



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΠΜΣ: ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εκτίμηση παραμέτρων βλάστησης δασικών οικοσυστημάτων με τη χρήση
δορυφορικών εικόνων**

Φοιτητής: Χριστόφορος Α. Καρανίκας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Περάκης

Βόλος
Ιούνιος 2018

Δήλωση

Βεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του ΤΜΧΠΠΑ και ότι στο πλαίσιο αυτού έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του ΠΘ ή και του ΤΜΧΠΠΑ.

Ημερομηνία: 4 Ιουνίου 2018

Όνοματεπώνυμο: Χριστοφορος Α. Καρανίκας

Υπογραφή:

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή αφορά στην εκτίμηση του ξυλαποθέματος δασικών οικοσυστημάτων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Μελετήθηκε η περίπτωση δάσους στον Κάτω Όλυμπο με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2. Από τα φασματικά κανάλια της εικόνας παρήχθησαν 20 δείκτες βλάστησης και οι τιμές των εικονοστοιχείων τους συσχετίστηκαν με το ξυλαπόθεμα στις δοκιμαστικές επιφάνειες. Με τις τιμές των εικονοστοιχείων ως ανεξάρτητες μεταβλητές και το ξυλαπόθεμα ως εξαρτημένη μεταβλητή και με διάφορους συνδυασμούς μεταξύ αυτών, χρησιμοποιώντας απλή γραμμική και πολλαπλή παλινδρόμηση, δημιουργήθηκαν μοντέλα πρόβλεψης του ξυλαποθέματος. Παράλληλα, εφαρμόστηκε επιβλεπόμενη ταξινόμηση καλύψεων γης με τη χρήση του αλγορίθμου Random Forests. Η αποτίμηση της ακρίβειας τόσο για την εκτίμηση του ξυλαποθέματος όσο και για την ταξινόμηση κυμάνθηκε σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Συνδυάζοντας το καλύτερο μοντέλο πρόβλεψης με τις δασοσκεπείς εκτάσεις της ταξινόμησης, παρήχθη τελικά ο χάρτης εκτίμησης ξυλαποθέματος για το συγκεκριμένος δάσος σε κλίμακα εικονοστοιχείου. Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από την παρούσα διατριβή είναι ότι η χρήση των δυνατοτήτων των δορυφορικών εικόνων συνιστά ένα χρήσιμο εργαλείο στη βελτίωση της εκτίμησης του ξυλαποθέματος κατά τη σύνταξη των διαχειριστικών μελετών.

Λέξεις κλειδιά: Τηλεπισκόπηση, Sentinel-2, Ξυλαπόθεμα, Random Forests, Διαχειριστική μελέτη, Μαύρη Πεύκη, Δρυς

ABSTRACT

In the current thesis the forest growing stock volume (GSV) is assessed through the application of imagery. A forest at Kato Olympos was studied with the use of a Sentinel-2 optical imagery. The pixel values responses of the original spectral bands and the produced vegetation indices were correlated with the GSV of the corresponding forest inventory plots. Several GSV regression models were developed using either linear regression analysis or multiple stepwise regression analysis. Supervised classification was also applied using Random Forests algorithm. The accuracy assessment for both the regression models and the classification was quite satisfactory. The implementation of the best regression model on the forested classes of the classification produced the GSV assessment map at pixel scale. A general conclusion drawn from the thesis is that the application of imagery in the planning of forest inventories improves the GSV assessment.

Keywords: Remote Sensing, Sentinel-2, Growing Stock Volume, Random Forests, Forest Inventory, *Pinus nigra*, *Quercus conferta*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ.....	ix
ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ	x
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	xi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	10
2.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	10
2.1.1 ΒΙΟΜΑΖΑ ΚΑΙ ΘΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	10
2.1.2 ΠΑΘΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	12
2.1.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	14
2.1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	15
2.1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	17
2.1.6 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ SENTINEL-2.....	17
2.1.7 ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	19
2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΛΥΨΕΩΝ ΓΗΣ ΜΕ ΤΥΧΑΙΑ ΔΑΣΗ (RANDOM FORESTS).....	25
2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	27
3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ	30
3.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	30
3.1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	30
3.1.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΟΥ	33
3.2 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ	37
3.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	37
3.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	38
3.2.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΕΙΚΤΕΣ.....	41
3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΞΥΛΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ	45
3.3.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ.....	45
3.3.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ.....	46
3.4 ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	48
3.4.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ RANDOM FORESTS.....	48
3.4.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ.....	50
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	52
4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΞΥΛΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	52
4.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1.....	52
4.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2.....	57
4.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3.....	60
4.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4.....	60
4.1.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ – ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	62
4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΛΥΨΕΩΝ ΓΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ RANDOM FORESTS	65
4.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΞΥΛΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ	71
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	75

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίν. 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών Sentinel-2 και οι κύριες χρήσεις τους (ESA, 2017a).....	19
Πίν. 2 Μελέτες εκτίμησης βιομάζας Μεσογειακών δασών (προσαρμοσμένο από Galidaki et al., 2017).....	20
Πίν. 3 Έκταση κυριότερων δασοπονικών ειδών.....	33
Πίν. 4 Δασοπονικά είδη και ξυλαπόθεμα ΔΕ	36
Πίν. 5 Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία με σύντομη περιγραφή τους και τον μαθηματικό του τύπο	41
Πίν. 6 Δοκιμαστικές επιφάνειες που εξαιρέθηκαν από την εξαγωγή τιμών των εικόνων ώστε να χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης... ..	45
Πίν. 7 Συγκεντρωτικά οι περιπτώσεις των διαφορετικών αναλύσεων για την κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης ξυλαποθέματος.....	46
Πίν. 8 Κλάσεις ταξινόμησης καλύψεων γης για το RF	48
Πίν. 9 Αποτελέσματα απλής γραμμικής παλινδρόμησης μόνο για τις ΔΕ με πεύκα	52
Πίν. 10 Το φασματικό κανάλι B3 (G) παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R^2 της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τα πεύκα.....	53
Πίν. 11 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για το πεύκο που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης	54
Πίν. 12 Αποτελέσματα απλής γραμμικής παλινδρόμησης μόνο για τις ΔΕ με δρυ	55
Πίν. 13 Ο δείκτης εδάφους TSAVI παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R^2 της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις δρυς	56
Πίν. 14 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για τη δρυ που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης	57
Πίν. 15 Αποτελέσματα απλής γραμμικής παλινδρόμησης συνολικά για τις ΔΕ με πεύκο και δρυ	57
Πίν. 16 Το φασματικό κανάλι B11 (SWIR1) παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R^2 της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για το πεύκο και τη δρυ συνολικά	58
Πίν. 17 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για το πεύκο και τη δρυ συνολικά, που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης	59
Πίν. 18 Το φασματικό κανάλι B11 και οι δείκτες MCARI και TSAVI επιλέχθηκαν κατά την ανάλυση της πολλαπλής παλινδρόμησης για το πεύκο και τη δρυ συνολικά.....	60
Πίν. 19 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για το πεύκο και τη δρυ συνολικά, που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της πολλαπλής παλινδρόμησης	61
Πίν. 20 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της αποτίμησης της ακρίβειας της πρόβλεψης ξυλαποθέματος για τις 4 περιπτώσεις.....	62
Πίν. 21 Έκταση ταξινομημένων κλάσεων	66
Πίν. 22 Πίνακας σφαλμάτων ταξινόμησης με τη χρήση των φασματικών καναλιών (B2 – B12 εκτός από B9 και B10).....	66

Πίν. 23 Πίνακας ακρίβειας ταξινόμησης για τα φασματικά κανάλια.....	67
Πίν. 24 Πίνακας σφαλμάτων ταξινόμησης με τη χρήση των φασματικών καναλιών (B2 – B12 εκτός από B9 και B10) και δεικτών βλάστησης	67
Πίν. 25 Πίνακας ακρίβειας ταξινόμησης για τα φασματικά κανάλια και τους δείκτες βλάστησης.....	68
Πίν. 26 Έκταση και ξυλαπόθεμα που εκτιμήθηκε με την παρούσα εργασία και οι αντίστοιχες τιμές από τη διαχειριστική μελέτη του δάσους.....	71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Διάγραμμα διασποράς και εξίσωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ του πεύκου (pinus).....	54
Διάγραμμα 2 Διάγραμμα διασποράς και εξίσωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ της δρυός (quercus)	56
Διάγραμμα 3 Διάγραμμα διασποράς και εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ του πεύκου και της δρυός συνολικά.	59
Διάγραμμα 4 Ξυλαπόθεμα προβλεπόμενο και από τη διαχειριστική μελέτη για κάθε συστάδα	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 1 Απεικόνιση από τον δορυφόρο Sentinel-2 της δασικής πυρκαγιάς στη Λίμνη Ευβοίας τον Ιούλιο του 2016 (RGB=B12, B8, B4).....	4
Εικ. 2 Sentinel-2 Μήκη κύματος φασματικών καναλιών X.Δ.Ι. 10 m (ESA, 2015).....	18
Εικ. 3 Sentinel-2 Μήκη κύματος φασματικών καναλιών X.Δ.Ι. 20 m (ESA, 2015).....	18
Εικ. 4 Sentinel-2 Μήκη κύματος φασματικών καναλιών X.Δ.Ι. 60 m (ESA, 2015).....	18
Εικ. 5 Διαδικασία κατασκευής των Random Forests (Τσιάρα, 2012).....	25
Εικ. 6 Διάγραμμα ροής βημάτων.....	29
Εικ. 7 Όρια και δασοκάλυψη του δάσους από δορυφορική εικόνα Sentinel-2. Πάνω μέρος RGB=B4, B3, B2 και κάτω μέρος RGB=B11, B8, B4.....	31
Εικ. 8 Οι θέσεις των ΔΕ στην έκταση του δάσους.....	34
Εικ. 9 Η περιοχή που καλύπτει η εικόνα Sentinel-2A που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μέσα από το περιβάλλον της πλατφόρμας SNAP.....	38
Εικ. 10 Παράμετροι που εισήχθησαν στο Sen2Cor.....	39
Εικ. 11 Παράμετροι επανασύστασης (resampling) της εικόνας.....	39
Εικ. 12 Περικοπή (subset) της εικόνας στην περιοχή ενδιαφέροντος.....	40
Εικ. 13 Αλλαγή του προβολικού συστήματος της εικόνας σε ΕΓΣΑ87. Διακρίνεται η χαρακτηριστική δεξιόστροφη περιστροφή της.....	41
Εικ. 14 Υπολογισμός των δεικτών μέσω του γραφήματος του GraphBuilder.....	43
Εικ. 15 Δημιουργία αρχείου δεικτών και φασματικών καναλιών μαζί, με τη χρήση του GraphBuilder.....	44
Εικ. 16 Περιοχές εκπαίδευσης των 4 κλάσεων για την ταξινόμηση με το RF.....	49
Εικ. 17 Παράμετροι ταξινόμησης RF.....	50
Εικ. 18 Κατανομή των τυχαίων σημείων (ROIs) στην περιοχή μελέτης. Πολλά ROIs βρίσκονται εκτός των ορίων του δάσους.....	51
Εικ. 19 Εικόνα πρόβλεψης ξυλαποθέματος δάσους με βάση το φασματικό κανάλι B11 μετά την εφαρμογή της Εξίσωσης 5.....	64
Εικ. 20 Ταξινόμηση RF καλύψεων γης του δάσους με βάση μόνο τα φασματικά κανάλια.....	65
Εικ. 21 Ταξινόμηση RF καλύψεων γης του δάσους με βάση τα φασματικά κανάλια τους δείκτες βλάστησης και εδάφους.....	66
Εικ. 22 Σύγκριση απόδοσης ταξινόμησης RF και ταξινόμησης διαχειριστικού χάρτη για τις συστάδες 8β και 9α. α) Εικόνα από το Google Earth, β) Ταξινόμηση RF και γ) Ταξινόμηση διαχειριστικού χάρτη.....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1 Το δημόσιο δάσος Κονόσπολης – Διάβας με τα τμήματα και τις συστάδες του	30
Χάρτης 2 Χάρτης πρόβλεψης ξυλαποθέματος δημοσίου δάσους Κονόσπολης - Διάβας σε εκτάσεις Δρυός και Μαύρης Πεύκης.....	74

ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ

BOA	Bottom Of Atmosphere
DBH	Diameter at Breast Height
ESA	European Space Agency
GIS	Geographic Information System
GSV	Growing Stock Volume
MSI	Multispectral Instrument
RF	Random Forests
RMSE	Root Mean Square Error
ROI	Region Of Interest
SAR	Synthetic Aperture Radar
TOA	Top Of Atmosphere
TOC	Top Of Canopy
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
ΔΕ	Δοκιμαστικές Επιφάνειες
ΗΜ	Ηλεκτρομαγνητικό
Χ.Δ.Ι.	Χωρική Διακριτική Ικανότητα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διατριβή θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν είτε άμεσα είτε έμμεσα στην ολοκλήρωσή της. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Περάκη για τον χρόνο που μου διέθεσε καθώς και για τις παρατηρήσεις και συμβουλές του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Γούσιο και την Καθηγήτρια κα. Όλγα Χριστοπούλου για την κριτική εξέταση της διατριβής.

Θα ήθελα να κάνω ιδιαίτερη μνεία και να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ιωάννη Φαρασλή, μέλος ΕΔΠΙ, για το χρόνο του, τις συμβουλές του και τη γενικότερη καθοδήγηση του. Ακόμη, τις θερμές μου ευχαριστίες οφείλω στο προσωπικό του Δασαρχείου Ελασσόνας και ειδικότερα στη κα. Ζωή Φτίκα, Δασάρχη του Δασαρχείου Ελασσόνας και Αναπλ. Γενική Διευθύντρια Δασών και Αγροτικών Υποθέσεων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Θεσσαλίας – Στ. Ελλάδας, για την ευγενική παραχώρηση των πρωτογενών στοιχείων της διαχειριστικής μελέτης.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στη σύζυγό μου, Βάσω, και στις δύο κορούλες μου, Σοφία και Ιωάννα, για την συμπαράσταση τους και την υπομονή τους για την απουσία μου από τις οικογενειακές υποχρεώσεις.

X.K.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες στα δάση και στις δασικές εκτάσεις οργανώνονται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια με γνώμονα την αειφορία και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Τα σχέδια αυτών των δραστηριοτήτων βασίζονται στην αειφορική διαχείριση των δασών, της οποίας οι πρακτικές είναι σχεδιασμένες για να διατηρούν και να ενδυναμώνουν την μακροπρόθεσμη υγεία των δασικών οικοσυστημάτων, παρέχοντας παράλληλα οικονομικές, κοινωνικές και πολιτιστικές ευκαιρίες προς όφελος της σημερινής γενιάς αλλά και των μελλοντικών γενεών (Canadian Council of Forest Ministers, 1995). Η αειφορική διαχείριση των δασών, πέρα από τις οικονομικές αξίες που καλείται να καλύψει, προσβλέπει και στη διατήρηση ή ακόμα και βελτίωση της ποικιλότητας των ειδών, της δομής, της λειτουργικότητας και της βιολογικής παραγωγικότητας των οικοσυστημάτων. Η ευρεία αποδοχή της αειφορικής διαχείρισης αποτελεί παράδειγμα σημαντικών αλλαγών εντός των κοινοτήτων της δασικής επιστήμης και της δασικής διαχείρισης και είναι απόρροια της ωρίμανσής τους (Franklin, 2001).

Οι αλλαγές αυτές, ήδη σηματοδοτούν μια διαφορά στην αλληλεπίδραση του ανθρώπου με τα φυσικά δασικά οικοσυστήματα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση πλέον στη διαχείριση με επιστημονικούς όρους και αναγνωρίζεται η ανάγκη της καλύτερης κατανόησης της λειτουργίας και των μοτίβων των οικοσυστημάτων (Landsberg and Coops, 1999) για ευρύτερες περιοχές και μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Kohm and Franklin, 1997). Η κατανόηση αυτή είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε φιλοσοφική στάση έχουμε απέναντι στο ρόλο των δασών, της διαχείρισής τους αλλά και της χρήσης τους από τον άνθρωπο. Η αειφορική διαχείριση έχει ανοίξει μια μεγάλη συζήτηση στη δασική επιστήμη, στην εφαρμοσμένη δασοπονία και στην κοινότητα των οικολόγων (Maser, 1994).

Τα τελευταία χρόνια, σε πολλά μέρη του κόσμου η εφαρμοσμένη διαχείριση προσαρμόζεται στις επιταγές της αειφορίας αλλάζοντας τον τρόπο επιλογής των ατόμων/δέντρων στις ανομήλικες συστάδες (κατ' άτομο επιλογή) και επίσης αλλάζοντας τη διαχείριση και στις ομήλικες συστάδες (αποψιλωτικές υλοτομίες, υπόσκιες υλοτομίες, σπερμοβλαστήματα κλπ). Ακόμη, οι περίτροποι χρόνοι έχουν αυξηθεί την ίδια στιγμή που μειώνεται το λήμμα. Οι αλλαγές, από το παραδοσιακό μοντέλο διαχείρισης όπου κεντρικό ρόλο έπαιζε μόνο η συγκομιδή της ξυλείας στο νέο μοντέλο όπου λαμβάνεται υπόψη η αειφορία, είναι εμφανείς. Η όλη διαδικασία των

αλλαγών της διαχείρισης των δασών υπόκειται σε συνεχή συζήτηση, κατανόηση, διευκρινήσεις και τελικά μετατροπές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πρόσφατη επικαιροποίηση των προδιαγραφών των διαχειριστικών μελετών για τα ελληνικά δάση (ΦΕΚ Β' 1420, 2018). Οι προηγούμενες προδιαγραφές, αν και προσωρινού χαρακτήρα, ίσχυαν εδώ και 70 χρόνια (Υπουργικές Αποφάσεις του 1953 και του 1965)!

Πάντως, το μέλλον της δασικής διαχείρισης παραμένει αβέβαιο, καθώς υπάρχουν πολλά ερωτήματα, μερικά εκ των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια όπως τα συνοψίζει ο Franklin (2001, p. 3). Θα μπορέσουν τα πρωτογενή και δευτερογενή προϊόντα να καλύψουν τις οικονομικές και κοινωνικές ανάγκες; Θα μπορέσουν οι δασολόγοι της πράξης να βρουν καλύτερους τρόπους διαχείρισης των δασών ώστε να καλύψουν αυτές τις ανάγκες; Θα μπορέσουμε να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά της δυναμικής των οικοσυστημάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε να ενσωματώσουμε τις φυσικές διεργασίες στην αειφορική διαχείριση των δασών; Θα μπορέσουν οι ανθρώπινες ανάγκες και τα δάση να συνυπάρξουν μέσα από την αειφορία;

Το μόνο που είναι βέβαιο, είναι η πληθώρα της επιστημονικής πληροφορίας που είναι απαραίτητο να αποκτηθεί για να στηρίξει τους αναδυόμενους σκοπούς και τις πρακτικές στη διαχείριση των δασών (Noss, 1999; Simberloff, 1999). Μεταξύ αυτών των σκοπών είναι η προσαρμοστικότητα της δασικής διαχείρισης σε συνεχώς νέες προκλήσεις και στόχους και η γνώση της αειφορικής διαχείρισης με τέτοιο τρόπο που να ανταποκρίνεται και στις μελλοντικές απαιτήσεις. Ένας ακόμη σκοπός, θα μπορούσε να είναι η γνώση της σημερινής κατάστασης των δασών και το πώς η διαχείριση και οι φυσικές διαδικασίες επηρεάζουν τα μελλοντικά αποτελέσματα. Για να εκπληρωθούν οι παραπάνω σκοποί, είναι απαραίτητη η απόκτηση καινούριας πληροφορίας, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους (Franklin, 2001, p. 4):

- Αύξηση της κατανόησης των δασών μέσα από πειράματα πεδίου, παρατηρήσεις σε μόνιμες δοκιμαστικές επιφάνειες (ΔΕ), ανάλυση των ιστορικών αποτελεσμάτων, θέματα ανάπτυξης και διαδοχής, παρατηρήσεις ανταγωνισμού και μοντέλα.
- Μετατροπή και ερμηνεία δεδομένων από καινούριες αλλά και από προϋπάρχουσες διαχειριστικές μελέτες.
- Ανάπτυξη και πρόσβαση σε δεδομένα άλλων πηγών περιφερειακής ή εθνικής κλίμακας όπως φυτοϋγειονομικά δίκτυα, οικολογικά δίκτυα, κλπ.

- Απόκτηση νέων δεδομένων και εννοιών μέσα από τη χρήση τεχνολογιών αιχμής όπως η είναι τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ – GIS), η δημιουργία βάσεων γεωχωρικών δεδομένων αλλά και της τηλεπισκόπησης.

Η εύρεση χωρικής πληροφορίας σχετικά με την παραγωγικότητα των δασών και τα οικολογικά προβλήματα/καταστροφές είναι σχετικά εύκολη. Για παράδειγμα, η χαρτογράφηση καμένων δασικών εκτάσεων ή δασικών εκτάσεων που έχουν ασθενήσει (μύκητες, έντομα κλπ), εκτάσεων που έχουν υλοτομηθεί αποψιλωτικά ή έχουν εκχερσωθεί είναι πλέον εφικτή με τους σύγχρονους δορυφόρους και τους αισθητήρες αυτών. Αυτό όμως που παραμένει σαν πρόβλημα, είναι η κατανόηση σε βάθος όλης αυτής της χωρικής πληροφορίας και η διερεύνηση των μοτίβων που δημιουργεί αυτή, ούτως ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λήψη μελλοντικών αποφάσεων που θα πρέπει να ληφθούν μέσα από μια επικαιροποιημένη δασική διαχείριση.

Για την επικαιροποίηση των μεθόδων της δασικής διαχείρισης είναι απαραίτητο καταρχάς, να εντοπιστούν τα υπάρχοντα προβλήματα, στη συνέχεια να περιγραφούν επακριβώς και τέλος, να προταθούν αλλαγές κυρίως μέσα από τη χρήση των νέων τεχνολογιών. Θεωρητικά, η πρόθεση των προτεινόμενων αλλαγών είναι να δημιουργηθούν δάση τα οποία θα είναι «καλύτερα» από αυτά που υπάρχουν σήμερα με τα παρόντα διαχειριστικά σχέδια (Erdle and Sullivan, 1998). Για τον εντοπισμό των προβλημάτων της σημερινής διαχείρισης των δασών, μπορούμε να διερευνήσουμε το γενικότερο πλαίσιο σύνταξης των διαχειριστικών μελετών και των ευκαιριών αναθεώρησης τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ζητήματα στα οποία μπορούν να υπάρξουν αλλαγές μέσα από τη χρήση των νέων τεχνολογιών και ειδικότερα την τηλεπισκόπηση (Franklin, 2001, p. 7).

Το βασικό μέρος μιας διαχειριστικής μελέτης αποτελεί ο χάρτης στον οποίο απεικονίζονται όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες. Στις διαχειριστικές μελέτες των ελληνικών δασών αυτοί οι χάρτες συνήθως έχουν κλίμακα 1:20.000. Η σημαντικότερη πληροφορία που παρέχεται μέσω των χαρτών είναι η χωρική κατανομή των ειδών βλάστησης ή η ταξινόμησής τους. Η βασική χρήση της τηλεπισκόπησης απαντάει σε αυτό ακριβώς το ζήτημα, καθώς παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις χρήσεις γης, τους διαφόρους τύπους δασών με βάση τη δομή τους και ακόμη τη σύνθεση των δασοπονικών ειδών. Ένα πεδίο το οποίο η σημερινή διαχείριση δεν μπορεί να καλύψει, αφορά στις ετήσιες αλλαγές που συμβαίνουν στο δάσος είτε σαν αποτέλεσμα των διαχειριστικών μέτρων (π.χ. αποψιλωτικές υλοτομίες) ή από φυσικές καταστροφές (π.χ. πυρκαγιές). Η χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων διαφορετικών ημερομηνιών λήψης

παρέχει τη δυνατότητα επικαιροποίησης των δεδομένων που απεικονίζονται στους διαχειριστικούς χάρτες, όπως για παράδειγμα τα αποτελέσματα των διαχειριστικών μέτρων (καθαρισμοί και καλλιέργεια συστάδων, δημιουργία αναδασώσεων). Επίσης, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατασκευή νέων δασικών δρόμων ή φραγμάτων, εντοπίζει τις πληγείσες περιοχές από ασθένειες των δασικών δέντρων ή από δασικές πυρκαγιές (Εικ. 1) ή ακόμη και από πλημμύρες.



Εικ. 1 Απεικόνιση από τον δορυφόρο Sentinel-2 της δασικής πυρκαγιάς στη Λίμνη Ευβοίας τον Ιούλιο του 2016 (RGB=B12, B8, B4)

Ένα ερώτημα, το οποίο δυστυχώς για την ελληνική πραγματικότητα δεν υφίσταται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ακόμη, είναι το κατά πόσο μπορεί να συγκριθούν τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης με αυτά που υπάρχουν ήδη στις διαχειριστικές μελέτες και είναι αποθηκευμένα σε GIS. Προφανώς, για κάποια είδη δεδομένων όπως η πυκνότητα μιας συστάδας, η ακρίβεια που παρέχεται από την τηλεπισκόπηση είναι παρόμοια με αυτήν των GIS. Για διαφορετικού τύπου δεδομένα όμως, όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας, τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης υπερτερούν.

Η χρήση των τηλεσκοπικών δεδομένων για τη βελτίωση των διαχειριστικών μελετών δεν σταματούν εδώ. Οι τηλεσκοπικές παρατηρήσεις που έχουν διαφορετική κλίμακα και διακριτική ικανότητα μπορούν να χρησιμοποιούνται παράλληλα για τη συνεχή εκτίμηση της κατάστασης των δασών από την κλίμακα της δοκιμαστικής επιφάνειας στην κλίμακα της συστάδας και μέχρι την κλίμακα ολόκληρου του οικοσυστήματος. Έτσι, μπορεί να εντοπιστεί το μοτίβο και η δομή ενός τοπίου και ακόμη να ποσοτικοποιηθούν οι παράμετροί του. Τέλος, μέσα από τη χρήση της τηλεπισκόπησης μπορούν εκτιμηθούν διάφορες μεταβλητές, όπως η βιομάζα, και να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την κατασκευή ή την επαλήθευση μοντέλων που να περιγράφουν τις λειτουργίες των δασικών οικοσυστημάτων.

Προφανώς, η τηλεπισκόπηση δεν καλύπτει όλες τις ανάγκες στη σύνταξη μιας διαχειριστικής μελέτης. Σαφώς και οι επίγειες παρατηρήσεις μέσα από τις ΔΕ είναι απαραίτητες και σίγουρα είναι πολύ χρήσιμες όλες οι πληροφορίες που είναι διαθέσιμες από αεροφωτογραφίες ή από παλιότερους χάρτες της περιοχής. Το ζητούμενο είναι η συνέργεια όλων των διαθέσιμων πόρων, και πλέον και των δορυφορικών δεδομένων, ώστε να συνταχθεί μια πληρέστερη διαχειριστική μελέτη η οποία θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες του δασολόγου της πράξης που θα χρειαστεί να την εφαρμόσει μελλοντικά.

Στην ελληνική πραγματικότητα το πνεύμα της σύνταξης των διαχειριστικών μελετών ακολουθεί την παγκόσμια τάση με εξαίρεση ίσως τη χρήση των νέων τεχνολογιών συνολικά. Όπως βέβαια αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι προδιαγραφές που ακολουθούνται είναι παλιές και δεν ανταποκρίνονται ούτε στους πολλαπλούς σκοπούς της σύγχρονης δασοπονίας αλλά ούτε και εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες που υπάρχουν σήμερα. Η παρούσα έρευνα επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στις τεχνολογικές δυνατότητες που είναι πλέον διαθέσιμες και που μπορούν να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της επίτευξης των στόχων που τίθενται σε κάθε διαχειριστική μελέτη.

Η διαδικασία και η μεθοδολογία σύνταξης μια διαχειριστικής μελέτης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το/τα δασοπονικό/κα είδος/ει που ενδημούν στο υπό μελέτη δάσος. Παρόλα αυτά, η γενική πορεία σύνταξης της μελέτης είναι συνήθως αυτή που περιγράφεται στη συνέχεια.

Τα βασικά σημεία σύνταξης της διαχειριστικής μελέτης ενός δάσους είναι η σύνταξη του διαχειριστικού χάρτη και ο υπολογισμός του ξυλαποθέματος. Για την κατασκευή του χάρτη, ο μελετητής βασίζεται στον αντίστοιχο χάρτη της διαχειριστικής

μελέτης της προηγούμενης χρονικής περιόδου (αν υπάρχει), στις διαθέσιμες αεροφωτογραφίες, στους διαθέσιμους ορθοφωτοχάρτες και στους διαθέσιμους τοπογραφικούς χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ). Απαραίτητη είναι η αυτοψία σε όλη σχεδόν την έκταση του δάσους, με ταυτόχρονη χρήση GPS, ώστε να διευκρινιστούν τα ασαφή όρια μεταξύ των συστάδων, να εντοπιστούν τα είδη των φυτών και τα όρια εξάπλωσής τους και οποιαδήποτε άλλα δεδομένα όπως είναι οι δρόμοι, τα μονοπάτια, τα εξωκλήσια ή άλλες θέσεις ενδιαφέροντος. Όλα αυτά τα δεδομένα μεταφέρονται σε ψηφιακό περιβάλλον, συνηθέστερα με τη χρήση λογισμικών CAD και λιγότερο συχνά με GIS.

Για την αποτύπωση των ορίων των δασοσκεπών εκτάσεων λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός συγκόμωσης μιας περιοχής. Όταν η συγκόμωση είναι αραιή, η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται ως μερικώς δασοσκεπής και συνήθως εξαιρείται από τις υλοτομίες καθώς θεωρείται ότι δεν υπάρχει αρκετό ξυλαπόθεμα και επιπλέον με την υλοτομία αυξάνονται αρκετά οι ασκεπείς εκτάσεις (προστασία του εδάφους και της αναγέννησης). Οι υπόλοιπες εκτάσεις που καλύπτονται από δασική βλάστηση υψηλής συγκόμωσης αποτελούν τις εκτάσεις στις οποίες εγκαθίστανται οι ΔΕ, υπολογίζεται το ξυλαπόθεμά τους και είναι αυτές στις οποίες τελικά θα εφαρμοστούν τα διαχειριστικά μέτρα υλοτομίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαχειριστικές μελέτες έχουν 10ετή ισχύ (σπανιότερα 5ετή) και συνήθως κάθε έτος υλοτομούνται μία ή περισσότερες συστάδες, καλύπτοντας έτσι όλο το χρονικό εύρος των 10 ετών.

Μετά τη σύνταξη του διαχειριστικού χάρτη, ακολουθεί ο υπολογισμός του όγκου της ξυλείας που υπάρχει μέσα σε κάθε συστάδα. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στην εγκατάσταση δοκιμαστικών επιφανειών σε όλη τη δασοσκεπή έκταση του δάσους με γνώμονα την ορθότερη αντιπροσώπευση του ξυλαποθέματος στο δάσος. Σε κάθε συστάδα που περιέχει δασοσκεπείς εκτάσεις εγκαθίσταται τουλάχιστον μια ΔΕ. Τα βασικά κριτήρια επιλογής της θέσης που θα εγκατασταθεί η ΔΕ είναι το δασοπονικό είδος, η πυκνότητα του δάσους, η έκθεση του ως προς το βορρά, η ποιότητα του εδάφους κλπ. Ο βασικός στόχος του μελετητή είναι η επιλεγείσα θέση να μην υπερεκτιμά αλλά ούτε και να υποεκτιμά το ξυλαπόθεμα. Πρέπει δηλαδή να αντιπροσωπεύει τη μέση κατάσταση της συστάδας. Ο αριθμός των ΔΕ και η έκταση που αυτές καλύπτουν, εξαρτάται από το εμβαδό της δασοσκεπούς έκτασης του δάσους και συνήθως είναι λίγο μεγαλύτερη από το 0,5% της συνολικής δασοσκεπούς έκτασης. Μέσα στην κάθε ΔΕ μετράται η διάμετρος και το ύψος των δέντρων και με τη χρήση αλλομετρικών εξισώσεων υπολογίζεται το ξυλαπόθεμα στο εκτάριο.

Στη συνέχεια, με βάση το διαχειριστικό χάρτη που κατασκευάστηκε στο προηγούμενο στάδιο, υπολογίζεται το ξυλαπόθεμα στην κλίμακα της συστάδας. Αυτό επιτυγχάνεται ουσιαστικά με την αναγωγή του ξυλαποθέματος της ΔΕ σε όλη τη δασοσκεπή έκταση της συστάδας, θεωρώντας ότι αφού η ΔΕ είναι ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα θα προσεγγίζει και το μέσο ξυλαπόθεμα της συστάδας.

Όμως, εδώ δημιουργούνται δύο ζητήματα:

- Η αποτύπωση της δασοσκεπούς έκτασης περιέχει σφάλματα καθώς είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστεί η δασοσκεπής από τη μερικώς δασοσκεπή έκταση με ακρίβεια. Ενδέχεται μέσα στη μερικώς δασοσκεπή έκταση να υπάρχουν θέσεις υψηλής συγκόμωσης και άρα πιο παραγωγικές ή και το αντίθετο, εντός των δασοσκεπών εκτάσεων να υπάρχουν θέσεις αραιής συγκόμωσης ή ακόμη και μικρά ασκεπή τμήματα. Επιπλέον, η ακρίβεια της χαρτογραφικής αποτύπωσης εξαρτάται από το διαθέσιμο υλικό το οποίο πολύ συχνά είναι αρκετά παλιό (συχνά και 10ετία) και στο μεσοδιάστημα έχουν επέλθει αλλαγές στα όρια των εκτάσεων (επέκταση δάσους, εκχερσώσεις κλπ). Όπως γίνεται αντιληπτό, η αναγωγή του ξυλαποθέματος της ΔΕ στην κλίμακα της συστάδας, εμπεριέχει ένα σημαντικό ποσοστό σφάλματος εξαιτίας της εσφαλμένης οριοθέτησης. Το ίδιο σφάλμα δημιουργείται και στην περίπτωση αδυναμίας αποτύπωσης των ασκεπών (γυμνών) επιφανειών μικρής έκτασης.
- Η επιλογή της θέσης που θα εγκατασταθεί μια ΔΕ βασίζεται στην αντιπροσωπευτικότητα της συγκεκριμένης έκτασης αλλά για παράδειγμα μια έκταση 500 στρεμμάτων θα έχει θέσεις πιο παραγωγικές (π.χ. στις βόρειες εκθέσεις) και θέσεις λιγότερο παραγωγικές (π.χ. στις ράχες). Ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχουν δύο ή περισσότερες ΔΕ εντός της ίδιας συστάδας και το συνολικό ξυλαπόθεμα εκτιμάται από το μέσο όρο του ξυλαποθέματος των ΔΕ δεν εκτιμάται η παραγωγικότητα της κάθε περιοχής. Συνεπώς, και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει σφάλμα στη συνολική εκτίμηση του ξυλαποθέματος εξαιτίας του διαφορετικού δυναμικού παραγωγικότητας των επιμέρους περιοχών.

Η τηλεπισκόπηση και ειδικότερα οι δορυφορικές εικόνες, μπορούν να συμβάλλουν στην εξάλειψη ή ελάττωση αυτών των σφαλμάτων. Με τη χρήση πρόσφατης λήψης δορυφορικών εικόνων είναι εφικτή η ταξινόμηση καταρχάς των δασοσκεπών εκτάσεων και στη συνέχεια των δασοπονικών ειδών με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, τα διαφορετικά φασματικά κανάλια που διαθέτουν οι δορυφορικές εικόνες καθώς και οι δείκτες που προκύπτουν από αυτά, μπορούν να συσχετιστούν με

την παραγωγή ξυλαποθέματος σε όλη την έκταση του δάσους. Άρα, η χρήση των δορυφορικών εικόνων στη σύνταξη μιας διαχειριστικής μελέτης δάσους μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των σφαλμάτων όπως αυτά περιγράφηκαν πιο πάνω και να οδηγήσει τελικά σε πιο ακριβή εκτίμηση του συνολικού ξυλαποθέματος.

Συνεπώς, ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης του ξυλαποθέματος ενός δάσους με τη χρήση των δορυφορικών εικόνων μέσα από μια διαδικασία χαμηλού οικονομικού κόστους. Προφανώς, ο σκοπός δεν είναι η αντικατάσταση της μέχρι σήμερα μεθοδολογίας στην σύνταξη των πινάκων του ξυλαποθέματος μιας διαχειριστικής μελέτης, παρά μάλλον η προσφορά επιπλέον πληροφορίας ώστε ο υπολογισμός του ξυλαποθέματος να γίνει πιο ακριβής. Οι επιμέρους στόχοι αναφέρονται στα στάδια και στις διαδικασίες που θα συνεισφέρουν στην επίτευξη του βασικού σκοπού και οι οποίοι είναι:

- Η εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης για τη χαρτογράφηση των κύριων δασοπονικών ειδών και των εκτάσεων που αυτά καταλαμβάνουν.
- Η εξέταση των συσχετίσεων μεταξύ του ξυλαποθέματος και των φασματικών καναλιών καθώς και του ξυλαποθέματος και των δεικτών βλάστησης.
- Η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης του ξυλαποθέματος.
- Η δημιουργία ενός χάρτη του εκτιμώμενου ξυλαποθέματος.
- Η χρήση λογισμικών ανοικτού κώδικα (open source) τα οποία προσφέρονται δωρεάν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά από ιδιώτες ή από τις δασικές υπηρεσίες, χωρίς κόστος, στην εκτίμηση του ξυλαποθέματος με τη χρήση δορυφορικών εικόνων.

Όσον αφορά στη δομή της εργασίας μετά την εισαγωγή και για τα επόμενα κεφάλαια, η διάρθρωση είναι η ακόλουθη. Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη βιομάζα και την τηλεπισκόπηση, τους παράγοντες που επιδρούν σε αυτή τη σχέση και επιπλέον παρουσιάζονται ορισμένες μελέτες περίπτωσης. Ακόμη, γίνεται αναφορά στην ταξινόμηση με τον αλγόριθμο Random Forests. Το 3^ο Κεφάλαιο αφορά στην εφαρμογή της μεθόδου. Ειδικότερα παρουσιάζονται τα πρωτογενή δεδομένα του πεδίου, η επιλογή και η επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας, η μεθοδολογία της κατασκευής και της αποτίμησης της ακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης και τέλος η διαδικασία εφαρμογής της ταξινόμησης Random Forests και η μεθοδολογία αποτίμησης της ακρίβειάς της.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατασκευής των μοντέλων πρόβλεψης ξυλαποθέματος και της ταξινόμησης κάλυψης γης καθώς κι η αποτίμησή τους. Επίσης, γίνεται η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου πρόβλεψης και της καλύτερης ταξινόμησης και παρουσιάζεται ο τελικός χάρτης εκτίμησης ξυλαποθέματος. Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εργασία και γίνονται ορισμένες προτάσεις βελτίωσης της μεθοδολογίας για περαιτέρω έρευνα.

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

2.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1.1 *ΒΙΟΜΑΖΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ*

Σε παγκόσμια κλίμακα, το ενδιαφέρον της διαχείρισης των δασικών οικοσυστημάτων εκτός από την παραγωγή ξυλείας, στρέφεται κυρίως στο ρόλο και στις επιδράσεις της βιομάζας στον κύκλο του άνθρακα, στις εναποθέσεις θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, στη συσσώρευση καύσιμης ύλης και στα ποικίλα ενδιαιτήματα. Σε αυτό το σημείο, είναι χρήσιμο να διευκρινιστούν οι όροι ξυλαπόθεμα και βιομάζα τους οποίους θα συναντήσουμε πολύ συχνά στη συνέχεια. Θα πρέπει να τονιστεί όμως ότι στην παρούσα εργασία, τους αποδίδεται η ίδια σημασία, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά.

Ξυλαπόθεμα καλείται ο όγκος (για μια δεδομένη επιφάνεια π.χ. τμήμα, συστάδα ή δάσος) όλων των ζωντανών δέντρων μεγαλύτερων μιας ελάχιστης διαμέτρου X εκ. στο στήθιαίο ύψος (1,3m) και συνήθως μετράται σε m^3/ha . Συμπεριλαμβάνει τον κορμό από το έδαφος μέχρι και την κορυφή του δέντρου με μια ελάχιστη διάμετρο Y cm. Επίσης, συνυπολογίζονται και τα κλαδιά μιας ελάχιστης διαμέτρου W cm. (FAO, 2004). Το ξυλαπόθεμα αποτελεί το βασικό στοιχείο για τον χαρακτηρισμό ενός δάσους ως παραγωγικού. Η γνώση του ξυλαποθέματος των διαφόρων ειδών που συνιστούν το δάσος είναι βασικής σημασίας για την παροχή ξυλείας για δασικά προϊόντα με αειφορικό τρόπο.

Ως βιομάζα ορίζεται η οργανική ύλη, υπέργεια ή υπόγεια, τόσο η ζωντανή όσο και η νεκρή (π.χ. δέντρα, καλλιέργειες, χλόες, ρίζες κλπ) (FAO, 2004). Στην «υπέργεια βιομάζα» συμπεριλαμβάνονται οι κορμοί των δέντρων, τα πρέμνα, τα κλαδιά, ο φλοιός, οι σπόροι και το φύλλωμα. Στην «υπόγεια βιομάζα» συμπεριλαμβάνονται όλες οι ζωντανές ρίζες μεγαλύτερες των 2mm. Τέλος, ως «νεκρό ξύλο» εννοούμε όλη τη μη-ζωντανή βιομάζα και η οποία μπορεί να είναι ιστάμενη ή κείμενη επί του εδάφους ή ακόμη και μέσα στο έδαφος. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα πεσμένα ξύλα στο έδαφος, οι νεκρές ρίζες κλπ (FAO, 2010). Η γνώση της ποσότητας της βιομάζας ενός δάσους είναι πολύ σημαντική γιατί από αυτή μπορεί να υπολογιστεί το απόθεμα του άνθρακα αλλά και οι εκπομπές των αερίων ρύπων που προκαλούνται από τις δασικές πυρκαγιές.

Η εκτίμηση της κατανομής της βιομάζας από τοπική σε περιφερειακή και τέλος σε παγκόσμια κλίμακα έχει τη σημασία της για τις εκπομπές του άνθρακα και τη δέσμευσή του, για την κατανόηση της επιρροής στην γονιμότητα των εδαφών και στην ανάσχεση της διάβρωσης και τέλος στην κατανόηση του ρόλου της στις περιβαλλοντικές διεργασίες και στην αειφορία (Foody, 2003). Πάντως, γνωρίζοντας το ειδικό βάρος του ξύλου ενός δέντρου είναι εύκολη η μετατροπή του όγκου σε βάρος (βιομάζα) και αντίστροφα. Έτσι, στη βιβλιογραφία συχνά δύο όροι έχουν την ίδια σημασία οπότε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία θα αναφερόμαστε στο ξυλαπόθεμα ή στην υπέργεια βιομάζα αποδίδοντάς τους την ίδια σημασία, εκτός αν διευκρινίζεται διαφορετικά, καθώς η διαδικασία που ακολουθείται στον υπολογισμό της υπέργειας βιομάζας είναι παρόμοια με τη διαδικασία υπολογισμού του ξυλαποθέματος.

Οι περισσότερες έρευνες εκτίμησης βιομάζας, αφορούν σε δάση κωνοφόρων (Trotter et al., 1997; Zheng et al., 2004) εξαιτίας της σχετικά απλής δομής τους και της σύνθεσης των ειδών σε σχέση με τα δάση πλατύφυλλων ή ακόμη χειρότερα με τα τροπικά δάση. Η εκτίμηση της βιομάζας μπορεί να γίνει είτε με μετρήσεις πεδίου ή με τη χρήση της τηλεπισκόπησης. Οι μετρήσεις του πεδίου έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και χρειάζεται μεγάλος αριθμός δειγμάτων ώστε να κατασκευαστούν τα μοντέλα πρόβλεψης. Όμως, η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί πολύ χρόνο, είναι ιδιαίτερα κουραστική καθώς συνήθως τα δέντρα καταστρέφονται ολοκληρωτικά ώστε να υπολογιστεί η μάζα τους και επιπλέον είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε απομονωμένες περιοχές. Από την άλλη, η τηλεπισκόπηση εκμεταλλεύομενη την επαναληψιμότητα στη συλλογή των δεδομένων, το συνοπτικό έλεγχο, την ψηφιακή μορφή των δεδομένων που επιτρέπει τη γρήγορη επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων και την επισκόπηση απομονωμένων περιοχών είναι καλύτερη επιλογή για την εκτίμηση της βιομάζας για μεγάλες εκτάσεις (Lu, 2006).

Οι αισθητήρες των δορυφόρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση της βιομάζας διακρίνονται στους παθητικούς και στους ενεργητικούς. Οι παθητικοί αισθητήρες δεν εκπέμπουν οι ίδιοι ακτινοβολία αλλά καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στα ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) φάσματος. Οι περισσότεροι εξ αυτών διαθέτουν πολυφασματικό σαρωτή ο οποίος καταγράφει το ΗΜ σήμα που προέρχεται από την επιφάνεια της γης. Επειδή η καταγραφή του σήματος γίνεται ταυτόχρονα σε διαφορετικά μήκη κύματος αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των φασματικών καναλιών των δορυφορικών εικόνων

(Περάκης et al., 2015). Αντιθέτως, οι ενεργητικοί αισθητήρες εκπέμπουν οι ίδιοι την ακτινοβολία «το σήμα της οποίας ανακλάται, διαθλάται ή διαχέεται στη γήινη επιφάνεια ή ατμόσφαιρα και το καταγράφουν στην επιστροφή του» (Περάκης et al., 2015). Στη συνέχεια θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στους παθητικούς αισθητήρες καθώς αυτοί αποτελούν το αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας.

Σε γενικές γραμμές, η βιομάζα υπολογίζεται άμεσα από τα τηλεσκοπικά δεδομένα τα οποία έχουν υποστεί στατιστική επεξεργασία με τη χρήση πολλαπλής παλινδρόμησης, πλησιέστερου-γείτονα Κ και νευρωνικών δικτύων (Foody et al., 2003; Steininger, 2000; Zheng et al., 2004) ή έμμεσα από παραμέτρους της κομοστέγης, όπως είναι η διάμετρος της κόμης, τα δεδομένα των οποίων και πάλι προέρχονται από πολλαπλή παλινδρόμηση τηλεπισκοπικών παρατηρήσεων ή από διάφορα μοντέλα ανάκλασης της κομοστέγης (Phua and Saito, 2003; Popescu et al., 2003).

2.1.2 ΠΑΘΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι αισθητήρες των δορυφόρων διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με την πηγή εκπομπής της ακτινοβολίας που καταγράφουν. Οι ενεργητικοί αισθητήρες εκπέμπουν την ακτινοβολία το σήμα της οποίας ανακλάται, διαχέεται ή διαθλάται στην επιφάνεια της γης και στη συνέχεια το καταγράφουν με την επιστροφή του. Οι πιο γνωστοί ενεργητικοί αισθητήρες είναι τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar – SAR). Αντιθέτως, οι παθητικοί αισθητήρες καταγράφουν την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται στα ορατά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) φάσματος. Οι παθητικοί αισθητήρες είναι εφοδιασμένοι με έναν πολυφασματικό σαρωτή ο οποίος καταγράφει το ΗΜ σήμα που προέρχεται από την ίδια περιοχή της επιφάνειας της γης, την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε διαφορετικά μήκη κύματος, παρέχοντας έτσι διαφορετικά φασματικά κανάλια μιας πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας (Περάκης et al., 2015).

Ένα πολύ χρήσιμο προϊόν των φασματικών καναλιών είναι οι δείκτες. Οι δείκτες είναι εικόνες που προκύπτουν μετά από μαθηματικές πράξεις μεταξύ των φασματικών καναλιών της ίδιας ή διαφορετικών εικόνων. Αυτές οι πράξεις μπορεί να είναι απλές όπως «Κανάλι 1 – Κανάλι 2» ή πιο σύνθετες όπως είναι οι λόγοι μεταξύ των καναλιών, π.χ. «Κανάλι 1/ Κανάλι 2». Οι πιο γνωστοί δείκτες τηλεπισκόπησης είναι οι δείκτες βλάστησης οι οποίοι εφαρμόζονται για την παρακολούθηση της βιομάζας και άλλων βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης (Περάκης et al., 2015). Οι δείκτες αυτοί

βασίζονται στην αλληλεπίδραση της ΗΜ ακτινοβολίας με τα φύλλα των φυτών. Έτσι, οι βιοφυσικές ιδιότητες των φυτών επηρεάζουν την απορρόφηση, ανάκλαση και μετάδοση της ΗΜ ακτινοβολίας στα διαφορετικά μήκη κύματος. Αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με τους δείκτες βλάστησης και την κατηγοριοποίησή τους μπορεί να αναζητήσει κανείς στο άρθρο των (Silleos et al., 2006).

Τα προϊόντα των παθητικών αισθητήρων διακρίνονται σε δεδομένα μικρής, μεσαίας και μεγάλης (υψηλής) χωρικής διακριτικής ικανότητας (Χ.Δ.Ι.). Τα δεδομένα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (μέγεθος εικονοστοιχείου μικρότερο από 5m) όπως είναι των δορυφόρων IKONOS και Quick Bird, χρησιμοποιούνται κυρίως για τη δημιουργία μοντέλων που σχετίζονται με παραμέτρους των δέντρων ή της κόμης τους (Lévesque and King, 2003, 1999) και αποτελούν σημαντική πηγή δεδομένων για την εκτίμηση της βιομάζας. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο ακρίβειας εφαρμογών που χρησιμοποιούν δεδομένα μεσαίας ή μεγάλης χωρικής διακριτικής ικανότητας. Στα μειονεκτήματά τους, συγκαταλέγεται η συχνή έλλειψη εικόνων στο υπέρυθρο φάσμα το οποίο είναι σημαντικό στην εκτίμηση της βιομάζας και επίσης η ύπαρξη σκιών στις εικόνες που οφείλονται στο ανάγλυφο και στην κόμη των δέντρων και οι οποίες δυσκολεύουν την ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης.

Οι αισθητήρες μεσαίας διακριτικής ικανότητας κυμαίνονται από 10 έως 100m. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι δορυφόροι Landsat αποτέλεσαν τον κυριότερο εκπρόσωπό αυτής της κατηγορίας ενώ πλέον και οι δορυφόροι Sentinel-2 αποτελούν μια αξιόπιστη πηγή. Οι δορυφόροι της συγκεκριμένης κατηγορίας αποτελούν τη βασική πηγή δεδομένων πολλών εφαρμογών, μεταξύ των οποίων και η εκτίμηση της βιομάζας σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση παραμέτρων της συστάδας όπως είναι η ηλικία, η βιομάζα και η στηθιαία διάμετρος. Ειδικότερα, για την εκτίμηση της βιομάζας χρησιμοποιούνται η γραμμική ή μη γραμμική παλινδρόμηση, η μέθοδος του πλησιέστερου γείτονα K και τα νευρωνικά δίκτυα (Lu, 2006). Σημαντική επίδραση στην εκτίμηση έχουν η πολυπλοκότητα της δομής του δάσους και οι σκιάσεις που οφείλονται στο ανάγλυφο και στην κόμη των δέντρων (Lu, 2005; Steininger, 2000). Στην εκτίμηση της βιομάζας, εκτός από τις τιμές ανάκλασης των εικόνων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι φασματικές υπογραφές και οι δείκτες βλάστησης. Για τη μέτρηση βιοφυσικών ιδιοτήτων προτείνεται χρήση των δεικτών βλάστησης καθώς αφαιρούν την ποικιλότητα που οφείλεται στη γεωμετρία της κόμης, στο φόντο του εδάφους, στη γωνία πρόπτωσης των ηλιακών ακτινών και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Blackburn and Steele, 1999).

Εντούτοις, δεν σχετίζονται σημαντικά όλοι οι δείκτες με τη βιομάζα. Γενικά πάντως, οι δείκτες βλάστησης φέρεται να μειώνουν τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας και της σκίασης κι έτσι να ισχυροποιείται η συσχέτιση βιομάζας – δεικτών βλάστησης, ειδικά σε θέσεις με πολύπλοκη δομή βλάστησης (Lu et al., 2004), αν και αυτό δεν είναι κανόνας (Chrysafis et al., 2017).

Τέλος, υπάρχουν οι δορυφόροι μικρής χωρικής διακριτικής ικανότητας, με μέγεθος εικονοστοιχείου μεγαλύτερο των 100m. Οι πιο γνωστοί είναι ο NOAA (AVHRR), ο SPOT VEGETATION και ο MODIS και οι χρήσεις τους στοχεύουν σε εθνική ή παγκόσμια κλίμακα. Η αδρομερής εκτίμηση της βιομάζας (Dong et al., 2003) ή άλλων ιδιοτήτων της βλάστησης εξισορροπείται από την μεγάλη έκταση που καλύπτουν και αυτό βρίσκει εφαρμογές σε επίπεδο χωρών όπου για παράδειγμα μπορεί να εκτιμηθεί η αλλαγή των χρήσεων γης (Potter, 1999). Πάντως, η χρήση των συγκεκριμένων δορυφόρων είναι σχετικά περιορισμένη καθώς η χωρική διακριτική ικανότητα δημιουργεί προβλήματα στην ταξινόμηση του κάθε εικονοστοιχείου και επιπλέον, λόγω του μεγέθους τους, είναι δύσκολο να συσχετιστούν αυτά με μετρήσεις του πεδίου.

2.1.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Η εκτίμηση της απόδοσης του μοντέλου πρόβλεψης και ο έλεγχος ακρίβειάς του, αποτελεί ένα απαραίτητο στάδιο στην όλη διαδικασία της εκτίμησης της βιομάζας. Αρκετές είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης, με κυριότερες τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 , για τα μοντέλα αναπτύσσονται με γραμμική ή πολλαπλή παλινδρόμηση, και την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root mean square error – RMSE). Γενικά, η απόδοση του μοντέλου κρίνεται από τις τιμές του R^2 και RMSE. Όσο υψηλότερο το R^2 και όσο μικρότερο το RMSE, τόσο καλύτερα είναι προσαρμοσμένο το μοντέλο στα δεδομένα των δοκιμαστικών επιφανειών.

Οι πλειοψηφία των μελετών, αποφεύγει να παρουσιάσει τον έλεγχο ακρίβειας είτε λόγω έλλειψης δεδομένων επαλήθευσης ή λόγω μεγάλης απόκλισης των αποτελεσμάτων. Ο έλεγχος ακρίβειας μπορεί να επιτευχθεί σε επίπεδο εικονοστοιχείου, σε επίπεδο τεμαχίου (π.χ. ΔΕ), σε επίπεδο πολυγώνου ή τέλος σε όλη την υπό μελέτη περιοχή. Έχει βρεθεί ότι ενώ μεμονωμένα εικονοστοιχεία που συμμετέχουν στον έλεγχο ακρίβειας δίνουν φτωχά αποτελέσματα, αθροίσματα (blocks) εικονοστοιχείων (π.χ.

παράθυρα 3x3 ή 5x5) αυξάνουν την ακρίβεια (Fazakas et al., 1999). Δηλαδή, όσο αυξάνεται η ελάχιστη μονάδα επιφάνειας που συμμετέχει στην εκτίμηση της βιομάζας ή του όγκου ξυλείας, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι η εκτίμηση της βιομάζας στο επίπεδο του εικονοστοιχείου περιέχει σφάλματα ασυμφωνίας των ΔΕ και της εικόνας. Σε αυτό το επίπεδο υπάρχουν σφάλματα στη μέτρηση των φυσικών παραμέτρων καθώς δεν μπορεί να εντοπιστεί με ακρίβεια η θέση. Επίσης, ένα εικονοστοιχείο που καλύπτει μια έκταση 30m x 30m (Landsat) ή 10m x 10m (Sentinel-2,) περιέχει ένα μίγμα πληροφορίας που αντιστοιχεί για παράδειγμα σε πολλά είδη βλάστησης. Πάντως, ο Lu (2006) προτείνει η εκτίμηση της βιομάζας να γίνεται με τη χρήση μιας μεγαλύτερης επιφάνειας ή ενός πολυγώνου, αντί του εικονοστοιχείου, ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια. Αντίθετα, οι Ohmann et al. (2014) ενώ και αυτοί βρήκαν ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άθροισμα εικονοστοιχείων που συμμετέχει στην εκτίμηση δασικών παραμέτρων τόσο ακριβέστερη είναι η εκτίμηση, θεωρούν το αποτέλεσμα ως σφάλμα (artifact) της μεθόδου.

2.1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Πολλοί παράγοντες επιδρούν στην εκτίμηση της βιομάζας. Όπως πάντα, ο οικονομικός παράγοντας παίζει το ρόλο του κι εδώ, ξεκινώντας από το κόστος αγοράς των εικόνων όταν αυτές δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμες. Βέβαια, η πλειοψηφία των μελετών βασίζεται στις δωρεάν δορυφορικές εικόνες (Landsat, Sentinel, κλπ). Όμως, η οργάνωση της όλης μελέτης/εφαρμογής συναντά οικονομικές δυσκολίες στη συλλογή των δεδομένων πεδίου. Ο αριθμός των ΔΕ και η έκταση της επιφάνειά τους, αυξάνουν κατακόρυφα το χρόνο εργασίας για τη συλλογή στοιχείων. Επίσης, η πρόσβαση στα απομακρυσμένα σημεία οδηγεί σε αύξηση του κόστους. Προφανώς, όσο περισσότερες και μεγαλύτερης έκτασης ΔΕ, τόσο καλύτερη εκτίμηση επιτυγχάνεται εις βάρος όμως της οικονομίας.

Ο κάθε δορυφόρος παρέχει δορυφορικές εικόνες με διαφορετική φασματική, ραδιομετρική, χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα. Ο μελετητής θα πρέπει να εξετάσει ποιες από όλες ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις της έρευνάς του και να τις επιλέξει. Στη συνέχεια, θα πρέπει να προβεί στις κατάλληλες ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις το οποίο αποτελεί μια επίπονη εργασία. Ειδικά για ορεινές περιοχές θα πρέπει να προβεί και σε τοπογραφικές διορθώσεις ώστε να μειωθούν οι επιδράσεις της κλίσης και της έκθεσης του εδάφους στην ανάκλαση της

βλάστησης. Εκτός όμως από την υψηλή ποιότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων, απαιτείται και υψηλή ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων του πεδίου.

Συνήθως, η βιομάζα των δέντρων υπολογίζεται από αλλομετρικές εξισώσεις που βασίζονται στη στήθια διάμετρο και/ή στο ύψος των δέντρων (Nelson et al., 1999). Αυτές οι μέθοδοι παράγουν σφάλματα εξαιτίας του διαφορετικού σκοπού των μετρήσεων πεδίου, της ασυνέπειας στις ημερομηνίες συλλογής των δεδομένων και της σύνθεσης των δασοπονικών ειδών. Οι Friedl et al. (2001) αναφέρουν για τα τηλεσκοπικά δεδομένα τρεις κύριες πηγές σφαλμάτων: α) σφάλματα που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία απόκτησης των εικόνων β) σφάλματα που δημιουργούνται από την εφαρμογή των τεχνικών επεξεργασίας της εικόνας και γ) σφάλματα που σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις της διακριτικής ικανότητας των οργάνων και της κλίμακας των οικολογικών διαδικασιών στο έδαφος. Ειδικότερα, στην εκτίμηση της βιομάζας, προκύπτει αβεβαιότητα από τη συλλογή των δεδομένων πεδίου, την ατμοσφαιρική διόρθωση, τα σφάλματα εγγραφής μεταξύ τηλεπισκοπικών δεδομένων και δεδομένων πεδίου, την επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών και τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα πρόβλεψης.

Σε δάση κωνοφόρων έχει βρεθεί υψηλή συσχέτιση μεταξύ των τιμών ανάκλασης και του όγκου ξυλείας όταν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προκύπτουν από το μέσο όρο ολόκληρης της συστάδας ($R^2=0.89$) (Ripple et al., 1991). Αντιθέτως, σε μελέτες όπου τα δεδομένα έχουν προκύψει από τις τιμές ανάκλασης σε κλίμακα εικονοστοιχείου, οι συντελεστές συσχετισμού R^2 που βρέθηκαν είχαν πολύ μικρότερες τιμές, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλου όγκου ξυλείας (Danson, 1987). Οι Trotter et al. (1997) εκτιμώντας το ξυλαπόθεμα σε φυτείες κωνοφόρων με τη χρήση εικόνων του δορυφόρου Landsat, σε κλίμακα εικονοστοιχείου, βρήκαν στατιστικώς σημαντικό αλλά χαμηλό συντελεστή προσδιορισμού $R^2 < 0,3$. Όταν χρησιμοποίησαν όμως το μέσο όρο των τιμών ανάκλασης σε επίπεδο συστάδας, η ακρίβεια της εκτίμησης βελτιώθηκε, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι για την επίτευξη ακρίβειας στην εκτίμηση του όγκου ξυλείας με τη χρήση εικόνων του Landsat απαιτείται μια ελάχιστη έκταση 40 ha. Πάντως, πολλές έρευνες διαχειριστικών μελετών με τη χρήση τηλεπισκόπησης παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές αλλά ασθενείς συσχετίσεις μεταξύ των τιμών ανάκλασης και του ξυλαποθέματος, με αυξανόμενη όμως ακρίβεια για μεγάλες περιοχές (Ahern et al., 1991; Franklin, 1986).

2.1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

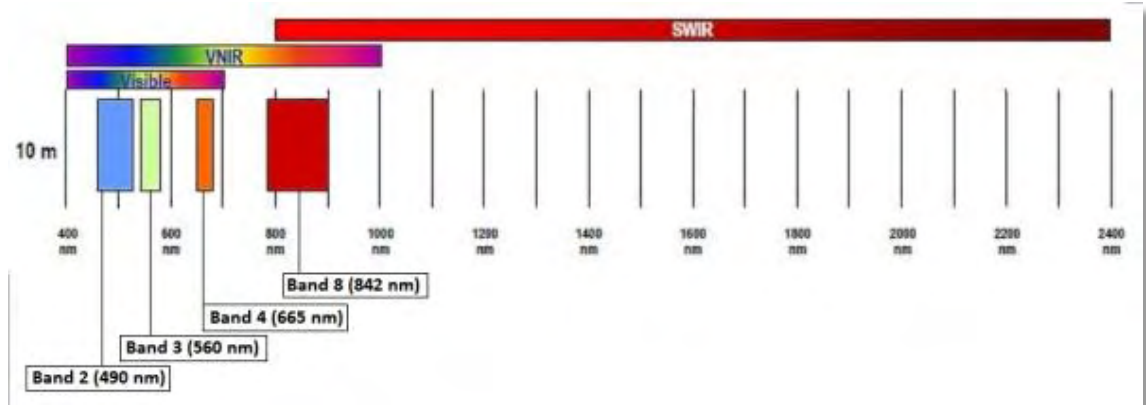
Πολλές μεταβλητές στην τηλεπισκόπηση όπως είναι οι φασματικές υπογραφές (φασματικά κανάλια), οι τροποποιημένες εικόνες και οι δείκτες βλάστησης μπορεί να είναι δυνητικές μεταβλητές εκτίμησης της βιομάζας. Η επιλογή της κατάλληλης μεταβλητής είναι ένα κρίσιμο στάδιο καθώς δεν συσχετίζονται όλες με τη βιομάζα. Θα πρέπει να εντοπιστούν εκείνες οι μεταβλητές με τη μεγαλύτερη συσχέτιση με τη βιομάζα και ταυτόχρονα με ασθενή συσχέτιση μεταξύ τους. Αν οι μεταβλητές παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους, τότε μειώνουν την απόδοση στην εκτίμηση της βιομάζας. Μεταξύ των στατιστικών μεθόδων για τον εντοπισμό των μεταβλητών που σχετίζονται με το ξυλαπόθεμα διακρίνονται η συσχέτιση, η απλή γραμμική παλινδρόμηση, η πολλαπλή παλινδρόμηση με κατά στάδια επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών (stepwise regression) και τα νευρωνικά δίκτυα.

Αφού εντοπιστούν οι καλύτερες ή η καλύτερη μεταβλητή, ακολουθεί η κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης της βιομάζας. Το κάθε μοντέλο έχει τα θετικά του και τις απαιτήσεις του στην εισαγωγή παραμέτρων. Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η χωρική διακριτική ικανότητα, η διαθεσιμότητα των δεδομένων των δοκιμαστικών επιφανειών, η κλίμακα της περιοχής, η διαθεσιμότητα του λογισμικού πακέτου όπως και οι γνώσεις και οι ικανότητες του μελετητή (Lu, 2006). Οι διάφοροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται ευρέως στην εκτίμηση της βιομάζας είναι πολλαπλή παλινδρόμηση, η μέθοδος του πλησιέστερου γείτονα K και τα νευρωνικά δίκτυα χωρίς να είναι ξεκάθαρο ποιος αλγόριθμος είναι πιο κατάλληλος για κάθε περίπτωση. Πάντως, η πλειοψηφία των ερευνών εικόνων μεσαίας διακριτικής ικανότητας χρησιμοποιεί την πολλαπλή παλινδρόμηση.

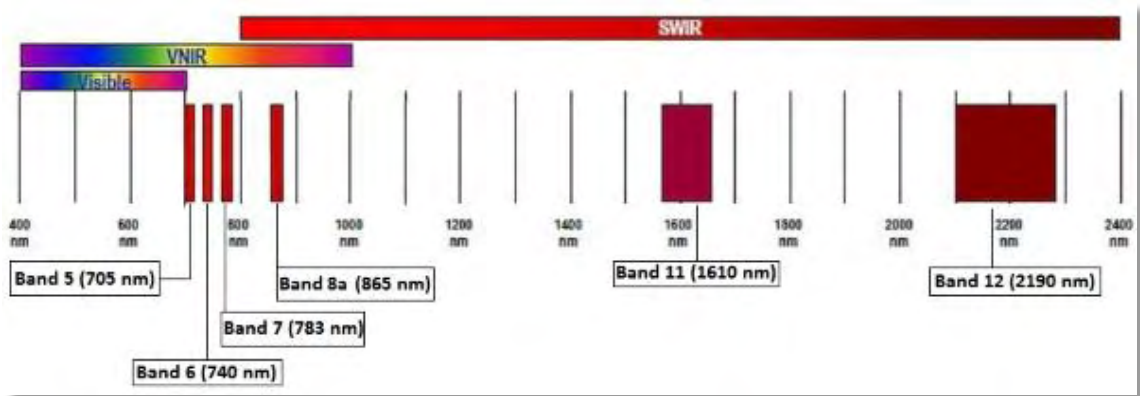
2.1.6 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ SENTINEL-2

Οι δορυφόροι Sentinel-2 αποτελούν ένα ζεύγος δορυφόρων (του 2A και του 2B) οι οποίοι επιχειρησιακά είναι η συνέχεια των δορυφόρων SPOT και Landsat. Οι δορυφόροι Sentinel-2 φέρουν όργανα πολυφασματικής απεικόνισης (MSI) για την παρακολούθηση και διαχείριση του περιβάλλοντος και ειδικότερα για τη μελέτη των υδάτων των υδρογραφικών δικτύων, της κάλυψης των εδαφών και της βλάστησης. Ο πρώτος εκ των δύο δορυφόρων, ο 2A, εκτοξεύτηκε στις 23-6-2015, ενώ ο δεύτερος, ο 2B, στις 7-3-2017. Έχουν έναν υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας πολυφασματικό σαρωτή με δεκατρία φασματικά κανάλια στο ορατό, στο εγγύς

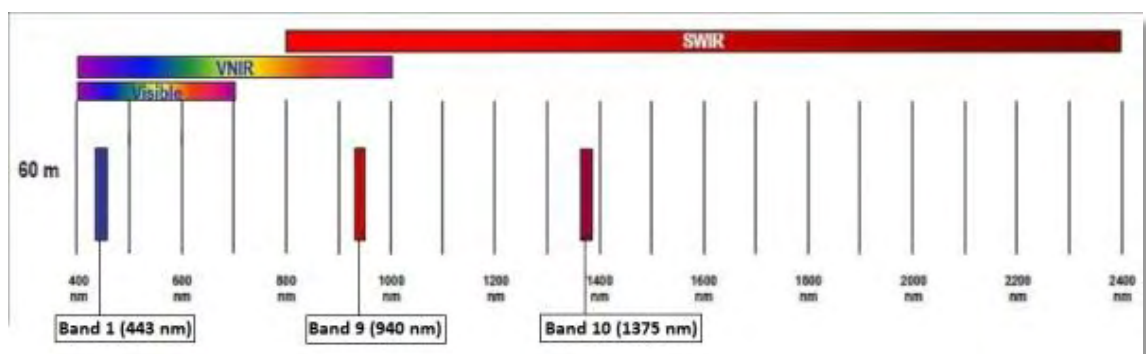
υπέρυθρο NIR και στο μικρό υπέρυθρο SWIR φάσμα: 4 κανάλια στα 10m (Εικ. 2), 6 κανάλια στα 20m (Εικ. 3) και 3 κανάλια στα 60m (Εικ. 4) και εύρος ανοίγματος σάρωσης (swath width) 290 km. Πετούν σε μέσο υψόμετρο περίπου στα 800 km και έχουν χρόνο επαναδιέλευσης στον ισημερινό τις 5 ημέρες.



Εικ. 2 Sentinel-2 Μήκη κύματος φασματικών καναλιών Χ.Δ.Ι. 10 m (ESA, 2015).



Εικ. 3 Sentinel-2 Μήκη κύματος φασματικών καναλιών Χ.Δ.Ι. 20 m (ESA, 2015).



Εικ. 4 Sentinel-2 Μήκη κύματος φασματικών καναλιών Χ.Δ.Ι. 60 m (ESA, 2015).

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών των δορυφόρων Sentinel-2, καθώς και η χρήση τους όπως αυτά παρουσιάζονται σε πρόσφατη τεχνική έκθεση της ESA (ESA, 2017a).

Πίν. 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φασματικών καναλιών Sentinel-2 και οι κύριες χρήσεις τους (ESA, 2017a)

Φασματικό κανάλι	Κέντρο λ nm	Φασματικό εύρος Δλ nm	Χ.Δ.Ι. m	Κύρια χρήση
B1 (Coastal aerosol)	443	20	60	Ατμοσφαιρική διόρθωση (διάχυση αερολύματος)
B2 (blue) (B)	490	65	10	Ευαισθησία στη γήρανση της βλάστησης, στα καρποτενοϊδή, στο φόντο του εδάφους και ατμοσφαιρική διόρθωση
B3 (green) (G)	560	35	10	Πράσινη κορυφή, ευαισθησία στη συνολική χλωροφύλλη
B4 (red) (R)	665	30	10	Μέγιστη απορρόφηση χλωροφύλλης
B5 (red edge 1) (RE1)	705	15	20	Θέση κόκκινης ακμής, ενδυνάμωση ατμοσφαιρικής διόρθωσης/γραμμής βάσης.
B6 (red edge 2) (RE2)	740	15	20	Θέση κόκκινης ακμής, ατμοσφαιρική διόρθωση, ανάκτηση φορτίου αερολύματος
B7 (NIR narrow 1) (NIR_{n1})	783	20	20	Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index/LAI), ακμή στο εγγύς υπέρυθρο
B8 (Near Infrared) (NIR)	842	115	10	LAI
B8A (NIR narrow 2) (NIR_{n2})	865	20	20	Επίπεδο NIR , ευαισθησία στη συνολική χλωροφύλλη, βιομάζα, LAI και πρωτεΐνες, αναφορά απορρόφησης υδρατμών, ανάκτηση φορτίου αερολυμάτων
B9 (Water Vapour)	945	20	60	Απορρόφηση υδρατμών, ατμοσφαιρική διόρθωση
B10 (Shortwave Infrared Cirrus)	1375	30	60	Ανίχνευση θυσάνων για ατμοσφαιρική διόρθωση
B11 (Shortwave Infrared 1) (SWIR1)	1610	90	20	Ευαισθησία σε λιγνίνη, άμυλο και υπέργεια δασική βιομάζα. Διαχωρισμός χιονιού/πάγου/σύννεφων
B12 (Shortwave Infrared 2) (SWIR2)	2190	180	20	Εκτίμηση Μεσογειακών συνθηκών βλάστησης. Διάκριση αργιλικών εδαφών για την παρακολούθηση της διάβρωσης. Διάκριση ανάμεσα σε ζωντανή βιομάζα, νεκρή βιομάζα και έδαφος (π.χ. αναγνώριση καμένων εκτάσεων)

2.1.7 ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Τα μεσογειακά οικοσυστήματα, εξαιτίας της περιορισμένης έκτασής τους από τη μια και της μειωμένης βιομάζας και αποθέματος άνθρακα από την άλλη, σε σχέση με τα τροπικά δάση έχουν τύχει περιορισμένου ενδιαφέροντος όσον αφορά στις επιστημονικές έρευνες σχετικά με το υπολογισμό της βιομάζας (Gratani et al., 2013). Γενικά, οι σχέσεις μεταξύ της υπέργειας βιομάζας και των φασματικών ιδιοτήτων των δορυφορικών εικόνων έχουν μελετηθεί σε ευρύ φάσμα οικοσυστημάτων και είναι κατά κύριο λόγο εξειδικευμένες για κάθε περιοχή (Foody et al., 2003; Gemmell, 1998). Οι δυσκολίες που υπάρχουν στο «χτίσιμο» αυτών των σχέσεων προκύπτουν από τις ιδιότητες των ίδιων των αισθητήρων (π.χ. γωνία πρόπτωσης, ραδιομετρική διακριτική ικανότητα), την επίδραση της ατμόσφαιρας (π.χ. σύννεφα, σωματίδια του αέρα), τη φαινολογία της βλάστησης, την τοπογραφία του εδάφους (Gemmell, 1998) και την ιδιαιτερότητα της δομής του δάσους αλλά και την ποικιλότητα της δασικής βλάστησης (Lu, 2005). Ειδικά στα μεσογειακά οικοσυστήματα που χαρακτηρίζονται από ανώμαλα

εδάφη και μεγάλη ετερογένεια στη βλάστηση (Salvador and Pons, 1998), αυτές οι σχέσεις είναι δύσκολο να χαρακτηριστούν (Cueva, 2008; Maselli et al., 2005).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες μελέτες εκτίμησης της βιομάζας που αφορούν κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά, σε Μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα. Σε αυτές τις μελέτες τονίζονται η περιγραφή των μοντέλων πρόβλεψης και οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού ή άλλων μεθόδων αποτίμησης της ακρίβειας των μοντέλων. Ακόμη, γίνονται αναφορές και στα δασοπονικά είδη που μελετώνται κάθε φορά. Στον επόμενο πίνακα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά μελέτες εκτίμησης βιομάζας Μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων ορισμένες από τις οποίες περιγράφονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

Πίν. 2 Μελέτες εκτίμησης βιομάζας Μεσογειακών δασών (προσαρμοσμένο από Galidaki et al. (2017))

Μελέτη	Τύπος βλάστησης	Αισθητήρας	Χ.Δ.Ι.	Μεταβλητές	Ακρίβεια μεθόδου / Συντελεστής προσδιορισμού
Alrababah et al., 2011	Δάσος	Landsat ETM, VHR αεροφωτογραφίες	30 m	Φασματικά κανάλια	$R^2=0.56$
(Calvão and Palmeirim, 2004)	Δασική έκταση	Landsat TM	30 m	Δείκτες βλάστησης	$R^2=0.74$
(Chirici et al., 2008)	Δασική έκταση	Landsat TM and ETM+	30 m	Φασματικά κανάλια	$R^2= 0.39$
(Chrysafis et al., 2017)	Δάσος	Sentinel-2A	10m & 20m	Φασματικά κανάλια και δείκτες βλάστησης	$R^2= 0.52$
Fernández-Manso et al., 2014	Δάσος	ASTER	30 m	Φασματικά κανάλια και δείκτες βλάστησης	$R_{adj}^2 = 0.63$
(Filella et al., 2004)	Δασική έκταση	Landsat TM	30 m	Δείκτες βλάστησης	$R^2 = 0.74$
(Gómez et al., 2014)	Δάσος	Landsat TM	30 m	Δείκτες βλάστησης	70% συνολική ακρίβεια
(Laurin et al., 2018)	Δάσος	Sentinel-1, ALOS2, Sentinel-2	20m	Εικόνες radar, φασματικά κανάλια και δείκτες βλάστησης	$R^2 = 0.70$
(Majasalmi and Rautiainen, 2016)	Δάσος	Sentinel-2A	10m & 20m	Δείκτες βλάστησης	$R^2 = 0.24$
(Mallinis et al., 2004)	Δάσος	Landsat TM	30 m	Φασματικά κανάλια και δείκτες βλάστησης	$R^2 = 0.16$
(Shoshany and Karnibad, 2011)	Δασική έκταση	Landsat TM	30 m	Δείκτες βλάστησης	$R^2 = 0.98$
(Sousa et al., 2015)	Δάσος	Quickbird	0.70 m	Φασματικά κανάλια	$R^2 = 0.67$
Vafaei et al., 2018	Δάσος	Sentinel-2A	10m &	Φασματικά	$R^2=0.58-0.70$

			20m	κανάλια και δείκτες βλάστησης	
(Zheng et al., 2014)	Δάσος	Landsat TM	30 m	Φασματικά κανάλια και δείκτες βλάστησης	$R^2 = 0.48$

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ξεκινά με μια σκανδιναβική μελέτη που παρουσιάζει τη χρησιμότητα των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων στη διαχείριση των δασικών οικοσυστημάτων. Ο συνδυασμός των δεδομένων των διαχειριστικών μελετών και των δορυφορικών εικόνων έχει γίνει πράξη στη Φιλανδία και στη Σουηδία ήδη από το 1990 (Tomppo et al., 2008) όπου παρακολουθούν μια σειρά από παράγοντες των δασικών οικοσυστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρακολουθούν ετησίως πάνω από 10.000 ΔΕ στις οποίες μετρούν περίπου 200 μεταβλητές. Ορισμένες ΔΕ είναι μόνιμες ενώ άλλες είναι προσωρινές, δημιουργώντας έτσι ένα πλέγμα το οποίο καλύπτει όλο το εύρος των δασικών οικοσυστημάτων της κάθε χώρας. Σε αυτές τις ΔΕ, μεταξύ άλλων, μετρώνται το ξυλαπόθεμα και η ηλικία των συστάδων ανά δασοπονικό είδος. Ένας από τους σκοπούς του όλου εγχειρήματος είναι η πρόβλεψη του όγκου της ξυλείας και για την επίτευξή του χρησιμοποιήθηκε, για πρώτη φορά μάλιστα, η μέθοδος του πλησιέστερου γείτονα-K (k -NN). Τα αποτελέσματα της εφαρμογής χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση φυσικών πόρων του δάσους, σε οικολογικές μελέτες καθώς και στο σχεδιασμό εφαρμογών στον ιδιωτικό τομέα. Μάλιστα, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της όλης διαδικασίας αποδεικνύεται από το γεγονός ότι οι δασικές βιομηχανίες είναι διατεθειμένες να αγοράσουν και να κάνουν χρήση των τελικών προϊόντων.

Η επόμενη έρευνα που παρουσιάζεται πραγματοποιήθηκε στην ελληνική επικράτεια και αφορά σε ένα από τα κυρίαρχα δασοπονικά είδη της περιοχής. Οι Mallinis et al. (2004) μελέτησαν δασικές παραμέτρους βλάστησης σε δάσος χαλεπίου πεύκης στη Χαλκιδική χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες Landsat TM. Οι παράμετροι που μελέτησαν ήταν η πυκνότητα του δάσους, η επιφάνεια των κορμών, η βιομάζα και ο όγκος ξυλείας. Σε όλη την έκταση του δάσους εγκατέστησαν 34 ΔΕ όπου μετρήθηκαν οι προηγούμενες παράμετροι. Οι στατιστικές αναλύσεις έγιναν σε δύο στάδια: α) στο πρώτο διερευνήθηκαν οι γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ των δασικών παραμέτρων και των φασματικών καναλιών ή των δεικτών βλάστησης και β) στο δεύτερο στάδιο διερευνήθηκε η πολλαπλή παλινδρόμηση μεταξύ των δασικών παραμέτρων και των φασματικών καναλιών ή των δεικτών βλάστησης. Από τα

αποτελέσματα προέκυψε πως τα περισσότερα μοντέλα δεν ήταν στατιστικώς σημαντικά. Ειδικότερα για τη γραμμική παλινδρόμηση και όσον αφορά στη βιομάζα και στο ξυλαπόθεμα ο δείκτης PVI έδωσε και για τις δυο περιπτώσεις το μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0,159$. Από την άλλη, η πολλαπλή παλινδρόμηση βελτίωσε κάπως τα αποτελέσματα, καθώς για τη βιομάζα ο συντελεστής προσδιορισμού έφτασε το $R^2=0,350$ ενώ για το ξυλαπόθεμα το $R^2=0,305$.

Στην ανατολική πλευρά της Μεσογείου και πιο συγκεκριμένα στη Β. Ιορδανία, οι Alrababah et al. (2011) μελέτησαν διάφορες δασικές παραμέτρους σε δάσος αείφυλλου δρυός και πεύκου. Χρησιμοποιώντας πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση κατασκεύασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της συγκόμωσης που βασιζόταν σε δορυφορικές εικόνες Landsat ETM και στο δείκτη TNDVI. Στη συνέχεια, με βάση αυτό το μοντέλο και χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά ένα μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης, επιδίωξαν να προβλέψουν διάφορες δασικές παραμέτρους, όπως τον όγκο (V) της βιομάζας που υπάρχει πάνω από την επιφάνεια της γης, το δείκτη ποικιλότητας Shannon (S) και την κυκλική επιφάνεια των κορμών (B). Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 που αφορά στην πρόβλεψη του όγκου της βιομάζας βρέθηκε ίσος με 0,56 ενώ το σφάλμα που προέκυψε με την επαλήθευση ανήλθε στο 17,1%.

Οι Zheng et al. (2014) μελέτησαν τη σχέση ξυλαποθέματος που υπολογίζεται από τις ΔΕ διαχειριστικών εκθέσεων και δεδομένων δορυφορικών εικόνων Landsat TM. Το υπό μελέτη δάσος αποτελούνταν κατά κύριο λόγο από πλατύφυλλα είδη, με κύριο τη δρυ και σε μικρότερο ποσοστό τη λεύκα. Οι ΔΕ είχαν εμβαδό 0,0667 Ha η κάθε μια και αριθμούσαν συνολικά τις 28. Οι δορυφορικές εικόνες μετά την επεξεργασία τους παρείχαν την ανακλαστικότητα των εικονοστοιχείων στην επιφάνεια του εδάφους (surface reflectance). Οι ερευνητές επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους στη σύγκριση των στατιστικών μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων τους. Για τη στατιστική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα φασματικά κανάλια, ορισμένοι δείκτες βλάστησης και άλλα χαρακτηριστικά της υφής της εικόνας. Το μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης, για την πρόβλεψη του ξυλαποθέματος, έδωσε μεγαλύτερο $R^2=0,482$ για το Κανάλι 1 (μπλε). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (stepwise regression) δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης με τρεις μεταβλητές το οποίο είχε $R^2=0,80$. Τέλος, έγινε χρήση και ενός νευρωνικού δικτύου (Back-propagation neural network) για τη δημιουργία μοντέλου πρόβλεψης, το οποίο είχε $R^2=1$ χωρίς όμως τη δυνατότητα διαχωρισμού του ποσοστού συμμετοχής της κάθε μεταβλητής.

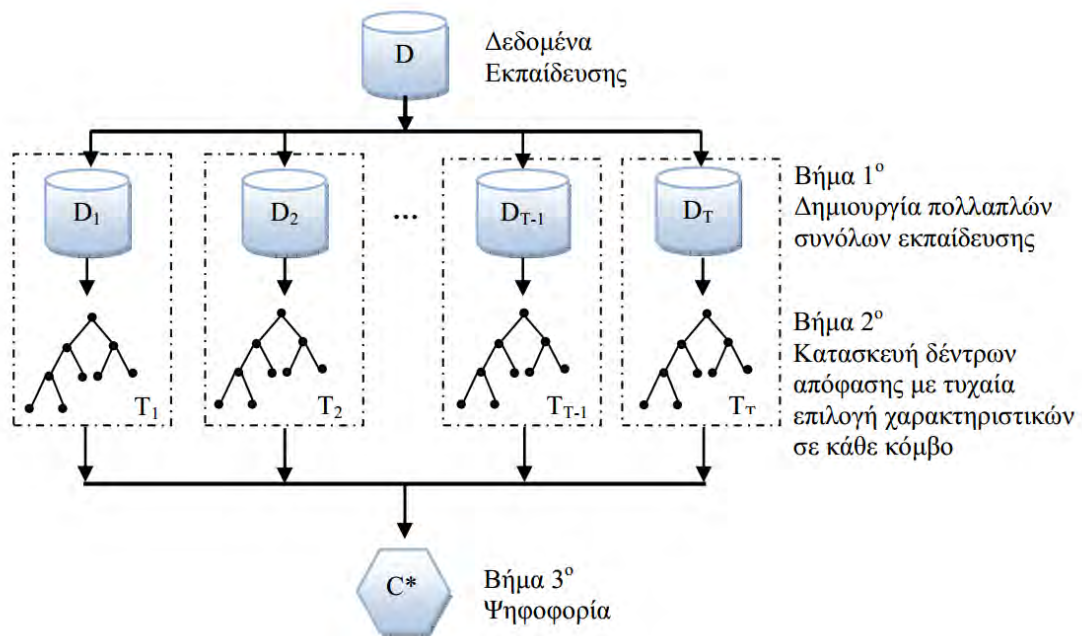
Σε μια ακόμη έρευνα στην ελληνική επικράτεια, οι Chrysafis et al. (2017) χρησιμοποίησαν δορυφορικές εικόνες Sentinel-2A για να εκτιμήσουν το ξυλαπόθεμα σε μια εκτεταμένη περιοχή στο Ν. Έβρου που περιελάμβανε κατά κύριο λόγο δάσος και σε μικρότερο βαθμό μερικώς δασοσκεπείς εκτάσεις, αγροτικές καλλιέργειες και χορτολιβαδικές εκτάσεις. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 112 ΔΕ, έκτασης 0,1 ha η κάθε μία, στις οποίες μετρήθηκε η στηθαία διάμετρος κάθε δέντρου και το ύψος του μέσου κορμού. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των κατάλληλων μορφαρίθμων υπολογίστηκε ο όγκος σε $m^3 ha^{-1}$. Ο όγκος του ξυλαποθέματος κάθε ΔΕ συσχετίστηκε με τη μέση τιμή ανάκλασης ενός παραθύρου 5x5 ή 3x3 (ανάλογα με τη χωρική διακριτική ικανότητα) για τα φασματικά κανάλια και τους δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν. Η κατασκευή των μοντέλων πρόβλεψης βασίστηκε στη γραμμική παλινδρόμηση και οι υψηλότεροι συντελεστές προσδιορισμού που προέκυψαν ήταν: για τα μεν φασματικά κανάλια (για το B11) $R^2=0,46$ και (για το B6) $R^2=0,38$, για τους δε δείκτες βλάστησης (για τον PVI) $R^2=0,31$ και επίσης (για τον EVI) $R^2=0,31$. Τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν με τη χρήση του μοντέλου παλινδρόμησης Random Forests που περιελάμβανε τα 10 φασματικά κανάλια δίνοντας συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0,63$.

Η χρήση των ενεργών δορυφορικών συστημάτων (SAR) στην πρόβλεψη της βιομάζας γίνεται όλο και πιο συχνή (Hüttich et al., 2014; Vaglio Laurin et al., 2016), αφού οι ενεργοί αισθητήρες, ανάλογα με το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής μικροκυματικής ακτινοβολίας, έχουν τη δυνατότητα να διαπερνούν το φύλλωμα και να ανακλώνται στα κλαδάκια ή στον κορμό των δέντρων ενός δάσους. Για παράδειγμα, η φασματική ζώνη C, που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι Sentinel-1, είναι ευαίσθητη στα μικρά κλαδιά και τα φύλλα των δένδρων, ενώ οι L και P εξαρτώνται από τα κλαδιά, τους κορμούς και το έδαφος (Παρχαρίδης, 2015, p. 124). Στην Ιταλία, συνδυάστηκαν οι δυνατότητες των εικόνων SAR που παρέχονται από το ζεύγος δορυφόρων Sentinel-1 με εικόνες SAR του δορυφόρου ALOS2 καθώς επίσης και με εικόνες του οπτικού δορυφόρου Sentinel-2 (Laurin et al., 2018). Για την κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης με κατά στάδια επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών (stepwise regression). Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η προσθήκη των φασματικών καναλιών του οπτικού δορυφόρου στο μοντέλο πρόβλεψης των εικόνων SAR αύξησε την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού της παλινδρόμησης ($R^2=0,7$). Τα φασματικά κανάλια Sentinel-2 που αύξησαν το συντελεστή προσδιορισμού ήταν το B6 στο φάσμα της κόκκινης ακμής (Red Edge –

RE) και τα B8 και B8A στο κοντινό υπέρυθρο (Near Infrared - NIR). Αυτή η φασματική περιοχή συνδέεται με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και συνεπώς τόσο με τον αριθμό των φύλλων όσο και με τη ζωτικότητα τους και τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Όπως επισημαίνουν οι Horler et al. (1983), η ανάκλαση στην περιοχή του φάσματος της κόκκινης ακμής επηρεάζεται από τον αριθμό των στρώσεων του φυλλώματος το οποίο και αντικατοπτρίζει το πάχος της κόμης, το δείκτη φυλλικής επιφάνειας και τη βιομάζα.

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΛΥΨΕΩΝ ΓΗΣ ΜΕ ΤΥΧΑΙΑ ΔΑΣΗ (RANDOM FORESTS)

Τα Τυχαία Δάση (Random Forests/RF) είναι ένας συνδυαστικός αλγόριθμος μάθησης για παλινδρόμηση και ταξινόμηση. Δεδομένου ότι είναι μια μέθοδος μηχανικής μάθησης, το RF είναι μη παραμετρικό αφού δε βασίζεται σε καμιά υπόθεση κατανομής δεδομένων. Αντίθετα από τις άλλες στατιστικές μεθόδους, η μηχανική μάθηση οδηγείται από τα δεδομένα και από τη σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων και των εξαρτημένων μεταβλητών (Breiman, 2001). Το RF είναι ένας συνδυασμός δέντρων πρόβλεψης ούτως ώστε κάθε δέντρο να εξαρτάται από τις τιμές ενός τυχαίου διανύσματος το οποίο επιλέγεται ανεξάρτητα και με την ίδια κατανομή με όλα τα δέντρα μέσα στο δάσος (Εικ. 5).



Εικ. 5 Διαδικασία κατασκευής των Random Forests (Τσιάρα, 2012)

Ο αλγόριθμος RF, εκτός των άλλων, έχει εφαρμοστεί και στην ταξινόμηση καλύψεων/χρήσεων γης με δορυφορικές εικόνες. Σε μια σύγκριση του RF με τρεις άλλους αλγόριθμους ταξινόμησης οι οποίοι ήταν ο αλγόριθμος Μηχανής Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines/SVM), ο αλγόριθμος Gentle Adaboost (GAB) και ο αλγόριθμος Ταξινόμησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Classification/MLC), τα αρχικά ευρήματα έδειξαν ότι ο RF έχει μεγαλύτερη ακρίβεια ταξινόμησης καλύψεων γης από τους άλλους τρεις αλγορίθμους, ειδικά στις αστικές περιοχές (Akar and Güngör, 2013). Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από τους

δορυφόρους Ikonos και Quickbird. Οι Mellor et al. (2013) εφάρμοσαν τον RF για να ταξινομήσουν την κάλυψη γης σε δύο κλάσεις, δασική και μη δασική, χρησιμοποιώντας εικόνες Landsat TM και MODIS της Πολιτείας Βικτώρια, στην Αυστραλία. Η ταξινόμηση είχε ποσοστό ακρίβειας 96% ($K=0,91$). Ο αλγόριθμος RF εφαρμόστηκε σε εικόνες WorldView-2 στην περιοχή της Αυστρίας για τον διαχωρισμό δασικών ειδών (Immitzer et al., 2012). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δασικά είδη διαχωρίστηκαν με ακρίβεια 82% ενώ κάποια είδη ήταν πιο εύκολα αναγνωρίσιμα.

Οι πρώτες εικόνες Sentinel-2 που ήταν διαθέσιμες στην Κ. Ευρώπη, χρησιμοποιήθηκαν για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση καλλιεργειών και δασικών οικοσυστημάτων με σκοπό τη διερεύνηση των δυνατοτήτων των φασματικών καναλιών του νέου δορυφόρου (Immitzer et al., 2016). Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν ξεχωριστά η αντικειμενοστραφής και η σημειακή (εικονοστοιχείου) ταξινόμηση αγροτικών εκτάσεων και δασών με τη χρήση του αλγόριθμου Random Forests. Τόσο για τις αγροτικές όσο και τις δασικές εκτάσεις, ο αριθμός των ειδών που μελετήθηκε ήταν ο ίδιος (7 αγροτικά και 7 δασικά είδη). Η συνολική ακρίβεια των ταξινομήσεων κυμάνθηκε από 65% για τις δασικές εκτάσεις (ταξινόμηση δέντρων) μέχρι και 76% για τις καλλιέργειες. Όσον αφορά στα δασικά είδη, ο διαχωρισμός των κωνοφόρων από τα πλατύφυλλα ήταν αρκετά πετυχημένος (93% σωστή ταξινόμηση), αλλά ο διαχωρισμός συνολικά των ειδών μεταξύ τους παρουσίασε προβλήματα καθώς οι φασματικές τους υπογραφές υπερκάλυπταν η μία την άλλη. Η διαφοροποίηση στο αποτέλεσμα της ταξινόμησης μεταξύ των αγροτικών καλλιεργειών και των δασικών ειδών οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ετερογένεια των δασικών οικοσυστημάτων και κατ'επέκταση στην ετερογένεια των αντίστοιχων κλάσεων ταξινόμησης. Διάφορες παράμετροι όπως η ηλικία των δέντρων, η πυκνότητα της συστάδας, ο βαθμός συγκόμωσης και η ύπαρξη υπορόφου έχουν άμεση επίδραση στη φασματική «συμπεριφορά» των κλάσεων των δασικών ειδών και στην ποικιλότητα εντός αυτών (Ozdemir, 2014). Η επιφάνεια της κομοστέγης ενός δάσους είναι πολύπλοκη με συχνές εναλλαγές φωτεινών και σκιερών θέσεων. Όλα τα παραπάνω δείχνουν τη δυσκολία που παρουσιάζουν τα δάση και οι δασικές εκτάσεις στην ταξινόμησή τους και στην εκτίμηση άλλων παραμέτρων βλάστησης σε σχέση με τις αγροτικές καλλιέργειες όπου τα φυτικά είδη είναι μορφολογικά ομοιόμορφα και η επιφάνεια που καταλαμβάνουν είναι σαφώς καθορισμένη.

2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε διακρίνεται σε 5 κύρια μέρη και αφορά στην επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων της διαχειριστικής μελέτης, στη λήψη και επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας, στη στατιστική επεξεργασία και παραγωγή του μοντέλου πρόβλεψης ξυλαποθέματος, στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση των καλύψεων γης και τέλος στο συνδυασμό των αποτελεσμάτων του μοντέλου πρόβλεψης και της ταξινόμησης.

Καταρχάς, έγινε η επεξεργασία των δεδομένων που ήταν διαθέσιμα από τη διαχειριστική μελέτη του δάσους. Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από τα δεδομένα μετρήσεων του πεδίου στις ΔΕ καθώς και από τον παραγόμενο χάρτη της διαχειριστικής μελέτης. Στα δεδομένα πεδίου, δηλαδή στα ογκομετρικά δεδομένα των ΔΕ, έγινε η κατάλληλη επεξεργασία ώστε το τελικό προϊόν να είναι ο όγκος σε κυβικά μέτρα (m^3) ανά δασοπονικό είδος και ανά εικονοστοιχείο για κάθε ΔΕ. Τα δεδομένα του διαχειριστικού χάρτη ήταν διαθέσιμα σε αρχείο μορφής cad (*.dwg). Στο αρχείο cad έγινε αρχική επιλογή των χρήσιμων δεδομένων (θέσεις ΔΕ, όριο δάσους, όρια συστάδων κλπ) και στη συνέχεια ακολούθησε ο καθαρισμός της τοπολογίας τους προτού μετατραπούν σε διανυσματικά (vector) αρχεία.

Η επιλογή της δορυφορικής εικόνας έγινε με κριτήριο τον δορυφόρο και την ημερομηνία λήψης. Έγινε αρχικά η προεπεξεργασία της εικόνας με τοπογραφική διόρθωση και μετατροπή σε ανάκλαση στην επιφάνεια του εδάφους και ακολούθησαν η επανασύσταση και η αποκοπή τμήματός της. Σε αυτή την εικόνα έγινε η εξαγωγή των τιμών ανάκλασης των εικονοστοιχείων στις θέσεις των ΔΕ και παράλληλα δημιουργήθηκαν οι εικόνες 20 δεικτών βλάστησης. Στο τέλος, έγινε αλλαγή προβολικού συστήματος αναφοράς με σκοπό την εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

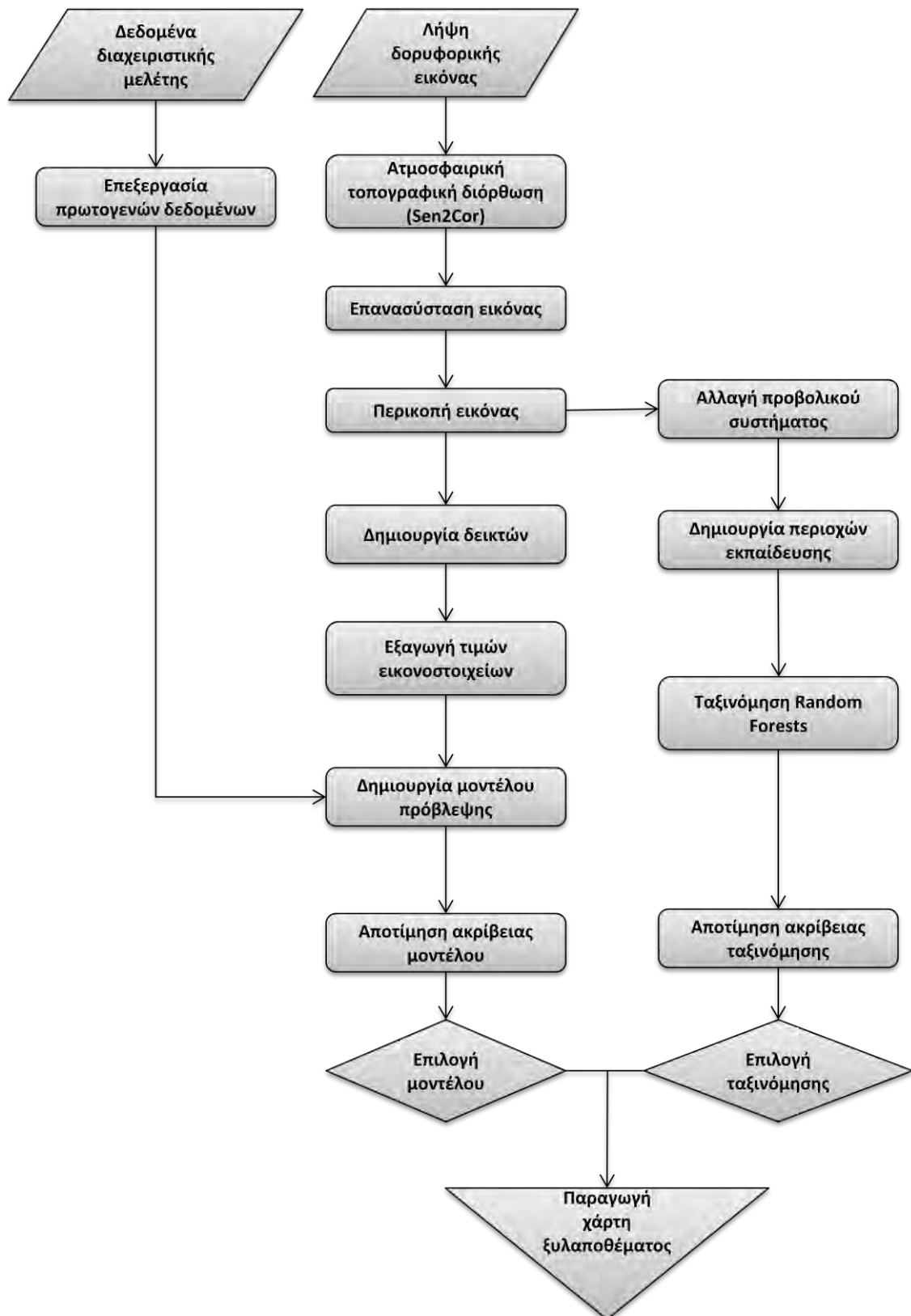
Στο τρίτο μέρος, έγινε η συσχέτιση του ξυλαποθέματος με τις τιμές ανάκλασης των εικονοστοιχείων των φασματικών καναλιών και των δεικτών βλάστησης. Από τη στατιστική ανάλυση με τη χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης και της πολλαπλής παλινδρόμησης κατά στάδια, για κάθε συνδυασμό ξυλαποθέματος - τιμή ανάκλασης, παρήχθησαν εξισώσεις πρόβλεψης ξυλαποθέματος. Στη συνέχεια, έγινε έλεγχος της ακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης και αξιολογήθηκε η καλύτερη από αυτές.

Στο τέταρτο μέρος εφαρμόστηκε η ταξινόμηση των καλύψεων γης του δάσους χρησιμοποιώντας στην πρώτη περίπτωση τα φασματικά κανάλια και στη δεύτερη

περίπτωση τα φασματικά κανάλια μαζί με τους δείκτες βλάστησης. Δημιουργήθηκαν τέσσερις κλάσεις καλύψεων γης με τη χρήση του αλγορίθμου RF και ακολούθησε η αποτίμηση της ακρίβειας στα αποτελέσματα των ταξινομήσεων.

Στο πέμπτο και τελευταίο μέρος, συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα του τρίτου και του τέταρτου μέρους για την παραγωγή ενός χάρτη που προβλέπει το ξυλαπόθεμα στις δασοσκεπείς εκτάσεις της υπό μελέτη περιοχής.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται περιληπτικά τα προηγούμενα βήματα και στάδια.



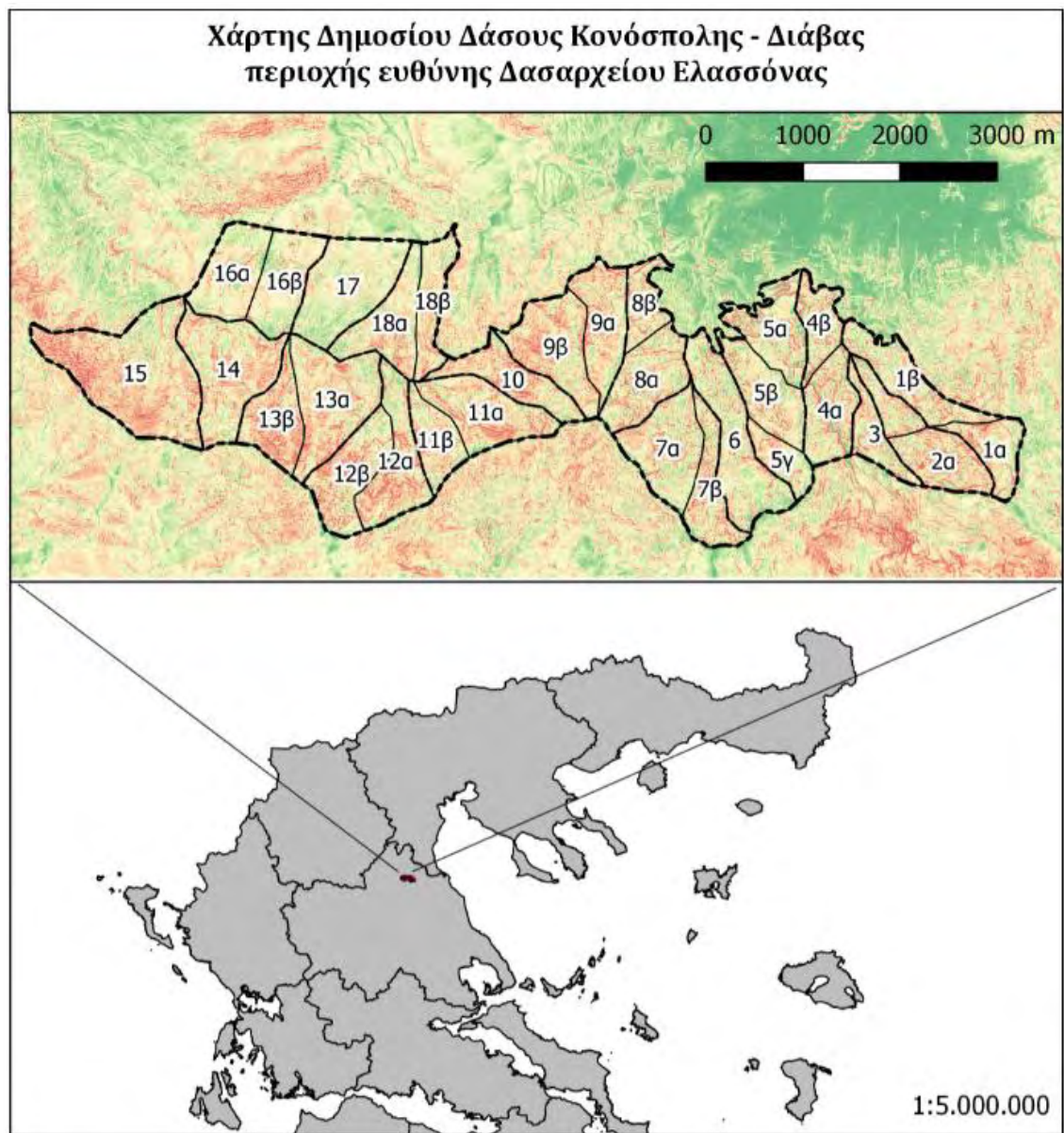
Εικ. 6 Διάγραμμα ροής βημάτων

3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

3.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

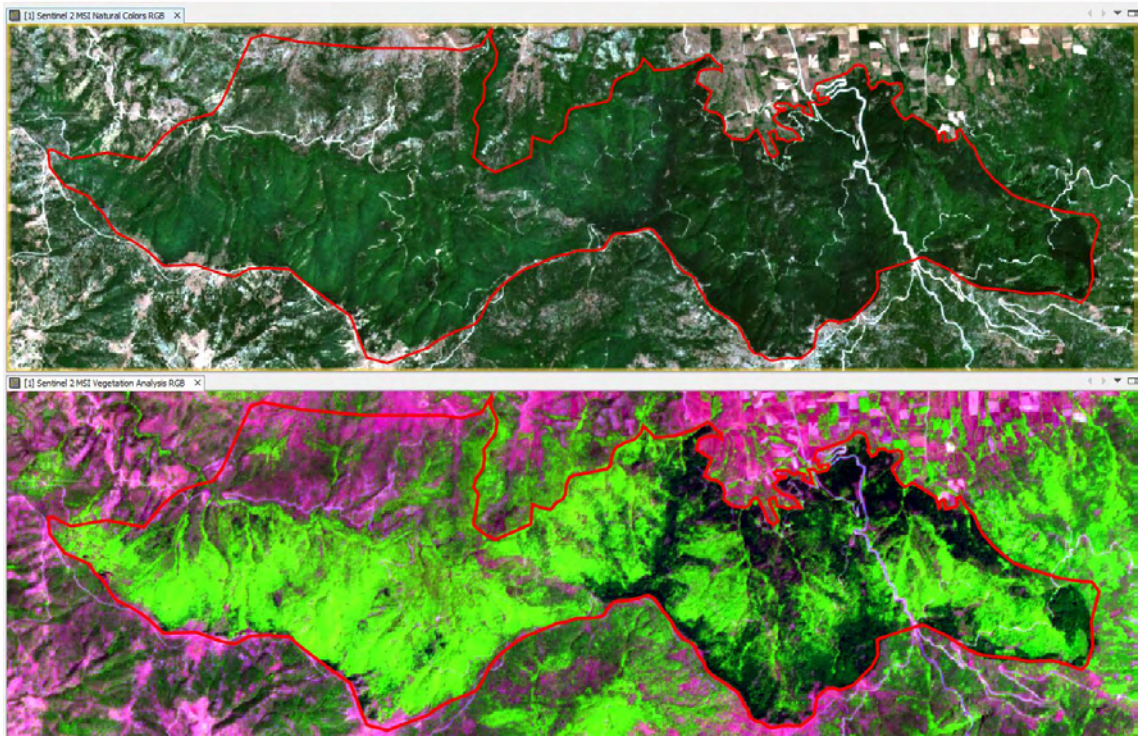
3.1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Τα πρωτογενή δεδομένα πεδίου καθώς και τα περιγραφικά στοιχεία της περιοχής μελέτης, για την παρούσα έρευνα, ελήφθησαν από τη Διαχειριστική Μελέτη 2016-2025 του δημοσίου δάσους «Κονόσπολης – Διάβας» που συντάχθηκε από το Δασαρχείο Ελασσόνας. Το δημόσιο δάσος «Κονόσπολης-Διάβας» περιλαμβάνει τα δημόσια Δάση Κονόσπολης Συκαμινέας και Διάβας Ελασσόνας τα οποία εξετάζονται σαν ενιαίο σύνολο (Χάρτης 1).



Χάρτης 1 Το δημόσιο δάσος Κονόσπολης – Διάβας με τα τμήματα και τις συστάδες του

Τα δάση αυτά εκτείνονται στις ΝΔ κλιτύες του Κάτω Ολύμπου και ειδικότερα επί των Β και ΒΑ εκθέσεων της οριογραμμής Κουκούλι Διάβας – Στραποκαμένη - Σουβλισμένη Ράχη – Καρατσέλη – Λιχτσή – Γκουνταμάνη, μεταξύ υψομέτρου 600 και 1420μ. Η περιοχή αυτών εκτείνεται μεταξύ πλάτους $39^{\circ} 54' 48''$ έως $39^{\circ} 56' 35''$ Β και μήκους $22^{\circ} 15' 48''$ έως $22^{\circ} 23' 01''$ Α. Η γενική έκθεση των δασών είναι βορεινή, αλλά δημιουργούμενες εκατέρωθεν των ρευμάτων κλιτύες εμφανίζουν κυρίως ανατολικές και δυτικές εκθέσεις με αποκλίσεις προς ΒΑ, ΒΔ, ΝΔ και ΝΑ. Η υπάρχουσα βλάστηση αρχίζει από το μικρότερο υψόμετρο και φτάνει λίγο πιο κάτω του μεγαλύτερου υψομέτρου (Εικ. 7).



Εικ. 7 Όρια και δασοκάλυψη του δάσους από δορυφορική εικόνα Sentinel-2. Πάνω μέρος RGB=B4, B3, B2 και κάτω μέρος RGB=B11, B8, B4

Τα πετρώματα της περιοχής αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος από αργιλικό σχιστόλιθο, εν μέρει δε από ασβεστόλιθο και ψαμμίτη. Οι κλίσεις των εδαφών κυμαίνονται από ομαλές μέχρι απότομες με επικρατέστερες αυτές των 25-45%. Το έδαφος, ως προϊόν αποσάθρωσης των ανωτέρω πετρωμάτων, παρουσιάζει διάφορο κατά θέσεις σύνθεση και γονιμότητα από λίαν καλή έως καλή. Έτσι, αλλού μεν είναι αμμοαργιλώδες αλλού δε αργιλοαμμώδες με βάθος το οποίο κυμαίνεται από αβαθές μέχρι μέσου βάθους και κατά θέσεις βαθύ. Γενικά το έδαφος, όπως συμπεραίνεται από επιτόπιες παρατηρήσεις, είναι ευμενές για την ανάπτυξη της υπάρχουσας δασικής βλάστησης. Στις μεσημβρινές κυρίως κλιτύες του δάσους, οι οποίες ως επί των

πλείστων καλύπτονται από αείφυλλα πλατύφυλλα, κυριαρχούν τα παραμεσόγεια ξηρά εδάφη, ενώ στις εκτάσεις που καλύπτονται από φυλλοβόλα πλατύφυλλα και από Μ. Πεύκη κυριαρχούν τα παραμεσόγεια δασικά εδάφη με υπέρυθρο ή ορφανέρυθρο ορίζοντα Β.

Το γενικό κλίμα της περιοχής εντός του οποίου αναπτύσσεται το μελετώμενο δάσος χαρακτηρίζεται ως ήπιο ηπειρωτικό. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι ομαλές, χωρίς μεγάλες απότομες μεταπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο. Κατά την θερινή περίοδο η θερμοκρασία δεν φθάνει στο δυσμενές όριο για την ανάπτυξη των δασικών φυτών. Δεν παρατηρούνται κατά τον χειμώνα βλαπτικοί παγετοί αν και οι θερμοκρασίες του αέρος και του εδάφους είναι συνήθως χαμηλές. Η σχετική υγρασία παρουσιάζεται σχετικά υψηλή. Επικρατούντες άνεμοι είναι βόρειοι και βορειοανατολικοί των οποίων η θερμοκρασία είναι χαμηλή και η ταχύτητά τους μεγάλη. Γενικά οι κλιματικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη της δασικής βλάστησης.

Το υπό μελέτη δάσος ανήκει σε τρεις φυτοδιαπλάσεις:

α) Στη φυτοδιάπλαση των αειφύλλων πλατύφυλλων (*Durisilvae*) με φυτοκοινωνικές ενώσεις κυρίως του πρίνου (*Quercus coccifera*).

β) Στη διάπλαση των φυλλοβόλων πλατύφυλλων (*Aestatisilvae*) με φυτοκοινωνικές ενώσεις της πλατύφυλλου δρυός (*Quercus conferta*) και δευτερεύοντος των ευγενών πλατυφύλλων γαύρου (*Carpinus betulus*), οστρυάς (*Ostrya carpinifolia*) και φράξου (*Fraxinus ornus*). Τα ευγενή πλατύφυλλα συναντώνται διάσπαρτα ανάμεσα και στα αείφυλλα πλατύφυλλα.

γ) Την τεχνικώς δημιουργηθείσα διάπλαση των κωνοφόρων (*Conisilvae*) με φυτοκοινωνική ένωση της Μ. Πεύκης (*Pinus nigra*) είτε αμιγή είτε μικτή με δασικά είδη των ανωτέρω διαπλάσεων καθώς και αρκουδοπούρναρου (*Ilex aquifolium*) κυρίως στα τμήματα 1 και 2.

Τα αείφυλλα πλατύφυλλα καταλαμβάνουν κυρίως τα χαμηλότερα ως επί των πλείστων σημεία του δάσους και παρουσιάζονται σε πρεμνοφυή θαμνώδη και νανώδη μορφή. Στα άγονα, αβαθή και πετρώδη νότιας έκθεσης εδάφη τα αείφυλλα πλατύφυλλα φθάνουν και ψηλότερα. Τα φυλλοβόλα πλατύφυλλα συναντώνται κυρίως σε καλής ποιότητας εδάφη και φθάνουν ψηλότερα. Η διάπλαση των κωνοφόρων δημιουργήθηκε πριν από περίπου 45 – 60 χρόνια, με τεχνητές φυτεύσεις, σε διάκενα και γυμνές θέσεις των ανωτέρω διαπλάσεων, καθώς και σε θέσεις των ανωτέρω διαπλάσεων που η υπάρχουσα βλάστηση των πλατυφύλλων είχε υποβαθμιστεί.

Η έκτασή του, σύμφωνα με τη διαχειριστική μελέτη, ανέρχεται σε 1.755, 54 ha και διαιρείται σε 18 τμήματα και 33 συστάδες. Η αρίθμηση των τμημάτων γίνεται με αραβικούς αριθμούς από το 1 έως το 18, ενώ των συστάδων με γράμματα του ελληνικού αλφάβητου. Η διάκριση των τμημάτων και των συστάδων συνήθως ακολουθεί φυσικές γραμμές του δάσους όπως είναι τα ρέματα, οι ράχες κλπ.

Οι συστάδες ή τα τμήματα κατατάχθηκαν σε δύο διαχειριστικές κλάσεις λαμβάνοντας υπόψη την έκταση του κυριότερου δασοπονικού είδους που καλύπτει την μεγαλύτερη έκταση:

- α) Η διαχειριστική κλάση Μαύρης Πεύκης και
- β) Η διαχειριστική κλάση Δρυός και λοιπών πλατύφυλλων.

Τα δασοπονικά είδη που συγκροτούν το ξυλώδες κεφάλαιο, κατά σειρά σπουδαιότητας, είναι η Δρυς με τα λοιπά πλατύφυλλα και το Πεύκο (Μαύρη πεύκη), ενώ σύμφωνα με τη διαχειριστική μελέτη η έκταση που καλύπτει κάθε είδος παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα:

Πίν. 3 Έκταση κυριότερων δασοπονικών ειδών

Δασοπονικό είδος	Έκταση σε (ha)	Ποσοστό (%)
Δρυς και λοιπά πλατύφυλλα	763,62	43,49
Πεύκο	449,70	25,61

3.1.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

Τα χαρτογραφικά δεδομένα της διαχειριστικής μελέτης ήταν διαθέσιμα σε αρχεία μορφής cad. Από το πλήθος των δεδομένων, επιλέχθηκαν τα όρια του δάσους, των τμημάτων και των συστάδων καθώς και τα σημεία των δοκιμαστικών επιφανειών. Με τη χρήση του λογισμικού QGIS (QGIS Development Team, 2017) στα παραπάνω αρχεία έγινε καθαρισμός τοπολογίας και μετατροπή τους σε διανυσματικά (vector) αρχεία, πολυγωνικά ή σημειακά.

Για τον υπολογισμό των ογκομετρικών στοιχείων του δάσους (ξυλαπόθεμα), χρησιμοποιήθηκε κατά συστάδα η μέθοδος των αντιπροσωπευτικών ΔΕ. Συνολικά λήφθηκαν 44 ΔΕ έκτασης 1 έως 3 στρεμμάτων η καθεμία. Η συνολική έκταση των δοκιμαστικών επιφανειών ανήλθε σε 70,1 στρ. και αντιπροσωπεύει το 0,67% της συνολικής δασοσκεπούς έκτασης, (1054,86 ha σύμφωνα με τον υπολογισμό της διαχειριστικής μελέτης). Οι ΔΕ κατανεμήθηκαν στις συστάδες ανάλογα με την δασοσκεπή έκταση κάθε συστάδας. Η επιλογή της θέσης τους έγινε με κριτήριο την εκτίμηση της μέσης κατάσταση του ξυλαποθέματος της συστάδας. Η διαδικασία

τοποθέτησής τους στο έδαφος ήταν η ακόλουθη: Γινόταν επιλογή των θέσεων μέσα στην συστάδα με κριτήριο την αντιπροσωπευτικότητα της μέσης κατάστασης. Στην συνέχεια αυτές τοποθετούνταν στο έδαφος με την μεγαλύτερη διάσταση, παράλληλα ή κάθετα με τις χωροσταθμικές του εδάφους, ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους. Οι επιφάνειες ορίστηκαν με κόκκινη ταινία και το σχήμα τους ήταν ορθογώνιο. Η ακριβής θέση της κάθε μιας σημειώθηκε με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της στο σύστημα ΕΓΣΑ 1987.

Σε κάθε δοκιμαστική επιφάνεια (Εικ. 8) έγινε γενική παχυμέτρηση στο ύψος της στηθιαίας διαμέτρου DBH (1,3μ.) των ατόμων με διάμετρο άνω των 10 cm. Ανά κλάση διαμέτρου βρέθηκε ο μέσος κορμός, του οποίου μετρήθηκε το ύψος, και στη συνέχεια με τη χρήση μορφαρίθμων, κατά δασοπονικό είδος και κλάση διαμέτρου, υπολογίστηκε το ξυλαπόθεμα της ΔΕ σύμφωνα με τον τύπο:

$$V_{\Delta E} = V * N_{\Delta E} \text{ σε } m^3$$

Όπου,

$$V = \frac{G}{N_K} * F * H \text{ σε } m^3, \text{ άφλοιος όγκος μέσου κορμού}$$

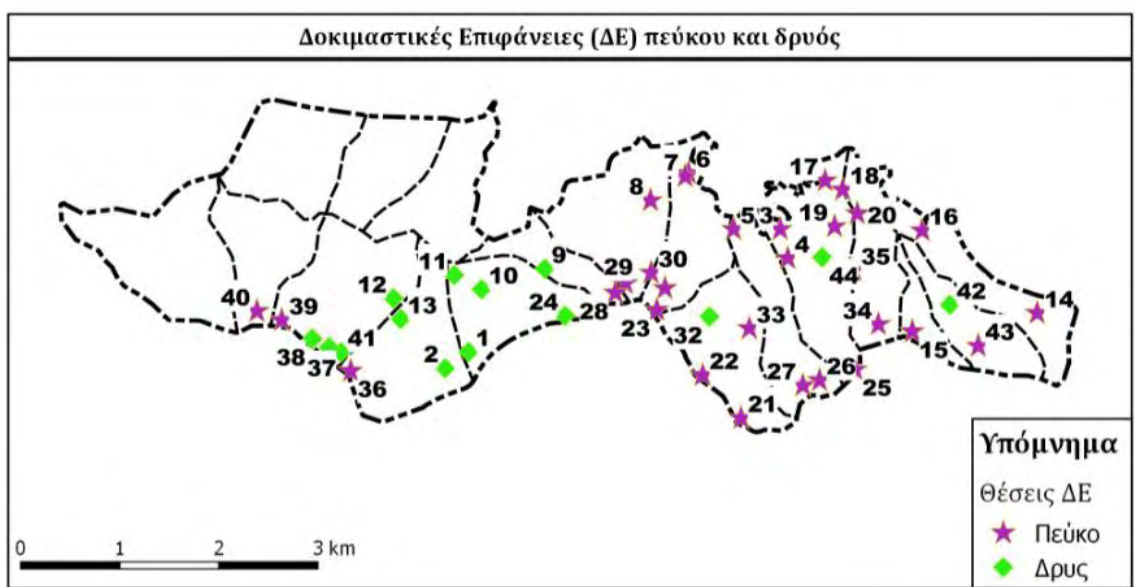
G = Επιφάνεια μέσου κορμού σε m^2 με DBH

N_K = Αριθμός κορμών κλάσης διαμέτρου

$N_{\Delta E}$ = Αριθμός κορμών ΔΕ

F = Μορφαρίθμος ανά δασοπονικό είδος και κλάση διαμέτρου (από πίνακα)

H = Ύψος μέσου δέντρου κλάσης σε m



Εικ. 8 Οι θέσεις των ΔΕ στην έκταση του δάσους

Στον Πίν. 4 παρουσιάζονται οι ΔΕ με το ξυλαπόθεμα που υπολογίστηκε για κάθε μια από αυτές. Επειδή οι ΔΕ δεν έχουν σταθερό εμβαδό, παρουσιάζεται ο όγκος που αντιστοιχεί στο εκτάριο (ha). Επίσης, παρουσιάζεται και το ξυλαπόθεμα που αντιστοιχεί στα 100m² καθώς αυτή είναι η ελάχιστη μονάδα επιφάνειας που θα συσχετιστεί στη συνέχεια με τις τιμές ανάκλασης των δορυφορικών εικόνων που αντιστοιχούν σε ένα εικονοστοιχείο (10m x 10m).

Όπως παρατηρούμε στον Πίν. 4, σε πολλές ΔΕ υπήρχαν ταυτόχρονα και τα δύο δασοπονικά είδη, πεύκο και δρυς, οπότε και το συνολικό ξυλαπόθεμα των αντίστοιχων ΔΕ προέκυψε από το άθροισμα του ξυλαποθέματος των δύο ειδών βλάστησης. Για την περαιτέρω επεξεργασία όμως, είναι απαραίτητη η κατηγοριοποίηση των ΔΕ σε δύο ομάδες, σε αυτή που κυριαρχεί το πεύκο και σε αυτή που κυριαρχεί η δρυς. Έτσι, ανάλογα με το ποιο είδος συνεισέφερε περισσότερο στο συνολικό ξυλαπόθεμα στην κάθε ΔΕ, έγινε και η κατηγοριοποίησή της. Οι ΔΕ που μετρήθηκαν ήταν 44, εκ των οποίων στις 30 κυριαρχεί το πεύκο (*Μαύρη πεύκη* – *Pinus nigra*) και στις υπόλοιπες 14 η δρυς (*Πλατύφυλλη δρυς* - *Quercus conferta*).

Πίν. 4 Δασοπονικά είδη και ξυλαπόθεμα ΔΕ

Α/Α ΔΕ	Ξυλαπόθεμα (m ³) πεύκου στο ha	Ξυλαπόθεμα (m ³) δρυός στο ha	Ξυλαπόθεμα (m ³) στο ha	Ξυλαπόθεμα (m ³) στα 100m ²	Κυρίαρχο δασοπονικό είδος
1		29,90	29,9	0,299	Δρυς
2		27,17	27,17	0,2717	Δρυς
3	383,50		383,5	3,835	Πεύκο
4	148,20	58,7	206,9	2,069	Πεύκο
5	191,55		191,55	1,9155	Πεύκο
6	245,06		245,06	2,4506	Πεύκο
7	228,33		228,33	2,2833	Πεύκο
8	80,80	43,8	124,6	1,246	Πεύκο
9	27,4	38,40	65,8	0,658	Δρυς
10		67,20	67,2	0,672	Δρυς
11		54,00	54	0,54	Δρυς
12		19,35	19,35	0,1935	Δρυς
13		60,87	60,87	0,6087	Δρυς
14	234,75		234,75	2,3475	Πεύκο
15	254,50		254,5	2,545	Πεύκο
16	236,50		236,5	2,365	Πεύκο
17	257,20		257,2	2,572	Πεύκο
18	258,40		258,4	2,584	Πεύκο
19	242,30	33,8	276,1	2,761	Πεύκο
20	349,10		349,1	3,491	Πεύκο
21	191,15		191,15	1,9115	Πεύκο
22	221,50		221,5	2,215	Πεύκο
23	69,05	33,65	102,7	1,027	Πεύκο
24		38,50	38,5	0,385	Δρυς
25	286,00		286	2,86	Πεύκο
26	456,10		456,1	4,561	Πεύκο
27	368,25		368,25	3,6825	Πεύκο
28	310,73	8,20	318,93	3,1893	Πεύκο
29	68,00	63,7	131,7	1,317	Πεύκο
30	326,00		326	3,26	Πεύκο
31	161,65	6,45	168,1	1,681	Πεύκο
32		34,95	34,95	0,3495	Δρυς
33	39,20	29,55	68,75	0,6875	Πεύκο
34	151,67	20,00	171,67	1,7167	Πεύκο
35	149,00	27,34	176,34	1,7634	Πεύκο
36	191,46		191,46	1,9146	Πεύκο
37		49,47	49,47	0,4947	Δρυς
38		45,80	45,8	0,458	Δρυς
39	101,2		101,2	1,012	Πεύκο
40	24,14	14,23	38,37	0,3837	Πεύκο
41		18,60	18,6	0,186	Δρυς
42		95,00	95	0,95	Δρυς
43	223,10		223,1	2,231	Πεύκο
44		138,8	138,8	1,388	Δρυς

3.2 ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

3.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Η επιλογή της δορυφορικής εικόνας έγινε μεταξύ των εικόνων του δορυφόρου Sentinel-2 και του δορυφόρου Landsat 8. Τελικά προτιμήθηκε ο δορυφόρος Sentinel-2, επειδή έχει καταρχάς περισσότερα φασματικά κανάλια εκ των οποίων τα 4 έχουν πολύ καλή χωρική διακριτική ικανότητα (10m). Επίσης, η χρονική διακριτική ικανότητα του Sentinel-2 είναι καλύτερη καθώς με το ζεύγος Sentinel-2A και 2B, ο χρόνος επίσκεψης πάνω από το ίδιο σημείο της γήινης επιφάνειας έχει μειωθεί περίπου στις 5 ημέρες (Mandanici and Bitelli, 2016; Zhang et al., 2017). Παρόλα αυτά, η υπεροχή του Sentinel-2 έναντι του Landsat 8 στην πρόβλεψη του ξυλαποθέματος δεν επιβεβαιώνεται, καθώς φαίνεται ότι και οι δύο δορυφόροι στο συγκεκριμένο γνώρισμα είναι εξίσου αποτελεσματικοί (Mura et al., 2018). Η λήψη της επιλεγμένης εικόνας πραγματοποιήθηκε μέσα από την ιστοσελίδα Copernicus Open Access Hub <https://scihub.copernicus.eu/> μετά από δωρεάν εγγραφή.

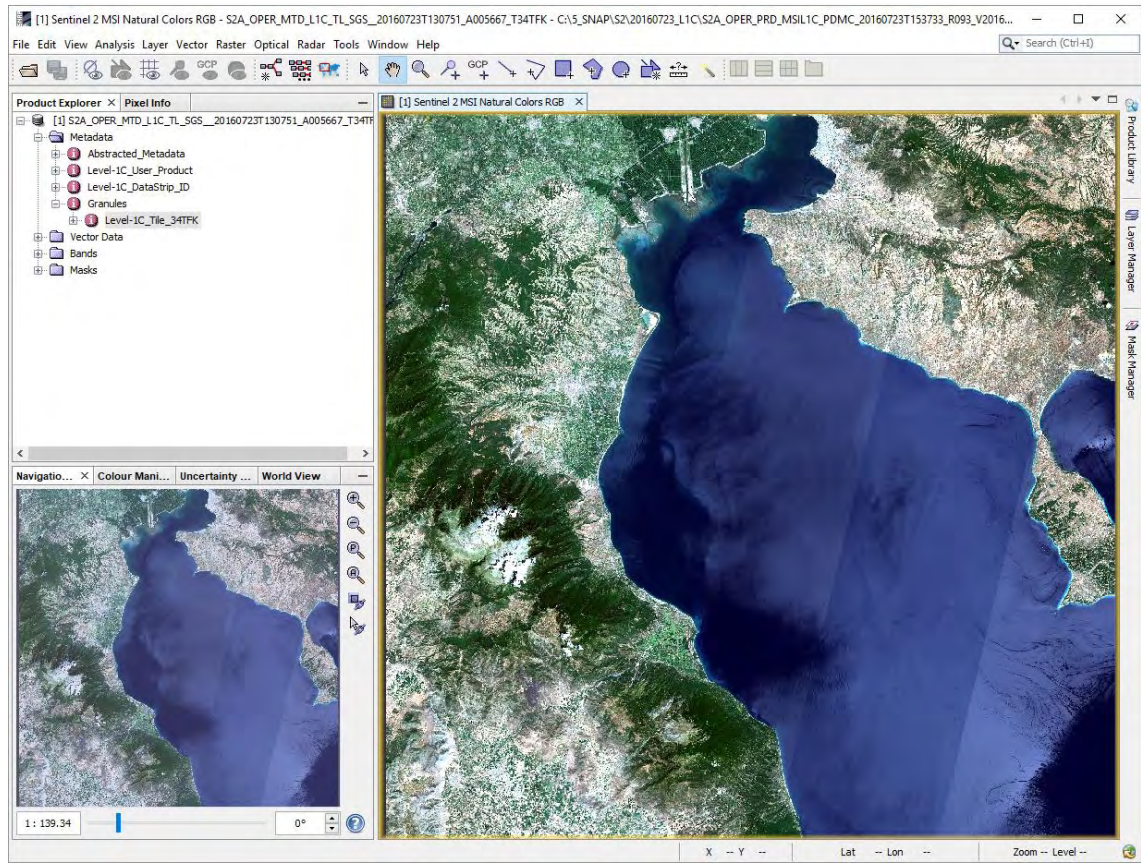
Η δορυφορική εικόνα Sentinel-2A με ημερομηνία λήψης 23-07-2016 που επελέγη για την παρούσα έρευνα είχε ονομασία αρχείου

‘S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160723T153733_R093_V20160723T092032_20160723T092032’.

Η επιλογή της ημερομηνίας λήψης της εικόνας βασίστηκε στη φυσιολογία ανάπτυξης του φυλλώματος και επιλέχθηκε να εμπίπτει στη χρονική περίοδο από το τέλος της άνοιξης μέχρι τα μέσα του καλοκαιριού, ώστε να μην έχει αρχίσει ακόμη η ξηρασία των φύλλων (Laurin et al., 2018). Η συγκεκριμένη εικόνα καλύπτει ένα πολύ μεγάλο κομμάτι της Ελλάδας. Μέσα σε αυτήν υπάρχουν τμήματα, τα tiles ή granules, που χωρίζουν την εικόνα σε μικρότερα μέρη, τα οποία είναι ποιο εύκολα επεξεργάσιμα. Έτσι, το granule που περιέχει την περιοχή έρευνας και που χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω επεξεργασία ήταν το

‘S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160723T130751_A005667_T34TFK_N02.04’

το οποίο παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα (Εικ. 9) μέσα από το περιβάλλον της πλατφόρμας SNAP (ESA, 2017b).



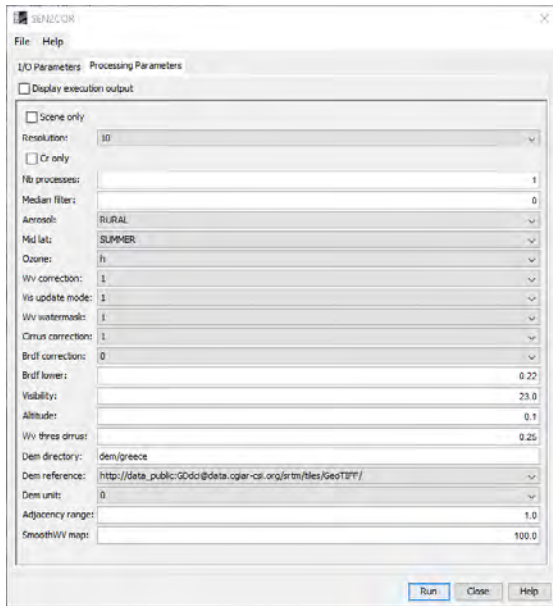
Εικ. 9 Η περιοχή που καλύπτει η εικόνα Sentinel-2A που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μέσα από το περιβάλλον της πλατφόρμας SNAP

3.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Οι εικόνες Sentinel-2 που διατίθενται στο διαδίκτυο¹ έχουν επίπεδο επεξεργασίας Level-1C και παρέχουν τις τιμές ανάκλασης στην ατμόσφαιρα (TOA – Top Of Atmosphere). Για τη μετατροπή τους σε Level-2A, δηλαδή σε τιμές ανάκλασης εδάφους (TOC – Top Of Canopy ή BOA – Bottom Of Atmosphere ή Surface Reflectance), χρησιμοποιήθηκε το πρόσθετο (plug-in) Sen2Cor (Main-Knorn et al., 2017) του λογισμικού SNAP. Ο αλγόριθμος του Sen2Cor βασίζεται στο αριθμητικό μοντέλο ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction) (Richter et al., 2011) και προβαίνει στην απαλοιφή των ατμοσφαιρικών επιδράσεων εξαιτίας της απορρόφησης και σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης, κατ' επιλογή, και σε τοπογραφικές ραδιομετρικές διορθώσεις. Ειδικότερα, η μέθοδος της ατμοσφαιρικής διόρθωσης βασίζεται στο μοντέλο LIBRADTRAN (Mayer and Kylling, 2005). Για την

¹ Από τον Απρίλιο του 2017, για την ευρωπαϊκή ήπειρο διατίθενται εικόνες επιπέδου επεξεργασίας L2A.

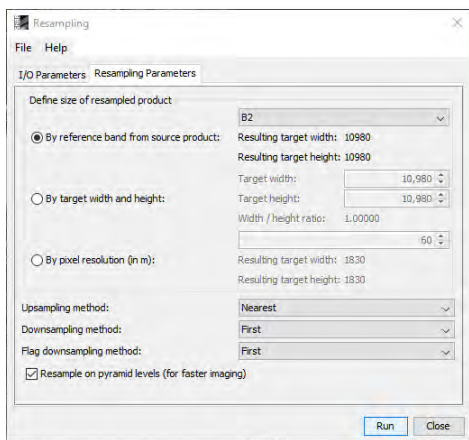
εικόνα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, εκτός της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, εφαρμόστηκε η τοπογραφική διόρθωση με τη χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) 90m και διόρθωση των θυσάνων (cirrus) (Εικ. 10).



Εικ. 10 Παράμετροι που εισήχθησαν στο Sen2Cor.

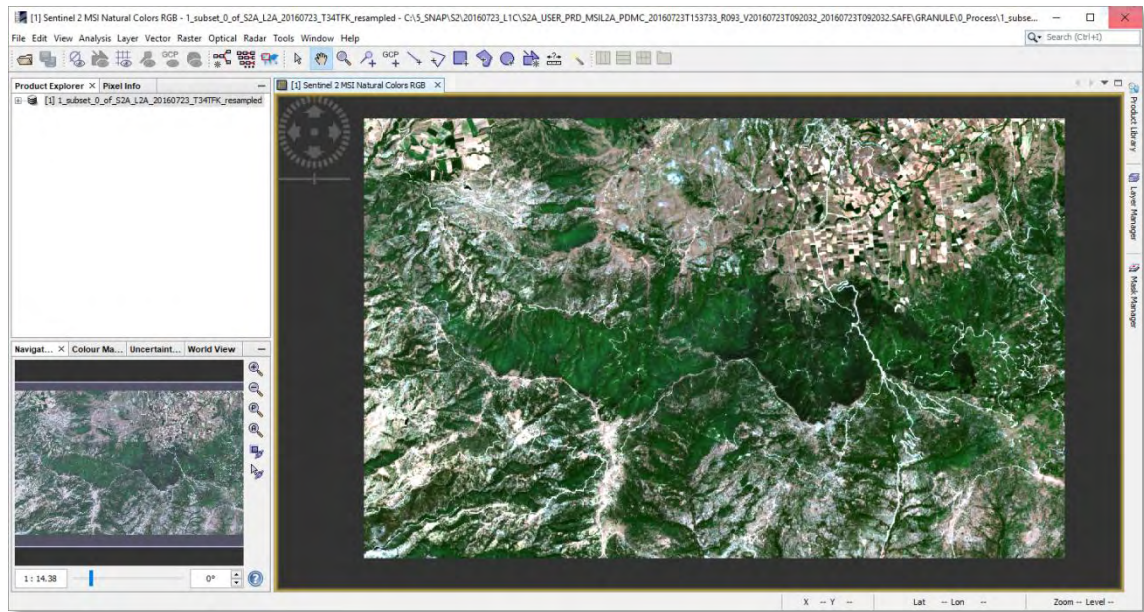
Με την ολοκλήρωση της ατμοσφαιρικής και τοπογραφικής διόρθωσης της L1C εικόνας με το Sen2Cor δημιουργήθηκε η εικόνα επιπέδου επεξεργασίας L2A η οποία χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περαιτέρω αναλύσεις.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, τα φασματικά κανάλια των εικόνων Sentinel-2 έχουν χωρική διακριτική ικανότητα 10m, 20m και 60m, γι' αυτό και ακολούθησε επανασύσταση (resampling) της εικόνας στα 10m. Για την επανασύσταση επιλέχθηκε η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου (Εικ. 11)



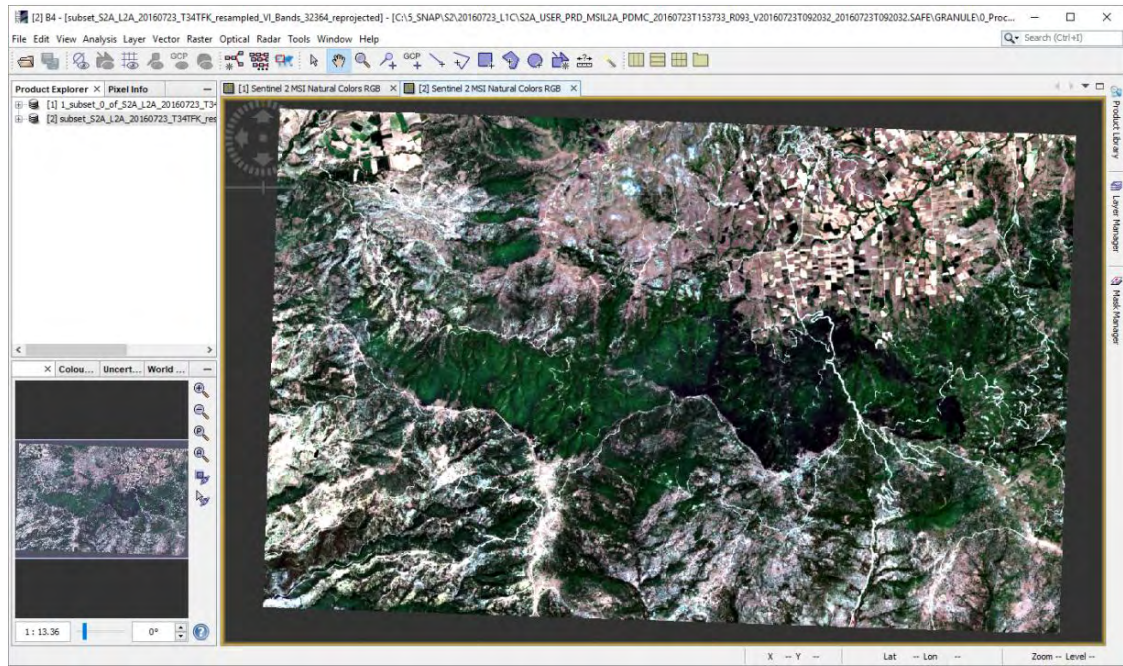
Εικ. 11 Παράμετροι επανασύστασης (resampling) της εικόνας.

Η εικόνα (Εικ. 9) καλύπτει μια τεράστια έκταση η οποία δεν είναι αναγκαία στην παρούσα μελέτη και έχει πολύ μεγάλο μέγεθος αρχείου. Για να είναι πιο εύκολα επεξεργάσιμο το αρχείο ώστε να εξοικονομηθεί χρόνος αλλά και πόροι του συστήματος, ακολούθησε η περικοπή (subset ή clip) της εικόνας στην περιοχή ενδιαφέροντος (Εικ. 12). Παράλληλα, με την εφαρμογή της εντολής subset, έγινε και αφαίρεση των φασματικών καναλιών που δεν ήταν απαραίτητα για τη συνέχεια, ενώ απομακρύνθηκε μια πληθώρα από μάσκες. Τα φασματικά κανάλια που αφαιρέθηκαν ήταν τα B1, B9 και B10.



Εικ. 12 Περικοπή (subset) της εικόνας στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Η εικόνα αυτή είναι έτοιμη να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των δεικτών και την εξαγωγή των τιμών των εικονοστοιχείων στις θέσεις των ΔΕ. Όμως, για την ταξινόμηση των καλύψεων γης, ήταν απαραίτητη η επαναπροβολή (reprojection) του συστήματος αναφοράς από WGS84/UTM34 (EPSG:32634) σε ΕΓΣΑ87 (EPSG:2100) καθώς οι περιοχές εκπαίδευσης (training sites) ήταν σε ΕΓΣΑ87. Να τονιστεί ότι η εικόνα με προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ87 (Εικ. 13) χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια μόνο για την εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης.



Εικ. 13 Αλλαγή του προβολικού συστήματος της εικόνας σε ΕΓΣΑ87. Διακρίνεται η χαρακτηριστική δεξιόστροφη περιστροφή της.

3.2.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΕΙΚΤΕΣ

Η πλατφόρμα SNAP, διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία δεικτών βλάστησης, εδάφους και βιοφυσικών παραμέτρων. Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκαν οι δείκτες που παρουσιάζονται στον Πίν. 5.

Πίν. 5 Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία με σύντομη περιγραφή τους και τον μαθηματικό του τύπο

Όνομα Δείκτη	Πλήρες Όνομα Δείκτη	Σύντομη Περιγραφή	Κατηγορία*	Αλγεβρικός/Μαθηματικός Τύπος**	Βιβλιογραφία
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Ο πλέον γνωστός και κλασσικός δείκτης βλάστησης. Ο NDVI μετρά τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και είναι ισχυρά συσχετισμένος με την πυκνότητα και τη ζωτικότητα της βλάστησης.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR-R}{NIR+R}$	(Rouse, 1974)
DVI	Difference Vegetation Index	Ο δείκτης αυτός είναι ευαίσθητος στην ποσότητα της βλάστησης.	Δείκτης Βλάστησης	$NIR-R$	(Richardson and Weigand, 1977)
RVI	Ratio Vegetation Index	Ο απλούστερος δείκτης που βασίζεται σε λόγο φασματικών καναλιών και γι' αυτό ονομάζεται και Απλός Λόγος (Simple Ratio - SR). Δείχνει την ποσότητα της βλάστησης και επίσης μειώνει την επιρροή της ατμόσφαιρας και της τοπογραφίας.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{R}{NIR}$	(Richardson and Weigand, 1977)
PVI	Perpendicular Vegetation Index	Αυτός ο δείκτης μπορεί να θεωρηθεί γενίκευση του DVI, ο οποίος επιτρέπει γραμμές εδάφους διαφορετικών κλίσεων.	Δείκτης Βλάστησης	$\sin(\alpha)NIR - \cos(\alpha)R$, όπου $\alpha=45^\circ$	(Richardson and Weigand, 1977)
IPVI	Infrared Percentage Vegetation Index	Ο δείκτης είναι λειτουργικά ισοδύναμος με τους NDVI και RVI, μόνο που οι τιμές του κυμαίνονται από 0.0 - 1.0.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR}{NIR+R} (NDVI+1)$	(Crippen, 1990)

WDVI	<u>W</u> eighted <u>D</u> ifference <u>V</u> egetation <u>I</u> ndex	Ο WDVI είναι μια απλοποιημένη έκδοση του PVI αλλά με απεριόριστο εύρος τιμών.	Δείκτης Βλάστησης	$NIR - aR$, όπου $a=0.5$	(Baret and Guyot, 1991)
TNDVI	<u>T</u> ransformed <u>N</u> ormalized <u>D</u> ifference <u>V</u> egetation <u>I</u> ndex	Ο αλγόριθμος TNDVI υποδεικνύει μια σχέση μεταξύ της πράσινης βιομάζας που υπάρχει μέσα σε ένα εικονοστοιχείο.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR-R}{\sqrt{NIR+R}} + 0.5$	(Deering et al., 1975)
GEMI	<u>G</u> lobal <u>E</u> nvironmental <u>M</u> onitoring <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αναπτύχθηκε για να εξαλείψει την ανάγκη λεπτομερούς ατμοσφαιρικής διόρθωσης δημιουργώντας ένα απόθεμα ατμοσφαιρικής διόρθωσης για τους δείκτες βλάστησης.	Δείκτης Βλάστησης	$(n(1 - 0.25n) - \frac{R-0.125}{1-R})$, όπου $NIR=B8A$ και $n=\beta$. βιβλιογραφία	(Pinty and Verstraete, 1992)
ARVI	<u>A</u> tmospherically <u>R</u> esistant <u>V</u> egetation <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός εκμεταλλεύεται το πλεονέκτημα της διαφορετικής σκέδασης του μπλε και κόκκινου φασματικού καναλιού ώστε να ανακτήσει πληροφορίες σχετικά με την ατμοσφαιρική αδιαφάνεια (θολούρα).	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR-R+\gamma(R-B)}{NIR+R-\gamma(R-B)}$ όπου $\gamma=1$	(Bannari et al., 1995)
NDI45	<u>N</u> ormalized <u>D</u> ifference <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός είναι πιο γραμμικός, με λιγότερο κορεσμό στις υψηλές τιμές σε σχέση με τον NDVI.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR-R}{NIR+R}$, όπου $NIR = B5$	(Delegido et al., 2011)
MTCI	<u>M</u> eris <u>T</u> errestrial <u>C</u> hlorophyll <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της περιεχόμενης χλωροφύλλης σε δεδομένα MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer).	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{754nm-709nm}{709nm-681nm} = \frac{B06-B05}{B05-B04}$	(Dash and Curran, 2004)
MCARI	<u>M</u> odified <u>C</u> hlorophyll <u>A</u> bsorption <u>R</u> atio <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός αναπτύχθηκε για να ανταποκρίνεται τόσο στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης στα φύλλα όσο και στην ανακλαστικότητα του εδάφους.	Δείκτης Βλάστησης	$1 - \frac{0.2(R_2-G)}{R_2-R_1}$, όπου $R_1 = B4$, $R_2 = B5$ και $G = B3$	(Daughtry et al., 2000)
REIP	<u>R</u> ed-Edge <u>I</u> nflection <u>P</u> oint <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός αναπτύχθηκε για εφαρμογές σχετικές με τη βιομάζα και την πρόσληψη αζώτου (N) σε ετερογενή πεδία.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{700+40 \left(\frac{B04+B07-B05}{B2} \right)}{B06-B05}$	(Vogelmann et al., 1993)
S2REP	<u>S</u> entinel-2 <u>R</u> ed-Edge <u>P</u> osition <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός βασίζεται στη γραμμική παρεμβολή όπως αυτή παρουσιάστηκε από τους (Guyot and Baret, 1988). Εκτιμάται ο δείκτης REP μέσω της παρεμβολής των φασματικών καναλιών 5 και 6 του Sentinel-2 βρίσκονται στην κόκκινη ακμή (Red Edge - RE)	Δείκτης Βλάστησης	$705 + 35 \frac{NIR+R-RE1}{RE2-RE1}$, όπου $NIR = B7$, $RE1 = B5$ και $RE2 = B6$	(Frampton et al., 2013)
IRECI	<u>I</u> nverted <u>R</u> ed-Edge <u>C</u> hlorophyll <u>I</u> ndex	Ο αλγόριθμος αυτού του δείκτη ενσωματώνει την ανάκλαση 4 φασματικών καναλιών για την εκτίμηση της χλωροφύλλης της κόμης.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR-R}{\frac{RE1}{RE2}}$, όπου $NIR=B7$, $R=B4$, $RE1 = B5$ και $RE2 = B6$	(Frampton et al., 2013)
PSSRa	<u>P</u> igment <u>S</u> pecific <u>S</u> imple <u>R</u> atio (chlorophyll) <u>I</u> ndex.	Ο δείκτης αυτός αναπτύχθηκε για να διερευνηθεί το εύρος των φασματικών προσεγγίσεων της ποσότητας των χρωστικών στην κλίμακα της κομοστέλης.	Δείκτης Βλάστησης	$\frac{NIR}{R}$, όπου $NIR=B7$	(Blackburn, 1998)
SAVI	<u>S</u> oil <u>A</u> djused <u>V</u> egetation <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός επιχειρεί να είναι υβρίδιο μεταξύ των δεικτών που βασίζονται στο πηλίκιο και των κατακόρυφων δεικτών.	Δείκτης Εδάφους	$\frac{(1+L)(NIR-R)}{NIR+R+L}$, όπου $L=0.5$	(Huete, 1988)
TSAVI	<u>T</u> ransformed <u>S</u> oil <u>A</u> djused <u>V</u> egetation <u>I</u> ndex	Ο δείκτης αυτός υποθέτει ότι η γραμμή εδάφους έχει αυθαίρετη κλίση και χρησιμοποιεί αυτές τις τιμές για να προσαρμόσει το δείκτη βλάστησης.	Δείκτης Εδάφους	$\frac{a(NIR-aR-b)}{aNIR+R-a+X(1+a^2)}$ όπου $a=0.5$, $\beta=0.5$ και $X=0.08$	(Baret and Guyot, 1991)

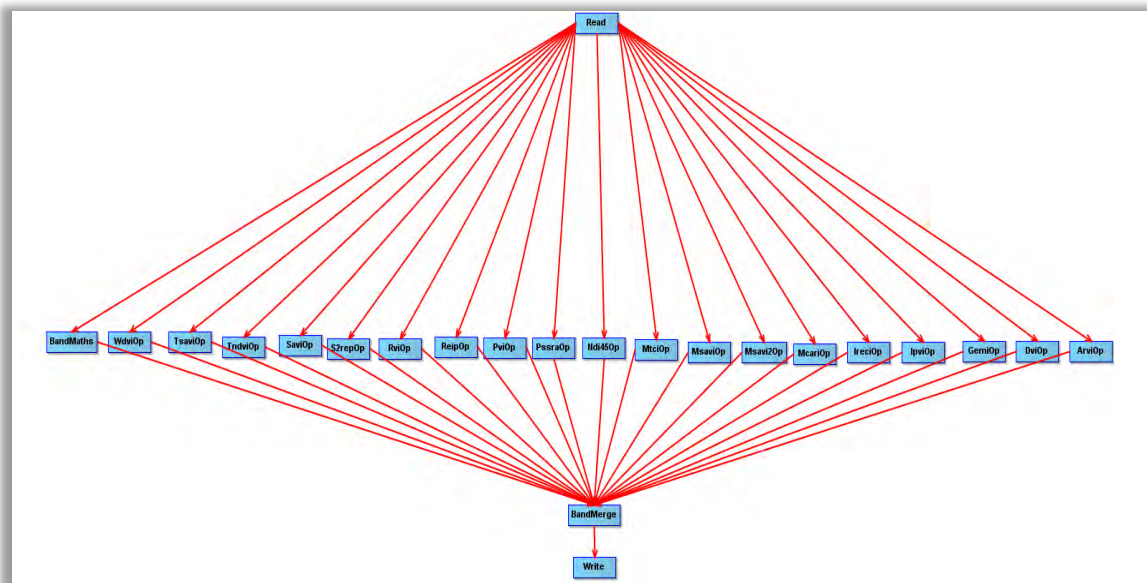
MSAVI	<u>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</u>	Η βασική ιδέα του MSAVI ήταν να παρέχει μια μεταβλητή διόρθωσης στον L παράγοντα. Ο παράγοντας διόρθωσης βασίζεται στο προϊόν του NDVI και του WDVl.	Δείκτης Εδάφους	$\frac{(NIR-R)(1+L)}{NIR-R+L}$ $\text{όπου } L = 1 - \frac{2s(NIR-R)(NIR-sR)}{NIR+R}$ και $s=0,5$	(Qi et al., 1994)
MSAVI2	<u>The second Modified Soil Adjusted Vegetation Index</u>	Μειώνει το θόρυβο του εδάφους και αυξάνει το δυναμικό εύρος στο σήμα της βλάστησης. Δεν χρησιμοποιεί τη σταθερά L, όπως ο SAVI για να αναδείξει την υγιή βλάστηση	Δείκτης Εδάφους	$\frac{2NIR+1-\sqrt{(2NIR+1)^2-}}{2}$	(Qi et al., 1994)

* Από ESA Sentinel-2 Toolbox Features <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox/sentinel-2-toolbox-features/>

** Όπου G=B3, R=B4 και NIR=B8 εκτός αν ορίζεται διαφορετικά

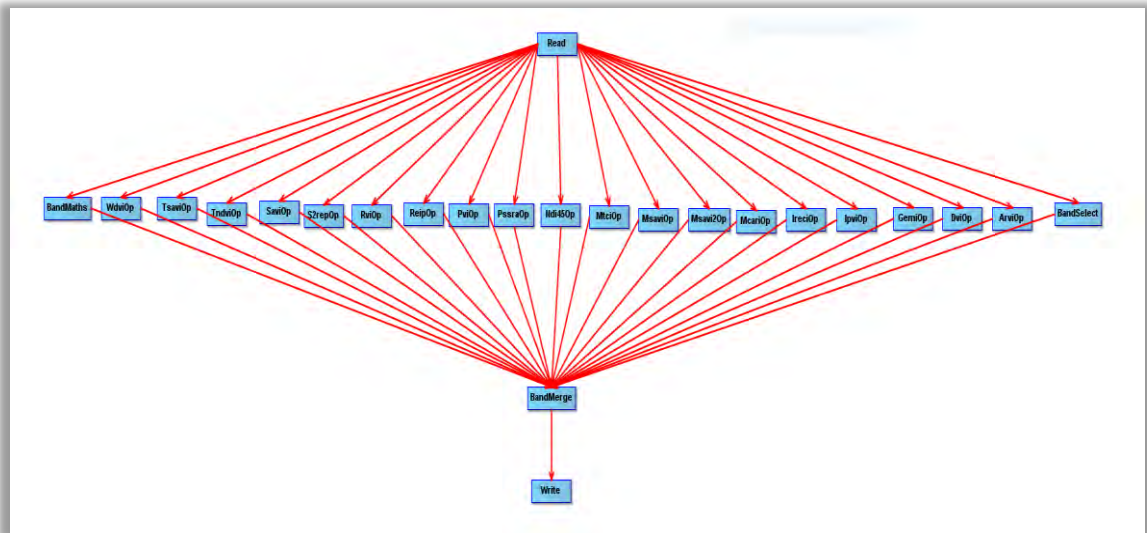
Στην 5^η στήλη του πίνακα παρουσιάζεται ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού του δείκτη. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι default παράμετροι υπολογισμού των δεικτών του λογισμικού SNAP. Διευκρινίζεται η αντιστοιχία των ακόλουθων συμβολισμών: G=B3, R=B4 και NIR=B8. Στις περιπτώσεις που δεν ακολουθείται η αντιστοιχία αυτή στις default παραμέτρους, αυτή διευκρινίζεται, όπως επίσης διευκρινίζονται και οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν.

Επειδή η δημιουργία τόσο πολλών δεικτών είναι χρονοβόρα, η όλη διαδικασία έγινε με τη χρήση του GraphBuilder και του Batch processing που είναι διαθέσιμες στο λογισμικό SNAP. Με το GraphBuilder δημιουργείται ένα γράφημα που περιέχει όλα τα βήματα μιας διαδικασίας, από το ποιο παράγοντες (read) εισάγονται μέχρι το τελικό αποτέλεσμα (write). Αφού ετοιμαστεί το γράφημα, όπου έχουν προστεθεί όλοι οι δέκτες που μας ενδιαφέρουν, αποθηκεύεται και στη συνέχεια τρέχει μέσα από την αυτοματοποιημένη διαδικασία Batch processing.



Εικ. 14 Υπολογισμός των δεικτών μέσω του γραφήματος του GraphBuilder

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του GraphBuilder είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα το τελικό προϊόν (product) να είναι ένα ενιαίο αρχείο. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο στη μετέπειτα διαδικασία καθώς διευκολύνεται η εξαγωγή των τιμών των εικονοστοιχείων (pixel extraction). Γι' αυτό το λόγο, σε ένα δεύτερο επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε και πάλι το GraphBuilder (Εικ. 15) με την επιλογή band select, για να δημιουργηθεί ένα αρχείο (product) που συμπεριελάμβανε τους δείκτες και τα φασματικά κανάλια μαζί.



Εικ. 15 Δημιουργία αρχείου δεικτών και φασματικών καναλιών μαζί, με τη χρήση του GraphBuilder

3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΞΥΛΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ

3.3.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Για τη δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης ξυλαποθέματος με τη χρήση δορυφορικών εικόνων πρέπει να συσχετιστεί το ξυλαπόθεμα μια δεδομένης επιφάνειας με την τιμή της εικόνας για την ίδια επιφάνεια. Ως ελάχιστη μονάδα επιφάνειας για τη συγκεκριμένη λειτουργία χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος των μικρότερων διαθέσιμων εικονοστοιχείων των εικόνων Sentinel-2, δηλαδή τα 100m² (10m x 10m). Έτσι, ήταν απαραίτητη η αναγωγή του ξυλαποθέματος των ΔΕ στα 100m² (Πίν. 4).

Η εξαγωγή των τιμών των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στις θέσεις των ΔΕ έγινε με τη χρήση του λογισμικού SNAP και με την εντολή 'Extract Pixel Values'. Όμως, οι τιμές των pixel που εξήχθησαν ήταν ο μέσος όρος pixel ενός παραθύρου 3x3 γύρω από τη συντεταγμένη της θέσης της ΔΕ. Αυτό έγινε καταρχάς γιατί το κάθε pixel καλύπτει έκταση ίση με 100m² ενώ η έκταση των ΔΕ κυμαινόταν από 1 έως 3 στρέμματα. Συνεπώς, ένα μπλοκ 9 εικονοστοιχείων αντιστοιχεί σε έκταση 900m², που προσεγγίζει την έκταση της μικρότερης ΔΕ. Επιπλέον, με τον υπολογισμό της μέσης τιμής του παραθύρου αποφεύγονται σφάλματα τοποθέτησης της ακριβούς θέσης του κέντρου της κάθε ΔΕ (Calvão and Palmeirim, 2004; Vafaei et al., 2018). Έτσι διασφαλίζεται, ειδικά σε σχέση με τη σημειακή μέτρηση όπου λαμβάνεται υπόψη η τιμή ενός μόνο εικονοστοιχείου, αυτού που συμπίπτει με τις συντεταγμένες του κέντρου της δειγματοληπτικής επιφάνειας, η αντικειμενικότητα της μέτρησης, η ομαλοποίηση της τυχαίας μεταβλητότητας των τιμών (θόρυβος), και η μεταβλητότητα λόγω του μη ακριβούς προσδιορισμού της θέσης κάθε ΔΕ στην εικόνα (Μάκρας, 2007, p. 105).

Ακόμη, από τις συνολικά 44 ΔΕ, οι 9 από αυτές, δηλαδή ένα ποσοστό που αντιστοιχεί περίπου στο 20% (Πίν. 6), εξαιρέθηκαν από το pixel extraction σε αυτό το στάδιο, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως μάρτυρες στην αποτίμηση ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης (Vafaei et al., 2018). Οπότε τελικά, χρησιμοποιήθηκαν 35 ΔΕ, 24 με πεύκο και 11 με δρυ.

Πίν. 6 Δοκιμαστικές επιφάνειες που εξαιρέθηκαν από την εξαγωγή τιμών των εικόνων ώστε να χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης

Δασοπονικό είδος	Αριθμός ΔΕ	20% των ΔΕ	ΔΕ που εξαιρέθηκαν
Πεύκο	30	6	6,18,19,22,27,29
Δρυς	14	3	11,32,37
Σύνολο	44	9	

Για τη δημιουργία του μοντέλου πρόβλεψης ξυλαποθέματος επιλέχθηκαν δύο στατιστικές μέθοδοι: α) η ανάλυση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης και β) η ανάλυση της πολλαπλής παλινδρόμησης με κατά στάδια επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών (stepwise regression) (Lu, 2006; Γρηγοριάδης, 2014; Μάκρας, 2007). Το ξυλαπόθεμα αποτέλεσε την εξαρτημένη μεταβλητή, ενώ οι τιμές των εικονοστοιχείων τις ανεξάρτητες. Η ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε μεταβλητή κάθε ομάδας δεδομένων. Αντίθετα, στην πολλαπλή παλινδρόμηση διερευνήθηκε η δυνατότητα συμβολής περισσότερων από μία ανεξάρτητων μεταβλητών στην εκτίμηση του ξυλαποθέματος.

Επιπλέον, εκτός από τις δύο μεθόδους παλινδρόμησης, τα δεδομένα αναλύθηκαν είτε με βάση το διαχωρισμό (στρωμάτωση) των δασοπονικών ειδών (πέυκο ή δρυ) ή συνολικά ως ενιαία βλάστηση (πέυκο μαζί με δρυ) (Πίν. 7). Οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS v.23.0 (IBM Corp., 2015).

Πίν. 7 Συγκεντρωτικά οι περιπτώσεις των διαφορετικών αναλύσεων για την κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης ξυλαποθέματος

Μέθοδος ανάλυσης	Δασοπονικό είδος	Περίπτωση
Απλή γραμμική παλινδρόμηση	Χωριστά το κάθε είδος πέυκο/δρυς	Περίπτωση 1
	Μαζί πέυκο & δρυς	Περίπτωση 2
Πολλαπλή παλινδρόμηση με κατά στάδια επιλογή	Χωριστά το κάθε είδος πέυκο/δρυς	Περίπτωση 3
	Μαζί πέυκο & δρυς	Περίπτωση 4

Υπάρχουν δηλαδή συνολικά τέσσερις περιπτώσεις αναλύσεων και η κάθε μια από αυτές οδηγεί σε ένα μοντέλο πρόβλεψης ξυλαποθέματος.

3.3.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Με βάση το συντελεστή προσδιορισμού επιλέγεται το καλύτερο μοντέλο πρόβλεψης για την κάθε περίπτωση. Αφού κατασκευαστούν τα μοντέλα πρόβλεψης του ξυλαποθέματος και εφαρμοστούν στις αντίστοιχες εικόνες, ακολουθεί η αποτίμηση της ακρίβειάς τους ώστε να επιλεγεί το επικρατέστερο ανάμεσα στις 4 Περιπτώσεις. Η αποτίμηση βασίζεται καταρχάς στους συντελεστές προσδιορισμού R^2 των μοντέλων και επίσης, στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή στα μοντέλα πρόβλεψης του 20% των ΔΕ που είχαν εξαιρεθεί αρχικά από τις αναλύσεις, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως μάρτυρες. Στη δεύτερη περίπτωση, εφαρμογή μοντέλων στις

εξαιρεθείσες ΔΕ, ο έλεγχος έγινε με τον υπολογισμό της απόκλισης της μέσης τιμής $A_{\bar{V}}$ και τον υπολογισμό του σφάλματος E (Alrababah et al., 2011) που δίνουν τη διαφορά της πρόβλεψης από τη μέση πραγματική τιμή.

$$A_{\bar{V}} = \left| \frac{\bar{V}_A - \bar{V}_P}{\bar{V}_A} \right| * 100 (\%) \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_A - V_P)^2}{n}} \frac{1}{\bar{V}_A} * 100 (\%) \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Όπου,

$A_{\bar{V}}$ = Απόκλιση της μέσης τιμής πρόβλεψης

E = Ποσοστό % σφάλματος μοντέλου (διαφορά από τη μέση πραγματική τιμή)

V_A = Πραγματικό ξυλαπόθεμα των ΔΕ (σύμφωνα με τα στοιχεία της διαχειριστικής μελέτης)

\bar{V}_A = Μέση τιμή πραγματικού ξυλαποθέματος

\bar{V}_P = Μέση τιμή προβλεπόμενου ξυλαποθέματος

V_P = Ξυλαπόθεμα προβλεπόμενο από το μοντέλο

n = αριθμός ΔΕ που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο ακρίβειας

3.4 ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

3.4.1 *ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ RANDOM FORESTS*

Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση των καλύψεων γης της εικόνας έγινε με τη χρήση του αλγόριθμου Random Forests που είναι διαθέσιμος με το λογισμικό SNAP. Η εικόνα που χρησιμοποιήθηκε ήταν στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ87 (EPSG=2100) και μετασχηματίστηκε καταλλήλως, ώστε να δημιουργηθεί το αρχείο (product) που να περιέχει τους δείκτες και τα φασματικά κανάλια μαζί. Το SNAP δίνει δύο επιλογές όσον αφορά στη δημιουργία των περιοχών εκπαίδευσης (training sites): α) Να δημιουργηθούν τα training sites ως νέα πολύγωνα απευθείας στην εικόνα στο SNAP και β) να δημιουργηθούν τα training sites ως πολύγωνα με τη μορφή αρχείου *.shp σε άλλο λογισμικό και να εισαχθούν στη συνέχεια στο SNAP. Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε η δεύτερη επιλογή. Έτσι, τα training sites δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού QGIS. Με το QGIS είναι καταρχάς πολύ εύκολη η δημιουργία και αποθήκευση των πολυγώνων σε αρχείο τύπου *.shp και επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα χρήσης άλλων βοηθητικών εικόνων με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα όπως είναι το Google Maps, το Bing Maps κλπ. Οι κλάσεις/κατηγορίες ταξινόμησης που αποφασίστηκε τελικά να χρησιμοποιηθούν ήταν τέσσερις (Πίν. 8).

Πίν. 8 Κλάσεις ταξινόμησης καλύψεων γης για το RF

Κλάσεις ταξινόμησης

1 – Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες

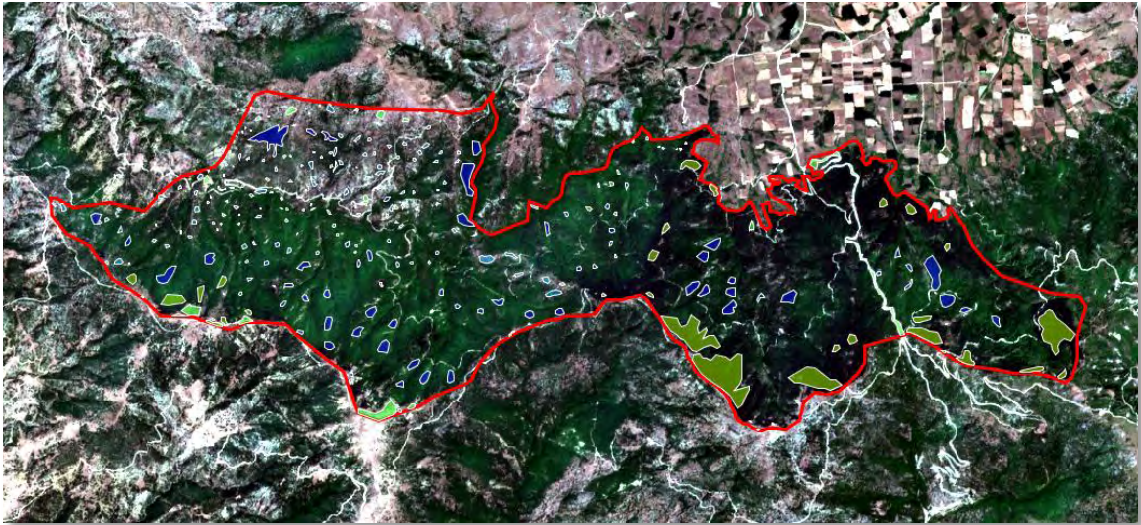
2 – Πεύκο

3 – Δρυς (και ευγενή πλατύφυλλα)

4 – Αείφυλλα πλατύφυλλα

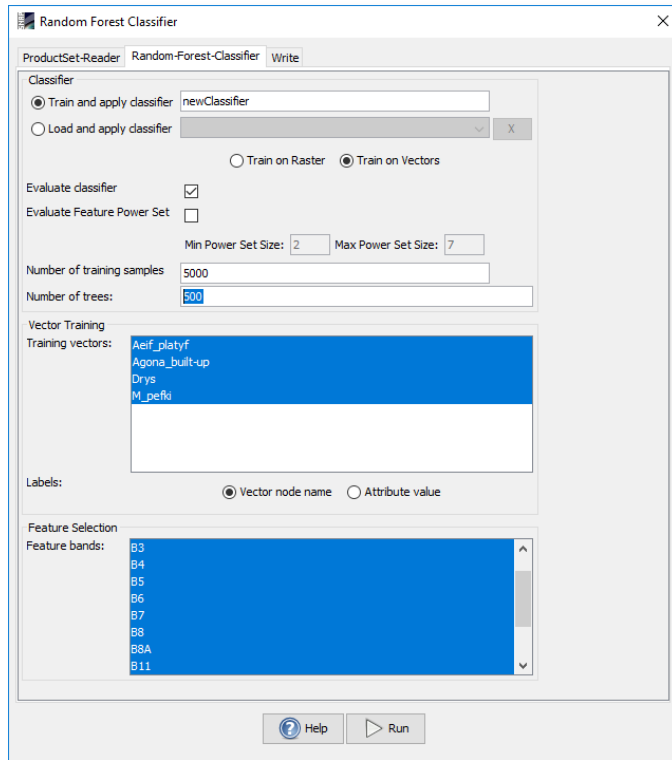
Οι άγονες εκτάσεις αποτελούνται από ασκεπείς εκτάσεις εντός του δάσους και από βραχώδεις εξάρσεις, ενώ οι τεχνητές επιφάνειες από τους δρόμους, επαρχιακό και δασικό δίκτυο. Στην κατηγορία του πεύκου ταξινομήθηκαν οι εκτάσεις που καλύπτονται από πεύκο (Μαύρη πεύκη). Στην κατηγορία της δρυός ταξινομήθηκαν οι εκτάσεις που καλύπτονται από δρυ και από τα λοιπά ευγενή πλατύφυλλα. Τέλος, στην κατηγορία αειφύλλων πλατυφύλλων ταξινομήθηκαν οι εκτάσεις που καλύπτονται από θάμνους, κυρίως από πουρνάρι (*Quercus coccifera*). Τα αείφυλλα πλατύφυλλα καλύπτουν αρκετά μεγάλη έκταση όμως μένουν εκτός διαχείρισης και γι' αυτό δεν συμπεριλήφθησαν στις ΔΕ. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη

ταξινόμηση κανονικά ως ξεχωριστή κλάση. Έτσι, οι περιοχές εκπαίδευσης των τεσσάρων κλάσεων που δημιουργήθηκαν με τη χρήση του QGIS παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



Εικ. 16 Περιοχές εκπαίδευσης των 4 κλάσεων για την ταξινόμηση με το RF

Τα αρχεία με τις περιοχές εκπαίδευσης εισήχθησαν στο SNAP και ξεκίνησε η διαδικασία της ταξινόμησης. Για την ταξινόμηση επιλέχθηκαν δύο ομάδες καναλιών/μεταβλητών. Στη πρώτη περίπτωση η ταξινόμηση έγινε με βάση μόνο τα φασματικά κανάλια (εκτός του B1, B9 και B10), ενώ στη δεύτερη περίπτωση έγινε με βάση τα φασματικά κανάλια και τους δείκτες μαζί. Επιπλέον, ορίστηκε ο αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης ίσος με 5.000 και ο αριθμός των δέντρων ίσος με 500 (Εικ. 17).



Εικ. 17 Παράμετροι ταξινόμησης RF

3.4.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

Η αποτίμηση της ακρίβειας της ταξινόμησης των καλύψεων γης με τον αλγόριθμο Random Forests πραγματοποιήθηκε με το πρόσθετο (plug-in) του QGIS, το Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) (Congedo, 2016). Στο λογισμικό αυτό, εισήχθη η ταξινομημένη προς αξιολόγηση εικόνα και στην επιφάνειά της δημιουργήθηκαν τυχαία σημεία (Regions Of Interest/ROIs). Στη συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργήθηκαν 200 ROIs. Αυτά στη συνέχεια αξιολογήθηκαν ένα προς ένα και ταξινομήθηκαν στις αντίστοιχες κλάσεις τους. Τα ROIs που βρισκόταν εκτός των ορίων του δάσους ταξινομήθηκαν ως No Data value (Εικ. 18). Συνολικά, εντός των ορίων του δάσους βρέθηκαν 101 ROIs τα οποία και ταξινομήθηκαν στις τέσσερις κλάσεις. Η διαδικασία αποτίμησης επαναλήφθηκε τόσο για την εικόνα της ταξινόμησης με βάση μόνο τα φασματικά κανάλια όσο και για την εικόνα της ταξινόμησης με βάση τα φασματικά κανάλια και τους δείκτες μαζί.



Εικ. 18 Κατανομή των τυχαίων σημείων (ROIs) στην περιοχή μελέτης. Πολλά ROIs βρίσκονται εκτός των ορίων του δάσους.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΞΥΛΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων της απλής γραμμικής και της πολλαπλής παλινδρόμησης. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης με τις δύο περιπτώσεις τους, δηλαδή ανάλυση με τα δασοπονικά είδη χωριστά και ανάλυση με τα δασοπονικά είδη μαζί ως ενιαία βλάστηση. Το ίδιο θα επαναληφτεί για την πολλαπλή παλινδρόμηση με επιλογή κατά στάδια (stepwise regression).

4.1.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1

α) Για τη γραμμική παλινδρόμηση μόνο με τις ΔΕ του πεύκου υπολογίστηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίν. 9 Αποτελέσματα απλής γραμμικής παλινδρόμησης μόνο για τις ΔΕ με πεύκα

Πεύκο (Pinus), n=24									
α/α	Κατηγορίες μεταβλητών ¹	Μεταβλητή	R	R ²	R ² _{adj}	RMSE	Sig.	Σταθερά α	Σταθερά β
1	Φασματικό κανάλι	B2	-,519	,269	,236	,874	,009	5,617	-175,415
2	Φασματικό κανάλι	B3	-,723	,523	,501	,706	,000	5,991	-113,608
3	Φασματικό κανάλι	B4	-,519	,269	,236	,874	,009	4,613	-135,387
4	Φασματικό κανάλι	B5	-,684	,468	,444	,746	,000	5,430	-52,059
5	Φασματικό κανάλι	B6	-,550	,303	,271	,854	,005	4,520	-10,897
6	Φασματικό κανάλι	B7	-,527	,278	,245	,869	,008	4,345	-8,211
7	Φασματικό κανάλι	B8	-,566	,321	,290	,843	,004	4,514	-8,655
8	Φασματικό κανάλι	B8	-,522	,272	,239	,872	,009	4,338	-7,582
9	Φασματικό κανάλι	B11	-,720	,519	,497	,709	,000	5,018	-22,577
10	Φασματικό κανάλι	B12	-,700	,490	,467	,730	,000	5,092	-49,636
11	Δείκτης Βλάστησης	RVI	,117	,014	-,031	1,016	,585	,079	2,412
12	Δείκτης Βλάστησης	DVI	-,535	,286	,254	,864	,007	4,235	-8,153
13	Δείκτης Βλάστησης	GEMI	-,504	,254	,220	,883	,012	5,884	-5,243
14	Δείκτης Βλάστησης	IPVI	,000	,000	-,045	1,023	,999	2,190	,014
15	Δείκτης Βλάστησης	IRECI	-,336	,113	,072	,963	,109	3,191	-1,156
16	Δείκτης Βλάστησης	MCRI	-,317	,101	,060	,970	,131	2,828	-4,169
17	Δείκτης Βλάστησης	MTCI	,273	,074	,032	,984	,197	,196	,577
18	Δείκτης Βλάστησης	NDI45	-,089	,008	-,037	1,019	,679	2,900	-1,260
19	Δείκτης Βλάστησης	NDVI	-,000	,000	-,045	1,023	,999	2,197	,007
20	Δείκτης Βλάστησης	PSSR	,082	,007	-,038	1,019	,705	1,974	,014
21	Δείκτης Βλάστησης	PVI	-,535	,286	,254	,864	,007	4,235	-11,530
22	Δείκτης Βλάστησης	REIP	,190	,036	-,008	1,004	,374	-98,051	,139
23	Δείκτης Βλάστησης	RVI	,036	,001	-,044	1,022	,866	2,095	,007

24	Δείκτης Βλάστησης	S2REP	,190	,036	-,008	1,004	,374	-112,762	,159
25	Δείκτης Βλάστησης	TNDVI	,001	,000	-,045	1,023	,995	2,110	,079
26	Δείκτης Βλάστησης	WDVI	-,551	,303	,272	,854	,005	4,374	-8,411
27	Δείκτης Εδάφους	MSVI	-,512	,262	,229	,878	,011	4,541	-5,661
28	Δείκτης Εδάφους	MSVI2	-,507	,257	,223	,881	,011	6,559	-4,521
29	Δείκτης Εδάφους	SVI	-,499	,249	,214	,886	,013	5,104	-6,187
30	Δείκτης Εδάφους	TSVI	,499	,249	,215	,886	,013	1,916	,054

¹Από ESA Sentinel-2 Toolbox Features <http://step.es.int/min/toolboxes/sentinel-2-toolbox/sentinel-2-toolbox-fetures/>

Όπως προκύπτει από την εξέταση του προηγούμενου πίνακα, το φασματικό κανάλι B3 (Πράσινο/Green), παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού (Πίν. 10) και ακολουθούσαν τα κανάλια B11 (SWIR1) και B12 (SWIR2). Ο δείκτης με τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού ($R^2=0,303$) ήταν ο WDVI και ήταν 6^{ος} στη σειρά κατάταξης.

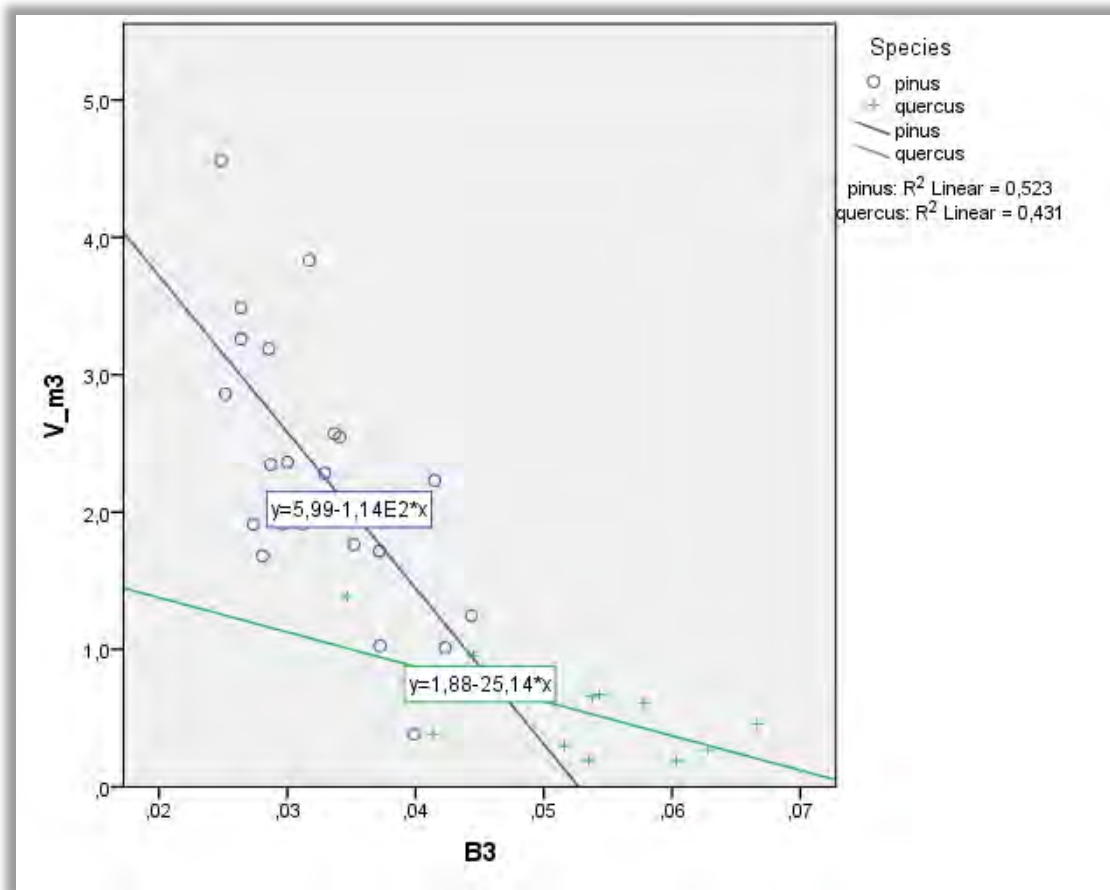
Πίν. 10 Το φασματικό κανάλι B3 (G) παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R^2 της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τα πεύκα

ΔΕ Πεύκου (n=24)							
Μεταβλητή	R	R^2	R^2_{adj}	RMSE*	Sig. **	Σταθερά α	Σταθερά β
B3	.723	.523	.501	.706	.000	5.991	-113.608
*RMSE: Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος							
** Sig.: Επίπεδο σημαντικότητας							

Η εξίσωση για το μοντέλο πρόβλεψης του πεύκου για την εικόνα B3 είναι:

$$y = 5,991 - 113,608x \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Το διάγραμμα διασποράς του καναλιού B3 μαζί με την εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ πεύκου (pinus) παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 1 Διάγραμμα διασποράς και εξίσωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ του πεύκου (pinus)

Από την εφαρμογή της Εξίσωσης 3 στο κανάλι B3 προέκυψε μια νέα εικόνα στην οποία έγινε εξαγωγή (pixel extraction) των τιμών των εικονοστοιχείων των 6 ΔΕ πεύκου, οι οποίες είχαν εξαιρεθεί της ανάλυσης ώστε να χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση της ακρίβειας. Αυτές οι τιμές ουσιαστικά είναι οι προβλεπόμενες τιμές (V_P) του μοντέλου πρόβλεψης (Πίν. 11).

Πίν. 11 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για το πεύκο που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

ΔΕ Πεύκου	V_A (m ³)	V_P (m ³) 3x3 window	Απόκλιση % (Απόλυτες Τιμές)
6	2.45	2.11	13.9
18	2.58	3.35	29.8
19	2.76	2.27	17.9
22	2.22	3.19	43.6
27	3.68	2.81	23.6
29	1.32	1.87	41.7
Μέση Τιμή	2.50	2.60	28.41

Όπου, V_A =Πραγματικός όγκος σε m³, V_P = Προβλεπόμενος όγκος από το μέσο όρο παράθυρου 3x3 σε m³

Για την αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις 1 και 2:

Απόκλιση μέσης τιμής $A_{\bar{v}}=3.91\%$

Σφάλμα διαφοράς της πρόβλεψης από τη μέση πραγματική τιμή $E=28,02\%$

β) Για τη γραμμική παλινδρόμηση μόνο με τις ΔΕ της δρυός τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίν. 12.

Πίν. 12 Αποτελέσματα απλής γραμμικής παλινδρόμησης μόνο για τις ΔΕ με δρυ

Δρυς (Quercus), n=11									
a/a	Κατηγορίες μεταβλητών ¹	Μεταβλητή	R	R ²	R ² _{adj}	RMSE	Sig.	Σταθερά α	Σταθερά β
1	Φασματικό κανάλι	B2	-,563	,316	,240	,318	,072	1,615	-42,077
2	Φασματικό κανάλι	B3	-,657	,431	,368	,290	,028	1,880	-25,138
3	Φασματικό κανάλι	B4	-,323	,104	,004	,364	,333	,927	-15,949
4	Φασματικό κανάλι	B5	-,655	,429	,365	,290	,029	1,756	-12,002
5	Φασματικό κανάλι	B6	-,560	,314	,238	,318	,073	1,589	-3,094
6	Φασματικό κανάλι	B7	-,516	,267	,185	,329	,104	1,459	-2,236
7	Φασματικό κανάλι	B8	-,493	,243	,158	,334	,124	1,408	-2,051
8	Φασματικό κανάλι	B8A	-,518	,268	,187	,329	,103	1,486	-2,142
9	Φασματικό κανάλι	B11	-,684	,468	,409	,280	,020	1,869	-6,229
10	Φασματικό κανάλι	B12	-,602	,363	,292	,307	,050	1,733	-12,743
11	Δείκτης Βλάστησης	ARVI	-,203	,041	-,065	,376	,549	1,697	-1,279
12	Δείκτης Βλάστησης	DVI	-,462	,214	,126	,341	,152	1,304	-1,910
13	Δείκτης Βλάστησης	GEMI	-,561	,314	,238	,318	,073	2,275	-1,945
14	Δείκτης Βλάστησης	IPVI	-,212	,045	-,061	,375	,531	3,935	-3,584
15	Δείκτης Βλάστησης	IRECI	-,267	,071	-,032	,370	,427	,874	-,247
16	Δείκτης Βλάστησης	MCARI	-,455	,207	,119	,342	,159	1,034	-1,494
17	Δείκτης Βλάστησης	MTCI	,256	,066	-,038	,371	,447	-,101	,209
18	Δείκτης Βλάστησης	NDI45	-,330	,109	,010	,363	,321	1,463	-1,463
19	Δείκτης Βλάστησης	NDVI	-,212	,045	-,061	,375	,531	2,143	-1,792
20	Δείκτης Βλάστησης	PSSRa	-,125	,016	-,094	,381	,713	,696	-,008
21	Δείκτης Βλάστησης	PVI	-,462	,214	,126	,341	,152	1,304	-2,702
22	Δείκτης Βλάστησης	REIP	,137	,019	-,090	,381	,689	-28,118	,040
23	Δείκτης Βλάστησης	RVI	-,114	,013	-,097	,382	,739	,683	-,007
24	Δείκτης Βλάστησης	S2REP	,137	,019	-,090	,381	,689	-32,333	,046
25	Δείκτης Βλάστησης	TNDVI	-,208	,043	-,063	,376	,539	5,363	-4,084
26	Δείκτης Βλάστησης	WDVI	-,478	,228	,142	,337	,137	1,356	-1,984
27	Δείκτης Εδάφους	MSAVI	-,481	,231	,146	,337	,134	1,496	-1,595
28	Δείκτης Εδάφους	MSAVI2	-,474	,225	,138	,338	,141	2,101	-1,318
29	Δείκτης Εδάφους	SAVI	-,496	,246	,162	,334	,121	1,747	-1,928
30	Δείκτης Εδάφους	TSAVI	,782	,612	,568	,239	,004	,537	,121

¹Από ESA Sentinel-2 Toolbox Features <http://step.es.int/min/toolboxes/sentinel-2-toolbox/sentinel-2-toolbox-fetures/>

Εξετάζοντας τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι από το σύνολο των συντελεστών προσδιορισμού μόλις τέσσερις είναι στατιστικά σημαντικοί. Υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού παρουσίασε ο δείκτης εδάφους TSAVI (Πίν. 13), ενώ

ακολούθησαν 4 φασματικά κανάλια το B11 (SWIR), B3 (Green) και B5 (Red Edge 1/RE1).

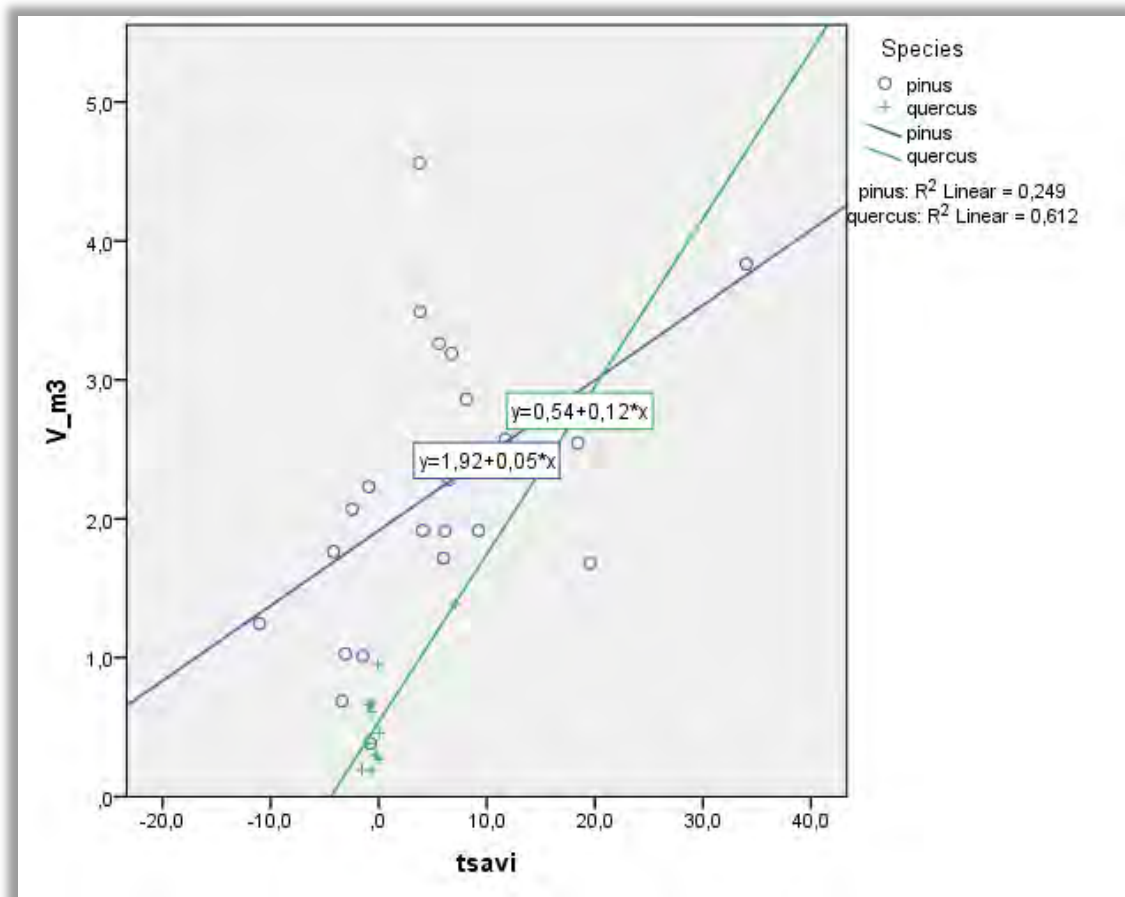
Πίν. 13 Ο δείκτης εδάφους TSAVI παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R^2 της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις δρυς

ΔΕ Δρυός (n=11)							
Μεταβλητή	R	R^2	R^2_{adj}	RMSE*	Sig.**	Σταθερά α	Σταθερά β
TSAVI	.782	.612	.568	.239	.004	.537	.121
*RMSE: Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος							
** Sig.: Επίπεδο σημαντικότητας							

Η εξίσωση για το μοντέλο πρόβλεψης της δρυός για τον δείκτη TSAVI είναι:

$$y = 0,537 + 0,121x \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Το διάγραμμα διασποράς του δείκτη TSAVI, μαζί με τη εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ δρυός (quercus) παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2 Διάγραμμα διασποράς και εξίσωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ της δρυός (quercus)

Από την εφαρμογή της Εξίσωσης 4 στο δείκτη TSAVI προέκυψε μια νέα εικόνα στην οποία έγινε εξαγωγή (pixel extraction) των τιμών των εικονοστοιχείων των 3 ΔΕ δρυός, οι οποίες είχαν εξαιρεθεί της ανάλυσης ώστε να χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση της ακρίβειας. Αυτές οι τιμές ουσιαστικά είναι οι προβλεπόμενες τιμές (V_P) του μοντέλου πρόβλεψης (Πίν. 14).

Πίν. 14 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για τη δρυ που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

ΔΕ Δρυός	V_A (m ³)	V_P (m ³) 3x3 window	Απόκλιση % (Απόλυτες τιμές)
11	0.54	0.47	12.24
32	0.35	0.49	41.06
37	0.49	0.51	4.95
Μέση Τιμή	0.46	0.49	19.41

Όπου, V_A =Πραγματικός όγκος σε m³, V_P = Προβλεπόμενος όγκος από το μέσο όρο παράθυρου 3x3 σε m³

Για την αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις 1 και 2:

Απόκλιση μέσης τιμής $A_{\bar{v}}=7.38\%$

Σφάλμα διαφοράς της πρόβλεψης από τη μέση πραγματική τιμή $E=19,81\%$

4.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2

Στην Περίπτωση 2, το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης βασίστηκε στα δεδομένα των ΔΕ του πεύκου και της δρυός συνολικά, χωρίς τα δύο είδη να διαχωρίζονται. Τα αποτελέσματα των γραμμικών παλινδρομήσεων για κάθε φασματικό κανάλι και δείκτη παρουσιάζονται στον Πίν. 15.

Πίν. 15 Αποτελέσματα απλής γραμμικής παλινδρόμησης συνολικά για τις ΔΕ με πεύκο και δρυ

Πεύκο & Δρυς (Pinus & Quercus), n=35									
a/α	Κατηγορίες μεταβλητών ¹	Μεταβλητή	R	R ²	R ² _{adj}	RMSE	Sig.	Σταθερά α	Σταθερά β
1	Φασματικό κανάλι	B2	-,666	,444	,427	,870	,000	5,297	-169,759
2	Φασματικό κανάλι	B3	-,808	,653	,643	,687	,000	4,799	-78,924
3	Φασματικό κανάλι	B4	-,557	,311	,290	,968	,001	3,865	-111,325
4	Φασματικό κανάλι	B5	-,792	,627	,616	,712	,000	4,532	-38,468
5	Φασματικό κανάλι	B6	-,740	,547	,533	,785	,000	4,365	-10,672
6	Φασματικό κανάλι	B7	-,719	,517	,502	,811	,000	4,277	-8,461
7	Φασματικό κανάλι	B8	-,732	,535	,521	,795	,000	4,305	-8,342
8	Φασματικό κανάλι	B8A	-,719	,517	,502	,811	,000	4,310	-7,953
9	Φασματικό κανάλι	B11	-,822	,676	,666	,664	,000	4,383	-17,761
10	Φασματικό κανάλι	B12	-,807	,651	,640	,689	,000	4,587	-42,040
11	Δείκτης Βλάστησης	ARVI	-,048	,002	-,028	1,165	,782	2,644	-1,085
12	Δείκτης Βλάστησης	DVI	-,711	,506	,491	,820	,000	4,113	-8,244
13	Δείκτης Βλάστησης	GEMI	-,710	,505	,490	,821	,000	6,442	-6,261
14	Δείκτης Βλάστησης	IPVI	-,173	,030	,000	1,149	,321	11,098	-10,040

15	Δείκτης Βλάστησης	IRECI	-,549	,301	,280	,975	,001	3,316	-1,638
16	Δείκτης Βλάστησης	MCARI	-,621	,386	,368	,914	,000	2,910	-6,004
17	Δείκτης Βλάστησης	MTCI	,407	,166	,140	1,065	,015	-1,550	,961
18	Δείκτης Βλάστησης	NDI45	,355	,126	,099	1,091	,037	4,601	-5,074
19	Δείκτης Βλάστησης	NDVI	-,173	,030	,000	1,149	,321	6,078	-5,020
20	Δείκτης Βλάστησης	PSSRa	-,136	,019	-,011	1,156	,435	2,134	-,026
21	Δείκτης Βλάστησης	PVI	-,711	,506	,491	,820	,000	4,113	-11,658
22	Δείκτης Βλάστησης	REIP	,372	,139	,113	1,082	,028	-216,364	,303
23	Δείκτης Βλάστησης	RVI	-,178	,032	,002	1,148	,308	2,287	-,035
24	Δείκτης Βλάστησης	S2REP	,372	,139	,113	1,082	,028	-248,374	,346
25	Δείκτης Βλάστησης	TNDVI	-,170	,029	-,001	1,149	,330	15,124	-11,463
26	Δείκτης Βλάστησης	WDVI	-,722	,521	,506	,807	,000	4,211	-8,300
27	Δείκτης Εδάφους	MSAVI	-,701	,491	,476	,832	,000	4,659	-6,339
28	Δείκτης Εδάφους	MSAVI2	-,697	,485	,470	,837	,000	7,059	-5,218
29	Δείκτης Εδάφους	SAVI	-,694	,481	,465	,840	,000	5,438	-7,271
30	Δείκτης Εδάφους	TSAVI	,562	,316	,295	,965	,000	1,390	,080

Από ESA Sentinel-2 Toolbox Features <http://step.es.int/min/toolboxes/sentinel-2-toolbox/sentinel-2-toolbox-fetures/>

Από την εξέταση του παραπάνω πίνακα προκύπτει πως οι περισσότερες μεταβλητές είναι στατιστικά σημαντικές. Υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού παρουσίασε το φασματικό κανάλι B11 (SWIR1) (Πίν. 16) ακολουθούμενο επίσης από τα φασματικά κανάλια B3 (G) και B12 (SWIR2). Παρατηρούμε ότι, και σε αυτή την περίπτωση, οι έξι υψηλότεροι συντελεστές προσδιορισμού ανήκουν σε φασματικά κανάλια. Μόλις 7^{ος} στην κατάταξη βρίσκεται ο δείκτης με τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού και είναι και πάλι, όπως και στην Περίπτωση 1α, ο WDVl με $R^2=0,303$.

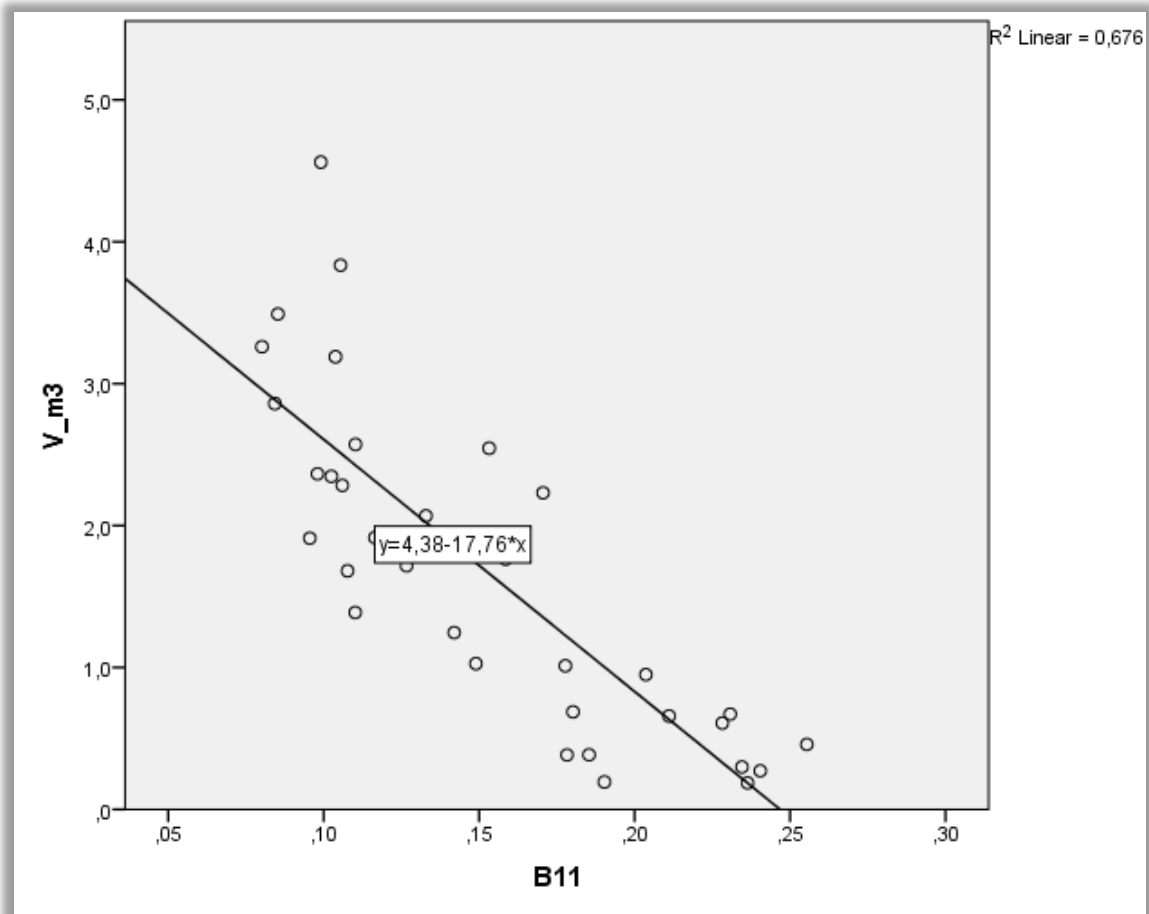
Πίν. 16 Το φασματικό κανάλι B11 (SWIR1) παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού R^2 της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για το πεύκο και τη δρυ συνολικά

ΔΕ Πεύκου & Δρυός (n=35)							
Μεταβλητή	R	R ²	R ² _{adj}	RMSE*	Sig. **	Σταθερά α	Σταθερά β
B11	.822	.676	.666	.664	.000	4.383	-17.761
*RMSE Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος							
** Sig.: Επίπεδο σημαντικότητας							

Η εξίσωση για το μοντέλο πρόβλεψης του πεύκου και της δρυός συνολικά για την εικόνα B11 είναι:

$$y = 4,383 - 17,761x \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Το διάγραμμα διασποράς του φασματικού καναλιού B11 μαζί με τη εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ πεύκου (pinus) και δρυός (quercus) συνολικά, παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 3 Διάγραμμα διασποράς και εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης για τις ΔΕ του πεύκου και της δρυός συνολικά.

Από την εφαρμογή της Εξίσωσης 5 στο κανάλι B11 προέκυψε μια νέα εικόνα στην οποία έγινε εξαγωγή (pixel extraction) των τιμών των εικονοστοιχείων των 9 ΔΕ πεύκου και δρυός, οι οποίες είχαν εξαιρεθεί της ανάλυσης ώστε να χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση της ακρίβειας. Αυτές οι τιμές ουσιαστικά είναι οι προβλεπόμενες τιμές (V_P) του μοντέλου πρόβλεψης (Πίν. 17).

Πίν. 17 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για το πεύκο και τη δρυ συνολικά, που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

ΔΕ (Πεύκου & Δρυός)	V_A (m ³)	V_P (m ³) 3x3 window	Απόκλιση % (Απόλυτες τιμές)
6	2.45	2.50	1.89
11	0.54	0.27	50.19
18	2.58	2.82	9.35
19	2.76	2.26	18.20
22	2.22	2.81	26.58
27	3.68	2.79	24.13
29	1.32	1.31	0.81
32	0.35	0.85	143.91
37	0.49	0.24	51.96

Μέση τιμή	1.82	1.76	36.33
Όπου, V_A =Πραγματικός όγκος σε m^3 , V_P = Προβλεπόμενος όγκος από το μέσο όρο παράθυρου 3x3 σε m^3			

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί για τα αποτελέσματα του προβλεπόμενου ξυλαποθέματος είναι η πολύ μεγάλη απόκλιση (134,91%) που παρουσίασε η προβλεπόμενη από την πραγματική τιμή στη ΔΕ 32. Αυτό έχει ως συνέπεια να αυξηθεί η συνολική απόκλιση και το σφάλμα από τη μέση πραγματική τιμή.

Για την αποτίμηση της ακρίβειας του μοντέλου εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις 1 και 2:

Απόκλιση μέσης τιμής $A_{\bar{y}}=3.33\%$

Σφάλμα διαφοράς της πρόβλεψης από τη μέση πραγματική τιμή $E=24,80\%$

4.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3

Στην Περίπτωση 3, εφαρμόστηκε η πολλαπλή παλινδρόμηση με επιλογή κατά στάδια (stepwise regression) με βάση είτε μόνο τις ΔΕ του πεύκου ή μόνο τις ΔΕ της δρυός. Τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα με αυτά της Περίπτωσης 1. Δηλαδή, για το πεύκο μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού ($R^2=0,523$) είχε το φασματικό κανάλι B3, ενώ για τη δρυ μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού ($R^2=0,612$) είχε ο δείκτης εδάφους TSAVI. Επειδή τα αποτελέσματα είναι ίδια με τα αντίστοιχα των γραμμικών παλινδρομήσεων, δεν παρουσιάζονται.

4.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4

Στην Περίπτωση 4, εφαρμόστηκε η πολλαπλή παλινδρόμηση με επιλογή κατά στάδια (stepwise regression) με βάση τις ΔΕ του πεύκου και τις δρυός συνολικά. Η πολλαπλή παλινδρόμηση κατά στάδια επέλεξε τρεις από τις συνολικά 30 μεταβλητές: το φασματικό κανάλι B11, το δείκτη βλάστησης MCARI και το δείκτη βλάστησης (εδάφους) TSAVI (Πίν. 18). Η συσχέτιση των τριών ερμηνευτικών μεταβλητών με το ξυλαποθέμα βρέθηκε ίση με $R=0.874$ και ο συντελεστής προσδιορισμού ίσος με $R^2=0,764$. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται και οι σταθερές για κάθε μεταβλητή.

Πίν. 18 Το φασματικό κανάλι B11 και οι δείκτες MCARI και TSAVI επιλέχθηκαν κατά την ανάλυση της πολλαπλής παλινδρόμησης για το πεύκο και τη δρυ συνολικά

ΔΕ Πεύκου & Δρυός (n=35)									
Μεταβλητή	R	R ²	R ² _{adj}	RMSE*	Sig. F **	Σταθερά α	Σταθερά B11	Σταθερά MCARI	Σταθερά TSAVI

B11, MCARI, TSAVI	,874	,764	,741	,585	,000	4,309	-24,258	4,583	,014
*RMSE: Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος									
** Sig. F: Επίπεδο σημαντικότητας									

Η εξίσωση παλινδρόμησης που δίνει τον προβλεπόμενο όγκο (V_p) είναι:

$$V_p = 4,309 - 24,258*B11 + 4,583*MCARI + 0,014*TSAVI \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

Οι μέσες τιμές ανάκλασης για τις τρεις μεταβλητές στα εικονοστοιχεία παραθύρου 3x3 που αντιστοιχούν στις ΔΕ, όπως και ο προβλεπόμενος όγκος που προκύπτει από την Εξίσωση 6, δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίν. 19 Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα για το πεύκο και τη δρυ συνολικά, που προέκυψε από την εφαρμογή της εξίσωσης της πολλαπλής παλινδρόμησης

ΔΕ (Πεύκου & Δρυός)	V_A (m ³)	$\overline{B11}_{3x3}$	\overline{MCARI}_{3x3}	\overline{TSAVI}_{3x3}	V_p (m ³)
6	2,45	0,118	0,269	6,175	2,38
11	0,54	0,231	0,376	-0,482	-0,16
18	2,58	0,088	0,131	2,924	2,76
19	2,76	0,121	0,174	7,893	2,04
22	2,22	0,091	0,092	4,249	2,64
27	3,68	0,093	0,086	10,453	2,66
29	1,32	0,168	0,250	-0,330	1,21
32	0,35	0,181	0,304	-1,123	0,66
37	0,49	0,234	0,403	-0,220	0,53
Μέση τιμή	1,82				1,64

Όπου, V_A =Πραγματικός όγκος σε m³, V_p = Προβλεπόμενος όγκος από την Εξίσωση 3 σε m³

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ένα μη λογικό αποτέλεσμα αφού για την ΔΕ 11, η Εξίσωση 3 προβλέπει ξυλαπόθεμα αρνητικό (-0,16 m³). Η πραγματική τιμή της ΔΕ 11 (0,54 m³) είναι αρκετά κοντά στο μηδέν και επειδή το R^2 εξηγεί το 76,4% της συνολικής διακύμανσης μάλλον αυτή η αρνητική τιμή οφείλεται στα κατάλοιπα (residuals) του μοντέλου.

Από την Εξίσωση 1, για τις ΔΕ πεύκου και δρυός μαζί προκύπτει απόκλιση $A_{\bar{v}}=10,16\%$.

Από την Εξίσωση 2, για τις ΔΕ πεύκου και δρυός μαζί προκύπτει σφάλμα $E=28,17\%$.

4.1.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ – ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της αποτίμησης της ακρίβειας στην πρόβλεψη του ξυλαποθέματος παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας.

Πίν. 20 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της αποτίμησης της ακρίβειας της πρόβλεψης ξυλαποθέματος για τις 4 περιπτώσεις

Ανάλυση παλινδρόμησης	Δασοπονικό είδος	Περίπτωση	R^2	Σφάλμα E %	Απόκλιση $A_{\bar{y}}\%$
Απλή γραμμική παλινδρόμηση	Πεύκο (n=24)	Περίπτωση 1	0,523	28,02	3,91
	Δρυς (n=11)		0,612	19,81	7,38
	Πεύκο & Δρυς (n=35)	Περίπτωση 2	0,676	24,80	3,33
Πολλαπλή παλινδρόμηση με κατά στάδια επιλογή	Πεύκο (n=24)	Περίπτωση 3	0,523	28,02	3,91
	Δρυς (n=11)		0,612	19,81	7,38
	Πεύκο & Δρυς (n=35)	Περίπτωση 4	0,764	28,17	10,16

Στον Πίν. 20 παρατηρούμε ότι η Περίπτωση 1 είναι ακριβώς ίδια με την Περίπτωση 3. Για αυτές τις περιπτώσεις έχουμε δύο συντελεστές προσδιορισμού, από έναν για κάθε είδος, οπότε δεν μπορούμε να δηλώσουμε το συνολικό συντελεστή προσδιορισμού της Περιπτώσεως 1 ή και της Περιπτώσεως 3 κατ' αντιστοιχία. Πάντως, ο μικρότερος R^2 είναι ίσος με 0,523 (πεύκο) και ο μεγαλύτερος ίσος με 0,676 (δρυς). Στην Περίπτωση 2 ο R^2 είναι αρκετά ικανοποιητικός (0,676), ενώ η Περίπτωση 4 παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή του R^2 , ίση με 0,764. Τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων είναι πολύ ικανοποιητικά συγκρινόμενα με άλλες μελέτες που παρουσιάζονται στον Πίν. 2. Ειδικότερα, συγκρινόμενα με μελέτες που αφορούν σε ελληνικά δασικά οικοσυστήματα (Chrysafis et al., 2017; Mallinis et al., 2004), κρίνονται ως άκρως ικανοποιητικά.

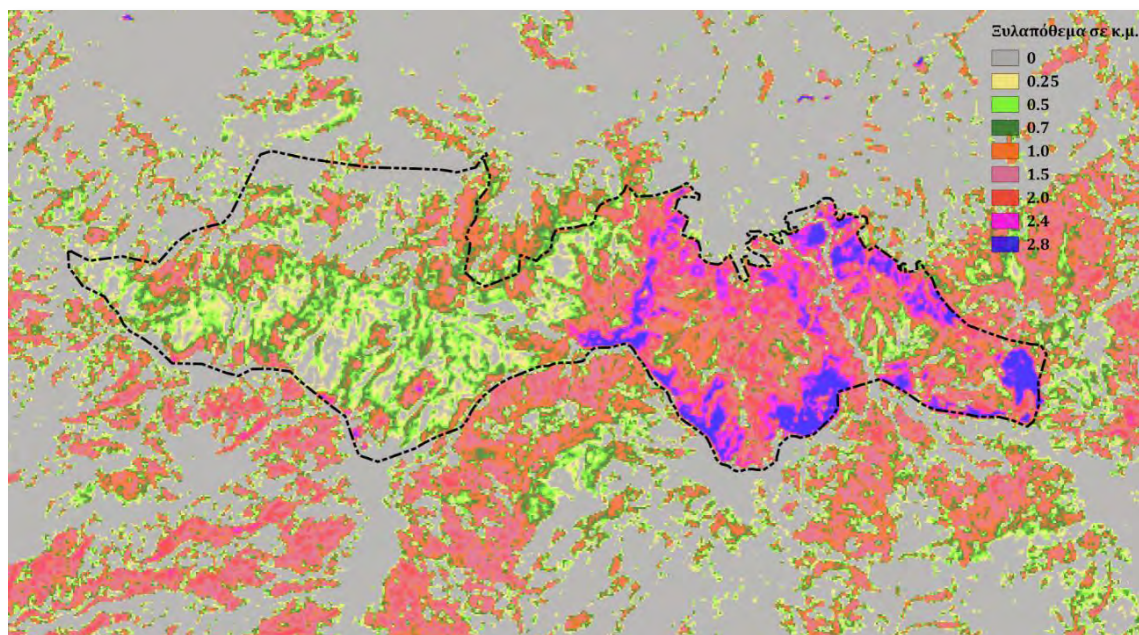
Σχολιάζοντας τους συντελεστές προσδιορισμού της παρούσας εργασίας αλλά και εν γένει μελετών που αφορούν σε δασικά οικοσυστήματα σε σχέση με τους συντελεστές προσδιορισμού των αγροτικών οικοσυστημάτων θα λέγαμε ότι δεν θα πρέπει να γίνεται άμεση σύγκριση τους για τους εξής λόγους:

- Ποικιλότητα ειδών. Τα δασικά οικοσυστήματα χαρακτηρίζονται από μια πληθώρα ειδών χλωρίδας ακόμη και στα δάση που χαρακτηρίζονται από ένα είδος όπως η ελάτη.
- Ανομοιογένεια στη δομή. Στα δασικά οικοσυστήματα συναντάμε περισσότερους από έναν ορόφους, με διαφορετικά είδη σε καθέναν από αυτούς.

- Ανομοιογένεια στην χωρική κατανομή. Τα καλλιεργούμενα είδη είναι προϊόν σποράς ή φύτευσης οπότε και ακολουθούν προκαθορισμένους φυτευτικούς συνδέσμους. Αντιθέτως, τα δασικά είδη βρίσκονται διάσπαρτα στο χώρο.
- Ανομοιογένεια στην ηλικία. Τα καλλιεργούμενα είδη είναι συνήθως ομήλικα σε αντίθεση με τα δασικά όπου συναντώνται στον ίδιο χώρο πολλές ηλικίες του ίδιου είδους.

Γι' αυτούς του λόγους, θεωρώ ότι θα πρέπει οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού της παρούσας εργασίας να συγκρίνονται καταρχήν με τις αντίστοιχες τιμές που προέρχονται από δασικά οικοσυστήματα και ακόμη καλύτερα με τις αντίστοιχες τιμές που προέρχονται από Μεσογειακά δάση.


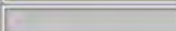


Όσον αφορά στην επιλογή του μοντέλου πρόβλεψης ξυλαποθέματος, αυτή βασίστηκε καταρχάς στον συντελεστή προσδιορισμού, λαμβάνοντας όμως υπόψη και τις τιμές του σφάλματος E και της απόκλισης $A_{\bar{y}}$. Έτσι, και με βάση τα συγκεντρωτικά στοιχεία του Πίν. 20, επελέγη ως καλύτερο μοντέλο πρόβλεψης η Περίπτωση 2 που βασίζεται στο φασματικό κανάλι B11 (Πίν. 16) και που παρουσιάζει ταυτόχρονα υψηλό συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0,676$, μέτριο σφάλμα $E=24,80\%$ και τη μικρότερη απόκλιση της μέσης τιμής $A_{\bar{y}}=3,33\%$. Στην ίδια επιλογή (B11) καταλήγουν και οι (Chrysafis et al., 2017) που επίσης χρησιμοποίησαν εικόνες Sentinel-2 σε ελληνικό δασικό οικοσύστημα. Ακόμη, την επιλογή του φασματικού καναλιού B11 για την εκτίμηση του ξυλαποθέματος ενισχύει και η τεχνική έκθεση της ESA (ESA, 2017a) για τις λειτουργίες της φασματικής ανταπόκρισης (χρήσεις των φασματικών καναλιών) – σύμφωνα με την οποία το κανάλι B11 δείχνει ευαισθησία στην υπέργεια δασική βιομάζα.



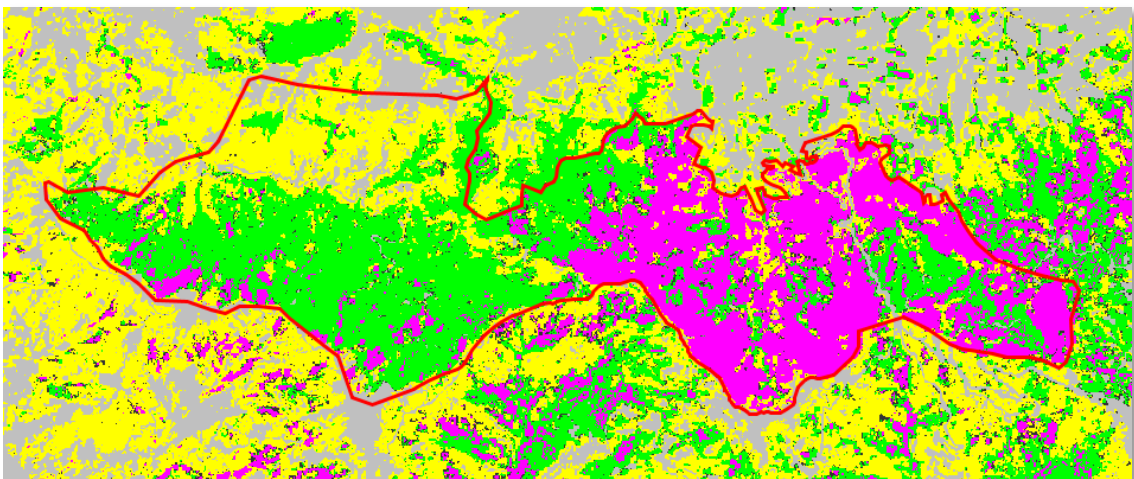
Εικ. 19 Εικόνα πρόβλεψης ξυλαποθέματος δάσους με βάση το φασματικό κανάλι B11 μετά την εφαρμογή της Εξίσωσης 5

4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΛΥΨΕΩΝ ΓΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ RANDOM FORESTS

Η ταξινόμηση των καλύψεων γης για το δημόσιο δάσος Κονόσπολης - Διάβας έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου Random Forests λαμβάνοντας ως μεταβλητές είτε μόνο τα φασματικά κανάλια ή τα φασματικά κανάλια μαζί με τους δείκτες βλάστησης και εδάφους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο ταξινομήσεων, ξεκινώντας από την ταξινόμηση που βασίστηκε μόνο στα φασματικά κανάλια (Εικ. 20).






Label	Colour	Value
no data		-1
Agona_built-up		0
Drys		1
M_pefki		2
aeif_platyf		3

Γκρι = Άγονες και τεχνητές εκτάσεις
 Πράσινο = Δρυς και λοιπά πλατύφυλλα
 Μωβ = Πεύκο
 Κίτρινο = Αείφυλλα πλατύφυλλα

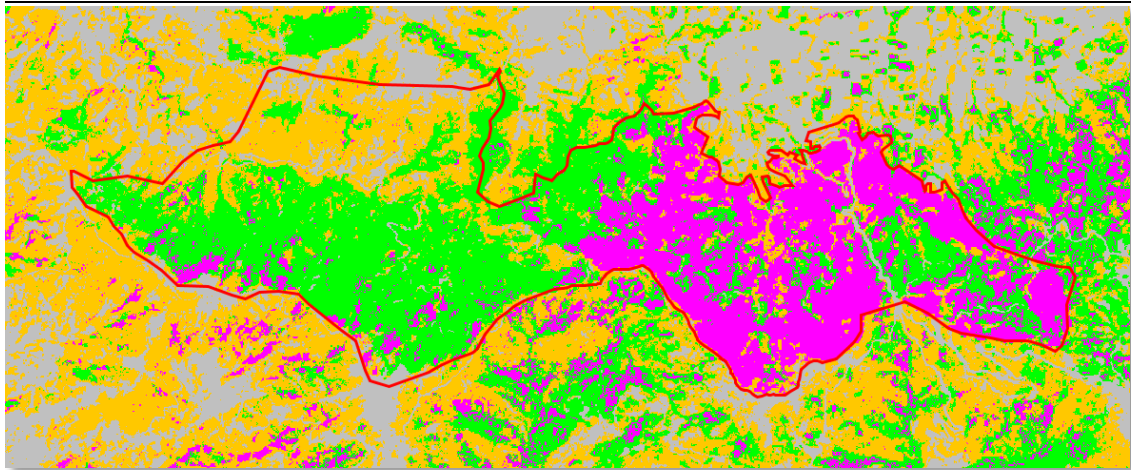


Εικ. 20 Ταξινόμηση RF καλύψεων γης του δάσους με βάση μόνο τα φασματικά κανάλια

Και ακολουθεί η ταξινόμηση με βάση τα φασματικά κανάλια και τους δείκτες βλάστησης και εδάφους (Εικ. 21).

Label	Colour	Value
no data		-1
Agona_built-up		0
Drys		1
M_pefki		2
aeif_platyf		3

Γκρι = Άγονες και τεχνητές εκτάσεις
 Πράσινο = Δρυς και λοιπά πλατύφυλλα
 Μωβ = Πεύκο
 Πορτοκαλί = Αείφυλλα πλατύφυλλα



Εικ. 21 Ταξινόμηση RF καλύψεων γης του δάσους με βάση τα φασματικά κανάλια τους δείκτες βλάστησης και εδάφους

Μετά από τη μεταφορά των εικόνων των ταξινομήσεων στο λογισμικό QGIS και την επεξεργασία τους, προέκυψαν τα συγκεντρωτικά στοιχεία που αφορούν στην έκταση της κάθε κλάσης (Πίν. 21).

Πίν. 21 Έκταση ταξινομημένων κλάσεων

Ταξινόμηση Random Forests με τη χρήση				
Κλάσεις	Φασματικών καναλιών		Φασματικών καναλιών και Δεικτών	
	Ποσοστό %	Έκταση ha	Ποσοστό %	Έκταση ha
1 – Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	6.12	107.44	6.30	110.55
2 – Πεύκο	32.36	568.17	32.23	565.75
3 – Δρυς	39.95	701.35	40.71	714.61
4 – Αείφυλλα πλατύφυλλα	21.57	378.64	20.77	364.67

Από τον Πίν. 21 προκύπτει πως οι δύο ταξινομήσεις έχουν σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα και οι διαφορές στις εκτάσεις των κλάσεων είναι γενικά μικρές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την αποτίμηση της ακρίβειας της ταξινόμησης που ακολουθεί.

Στον επόμενο πίνακα (Πίν. 22) παρουσιάζονται οι κλάσεις της ταξινόμησης καθώς και τα δεδομένα επαλήθευσης. Διαγωνίως παρουσιάζονται τα σωστά ταξινομημένα ROIs, με το σύνολό τους (101) να παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη. Στις κάθετες στήλες (εκτός διαγωνίου) παρουσιάζονται οι εσφαλμένες ταξινομήσεις και σε ποια κλάση έχουν αποδοθεί.

Πίν. 22 Πίνακας σφαλμάτων ταξινόμησης με τη χρήση των φασματικών καναλιών (B2 – B12 εκτός από B9 και B10)

Κλάσεις ταξινόμησης	Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	Δεδομένα επαλήθευσης			Συνολικά
		Πεύκο	Δρυς	Αείφυλλα πλατύφυλλα	

	Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	4	0	0	0	4
Δεδομένα ταξινόμησης χάρτη	Πεύκο	0	23	4	0	27
	Δρυς	0	3	48	1	52
	Αείφυλλα πλατύφυλλα	1	1	3	13	18
	Συνολικά	5	27	55	14	101

Ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ακρίβειας του κατασκευαστή και του χρήστη καθώς και ο δείκτης Kappa για κάθε κλάση.

Πίν. 23 Πίνακας ακρίβειας ταξινόμησης για τα φασματικά κανάλια

Κλάσεις ταξινόμησης	Ακρίβεια κατασκευαστή (%)	Ακρίβεια χρήστη (%)	Δείκτης Kappa
1 – Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	80,00	100,00	1,00
2 – Πεύκο	85,19	85,19	0,80
3 – Δρυς	87,27	92,31	0,83
4 – Αείφυλλα πλατύφυλλα	92,86	72,22	0,68

$$\text{Συνολική ακρίβεια (\%)} = 87,13$$

$$\text{Δείκτης συμφωνίας Kappa} = 0,79$$

Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης θεωρείται ικανοποιητικό καθώς η συνολική ακρίβεια (overall accuracy) που προκύπτει από τη μήτρα σφαλμάτων ταξινόμησης (error matrix) είναι μεγαλύτερη του 85%, οπότε το αποτέλεσμα της ταξινόμησης θεωρείται αποδεκτό (Anderson et al., 1976; Congalton and Green, 2009, p. 56). Επιπλέον, τιμές του δείκτη συμφωνίας Kappa μεγαλύτερες από 0,60 θεωρούνται ικανοποιητικές ως προς το αποτέλεσμα της ταξινόμησης (Czaplewski, 1994).

Ομοίως, τα αποτελέσματα του ελέγχου σφαλμάτων για την ταξινόμηση καλύψεων γης με τη χρήση των φασματικών καναλιών και των δεικτών βλάστησης και εδάφους παρουσιάζονται επόμενο πίνακα.

Πίν. 24 Πίνακας σφαλμάτων ταξινόμησης με τη χρήση των φασματικών καναλιών (B2 – B12 εκτός από B9 και B10) και δεικτών βλάστησης

Κλάσεις ταξινόμησης	Δεδομένα επαλήθευσης				
	Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	Πεύκο	Δρυς	Αείφυλλα πλατύφυλλα	Συνολικά
Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	3	0	0	0	3
Δεδομένα ταξινόμησης χάρτη	Πεύκο	0	23	3	26
	Δρυς	0	3	51	55
	Αείφυλλα πλατύφυλλα	2	1	1	13
	Συνολικά	5	27	55	14

Αυτό που παρατηρούμε στον Πίν. 24 είναι ότι 2 σημεία ταξινομήθηκαν στην κλάση των αιφυλλων πλατυφύλλων αντί της κλάσης των άγονων και τεχνητών επιφανειών. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της μεγάλης ετερογένειας στην έκταση των αιφυλλων πλατυφύλλων που κυριαρχείται από το πουρνάρι. Το πουρνάρι σχηματίζει αθροίσματα και γύρω από τα αθροίσματα πολλές φορές η επιφάνεια είναι γυμνή. Όμως, εξαιτίας της μικρής έκτασης των αθροισμάτων και της ασυνέχειας που αυτά παρουσιάζουν, το εικονοστοιχείο συμπεριλαμβάνει και τις δύο κλάσεις σε περίπου ίδιο ποσοστό με αποτέλεσμα να είναι επισφαλής η ταξινόμησή του.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ακρίβειας του κατασκευαστή και του χρήστη καθώς και ο δείκτης Kappa για κάθε κλάση.

Πίν. 25 Πίνακας ακρίβειας ταξινόμησης για τα φασματικά κανάλια και τους δείκτες βλάστησης

Κλάσεις ταξινόμησης	Ακρίβεια κατασκευαστή (%)	Ακρίβεια χρήστη (%)	Δείκτης Kappa
1 – Άγονες & Τεχνητές επιφάνειες	60,00	100,00	1,0
2 – Πεύκο	85,19	88,46	0,84
3 – Δρυς	92,73	92,73	0,84
4 – Αείφυλλα πλατύφυλλα	92,86	76,47	0,73

$$\text{Συνολική ακρίβεια (\%)} = 89,11$$

$$\text{Δείκτης συμφωνίας Kappa} = 0,82$$

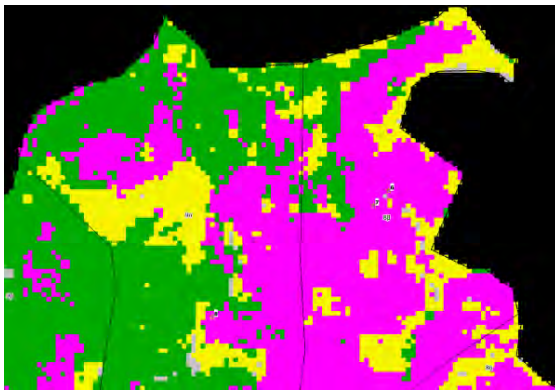
Και σε αυτή την περίπτωση η ταξινόμηση θεωρείται ικανοποιητική και μάλιστα έδωσε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ταξινόμηση με τη χρήση μόνο των φασματικών καναλιών. Σε προηγούμενη μελέτη (Zhang et al., 2017) που έγινε σύγκριση ταξινομήσεων και όπου η μεν πρώτη ταξινόμηση βασίστηκε στα φασματικά κανάλια και η δε δεύτερη, στους δείκτες NDVI και NDWI βρέθηκε ότι καλύτερη ταξινόμηση επετεύχθη με τα φασματικά κανάλια. Στην παρούσα εργασία βέβαια δεν ελέγχθηκε η ακρίβεια ταξινόμησης μόνο των δεικτών χωρίς τα φασματικά κανάλια. Πάντως, στο επόμενο στάδιο χρησιμοποιήθηκε το αποτέλεσμα της ταξινόμησης που βασίστηκε τόσο στα φασματικά κανάλια όσο και στους δείκτες (Εικ. 21).

Γενικά, μπορεί να σχολιαστεί η πολύ μεγάλη ετερογένεια των δασοπονικών ειδών σε όλη σχεδόν την έκταση του δάσους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που αφορά σε ένα τμήμα του δάσους και πιο συγκεκριμένα στις συστάδες 8β και 9α, παρουσιάζεται στην Εικ. 22. Στο μέρος α) της εικόνας είναι το απόσπασμα από το Google Earth που

δείχνει την πραγματική κατάσταση του δάσους. Στο μέρος β) είναι το αποτέλεσμα της ταξινόμησης με φασματικά κανάλια και δείκτες και στο μέρος γ) είναι η ταξινόμηση από τη διαχειριστική μελέτη. Στην εικόνα του Google Earth μπορούν να διακριθεί το πεύκο καθώς έχει σκουρότερο πράσινο χρώμα από τα πλατύφυλλα. Συγκρίνοντας τις τρεις εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε τις λεπτομέρειες που αποτυπώνει η ταξινόμηση RF και οι οποίες απουσιάζουν από την αποτύπωση στον χάρτη της διαχειριστικής μελέτης. Ειδικότερα, αν εστιάσουμε στο ΒΑ κέρασ του δάσους, διακρίνουμε χαμηλή θαμνώδη βλάστηση (αείφυλλα πλατύφυλλα) και ασκεπείς εκτάσεις. Οι λεπτομέρειες αυτές έχουν αποδοθεί με μεγάλη ακρίβεια στην ταξινόμηση RF, ενώ στο διαχειριστικό χάρτη η όλη συστάδα αναφέρεται ως πευκόφυτη με διάσπαρτα άτομα δρυός και ευγενών πλατύφυλλων.



α)



β)



γ)

Εικ. 22 Σύγκριση απόδοσης ταξινόμησης RF και ταξινόμησης διαχειριστικού χάρτη για τις συστάδες 8β και 9α. α) Εικόνα από το Google Earth, β) Ταξινόμηση RF και γ) Ταξινόμηση διαχειριστικού χάρτη

4.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΞΥΛΑΠΟΘΕΜΑΤΟΣ

Το τελευταίο μέρος της παρούσας εργασίας αφορά στην παραγωγή του χάρτη ξυλαποθέματος για το υπό μελέτη δάσος. Σε αυτό το στάδιο έγινε ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων των προηγούμενων βημάτων. Δηλαδή, στην επιλεγμένη εικόνα πρόβλεψης του ξυλαποθέματος (Εικ. 19) εφαρμόστηκε μια μάσκα αποκοπής των εκτάσεων που έχουν ταξινομηθεί ως καλυπτόμενα από πεύκο και δρυ (Εικ. 21). Εξαιρέθηκαν οι άγονες και τεχνητές εκτάσεις (κλάση 1) όπως επίσης και τα αειφύλλα πλατύφυλλα (κλάση 4). Από το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στον χάρτη (Χάρτης 2) προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ξυλαπόθεμα εντοπίζεται στις ανατολικές συστάδες όπου και φύεται το πεύκο. Εξαίρεση, αποτελούν δυο – τρεις λόγχμες πεύκου (φαίνονται με μωβ και κόκκινο χρωματισμό στις συστάδες 12β, 13α, 13β και 14) στα ΝΔ όρια του δάσους όπου κυριαρχεί η δρυς.

Στον Πίν. 26 παρουσιάζονται για κάθε συστάδα ή τμήμα, η έκταση και τα ξυλαπόθεμα που εκτιμήθηκαν με την παρούσα εργασία, όπως επίσης και οι αντίστοιχες τιμές από τα δεδομένα της διαχειριστικής μελέτης του δάσους.

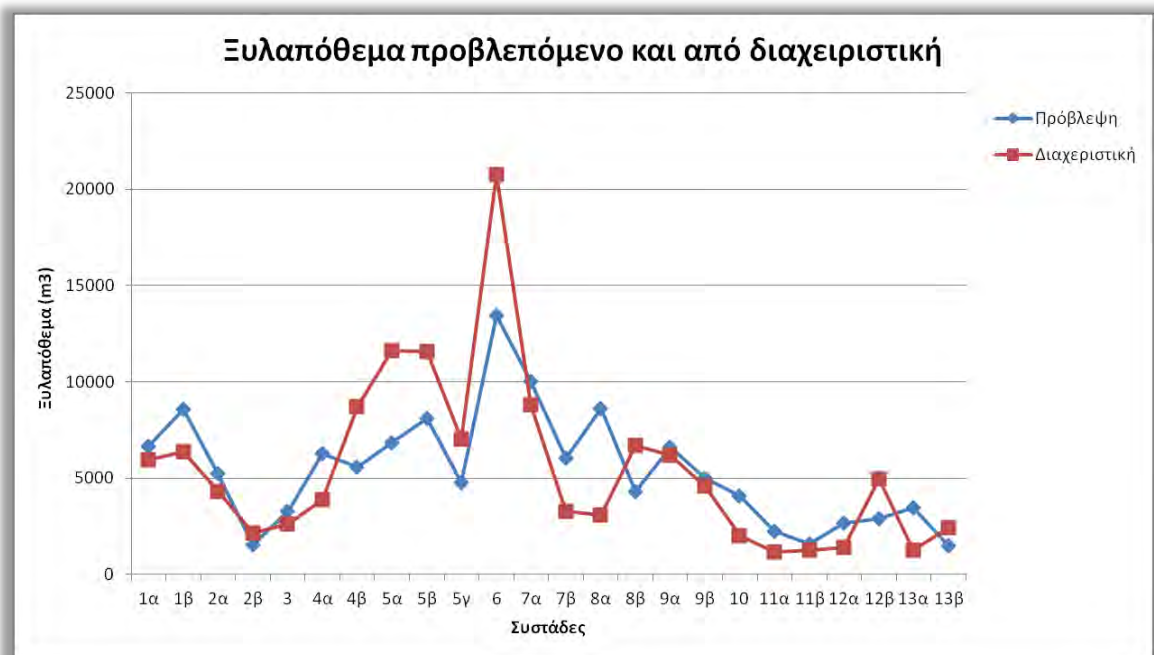
Πίν. 26 Έκταση και ξυλαπόθεμα που εκτιμήθηκε με την παρούσα εργασία και οι αντίστοιχες τιμές από τη διαχειριστική μελέτη του δάσους

Συστάδα	Πρόβλεψη		Διαχειριστική		Απόκλιση ξυλαποθέματος %
	Έκταση από RF (ha)	Προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα (m ³)	Έκταση από διαχειριστική (ha)	Ξυλαπόθεμα διαχειριστικής (m ³)	
1α	32,45	6659,77	30,94	5934,48	10,89
1β	45,15	8566,19	51,45	6350,03	25,87
2α	43,05	5250,27	46,13	4328,14	17,56
2β	21,05	1539,45	22,54	2141,3	-39,10
3	23,69	3292,88	25,85	2634,08	20,01
4α	44,38	6276,66	48,19	3870,19	38,34
4β	26,08	5589,82	28,62	8693,33	-55,52
5α	33,96	6827,64	46,56	11628,36	-70,31
5β	46,20	8119,10	51,46	11591,05	-42,76
5γ	24,28	4774,41	25,35	7041,32	-47,48
6	69,04	13469,54	82,85	20744,47	-54,01
7α	63,68	10008,80	64,78	8789,58	12,18
7β	34,40	6056,44	41,55	3286,88	45,73
8α	52,81	8630,18	59,02	3065,92	64,47
8β	22,35	4287,27	28,23	6681,76	-55,85
9α	48,01	6601,22	39,97	6183,3	6,33
9β	65,84	5000,47	69,39	4571,08	8,59
10	44,94	4050,52	41,72	1985,11	50,99
11α	43,60	2234,45	22,38	1141,56	48,91

11β	33,23	1585,16	29,87	1253,05	20,95
12α	54,76	2641,75	55,79	1404,69	46,83
12β	47,62	2909,16	51,57	4963,4	-70,61
13α	78,72	3452,48	67,20	1262,93	63,42
13β	44,02	1502,05	47,88	2424,55	-61,42
Σύνολο	1043,30	129325,69	1079,29	131970,56	-2,05

Η συνολική έκταση που ταξινομήθηκε ως πεύκο και δρυς με τη χρήση του αλγόριθμου Random Forests, για τις υπό διαχείριση συστάδες που παρουσιάζονται στον προηγούμενο πίνακα, ανέρχεται σε 1043,30 ha. Η αντίστοιχη έκταση που υπολογίστηκε στη διαχειριστική μελέτη και χρησιμοποιήθηκε για την αναγωγή των δεδομένων των ΔΕ στο σύνολο των συστάδων ανέρχεται σε 1079,26 ha. Βλέπουμε λοιπόν ότι η με τη χρήση της δορυφορικής εικόνας η δασοσκεπής, με πεύκο και δρυ, έκταση εκτιμήθηκε κατά περίπου 60 ha μικρότερη από ότι στη διαχειριστική. Πάντως, σε κάποιες συστάδες ταξινομήθηκε μικρότερη έκταση στο πεύκο και στη δρυ σε σχέση με τη διαχειριστική ενώ σε κάποιες άλλες μεγαλύτερη.

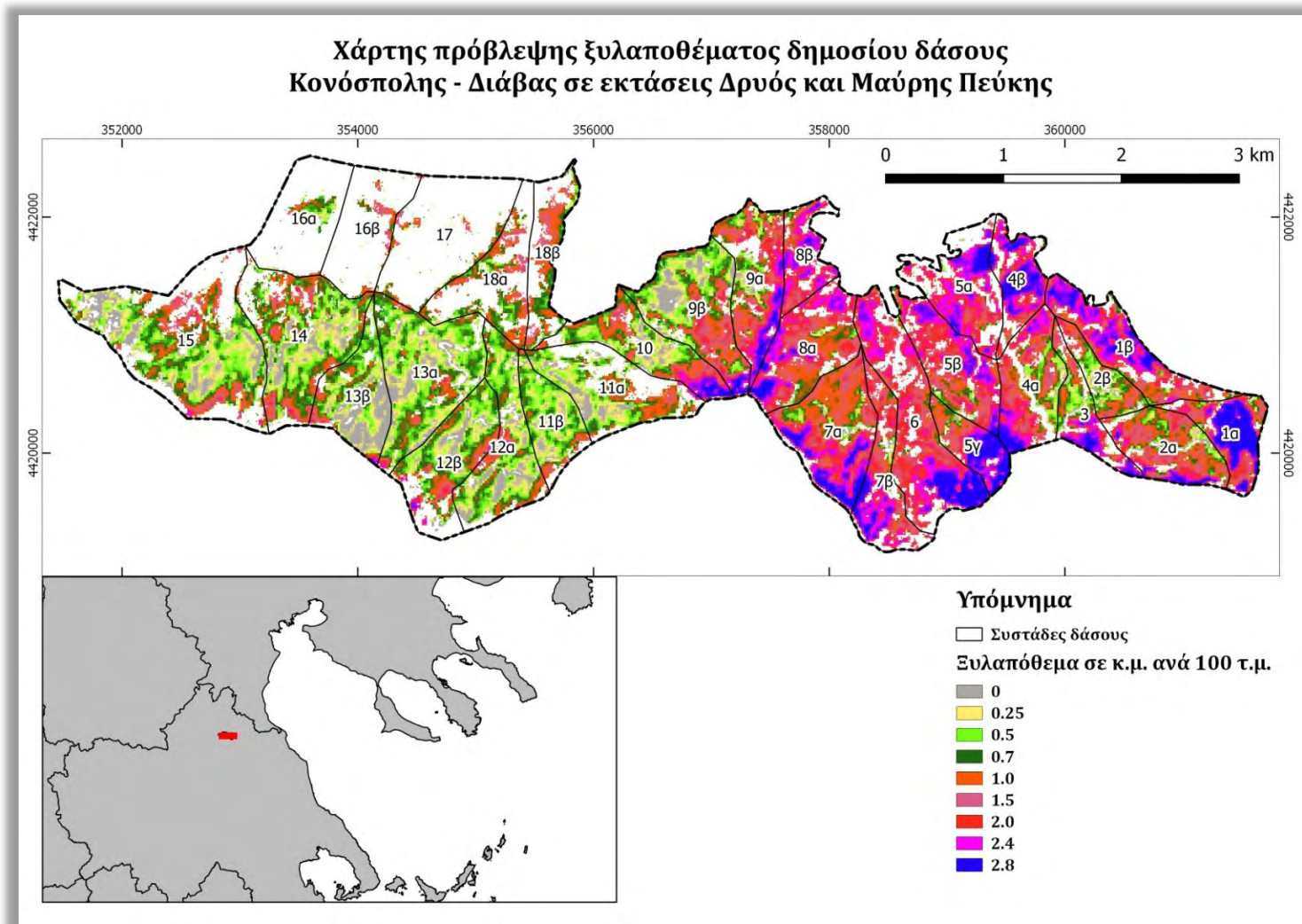
Όσον αφορά στο συνολικό ξυλαπόθεμα που εκτιμήθηκε με τα εργαλεία και τις μεθόδους της παρούσας εργασίας ανέρχεται στο ποσό των 129.325,69 m³ έναντι των 131.970,56 m³ που υπολογίστηκε στη διαχειριστική μελέτη. Η διαφορά τους είναι μόλις 2.645 m³ ή 2,05%. Αυτό όμως που έχει ιδιαίτερη σημασία, είναι οι επιμέρους διαφορές για την κάθε συστάδα που διακρίνονται καλύτερα στο Διάγραμμα 4.



Διάγραμμα 4 Ξυλαπόθεμα προβλεπόμενο και από τη διαχειριστική μελέτη για κάθε συστάδα

Εξετάζοντας το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το εκτιμώμενο/προβλεπόμενο ξυλαπόθεμα σε γενικές γραμμές ακολουθεί την τάση του ξυλαποθέματος της διαχειριστικής. Σε κάποιες συστάδες οι τιμές είναι παραπλήσιες (π.χ. συστάδα 9α) ενώ σε άλλες εντοπίζονται πολύ μεγάλες διαφορές (π.χ. συστάδα 8β). Οι διαφορές αυτές οφείλονται εν μέρει στη διαφορετική έκταση που λήφθηκε υπόψη στην κάθε μέθοδο αλλά και στις ίδιες τις μεθόδους. Για να γίνει αυτό αντιληπτό ας επιστρέψουμε στο παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας για τη συστάδα 8β. Στη συγκεκριμένη συστάδα υπάρχουν δύο ΔΕ οι οποίες έδωσαν από μία τιμή ξυλαποθέματος στο εκτάριο. Στη διαχειριστική μελέτη, βρέθηκε ο μέσος όρος τους και στη συνέχεια ανάχθηκε στη συνολική επιφάνεια της συστάδας. Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο πρόβλεψης ξυλαποθέματος βασίστηκε σε όλες τις ΔΕ του δάσους και όχι μόνο της συγκεκριμένης συστάδας. Επιπλέον, με την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης και τη δημιουργία του χάρτη βρέθηκε το ξυλαπόθεμα για κάθε εικονοστοιχείο που αντιπροσωπεύει έκταση 100 m². Έτσι, δημιουργήθηκε ένα εύρος τιμών ξυλαποθέματος για τη συγκεκριμένη συστάδα, το άθροισμα των οποίων έδωσε το τελικό της ξυλαπόθεμα. Με λίγα λόγια, το ξυλαπόθεμα της κάθε συστάδας στη διαχειριστική προκύπτει από αναγωγή μίας μόνο τιμής (ανεξάρτητα από το πόσο παραγωγική ή όχι είναι η κάθε θέση), ενώ με το μοντέλο πρόβλεψης από το άθροισμα των τιμών του κάθε εικονοστοιχείου της συστάδας.

Σαν γενική παρατήρηση μπορούμε να πούμε ότι το συνολικό ξυλαπόθεμα που εκτιμήθηκε είναι περίπου το ίδιο με αυτό που υπολογίστηκε στην διαχειριστική. Το συνολικό λήμμα (ποσότητα ξυλείας που θα υλοτομηθεί), που προκύπτει ως ποσοστό επί του ξυλαποθέματος, στο τέλος της διαχειριστικής περιόδου (δεκαετία) θα είναι περίπου το ίδιο τόσο για την πρόβλεψη του μοντέλου όσο και για τη διαχειριστική. Όμως, εκεί που εντοπίζονται διαφορές και θα πρέπει να δοθεί προσοχή από τον μελετητή της σύνταξης της διαχειριστικής μελέτης, είναι στην ετήσια κάρπωση που αφορά σε κάποιες συστάδες. Υπάρχει όντως το ξυλαπόθεμα που προκύπτει από τη διαχειριστική για την κάθε συστάδα ή μήπως είναι πολύ λιγότερο ή πολύ περισσότερο, οπότε θα δημιουργηθεί πρόβλημα στους εφαρμοστές υπαλλήλους του δασαρχείου; Όπως προκύπτει εδώ, η συμβολή της τηλεπισκόπησης στη σύνταξη της διαχειριστικής μελέτης είναι καθοριστική καθώς μπορεί να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα της διαχωριστικής μελέτης ή να τα θέσει υπό αμφισβήτηση.



Χάρτης 2 Χάρτης πρόβλεψης ξυλαποθέματος δημοσίου δάσους Κονόσπολης - Διάβας σε εκτάσεις Δρυός και Μαύρης Πεύκης

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το δημόσιο δάσος Κονόσπολης - Διάβας παρουσιάζει μεγάλη ομοιογένεια όσον αφορά στη δασοκάλυψη. Εκτός από τις ΒΔ συστάδες όπου η βλάστηση είναι αραιή και κυριαρχείται από πουρνάρια, το υπόλοιπο δάσος καταλαμβάνουν πυκνές συστάδες από πλατύφυλλη δρυ, σε μίξη με ευγενή πλατύφυλλα, και από αναδασώσεις μαύρης πεύκης. Σε αρκετές συστάδες, κυρίως στις ανατολικές, σημαντική είναι και η παρουσία αρκουδοπούρνναρου. Η διακριτή σύσταση των ειδών αποτέλεσε βασικό παράγοντα στην επιλογή του εν λόγω δάσους για την παρούσα μελέτη αν και κατά την ταξινόμηση των καλύψεων γης έγινε αντιληπτή η μεγάλη μίξη των πλατύφυλλων ειδών. Το γεγονός αυτό αύξησε τη δυσκολία της ταξινόμησης αλλά και της εκτίμησης του ξυλαποθέματος καθώς τα δεδομένα της διαχειριστικής μελέτης αφορούσαν μόνο στο πεύκο και στη δρυ. Συνεπώς, το ξυλαπόθεμα ενός ποσοστού δέντρων δεν ελήφθη υπόψη στις αναλύσεις καθώς δεν υπήρχε στα πρωτογενή δεδομένα της διαχειριστικής, η οποία αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση των κυρίαρχων δασοπονικών ειδών και όχι των δευτερευόντων. Αυτό αποτελεί εγγενές πρόβλημα, από πλευράς τηλεπισκόπησης, των δεδομένων της διαχειριστικής, καθώς είναι μέρος του σχεδιασμού τους και της στοχοθεσίας τους.

Το λογισμικό SNAP διατίθεται δωρεάν από την ESA και είναι πλήρως προσαρμοσμένο στην επεξεργασία των εικόνων Sentinel-2. Επειδή όμως βρίσκεται στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του, παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα και δυσκολίες για τους περισσότερους χρήστες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το plug-in Sen2Cor για την ατμοσφαιρική και τοπογραφική διόρθωση των εικόνων, καθώς η εγκατάστασή του είτε ως ενσωματωμένο plug-in ή σε stand alone έκδοση απαιτεί μεγάλη προσπάθεια και σχετικά εξειδικευμένες γνώσεις. Παρόλα αυτά, το SNAP προσφέρει ένα πλήθος από δείκτες βλάστησης και βιοφυσικών παραμέτρων, η χρήση των οποίων είναι πολύ απλή. Μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί η αυτοματοποίηση των διαδικασιών που μπορεί να επιτευχθεί μέσα από το Graphbuilder. Ακόμη, προσφέρει και αρκετούς αλγόριθμους ταξινόμησης, όπως είναι ο Random Forests, η χρήση των οποίων αρκετά εύκολη. Από την άλλη βέβαια, το SNAP προσφέρει ελάχιστες επιλογές λειτουργίας GIS και γι' αυτό προτείνεται η συνεργατικότητα με το δωρεάν open source QGIS. Τα δύο αυτά λογισμικά μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά το ένα με το άλλο σε εργασίες τηλεπισκόπησης, κάτι που έγινε εκτενώς στην παρούσα εργασία.

Οι δορυφορικές εικόνες Sentinel-2 αποδείχτηκαν μια πολύ καλή επιλογή, καθώς η χωρική διακριτική ικανότητα των 10μ. που παρέχουν, συνιστά ένα σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας τόσο στην εκτίμηση του ξυλαποθέματος όσο και στην ταξινόμηση. Τα 10 φασματικά κανάλια μπορούν να συνδυαστούν πολύ εύκολα μέσω του SNAP δημιουργώντας εικόνες που τονίζουν διάφορες παραμέτρους όπως βλάστηση, βιομάζα κλπ. Η επεξεργασία των εικόνων που απαιτείται είναι μικρή καθώς διατίθενται ήδη ατμοσφαιρικά διορθωμένες σε τιμές ανάκλασης στην ατμόσφαιρα (TOA), ενώ από τον Απρίλιο του 2017 διατίθενται και σε τιμές ανάκλασης εδάφους (BOA) για την ευρωπαϊκή ήπειρο.

Οι συσχετίσεις μεταξύ ξυλαποθέματος και τιμών εικονοστοιχείων, στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν στατιστικά σημαντικές με εξαίρεση τη δρυ των Περιπτώσεων 1 και 3, όπου ήταν μόλις 4. Σαν γενική εικόνα θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα φασματικά κανάλια δείχνουν να συσχετίζονται καλύτερα με το ξυλαπόθεμα σε σχέση με τους δείκτες. Οι αναλύσεις των παλινδρομήσεων συγκρινόμενες, απλής γραμμικής και πολλαπλής, έδωσαν αρκετά κοντινά αποτελέσματα. Οι Περιπτώσεις 1 και 3 είχαν ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά στην επιλογή του μεταβλητής με το μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού, ενώ και στην Περίπτωση 4, επιλέχθηκε το κανάλι B11 που έδωσε το υψηλότερο R^2 στην Περίπτωση 2. Ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2=0,676$ που υπολογίστηκε για το φασματικό κανάλι B11, είναι αρκετά υψηλός, συγκρινόμενος με τη διεθνή βιβλιογραφία που αφορά σε δασοπονικά είδη αλλά και με αντίστοιχες μελέτες σε μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα (Πίν. 2).

Η ακρίβεια της επιβλεπόμενης ταξινόμησης με το αλγόριθμο Random Forests που εφαρμόστηκε, κυμάνθηκε από 87,13 έως 89,11% και θεωρείται πολύ ικανοποιητική. Με την εφαρμογή της ταξινόμησης εντοπίστηκαν και ταξινομήθηκαν πολύ μικρές περιοχές που καλύπτονταν από πεύκο ή δρυ και οι οποίες δεν παρουσιάζονται στο χάρτη της διαχειριστικής μελέτης. Επίσης, ταξινομήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια αρκετοί δασικοί δρόμοι. Η χρήση των δεικτών βλάστησης, επί προσθέτως στα φασματικά κανάλια, ως μεταβλητές στην ταξινόμηση, βελτίωσε πολύ λίγο την ακρίβεια. Σε μελλοντικές μελέτες, για τη βελτίωση της ακρίβειας της ταξινόμησης, μπορούν δοκιμαστούν διάφοροι συνδυασμοί μεταβλητών, είτε ακόμη και μόνο οι δείκτες βλάστησης.

Το τελικό αποτέλεσμα της παραγωγής του χάρτη εκτίμησης του ξυλαποθέματος και η σύγκριση των δεδομένων του, με τα δεδομένα της διαχειριστικής μελέτης, έδωσε μερικά πολύ ενδιαφέροντα και απρόσμενα ευρήματα. Καταρχάς, το συνολικό

ξυλαπόθεμα που εκτιμήθηκε για τις υπό διαχείριση συστάδες, διέφερε μόλις κατά 2% περίπου από το συνολικό ξυλαπόθεμα που υπολογίστηκε από τη διαχειριστική μελέτη. Παράλληλα όμως, οι αποκλίσεις στο ξυλαπόθεμα στην εκάστοτε συστάδα ήταν συνήθως μεγάλες. Για να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτά τα ευρήματα είναι τυχαία ή όχι, θα πρέπει και για άλλα δάση, οι εκτιμήσεις του ξυλαποθέματος με τη μέθοδο που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία να συγκριθούν τις εκτιμήσεις από τις αντίστοιχες διαχειριστικές μελέτες. Επιπλέον, η επαλήθευση του πραγματικού ξυλαποθέματος σε κλίμακα συστάδας είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Πιθανόν, με την ολοκλήρωση της εφαρμογής της διαχειριστικής μελέτης σε βάθος 10ετίας και με την καταγραφή του πραγματικού λήμματος που υλοτομήθηκε ανά συστάδα, να μπορεί να εξακριβωθεί εκ των υστέρων η σωστή εκτίμηση ξυλαποθέματος.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι ο σκοπός της παρούσας διατριβής που αφορά στην εκτίμηση του ξυλαποθέματος του δάσους με τη χρήση δορυφορικών εικόνων, επετεύχθη με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, οι συσχετίσεις που διερευνήθηκαν και τα μοντέλα πρόβλεψης που κατασκευάστηκαν, εκπλήρωσαν τους επιμέρους στόχους. Τέλος, η χρήση δωρεάν και ανοικτού κώδικα λογισμικών, αποδείχτηκε επαρκέστατη για την εκπλήρωση του σκοπού και ταυτόχρονα μια οικονομική λύση που μπορεί να βρει εφαρμογή στις Δασικές Υπηρεσίες της χώρας μας. Ολοκληρώνοντας, και πέρα των όσων αναφέρθηκαν πιο πάνω, μια πρόταση για μελλοντική έρευνα σχετική με την εκτίμηση του ξυλαποθέματος, αφορά στον συνδυασμό των δεδομένων παθητικών αισθητήρων (Sentinel-2) με δεδομένα ενεργητικών αισθητήρων (SAR από Sentinel-1).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Γρηγοριάδης, Δ.Δ., 2014. Εκτίμηση του κινδύνου της έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα από δασική πυρκαγιά με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και Τηλεπισκόπησης (Μεταπτυχιακή Διατριβή). ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Μάκρας, Α., 2007. Εκτίμηση της βιομάζας δασικών συστάδων με τη χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (Διδακτορική Διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος. Τομέας Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Φυσικών Πόρων. Εργαστήριο Δασικής Διαχειριστικής και Τηλεπισκόπησης. <https://doi.org/10.12681/eadd/19200>
- Παρχαρίδης, Ι., 2015. Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης.
- Περάκης, Κ., Μουσιάδης, Α., Φαρασλής, Ι., 2015. Η τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες.
- Τσιάρα, Α., 2012. Ταξινόμηση εικόνων με τυχαία δάση (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής, Ιωάννινα.
- ΦΕΚ Β' 1420, 2018. Αριθμ. 166780/1619. Τροποποίηση των «Προσωρινών Πρότυπων Τεχνικών Προδιαγραφών Εργασιών Σύνταξης Δασοπονικών και λοιπών Μελετών Δασών και Δασικών Εκτάσεων».

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahern, F.J., Erdle, T., MaClean, D.A., Kneppack, I.D., 1991. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements. *Int. J. Remote Sens.* 12, 387–400. <https://doi.org/10.1080/01431169108929660>
- Akar, Ö., Güngör, O., 2013. Classification of multispectral images using Random Forest algorithm. *J. Geod. Geoinformation* 1. <https://doi.org/10.9733/186>
- Alrababah, M.A., Alhamad, M.N., Bataineh, A.L., Bataineh, M.M., Suwaileh, A.F., 2011. Estimating east Mediterranean forest parameters using Landsat ETM. *Int. J. Remote Sens.* 32, 1561–1574. <https://doi.org/10.1080/01431160903573235>
- Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T., Witmer, R.E., 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data (USGS Numbered Series No. 964), Professional Paper.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A.R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sens. Rev.* 13, 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35, 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Blackburn, G.A., 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *Int. J. Remote Sens.* 19, 657–675. <https://doi.org/10.1080/014311698215919>
- Blackburn, G.A., Steele, C.M., 1999. Towards the Remote Sensing of Matorral Vegetation Physiology: Relationships between Spectral Reflectance, Pigment, and Biophysical Characteristics of Semiarid Bushland Canopies. *Remote Sens. Environ.* 70, 278–292. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00044-9)
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Calvão, T., Palmeirim, J.M., 2004. Mapping Mediterranean scrub with satellite imagery: biomass estimation and spectral behaviour. *Int. J. Remote Sens.* 25, 3113–3126. <https://doi.org/10.1080/01431160310001654978>

- Canadian Council of Forest Ministers, 1995. Defining sustainable forest management: A Canadian approach to criteria and indicators. Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, Ottawa.
- Chirici, G., Barbati, A., Corona, P., Marchetti, M., Travaglini, D., Maselli, F., Bertini, R., 2008. Non-parametric and parametric methods using satellite images for estimating growing stock volume in alpine and Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sens. Environ., Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue 112*, 2686–2700. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.002>
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Siachalou, S., Patias, P., 2017. Assessing the relationships between growing stock volume and Sentinel-2 imagery in a Mediterranean forest ecosystem. *Remote Sens. Lett.* 8, 508–517. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1295479>
- Congalton, R.G., Green, K., 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices, 2nd ed. ed. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton.
- Congedo, L., 2016. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- Crippen, R.E., 1990. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sens. Environ.* 34, 71–73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-Z)
- Cueva, A.V. de la, 2008. Structural attributes of three forest types in central Spain and Landsat ETM+ information evaluated with redundancy analysis. *Int. J. Remote Sens.* 29, 5657–5676. <https://doi.org/10.1080/01431160801891853>
- Czaplewski, R.L., 1994. Variance approximations for assessments of classification accuracy (No. RM-RP-316). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Ft. Collins, CO. <https://doi.org/10.2737/RM-RP-316>
- Danson, F.M., 1987. Preliminary evaluation of the relationships between SPOT-1 HRV data and forest stand parameters. *Int. J. Remote Sens.* 8, 1571–1575. <https://doi.org/10.1080/01431168708954798>
- Dash, J., Curran, P.J., 2004. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 25, 5403–5413. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274015>
- Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., Brown De Colstoun, E., McMurtrey III, J.E., 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sens. Environ.*
- Deering, D.W., Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., 1975. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data, in: Cook, J.J. (Ed.), *Proceedings of the Tenth International Symposium on Remote Sensing of Environment (Ann Arbor, 1975)*. Ann Arbor, Michigan, pp. 1169–1178.
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J., 2011. Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors* 11, 7063–7081. <https://doi.org/10.3390/s110707063>
- Dong, J., Kaufmann, R.K., Myneni, R.B., Tucker, C.J., Kauppi, P.E., Liski, J., Buermann, W., Alexeyev, V., Hughes, M.K., 2003. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: Carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sens. Environ.* 84, 393–410. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00130-X)
- Erdle, T., Sullivan, M., 1998. Forest management design for contemporary forestry. *For. Chron.* 74, 83–90. <https://doi.org/10.5558/tfc74083-1>
- ESA, 2017a. Sentinel-2 Spectral Response Functions (S2-SRF) - Document Library COPE-GSEG-EOPG-TN-15-0007.
- ESA, 2017b. SNAP - ESA Sentinel Application Platform.
- ESA, 2015. ESA Standard Document - Sentinel-2 User Handbook.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Country report United States of America. FRA2010/223.
- FAO, 2004. Global Forest Resources Assessment Update 2005 - Terms and Definitions. Working Paper 83.

- Fazakas, Z., Nilsson, M., Olsson, H., 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agric. For. Meteorol.* 98–99, 417–425. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00112-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00112-4)
- Fernández-Manso, O., Fernández-Manso, A., Quintano, C., 2014. Estimation of aboveground biomass in Mediterranean forests by statistical modelling of ASTER fraction images. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 31, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.005>
- Filella, I., Peñuelas, J., Llorens, L., Estiarte, M., 2004. Reflectance assessment of seasonal and annual changes in biomass and CO₂ uptake of a Mediterranean shrubland submitted to experimental warming and drought. *Remote Sens. Environ.* 90, 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.010>
- Foody, G.M., 2003. Remote sensing of tropical forest environments: Towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. *Int. J. Remote Sens.* 24, 4035–4046. <https://doi.org/10.1080/0143116031000103853>
- Foody, G.M., Boyd, D.S., Cutler, M.E.J., 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sens. Environ.* 85, 463–474. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00039-7)
- Frampton, W.J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E.J., 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 82, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Franklin, J., 1986. Thematic mapper analysis of coniferous forest structure and composition. *Int. J. Remote Sens.* 7, 1287–1301. <https://doi.org/10.1080/01431168608948931>
- Franklin, S.E., 2001. *Remote sensing for sustainable forest management*. Lewis, Boca Raton, Fla.
- Friedl, M.A., McGwire, K.C., McIver, D.K., 2001. An overview of uncertainty in optical remotely sensed data for ecological applications, in: Hunsaker, C.T., Goodchild, M.F., Friedl, M.A., Case, T.J. (Eds.), *Spatial Uncertainty in Ecology: Implications for Remote Sensing and GIS Applications*. Springer, New York, pp. 258–283.
- Galidaki, G., Zianis, D., Gitas, I., Radoglou, K., Karathanassi, V., Tsakiri-Strati, M., Woodhouse, I., Mallinis, G., 2017. Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. *Int. J. Remote Sens.* 38, 1940–1966. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1266113>
- Gemmell, F., 1998. An Investigation of Terrain Effects on the Inversion of a Forest Reflectance Model. *Remote Sens. Environ.* 65, 155–169. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00022-4)
- Gómez, C., White, J.C., Wulder, M.A., Alejandro, P., 2014. Historical forest biomass dynamics modelled with Landsat spectral trajectories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 93, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.008>
- Gratani, L., Varone, L., Ricotta, C., Catoni, R., 2013. Mediterranean shrublands carbon sequestration: environmental and economic benefits. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 18, 1167–1182. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9415-1>
- Guyot, G., Baret, F., 1988. Utilisation de la Haute Resolution Spectrale pour Suivre L'état des Couverts Vegetaux. Presented at the Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, pp. 279–286.
- Horler, D.N.H., Dockray, M., Barber, J., Barringer, A.R., 1983. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. *Adv. Space Res.* 3, 273–277. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(83\)90130-8](https://doi.org/10.1016/0273-1177(83)90130-8)
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Hüttich, C., Korets, M., Bartalev, S., Zharko, V., Schepaschenko, D., Shvidenko, A., Schmillius, C., 2014. Exploiting Growing Stock Volume Maps for Large Scale Forest Resource Assessment: Cross-Comparisons of ASAR- and PALSAR-Based GSV Estimates with Forest Inventory in Central Siberia. *Forests* 5, 1753–1776. <https://doi.org/10.3390/f5071753>
- IBM Corp., 2015. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 23.0*. IBM Corp., Armonk, NY.

- Immitzer, M., Atzberger, C., Koukal, T., 2012. Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2 Satellite Data. *Remote Sens.* 4, 2661–2693. <https://doi.org/10.3390/rs4092661>
- Immitzer, M., Vuolo, F., Atzberger, C., 2016. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sens.* 8, 166. <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
- Kohm, K.A., Franklin, J.F. (Eds.), 1997. *Creating a forestry for the 21st century: the science of ecosystem management*, 3. [impression]. ed. Island Press, Washington, DC.
- Landsberg, J., Coops, N.C., 1999. Modeling Forest Productivity Across Large Areas and Long Periods. *Nat. Resour. Model.* 12, 383–411. <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.1999.tb00019.x>
- Laurin, G.V., Balling, J., Corona, P., Mattioli, W., Papale, D., Puletti, N., Rizzo, M., Truckenbrodt, J., Urban, M., 2018. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. *J. Appl. Remote Sens.* 12, 016008. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016008>
- Lévesque, J., King, D.J., 2003. Spatial analysis of radiometric fractions from high-resolution multispectral imagery for modelling individual tree crown and forest canopy structure and health. *Remote Sens. Environ.* 84, 589–602. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00182-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00182-7)
- Lévesque, J., King, D.J., 1999. Airborne Digital Camera Image Semivariance for Evaluation of Forest Structural Damage at an Acid Mine Site. *Remote Sens. Environ.* 68, 112–124. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00104-7)
- Lu, D., 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *Int. J. Remote Sens.* 27, 1297–1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>
- Lu, D., 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 26, 2509–2525. <https://doi.org/10.1080/01431160500142145>
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., Moran, E., 2004. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *For. Ecol. Manag.* 198, 149–167. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.048>
- Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., Gascon, F., 2017. Sen2Cor for Sentinel-2, in: *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*. Presented at the Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, International Society for Optics and Photonics, p. 1042704. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>
- Majasalmi, T., Rautiainen, M., 2016. The potential of Sentinel-2 data for estimating biophysical variables in a boreal forest: a simulation study. *Remote Sens. Lett.* 7, 427–436. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1149251>
- Mallinis, G., Koutsias, N., Makras, A., Karteris, M., 2004. Forest parameters estimation in a European Mediterranean landscape using remotely sensed data. *For. Sci.* 50, 450–460.
- Mandanici, E., Bitelli, G., 2016. Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use. *Remote Sens.* 8, 1014. <https://doi.org/10.3390/rs8121014>
- Maselli, F., Chirici, G., Bottai, L., Corona, P., Marchetti, M., 2005. Estimation of Mediterranean forest attributes by the application of k-NN procedures to multitemporal Landsat ETM+ images. *Int. J. Remote Sens.* 26, 3781–3796. <https://doi.org/10.1080/01431160500166433>
- Maser, C., 1994. *Sustainable forestry: philosophy, science, and economics*. St. Lucie Press, Boca Raton, Fla.
- Mayer, B., Kylling, A., 2005. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos Chem Phys* 5, 1855–1877. <https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>
- Mellor, A., Haywood, A., Stone, C., Jones, S., 2013. The Performance of Random Forests in an Operational Setting for Large Area Sclerophyll Forest Classification. *Remote Sens.* 5, 2838–2856. <https://doi.org/10.3390/rs5062838>
- Mura, M., Bottalico, F., Giannetti, F., Bertani, R., Giannini, R., Mancini, M., Orlandini, S., Travaglini, D., Chirici, G., 2018. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi

- spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 66, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.013>
- Nelson, B.W., Mesquita, R., Pereira, J.L.G., Garcia Aquino de Souza, S., Teixeira Batista, G., Bovino Couto, L., 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *For. Ecol. Manag.* 117, 149–167. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00475-7)
- Noss, R.F., 1999. Assessing and monitoring forest biodiversity: A suggested framework and indicators. *For. Ecol. Manag.* 115, 135–146. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00394-6)
- Ohmann, J.L., Gregory, M.J., Roberts, H.M., 2014. Scale considerations for integrating forest inventory plot data and satellite image data for regional forest mapping. *Remote Sens. Environ., Special Issue on 2012 ForestSAT* 151, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.048>
- Ozdemir, I., 2014. Linear transformation to minimize the effects of variability in understory to estimate percent tree canopy cover using RapidEye data. *GIScience Remote Sens.* 51, 288–300. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.912876>
- Phua, M.-H., Saito, H., 2003. Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data. *Can. J. Remote Sens.* 29, 429–440. <https://doi.org/10.5589/m03-005>
- Pinty, B., Verstraete, M.M., 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* 101, 15–20. <https://doi.org/10.1007/BF00031911>
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F., 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Can. J. Remote Sens.* 29, 564–577. <https://doi.org/10.5589/m03-027>
- Potter, C.S., 1999. Terrestrial Biomass and the Effects of Deforestation on the Global Carbon Cycle Results from a model of primary production using satellite observations. *BioScience* 49, 769–778. <https://doi.org/10.2307/1313568>
- QGIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Richardson, A.J., Weigand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 43.
- Richter, R., Schlapfer, D., Muller, A., 2011. Operational Atmospheric Correction for Imaging Spectrometers Accounting for the Smile Effect. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49, 1772–1780. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2089799>
- Ripple, W.J., Wang, S., Isaacson, D.L., Paine, D.P., 1991. A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-1 HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *Int. J. Remote Sens.* 12, 1971–1977. <https://doi.org/10.1080/01431169108955230>
- Rouse, J.W., 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. [Great Plains Corridor].
- Salvador, R., Pons, X., 1998. On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. *For. Ecol. Manag.* 104, 193–208. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00264-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00264-8)
- Shoshany, M., Karnibad, L., 2011. Mapping shrubland biomass along Mediterranean climatic gradients: The synergy of rainfall-based and NDVI-based models. *Int. J. Remote Sens.* 32, 9497–9508. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.562255>
- Silleos, N.G., Alexandridis, T.K., Gitas, I.Z., Perakis, K., 2006. Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. *Geocarto Int.* 21, 21–28. <https://doi.org/10.1080/10106040608542399>
- Simberloff, D., 1999. The role of science in the preservation of forest biodiversity. *For. Ecol. Manag.* 115, 101–111. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00391-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00391-0)

- Sousa, A.M.O., Gonçalves, A.C., Mesquita, P., Marques da Silva, J.R., 2015. Biomass estimation with high resolution satellite images: A case study of *Quercus rotundifolia*. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 101, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.004>
- Steininger, M.K., 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: Data from Brazil and Bolivia. *Int. J. Remote Sens.* 21, 1139–1157. <https://doi.org/10.1080/014311600210119>
- Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O., Katila, M., 2008. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sens. Environ., Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue 112, 1982–1999.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.032>
- Trotter, C.M., Dymond, J.R., Goulding, C.J., 1997. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. *Int. J. Remote Sens.* 18, 2209–2223. <https://doi.org/10.1080/014311697217846>
- Vafaei, S., Soosani, J., Adeli, K., Fadaei, H., Naghavi, H., Pham, T.D., Tien Bui, D., 2018. Improving Accuracy Estimation of Forest Aboveground Biomass Based on Incorporation of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2A Imagery and Machine Learning: A Case Study of the Hyrcanian Forest Area (Iran). *Remote Sens.* 10, 172. <https://doi.org/10.3390/rs10020172>
- Vaglio Laurin, G., Pirotti, F., Callegari, M., Chen, Q., Cuzzo, G., Lingua, E., Notarnicola, C., Papale, D., 2016. Potential of ALOS2 and NDVI to Estimate Forest Above-Ground Biomass, and Comparison with Lidar-Derived Estimates. *Remote Sens.* 9, 18. <https://doi.org/10.3390/rs9010018>
- Vogelmann, J.E., Rock, B.N., Moss, D.M., 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *Int. J. Remote Sens.* 14, 1563–1575. <https://doi.org/10.1080/01431169308953986>
- Zhang, T., Su, J., Liu, C., Chen, W.-H., Liu, H., Liu, G., 2017. Band selection in Sentinel-2 satellite for agriculture applications. © IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICoNAC.2017.8081990>
- Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J., Ryu, S.-R., 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sens. Environ.* 93, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.008>
- Zheng, S., Cao, C., Dang, Y., Xiang, H., Zhao, J., Zhang, Y., Wang, X., Guo, H., 2014. Retrieval of forest growing stock volume by two different methods using Landsat TM images. *Int. J. Remote Sens.* 35, 29–43. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.860567>