματικότερη αναγνώριση των διαφόρων χαρακτηριστικών και αντικειμένων των περιοχών μελέτης, τον προσδιορισμό των δειγμάτων εκπαίδευσης και τη διαμόρφωση κριτηρίων κατά τη σύνθεση των δέντρων αποφάσεων.

Για την αναζήτηση και λήψη των βοηθητικών δεδομένων αξιοποιήθηκαν αναγνωρισμένες διαδικτυακές πηγές ελεύθερων δεδομένων, όπως ιστότοποι ευρωπαϊκών και κρατικών φορέων

και γενικότερα ιστότοποι επίσημων φορέων. Ακολουθεί η συνοπτική παρουσίαση των δεδομένων αυτών:

- Θεματικοί χάρτες καλύψεων/χρήσεων γης του Ευρωπαϊκού προγράμματος CORINE Land Cover (CLC) και πιο συγκεκριμένα, οι εκδόσεις CLC 1990, 2000 και 2006. Τα δεδομένα αυτά ελήφθησαν από τον ιστότοπο του ευρωπαϊκού συστήματος παρακολούθησης της γης «Copernicus», σε ψηφιδωτή μορφή (τύπος αρχείων: GEOTIFF), με μέγεθος κελιού πλέγματος (χωρική ανάλυση) 100 m. Γενικότερα, οι θεματικοί χάρτες CLC περιλαμβάνουν 44 (υποδιαιρέσεις) κατηγοριοποιήσεις κάλυψης γης, ενώ παρέχουν γεωμετρική ακρίβεια περίπου 100 m και θεματική ακρίβεια 85% και άνω (Copernicus, 2016).
- Διανυσματικά δεδομένα, σε μορφή αρχείου Shapefile, από τον ιστότοπο ανοικτών γεωχωρικών δεδομένων της Ελληνικής Κυβέρνησης «Geodata.gov.gr». Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν είναι: όρια περιοχών Natura 2000, Εθνικά Πάρκα, Εθνικοί Δρυμοί, Καταφύγια Άγριας Ζωής, ακτογραμμή της Ελλάδας, Περιφέρειες Ελλάδας, όρια Νομών, όρια Δήμων (Καλλικράτης), θέσεις οικισμών και υδρογραφικό δίκτυο της Ελλάδας (Geodata.gov.gr, 2015).
- Διανυσματικά δεδομένα (Shapefile) με τους τύπους οικοτόπων, τους τύπους τοπίου – χρήσεων γης και τους τύπους βλάστησης του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου, τα οποία παραχωρήθηκαν από το ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου, έπειτα από προσωπική επικοινωνία (ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου, 2015).
- Δεδομένα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης από τη διαδικτυακή Υπηρεσία Θέασης Ορθοφωτογραφιών της Κτηματολόγιο ΑΕ (ΕΚΧΑ ΑΕ, 2016) και το Google Earth (Google Inc., 2016).

3.5 Επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται η αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα στάδια που ακολουθήθηκαν για τη φασματική ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων και τη μετα-ταξινομική ανίχνευση και ανάλυση των διαχρονικών αλλαγών.

3.5.1 Προεπεξεργασία δεδομένων

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε αναγωγή όλων των γεωχωρικών δεδομένων σε κοινό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Συγκεκριμένα, το προβολικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το WGS 84 / UTM Zone 34, στο οποίο ήταν ήδη γεωαναφερόμενα τα δορυφορικά δεδομένα Landsat.

Στη συνέχεια ακολούθησαν οι απαραίτητες, για την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, διαδικασίες προεπεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν στα παρακάτω βασικά στάδια.

1^ο Στάδιο: Γεωμετρική και τοπογραφική διόρθωση. Τα ληφθέντα δεδομένα Landsat ήταν ήδη γεωμετρικά διορθωμένα και ορθοδιορθωμένα (βαθμός επεξεργασίας: L1T) (Srivastava, et al., 2012). Επιπλέον, δεν κρίθηκε απαραίτητη η γεωμετρική αναγωγή εικόνας ως προς εικόνα, καθώς, έπειτα από σχετικό έλεγχο, παρατηρήθηκαν σφάλματα μικρότερα του 1/3 του εικονοστοιχείου κατά τον άξονα x και y (Coppin & Bauer, 1996; Paolini, et al., 2006). Παράλληλα, επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας των περιοχών μελέτης παρουσιάζει κλίσεις μικρότερες των 30°, σε συνδυασμό με το σχετικά μεγάλο ύψος ηλίου των επιλεγμένων δορυφορικών σκηνών (βλ. Πίνακα 8), υποδηλώνουν δυνητικά μικρή επίδραση της τοπογραφίας στα τελικά αποτελέσματα (Song & Woodcock, 2003, p.2566), δεν κρίθηκε απαραίτητο να πραγματοποιηθεί τοπογραφική διόρθωση.

2^ο Στάδιο: Ραδιομετρική διόρθωση. Η ποσοτική σύγκριση δορυφορικών εικόνων που έχουν ληφθεί από διαφορετικούς αισθητήρες και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, απαιτεί τη μετατροπή των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων (Digital Number – DN) σε τιμές ακτινοβολίας (Kolios & Stylios, 2013). Για την εφαρμογή της μετατροπής αυτής, στις δορυφορικές εικόνες της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση (Lu, et al., 2002):

$$R = [(R_{max} - R_{min}) / (DN_{max} - DN_{min})] \times (DN - DN_{min}) + R_{min}$$

Όπου R (Spectral Radiance, μονάδες: $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) είναι η ακτινοβολία που φτάνει στο σαρωτή, R_{max} και R_{min} είναι η μεγαλύτερη και η μικρότερη, αντίστοιχα, τιμή ακτινοβολίας που καταγράφεται στο εκάστοτε κανάλι, DN_{max} και DN_{min} αντιπροσωπεύουν το διάστημα τιμών στο οποίο ψηφιοποιείται η ένταση της καταγραφόμενης ακτινοβολίας (Landsat TM και ETM+: $DN_{max} = 255$, $DN_{min} = 1$ και Landsat OLI: $DN_{max} = 65535$, $DN_{min} = 1$) και DN είναι η ψηφιακή τιμή φωτεινότητας που καταγράφεται στο εκάστοτε εικονοστοιχείο. Τα στοιχεία αυτά είναι

διαθέσιμα στο αρχείο μεταδεδομένων MTL της κάθε εικόνας, ενώ η παραπάνω σχέση εφαρμόστηκε στην εικόνα κάθε επιλεγμένου καναλιού, των δορυφορικών σκηνών της διατριβής, μέσω του Raster calculator του λογισμικού QGIS. Ακολουθεί παράδειγμα εφαρμογής με το κανάλι 1 της σκηνής Landsat 5 TM (1984).

π.χ. $((169.000 - (-1.520)) / (255 - 1)) * (B01_1984L5@1 - 1) + (-1.520)$

3^ο Στάδιο: Ατμοσφαιρική διόρθωση. Για την ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων εφαρμόστηκε η κλασική και ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική μέθοδος του σκοτεινότερου σημείου (Dark object subtraction) (Chavez, 1988). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι, σε κάθε εικόνα υπάρχουν τουλάχιστον λίγα «σκοτεινά» εικονοστοιχεία (μηδενική ή σχεδόν μηδενική τιμή φωτεινότητας), αλλά λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας τα εικονοστοιχεία αυτά εμφανίζουν μη μηδενικές τιμές φωτεινότητας (Richards, 2013). Έτσι, οι μικρότερες τιμές φωτεινότητας σε κάθε κανάλι μιας εικόνας, αποδίδονται στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις (ατμοσφαιρική διάχυση) και αφαιρούνται από όλες τις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων του κάθε καναλιού (Richards, 2013). Στην παρούσα διατριβή, η μέθοδος του σκοτεινότερου σημείου εφαρμόστηκε, για κάθε κανάλι, εντοπίζοντας την τιμή που αντιστοιχεί στο 0,5% των χαμηλότερων τιμών έντασης ακτινοβολίας (R_{Dark}) και αφαιρώντας την από όλες τις τιμές ακτινοβολίας (R). Ακολουθεί η μαθηματική έκφραση.

$$R_{\tau} = R - R_{Dark}$$

Όπου R_{τ} είναι η τελική τιμή ακτινοβολίας (στο σαρωτή) – απαλλαγμένη από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

4^ο Στάδιο: Κανονικοποίηση τιμών R_{τ} . Έπειτα από τη ραδιομετρική και ατμοσφαιρική διόρθωση, πραγματοποιήθηκε, για κάθε κανάλι (κάθε εικόνας), κανονικοποίηση των τιμών R_{τ} σε ενιαία κλίμακα (0 – 1), έτσι ώστε οι δορυφορικές εικόνες να καταστούν άμεσα συγκρίσιμες. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

$$(R_{\tau} - R_{\tau min}) / (R_{\tau max} - R_{\tau min}),$$

όπου $R_{\tau max}$ και $R_{\tau min}$ είναι η μέγιστη και η ελάχιστη, αντίστοιχα, τελική (ατμοσφαιρικά διορθωμένη) τιμή ακτινοβολίας.

5^ο Στάδιο: Αποκοπή δεδομένων και εξαγωγή ιδιοτήτων αναγλύφου από το ΨΥΜΕ. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε η αποκοπή των δορυφορικών εικόνων και των βοηθητικών δεδομένων στα όρια των περιοχών μελέτης (βάσει του διανυσματικού επιπέδου «όρια περιοχών

Natura 2000»). Επίσης, έγινε συνένωση των τεσσάρων πινακίδων του ASTER GDEM V2 και αναγωγή του συνενωμένου επιπέδου στο σύστημα αναφοράς WGS 84 / UTM Zone 34. Έπειτα, ακολούθησαν η αποκοπή του συνενωμένου ΨΥΜΕ στα όρια των περιοχών μελέτης και η εξαγωγή των επιπέδων του υψομέτρου, της κλίσης και της έκθεσης του αναγλύφου, για κάθε περιοχή μελέτης.

3.5.2 Δημιουργία φασματικών δεικτών και έγχρωμων σύνθετων

Μετά την ολοκλήρωση της προεπεξεργασίας των δεδομένων, ακολούθησε η δημιουργία των φασματικών δεικτών. Οι δείκτες που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, έπειτα από σχετική διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, είναι οι εξής:

- Ο «κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης» (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) (Rouse, et al., 1973), ο οποίος, όπως έχει προαναφερθεί (βλ. υποενότητα «2.3.5 Λόγοι καναλιών και φασματικοί δείκτες – Έγχρωμα σύνθετα»), αποτελεί τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο φασματικό δείκτη για τη χαρτογράφηση της βλάστησης και την αξιολόγηση της κατάστασης της (Kadmon, 2001; Lambin, 2001; Richards, 2013). Ο δείκτης αυτός αξιοποιήθηκε ως επιπρόσθετη φασματική πληροφορία στη διαμόρφωση κριτηρίων κατά τις διαδικασίες ταξινόμησης. Ο υπολογισμός του NDVI πραγματοποιείται σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική σχέση.

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

όπου NIR (near infrared): εγγύς υπέρυθρο (κανάλι 4 για Landsat TM και ETM+, κανάλι 5 για Landsat OLI) και Red: κόκκινο τμήμα του φάσματος (κανάλι 3 για Landsat TM και ETM+, κανάλι 4 για Landsat OLI). Οι τιμές των εικονοστοιχείων του NDVI κυμαίνονται από -1 (καθόλου βλάστηση) έως +1 (πυκνή βλάστηση).

- Ο «δείκτης φωτεινότητας» (Brightness Index – BI), ο οποίος υπολογίζει τη συνολική φωτεινότητα (ανακλαστικότητα) μιας επιφάνειας (Mathieu, et al., 1998). Πιο συγκεκριμένα, τα εικονοστοιχεία με μεγάλες τιμές BI αντιπροσωπεύουν ομαλές επιφάνειες με γυμνό έδαφος ανοικτού χρώματος, ενώ τα εικονοστοιχεία με μικρές τιμές BI αντιστοιχούν σε επιφάνειες με μεγάλα ποσοστά υγρασίας (π.χ. υδάτινες επιφάνειες) ή βλάστησης ή σκίασης κλπ. Η χρήση του δείκτη αυτού δεν κρίθηκε απαραίτητη στη διαμόρφωση των κριτηρίων ταξινόμησης, εντούτοις οι εικόνες του BI αξιοποιήθηκαν για την αναγνώριση των διαφόρων χαρακτηριστικών των περιοχών μελέτης και κατά τον προσδιορισμό των δειγμάτων εκπαίδευσης. Ο BI υπολογίστηκε, για κάθε δορυφορική σκηνή, με την ακόλουθη σχέση (Mathieu, et al., 1998):

$$BI = [(Red)^2 + (Green)^2 + (Red)^2]^{1/2}/(3)^{1/2},$$

όπου Red: κανάλι 3 για TM και ETM+, κανάλι 4 για OLI και Green: πράσινο τμήμα του φάσματος – κανάλι 2 για TM και ETM+, κανάλι 3 για OLI.

- Ο «δείκτης ανίχνευσης σκιάσεων» (Shadow Detection Index – SDI), ο οποίος αναπτύχθηκε από τους Shahi, Shafri και Taherzadeh (2014) για την αυτόματη ανίχνευση έντονων σκιάσεων σε δορυφορικές εικόνες. Ο δείκτης αυτός εφαρμόστηκε στις εικόνες της Β περιοχής μελέτης (έντονες σκιάσεις λόγω του φαραγγιού του Βίκου και της χαράδρας του Αώου) για τον εντοπισμό και την αποκοπή των «σκοτεινών» εικονοστοιχείων τους, από τα οποία δεν ήταν εφικτή η εξαγωγή φασματικής πληροφορίας. Έτσι, η εικόνα του SDI χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός επιπέδου μάσκας (Mask layer), βάσει του οποίου αποκόπηκαν οι περιοχές με έντονη σκίαση από τις εικόνες της Β περιοχής μελέτης. Ο SDI δημιουργήθηκε από τη σκηνή Landsat 5 TM (1984), καθώς αυτή παρουσίαζε τα περισσότερα «σκοτεινά» εικονοστοιχεία. Η μαθηματική σχέση με την οποία υπολογίστηκε είναι η εξής (Shahi, Shafri & Taherzadeh, 2014):

$$SDI = [(NIR - Blue)/(NIR + Blue)] - NIR,$$

όπου NIR: κανάλι 4 για TM και ETM+, κανάλι 5 για OLI και Blue: μπλε τμήμα του φάσματος – κανάλι 1 για TM και ETM+, κανάλι 2 για OLI.

Ύστερα από τη δημιουργία των φασματικών δεικτών, ακολούθησε η κανονικοποίηση των εικόνων του NDVI και του BI, έτσι ώστε οι τιμές τους να μετατοπιστούν στην ίδια κλίμακα τιμών (0 – 1) με αυτή των κανονικοποιημένων δορυφορικών εικόνων. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$(I - I_{min})/(I_{max} - I_{min}),$$

όπου I (Index) είναι η τιμή εικονοστοιχείου του δείκτη και I_{max} , I_{min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη, αντίστοιχα, τιμή του δείκτη στην εκάστοτε εικόνα.

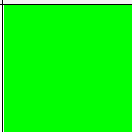
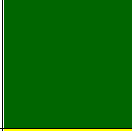
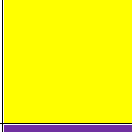
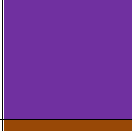
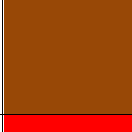
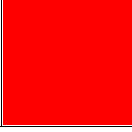
Επιπλέον, για την ανάδειξη και τον προσδιορισμό των διαφόρων χαρακτηριστικών των περιοχών μελέτης, καθώς και για την αποτελεσματικότερη επιλογή των δειγμάτων εκπαίδευσης, αξιοποιήθηκαν και διάφορα έγχρωμα σύνθετα (RGB – Red, Green, Blue). Οι συνδυασμοί των φασματικών ζωνών που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως είναι ο RGB: 321 (για TM και ETM+) ή 432 (για OLI), με τον οποίο τα γνωρίσματα του εδάφους εμφανίζονται με τα «φυσικά» τους χρώματα, ο RGB: 432 ή 543, στον οποίο η βλάστηση ξεχωρίζει με έντονο ερυθρό χρώμα και ο

RGB: 742 ή 753, με τον οποίο γίνεται εφικτή η διάκριση μεταξύ κωνοφόρων και πλατύφυλλων δέντρων (για αναλυτικότερη περιγραφή βλ. σχετικά την υποενότητα «2.3.5 Λόγοι καναλιών και φασματικοί δείκτες – Έγχρωμα σύνθετα»).

3.5.3 Φασματική ταξινόμηση εικόνων με δέντρα αποφάσεων

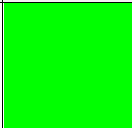
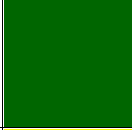
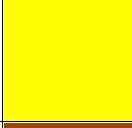
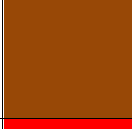
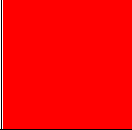
Αρχικά, μετά από προσεκτική και διεξοδική εξέταση των περιοχών μελέτης, εντοπίστηκαν οι διακριτές φασματικές κλάσεις, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι ταξινομήσεις των δορυφορικών δεδομένων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Οι κλάσεις αυτές επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντιπροσωπεύονται πλήρως οι βασικές κατηγορίες καλύψεων γης των περιοχών μελέτης. Έτσι, όπως φαίνεται στους Πίνακες 10 και 11, ορίστηκαν έξι θεματικές τάξεις για την Α (GR2130011) και πέντε για τη Β (GR2130009) περιοχή μελέτης αντίστοιχα, οι οποίες βασίστηκαν στο σύστημα ταξινόμησης CORINE Land Cover, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες διάκρισης διαφορετικών τύπων κάλυψης γης που παρέχουν η χωρική και η φασματική ανάλυση των δεδομένων Landsat.

Πίνακας 10. Οι θεματικές τάξεις της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) και ο αριθμός των εικονοστοιχείων εκπαίδευσης, για κάθε εκπαιδευτικό δείγμα και για κάθε εξεταζόμενο έτος.

Τύποι κάλυψης γης	Χρώμα	Περιγραφή	Εικονοστ. εκπαίδ. 1984 / 2000 / 2014
Πλατύφυλλα (Broadleaf)		Περιοχές που καλύπτονται από πλατύφυλλα δέντρα ή και υψηλούς θαμνώνες αείφυλλων πλατύφυλλων, με αραιή ή πυκνή κάλυψη	537 / 543 / 576
Κωνοφόρα (Conifers)		Περιοχές που καλύπτονται από κωνοφόρα δέντρα, με αραιή ή πυκνή κάλυψη	503 / 527 / 564
Χαμηλή βλάστηση (Low vegetation)		Περιοχές με χαμηλή ή και σχετικά αραιή βλάστηση, χαμηλοί θαμνώνες με σχετικά αραιή πυκνότητα κλπ.	527 / 540 / 542
Καλλιέργειες (Cropland)		Γεωργικές εκτάσεις, καλλιεργήσιμα εδάφη κλπ.	527 / 537 / 518
Γυμνό έδαφος (Barren land)		Χωμάτινες ή και αμμώδεις ή και χαλικώδεις – πετρώδεις επιφάνειες σκούρου χρώματος, με αραιή ή καθόλου βλάστηση	540 / 534 / 533
Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις (Artificial surfaces & Rocky areas)		Οικισμοί, δρόμοι, πετρώδεις – βραχώδεις εξάρσεις ανοικτού χρώματος, εκτάσεις καλυμμένες από χιόνι κ.ά.	593 / 623 / 617

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των έγχρωμων σύνθετων, των φασματικών δεικτών και των βοηθητικών δεδομένων, συλλέχτηκε, για κάθε μία θεματική τάξη, ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών εικονοστοιχείων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε, για κάθε εικόνα των περιοχών μελέτης, μέσω του σχεδιασμού πολυγώνων (λογισμικό ENVI), διαμορφώνοντας έτσι τα δείγματα εκπαίδευσης ή αλλιώς τις περιοχές ενδιαφέροντος (Regions of Interest – ROI). Ο σχεδιασμός των πολυγώνων επιλογής εικονοστοιχείων, της εκάστοτε κλάσης, πραγματοποιήθηκε σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία της κάθε εικόνας, ούτως ώστε τα δεδομένα εκπαίδευσης να είναι αρκετά αντιπροσωπευτικά της μεταβλητότητας που περιέχεται στην αντίστοιχη θεματική τάξη.

Πίνακας 11. Οι θεματικές τάξεις της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) και ο αριθμός των εικονοστοιχείων εκπαίδευσης, για κάθε εκπαιδευτικό δείγμα και για κάθε εξεταζόμενο έτος.

Τύποι κάλυψης γης	Χρώμα	Περιγραφή	Εικονοστ. εκπαίδ. 1984 / 2000 / 2014
Πλατύφυλλα (Broadleaf)		Περιοχές που καλύπτονται από πλατύφυλλα δέντρα ή και υψηλούς θαμνώνες αείφυλλων πλατύφυλλων, με αραιή ή πυκνή κάλυψη	530 / 529 / 545
Κωνοφόρα (Conifers)		Περιοχές που καλύπτονται από κωνοφόρα δέντρα, με αραιή ή πυκνή κάλυψη	472 / 472 / 477
Χαμηλή βλάστηση (Low vegetation)		Περιοχές με χαμηλή ή και σχετικά αραιή βλάστηση, χαμηλοί θαμνώνες με σχετικά αραιή πυκνότητα κλπ.	584 / 580 / 573
Γυμνό έδαφος (Barren land)		Χωμάτινες ή και αμμώδεις ή και χαλικώδεις – πετρώδεις επιφάνειες σκούρου χρώματος, με αραιή ή καθόλου βλάστηση	507 / 503 / 494
Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις (Artificial surfaces & Rocky areas)		Οικισμοί, δρόμοι, πετρώδεις – βραχώδεις εξάρσεις ανοικτού χρώματος, εκτάσεις καλυμμένες από χιόνι κ.ά.	540 / 557 / 552

Η ποσότητα των επιλεγμένων εικονοστοιχείων, του κάθε δείγματος εκπαίδευσης, παρουσιάζεται στους Πίνακες 10 και 11, και είναι σύμφωνη, κατά προσέγγιση, με τον παρακάτω τύπο (Lillesand & Kiefer, 1993 όπως αναφέρεται στο Μηλιαρέσης, 2003):

$$(n + 1) \times 10,$$

όπου n είναι ο αριθμός των φασματικών καναλιών που χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση της εκάστοτε πολυφασματικής εικόνας.

Σημειώνεται, εδώ, ότι για τον προσδιορισμό των κριτηρίων διαχωρισμού, κατά τη διαμόρφωση των δέντρων αποφάσεων, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής τελικά σύνολα δεδομένων:

- Α περιοχή μελέτης: τα κανάλια 1, 3, 4 και 5 (για TM και ETM+) ή 2, 4, 5 και 6 (για OLI), ο NDVI και τα επίπεδα υψομέτρου και κλίσεων (Slope).
- Β περιοχή μελέτης: τα κανάλια 1, 2, 4 και 5 (για TM και ETM+) ή 2, 3, 5 και 6 (για OLI), ο NDVI και το επίπεδο υψομέτρου.

Βάσει αυτών των συνόλων δεδομένων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές «διαχωριστικότητας» (Separability tests), μέσω του λογισμικού ENVI, για να ελεγχθεί το πόσο καλά διαχωρίζονται τα δείγματα εκπαίδευσης των καθορισμένων θεματικών τάξεων. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν οι στατιστικές τεχνικές «Jeffries-Matusita» και της μετασχηματισμένης απόκλισης (ENVI User's Guide, 2009), των οποίων οι προκύπτουσες τιμές διαχωριστικότητας κυμαίνονται από 0 έως 2 (τιμές άνω του 1,9 συνιστούν πολύ καλό διαχωρισμό, ενώ τιμές μικρότερες του 1 δηλώνουν χαμηλή διαχωριστικότητα). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών συνοψίζονται ως εξής:

- Α περιοχή μελέτης: τα περισσότερα δείγματα εκπαίδευσης διαχωρίζονται πολύ καλά μεταξύ τους (τιμές άνω του 1,9), με εξαίρεση τους διαχωρισμούς μεταξύ των κλάσεων «Χαμηλή βλάστηση» – «Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις» (χαμηλότερη τιμή για το 1984: 1,79, το 2000: 1,81, το 2014: 1,95), «Χαμηλή βλάστηση» – «Καλλιέργειες» (1984: 1,86, 2000: 1,63, 2014: 1,96) και «Καλλιέργειες» – «Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις» (1984: 1,90, 2000: 1,86, 2014: 1,87).
- Β περιοχή μελέτης: όλα τα δείγματα εκπαίδευσης παρουσιάζουν πολύ καλό διαχωρισμό, με τη χαμηλότερη τιμή διαχωριστικότητας να είναι 1,96, η οποία εμφανίζεται στην εικόνα του 1984 μεταξύ των κλάσεων «Χαμηλή βλάστηση» – «Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις».

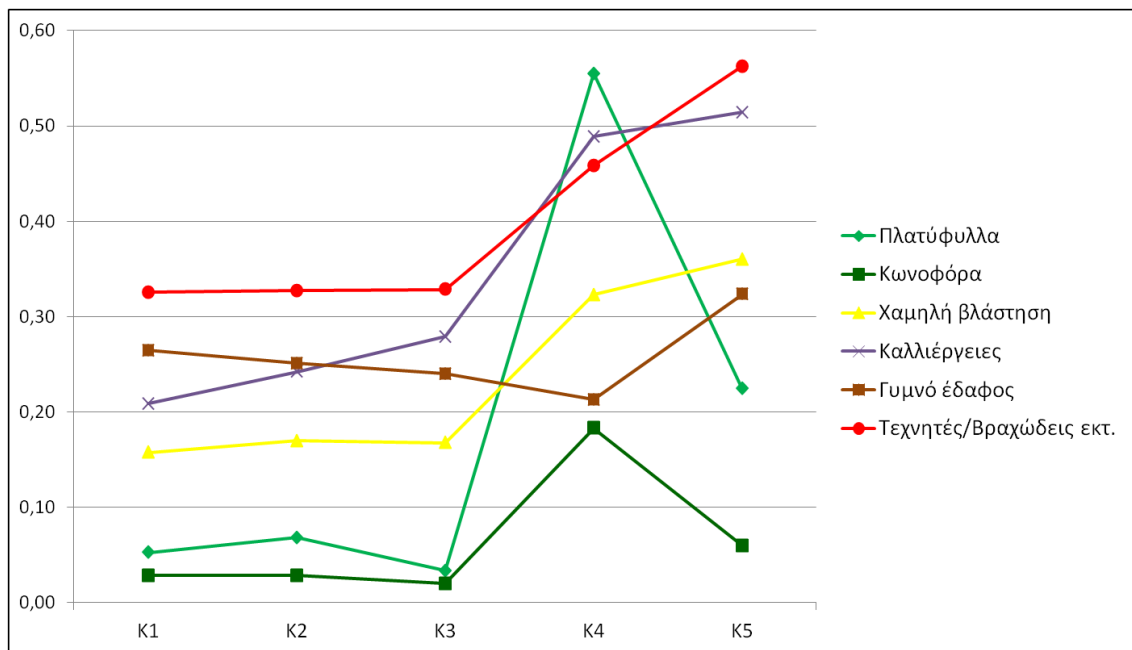
Αφού καθορίστηκαν τα δείγματα εκπαίδευσης, έπειτα υπολογίστηκαν οι βασικές στατιστικές παράμετροι των τιμών των εικονοστοιχείων τους, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι φασματικές ιδιότητες της κάθε θεματικής τάξης. Βάσει αυτών των φασματικών χαρακτηριστικών και των βοηθητικών δεδομένων διαμορφώθηκαν τα κριτήρια διαχωρισμού, με τα οποία πραγματοποιήθηκε η σύνθεση των δέντρων αποφάσεων (Decision Trees – DT). Ακολουθεί η παρουσίαση των διαδικασιών σύνθεσης των DT για κάθε περιοχή μελέτης χωριστά.

Α περιοχή μελέτης (GR2130011):

Οι στατιστικές παράμετροι των δειγμάτων εκπαίδευσης, της κάθε θεματικής τάξης, παρατίθενται ανά εξεταζόμενο έτος (δορυφορική σκηνή) στους Πίνακες 12, 13 και 14. Παράλληλα, στα Σχήματα 7, 8 και 9 παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές των κλάσεων, οι οποίες διαμορφώνονται βάσει του μέσου (Mean) των κανονικοποιημένων τιμών ακτινοβολίας, που εμφανίζει η εκάστοτε περιοχή εκπαίδευσης σε κάθε κανάλι.

Πίνακας 12. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση.

Κανάλι/ Δείκτης	Πλατύφυλλα				Κωνοφόρα				Χαμηλή βλάστηση			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,028	0,077	0,053	0,008	0,000	0,072	0,028	0,014	0,022	0,331	0,158	0,049
K2	0,042	0,109	0,068	0,013	0,000	0,067	0,029	0,015	0,042	0,311	0,170	0,047
K3	0,019	0,063	0,033	0,008	0,000	0,050	0,020	0,011	0,050	0,306	0,168	0,046
K4	0,346	0,824	0,555	0,119	0,088	0,321	0,183	0,054	0,126	0,572	0,323	0,084
K5	0,150	0,322	0,224	0,043	0,013	0,176	0,060	0,037	0,103	0,639	0,361	0,109
NDVI	0,872	0,954	0,927	0,013	0,810	0,978	0,875	0,035	0,542	0,694	0,616	0,037
Κανάλι/ Δείκτης	Καλλιέργειες				Γυμνό έδαφος				Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,116	0,436	0,209	0,044	0,094	0,536	0,265	0,063	0,182	0,961	0,325	0,084
K2	0,126	0,454	0,242	0,047	0,076	0,538	0,251	0,062	0,176	0,975	0,327	0,084
K3	0,131	0,488	0,279	0,068	0,069	0,513	0,240	0,060	0,169	0,938	0,329	0,086
K4	0,245	0,616	0,489	0,069	0,075	0,484	0,213	0,058	0,189	0,887	0,458	0,070
K5	0,330	0,730	0,514	0,090	0,099	0,893	0,324	0,087	0,313	1,000	0,562	0,109
NDVI	0,460	0,719	0,596	0,055	0,324	0,506	0,426	0,041	0,438	0,712	0,541	0,045



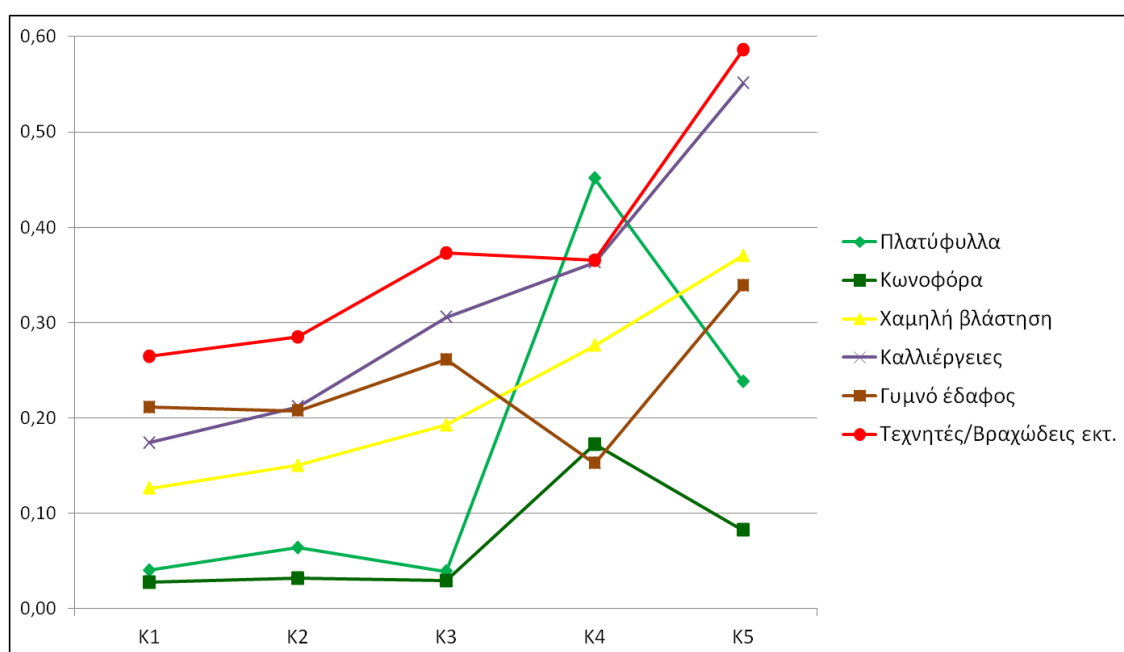
Σχήμα 7. Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του TM. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.

Μετά από ενδελεχή εξέταση των φασματικών αποκρίσεων των θεματικών τάξεων και με βάση τα εύρη τιμών εικονοστοιχείων και τα κέντρα κλάσης σε κάθε κανάλι και δείκτη, εντοπίστηκαν οι διασπάσεις που διαχωρίζουν ευκρινέστερα τους διακριτούς τύπους κάλυψης γης. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την πληροφορία αυτή, αλλά και το επιπρόσθετο πληροφοριακό υλικό από το υψόμετρο, ορίστηκαν τα κριτήρια διαχωρισμού (τιμές κατωφλίων και συνθήκες αποδοχής/απόρριψης), βάσει των οποίων διαμορφώθηκε το δέντρο ταξινόμησης.

Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση του DT πραγματοποιήθηκε με τη σταδιακή εφαρμογή των κριτηρίων διαχωρισμού, από τον αρχικό κόμβο προς τους υπόλοιπους κόμβους απόφασης και έπειτα από μια σειρά δοκιμών προσδιορίστηκε η βέλτιστη δομή του δέντρου (δηλαδή, μεγαλύτερος δυνατός διαχωρισμός με τις λιγότερες δυνατές διακλαδώσεις), η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.

Πίνακας 13. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση.

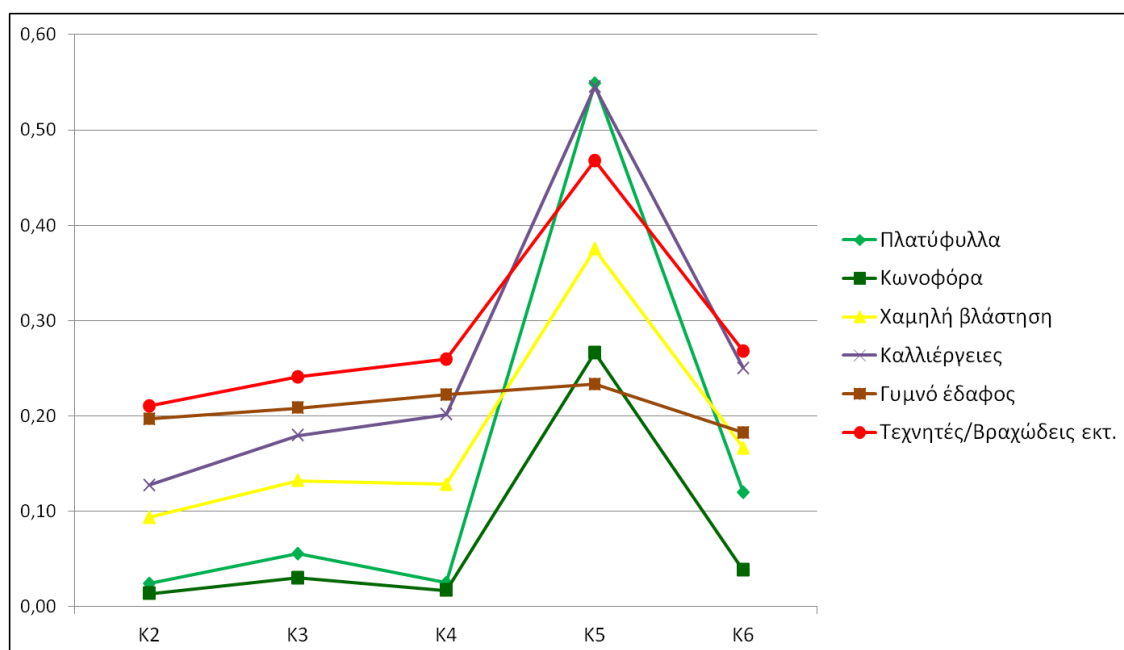
Κανάλι/ Δείκτης	Πλατύφυλλα				Κωνοφόρα				Χαμηλή βλάστηση			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,016	0,064	0,040	0,007	0,005	0,064	0,028	0,011	0,027	0,257	0,126	0,043
K2	0,041	0,097	0,064	0,011	0,005	0,069	0,032	0,013	0,037	0,286	0,151	0,049
K3	0,013	0,070	0,039	0,008	0,004	0,066	0,029	0,011	0,052	0,328	0,193	0,063
K4	0,320	0,675	0,451	0,089	0,089	0,331	0,173	0,051	0,071	0,503	0,276	0,086
K5	0,164	0,327	0,238	0,043	0,022	0,221	0,082	0,043	0,097	0,624	0,371	0,117
NDVI	0,873	0,962	0,926	0,012	0,809	0,957	0,864	0,028	0,544	0,694	0,624	0,041
Κανάλι/ Δείκτης	Καλλιέργειες				Γυμνό έδαφος				Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,096	0,299	0,174	0,036	0,070	0,524	0,212	0,078	0,150	0,519	0,265	0,053
K2	0,124	0,346	0,212	0,041	0,065	0,535	0,208	0,079	0,194	0,562	0,285	0,054
K3	0,162	0,541	0,306	0,073	0,079	0,703	0,261	0,102	0,240	0,734	0,373	0,076
K4	0,231	0,621	0,363	0,055	0,047	0,456	0,153	0,074	0,207	0,550	0,366	0,050
K5	0,292	0,792	0,551	0,107	0,071	1,000	0,339	0,148	0,363	0,903	0,586	0,093
NDVI	0,455	0,719	0,581	0,071	0,233	0,509	0,406	0,060	0,435	0,690	0,534	0,047



Σχήμα 8. Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του ETM+. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.

Πίνακας 14. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση.

Κανάλι/ Δείκτης	Πλατύφυλλα				Κωνοφόρα				Χαμηλή βλάστηση			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K2	0,003	0,042	0,024	0,011	0,007	0,024	0,014	0,003	0,054	0,171	0,094	0,022
K3	0,022	0,091	0,056	0,015	0,018	0,050	0,030	0,005	0,081	0,208	0,132	0,027
K4	0,012	0,039	0,025	0,006	0,010	0,028	0,017	0,003	0,069	0,218	0,129	0,030
K5	0,413	0,772	0,549	0,075	0,165	0,372	0,266	0,039	0,245	0,572	0,375	0,065
K6	0,075	0,167	0,120	0,016	0,015	0,082	0,038	0,011	0,094	0,263	0,167	0,038
NDVI	0,923	0,967	0,947	0,009	0,893	0,953	0,926	0,010	0,604	0,770	0,706	0,038
Κανάλι/ Δείκτης	Καλλιέργειες				Γυμνό έδαφος				Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K2	0,084	0,290	0,128	0,034	0,068	0,470	0,197	0,077	0,085	0,406	0,210	0,043
K3	0,122	0,311	0,180	0,033	0,087	0,504	0,208	0,077	0,120	0,431	0,241	0,044
K4	0,116	0,403	0,202	0,068	0,088	0,562	0,222	0,086	0,113	0,455	0,260	0,052
K5	0,324	0,690	0,545	0,073	0,085	0,564	0,233	0,087	0,275	0,665	0,468	0,066
K6	0,149	0,442	0,250	0,058	0,061	0,537	0,182	0,079	0,159	0,423	0,268	0,036
NDVI	0,503	0,780	0,691	0,088	0,274	0,563	0,466	0,065	0,441	0,769	0,597	0,050



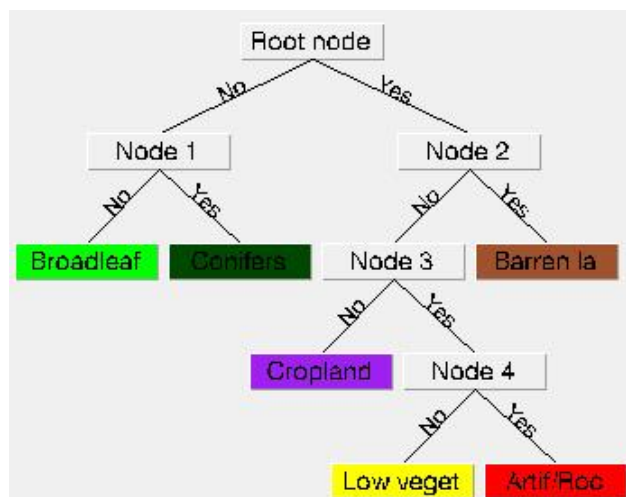
Σχήμα 9. Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Α περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014), ως προς τα κανάλια 2, 3, 4, 5 και 6 του OLI. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.

Στον Πίνακα 15 παρατίθενται τα κριτήρια διαχωρισμού, που αφορούν την ταξινόμηση των εικόνων της Α περιοχής μελέτης. Έτσι, για παράδειγμα, εφαρμόζοντας το DT στην εικόνα του 1984, στον αρχικό κόμβο τα εικονοστοιχεία με τιμή NDVI μικρότερη ή ίση του 0,72 «ή» (λογικός τελεστής Boolean «OR») με τιμή μεγαλύτερη του 0,14 στο κανάλι 3, δηλαδή τα εικονοστοιχεία που πληρούν τη μία ή και τις δύο συνθήκες, θα ακολουθήσουν τη δεξιά διακλάδωση «Yes» (Ναι: συνθήκη αποδοχής), ενώ τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία θα κατευθυνθούν στην αριστερή διακλάδωση «No» (Όχι: συνθήκη απόρριψης). Οι τιμές 0,72 και 0,14 και γενικότερα οι τιμές κατωφλίων προκύπτουν σύμφωνα με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

όπου x_i είναι η μέση τιμή (Mean) της εκάστοτε κλάσης ή ο μέσος των μέσων τιμών (Mean) του εκάστοτε συνόλου κλάσεων και n είναι ο αριθμός των κλάσεων ή και των συνόλων των κλάσεων, αντίστοιχα.

Για παράδειγμα, η τιμή 0,72 προέκυψε αφού υπολογίστηκε ο μέσος των μέσων τιμών NDVI των κλάσεων Πλατύφυλλα και Κωνοφόρα: $(0,927 + 0,875)/2 = 0,901$ και ο μέσος των μέσων τιμών NDVI των υπολοίπων κλάσεων: $(0,616 + 0,596 + 0,426 + 0,541)/4 = 0,545$ (για τις προαναφερόμενες τιμές βλ. Πίνακα 12). Έπειτα, υπολογίστηκε ο μέσος των μέσων των δύο συνόλων κλάσεων: $(0,901 + 0,545)/2 = 0,723$, λαμβάνοντας έτσι την τιμή του κριτηρίου $NDVI \leq 0,72$ (βλ. Πίνακα 15).



Σχήμα 10. Η σχηματική δομή (λογισμικό ENVI) του δέντρου αποφάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση των εικόνων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).

Όπως είναι φανερό, αρχικά πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των δασικών εκτάσεων (Πλατύφυλλα, Κωνοφόρα) από τις υπόλοιπες εκτάσεις, διότι μεταξύ των δύο αυτών συνόλων κλάσεων παράγεται το μεγαλύτερο μέτρο απόκλισης. Στη συνέχεια ακολουθούν οι διαχωρισμοί μεταξύ πιο ομοιογενών κλάσεων όπως Πλατύφυλλα – Κωνοφόρα, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους βάσει του καναλιού 4 (ή 5 για OLI), καθώς τα Πλατύφυλλα παρουσιάζουν πολύ πιο υψηλή ανακλαστικότητα, από ότι τα Κωνοφόρα, στο εγγύς υπέρυθρο (βλ. Σχήματα 7, 8 και 9).

Σε ότι αφορά στα κριτήρια διαχωρισμού του κόμβου 3, σε αυτά συμπεριλήφθηκαν και οι παράγοντες του υψομέτρου (ΨΥΜΕ) και της κλίσης (Slope), για την αποτελεσματικότερη διάκριση μεταξύ των καλλιεργήσιμων εκτάσεων και των τάξεων Χαμηλή βλάστηση και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις. Οι τιμές 1.100 m για το υψόμετρο και 22° για την κλίση, ορίστηκαν έπειτα από προσεκτική εξέταση των βοηθητικών δεδομένων και μετά από σχετικές συμβουλές ειδικών για το βέλτιστο τρόπο διαχωρισμού των κλάσεων αυτών.

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, όπου κρίθηκε απαραίτητο χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια διαχωρισμού, οι λόγοι των μέσων τιμών (Mean) της εκάστοτε κλάσης στα αντίστοιχα κανάλια (π.χ. κόμβος 2: κανάλι 1/κανάλι 4), αντί των μέσων τιμών (Mean), που παρουσιάζουν οι κλάσεις στις φασματικές ζώνες, καθώς οι λόγοι διαχωρίζουν ευκρινέστερα τις συγκεκριμένες θεματικές τάξεις.

Πίνακας 15. Τα κριτήρια διαχωρισμού για κάθε κόμβο διάσπασης του δέντρου αποφάσεων, με το οποίο ταξινομήθηκαν οι εικόνες της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).

Κόμβος	Κριτήρια διαχωρισμού (εικόνα: 1984, TM)
Root node (Αρχικός κόμβος)	$NDVI \leq 0,72$ OR $K3 > 0,14$
Node 1 (Κόμβος 1)	$K4 < 0,37$
Node 2 (Κόμβος 2)	$K1/K4 > 0,89$
Node 3 (Κόμβος 3)	$K1/K3 \geq 0,86$ OR $\PsiΥΜΕ \geq 1100$ OR $Slope \geq 22$
Node 4 (Κόμβος 4)	$(K5 > 0,46$ OR $K4/K5 < 0,86)$ AND $K1 > 0,24$
Κόμβος	Κριτήρια διαχωρισμού (εικόνα: 2000, ETM+)
Root node (Αρχικός κόμβος)	$NDVI < 0,72$ OR $K3 \geq 0,16$
Node 1 (Κόμβος 1)	$K4 \leq 0,31$
Node 2 (Κόμβος 2)	$K1/K4 > 0,97$
Node 3 (Κόμβος 3)	$K1/K3 \geq 0,63$ OR $\PsiΥΜΕ \geq 1100$ OR $Slope \geq 22$
Node 4 (Κόμβος 4)	$(K5 \geq 0,48$ OR $K4/K5 \leq 0,68)$ AND $K1 \geq 0,20$
Κόμβος	Κριτήρια διαχωρισμού (εικόνα: 2014, OLI)
Root node (Αρχικός κόμβος)	$NDVI < 0,78$ OR $K4 > 0,11$
Node 1 (Κόμβος 1)	$K5 < 0,41$
Node 2 (Κόμβος 2)	$K2/K5 \geq 0,58$
Node 3 (Κόμβος 3)	$K2/K4 > 0,70$ OR $\PsiΥΜΕ \geq 1100$ OR $Slope \geq 22$
Node 4 (Κόμβος 4)	$(K6 \geq 0,22$ OR $K5/K6 < 2,00)$ AND $K2 > 0,15$

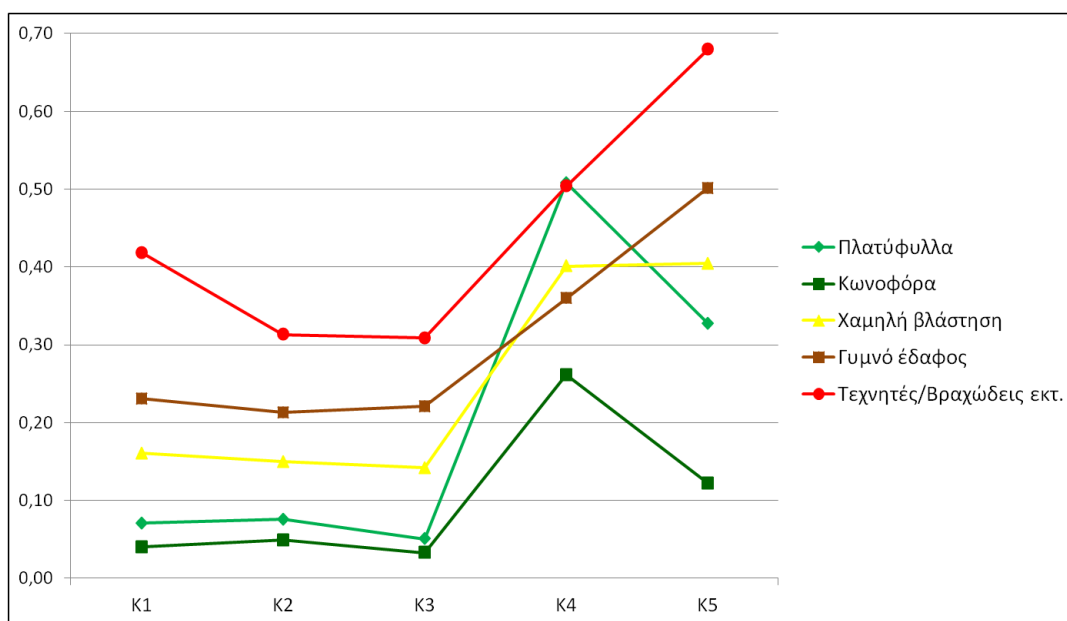
Β περιοχή μελέτης (GR2130009):

Στους Πίνακες 16, 17 και 18 παρατίθενται, για κάθε εξεταζόμενο έτος (δορυφορική σκηνή), οι στατιστικές παράμετροι των δειγμάτων εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων της Β περιοχής μελέτης, ενώ στα Σχήματα 11, 12 και 13 παρουσιάζονται οι φασματικές υπογραφές των τάξεων αυτών.

Πίνακας 16. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση.

Κανάλι/ Δείκτης	Πλατύφυλλα				Κωνοφόρα				Χαμηλή βλάστηση			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,020	0,130	0,071	0,016	0,020	0,060	0,041	0,009	0,075	0,275	0,161	0,031
K2	0,046	0,109	0,076	0,013	0,034	0,063	0,049	0,006	0,086	0,229	0,150	0,026
K3	0,027	0,081	0,051	0,011	0,018	0,045	0,033	0,006	0,072	0,215	0,142	0,027
K4	0,323	0,693	0,508	0,085	0,240	0,302	0,262	0,015	0,245	0,573	0,401	0,081
K5	0,186	0,457	0,327	0,053	0,085	0,162	0,123	0,015	0,198	0,603	0,405	0,089
NDVI	0,830	0,922	0,878	0,024	0,811	0,917	0,852	0,020	0,634	0,729	0,671	0,019

Κανάλι/ Δείκτης	Γυμνό έδαφος				Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,165	0,310	0,231	0,025	0,165	0,690	0,418	0,130
K2	0,149	0,286	0,213	0,024	0,137	0,480	0,313	0,083
K3	0,143	0,291	0,221	0,026	0,117	0,480	0,309	0,085
K4	0,240	0,443	0,360	0,040	0,240	0,651	0,504	0,082
K5	0,332	0,619	0,501	0,053	0,259	1,000	0,679	0,155
NDVI	0,490	0,575	0,541	0,016	0,466	0,717	0,547	0,053

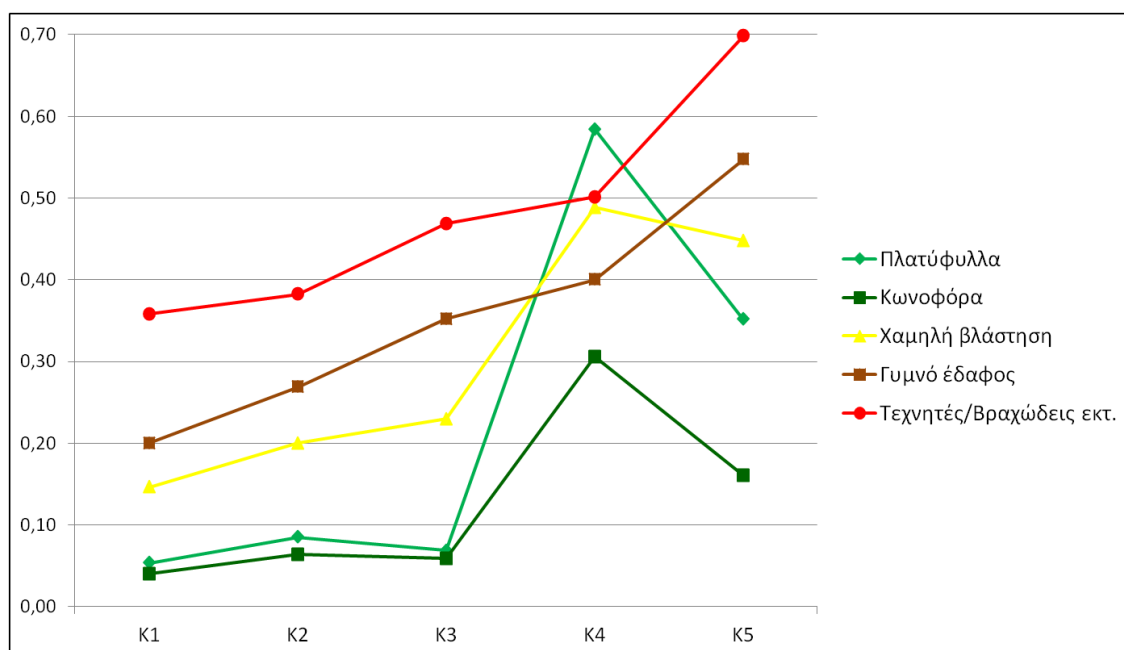


Σχήμα 11. Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 1984), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του TM. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.

Πίνακας 17. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση.

Κανάλι/ Δείκτης	Πλατύφυλλα				Κωνοφόρα				Χαμηλή βλάστηση			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,015	0,100	0,054	0,015	0,020	0,060	0,040	0,007	0,090	0,210	0,146	0,023
K2	0,054	0,131	0,085	0,016	0,036	0,090	0,064	0,008	0,135	0,266	0,200	0,024
K3	0,039	0,120	0,069	0,018	0,030	0,086	0,059	0,009	0,146	0,309	0,230	0,030
K4	0,406	0,697	0,584	0,058	0,255	0,370	0,306	0,019	0,333	0,648	0,488	0,069
K5	0,204	0,486	0,352	0,045	0,110	0,249	0,161	0,023	0,290	0,580	0,448	0,059
NDVI	0,860	0,946	0,905	0,020	0,826	0,922	0,854	0,018	0,650	0,779	0,703	0,025

Κανάλι/ Δείκτης	Γυμνό έδαφος				Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K1	0,150	0,255	0,200	0,020	0,170	0,605	0,358	0,065
K2	0,203	0,360	0,269	0,026	0,176	0,671	0,382	0,063
K3	0,262	0,502	0,352	0,039	0,189	0,824	0,469	0,083
K4	0,291	0,491	0,400	0,037	0,248	0,739	0,502	0,069
K5	0,371	0,694	0,547	0,060	0,220	0,988	0,698	0,123
NDVI	0,507	0,590	0,560	0,018	0,459	0,650	0,546	0,039

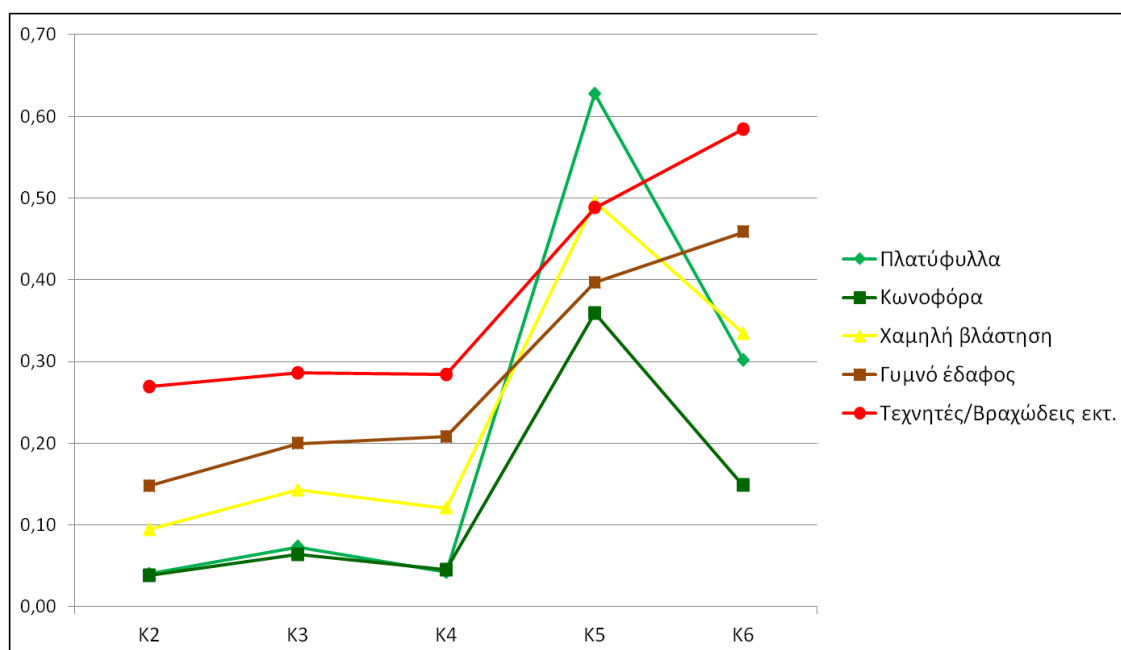


Σχήμα 12. Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2000), ως προς τα κανάλια 1, 2, 3, 4 και 5 του ETM+. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.

Πίνακας 18. Βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές εκπαίδευσης των θεματικών τάξεων (φασματικές αποκρίσεις των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014). Όπου Min: ελάχιστη τιμή, Max: μέγιστη τιμή, Mean: μέση τιμή και Stdev – Standard deviation: τυπική απόκλιση.

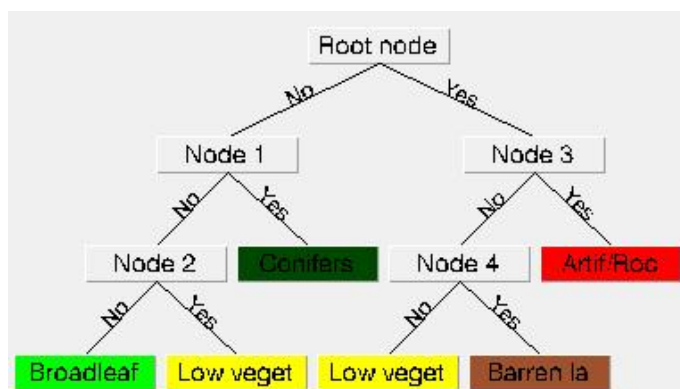
Κανάλι/ Δείκτης	Πλατύφυλλα				Κωνοφόρα				Χαμηλή βλάστηση			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K2	0,026	0,053	0,040	0,007	0,027	0,048	0,039	0,004	0,070	0,130	0,095	0,011
K3	0,053	0,089	0,073	0,006	0,044	0,080	0,064	0,006	0,101	0,185	0,143	0,016
K4	0,032	0,052	0,042	0,004	0,030	0,061	0,045	0,006	0,086	0,163	0,121	0,015
K5	0,474	0,724	0,628	0,038	0,293	0,441	0,359	0,023	0,323	0,699	0,495	0,089
K6	0,242	0,367	0,302	0,021	0,095	0,211	0,148	0,017	0,221	0,564	0,335	0,062
NDVI	0,891	0,926	0,910	0,008	0,810	0,883	0,844	0,016	0,678	0,796	0,733	0,022

Κανάλι/ Δείκτης	Γυμνό έδαφος				Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
K2	0,116	0,183	0,148	0,013	0,087	0,463	0,269	0,074
K3	0,157	0,252	0,200	0,017	0,085	0,464	0,286	0,067
K4	0,154	0,279	0,208	0,021	0,076	0,473	0,284	0,072
K5	0,292	0,495	0,396	0,038	0,207	0,647	0,488	0,087
K6	0,332	0,597	0,458	0,055	0,195	0,925	0,584	0,141
NDVI	0,480	0,595	0,564	0,019	0,452	0,685	0,542	0,053



Σχήμα 13. Γραφική παράσταση των κέντρων βάρους των περιοχών εκπαίδευσης (φασματικές υπογραφές των κλάσεων) της Β περιοχής μελέτης (δορυφορική σκηνή: 2014), ως προς τα κανάλια 2, 3, 4, 5 και 6 του OLI. Άξονας των y: κανονικοποιημένη τιμή ακτινοβολίας.

Η γενική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διαμόρφωση των κριτηρίων διαχωρισμού και την τελική σύνθεση του DT με το οποίο ταξινομήθηκαν οι εικόνες της Β περιοχής μελέτης, είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται για το DT της Α περιοχής μελέτης. Δηλαδή, όπως για την Α, έτσι και για τη Β περιοχή μελέτης προσδιορίστηκαν οι διασπάσεις που διαχωρίζουν ευκρινέστερα τους διακριτούς τύπους κάλυψης γης και σε συνδυασμό με το επιπρόσθετο πληροφοριακό υλικό από το υψόμετρο, ορίστηκαν τα κριτήρια διαχωρισμού βάσει των οποίων διαμορφώθηκε το δέντρο ταξινόμησης του Σχήματος 14.



Σχήμα 14. Η σχηματική δομή (λογισμικό ENVI) του δέντρου αποφάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση των εικόνων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).

Τα κριτήρια διαχωρισμού του DT της Β περιοχής μελέτης παρατίθενται στον Πίνακα 19. Οι τιμές κατωφλίων διαμορφώνονται και εδώ σύμφωνα με τη μαθηματική σχέση (1). Όπως το DT της Α, έτσι και το DT της Β περιοχής μελέτης αποτελείται από κόμβους που περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα κριτήρια διαχωρισμού συνδεδεμένα μεταξύ τους με τους λογικούς τελεστές «OR» («ή») και «AND» («και»). Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των κριτηρίων του Πίνακα 15 και αυτών του Πίνακα 19, οφείλονται κυρίως σε δύο παράγοντες: στο διαφορετικό αριθμό κλάσεων που επιλέχθηκαν για τις δύο περιοχές μελέτης και στην απόκλιση που παρουσιάζει η φασματική απόκριση της κάθε κλάσης στις δύο αυτές περιοχές.

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, και σε αυτό το DT πραγματοποιείται αρχικά (αρχικός κόμβος) ο διαχωρισμός των δασικών εκτάσεων (Πλατύφυλλα, Κωνοφόρα) από τις υπόλοιπες εκτάσεις. Παρ' όλα αυτά, στον κόμβο 2 διαχωρίζεται εκ νέου η κλάση Πλατύφυλλα από αυτή της Χαμηλής βλάστησης, βάσει του κριτηρίου του υψομέτρου (1.950 m). Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στο γεγονός ότι στη συγκεκριμένη περιοχή δεν αναπτύσσονται πλατύφυλλα δέντρα πάνω από αυτό το υψόμετρο. Έτσι, στις περιοχές με υψόμετρο άνω των 1.950 m, τα εικονοστοιχεία που πιθανά να ταξινομούνταν στην κλάση Πλατύφυλλα θα πρέπει να

ταξινομηθούν ως Χαμηλή βλάστηση (π.χ. αλπικά και υπαλπικά λιβάδια). Η ακριβής τιμή του υψομετρικού αυτού κριτηρίου ορίστηκε έπειτα από προσεκτική εξέταση των βοηθητικών δεδομένων σε συνδυασμό με τα υψόμετρα των δασικών ζωνών βλάστησης που παρατίθενται στον ιστότοπο του ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου (2016).

Πίνακας 19. Τα κριτήρια διαχωρισμού για κάθε κόμβο διάσπασης του δέντρου αποφάσεων, με το οποίο ταξινομήθηκαν οι εικόνες της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).

Κόμβος	Κριτήρια διαχωρισμού (εικόνα: 1984, TM)
Root node (Αρχικός κόμβος)	$NDVI < 0,73$ OR $K1 > 0,16$ OR $K2 > 0,14$
Node 1 (Κόμβος 1)	$K4 \leq 0,38$ AND $K5 < 0,23$
Node 2 (Κόμβος 2)	$\Psi\Upsilon\Upsilon\text{ME} > 1950$
Node 3 (Κόμβος 3)	$K1 \geq 0,31$ OR $K1/K4 \geq 0,68$
Node 4 (Κόμβος 4)	$NDVI < 0,61$ AND $K1/K4 > 0,52$
Κόμβος	Κριτήρια διαχωρισμού (εικόνα: 2000, ETM+)
Root node (Αρχικός κόμβος)	$NDVI \leq 0,74$ OR $K1 > 0,14$ OR $K2 \geq 0,18$
Node 1 (Κόμβος 1)	$K4 < 0,45$ AND $K5 < 0,26$
Node 2 (Κόμβος 2)	$\Psi\Upsilon\Upsilon\text{ME} > 1950$
Node 3 (Κόμβος 3)	$K1 \geq 0,27$ OR $K1/K4 \geq 0,56$
Node 4 (Κόμβος 4)	$NDVI \leq 0,63$ AND $K1/K4 \geq 0,40$
Κόμβος	Κριτήρια διαχωρισμού (εικόνα: 2014, OLI)
Root node (Αρχικός κόμβος)	$NDVI < 0,75$ OR $K2 > 0,10$ OR $K3 \geq 0,14$
Node 1 (Κόμβος 1)	$K5 \leq 0,49$ AND $K6 < 0,23$
Node 2 (Κόμβος 2)	$\Psi\Upsilon\Upsilon\text{ME} > 1950$
Node 3 (Κόμβος 3)	$K2 \geq 0,20$ OR $K2/K5 \geq 0,42$
Node 4 (Κόμβος 4)	$NDVI < 0,65$ AND $K2/K5 > 0,28$

3.5.4 Εκτίμηση ακρίβειας ταξινόμησης – Ανίχνευση και ανάλυση διαχρονικών αλλαγών

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων ταξινόμησης, της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της ακρίβειας για κάθε ταξινομημένη εικόνα λαμβάνοντας ως δεδομένα αναφοράς (σημεία επαλήθευσης – validation points) τα δείγματα εκπαίδευσης που είχαν χρησιμοποιηθεί στη διαμόρφωση των δέντρων αποφάσεων.

Για το σκοπό αυτό, υπολογίστηκαν, μέσω του λογισμικού ENVI, τα ακόλουθα:

- ο πίνακας σύγχυσης (confusion matrix),
- η συνολική ακρίβεια (overall accuracy) και
- ο συντελεστής K (Kappa coefficient),

τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στην υποενότητα «2.3.8 Εκτίμηση ακρίβειας ταξινόμησης». Τα αποτελέσματα της εκτίμησης συνοψίζονται σε πίνακες, ανά ταξινομημένη εικόνα, στο Κεφάλαιο 4.

Σε ότι αφορά στην ανίχνευση των διαχρονικών μεταβολών, αυτή πραγματοποιήθηκε με τη μεταταξινομική ανάλυση των αλλαγών, μέσω του λογισμικού ENVI. Κατά τη διαδικασία αυτή προκύπτει ένας πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix), η ερμηνεία του οποίου οδηγεί σε συμπεράσματα για την έκταση και το είδος των μεταβολών («από – σε») των καλύψεων γης από τη μία ημερομηνία στην άλλη (ENVI User's Guide, 2009). Στην ουσία πρόκειται για ένα δισδιάστατο πίνακα, στον οποίο οι γραμμές αντιστοιχούν στις θεματικές τάξεις της εικόνας της πρώτης ημερομηνίας και οι στήλες αντιστοιχούν στις ανάλογες τάξεις της εικόνας της τελευταίας ημερομηνίας (Mallinis, et al., 2011, p.314). Τα κύρια διαγώνια στοιχεία του πίνακα αναπαριστούν την έκταση ή το ποσοστό ή τον αριθμό των εικονοστοιχείων της κάθε κλάσης που δεν υπέστησαν μεταβολή, ενώ τα μη διαγώνια στοιχεία εμφανίζουν τις μεταβολές από τη μία κλάση στην άλλη (Mallinis, et al., 2011, p.314).

Η παραπάνω διαδικασία σύγκρισης ταξινομημένων εικόνων εφαρμόζεται, όπως είναι φυσικό, ανά ζεύγος εικόνων. Έτσι, στην παρούσα διατριβή, η ανάλυση των διαχρονικών αλλαγών, που έλαβαν χώρα στις δύο περιοχές μελέτης, πραγματοποιήθηκε για τα εξής χρονικά διαστήματα: 1984 – 2000, 2000 – 2014 και 1984 – 2014.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεταταξινομικής ανάλυσης αλλαγών λαμβάνεται συνήθως προσεγγιστικά ίση με το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της ακρίβειας των συγκρινόμενων ταξινομημένων εικόνων (Coppin & Bauer, 1996, p.217).

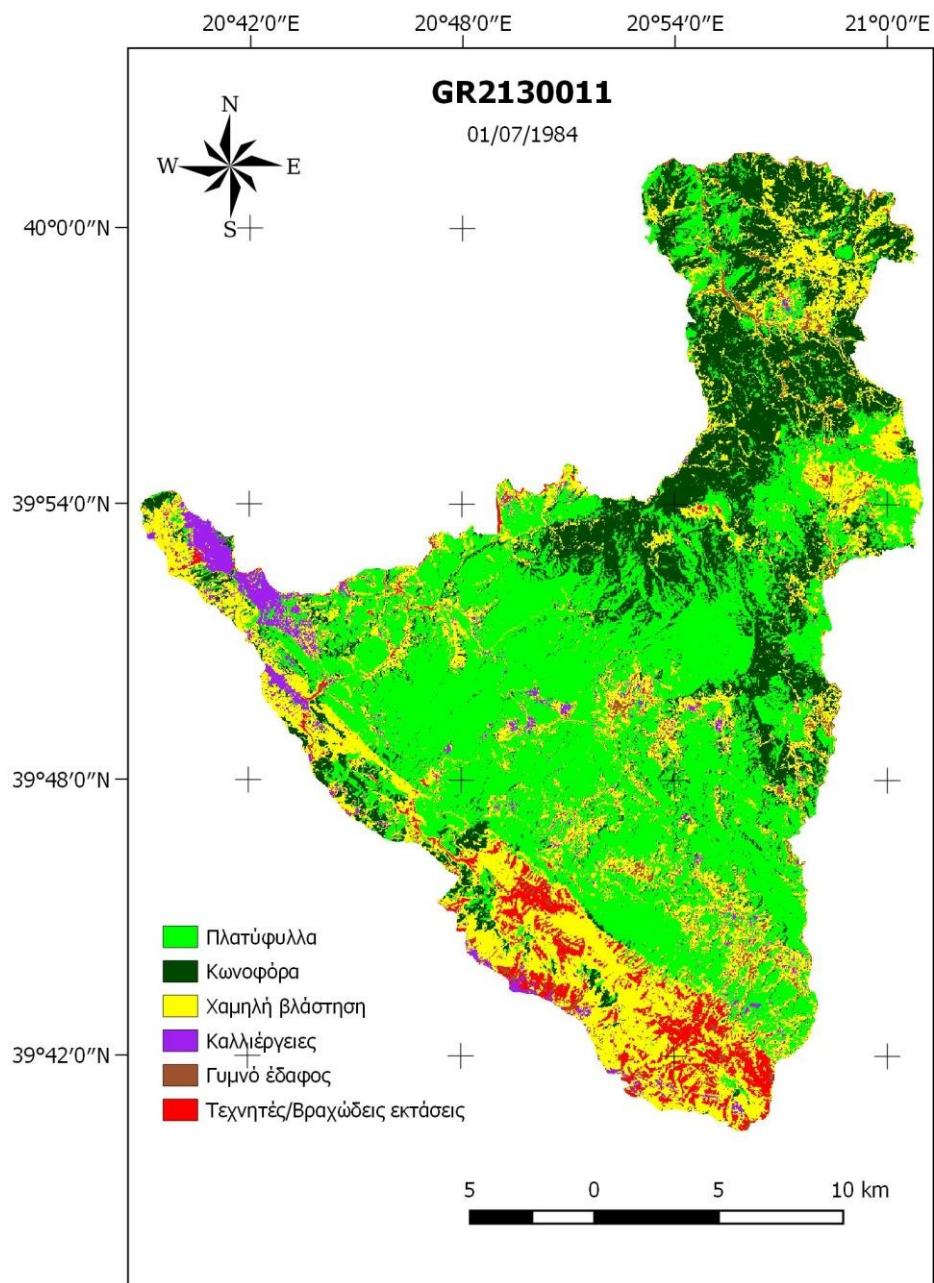
Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

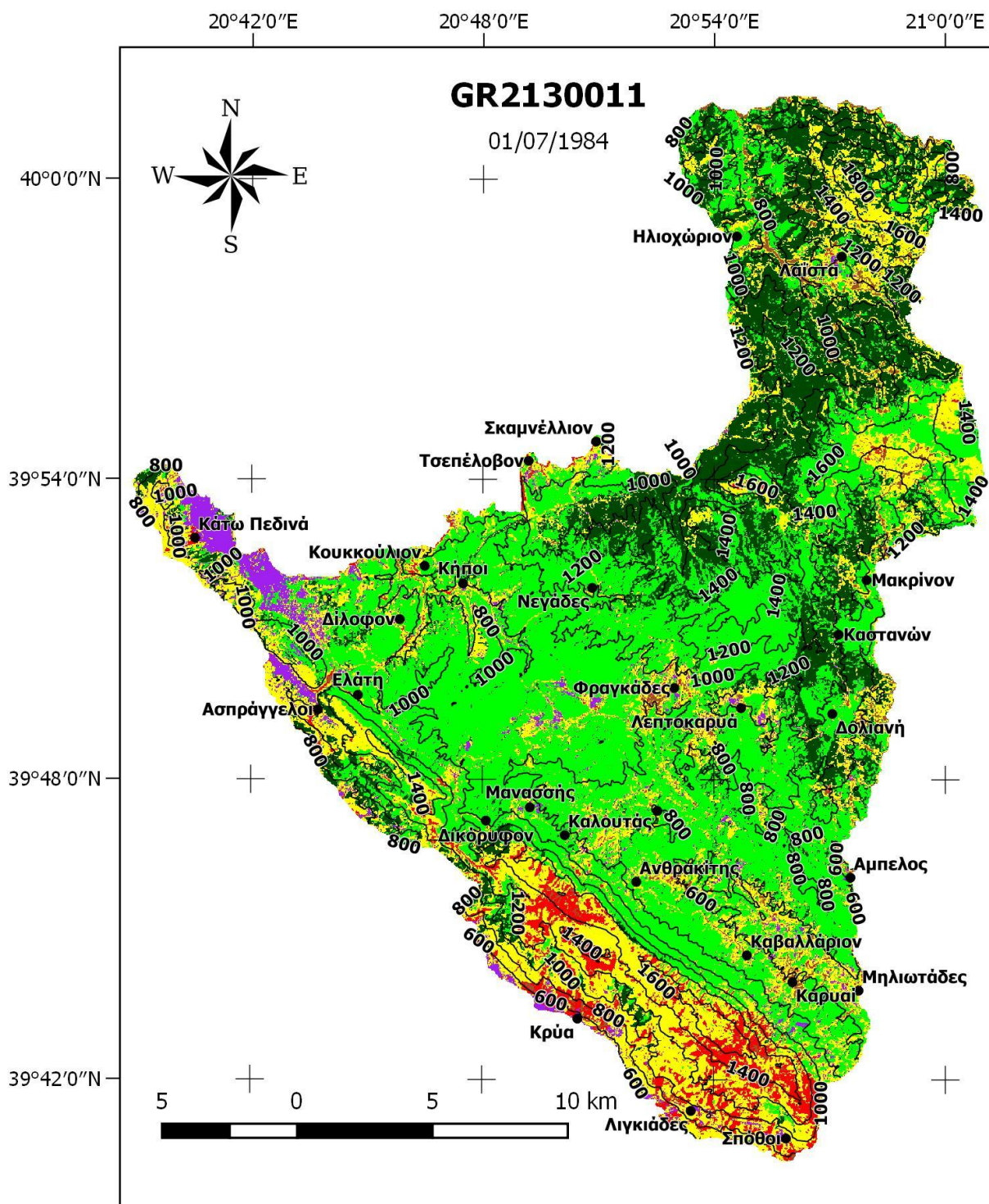
Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, στις δύο ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται, ανά περιοχή μελέτης, οι ταξινομημένες εικόνες, καθώς και τα ποσοτικά αποτελέσματα των ταξινομήσεων, της εκτίμησης της ακρίβειας των ταξινομημένων εικόνων και της ανάλυσης των διαχρονικών αλλαγών.

4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Α περιοχής μελέτης (GR2130011)

Το προϊόν της ταξινόμησης για το έτος του 1984 παρουσιάζεται στην Εικόνα 9 και στην Εικόνα 10, στην οποία απεικονίζεται μαζί με τα διανυσματικά επίπεδα των ισοψών καμπυλών (προκύπτουσες από το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους – ΨΥΜΕ ASTER GDEM V2) και των οικισμών της Α περιοχής μελέτης. Όπως φαίνεται στις δύο αυτές εικόνες, η συγκεκριμένη Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) καλύπτεται κυρίως από εκτεταμένα δάση πλατύφυλλων, καθώς και από σημαντικές εκτάσεις κωνοφόρων δέντρων και χαμηλής βλάστησης.



Εικόνα 9. Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).



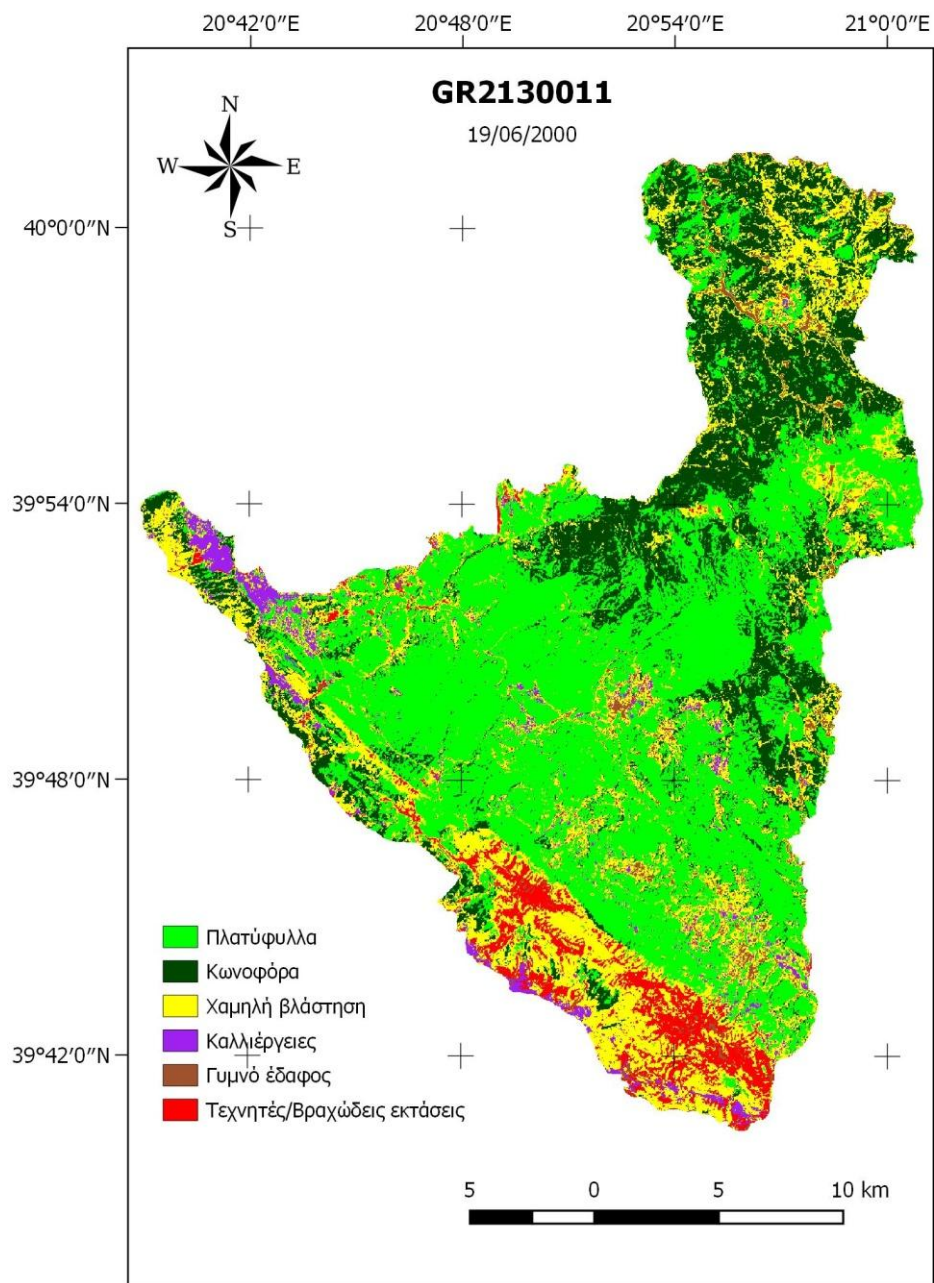
Εικόνα 10. Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011), με υπέρθεση των επιπέδων των ισούψων (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης ακρίβειας, που αφορούν αυτή την πρώτη ταξινομημένη εικόνα, συνοψίζονται στον Πίνακα 20. Γενικότερα, σε κάθε πίνακα σύγκρισης, στην παρούσα διατριβή, συμπεριλαμβάνονται τα στατιστικά μεγέθη της συνολικής ακρίβειας και του συντελεστή K. Επίσης, η κύρια διαγώνιος των πινάκων σύγκρισης (γκρίζα κελιά) αναπαριστά τον αριθμό των εικονοστοιχείων αναφοράς (και σε παρένθεση το ποσοστό επί τοις εκατό αυτών), της εκάστοτε θεματικής τάξης, που ταξινομήθηκε σωστά, ενώ τα υπόλοιπα κελιά εμφανίζουν τον αριθμό και ποσοστό των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκε εσφαλμένα σε άλλες τάξεις. Έτσι, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 20, η συνολική ακρίβεια για την ταξινομημένη εικόνα του 1984 ανέρχεται στο 91,73%. Οι κλάσεις Πλατύφυλλα και Κωνοφόρα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια ταξινόμησης, σε αντίθεση με τις Καλλιέργειες και τις Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις, των οποίων αρκετά εικονοστοιχεία αναφοράς ταξινομήθηκαν σε άλλες κλάσεις.

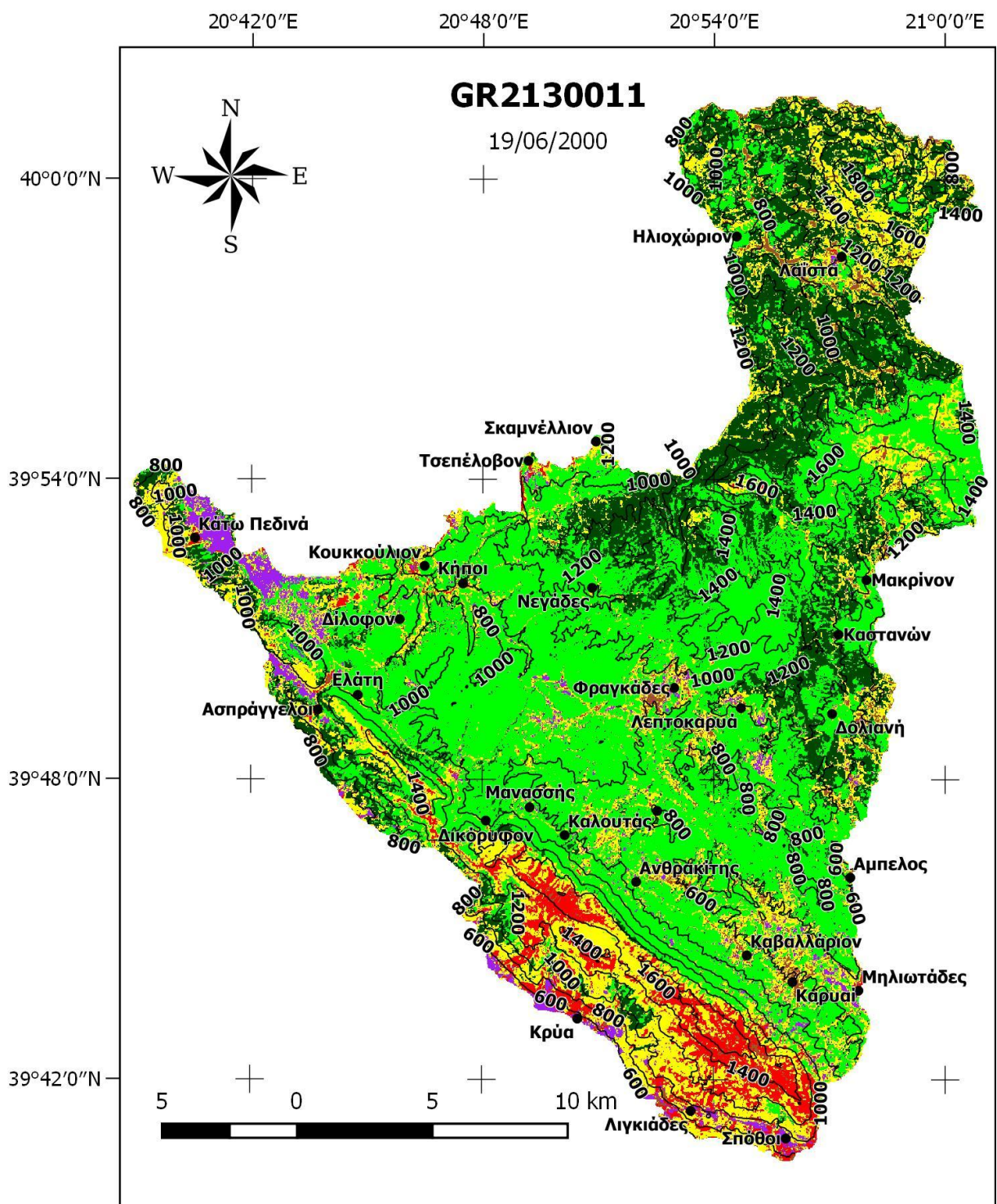
Πίνακας 20. Ο πίνακας σύγκρισης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).

Συνολική Ακρίβεια (2960/3227) 91,73%							
Συντελεστής K 0,901							
Θεματική τάξη	Αριθμός εικονοστοιχείων δεδομένων αναφοράς (δειγμάτων εκπαίδευσης)						
	Ποσοστό (%)						
	Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Καλλιέργειες	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.	Σύνολο
Πλατύφυλλα	528 (98,32)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	528 (16,36)
Κωνοφόρα	9 (1,68)	503 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	512 (15,87)
Χαμηλή βλάστηση	0 (0,00)	0 (0,00)	484 (91,84)	61 (11,57)	14 (2,59)	88 (14,84)	647 (20,05)
Καλλιέργειες	0 (0,00)	0 (0,00)	31 (5,88)	456 (86,53)	0 (0,00)	3 (0,51)	490 (15,18)
Γυμνό έδαφος	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	3 (0,57)	518 (95,93)	31 (5,23)	552 (17,11)
Τεχν./Βραχ.	0 (0,00)	0 (0,00)	12 (2,28)	7 (1,33)	8 (1,48)	471 (79,43)	498 (15,43)
Σύνολο	537 (100,00)	503 (100,00)	527 (100,00)	527 (100,00)	540 (100,00)	593 (100,00)	3227 (100,00)

Στη συνέχεια ακολουθούν οι Εικόνες 11 και 12, στις οποίες απεικονίζεται η ταξινομημένη εικόνα του 2000.



Εικόνα 11. Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).



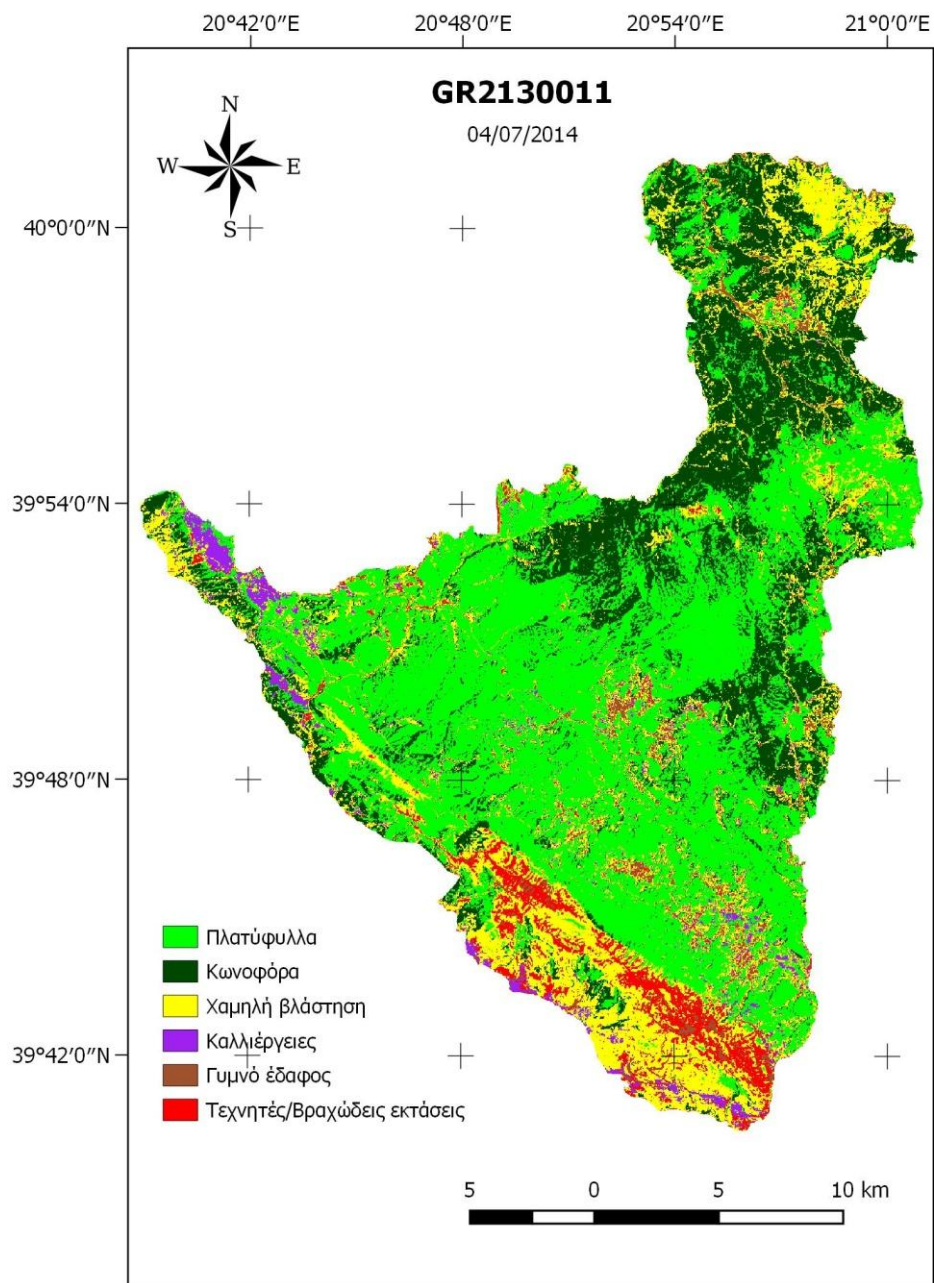
Εικόνα 12. Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών.

Η εκτίμηση της ακρίβειας της ταξινομημένης εικόνας του 2000 συνοψίζεται στον Πίνακα 21. Συγκριτικά, η δεύτερη ταξινόμηση παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια από την πρώτη, με τη συνολική της ακρίβεια να φτάνει το 92,83%. Εντούτοις, η επιμέρους ακρίβεια για τις Καλλιέργειες μειώθηκε σημαντικά, ενώ και σε αυτή την περίπτωση οι κλάσεις Πλατύφυλλα και Κωνοφόρα παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ακρίβειας.

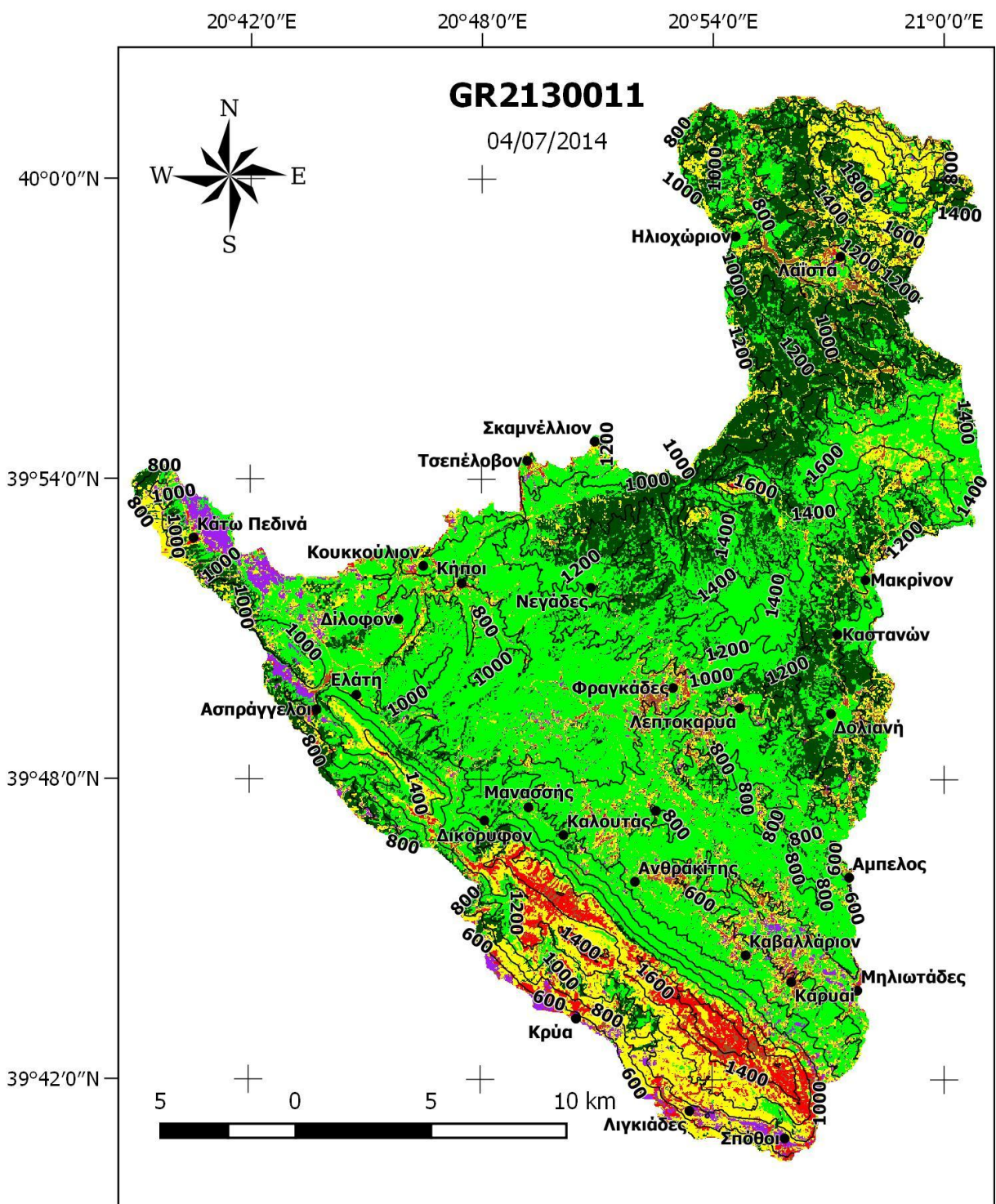
Πίνακας 21. Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).

Συνολική Ακρίβεια (3067/3304) 92,83%								
Συντελεστής K 0,914								
Θεματική τάξη	Αριθμός εικονοστοιχείων δεδομένων αναφοράς (δειγμάτων εκπαίδευσης)							
	Ποσοστό (%)							
	Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Καλλιέργειες	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.	Σύνολο	
Πλατύφυλλα	543 (100,00)	3 (0,57)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	546 (16,53)	
Κωνοφόρα	0 (0,00)	524 (99,43)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	524 (15,86)	
Χαμηλή βλάστηση	0 (0,00)	0 (0,00)	517 (95,74)	92 (17,13)	25 (4,68)	66 (10,59)	700 (21,19)	
Καλλιέργειες	0 (0,00)	0 (0,00)	5 (0,93)	433 (80,63)	0 (0,00)	0 (0,00)	438 (13,26)	
Γυμνό έδαφος	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	505 (94,57)	12 (1,93)	517 (15,65)	
Τεχν./Βραχ.	0 (0,00)	0 (0,00)	18 (3,33)	12 (2,23)	4 (0,75)	545 (87,48)	579 (17,52)	
Σύνολο	543 (100,00)	527 (100,00)	540 (100,00)	537 (100,00)	534 (100,00)	623 (100,00)	3304 (100,00)	

Στις Εικόνες 13 και 14 παρουσιάζεται η ταξινομημένη εικόνα του 2014. Όπως είναι φανερό, και στις τρεις ταξινομημένες εικόνες (τρία εξεταζόμενα έτη) οι κλάσεις Πλατύφυλλα, Κωνοφόρα και Χαμηλή βλάστηση καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της Α περιοχής μελέτης.



Εικόνα 13. Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).



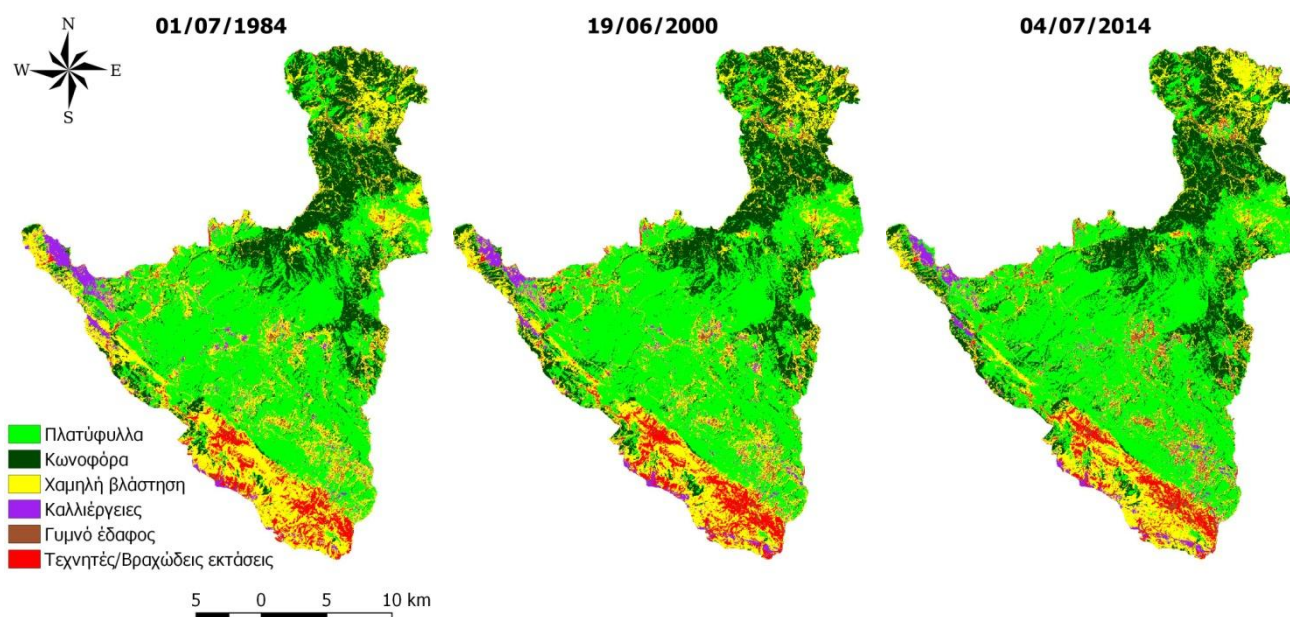
Εικόνα 14. Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011), με υπέρθεση των επιπέδων των ισοϋψών (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης ακρίβειας, που αφορούν την ταξινομημένη εικόνα του 2014, συνοψίζονται στον Πίνακα 22. Η συνολική ακρίβεια αυτής της ταξινόμησης ανέρχεται στο 93,37% και είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των τριών ταξινομήσεων της Α περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τον πίνακα σύγχυσης, η ταξινόμηση των κλάσεων Πλατύφυλλα και Κωνοφόρα δεν παρουσιάζει λάθη, ενώ, παράλληλα, όλες οι υπόλοιπες κλάσεις ταξινομούνται με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια, η οποία ξεπερνάει το 85%.

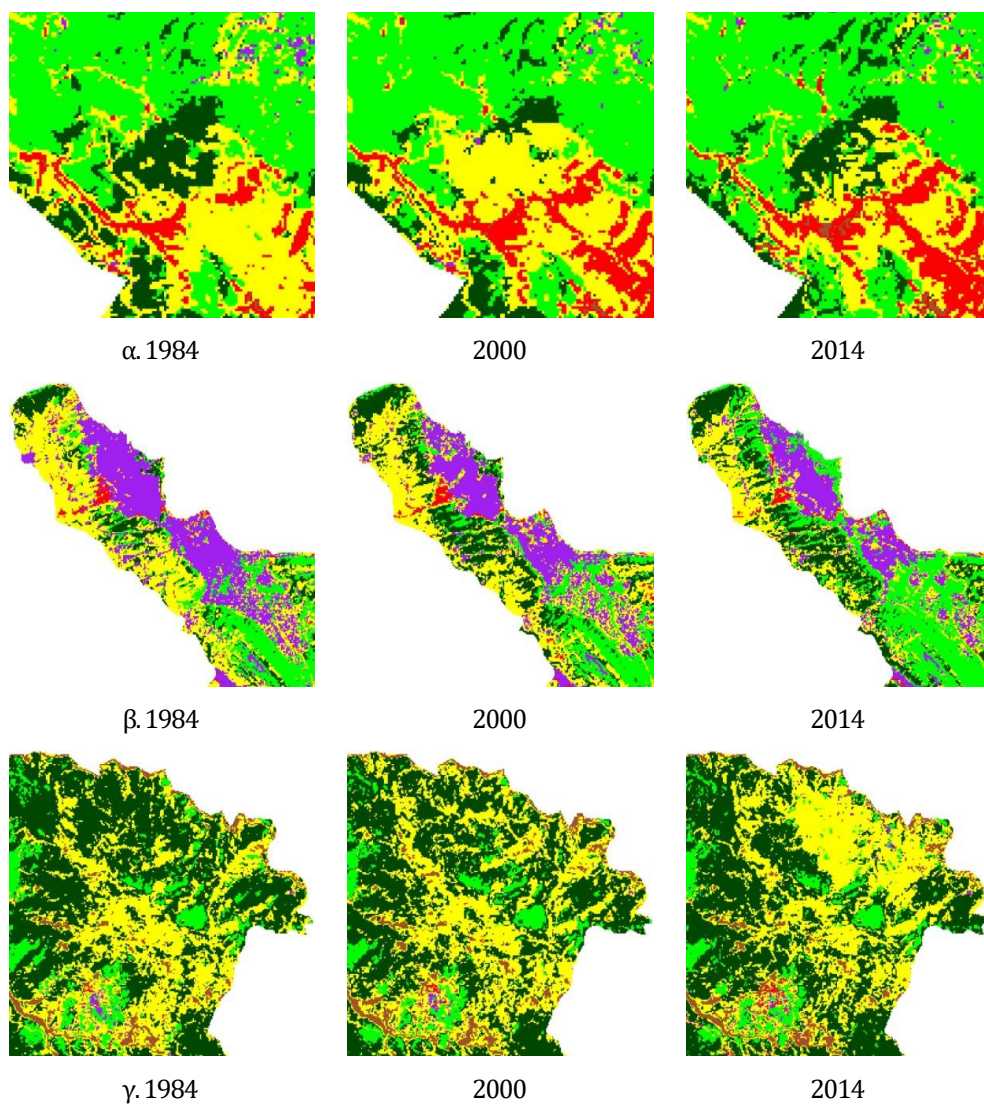
Πίνακας 22. Ο πίνακας σύγχυσης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).

Συνολική Ακρίβεια (3128/3350) 93,37%							
Συντελεστής K 0,920							
Θεματική τάξη	Αριθμός εικονοστοιχείων δεδομένων αναφοράς (δειγμάτων εκπαίδευσης)						
	Ποσοστό (%)						
	Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Καλλιέργειες	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.	Σύνολο
Πλατύφυλλα	576 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	576 (17,19)
Κωνοφόρα	0 (0,00)	564 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	564 (16,84)
Χαμηλή βλάστηση	0 (0,00)	0 (0,00)	502 (92,62)	56 (10,81)	31 (5,82)	32 (5,19)	621 (18,54)
Καλλιέργειες	0 (0,00)	0 (0,00)	28 (5,17)	448 (86,49)	2 (0,38)	1 (0,16)	479 (14,30)
Γυμνό έδαφος	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	2 (0,39)	493 (92,50)	39 (6,32)	534 (15,94)
Τεχν./Βραχ.	0 (0,00)	0 (0,00)	12 (2,21)	12 (2,32)	7 (1,31)	545 (88,33)	576 (17,19)
Σύνολο	576 (100,00)	564 (100,00)	542 (100,00)	518 (100,00)	533 (100,00)	617 (100,00)	3350 (100,00)

Στην Εικόνα 15 παρατίθενται μαζί τα προϊόντα ταξινόμησης, της Α περιοχής μελέτης, για μια πιο άμεση οπτική σύγκριση των τριών αυτών ταξινομημένων εικόνων. Επιπλέον, στην Εικόνα 16 πραγματοποιείται η παράθεση τριών επιμέρους παραδειγμάτων, όπου απεικονίζονται τμήματα της εν λόγω ΖΕΠ, τα οποία υπέστησαν σημαντικές μεταβολές στην κάλυψη γης, μεταξύ των εξεταζόμενων ετών.



Εικόνα 15. Παράθεση των τριών ταξινομημένων εικόνων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011).

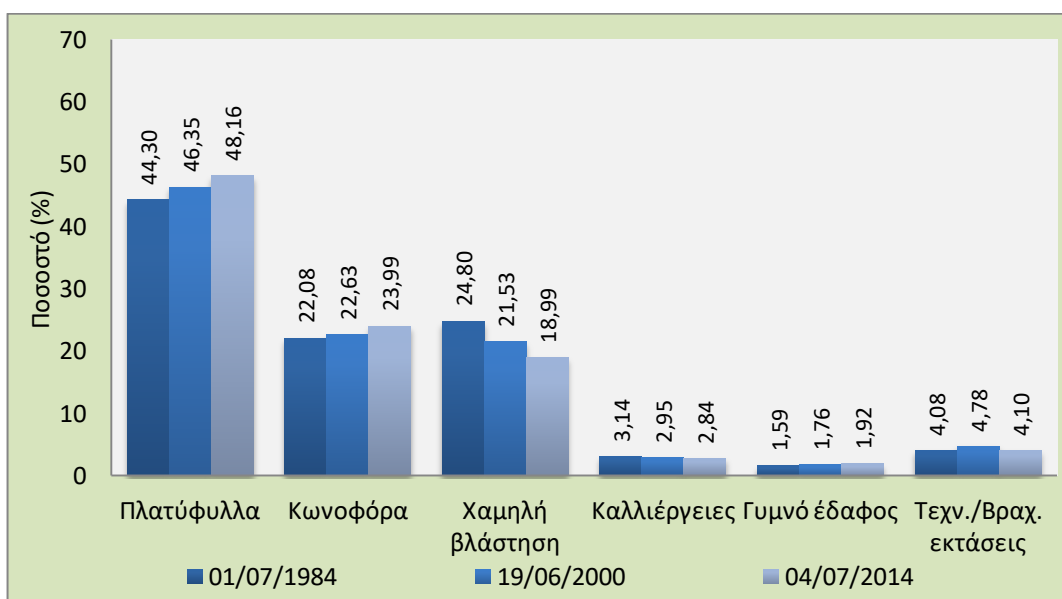


Εικόνα 16. Παραδείγματα έντονων μεταβολών στις καλύψεις γης της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) (α: νότιο, β: δυτικό και γ: βορειοανατολικό τμήμα της ΖΕΠ).

Στον Πίνακα 23 παρουσιάζονται για τα τρία έτη και για κάθε κλάση οι εκτάσεις και οι αυξομειώσεις αυτών, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης των κλάσεων φαίνονται στο γράφημα του Σχήματος 15. Όπως είναι φανερό, τα πλατύφυλλα δάση καταλαμβάνουν σχεδόν το ήμισυ της συνολικής έκτασής της ΖΕΠ, ενώ, παράλληλα, παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη αύξηση στην έκτασή τους. Σημαντική αύξηση παρατηρείται και στα κωνοφόρα δέντρα κατά το διάστημα 2000 – 2014. Από την άλλη, οι Καλλιέργειες περιορίζονται σταδιακά, ενώ εντυπωσιακή είναι η μείωση των εκτάσεων της Χαμηλής βλάστησης.

Πίνακας 23. Η επιφανειακή έκταση των κλάσεων της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) για τα τρία εξεταζόμενα έτη και οι μεταβολές που παρουσιάζουν στην έκτασή τους μεταξύ των εξεταζόμενων ετών.

Θεματική τάξη	Έκταση (km ²)			Έκταση αλλαγών (km ²)		
	1984	2000	2014	1984 – 2000	2000 – 2014	1984 – 2014
Πλατύφυλλα	236,45	247,36	257,03	10,91	9,67	20,58
Κωνοφόρα	117,86	120,78	128,02	2,92	7,24	10,16
Χαμηλή βλάστηση	132,37	114,92	101,36	-17,45	-13,56	-31,01
Καλλιέργειες	16,76	15,74	15,17	-1,02	-0,57	-1,59
Γυμνό έδαφος	8,48	9,40	10,26	0,92	0,86	1,78
Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις	21,80	25,51	21,86	3,71	-3,65	0,06
Συνολική έκταση περιοχής μελέτης	533,71					



Σχήμα 15. Συγκριτικό γράφημα με τα ποσοστά της κάθε κλάσης της Α περιοχής μελέτης (GR2130011) στα τρία εξεταζόμενα έτη.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα της ανίχνευσης των διαχρονικών αλλαγών παρουσιάζονται στους Πίνακες 24, 25 και 26. Τα κύρια διαγώνια στοιχεία (γκρίζα κελιά) των πινάκων αυτών αναπαριστούν το ποσοστό της έκτασης των θεματικών τάξεων που παρέμεινε αμετάβλητη μεταξύ των εξεταζόμενων ετών, ενώ τα υπόλοιπα κελιά εμφανίζουν τις μεταβολές που έλαβαν χώρα από τη μία κλάση στην άλλη. Από τα στοιχεία αυτά γίνεται εμφανές ότι στα εξεταζόμενα χρονικά διαστήματα συντελέστηκαν σημαντικές μεταβολές στις καλύψεις γης της εν λόγω ΖΕΠ. Πιο συγκεκριμένα, οι κλάσεις Καλλιέργειες, Χαμηλή βλάστηση και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις παρουσιάζουν έντονες μεταβολές και στα τρία χρονικά διαστήματα, με το ποσοστό των συνολικών αλλαγών για τις Καλλιέργειες να ξεπερνά το 50% μεταξύ του 1984 και του 2014.

Πίνακας 24. Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2000 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα.

Θεματική τάξη		Αρχική εικόνα (01/07/1984)					
		Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Καλλιέργειες	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.
Τελική εικόνα (19/06/2000)	Πλατύφυλλα	91,84	11,55	10,72	14,05	0,14	0,12
	Κωνοφόρα	5,08	80,79	9,91	2,49	0,18	0,01
	Χαμηλή βλάστηση	2,38	7,40	68,81	27,01	14,75	17,11
	Καλλιέργειες	0,66	0,18	3,36	53,70	0,49	2,25
	Γυμνό έδαφος	0,01	0,04	1,49	0,54	77,79	3,17
	Τεχν./Βραχ.	0,04	0,05	5,72	2,21	6,65	77,34
Σύνοψη	Αλλαγές θεμ. τάξης	8,16	19,22	31,19	46,30	22,21	22,66
	Διακύμανση	4,62	2,47	-13,18	-6,09	10,87	17,03

Πίνακας 25. Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 2000 και αυτής του 2014 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα.

Θεματική τάξη		Αρχική εικόνα (19/06/2000)					
		Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Καλλιέργειες	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.
Τελική εικόνα (04/07/2014)	Πλατύφυλλα	92,58	10,74	10,55	18,20	0,02	0,24
	Κωνοφόρα	5,39	83,76	11,44	2,07	0,16	0,10
	Χαμηλή βλάστηση	1,61	5,28	68,83	22,11	16,55	26,91
	Καλλιέργειες	0,38	0,20	4,18	53,79	1,33	2,38
	Γυμνό έδαφος	0,01	0,01	1,09	0,84	76,25	6,60
	Τεχν./Βραχ.	0,03	0,00	3,92	3,00	5,69	63,77
Σύνοψη	Αλλαγές θεμ. τάξης	7,42	16,24	31,17	46,22	23,75	36,23
	Διακύμανση	3,91	6,00	-11,81	-3,58	9,19	-14,30

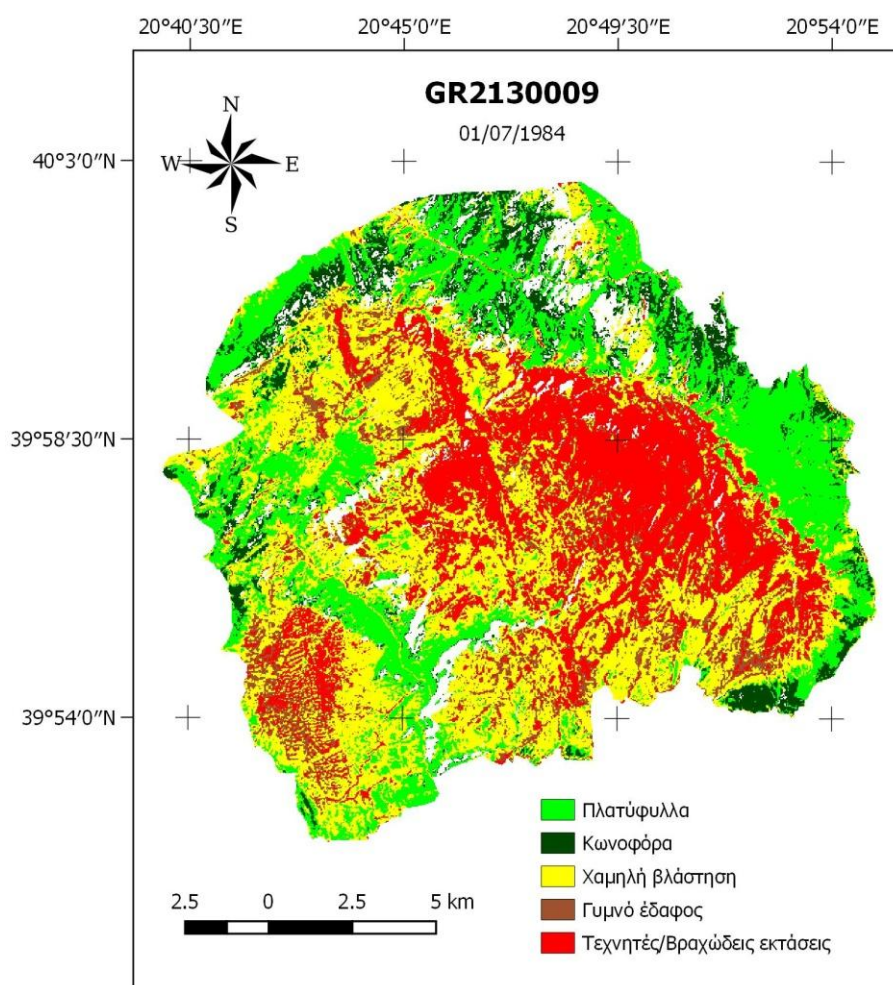
Πίνακας 26. Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2014 της Α περιοχής μελέτης (GR2130011). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα.

Θεματική τάξη		Αρχική εικόνα (01/07/1984)					
		Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Καλλιέργειες	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.
Τελική εικόνα (04/07/2014)	Πλατύφυλλα	90,19	14,83	16,38	26,34	0,53	0,76
	Κωνοφόρα	7,27	77,91	13,91	3,21	0,51	0,09
	Χαμηλή βλάστηση	1,91	7,02	57,93	20,92	18,11	31,44
	Καλλιέργειες	0,52	0,22	3,95	45,71	0,84	3,30
	Γυμνό έδαφος	0,02	0,01	1,60	0,93	73,10	7,99
	Τεχν./Βραχ.	0,09	0,02	6,24	2,89	6,91	56,42
Σύνοψη	Αλλαγές θεμ. τάξης	9,81	22,09	42,07	54,29	26,90	43,58
	Διακύμανση	8,71	8,62	-23,43	-9,46	21,06	0,30

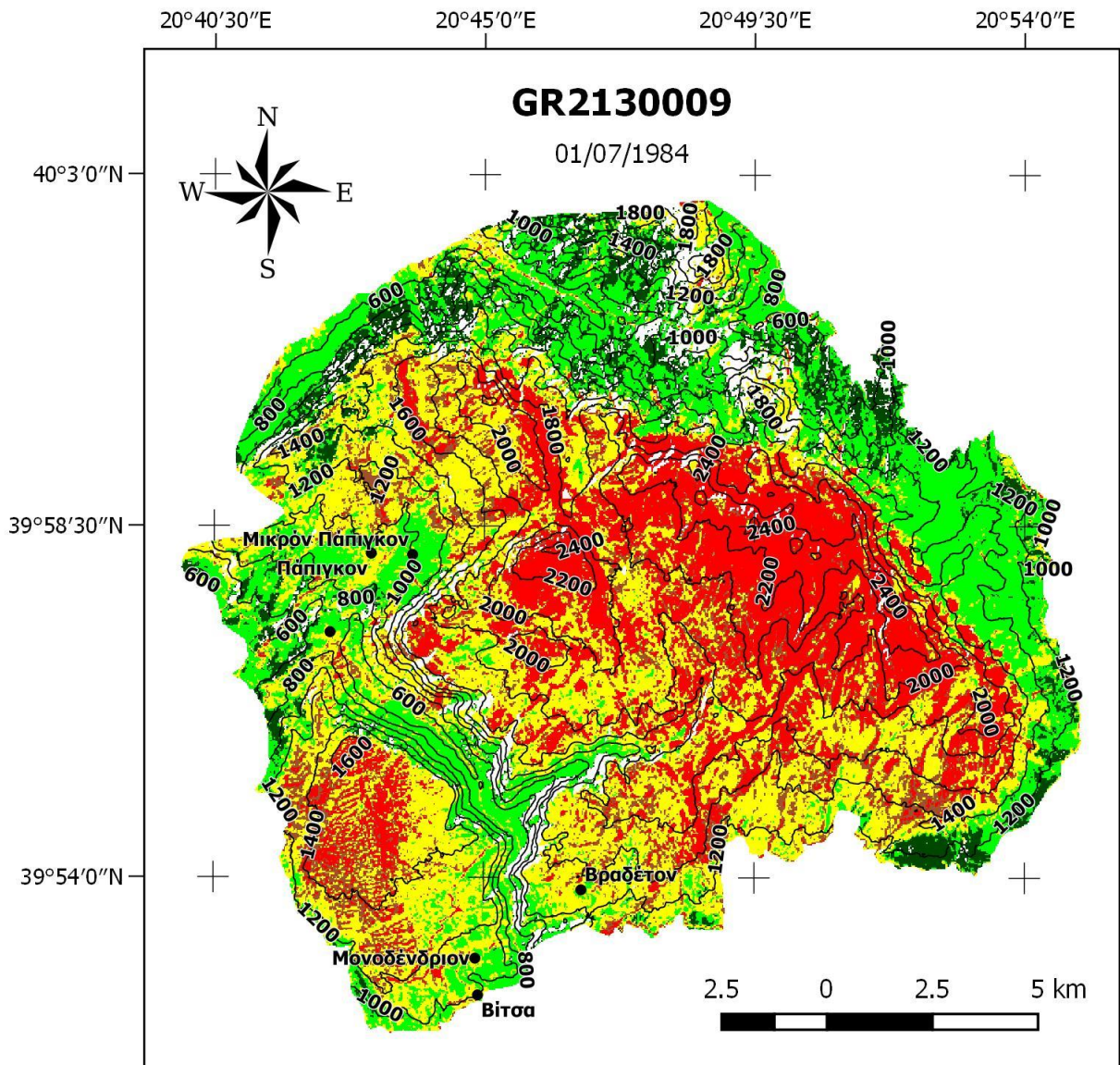
4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Β περιοχής μελέτης (GR2130009)

Η πρώτη ταξινομημένη εικόνα (σκιηνή 1984) της Β περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στις Εικόνες 17 και 18. Όπως φαίνεται στις δύο αυτές εικόνες, η συγκεκριμένη ΖΕΠ καλύπτεται κυρίως από πλατύφυλλα δάση, χαμηλή βλάστηση και βραχώδεις εκτάσεις.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι λευκές περιοχές που παρατηρούνται και στις τρεις ταξινομημένες εικόνες της Β περιοχής μελέτης και βρίσκονται εντός ορίων της εν λόγω ΖΕΠ, αποτελούν τα τμήματα που αποκόπηκαν από τις αντίστοιχες δορυφορικές σκιηνές, λόγω της παρουσίας σε αυτά εξαιρετικά έντονων σκιάσεων (βλ. υποενότητα «3.5.2 Δημιουργία φασματικών δεικτών και έγχρωμων σύνθετων», φασματικός δείκτης SDI – Shadow Detection Index).



Εικόνα 17. Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).



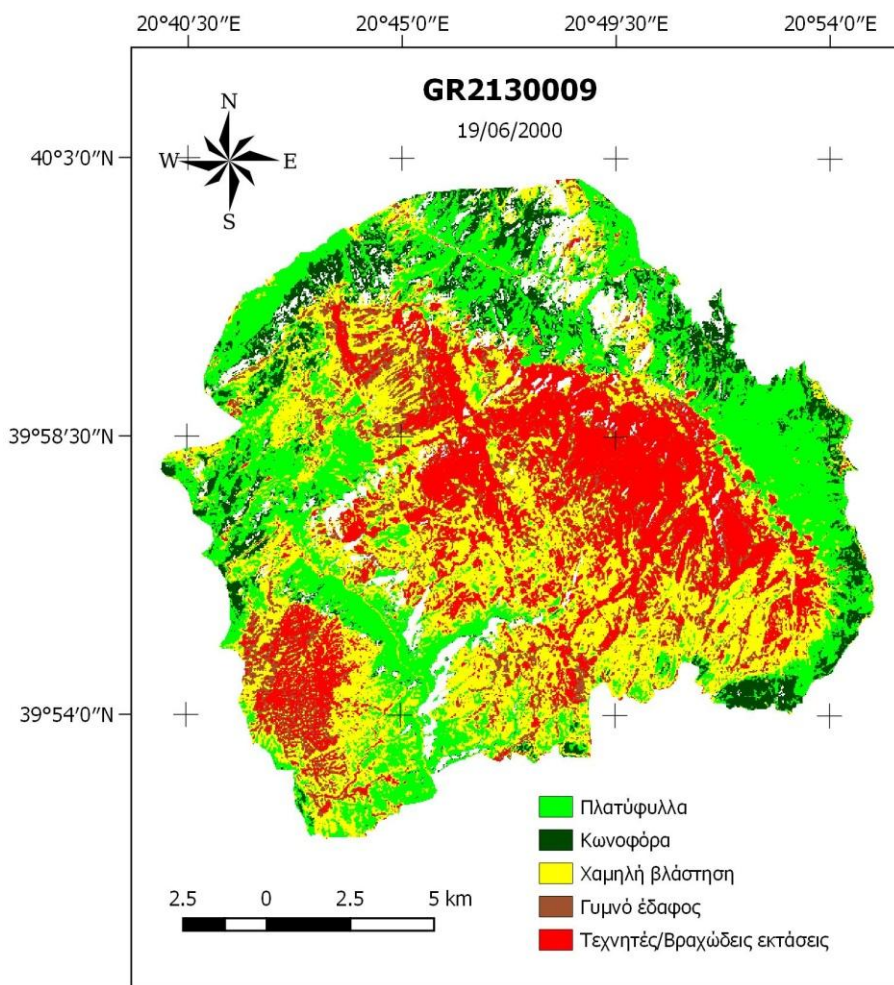
Εικόνα 18. Η ταξινομημένη εικόνα του 1984 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009), με υπέρθεση των επιπέδων των ισούψων (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης της ακρίβειας αυτής της πρώτης ταξινόμησης συνοψίζονται στον Πίνακα 27. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι, σύμφωνα με τον πίνακα σύγκυσης, η ταξινόμηση των κλάσεων Πλατύφυλλα, Κωνοφόρα και Χαμηλή βλάστηση δεν παρουσίασε σφάλματα. Εντούτοις, η ακρίβεια με την οποία ταξινομήθηκαν το Γυμνό έδαφος και οι Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις ήταν αρκετά χαμηλή, με αποτέλεσμα η συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης να φτάσει στο 91,64% και η τιμή του συντελεστή K να παρουσιάζεται χαμηλότερη του 0,9.

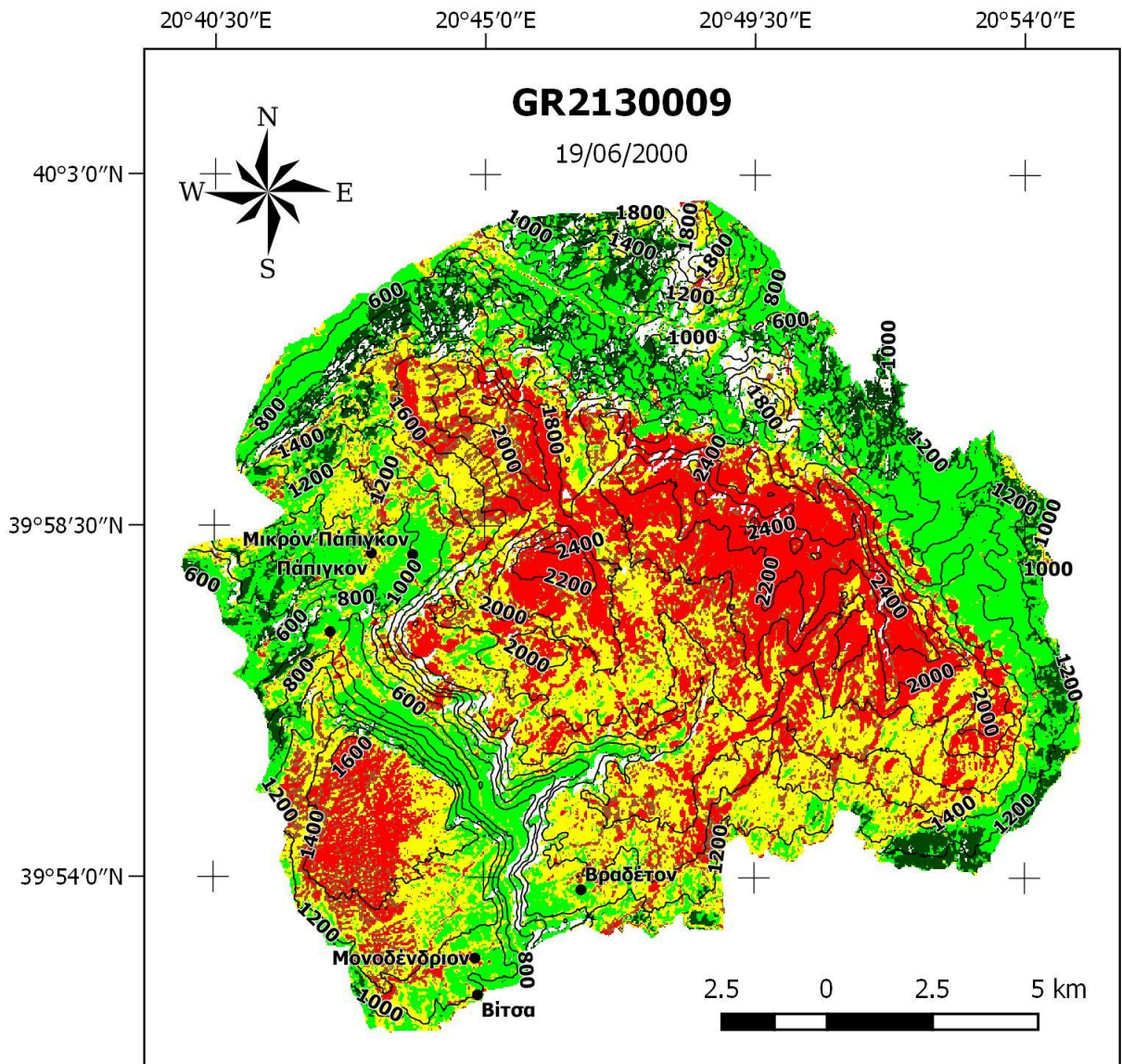
Πίνακας 27. Ο πίνακας σύγκρισης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 1984 (Landsat 5 TM) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).

Συνολική Ακρίβεια (2413/2633) 91,64%						
Συντελεστής K 0,895						
Θεματική τάξη	Αριθμός εικονοστοιχείων δεδομένων αναφοράς (δειγμάτων εκπαίδευσης)					
	Ποσοστό (%)					
	Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.	Σύνολο
Πλατύφυλλα	530 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	530 (20,13)
Κωνοφόρα	0 (0,00)	472 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	472 (17,93)
Χαμηλή βλάστηση	0 (0,00)	0 (0,00)	584 (100,00)	0 (0,00)	68 (12,59)	652 (24,76)
Γυμνό έδαφος	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	384 (75,74)	29 (5,37)	413 (15,69)
Τεχν./Βραχ.	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	123 (24,26)	443 (82,04)	566 (21,50)
Σύνολο	530 (100,00)	472 (100,00)	527 (100,00)	507 (100,00)	540 (100,00)	2633 (100,00)

Ακολουθούν οι Εικόνες 19 και 20, στις οποίες παρουσιάζεται η ταξινομημένη εικόνα του 2000.



Εικόνα 19. Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).



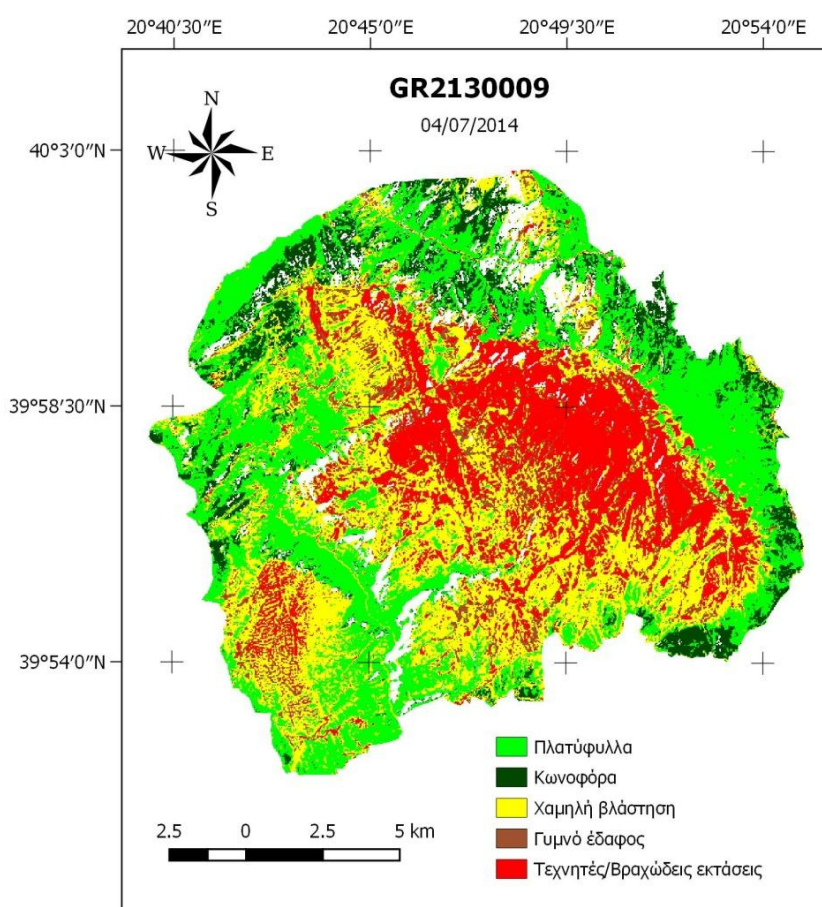
Εικόνα 20. Η ταξινομημένη εικόνα του 2000 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009), με υπέρθεση των επιπέδων των ισούψων (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών.

Η εκτίμηση της ακρίβειας της ταξινομημένης εικόνας του 2000 συνοψίζεται στον Πίνακα 28. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της δεύτερης ταξινόμησης, σε σχέση με την πρώτη, είναι η εντυπωσιακή βελτίωση της ακρίβειας ταξινόμησης των κλάσεων Γυμνό έδαφος και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις, η οποία και στις δύο περιπτώσεις ξεπέρασε το 85%. Συγχρόνως, οι επιμέρους ακρίβειες των τριών πρώτων κλάσεων παρέμειναν σε πολύ υψηλά επίπεδα, διαμορφώνοντας έτσι τη συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης στο 96,59%.

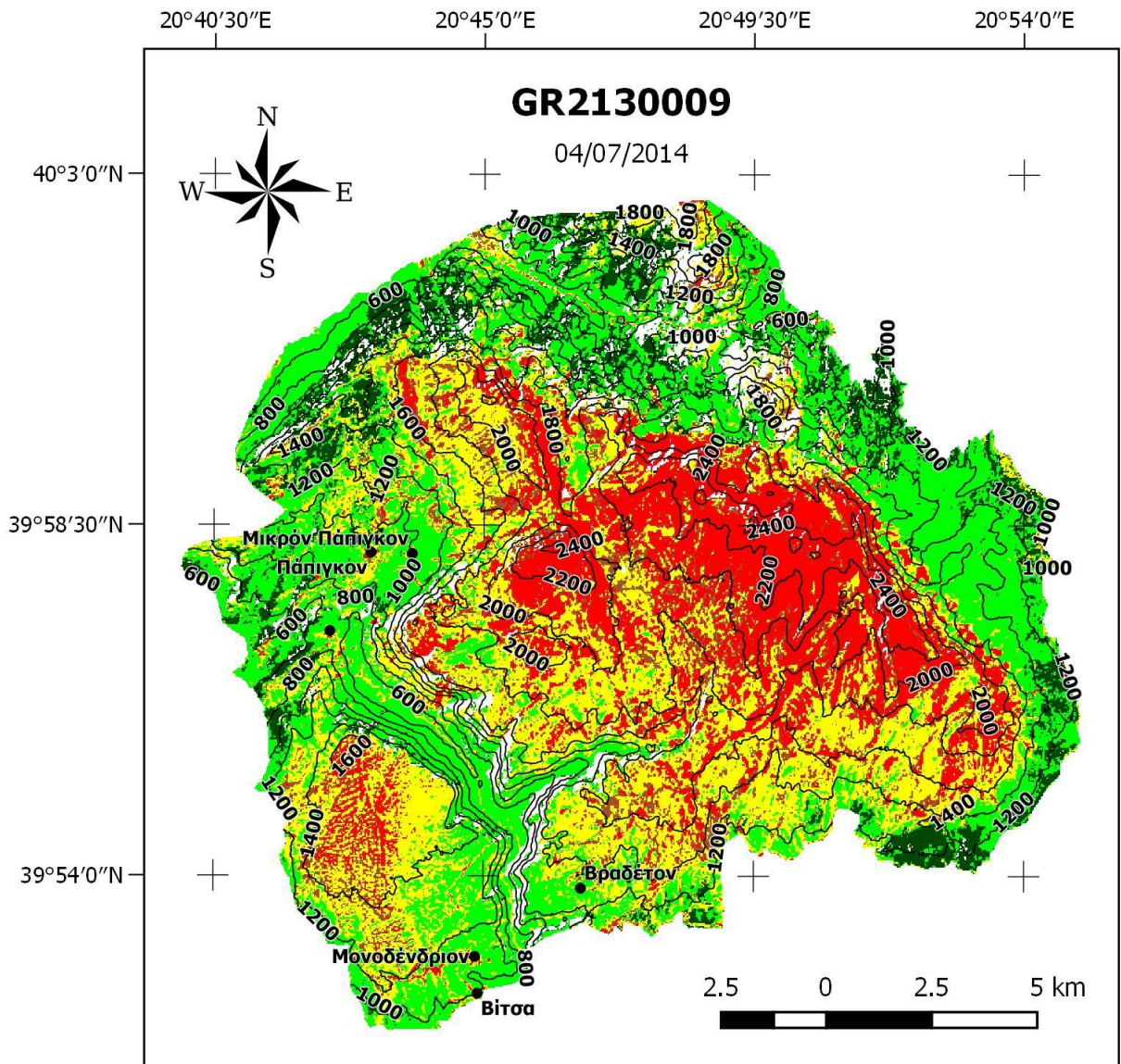
Πίνακας 28. Ο πίνακας σύγκρισης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2000 (Landsat 7 ETM+) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).

Συνολική Ακρίβεια (2551/2641) 96,59%						
Συντελεστής K 0,957						
Θεματική τάξη	Αριθμός εικονοστοιχείων δεδομένων αναφοράς (δειγμάτων εκπαίδευσης) Ποσοστό (%)					
	Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.	Σύνολο
Πλατύφυλλα	529 (100,00)	0 (0,00)	5 (0,86)	0 (0,00)	0 (0,00)	534 (20,22)
Κωνοφόρα	0 (0,00)	472 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	472 (17,87)
Χαμηλή βλάστηση	0 (0,00)	0 (0,00)	575 (99,14)	2 (0,40)	7 (1,26)	584 (22,11)
Γυμνό έδαφος	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	445 (88,47)	20 (3,59)	465 (17,61)
Τεχν./Βραχ.	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	56 (11,13)	530 (95,15)	586 (22,19)
Σύνολο	529 (100,00)	472 (100,00)	580 (100,00)	503 (100,00)	557 (100,00)	2641 (100,00)

Στις Εικόνες 21 και 22 παρουσιάζεται η ταξινομημένη εικόνα του 2014. Γενικότερα, όπως είναι φανερό, οι κλάσεις Πλατύφυλλα, Χαμηλή βλάστηση και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της Β περιοχής μελέτης και στα τρία εξεταζόμενα έτη.



Εικόνα 21. Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).



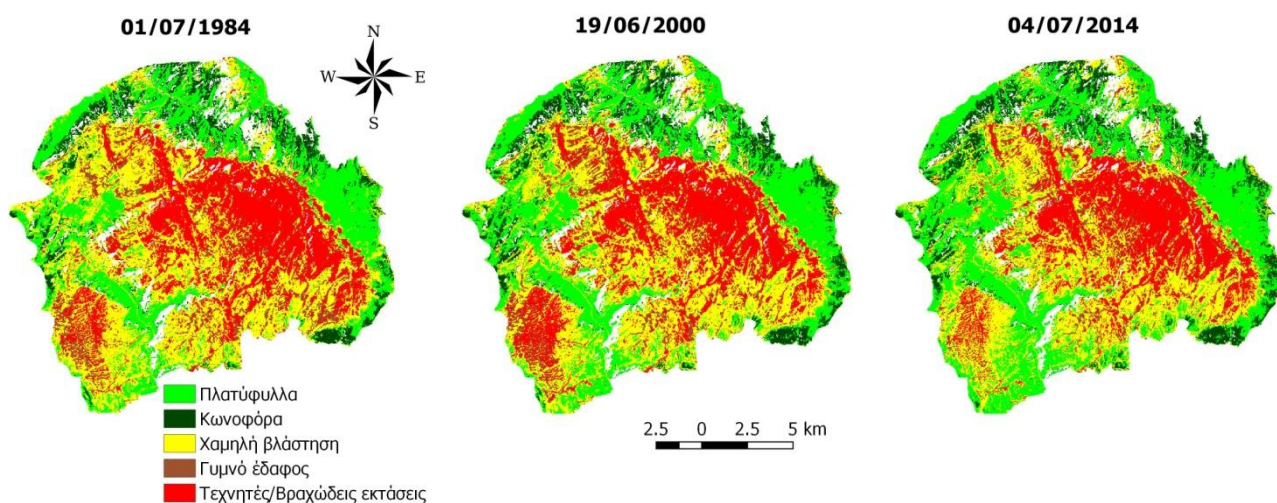
Εικόνα 22. Η ταξινομημένη εικόνα του 2014 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009), με υπέρθεση των επιπέδων των ισούψων (ισοδιάστασης 200 m) και των οικισμών.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης ακρίβειας, που αφορούν την ταξινομημένη εικόνα του 2014, συνοψίζονται στον Πίνακα 29. Στην τρίτη αυτή ταξινόμηση οι επιμέρους ακρίβειες των θεματικών τάξεων παραμένουν στα ίδια σχεδόν επίπεδα με αυτά της δεύτερης, ενώ η συνολική ακρίβεια διαμορφώνεται εδώ στο 96,33%.

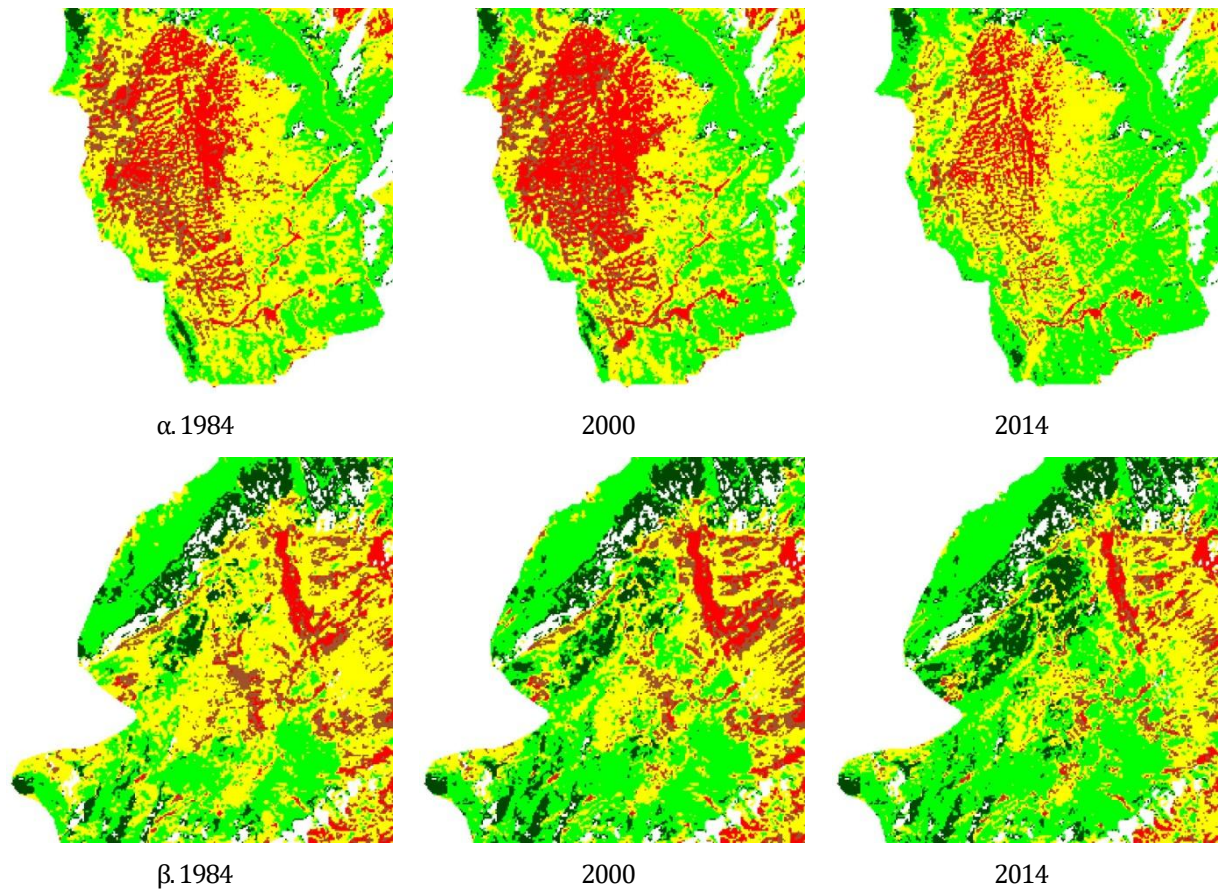
Πίνακας 29. Ο πίνακας σύγκρισης, η συνολική ακρίβεια και ο συντελεστής K για την ταξινομημένη εικόνα του 2014 (Landsat 8 OLI) της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).

Συνολική Ακρίβεια (2544/2641) 96,33%						
Συντελεστής K 0,954						
Θεματική τάξη	Αριθμός εικονοστοιχείων δεδομένων αναφοράς (δειγμάτων εκπαίδευσης) Ποσοστό (%)					
	Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.	Σύνολο
Πλατύφυλλα	545 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	545 (20,64)
Κωνοφόρα	0 (0,00)	477 (100,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	477 (18,06)
Χαμηλή βλάστηση	0 (0,00)	0 (0,00)	573 (100,00)	1 (0,20)	7 (1,27)	581 (22,00)
Γυμνό έδαφος	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	438 (88,66)	34 (6,16)	472 (17,87)
Τεχν./Βραχ.	0 (0,00)	0 (0,00)	0 (0,00)	55 (11,13)	511 (92,57)	566 (21,43)
Σύνολο	545 (100,00)	477 (100,00)	573 (100,00)	494 (100,00)	552 (100,00)	2641 (100,00)

Στην Εικόνα 23 παρατίθενται μαζί οι ταξινομημένες εικόνες, της Β περιοχής μελέτης, για μια πιο άμεση οπτική σύγκριση των μεταξύ τους διαφορών. Παράλληλα, στην Εικόνα 24 παρουσιάζονται παραδείγματα έντονων χωρικών αλλαγών, οι οποίες έλαβαν χώρα σε δύο διαφορετικές υποπεριοχές της εν λόγω ΖΕΠ.



Εικόνα 23. Παράθεση των τριών ταξινομημένων εικόνων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009).

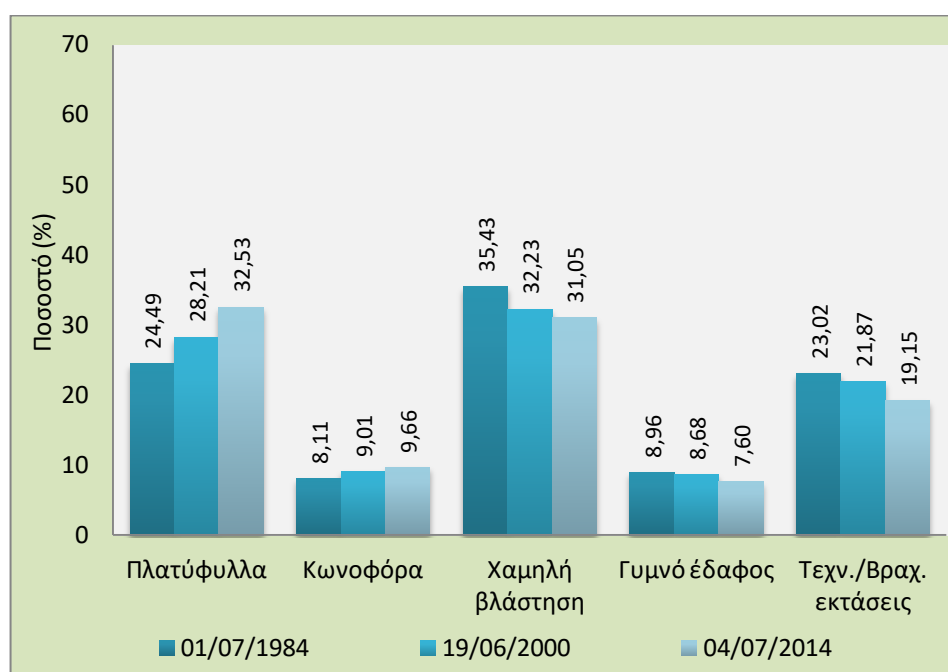


Εικόνα 24. Παραδείγματα έντονων μεταβολών στις καλύψεις γης της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) (α: νοτιοδυτικό και β: βορειοδυτικό τμήμα της ΖΕΠ).

Στον Πίνακα 30 παρουσιάζονται για τα τρία έτη και για κάθε θεματική τάξη οι εκτάσεις και οι αυξομειώσεις αυτών, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης των κλάσεων απεικονίζονται στο γράφημα του Σχήματος 16. Όπως ήταν φανερό και από τις ταξινομημένες εικόνες, οι κλάσεις Πλατύφυλλα, Χαμηλή βλάστηση και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις καλύπτουν διαχρονικά τη συντριπτική πλειοψηφία των εκτάσεων της ΖΕΠ. Η θεματική τάξη με τη μεγαλύτερη επιφανειακή έκταση το 1984 ήταν η Χαμηλή βλάστηση. Ωστόσο, το 2014 τα Πλατύφυλλα είναι αυτά που καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση, καθώς στο διάστημα αυτό των τριάντα ετών παρουσίασαν εξαιρετικά μεγάλη αύξηση, ενώ, παράλληλα, η Χαμηλή βλάστηση περιορίστηκε σημαντικά. Αρκετά μεγάλη μείωση υπέστη και η κλάση Γυμνό έδαφος, ενώ οι εκτάσεις των Κωνοφόρων παρουσίασαν μικρή αλλά σταθερή αύξηση και στα δύο επιμέρους χρονικά διαστήματα.

Πίνακας 30. Η επιφανειακή έκταση των κλάσεων της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) για τα τρία εξεταζόμενα έτη και οι μεταβολές που παρουσιάζουν στην έκτασή τους μεταξύ των εξεταζόμενων ετών.

Θεματική τάξη	Έκταση (km ²)			Έκταση αλλαγών (km ²)		
	1984	2000	2014	1984-2000	2000-2014	1984-2014
Πλατύφυλλα	63,07	72,64	83,78	9,57	11,14	20,71
Κωνοφόρα	20,88	23,21	24,88	2,33	1,67	4,00
Χαμηλή βλάστηση	91,23	83,01	79,97	-8,22	-3,04	-11,26
Γυμνό έδαφος	23,07	22,34	19,58	-0,73	-2,76	-3,49
Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις	59,28	56,33	49,31	-2,95	-7,02	-9,97
Συνολική έκταση περιοχής μελέτης	257,53					



Σχήμα 16. Συγκριτικό γράφημα με τα ποσοστά της κάθε κλάσης της Β περιοχής μελέτης (GR2130009) στα τρία εξεταζόμενα έτη.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα της ανίχνευσης των διαχρονικών αλλαγών παρουσιάζονται στους Πίνακες 31, 32 και 33. Τα κύρια διαγώνια στοιχεία (γκρίζα κελιά) των πινάκων αυτών αναπαριστούν το ποσοστό της έκτασης των θεματικών τάξεων που παρέμεινε αμετάβλητη μεταξύ των εξεταζόμενων ετών, ενώ τα υπόλοιπα κελιά εμφανίζουν τις μεταβολές που έλαβαν χώρα από τη μία κλάση στην άλλη. Από τα στοιχεία αυτά γίνονται άμεσα αντιληπτές οι μεγάλες μεταβολές που υπέστησαν οι κλάσεις Γυμνό έδαφος και Χαμηλή βλάστηση. Ειδικότερα, το Γυμνό έδαφος παρουσιάζει εξαιρετικά έντονες μεταβολές και στα τρία χρονικά διαστήματα, με το

ποσοστό των συνολικών αλλαγών του να ξεπερνά το 60% μεταξύ του 1984 και του 2014. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η συντριπτική πλειοψηφία των μεταβολών αυτών αφορά αλλαγές από Γυμνό έδαφος σε Χαμηλή βλάστηση και παράλληλα, από Χαμηλή βλάστηση σε Πλατύφυλλα.

Πίνακας 31. Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2000 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα.

Θεματική τάξη		Αρχική εικόνα (01/07/1984)				
		Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.
Τελική εικόνα (19/06/2000)	Πλατύφυλλα	89,15	14,12	14,73	0,06	0,03
	Κωνοφόρα	7,56	84,13	0,96	0,00	0,01
	Χαμηλή βλάστηση	3,22	1,69	75,97	32,95	6,28
	Γυμνό έδαφος	0,04	0,04	6,78	50,52	7,55
	Τεχν./Βραχ.	0,04	0,02	1,57	16,48	86,14
Σύνοψη	Αλλαγές θεμ. τάξης	10,85	15,87	24,03	49,49	13,86
	Διακύμανση	15,18	11,17	-9,01	-3,16	-4,98

Πίνακας 32. Ο πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 2000 και αυτής του 2014 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα.

Θεματική τάξη		Αρχική εικόνα (19/06/2000)				
		Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.
Τελική εικόνα (04/07/2014)	Πλατύφυλλα	92,50	10,24	17,09	0,12	0,01
	Κωνοφόρα	4,98	88,80	0,79	0,00	0,00
	Χαμηλή βλάστηση	2,52	0,95	76,43	46,32	7,33
	Γυμνό έδαφος	0,01	0,01	4,40	44,30	10,71
	Τεχν./Βραχ.	0,01	0,01	1,29	9,26	81,96
Σύνοψη	Αλλαγές θεμ. τάξης	7,51	11,20	23,57	55,70	18,04
	Διακύμανση	15,34	7,22	-3,67	-12,35	-12,45

Πίνακας 33.0 Πίνακας εντοπισμού μεταβολών (change detection matrix) μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας του 1984 και αυτής του 2014 της Β περιοχής μελέτης (GR2130009). Οι τιμές εκφράζουν ποσοστά (%), ενώ το σύνολο των κλάσεων σε κάθε στήλη είναι ίσο με 100%. Το πεδίο Διακύμανση εκφράζει το ποσοστό αύξησης ή μείωσης μίας κλάσης στην τελική εικόνα.

Θεματική τάξη		Αρχική εικόνα (01/07/1984)				
		Πλατύφυλλα	Κωνοφόρα	Χαμηλή βλάστηση	Γυμνό έδαφος	Τεχν./Βραχ.
Τελική εικόνα (04/07/2014)	Πλατύφυλλα	88,69	15,76	26,66	0,89	0,05
	Κωνοφόρα	8,59	82,22	2,51	0,06	0,00
	Χαμηλή βλάστηση	2,69	2,00	66,10	51,92	9,40
	Γυμνό έδαφος	0,03	0,01	4,03	39,95	11,26
	Τεχν./Βραχ.	0,00	0,00	0,71	7,20	79,29
Σύνοψη	Αλλαγές θεμ. τάξης	11,31	17,78	33,90	60,06	20,71
	Διακύμανση	32,85	19,19	-12,35	-15,12	-16,82

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση – Συμπεράσματα – Εισηγήσεις

Στις δύο πρώτες ενότητες του κεφαλαίου αυτού πραγματοποιείται, ανά περιοχή μελέτης, η ανασκόπηση των ευρημάτων, της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, η σύνδεσή τους με αντίστοιχα ευρήματα άλλων ερευνών και γενικότερα η τοποθέτηση τους μέσα στην ευρύτερη βιβλιογραφία. Τέλος, στην τρίτη ενότητα συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της διατριβής, καθώς και παρατίθενται εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα και για την ενσωμάτωση των ευρημάτων στις διαχειριστικές πολιτικές.

5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Α περιοχής μελέτης (GR2130011)

Τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων έδειξαν ότι οι περισσότερες εκτάσεις της Ζώνης Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) «Κεντρικό Ζαγόρι και ανατολικό τμήμα όρους Μιτσικέλι, GR2130011» (Α περιοχή μελέτης) καλύπτονται κυρίως από πλατύφυλλα και κωνοφόρα δάση, καθώς και από περιοχές με χαμηλή βλάστηση. Συγκεκριμένα, έως το υψόμετρο των 1.200 m κυριαρχούν τα δάση πλατύφυλλων, ενώ τα εδάφη με μεγαλύτερο υψόμετρο καταλαμβάνονται κυρίως από κωνοφόρα δέντρα, με εξαίρεση το νότιο-νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής (όρος Μιτσικέλι: 1.810 m), το οποίο καλύπτεται από χαμηλή βλάστηση και βραχώδεις εκτάσεις (βλ. Εικόνες 10, 12 και 14). Σε ότι αφορά τα επιμέρους ποσοστά της συνολικής δασοκάλυψης (Πλατύφυλλα και Κωνοφόρα, 1984: 66,38%, 2000: 68,98%, 2014: 72,15%), της χαμηλής βλάστησης (1984: 24,80%, 2000: 21,53%, 2014: 18,99%) και των καλλιεργείων (1984: 3,14%, 2000: 2,95%, 2014: 2,84%), αυτά σε γενικές γραμμές συμφωνούν με τα στοιχεία που παρατίθενται στο Τυποποιημένο Έντυπο Δεδομένων (Standard Data Form) της εν λόγω ΖΕΠ (ΕΕΑ, 2015a), βάσει των οποίων (έπειτα από επεξεργασία των στοιχείων, βλ. Πίνακα 4) οι δασικές εκτάσεις καλύπτουν το 66,57%, η χαμηλή βλάστηση το 22,70% και οι καλλιέργειες δενδρωδών φυτών και σιτηρών το 3,23% της περιοχής (το έτος αναφοράς δεν βρέθηκε).

Παράλληλα, η ακρίβεια των ταξινομήσεων κυμάνθηκε σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα, με τη συνολική ακρίβεια να ξεπερνά το 90% και για τρία εξεταζόμενα έτη (βλ. Πίνακες 20, 21 και 22). Από την άλλη, οι επιμέρους ακρίβειες της ταξινόμησης ορισμένων θεματικών τάξεων παρουσιάστηκαν σχετικά χαμηλές, με αυτή των Τεχνητών/Βραχωδών εκτάσεων να περιορίζεται στο 79,43% για το 1984 (Landsat 5 TM) και των Καλλιεργειών στο 80,63% για το 2000 (Landsat 7 ETM+) και στο 86,49% για το 2014 (Landsat 8 OLI). Ωστόσο, γενικά, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι άκρως αποδεκτά, καθώς σύμφωνα με τους Thomlinson, Bolstad και Cohen (1999, p.25) η συνολική ακρίβεια θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 85% και η επιμέρους 70% ανά κλάση, έτσι ώστε το προϊόν της ταξινόμησης να θεωρείται αρκετά αξιόπιστο και αξιοποιήσιμο.

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα, που παρατηρούνται, στις ταξινομήσεις των Καλλιεργειών και των Τεχνητών/Βραχωδών εκτάσεων αφορούν κυρίως στην ταξινόμηση εικονοστοιχείων τους ως Χαμηλή βλάστηση (βλ. Πίνακες 20, 21 και 22). Αυτό ήταν αναμενόμενο, ως ένα βαθμό, καθώς οι τρεις προαναφερθείσες κλάσεις ήταν αυτές που παρουσίασαν το χαμηλότερο διαχωρισμό μεταξύ τους, στις δοκιμές «διαχωριστικότητας» (βλ. υποενότητα «3.5.3 Φασματική ταξινόμηση εικόνων με δέντρα αποφάσεων»), ενώ, επίσης, οι φασματικές τους αποκρίσεις, όπως φαίνονται στα Σχήματα 7, 8, και 9 (φασματικές υπογραφές των κλάσεων), παρουσιάζονται αρκετά όμοιες.

Έπειτα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι η συμπερίληψη των κριτηρίων υψομέτρου και κλίσης βελτίωσε αισθητά τη διαχωριστικότητα μεταξύ των καλλιεργήσιμων εκτάσεων και των τάξεων Χαμηλή βλάστηση και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις. Άλλωστε, σε αρκετές έρευνες (π.χ. Liu, et al., 2008; Sesnie, et al., 2008; Gartzia, et al., 2013; Keshtkar, et al., 2013), στις οποίες εφαρμόζονται μέθοδοι δέντρων αποφάσεων (Decision Trees – DT), αναφέρεται ότι οι ταξινομήσεις παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση, όταν επιπροσθέτως της φασματικής πληροφορίας χρησιμοποιούνται και διάφορα δεδομένα αναγλύφου. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της έρευνας των Liu, et al. (2008), όπου μετά την προσθήκη υψομετρικών και τοπογραφικών μεταβλητών, στη διαμόρφωση των κριτηρίων των DT, η συνολική ακρίβεια των φασματικών ταξινομήσεων διαμορφώθηκε από το 69% ($\pm 3,3\%$) στο 93% ($\pm 3,3\%$).

Παράλληλα, σε ότι αφορά τις διαχρονικές αλλαγές μεταξύ των κλάσεων (αλλαγές «από – σε»), οι προαναφερθείσες θεματικές τάξεις (Καλλιέργειες, Χαμηλή βλάστηση και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις) είναι αυτές που σταθερά, για κάθε εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες μεταβολές (βλ. Πίνακες 24, 25 και 26). Πιο συγκεκριμένα, οι κύριες αλλαγές των θεματικών αυτών τάξεων έχουν ως εξής: οι τεχνητές/βραχώδεις εκτάσεις μεταβάλλονται σε χαμηλή βλάστηση, οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις μετατρέπονται σε περιοχές με χαμηλή βλάστηση και σε πλατύφυλλα δάση και η χαμηλή βλάστηση μεταβάλλεται σε πλατύφυλλα και κωνοφόρα δέντρα. Επίσης, κατά το διάστημα 1984 – 2014, η έκταση της χαμηλής βλάστησης παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση, ενώ σημαντικός ήταν και ο περιορισμός των καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Από την άλλη, οι εκτάσεις των πλατύφυλλων και των κωνοφόρων δασών παρουσίασαν τη σημαντικότερη επιφανειακή αύξηση (βλ. Πίνακα 23), ενώ η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση ήταν αυτή του γυμνού εδάφους.

Χαρακτηριστικά, στο παράδειγμα β, της Εικόνας 16, παρατηρείται μία σταδιακή μεταβολή αρκετών εκτάσεων χαμηλής βλάστησης και καλλιεργειών σε πλατύφυλλα και κωνοφόρα δάση. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στον οικισμό των Κάτω Πεδινών και οι συγκεκριμένες καλλιέργειες αποτελούν τη σημαντικότερη (από άποψη έκτασης) γεωργική έκταση της εν λόγω ΖΕΠ. Η παρατηρούμενη μείωση των γεωργικών εκτάσεων μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως η πιθανή αλλαγή των καλλιεργειών, η διάνοιξη δρόμων κατά την εξεταζόμενη περίοδο (κόκκινες γραμμές – εικονοστοιχεία μέσα στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις), η εσφαλμένη ταξινόμηση εικονοστοιχείων ως Πλατύφυλλα (παρόμοιες φασματικές αποκρίσεις με Καλλιέργειες) κ.ά. Παρ' όλα αυτά, ως πιθανότερο αίτιο θα πρέπει να λογίζεται η σταδιακή εγκατάλειψη των ορεινών και ημιορεινών γεωργικών εκμεταλλεύσεων, που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή (Στάρα & Τσιακίρης, 2009α, p.22). Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι, βάσει στοιχείων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ, όπως παρατίθενται στο Περιφέρεια Ηπείρου, 2011, pp.30 & 37), οι συνολικές καλλιεργήσιμες εκτάσεις (συμπεριλαμβανομένου των εκτάσεων αγρανάπαυσης) της Περιφερειακής Ενότητας (ΠΕ) Ιωαννίνων περιορίστηκαν από τα 457,00 km² το 1981 στα 320,23 km² το 2004.

Σε ότι αφορά στο παράδειγμα α της Εικόνας 16, εκεί παρουσιάζεται ο χαρακτηριστικός περιορισμός (1984 – 2000) και η επανεμφάνιση (2000 – 2014) ενός τμήματος κωνοφόρου δάσους, ενώ στην ίδια περιοχή παρατηρείται και η σταδιακή μεταβολή της χαμηλής βλάστησης σε τεχνητές/βραχώδεις εκτάσεις. Στην περίπτωση του κωνοφόρου δάσους οι μεταβολές οφείλονται σε δασική πυρκαγιά που πιθανά σημειώθηκε πριν το 2000, καθώς το συγκεκριμένο

τιμήμα ταξινομείται ως καμένη έκταση στο θεματικό χάρτη CORINE Land Cover (CLC) του 2000. Στη δεύτερη περίπτωση, το πιθανότερο αίτιο των αλλαγών (από Χαμηλή βλάστηση σε Γυμνό έδαφος) είναι αυτό της υπερβόσκησης, καθώς, σύμφωνα με τους Στάρα και Τσιακίρης (2009a, p.4), στη συγκεκριμένη περιοχή (όρος Μιτσικέλι) η μακροχρόνια βόσκηση έχει συντελέσει καθοριστικά στην υποβάθμιση της χλωρίδας της.

Το αίτιο των δασικών πυρκαγιών αποτελεί την πιθανή εξήγηση και για τη σημαντική απώλεια εκτάσεων κωνοφόρων δέντρων που φαίνεται στο παράδειγμα γ., της Εικόνας 16. Γενικότερα, σύμφωνα με τους Τσαγκάκη, Καρέτσος και Προύτσος (2011, pp.35–36), η ΠΕ Ιωαννίνων παρουσίασε, από το 1983 έως το 2005, τα περισσότερα περιστατικά πυρκαγιών (1.989) μεταξύ των ΠΕ της Ηπείρου, με το σύνολο των καμένων εκτάσεων να ανέρχεται στα 299,90 km².

Πέρα από τα παραπάνω, το βασικότερο χαρακτηριστικό των αλλαγών, που παρατηρούνται στην Α περιοχή μελέτης, είναι η σημαντική αύξηση των δασικών εκτάσεων. Βασική αιτία αυτού του φαινομένου αποτελεί η σταδιακή εγκατάλειψη (κατά τις τελευταίες δεκαετίες) των παραδοσιακών δραστηριοτήτων και χρήσεων γης (π.χ. δασοκομία, κτηνοτροφία, εκτατική γεωργία της ημιορεινής ζώνης), που είχαν διαμορφώσει το τοπίο της περιοχής για αιώνες. Ενδεικτικά, αναφέρονται η μείωση του μόνιμου πληθυσμού του καλλικρατικού Δήμου Ζαγορίου από 4.274 άτομα το 1991 σε 3.740 το 2011 (ΕΣΥΕ, 1991; ΕΛΣΤΑΤ, εκτιμήσεις 2011 όπως παρατίθενται στο Θεώρημα, Ροϊκός & Λώλος, 2012, p.1039) και η εντυπωσιακή μείωση στη παραγωγή ξυλείας για την ΠΕ Ιωαννίνων από 37.786 m³ το 1991 σε 20.474 m³ το 2000 (Περιφέρεια Ηπείρου, 2011, p.45).

Η αύξηση των δασικών εκτάσεων αποτελεί μία γενική τάση (σε παγκόσμιο επίπεδο), τις τελευταίες δεκαετίες, για τις εύκρατες και τις μεσογειακές περιοχές (FAO, 2015). Πολλές είναι οι έρευνες, οι οποίες με τη χρήση τηλεπισκοπικών μεθόδων διερεύνησαν τις διαχρονικές μεταβολές στους τύπους βλάστησης και κάλυψης γης σε μεσογειακές περιοχές (π.χ. Serra, Pons & Sauri, 2008; Meliadis, et al., 2010; Meliadis & Meliadis, 2011; Lasanta & Vicente-Serrano, 2012) και σε ορεινά οικοσυστήματα (π.χ. Lasanta-Martinez, Vicente-Serrano & Cuadrat-Prats, 2005; Kuemmerle, et al., 2009; Griffiths, et al., 2014) και σημειώνουν την τάση αύξησης των δασικών εκτάσεων.

Βάσει των προαναφερθέντων ερευνών, η εγκατάλειψη των αγροτικών περιοχών και οι κλιματικές μεταβολές αποτελούν τις σημαντικότερες αιτίες των παρατηρούμενων φυσικών

αναδασώσεων. Παράλληλα, σε ότι αφορά τις τάσεις εγκατάλειψης της υπαίθρου, αυτές, σύμφωνα με τους Mallinis, et al. (2011) και τους Λιαρίκος, Μαραγκού και Παπαγιάννης (2012), αποδίδονται κυρίως σε κοινωνικοοικονομικά αίτια (συγκέντρωση στα αστικά κέντρα και σε παραθαλάσσιες τουριστικές περιοχές), καθώς και στις επιπτώσεις της μη ορθής εφαρμογής των ευρωπαϊκών γεωργικών πολιτικών (γεωργικές επιδοτήσεις κλπ.).

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, βάσει της έρευνας των Λιαρίκος, Μαραγκού και Παπαγιάννης (2012), οι συνολικές δασικές εκτάσεις της Περιφέρειας Ηπείρου παρουσίασαν μείωση κατά το χρονικό διάστημα 1987 – 2007. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις αυξητικές τάσεις των δασών στην Α περιοχή μελέτης, πιθανά αντανακλά τις «θετικές» επιπτώσεις από την εφαρμογή των πολιτικών προστασίας στη συγκεκριμένη περιοχή.

Παρ' όλα αυτά, η σταδιακή αναδάσωση των ανοικτών χώρων της ΖΕΠ, έχει ως συνέπεια τη μείωση του μωσαϊκού των αγροδασικών και των λιβαδικών οικοσυστημάτων της, τα οποία αποτελούν σημαντικά ενδιαιτήματα για τα είδη προστατευόμενων πτηνών, που φιλοξενεί η περιοχή αυτή (The Return of the Neophron, 2015a). Παράλληλα, η ανεξέλεγκτη πύκνωση των δασών αυξάνει τον κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιών, ενώ σύμφωνα με τον Perry (1988 όπως αναφέρεται στο Lasanta-Martinez, Vicente-Serrano & Cuadrat-Prats, 2005) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση θνησιμότητας της πανίδας και την τοπική μείωση της βιοποικιλότητας.

5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Β περιοχής μελέτης (GR2130009)

Από τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων, που αφορούν τη ΖΕΠ «Όρος Τύμφη (Γκαμήλα), GR2130009» (Β περιοχή μελέτης), γίνεται φανερό ότι η τοποθεσία αυτή και στα τρία εξεταζόμενα έτη καταλαμβάνεται κυρίως από χαμηλή βλάστηση, πλατύφυλλα δάση και βραχώδεις εκτάσεις. Συγκεκριμένα, στα χαμηλότερα υψόμετρα (έως 1.400 m περίπου) κυριαρχούν τα δάση πλατύφυλλων, ενώ όσο ανεβαίνει το υψόμετρο η κάλυψη μετατρέπεται σταδιακά σε χαμηλή βλάστηση και έπειτα σε βραχώδεις εκτάσεις, οι οποίες στην ουσία αποτελούν τις κορυφές του ορεινού συγκροτήματος της Τύμφης. Σε ότι αφορά τα επιμέρους ποσοστά των πλατύφυλλων (1984: 24,49%, 2000: 28,21%, 2014: 32,53%) και των κωνοφόρων (1984: 8,11%, 2000: 9,01%, 2014: 9,66%), αυτά σε γενικές γραμμές συμφωνούν με τα στοιχεία που παρατίθενται στο Τυποποιημένο Έντυπο Δεδομένων (Standard Data Form) της εν λόγω ΖΕΠ (EEA, 2015b), βάσει των οποίων (βλ. Πίνακα 6) τα πλατύφυλλα φυλλοβόλα δάση

καλύπτουν το 30,00%, τα κωνοφόρα δάση το 11,00% και τα μικτά δάση το 4,00% της περιοχής (το έτος αναφοράς δεν βρέθηκε).

Παράλληλα, οι ακρίβειες των ταξινομήσεων ήταν άκρως ικανοποιητικές και κυμάνθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα από τις αντίστοιχες της Α περιοχής μελέτης. Σε αυτό συνέβαλε ο μικρότερος αριθμός κλάσεων (πέντε αντί για έξι), που επιλέχθηκαν για τη Β περιοχή μελέτης και κυρίως η απουσία της θεματικής τάξης Καλλιέργειες, η οποία, όπως είναι φυσικό, παρουσιάζει παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά με άλλες κλάσεις (π.χ. Χαμηλή βλάστηση, Πλατύφυλλα). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις που αναγνωρίστηκαν, έπειτα από προσεκτική εξέταση (βοηθητικά δεδομένα) της Β περιοχής μελέτης, ήταν πρακτικά ασήμαντες και στην ουσία μη εντοπίσιμες, βάσει της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων Landsat.

Αναλυτικότερα, εκτός από την πρώτη ταξινόμηση (Landsat 5 TM) οι υπόλοιπες (Landsat 7 ETM+ και Landsat 8 OLI) παρουσίασαν συνολικές ακρίβειες άνω του 95% (βλ. Πίνακες 27, 28 και 29). Παρόμοια ποσοστά ακρίβειας επιτυγχάνονται σε έρευνες διαχρονικών μεταβολών που χρησιμοποιούν άλλους μη παραμετρικούς αλγορίθμους, όπως νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANN) και μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines – SVM), για την ταξινόμηση εικόνων Landsat (π.χ. Srivastava, et al., 2012; Kolios & Stylios, 2013), ενώ οι Otukei και Blaschke (2010), συγκρίνοντας διάφορες μεθόδους DT με διάφορες μεθόδους SVM και μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Classifier – MLC), καταλήγουν ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση τα DT παρουσιάζουν μεγαλύτερες ακρίβειες, με τα ποσοστά τους να φτάνουν μέχρι και άνω του 94%.

Σε ότι αφορά τις επιμέρους ακρίβειες των κλάσεων, αυτές κυμάνθηκαν σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα, με εξαίρεση τις ακρίβειες της κλάσης Γυμνό έδαφος, οι οποίες ήταν οι χαμηλότερες και για τα τρία εξεταζόμενα έτη (βλ. Πίνακες 27, 28 και 29). Παράλληλα, το γυμνό έδαφος παρουσιάζει εξαιρετικά έντονες αλλαγές (μεταβολές «από κλάση – σε κλάση») και στα τρία εξεταζόμενα χρονικά διαστήματα, με τις περισσότερες εξ αυτών να αφορούν μεταβολές σε χαμηλή βλάστηση (βλ. Πίνακες 31, 32 και 33). Επίσης, αρκετά μεγάλες αλλαγές παρουσιάζει και η χαμηλή βλάστηση, της οποίας οι περισσότερες μεταβαλλόμενες εκτάσεις μετατρέπονται σε πλατύφυλλα δάση. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα β. της Εικόνας 24, όπου σημαντικές εκτάσεις χαμηλής βλάστηση και αρκετές γυμνού εδάφους, οι οποίες βρίσκονται κοντά στους οικισμούς Πάπιγκο και Μικρό Πάπιγκο, μετατρέπονται σταδιακά σε πλατύφυλλα και κωνοφόρα δάση.

Από την άλλη, στο παράδειγμα α., της Εικόνας 24, παρατηρείται μία έντονη συνεχής εναλλαγή από Χαμηλή βλάστηση σε Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις (1984 – 2000) και αντίστροφα (2000 – 2014). Γενικότερα, σύμφωνα με τους Corpin, et al. (2004), μεταβολές τέτοιου μεγέθους είναι ως ένα βαθμό αναμενόμενες όταν μεταξύ των εξεταζόμενων ετών παρεμβάλλονται μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ παράλληλα σημαντικό ρόλο παίζει και η διαχρονική κλιματική μεταβλητότητα. Για παράδειγμα, πιθανή απουσία βροχοπτώσεων κατά το χρονικό διάστημα πριν τη λήψη της δορυφορικής εικόνας, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη εμφάνιση ξηρασίας στη χαμηλή βλάστηση (χόρτα, θάμνοι κλπ.), και έτσι, λόγω χαμηλού NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), αυτή να αναγνωρίζεται ως Γυμνό έδαφος ή Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις. Επίσης, άλλη μία πιθανή αιτία των έντονων αυτών μεταβολών είναι η υπερβόσκηση και γενικότερα οι διαφορές στη χωρική κατανομή που παρουσιάζουν οι δραστηριότητες της βόσκησης σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα (Lambin, et al., 2001).

Όσον αφορά τις εκτάσεις των θεματικών τάξεων Χαμηλή βλάστηση, Γυμνό έδαφος και Τεχνητές/Βραχώδεις εκτάσεις, αυτές παρουσιάζουν μείωση και στα δύο επιμέρους χρονικά διαστήματα. Συγκεκριμένα, η ποσοστιαία μείωση της Χαμηλής βλάστησης, κατά το διάστημα 1984 – 2000, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των άλλων δύο κλάσεων, ενώ κατά το διάστημα 2000 – 2014 συμβαίνει το αντίστροφο (βλ. Πίνακες 31, 32 και 33). Οι διαφορές αυτές, μεταξύ των δύο χρονικών διαστημάτων, πιθανόν να οφείλονται στις μεταβολές της κτηνοτροφικής δραστηριότητας της περιοχής, που έλαβαν χώρα κατά τις συγκεκριμένες περιόδους. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι, βάσει στοιχείων της ΕΛΣΤΑΤ (όπως παρατίθενται στο Περιφέρεια Ηπείρου, 2011, p.33), ο συνολικός αριθμός προβατοειδών και αιγοειδών της ΠΕ Ιωαννίνων μειώθηκε από τις 490.317 κεφαλές το 1991 στις 437.231 το 2000.

Παράλληλα, οι εκτάσεις των δασικών καλύψεων γης της εν λόγω ΖΕΠ αυξήθηκαν σημαντικά κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων ετών. Ειδικότερα, τα πλατύφυλλα δάση σημείωσαν εξαιρετικά μεγάλη αύξηση (βλ. Πίνακα 30 και Σχήμα 16), με τα ποσοστά αυτής να παραμένουν σταθερά υψηλά (15% περίπου) και στα δύο επιμέρους εξεταζόμενα χρονικά διαστήματα. Αυξήσεις ανάλογου μεγέθους, στις καλύψεις πλατύφυλλων ειδών, καταγράφονται και στην έρευνα των Meliadis, et al. (2010), όπου μέσω δορυφορικών δεδομένων Landsat και τεχνικών ΓΣΠ (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών) αναλύονται οι διαχρονικές μεταβολές (1989 – 1999) στην κάλυψη γης και στη βλάστηση της ΖΕΠ «Αντιχάσια Όρη και Μετέωρα», η οποία παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις περιοχές μελέτης της παρούσας διατριβής.

Αντιθέτως, σε αντίστοιχη έρευνα (Kolios & Stylios, 2013), που πραγματοποιήθηκε για τη χερσόνησο της Πρέβεζας (παραθαλάσσια τουριστική περιοχή της Ηπείρου) και αφορά στο διάστημα 2000 – 2009, εντοπίζεται μείωση των δασικών εκτάσεων και παράλληλη σημαντική αύξηση των κλάσεων Γυμνό έδαφος και Τεχνητές εκτάσεις/Παραλίες.

Επίσης, οι Serra, Pons και Sauri (2008) χρησιμοποιώντας πολυφασματικά δεδομένα Landsat, μελέτησαν τις διαχρονικές μεταβολές των καλύψεων γης, που έλαβαν χώρα κατά το διάστημα 1977 – 1997 σε περιοχή της βορειοανατολικής Καταλονίας (Ισπανία), ενώ παράλληλα βασιζόμενοι σε ανθρωπογενείς, βιοφυσικούς και τοπογραφικούς παράγοντες επιχείρησαν τη διερεύνηση των βασικών κινητήριων δυνάμεων των μεταβολών αυτών. Στα σημαντικότερα ευρήματα της έρευνας συγκαταλέγονται η εντατικοποίηση της γεωργίας στο παραθαλάσσιο τμήμα της περιοχής, η εγκατάλειψη των καλλιεργειών ελιάς και αμπέλου στην ημιορεινή ζώνη και η αύξηση της δασοκάλυψης στην ορεινή ζώνη της περιοχής. Παράλληλα, ως βασικότερα αίτια μεταβολών αναφέρονται η εγκατάλειψη των μόνιμων καλλιεργειών, οι δασικές πυρκαγιές και οι πολιτικές προστασίας των διαχειριστών του εθνικού πάρκου της περιοχής, οι οποίες επικεντρώνονται στη διατήρηση των δασών δρυός και οξιάς.

Γενικότερα, σε ότι αφορά τους κοινωνικοοικονομικούς και φυσικούς παράγοντες που συμβάλλουν στη διαμόρφωση των μεταβολών της Β περιοχής μελέτης, αυτοί ως ένα βαθμό θα πρέπει να λογίζονται όμοιοι με τους αντίστοιχους της Α περιοχής μελέτης, καθώς οι τοποθεσίες αυτές αποτελούν τμήματα της ίδιας ευρύτερης περιοχής. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο τμήμα της Β περιοχής μελέτης (έτος χαρακτηρισμού ως ΖΕΠ: 1987) εμπίπτει σε καθεστώς προστασίας από το 1973 (Εθνικός Δρυμός «Βίκου – Αώου»), ενώ η προστασία σημαντικού τμήματος της Α περιοχής μελέτης (έτος χαρακτηρισμού ως ΖΕΠ: 2010) ξεκινά στην ουσία το 2005, με τη δημιουργία του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου (ΕΠΒΠ) (βλ. υποενότητες «3.3.1 Α περιοχή μελέτης (GR2130011)» και «3.3.2 Β περιοχή μελέτης (GR2130009)»). Τα προαναφερθέντα ίσως αποτελούν και τη βασική αιτία που οι δασικές εκτάσεις τις Β περιοχής μελέτης παρουσιάζουν σταθερά και στα δύο επιμέρους χρονικά διαστήματα, μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης από αυτές της Α περιοχής μελέτης.

Παρ' όλα αυτά, όπως και στην Α, έτσι και στη Β περιοχή μελέτης, η επέκταση και η πύκνωση των δασικών της εκτάσεων οδηγεί στη σταδιακή μείωση του μωσαϊκού των αγροδασικών και των λιβαδικών οικοσυστημάτων της, τα οποία αποτελούν σημαντικούς οικοτόπους για πολλά από

τα είδη προστατευόμενων πτηνών, που φιλοξενεί η περιοχή αυτή (The Return of the Neophron, 2015b).

5.3 Συμπεράσματα – Εισηγήσεις

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε ο εντοπισμός και η καταγραφή των βασικών τύπων κάλυψης γης και των διαχρονικών μεταβολών τους (1984 – 2000 – 2014) σε δύο περιβαλλοντικά πολύ σημαντικές περιοχές που ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000. Βασικός σκοπός της διατριβής ήταν η λεπτομερής ανάλυση των μεταβολών αυτών και η ανάδειξη των κύριων αιτιών και επιπτώσεων τους, ώστε να αποτελέσει ένα οδηγό για την περαιτέρω βελτίωση της προστασίας των δύο εξεταζόμενων περιοχών και να συμβάλει στην ολοκληρωμένη και αειφόρο διαχείριση τους.

Για το σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Landsat, καθώς και άλλα ελεύθερα διαθέσιμα γεωχωρικά δεδομένα, ενώ η ανίχνευση και η ανάλυση των αλλαγών πραγματοποιήθηκε μέσω μετα-ταξινομικών τεχνικών. Για την ταξινόμηση των εικόνων εφαρμόστηκαν δέντρα αποφάσεων, όπου συνδυάζοντας τη φασματική με την υψομετρική πληροφορία επιτεύχθηκαν άκρως ικανοποιητικά αποτελέσματα ταξινόμησης, εφάμιλλα με αυτά ερευνών της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Από τα αποτελέσματα της διατριβής διαπιστώνεται ότι οι δύο εξεταζόμενες περιοχές υπέστησαν εξίσου σημαντικές μεταβολές, στις καλύψεις γης, κατά την τελευταία τριακονταετία. Επίσης, το μέγεθος των αλλαγών αυτών διατηρείται σχεδόν στα ίδια επίπεδα και στα δύο επιμέρους χρονικά διαστήματα (1984 – 2000, 2000 – 2014).

Πιο συγκεκριμένα, στην Α περιοχή μελέτης (ΖΕΠ «Κεντρικό Ζαγόρι και ανατολικό τμήμα όρους Μιτσικέλι, GR2130011») παρατηρείται σημαντική αύξηση των δασικών εκτάσεων και αρκετά μεγάλη ποσοστιαία αύξηση για τις περιοχές με γυμνό έδαφος. Από την άλλη, η χαμηλή βλάστηση παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση, ενώ σημαντικός ήταν και ο περιορισμός των καλλιεργήσιμων εκτάσεων.

Σε ότι αφορά τη Β περιοχή μελέτης (ΖΕΠ «Όρος Τύμφη (Γκαμήλα), GR2130009»), τα αποτελέσματα έδειξαν εξαιρετικά μεγάλη αύξηση για τα δάση πλατύφυλλων και σημαντική επέκταση των κωνοφόρων δασών, ενώ αντίθετα οι υπόλοιπες καλύψεις γης παρουσίασαν αρκετά μεγάλη μείωση.

Τα πιθανά αίτια των μεταβολών αυτών έχουν ως εξής: διάνοιξη δρόμων, πιθανή αλλαγή των καλλιεργειών, συστηματική υπερβόσκηση, χωρικές μεταβολές στη δραστηριότητα βόσκησης, μείωση κτηνοτροφικής δραστηριότητας, διαχρονική κλιματική μεταβλητότητα και σφάλματα στη διαδικασία ταξινόμησης. Παράλληλα, ως κυριότερα αίτια θα πρέπει να λογίζονται οι δασικές πυρκαγιές, οι «θετικές» επιπτώσεις από την εφαρμογή των πολιτικών προστασίας και η εγκατάλειψη της ορεινής υπαίθρου και των παραδοσιακών χρήσεων γης (π.χ. δασοκομία, κτηνοτροφία, εκτατική γεωργία της ημιορεινής ζώνης).

Ειδικότερα, οι διαχειριστικές πολιτικές προστασίας και η εγκατάλειψη της ορεινής υπαίθρου αποτελούν τα σημαντικότερα ίσως αίτια για τη παρατηρούμενη σημαντική τάση αύξησης των δασικών εκτάσεων. Το γεγονός αυτό σημειώνεται και σε αρκετές έρευνες διαχρονικών μεταβολών, που αφορούν σε μεσογειακά ορεινά οικοσυστήματα.

Παράλληλα, συμπεραίνεται ότι η ίδια αυτή αυξητική τάση της δασοκάλυψης αποτελεί και τη κυριότερη αιτία ανάπτυξης οικολογικών απειλών και περιβαλλοντικών πιέσεων στις εξεταζόμενες περιοχές. Έτσι, η αύξηση του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιών, η μείωση του μωσαϊκού των ενδιαιτημάτων, η σταδιακή αναδάσωση των ανοικτών χώρων που επηρεάζει άμεσα πολλά είδη προστατευόμενων πτηνών, η αύξηση θνησιμότητας της πανίδας και γενικότερα η υποβάθμιση της βιοποικιλότητας, αποτελούν ίσως τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις των παρατηρούμενων μεταβολών. Συγχρόνως, το γεγονός ότι οι ΖΕΠ έχουν ως βασικό σκοπό τη διατήρηση και προστασία της άγριας ορνιθοπανίδας, καθώς και ότι οι περιοχές μελέτης της παρούσας διατριβής φιλοξενούν πολλά σπάνια, απειλούμενα και ενδημικά είδη χλωρίδας και πανίδας, αναδεικνύει τη σημαντικότητα και τη βαρύτητα των παραπάνω επιπτώσεων.

Επομένως, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής αναδείχθηκαν οι σημαντικές μεταβολές που έλαβαν χώρα κατά την τελευταία τριακονταετία σε δύο περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, καθώς και εντοπίστηκαν τα κυριότερα αίτια και επιπτώσεις των αλλαγών αυτών. Παράλληλα, διαπιστώνεται ότι τα ελεύθερα διαθέσιμα γεωχωρικά δεδομένα μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία στη διαχρονική παρακολούθηση των προστατευόμενων περιοχών, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα για την αποτίμηση των γενικών χωρικών μεταβολών και των αναπτυσσόμενων περιβαλλοντικών πιέσεων που τις συνοδεύουν, ενώ συγχρόνως εξασφαλίζουν πολύτιμο χρόνο και πόρους.

Ωστόσο, η περαιτέρω συνέχιση της έρευνας και ο αναλυτικότερος έλεγχος των αποτελεσμάτων της διατριβής κρίνονται απαραίτητα για την αποτελεσματικότερη αξιολόγηση και κατανόηση των παρατηρούμενων μεταβολών. Έτσι, για μια πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση της ακρίβειας των ταξινομήσεων και των αλλαγών θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και οι ανάλογες συγκρίσεις με γεωχωρικά δεδομένα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, καθώς και με αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου (συμπεριλαμβανομένου και τυχόν διαθέσιμων παρατηρήσεων παλαιότερων ετών, πλησίον του 1984 και 2000). Ακόμη, αναγκαία κρίνεται και η περαιτέρω ανάλυση των αλλαγών, έτσι ώστε να εκτιμηθεί και η στατιστική σημαντικότητα τους. Από την άλλη, επιπρόσθετες αναλύσεις της χωρικής και τις υψομετρικής διάστασης των αλλαγών, σε συνδυασμό με την παράθεση διαφόρων επιπέδων πληροφορίας (π.χ. οικισμοί, οδικό δίκτυο, τύποι οικοτόπων, κατανομή ειδών κλπ.), θα συντελούσαν σημαντικά στον ακριβέστερο προσδιορισμό των αιτιών των μεταβολών και των επιπτώσεων τους.

Επίσης, σημειώνεται ότι τα μεγάλα χρονικά διαστήματα, μεταξύ των εξεταζόμενων ετών και η μελέτη των δύο επιμέρους χρονικών περιόδων, συνέβαλλαν καθοριστικά στον εντοπισμό των σημαντικότερων μεταβολών και στην αξιολόγηση των κυριότερων τάσεων τους. Παρ' όλα αυτά, για την αποτελεσματικότερη ανάλυση των αλλαγών, που συντελέστηκαν στις δύο εξεταζόμενες περιοχές, καθώς και για την καλύτερη κατανόηση των αιτιών και των επιπτώσεων τους θα πρέπει να πραγματοποιηθούν λεπτομερέστερες διερευνήσεις, που θα περιλαμβάνουν περισσότερα και πυκνότερα χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, η χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλότερης χωρικής ή και φασματικής ανάλυσης από αυτές των Landsat, σε συνδυασμό με επιτόπιες επισκέψεις πεδίου, μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην αναλυτικότερη εξέταση των επιμέρους αλλαγών και στον ακριβέστερο εντοπισμό των επιπτώσεων/επιδράσεων τους. Ταυτόχρονα, οι ευελιξίες που προσφέρουν τα δέντρα αποφάσεων μπορούν, εκτός των άλλων, να αξιοποιηθούν και στη λεπτομερέστερη εξέταση των αλλαγών στοχευμένων καλύψεων γης ή οικοτόπων προτεραιότητας. Ωστόσο, τα ίδια αυτά αποτελέσματα της παρούσας διατριβής θα αποτελούν χρήσιμη βάση δεδομένων στη διάθεση των αντίστοιχων φορέων διαχείρισης, καθώς και θα μπορούν να αξιοποιηθούν σε μελλοντικές έρευνες (που θα αφορούν τις εξεταζόμενες περιοχές) ως συγκριτικά δεδομένα ή ως στοιχεία/δείκτες για μελέτες όπως βιοφυσικές χαρτογραφήσεις, εκτιμήσεις κινδύνου, διαχειριστικά σχέδια κ.ά.

Τέλος, μέσα από την παρούσα διατριβή γίνεται φανερό ότι για την αποτελεσματικότερη διαμόρφωση των πολιτικών διαχείρισης των προστατευόμενων περιοχών θα πρέπει μαζί με

τους οικολογικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες να λαμβάνονται εξίσου υπόψη και οι διάφορες κοινωνικοοικονομικές δυναμικές που αναπτύσσονται στην εκάστοτε περιοχή. Έτσι, πέρα από τα μέτρα που λαμβάνονται για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας κρίνεται απαραίτητη η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των φορέων διαχείρισης και των αρμόδιων κρατικών και τοπικών φορέων για την προσπάθεια διαμόρφωσης των κατάλληλων συνθηκών μέσω των οποίων θα είναι εφικτή η επίτευξη των στόχων προστασίας. Συγκεκριμένα και σε ότι αφορά τις περιοχές μελέτης της διατριβής, η προσεκτική ανάπτυξη ήπιων και εναλλακτικών μορφών τουρισμού και ειδικότερα του αγροτουρισμού, η προώθηση υιοθέτησης παραδοσιακών γεωργικών πρακτικών και η ολοκληρωμένη διαχείριση των δασών και των λιβαδιών με εξειδικεύσεις των παραγωγικών χρήσεων (δασοπονία, εκτατική κτηνοτροφία κλπ.) αποτελούν μερικές προτάσεις που θα μπορούσαν να συντελέσουν στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη των περιοχών αυτών, καθώς και στη διατήρηση της πολύτιμης ποικιλίας των ενδιαιτημάτων τους, συμβάλλοντας έτσι καθορίστηκα στην ολοκληρωμένη διαχείριση τους και στην αποτελεσματικότερη διατήρηση της βιοποικιλότητας τους.

Παράρτημα Α

Κατάσταση ακρωνυμίων και συμβολισμών

ΑΕ	Ανώνυμη Εταιρεία
ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΕΓΣΑ 87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ΕΔΒΑ	Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αώου
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΕΦ	Ένωση Ελλήνων Φυσικών
ΕΖΔ	Ειδικές Ζώνες Διατήρησης
ΕΘΙΑΓΕ	Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας
ΕΚΒΥ	Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων – Υγροτόπων
ΕΚΧΑ ΑΕ	Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση ΑΕ
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΕΠΒΠ	Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου
ΕΣΥΕ	Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος
ΖΕΠ	Ζώνες Ειδικής Προστασίας
Η/Υ	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
ΙΜΔΟ & ΤΔΠ	Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
Ν.	Νόμος
ΝΠΙΔ	Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου
ΠΕ	Περιφερειακή Ενότητα
ΠΖ	Περιφερειακές Ζώνες
ΠΠΧΣΑΑ	Περιφερειακό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης

ΤΚΣ	Τόποι Κοινοτικής Σημασίας
ΥΠΕΚΑ	Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
ΥΠΕΧΩΔΕ	Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων
ΦΔ	Φορέας Διαχείρισης
ΦΔΠΠ	Φορείς Διαχείρισης Προστατευόμενων Περιοχών
ANN	Artificial Neural Networks
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission & Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BI	Brightness Index
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CLC	CORINE Land Cover
DEM	Digital Elevation Model
DN	Digital Number
DT	Decision Tree
EEA	European Environment Agency
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EO-1	Earth Observing-1
ERS-1 & -2	European Remote Sensing-1 & -2
ERTS	Earth Resources Technology Satellite
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GDEM V2	Global Digital Elevation Model Version 2
GSFC	Goddard Space Flight Center
HRV	High Resolution Visible
Inc.	Incorporated
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRS	Indian Remote Sensing
ISODATA	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
J-spacesystems	Japan Space Systems
L1T	Level 1 Terrain Corrected
MDC	Minimum Distance Classifier
METI	Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry

MLC	Maximum Likelihood Classifier
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics & Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	near infrared
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
NPS	National Park Service
OLI	Operational Land Imager
PPC	Parallelepiped Classifier
QGIS	Quantum Geographic Information System
RBV	Return Beam Vidicon
RGB	Red, Green, Blue
ROI	Regions of Interest
SDI	Shadow Detection Index
SIC	Satellite Imaging Corporation
SPA	Special Protection Area
SPOT	French: Satellite Pour l' Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVM	Support Vector Machines
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TREES	TRopical Ecosystem Environment observations by Satellite
UNESCO	United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
VNIR	visible and near infrared
WGS 84	World Geodetic System 1984
WRS	Worldwide Reference System

Βιβλιογραφία

Βώκου, Δ., 2012. Πολιτικές Διατήρησης της Βιοποικιλότητας στην Ελλάδα, Εθνικό Σύστημα Προστατευόμενων Περιοχών και Επιτροπή Φύση 2000. Στο: Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Περιβαλλοντικής Πολιτικής & Διαχείρισης. Μυτιλήνη, 25-27 Μαΐου 2012. [pdf]. σελ.113-121. Διαθέσιμο στο: <<http://www.env.aegean.gr/tmima/synedrio-perivallontikis-politikis/>> [Πρόσβαση 18 Νοεμβρίου 2015].

EKBY (Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων – Υγροτόπων), 2010. Προστατευόμενες περιοχές. [online] Διαθέσιμο στο: <http://www.ekby.gr/ekby/el/EKBY_PP_el.html> [Πρόσβαση 14 Νοεμβρίου 2015].

EKXA AE (Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση AE), 2016. Υπηρεσία Θέασης Ορθοφωτογραφιών. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.ktimanet.gr/CitizenWebApp/Orthophotographs_Page.aspx> [Πρόσβαση 22 Μαρτίου 2016].

Θεώρημα Σύμβουλοι Ανάπτυξης AE (Ανώνυμη Εταιρεία), Ροϊκός Σύμβουλοι Μηχανικοί AE & Λώλος, Θ.Α., 2012. Αξιολόγηση, αναθεώρηση και εξειδίκευση Περιφερειακού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΠΠΧΣΑΑ) Περιφέρειας Ηπείρου. Α Φάση: Αξιολόγηση της εφαρμογής του θεσμοθετημένου Περιφερειακού Πλαισίου. Α1 Στάδιο Μελέτης. [pdf] Αθήνα: ΥΠΕΚΑ, Γενική Γραμματεία Χωροταξίας & Αστικού Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Χωροταξίας. Διαθέσιμο στο: <<http://www.php.gov.gr/enimerosi/anakoynoseis/>> [Πρόσβαση 27 Απριλίου 2015].

Θεώρημα Σύμβουλοι Ανάπτυξης AE, Ροϊκός Σύμβουλοι Μηχανικοί AE & Λώλος, Θ.Α., 2015. Αξιολόγηση, αναθεώρηση και εξειδίκευση ΠΠΧΣΑΑ Περιφέρειας Ηπείρου. Β Φάση: Αναθεώρηση και εξειδίκευση του θεσμοθετημένου Περιφερειακού Πλαισίου. Β1 Στάδιο: Μελέτη Τοπίου. [pdf] Αθήνα: ΥΠΕΚΑ, Γενική Γραμματεία Χωροταξίας & Αστικού Περιβάλλοντος, Διεύθυνση

Χωροταξία. Διαθέσιμο στο: <<http://www.php.gov.gr/enimerosi/anakoinoseis/4329-dianouleusi-ppxs.html>> [Πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2015].

Ιατρού, Α., Παπαϊωάννου, Δ., Παππάς, Ε. & Στάρα, Κ., 2003. *Σχέδιο Διαχείρισης της Λίμνης Παμβώτιδας Ιωαννίνων. Β Φάση.* [pdf] Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <<http://www.ecoioannina.gr/documents/diaxiristiko/pamvotismeleti1.pdf>> [Πρόσβαση 9 Μαρτίου 2016].

Κούτσιας, Ν., 2008. Η Δορυφορική Τηλεπισκόπηση σε Θέματα Διαχείρισης Προστατευόμενων Περιοχών. Στο: Π. Δημόπουλος, Ι.Δ. Παντής, Δ. Τζανουδάκης & Δ. Βαγενάς, επιμέλ. έκδ. 2008. *Αειφορική Διαχείριση Προστατευόμενων Περιοχών.* Αθήνα: Εκδόσεις Παππάς, Τμήμα III, Κεφ.5.

Λιαρικός, Κ., Μαραγκού, Π. & Παπαγιάννης, Θ. επιμέλ. έκδ., 2012. *Η Ελλάδα τότε και τώρα: Διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων γης, 1987-2007.* [pdf] Αθήνα: WWF Ελλάς. Διαθέσιμο στο: <<http://www.wwf.gr/forests/pdfs/atlas/>> [Πρόσβαση 16 Οκτωβρίου 2015].

Μερτίκας, Σ.Π., 2009. *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας.* Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

Μηλιαρέσης, Γ.Χ., 2003. *Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση.* Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

Μπεριάτος, Η., 2003. Σχεδιασμός και διαχείριση προστατευόμενων περιοχών στην Ελλάδα: Θεσμικές εξελίξεις, προβλήματα και προοπτικές. *Αειχώρος*, 2(1), pp.58–89, [online] Διαθέσιμο στο: <<http://www.aeihoros.gr/article/el/sxediasmos-kai-diaxeirisi-prostateuomenon-perioxon-stin-ellada-thesmikes-ekselikseis-provlimata-kai-prooptikes>> [Πρόσβαση 27 Σεπτεμβρίου 2015].

Νόμος 2204/1994 (ΦΕΚ59, Α'). *Κύρωση Σύμβασης για τη βιολογική ποικιλότητα.* [online] Διαθέσιμο στο: <http://ethics.duth.gr/files/rio_convention_gr.pdf> [Πρόσβαση 20 Σεπτεμβρίου 2015].

Οδηγία 92/43/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21^{ης} Μαΐου 1992 για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0043:20070101:EL:PDF>> [Πρόσβαση 18 Σεπτεμβρίου 2015].

Παπαστεργιάδου, Ε., Ρετάλης, Α., Αποστολάκης, Α. & Γεωργιάδης, Θ., 2004. Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην Παρακολούθηση Μακροχρόνιων Αλλαγών Καλύψεων – Χρήσεων Γης και της Υδρόβιας Βλάστησης της Λίμνης Χειμαδίτιδας, Β. Ελλάδα. Στο: ΕΕΦ (Ένωση Ελλήνων Φυσικών) & Παράρτημα Κεντρικής και Δυτικής Μακεδονίας της ΕΕΦ, *6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Περιβάλλοντος: Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη & Περιβάλλον.* Θεσσαλονίκη, 9-12 Δεκεμβρίου 2004. [pdf]. σελ.223–226. Διαθέσιμο στο:

<http://www.biology.upatras.gr/faculty_elections/E.Papastergiadou/> [Πρόσβαση 16 Νοεμβρίου 2015].

Περιφέρεια Ηπείρου, 2011. *Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιφέρειας Ηπείρου 2012-2014, Ενότητα Α'*. Εκδ. Περιφέρεια Ηπείρου.

Πλατής, Π.Δ., Παπαχρήστου, Θ.Γ., Τρακόλης, Δ., Μελιάδης, Ι., Γρηγοριάδης, Ν. & Μάκρας, Α., 2004. Διαχρονική παρακολούθηση τύπων βλάστησης στην περιοχή της λίμνης Άγρα. Στο: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων – Γενική Διεύθυνση Ανάπτυξης και Προστασίας Δασών και Φυσικού Περιβάλλοντος & Ελληνική Λιβαδοπονική Εταιρεία, *4^ο Πανελλήνιο Λιβαδοπονικό Συνέδριο: Λιβάδια των πεδινών και ημιορεινών περιοχών: Μοχλός ανάπτυξης της υπαίθρου*. Βόλος, 10-12 Νοεμβρίου 2004. [pdf] Αθήνα: Ελληνική Λιβαδοπονική Εταιρεία. σελ.355–361. Διαθέσιμο στο: <http://www.elet.gr/pages/wp-content/uploads/4o_praktika.pdf> [Πρόσβαση 25 Νοεμβρίου 2015].

Στάρα, Κ. & Τσιακίρης, Ρ., 2009α. Σχέδιο δράσης για τη Ζώνη Ειδικής Προστασίας «GR2130011 Κεντρικό Ζαγόρι και ανατολικό τμήμα Όρους Μιτσικέλι». Στο: Α. Δημαλέξης, Δ. Μπούσμπουρας, Θ. Καστρίτης, Α. Μανωλόπουλος & V. Saravia (Συντονιστές Έκδοσης). *Τελική αναφορά προγράμματος επαναξιολόγησης 69 σημαντικών περιοχών για τα πουλιά για τον χαρακτηρισμό τους ως Ζωνών Ειδικής Προστασίας της Οрниθοπανίδας*. [pdf] Αθήνα: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ). Διαθέσιμο στο: <<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=5yM27Xo754c%3D&tabid=572>> [Πρόσβαση 17 Οκτωβρίου 2015].

Στάρα, Κ. & Τσιακίρης, Ρ., 2009β. Έκθεση Ορνιθολογικής αξιολόγησης περιοχής «GR067 Κεντρικό Ζαγόρι και Ανατολικό Όρος Μιτσικέλι». Στο: Α. Δημαλέξης, Δ. Μπούσμπουρας, Θ. Καστρίτης, Α. Μανωλόπουλος & V. Saravia (Συντονιστές Έκδοσης). *Τελική αναφορά προγράμματος επαναξιολόγησης 69 σημαντικών περιοχών για τα πουλιά για τον χαρακτηρισμό τους ως Ζωνών Ειδικής Προστασίας της Οрниθοπανίδας*. [pdf] Αθήνα: ΥΠΕΧΩΔΕ. Διαθέσιμο στο: <<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=r3L4E0ZMklw%3D&tabid=572>> [Πρόσβαση 17 Οκτωβρίου 2015].

Τσαγκάρη, Κ., Καρέτσος, Γ. & Προύτσος, Ν., 2011. *Δασικές πυρκαγιές Ηπείρου 1983-2005*. [pdf] Αθήνα: WWF Ελλάς και Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας – Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΕΘΙΑΓΕ – ΙΜΔΟ & ΤΔΠ). Διαθέσιμο στο: <<http://www.oikoskopio.gr/pyroskopio/pdfs/pyrkagies-ipiros.pdf>> [Πρόσβαση 27 Νοεμβρίου 2016].

Τσιφτσής, Σπ. & Τσιφτιδής, Ι., 2015. *Ορχιδέες του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου*. [pdf] Ασπράγγελοι Δήμου Ζαγορίου, Ιωάννινα: Φορέα Διαχείρισης Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου & Πίνδου. Διαθέσιμο στο: <<http://pindosnationalpark.gr/>> [Πρόσβαση 9 Μαρτίου 2016].

ΥΠΕΚΑ, 2013. *Πόρισμα της Έκθεσης Αξιολόγησης του ισχύοντος Περιφερειακού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού & Αειφόρου Ανάπτυξης της Περιφέρειας Ηπείρου*. [pdf] Αθήνα: ΥΠΕΚΑ, Γενική Γραμματεία Χωροταξίας & Αστικού Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Χωροταξίας. Διαθέσιμο στο: <<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=514&language=el-GR>> [Πρόσβαση 27 Νοεμβρίου 2014].

ΥΠΕΚΑ, 2015a. *Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=432&language=el-GR>> [Πρόσβαση 17 Οκτωβρίου 2015].

ΥΠΕΚΑ, 2015b. *Επιτροπή «Φύση 2000»*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=764&language=el-GR>> [Πρόσβαση 17 Οκτωβρίου 2015].

ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου, 2015. *Δεδομένα, Χρήσεων Γης & Δασικών Τύπων Βλάστησης*. [email] Προσωπική επικοινωνία, 6 Μαρτίου 2015.

ΦΔ Εθνικών Δρυμών Βίκου – Αώου και Πίνδου, 2016. *Βλάστηση*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://pindosnationalpark.gr/vlastisi/>> [Πρόσβαση 17 Μαρτίου 2016].

Φιλιππίδης, Ε.Ι., 2006. *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών*. [pdf] Σέρρες: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κεντρικής Μακεδονίας. Διαθέσιμο στο: <ftp://teiser.gr/pliroforiki/GIS/Thewria/GIS_Theory.pdf> [Πρόσβαση 17 Οκτωβρίου 2015].

Χάρου, Ε., Ποϊραζίδης, Κ., Πετρίδης, Σ., Μαρτίνης, Α., Καλύβας, Δ., Καρρής, Γ. & Μήτσανας, Γ., 2012. *Εντοπισμός και χαρτογράφηση των διαχρονικών αλλαγών (1984 – 2011) των χρήσεων/κάλυψης γης των νησιών Ζακύνθου, Κεφαλονιάς και Λευκάδας*. Τεχνική αναφορά. [pdf] Ζάκυνθος: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ιονίων Νήσων. Διαθέσιμο στο: <<https://ionianlanduses.wordpress.com/changes/>> [Πρόσβαση 17 Οκτωβρίου 2015].

Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. & Malingreau, J.-P., 2002. Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. *Science*, 297(5583), pp.999–1002.

- Apostolopoulou, E. & Pantis, J.D., 2009. Conceptual gaps in the national strategy for the implementation of the European Natura 2000 conservation policy in Greece. *Biological Conservation*, 142, pp.221–237.
- Bortels, L., Chan, J.C.-W., Merken, R. & Koedam, N., 2011. Long-term monitoring of wetlands along the Western-Greek Bird Migration Route using Landsat and ASTER satellite images: Amvrakikos Gulf (Greece). *Journal for Nature Conservation*, 19, pp.215–223.
- Boyd, D.S., Sanchez-Hernandez, C. & Foody, G.M., 2006. Mapping a specific class for priority habitats monitoring from satellite sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(13), pp.2631–2644.
- Brown de Colstoun, E.C., Story, M.H., Thompson, C., Commisso, K., Smith, T.G. & Irons, J.R., 2003. National Park vegetation mapping using multitemporal Landsat 7 data and a decision tree classifier. *Remote Sensing of Environment*, 85, pp.316–327.
- Chan, J.C.-W., Chan, K.-P. & Yeh, A.G.-O., 2001. Detecting the Nature of Change in an Urban Environment: A Comparison of Machine Learning Algorithms. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(2), pp.213–225.
- Chauchard, S., Carcaillet, C. & Guibal, F., 2007. Patterns of Land-use Abandonment Control Tree-recruitment and Forest Dynamics in Mediterranean Mountains. *Ecosystems*, 10, pp.936–948.
- Chavez, P.S. Jr., 1988. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 24, pp.459–479.
- Chen, T., Niu, R., Wang, Y., Zhang, L. & Du, B., 2011. Percentage of Vegetation Cover Change Monitoring in Wuhan Region Based on Remote Sensing. *Procedia Environmental Sciences*, 10, pp.1466–1472.
- Chhabra, A., Geist, H., Houghton, R.A., Haberl, H., Braimoh, A.K., Vlek, P.L.G., Patz, J., Xu, J., Ramankutty, N., Coomes, O. & Lambin, E.F., 2006. Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change. In: E.F. Lambin & H. Geist, eds. 2006. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer. Ch.4.
- Copernicus, 2016. *Land Monitoring Services. CORINE Land Cover*. [online] [24 Οκτωβρίου 2016] Διαθέσιμο στο: <<http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>> [Πρόσβαση 27 Οκτωβρίου 2016].

- Coppin, P.R. & Bauer, M.E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews*, 13(3–4), pp.207–234.
- Coppin, P.R., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. & Lambin, E., 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), pp.1565–1596.
- Cortijo, F.J. & Perez de la Blanca, N., 1997. A comparative study of some non-parametric spectral classifiers. Applications to problems with high-overlapping training sets. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), pp.1259–1275.
- Crapper, P.F. & Hynson, K.C., 1983. Change Detection Using Landsat Photographic Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 13, pp.291–300.
- DeFries, R.S., Hansen, M.C., Townshend, J.R.G., Janetos, A.C. & Loveland, T.R., 2000. A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing. *Global Change Biology*, 6, pp.247–254.
- Dewan, A.M. & Yamaguchi, Y., 2009. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 29, pp.390–401.
- Di Gregorio, A. & Jansen, L.J.M., 2000. *Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual for Software Version 1.0*. [online] Rome: FAO. Διαθέσιμο στο: <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/X0596e00.htm#P-1_0> [Πρόσβαση 6 Δεκεμβρίου 2015].
- Díaz-Varela, R.A., Ramil-Rego, P., Calvo-Iglesias, S. & Muñoz Sobrino, C., 2008. Automatic habitat classification methods based on satellite images: A practical assessment in the NW Iberia coastal mountains. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144, pp.229–250.
- EEA (European Environment Agency), 2010. *The European environment – state and outlook 2010: land use*. [pdf] Copenhagen: EEA. Διαθέσιμο στο: <<http://www.eea.europa.eu/soer/europe/land-use>> [Πρόσβαση 6 Δεκεμβρίου 2015].
- EEA, 2015a. *Natura 2000 – Standard Data Form, GR2130011, Kentriko Zagori kai Anatoliko Tmima Orous Mitsikeli*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=GR2130011>> [Πρόσβαση 6 Δεκεμβρίου 2015].

EEA, 2015b. *Natura 2000 – Standard Data Form, GR2130009, Oros Tymfi (Gkamila)*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=GR2130009>> [Πρόσβαση 6 Δεκεμβρίου 2015].

EEA, 2015c. *Natura 2000 – Standard Data Form, GR2130001, Ethnikos Drymos Vikou – Aoou*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=GR2130001>> [Πρόσβαση 7 Δεκεμβρίου 2015].

ENVI User's Guide, 2009. *ENVI on-line software user's manual*. ITT Visual Information Solutions.

FAO, 2015. *Global Forest Resources Assessment 2015: How are the world's forests changing?*. [pdf] Rome: FAO. Διαθέσιμο στο: <http://docs.dpaq.de/9558-global_forestry_resources_assesment_fra_-2.pdf> [Πρόσβαση 27 Μαρτίου 2016].

Forster, M., Zebisch, M., Wagner-Lucker, I., Schmidt, T., Renner, K. & Neubert, M., 2014. Remote Sensing-Based Monitoring of Potential Climate-Induced Impacts on Habitats. In: S. Rannow & M. Neubert, eds. 2014. *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change*. Advances in Global Change Research, Volume 58. Dordrecht/Heidelberg/New York/London: Springer. Ch.7.

Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H., Woodcock, C.E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F. & Schaaf, C., 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp.287–302.

Gartzia, M., Alados, C.L., Pérez-Cabello, F. & Bueno, C.G., 2013. Improving the Accuracy of Vegetation Classifications in Mountainous Areas: A Case Study in the Spanish Central Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 33(1), pp.63–74.

Geist, H., McConnell, W., Lambin, E.F., Moran, E., Alves, D. & Rudel, T., 2006. Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. In: E.F. Lambin & H. Geist, eds. 2006. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer. Ch.3.

Geodata.gov.gr, 2015. *Δεδομένα*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://geodata.gov.gr/dataset>> [Πρόσβαση 7 Μαρτίου 2015].

Ghose, M.K., Pradhan, R. & Ghose, S.S., 2010. Decision Tree Classification of Remotely Sensed Satellite Data using Spectral Separability Matrix. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 1(5), pp.93–101.

Google Inc. (Incorporated), 2016. Google Earth. [computer program] Google Inc. Διαθέσιμο στο: <<https://www.google.com/intl/el/earth/>> [Πρόσβαση 7 Μαρτίου 2016].

Griffiths, P., Kuemmerle, T., Baumann, M., Radeloff, V.C., Abrudan, I.V., Lieskovsky, J., Munteanu, C., Ostapowicz, K. & Hostert, P., 2014. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sensing of Environment*, 151, pp.72–88.

Hansen, M., Dubayah, R. & DeFries, R., 1996. Classification trees: an alternative to traditional land cover classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 17(5), pp.1075–1081.

Hansen, M.C., DeFries, R.S., Townshend, J.R.G. & Sohlberg, R., 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), pp.1331–1364.

Hansen, M.C., DeFries, R.S., Townshend, J.R.G., Carroll, M., Dimiceli, C. & Sohlberg, R.A., 2003. Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. *Earth Interactions*, [e-journal] 7, pp.1–15. [http://dx.doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:GPTCAA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:GPTCAA>2.0.CO;2).

Hudak, A.T. & Wessman, C.A., 2000. Deforestation in Mwanza District, Malawi, from 1981 to 1992, as determined from Landsat MSS imagery. *Applied Geography*, 20, pp.155–175.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000. *Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Summary for Policymakers*. [pdf] Montreal: IPCC. Διαθέσιμο στο: <<https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>> [Πρόσβαση 14 Δεκεμβρίου 2015].

ITT Visual Information Solutions, 2009. ENVI (4.7). [computer program] ITT Visual Information Solutions.

J-spacesystems, 2012. *ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM)*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html>> [Πρόσβαση 12 Σεπτεμβρίου 2015].

Jensen, J.R., 1983. Biophysical Remote Sensing. *Annals of the Association of American Geographers*, 73(1), pp.111–132.

Johnston, C.A., 1998. *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στην Οικολογία*. Μεταφράστηκε από τα Αγγλικά από τους Ι.Ν. Βογιατζάκη & Α. Μαλούνη. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

- Jones, H.G. & Vaughan, R.A., 2010. *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. New York: Oxford University Press.
- Joseph, G., 1996. Imaging sensors for remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 13(3–4), pp.257–342.
- Kadmon, R., 2001. Remote Sensing and Image Processing. In: S.A. Levin, ed. 2001. *Encyclopedia of Biodiversity, Volume 5*. San Diego: Academic Press. pp.121–143.
- Kallimanis, A.S., Touloumis, K., Tzanopoulos, J., Mazaris, A.D., Apostolopoulou, E., Stefanidou, S., Scott, A.V., Potts, S.G. & Pantis, J.D., 2015. Vegetation coverage change in the EU: patterns inside and outside Natura 2000 protected areas. *Biodiversity and Conservation*, 24(3), pp.579–591.
- Keshtkar, H.R., Azarnivand, H., Arzani, H., Alavipanah, S.K. & Mellati, F., 2013. Land Cover Classification Using IRS-1D Data and a Decision Tree Classifier. *Desert*, 17, pp.137–146.
- Kolios, S. & Stylios, C.D., 2013. Identification of land cover/land use changes in the greater area of the Preveza peninsula in Greece using Landsat satellite data. *Applied Geography*, 40, pp.150–160.
- Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Knorn, J., Radeloff, V.C., Kruhlov, I., Keeton, W.S. & Hostert, P., 2009. Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sensing of Environment*, 113, pp.1194–1207.
- Lambin, E.F., 2001. Remote Sensing and Geographic Information Systems Analysis. In: N.J. Smelser & P.B. Baltes, eds. 2001. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Amsterdam: Elsevier. pp.13150–13155.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T.A., Vogel, C. & Xu, J., 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, pp.261–269.
- Lambin, E.F., Geist, H. & Rindfuss, R.R., 2006. Introduction: Local Processes with Global Impacts. In: E.F. Lambin & H. Geist, eds. 2006. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer. Ch.1.
- Lasanta-Martinez, T., Vicente-Serrano, S.M. & Cuadrat-Prats, J.M., 2005. Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25, pp.47–65.

- Lasanta, T. & Vicente-Serrano, S.M., 2012. Complex land cover change processes in semiarid Mediterranean regions: An approach using Landsat images in northeast Spain. *Remote Sensing of Environment*, 124, pp.1–14.
- Liu, K, Li, X., Shi, X. & Wang, S., 2008. Monitoring mangrove forest changes using remote sensing and GIS data with decision-tree learning. *Wetlands*, 28(2), pp.336–346.
- Loveland, T.R. & Dwyer, J.L., 2012. Landsat: Building a strong future. *Remote Sensing of Environment*, 122, pp.22–29.
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E. & Moran, E., 2002. Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), pp.2651–2671.
- Lu, D. Corresponding author, Mausel, P., Brondízio, E. & Moran, E., 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), pp.2365–2407.
- Mallinis, G., Emmanoloudis, D., Giannakopoulos, V., Maris, F. & Koutsias, N., 2011. Mapping and interpreting historical land cover/land use changes in a Natura 2000 site using earth observational data: The case of Nestos delta, Greece. *Applied Geography*, 31, pp.312–320.
- Markogianni, V., Dimitriou, E. & Kalivas, D.P., 2013. Land-use and vegetation change detection in Plastira artificial lake catchment (Greece) by using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 34(4), pp.1265–1281.
- Mas, J.F., 1999. Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1), pp.139–152.
- Mathieu, R., Pouget, J., Cervelle, B. & Escadafal, R., 1998. Relationships between Satellite-Based Radiometric Indices Simulated Using Laboratory Reflectance Data and Typic Soil Color of an Arid Environment. *Remote Sensing of Environment*, 66, pp.17–28.
- Melesse, A.M., Weng, Q., Thenkabail, P.S. & Senay, G.B., 2007. Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling. *Sensors*, 7, pp.3209–3241, [online] Διαθέσιμο στο: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/7/12/3209>> [Πρόσβαση 4 Σεπτεμβρίου 2015].
- Meliadis, I., Platis, P., Ainalis, A. & Meliadis, M., 2010. Monitoring and analysis of natural vegetation in a Special Protected Area of Mountain Antichasia – Meteora, central Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163, pp.455–465.

- Meliadis, I. & Meliadis, M., 2011. Multi-temporal Landsat image classification and change analysis of land cover/use in the Prefecture of Thessaloniki, Greece. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 1(1), pp.15–25, [online] Διαθέσιμο στο: <[http://www.iaees.org/iaees/publications/journals/piaees/articles/2011-1\(1\)/](http://www.iaees.org/iaees/publications/journals/piaees/articles/2011-1(1)/)> [Πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2015].
- Mölders, N., 2012. *Land-Use and Land-Cover Changes: Impact on Climate and Air Quality*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Volume 44. Dordrecht/Heidelberg/London/New York: Springer.
- Olofsson, P., Foody, G.M., Stehman, S.V. & Woodcock, C.E., 2013. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, pp.122–131.
- Otukei, J.R. & Blaschke, T., 2010. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12S, pp.S27–S31.
- Pal, M. & Mather, P.M., 2003. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 86, pp.554–565.
- Paolini, L., Grings, F., Sobrino, J.A., Jiménez Muñoz, J.C. & Karszenbaum, H., 2006. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4), pp.685–704.
- Papageorgiou, K. & Vogiatzakis, I.N., 2006. Nature protection in Greece: an appraisal of the factors shaping integrative conservation and policy effectiveness. *Environmental Science & Policy*, 9, pp.476–486.
- Papastergiadou, E.S., Retalis, A., Kalliris, P. & Georgiadis, Th., 2007. Land use changes and associated environmental impacts on the Mediterranean shallow Lake Stymfalia, Greece. *Hydrobiologia*, 584(1), pp.361–372.
- Parmenter, A.W., Hansen, A., Kennedy, R.E., Cohen, W., Langner, U., Lawrence, R., Maxwell, B., Gallant, A. & Aspinall, R., 2003. Land use and land cover change in the Greater Yellowstone Ecosystem: 1975–1995. *Ecological Applications*, 13(3), pp.687–703.
- Potapov, P.V., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Krylov, A.M., McCarty, J.L., Radeloff, V.C. & Hansen, M.C., 2015. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 159, pp.28–43.

QGIS (Quantum Geographic Information System), 2015. QGIS (2.8.4 Wien). [computer program] A Free and Open Source Geographic Information System. Διαθέσιμο στο: <<http://www.qgis.org/en/site/>> [Πρόσβαση 27 Νοεμβρίου 2015].

Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chhabra, A., DeFries, R.S., Foley, J.A., Geist, H., Houghton, R.A., Klein Goldewijk, K., Lambin, E.F., Millington, A., Rasmussen, K., Reid, R.S. & Turner II, B.L., 2006. Global Land-Cover Change: Recent Progress, Remaining Challenges. In: E.F. Lambin & H. Geist, eds. 2006. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer. Ch.2.

Rannow, S. & Neubert, M. eds., 2014. *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change*. Advances in Global Change Research, Volume 58. Dordrecht/Heidelberg/New York/London: Springer.

Rees, W.G., Williams, M. & Vitebsky, P., 2003. Mapping land cover change in a reindeer herding area of the Russian Arctic using Landsat TM and ETM+ imagery and indigenous knowledge. *Remote Sensing of Environment*, 85, pp.441–452.

Rexer, M. & Hirt, C., 2014. Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, [e-journal] 61, pp.213–226. <http://dx.doi.org/10.1080/08120099.2014.884983>.

Richards, J.A., 2013. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. 5th ed. Heidelberg/New York/Dordrecht/London: Springer.

Riebsame, W.E., Meyer, W.B. & Turner II, B.L., 1994. Modeling Land Use and Cover as Part of Global Environmental Change. *Climatic Change*, 28(1), pp.45–64.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973. *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center), Type II Report for Period September 1973 – March 1973, Greenbelt, Maryland.

Sader, S.A., Hayes, D.J., Hepinstall, J.A., Coan, M. & Soza, C., 2001. Forest change monitoring of a remote biosphere reserve. *International Journal of Remote Sensing*, 22(10), pp.1937–1950.

Sala, O.E., Chapin III, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. & Wall, D.H., 2000. Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287(5459), pp.1770–1774.

- Sarkar, S. & Kafatos, M., 2004. Interannual variability of vegetation over the Indian sub-continent and its relation to the different meteorological parameters. *Remote Sensing of Environment*, 90, pp.268–280.
- Senapathi, D., Vogiatzakis, I.N., Jeganathan, P., Gill, J.A., Green, R.E., Bowden, C.G.R., Rahmani, A.R., Pain, D. & Norris, K., 2007. Use of remote sensing to measure change in the extent of habitat for the critically endangered Jerdon's Courser *Rhinoptilus bitorquatus* in India. *Ibis*, 149(2), pp.328–337.
- Serra, P., Pons, X. & Sauri, D., 2008. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 28, pp.189–209.
- Sesnie, S.E., Gessler, P.E., Finegan, B. & Thessler, S., 2008. Integrating Landsat TM and SRTM-DEM derived variables with decision trees for habitat classification and change detection in complex neotropical environments. *Remote Sensing of Environment*, 112, pp.2145–2159.
- Shahi, K., Shafri, H.Z.M. & Taherzadeh, E., 2014. A Novel Spectral Index for Automatic Shadow Detection in Urban Mapping Based On WorldView-2 Satellite Imagery. *International Journal of Computer, Control, Quantum and Information Engineering*, 8(10), pp.1635–1638.
- Sharma, R., Ghosh, A. & Joshi, P.K., 2013. Decision tree approach for classification of remotely sensed satellite data using open source support. *Journal of Earth System Science*, 122(5), pp.1237–1247.
- SIC (Satellite Imaging Corporation), 2015. *Satellite Sensors*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/>> [Πρόσβαση 14 Σεπτεμβρίου 2015].
- Skole, D. & Tucker, C., 1993. Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988. *Science*, 260(5116), pp.1905–1910.
- Song, C. & Woodcock, C.E., 2003. Monitoring Forest Succession With Multitemporal Landsat Images: Factors of Uncertainty. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), pp.2557–2567.
- Soulé, M.E., 1991. Conservation: Tactics for a Constant Crisis. *Science*, 253(5021), pp.744–750.
- Southworth, J. & Gibbes, C., 2010. Digital Remote Sensing within the Field of Land Change Science: Past, Present and Future Directions. *Geography Compass*, 4(12), pp.1695–1712.

Srivastava, P.K., Han, D., Rico-Ramirez, M.A., Bray, M. & Islam, T., 2012. Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation. *Advances in Space Research*, 50, pp.1250–1265.

Stevanovic, V., Tan, K. & Iatrou, G., 2003. Distribution of the endemic Balkan flora on serpentine I. – obligate serpentine endemics. *Plant Systematics and Evolution*, 242, pp.149–170.

The Return of the Neophron, 2015a. *SPA Central Zagori and eastern part of mount Mitsikeli*. [online] Διαθέσιμο στο: <http://lifeneophron.eu/en/SPA_CZEPMM.html> [Πρόσβαση 6 Δεκεμβρίου 2015].

The Return of the Neophron, 2015b. *SPA Tymfi (Gkamila) mountain*. [online] Διαθέσιμο στο: <http://lifeneophron.eu/en/SPA_TGM.html> [Πρόσβαση 6 Δεκεμβρίου 2015].

Thomlinson, J.R., Bolstad, P.V. & Cohen, W.B., 1999. Coordinating Methodologies for Scaling Landcover Classifications from Site-Specific to Global: Steps toward Validating Global Map Products. *Remote Sensing of Environment*, 70, pp.16–28.

Toulios, L.G., Yassoglou, N.J. & Moutsoulas, M., 1990. Land-use mapping in West Messinia, Greece, using satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 11(9), pp.1645–1661.

Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E. & Steininger, M., 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 18(6), pp.306–314.

USGS, 2015a. *Landsat Missions*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://landsat.usgs.gov/>> [Πρόσβαση 27 Αυγούστου 2015].

USGS, 2015b. *EarthExplorer*. [online] Διαθέσιμο στο: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> [Πρόσβαση 9 Σεπτεμβρίου 2015].

Vanden Borre, J., Paelinckx, D., Mùcher, C.A., Kooistra, L., Haest, B., De Blust, G. & Schmidt, A.M., 2011. Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat monitoring: Prospects on the way forward. *Journal for Nature Conservation*, 19, pp.116–125.

Wear, D.N., Turner, M.G. & Naiman, R.J., 1998. Land Cover Along an Urban-Rural Gradient: Implications for Water Quality. *Ecological Applications*, 8(3), pp.619–630.

Wessels, K.J., DeFries, R.S., Dempewolf, J., Anderson, L.O., Hansen, A.J., Powell, S.L. & Moran, E.F., 2004. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from

the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Pará State, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 92, pp.67–83.

Yang, X. & Lo, C.P., 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*, 23(9), pp.1775–1798.