



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Χωρική Ανάλυση και Διαχείριση Περιβάλλοντος»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 2
ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΤΗΣ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ (FVC)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΡΑΚΗΣ

Τριμελής Επιτροπή:

Κωνσταντίνος Περάκης, Καθηγητής
Δημήτριος Σταθάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Γεώργιος Πετρόπουλος, Εντεταλμένος Ερευνητής Τηλεπισκόπησης και ΓΠΣ

Έρα Σταματούκου
Δασολόγος

Βόλος, 2019

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: 5 Ιουνίου 2019

Ονοματεπώνυμο: Ήρα Ζ. Σταματούκου

Υπογραφή:

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Τηλεπισκόπηση αποτελεί μια πρακτική αποτελεσματική και οικονομική μέθοδο για την καταγραφή παραμέτρων της βλάστησης των φυσικών ή μη οικοσυστημάτων. Η χρήση δορυφορικών δεδομένων απαιτεί την υιοθέτηση καινούργιων μεθόδων για την επεξεργασία τους και την εξαγωγή πληροφοριών, λόγω της αύξησης των φασματικών και χωρικών ιδιοτήτων που περιέχουν (Iron et al., 1985, Cushnie, 1987)

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης αξιολογήθηκε η δυνατότητα χαρτογράφησης και αποτύπωσης της κλασματικής κάλυψης βλάστησης Fractional Vegetation Cover (FVC), με ανάλυση δορυφορικών δεδομένων, μέσω των φασματικών χαρακτηριστικών της.

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η διερεύνηση μεθοδολογιών εκτίμησης της κλασματικής κάλυψης βλάστησης Fractional Vegetation Cover FVC, μέσω τηλεσκοπικών δεδομένων Sentinel 2 και η δημιουργία ενός μοντέλου ροής διαδικασιών το οποίο να είναι εφαρμόσιμο και σε άλλες περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά με τη χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης. Οι διάφορες μέθοδοι συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς την ευαισθησία τους στην περιοχή μελέτης και επιλέχθηκε η μέθοδος που εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης της περιοχής.

Η εκτίμηση της έγινε μέσω κατάλληλα επιλεγμένων δεικτών βλάστησης (Vegetation Indices, (Normalized Difference Vegetation Index NDVI), ως δείκτες του ποσοστού φυτικής κάλυψης, του περιεχόμενου σε χλωροφύλλη, της ποσότητας πράσινης βιομάζας και του νευρωνικού δικτύου (Neural Network).

Στη συνέχεια συσχετίστηκε η δυνατότητα αποτύπωσης και ενσωμάτωσης των εκτιμήσεων FVC στα πολύγωνα του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη. Τέλος δημιουργήθηκε ο χάρτης Fractional Vegetation Cover όπως προέκυψε από την εκτίμηση των δεικτών και των επιλεγόμενων μεθόδων προσδιορισμού τους.

Η εκτίμηση της παραμέτρου Fractional Vegetation Cover FVC και η αξιολόγηση της ακρίβειας των εκτιμήσεων της, επιτεύχθηκε μέσω συσχέτισης των φασματικών τιμών της εικόνας και μετρήσεων που πάρθηκαν στο πεδίο, δίνοντας ποσοστά ταύτισης κοινών περιοχών και ποσοστά ακρίβειας των επιλεγόμενων μεθόδων. Η ολική ακρίβεια αξιολογήθηκε με τη δημιουργία πίνακα Confusion Matrix και έδωσε ικανοποιητικές τιμές (79.729% & 89.864%).

Λέξεις-Κλειδιά: Κλασματική κάλυψη βλάστησης (FVC), Δείκτες Βλάστησης (VI), Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI), Νευρωνικά Δίκτυα (NN), Τηλεπισκόπηση, ΓΣΠ.

ABSTRACT

Remote sensing is a practical and cost-effective method for recording the vegetation of natural ecosystems. The use of satellite data requires the adoption of new methods for processing and extracting information due to the increase in spectral and spatial properties (Iron et al., 1985, Cushnie, 1987)

In the present study, the ability to map and plot Fractional Vegetation Cover FVC was evaluated by remote sensing data analysis through its spectral characteristics.

The purpose of this study was to investigate methodologies for estimating Fractional Vegetation Cover FVC by means of Sentinel 2 remote sensing data and to create a process flow model that can be applied to other areas with similar characteristics as using remote sensing techniques. The different methods were compared with each other for their sensitivity in the study area and the most sensitive method was chosen for biophysical parameters of the area's vegetation.

Its assessment was performed by means of suitably selected Vegetation Indices (NDVI) (Normalized Difference Vegetation Index), as indicators of the vegetation coverage, chlorophyll content, green biomass and neural network.

The ability to capture and incorporate Fractional Vegetation Cover FVC estimates into the polygons of forest maps was then associated. Finally, the Fractional Vegetation Cover map was created as a result of the assessment of the indicators and their chosen methods of identification. The estimation of the Fractional Vegetation Cover FVC and the assessment of the accuracy of its estimations was achieved by correlating the spectral values of the image and the measurements taken in the field, giving the common area identification rates and precision percentages of the selected methods. Total accuracy was evaluated by creating Confusion Matrix and yielding satisfactory values (79.729% & 89.864%).

Key Words: Fractional Vegetation Cover (FVC), Vegetation Indices (VI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Neural Networks (NN), Remote Sensing, GIS.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT.....	ii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ	viii
ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ	ix
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	xi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Γενική Διατύπωση του προβλήματος	1
1.2. Σκοπός μελέτης	2
1.3. Δομή μελέτης	3
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1. Ο Ρόλος της Τηλεπισκόπησης στην Παρακολούθηση της Βλάστησης	5
2.2. Φασματικά χαρακτηριστικά της Βλάστησης	6
2.2.1. Φωτοδεσμευτικές Χρωστικές	6
2.2.2. Φασματική Απόκριση Βλάστησης	6
2.2.3. Φασματική συμπεριφορά της Βλάστησης	10
2.2.4. Πολυφασματικά Δεδομένα και Βλάστηση.....	11
2.2.5. Sentinel 2.....	12
2.3. Τεχνικές Χαρτογράφησης της βλάστησης των δασικών οικοσυστημάτων.....	15
2.3.1. Χρήση αεροφωτογραφιών.....	15
2.3.2. Χρήση δορυφορικών δεδομένων.....	16
2.4. Fractional Vegetation Cover (FVC)	17
2.5. Μέθοδοι υπολογισμού βιοφυσικών παραμέτρων	18
2.5.1. Μέθοδοι παραμετρικής παλινδρόμησης	19
2.5.1.1. Δείκτες Βλάστησης.....	20
2.5.1.2. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	21
2.5.1.3. Υπολογισμός FVC κατά Gutman and Ignatov, 1998.....	23
2.5.1.4. Υπολογισμός FVC κατά Carlson and Ripley, 1997.....	26
2.5.2. Μέθοδοι μη παραμετρικής παλινδρόμησης.....	26
2.5.2.1. Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network).....	27

2.5.2.2. Υπολογισμός FVC (Neural Network) με πολυφασματικά δεδομένα Sentinel 2.....	29
2.5.3. Μέθοδοι Φυσικής Ανάκτησης (Physically-based retrieval methods).....	29
2.5.4. Υβριδικές Μέθοδοι (Hybrid methods).....	29
2.6. Fractional Vegetation Cover FVC - Μελέτες και Αποτελέσματα.....	30
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	41
3.1. Δεδομένα.....	41
3.2. Διάγραμμα Ροής Εργασιών.....	42
3.3. Επιλογή κατάλληλων δορυφορικών δεδομένων	43
3.4. Μεθοδολογική προσέγγιση Υπολογισμού FVC.....	43
3.5. Μετρήσεις Δεδομένων Πεδίου.....	45
3.6. Δεδομένα Πεδίου και Δορυφορικά Δεδομένα.....	46
3.7. Τελική Παραγωγή Προϊόντος FVC.....	47
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	48
4.1. Περιοχή μελέτης.....	48
4.2. Δορυφορικά Δεδομένα περιοχής μελέτης.....	50
4.3. Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων με χρήση του λογισμικού Snap.....	52
4.4. Εφαρμογή Μεθοδολογίας	55
4.4.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	55
4.4.2. NDVI min & max	57
4.4.3. Υπολογισμός FVC	60
4.4.3.1. FVC 1 κατά Gutman and Ignatov, (1998)	60
4.4.3.2. FVC 2 κατά Carlson and Ripley, (1997).....	60
4.4.3.3. FVCover (Neural Network)	65
4.5. Μετρήσεις δεδομένων πεδίου	68
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	71
5.1. Κατηγοριοποίηση FVC 1, FVC 2 & FVCover	71
5.2. Εκτίμηση Ακρίβειας Μεθόδων FVC.....	76
5.3. Αποτίμηση - Αποτελέσματα μεθόδων FVC - Επιλογή βέλτιστης μεθόδου.....	83
5.4. Ποσοστό Φυτοκάλυψης σε Δασικό Χάρτη.....	84
A. Πολύγωνα Μερικά Κυρωμένου Δασικού Χάρτη.....	84
B. Επεξεργασία Γεωχωρικών Δεδομένων.....	85
Γ. Δημιουργία τελικού χάρτη FVC.....	89
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	94

6.1. Επίτευξη των στόχων της παρούσας μελέτης.....	94
6.2. Συνέργεια Τηλεπισκόπησης και GIS στην εκτίμηση FVC.....	98
6.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 2.1. Φασματικά κανάλια Sentinel-2...</i>	<i>14</i>
<i>Πίνακας 4.1. Κατανομή Δεδομένων Πεδίου σε κλάσεις...</i>	<i>70</i>
<i>Πίνακας 5.1. Κατανομή των εικονοστοιχείων της κάθε μεθόδου...</i>	<i>76</i>
<i>Πίνακας 5.2. Έλεγχος ακρίβειας FVC1 (Confusion matrix) ...</i>	<i>78</i>
<i>Πίνακας 5.3. Έλεγχος ακρίβειας FVC2 (Confusion matrix)...</i>	<i>79</i>
<i>Πίνακας 5.4. Έλεγχος ακρίβειας FVCover (Confusion matrix)...</i>	<i>80</i>

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<i>Διάγραμμα 2.1. Κλασματική κάλυψη βλάστησης ως συνάρτηση του NDVI.....</i>	<i>24</i>
<i>Διάγραμμα 2.2. Κλασματική κάλυψη βλάστησης ως συνάρτηση του τετραγώνου NDVI.....</i>	<i>26</i>
<i>Διάγραμμα 3.1. Σχηματικό Διάγραμμα ροής εργασιών...</i>	<i>42</i>
<i>Διάγραμμα 4.1. Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος(NDVI)....</i>	<i>57</i>
<i>Διάγραμμα 4.2. Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος (NDVI_Min_Max).....</i>	<i>59</i>
<i>Διάγραμμα 4.3.Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος FVC1.....</i>	<i>62</i>
<i>Διάγραμμα 4.4.Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος FVC2.....</i>	<i>64</i>
<i>Διάγραμμα 4.5. Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος FCover (Neural Network).....</i>	<i>67</i>
<i>Διάγραμμα 5.1. Ακρίβεια του Αναλυτή/Παραγωγού (Producer's Accuracy).....</i>	<i>80</i>
<i>Διάγραμμα 5.2. Ακρίβεια του Χρήστη (User's Accuracy).....</i>	<i>81</i>
<i>Διάγραμμα 5.3. Σφάλμα Αναπλήρωσης (Commission Errors).....</i>	<i>82</i>
<i>Διάγραμμα 5.4. Σφάλμα Παράλειψης (Omission Errors).....</i>	<i>82</i>
<i>Διάγραμμα 5.5.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία στις κλάσεις FVC... ..</i>	<i>91</i>
<i>Διάγραμμα 5.6. Κατανομή (%) κλάσεων FVC σε πολύγωνα MKAX με δασική πληροφορία....</i>	<i>91</i>
<i>Διάγραμμα 5.7.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία ΔΔ στις κλάσεις FVC.....</i>	<i>92</i>
<i>Διάγραμμα 5.8.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία ΑΝΔΔ στις κλάσεις FVC</i>	<i>92</i>
<i>Διάγραμμα 5.9.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία ΑΔ στις κλάσεις FVC.....</i>	<i>92</i>
<i>Διάγραμμα 5.10.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία ΑΝΑΔ στις κλάσεις FVC</i>	<i>93</i>
<i>Διάγραμμα 5.11.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία ΠΔ στις κλάσεις FVC..</i>	<i>93</i>
<i>Διάγραμμα 5.12.Κατανομή πολυγώνων MKAX με δασική πληροφορία ΑΝΠΔ στις κλάσεις FVC.</i>	<i>93</i>

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 2.1. Απεικόνιση απορρόφησης & ανάκλασης ακτινοβολίας βλάστησης...</i>	<i>7</i>
<i>Εικόνα 2.2. Δομή του φύλλου και αλληλεπίδραση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία...</i>	<i>8</i>
<i>Εικόνα 2.3. Χλωροφύλλη και καροτενοειδή...</i>	<i>9</i>
<i>Εικόνα 2.4. Παράδειγμα φασματικής καμπύλης βλάστησης...</i>	<i>11</i>
<i>Εικόνα 2.5. Πολυφασματική εικόνα και αντιστοίχιση φασματικών με βιοφυσικές κατηγορίες...</i>	<i>12</i>
<i>Εικόνα 2.6. Δορυφόρος Sentinel-2...</i>	<i>13</i>
<i>Εικόνα 2.7. Sentinel 2...</i>	<i>14</i>
<i>Εικόνα 2.8. Sentinel-2- Φασματικές ζώνες...</i>	<i>15</i>
<i>Εικόνα 2.9. Μέθοδοι υπολογισμού βιοφυσικών παραμέτρων...</i>	<i>18</i>
<i>Εικόνα 2.10. Normalized Difference Vegetation Index, NDVI...</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 2.11. Σχηματικό διάγραμμα αλγόριθμου νευρωνικού δικτύου (Neural Network)...</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 3.1. Παράδειγμα Χωρικής Δομής Βλάστησης...</i>	<i>44</i>
<i>Εικόνα 3.2. Κάλυψη βλάστησης σε φάσμα τιμών από 0% μέχρι 100%...</i>	<i>45</i>
<i>Εικόνα 4.1. Περιοχή μελέτης...</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 4.2. Copernicus Open Access Hub...</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 4.3. Πληροφορίες λήψης εικόνας...</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 4.4. Όρια αρχικής δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 MSIL2A ημερομηνίας λήψης 26042019 σε natural (B4,B3,B2) και infrared (B8,B4,B3) απεικόνιση...</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 4.5. Παράμετροι επαναδειγματοληψίας...</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 4.6. Περιτομή αρχικής εικόνας στα όρια της περιοχής μελέτης...</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 4.7. Δημιουργία μάσκας (new_mask_13)...</i>	<i>54</i>
<i>Εικόνα 4.8. Απεικόνιση περιοχής μελέτης μετά την εφαρμογή ενιαίας μάσκας...</i>	<i>54</i>
<i>Εικόνα 4.9. Εποχιακή διακύμανση NDVI...</i>	<i>55</i>
<i>Εικόνα 4.10. Απεικόνιση Κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI)...</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 4.11. Υπολογισμός FVC 1...</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4.12. Υπολογισμός FVC 2...</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 4.13. Δομή Νευρωνικού Δικτύου...</i>	<i>65</i>
<i>Εικόνα 4.14. Υπολογισμός FCover (Neural Network)...</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 5.1. Υπολογισμός Στατιστικών των εικονοστοιχείων των FVC 1, FVC 2, FVCover...</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 5.2. Κωδικοποίηση πολυγώνων μορφής/κάλυψης Δασικού Χάρτη...</i>	<i>84</i>

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

<i>Χάρτης 4.1. Χαρτογραφική απεικόνιση Περιοχής Μελέτης...</i>	<i>48</i>
<i>Χάρτης 4.2. Προεργασία Διασποράς Δεδομένων πεδίου στις κλάσεις 1,2,3 Δορυφορική Εικόνα Google Earth...</i>	<i>69</i>
<i>Χάρτης 5.1. Χαρτογραφική απεικόνιση υπολογισμού FVC 1 σε κλάσεις...</i>	<i>73</i>
<i>Χάρτης 5.2. Χαρτογραφική απεικόνιση υπολογισμού FVC 2 σε κλάσεις...</i>	<i>74</i>
<i>Χάρτης 5.3. Χαρτογραφική απεικόνιση υπολογισμού FVCover σε κλάσεις...</i>	<i>75</i>
<i>Χάρτης 5.4. Απεικόνιση εκτίμησης FVC 2 με διασπορά δεδομένων πεδίου...</i>	<i>77</i>
<i>Χάρτης 5.5. Απεικόνιση κλάσεων Φυτοκάλυψης FVC 2 σε διανυσματικό αρχείο και απόσπασμα μεγέθυνσης ...</i>	<i>86</i>
<i>Χάρτης 5.6. Πολύγωνα ΜΚΔΧ Περιοχής Μελέτης με δασική πληροφορία...</i>	<i>88</i>
<i>Χάρτης 5.7. Χάρτης FVC...</i>	<i>90</i>

ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ

ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index
APAR	Absorbed Photosynthetically Active Radiation
ATBD	Algorithm Theoretical Based Document
BMA	Bayesian Model Average
BOA	European Space Agency
BPNNs	Back-Propagation Neural Networks
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
ECVs	Essential Climate Variable
EO	Earth Observation
ESA	European Space Agency
ESU	Elementary Sampling Units
FAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
FVC	Fractional Vegetation Cover
GARI	Green Atmospherically Resistant Index
GCOS	Global Climate Observation System
GIS	Geographic Information System
GLASS	Global Land Surface Satellite
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GPR	Gaussian Process Regression
GPS	Global Position System
GPs	Gaussian Processes Regression is based on Gaussian Processes
GRNNs	General Regression Neural Networks
GTOS	Global Terrestrial Observation System
IRECI	Inverted Red-edge Chlorophyll Index
KRR	Kernel Ridge Regression
LAI	Leaf Area Index
LCC	Leaf Chlorophyll Concentration
MARS	Multivariate Adaptive Regression Splines
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index
MGRS	Military Grid Reference System
MLR	Multiple Linear Regression
MSI	Multi-Spectral Instrument
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared

NN	Neural Network
PCR	Principal Component Regression
PLSR	Partial Least Squares Regression
PSSRA	Pigment Specific Simple Ratio
RFR	Random Forest Regression
RMSE	Root Mean Square Error
RR	Ridge Regression
RVI	Ratio Vegetation Index
RVM	Relevance Vector Machines
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SMM	Spectral Mixture Models
SNAP	Sentinel Application Platform
S-NPP	Suomi National Polar-Orbiting Partnership
SVMs	Support Vector Machines
SVR	Support Vector Regression
TOA	Top Of Atmosphere
TOC	Top Of Canopy
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index
VF	Vegetation Fraction
VI _s	Vegetation Indices
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΕΓΣΑ	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς
ΜΚΔΧ	Μερικά Κυρωμένος Δασικός Χάρτης
Π.Ε.	Περιφερειακή Ενότητα
ΧΔΙ	Χωρική Διακριτική Ικανότητα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Χωρική Ανάλυση και Διαχείριση Περιβάλλοντος» του Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κατά τη διάρκεια των ετών 2018-2019.

Η επαγγελματική μου ιδιότητα ως Δασολόγος στο Τμήμα Δασικών Χαρτογραφήσεων της Δ/σης Δασών Ν. Ευβοίας της Α.Δ.Θ.ΣΤ.Ε., σε συνδυασμό με την ενασχόλησή μου με την επιστήμη της Τηλεπισκόπησης και των ΓΣΠ οδήγησαν στην επιλογή του θέματος με επιχειρησιακό και πρακτικό ενδιαφέρον.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Περάκη για το ενδιαφέρον του και την πολύτιμη καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διατριβής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. Δημήτριο Σταθάκη Αναπληρωτή Καθηγητή και κ. Γεώργιο Πέτρόπουλο, Εντεταλμένο Ερευνητή Τηλεπισκόπησης και ΓΠΣ, για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Ιωάννη Φαρασλή (Μέλος ΕΔΙΠ), για την πολύτιμη ενθάρρυνση του όσον αφορά την επιλογή του θέματος, για τις συμβουλευτικές συζητήσεις και κατευθύνσεις του, καθώς και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στον γιό μου Ζήση για τον πολύτιμο χρόνο που στερήθηκε από μένα, στον οποίο και αφιερώνω την παρούσα διατριβή.

Έρα Σταματούκου

Βόλος, 2019

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενική Διατύπωση του Προβλήματος

Για τη σωστή διαχείριση των φυσικών πόρων και για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με τα φυσικά φαινόμενα έχει μεγάλη σημασία η έγκαιρη και ακριβής παρατήρηση των αλλαγών διαφόρων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων στην επιφάνεια της Γης (Lu et al., 2004). Η διαχείριση του περιβάλλοντος οδήγησε το επιστημονικό ενδιαφέρον στη μελέτη των διεργασιών ή αλλαγών που λαμβάνουν χώρα και στη συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων με σκοπό τη χωρική μοντελοποίηση των διεργασιών αυτών (Δρουγκελίδης, 2015).

Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης με τη μέθοδο παρατήρησης-ανίχνευσης φυσικών χαρακτηριστικών συμβάλλει ουσιαστικά στη μελέτη του περιβάλλοντος (Δρουγκελίδης, 2015), παρέχει τη δυνατότητα εστίασης, ανάπτυξης και εφαρμογής μεθόδων και τεχνικών για τη μελέτη περιβαλλοντικών προβλημάτων και φαινομένων (Collins και Woodcock, 1996), για την αποτίμηση των γήινων πόρων και την παρακολούθηση του περιβάλλοντος (Παπαδοπούλου, 2008).

Για τη διαχείριση των φυσικών οικοσυστημάτων απαιτείται πλήρης καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης με έγκυρα στοιχεία. Η ακρίβεια των στοιχείων βασίζεται κυρίως στις επίγειες μετρήσεις, διότι καταγράφουν την κατάσταση που επικρατεί σε μια περιοχή μελέτης. Ωστόσο, η πρόοδος των δορυφορικών αισθητήρων και η ακρίβεια των δεδομένων τους, προσελκύει όλο και περισσότερους ερευνητές ως προς την αξιοποίηση τους (Γρηγοριάδης, 2017).

Το φυσικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από πολύπλοκα και δυναμικά λειτουργικά συστήματα. Τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης της γης δίνουν τη δυνατότητα διαχρονικών απεικονίσεων με σταθερή επαναληψιμότητα. Παράλληλα η ελεύθερη διάθεση όλο και μεγαλύτερου όγκου δορυφορικών εικόνων αύξησε τη διαθεσιμότητα διαχρονικών αναλύσεων. Έτσι προσφέρεται η ικανότητα μελέτης δυναμικών φαινομένων, διαχρονικών συγκρίσεων και καταγραφής στοιχείων ή φαινομένων σε συνεχή βάση (long-term monitoring) (Βασιλάκη, 2014).

Η Δορυφορική Τηλεπισκόπηση δίνει τη δυνατότητα για αναγνώριση των αντικειμένων και των φαινομένων σε εικόνες της επιφάνειας της γης, ενώ τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ΓΣΠ (Geographic Information Systems GIS)

παρέχουν το ψηφιακό περιβάλλον για την ανάλυση των γεωγραφικών δεδομένων (Gonzalez & Wintz 1987, και Καρτέρης, 1992), συνδυάζοντας τη χωρική με την περιγραφική πληροφορία, ενώ η διάσταση του χρόνου υπεισέρχεται σαν μια επιπλέον μεταβλητή (Despotakis et al., 1991). Σύμφωνα με τους Yuan και Zhang (2008) η χρήση της Τηλεπισκόπησης και των ΓΣΠ παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη φύση των αλλαγών των χρήσεων γης, της φυτοκάλυψης, τη χωρική κατανομή και την έκταση των διαφόρων κλάσεων.

Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά τα Δάση, τα οποία εκτείνονται σε μεγάλες εκτάσεις και καλύπτουν ανώμαλο ανάγλυφο, οι δύο επιστήμες δίνουν τη δυνατότητα να γίνουν καταγραφές ισάξιες με τις μετρήσεις στο πεδίο, οι οποίες είναι πολύ πιο χρονοβόρες και αντιοικονομικές (Δρουγκελίδης, 2015).

Τα δασικά οικοσυστήματα αποτέλεσαν, αποτελούν και θα αποτελούν αντικείμενο εντατικής παρακολούθησης και έρευνας, εξαιτίας της οικονομικής και της περιβαλλοντικής σημασίας τους (Μαλλίνης, 2006). Η Τηλεπισκόπηση παρέχει ένα πολύτιμο μέσο καταγραφής και παρακολούθησής των σύνθετων δασικών οικοσυστημάτων (Παπαδοπούλου, 2008). Η προστασία του δασικού οικοσυστήματος συνδέεται άμεσα με τη διατήρηση της χλωρίδας και της πανίδας και εν γένει της φυσικής ισορροπίας, της διαχείρισης των βιοκλιματικών αλλαγών, αλλά και με την ποιότητα διαβίωσης του ανθρώπου (Παπαθανασόπουλος, 2014).

Τα δορυφορικά δεδομένα περιέχουν αυξημένη χωρική πληροφορία για την εκτίμηση διαφόρων δασικών παραμέτρων, τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και σε εθνικό, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον επικουρικά με τις μετρήσεις πεδίου (Γρηγοριάδης, 2017). Μια ποικιλία τεχνικών επεξεργασίας εικόνων έχει αναπτυχθεί για την αποτίμηση δασικών απογραφών και βιοφυσικών παραμέτρων από εικόνες τηλεπισκόπησης (Παπαδοπούλου, 2008).

Η συμβολή της Τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση δασικών παραμέτρων έχει προσφέρει ουσιαστικά αποτελέσματα (Ali et al. 2015, Kumar et al. 2015, Sinha et al., 2015), καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι δεδομένων Τηλεπισκόπησης για τη μοντελοποίηση των δασικών παραμέτρων ή της δομής της κόμης του δένδρου (Meng et al. 2013, Tillack et al. 2014, Kross et al. 2015).

1.2. Σκοπός μελέτης

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ως περιοχή έρευνας το νότιο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας της νήσου Ευβοίας. Ο κύριος σκοπός της μελέτης ήταν να

διερευνηθούν μεθοδολογίες εκτίμησης της Fractional Vegetation Cover FVC (κλασματικής κάλυψης βλάστησης), μέσω τηλεσκοπικών δεδομένων. Η Fractional Vegetation Cover FVC, αποτελεί μια γενικότερη έννοια που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Η εκτίμηση της, έγινε μέσω: (α) κατάλληλα επιλεγμένων δεικτών βλάστησης (vegetation indices), ως δείκτες της αφθονίας, της δραστηριότητας της πράσινης βλάστησης, του ποσοστού φυτικής κάλυψης, του περιεχόμενου σε χλωροφύλλη και της ποσότητας πράσινης βιομάζας και μέσω (β) νευρωνικών δικτύων.

Στο πλαίσιο αυτό, διερευνήθηκαν μια σειρά επιμέρους στόχων:

1. Υπολογισμός και διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης της βιογεωφυσικής παραμέτρου Fractional Vegetation Cover FVC σε πολυφασματικά δεδομένα Sentinel 2.
2. Αξιοποίηση και υιοθέτηση μεθόδων επεξεργασίας και ανάλυσης δορυφορικών εικόνων που θα μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες σχετικές με τη χαρτογράφηση της Fractional Vegetation Cover FVC.
3. Η αξιολόγηση των μεθόδων υπολογισμού Fractional Vegetation Cover FVC μέσω των δεικτών βλάστησης (Vegetation Indices) και των νευρωνικών δικτύων (Neural Network) και η επιλογή αυτής που εμφανίζει την υψηλότερη συσχέτιση.
4. Η εκτίμηση της ακρίβειας των παραγόμενων χαρτών Fractional Vegetation Cover FVC με χρήση δεδομένων πεδίου.
5. Συσχέτιση των αποτελεσμάτων της καλύτερης μεθόδου με τα πολύγωνα του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη στα όρια της περιοχής μελέτης.
6. Ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου προϊόντος χαρτογράφησης της εν λόγω περιοχής χρησιμοποιώντας τα βέλτιστα αποτελέσματα των προηγούμενων διαδικασιών.

1.3. Δομή μελέτης

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή της δομής των κεφαλαίων. Στο Πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης και διατυπώνεται ο σκοπός και οι επιμέρους στόχοι της.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η επισκόπηση της βιβλιογραφίας. Αρχικά αναλύονται βασικές έννοιες σχετικά με την Τηλεπισκόπηση, ενώ αναπτύσσεται ο ρόλος της τηλεπισκόπησης στην εκτίμηση των διαφόρων δασικών παραμέτρων όπως η

παρακολούθηση της βλάστησης. Αναφέρονται τα φασματικά χαρακτηριστικά, η φασματική απόκριση και η συμπεριφορά της βλάστησης. Στη συνέχεια γίνεται μια παρουσίαση των συστημάτων δορυφορικής απεικόνισης με ιδιαίτερη αναφορά στα πολυφασματικά δεδομένα και στους δορυφόρους Sentinel 2 και παρουσιάζονται οι αρχές επεξεργασίας και ερμηνείας τους καθώς και τεχνικές χαρτογράφησης της βλάστησης των δασικών οικοσυστημάτων.

Γίνεται αναφορά σε μεθόδους υπολογισμού των βιοφυσικών παραμέτρων παραμετρικής παλινδρόμησης, μη παραμετρικής, (με ιδιαίτερη αναφορά στα Νευρωνικά Δίκτυα), φυσικών και υβριδικών μεθόδων.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ερμηνεία της μεταβλητής Fractional Vegetation Cover FVC, παρατίθενται αποτελέσματα ερευνητικών μελετών και αναλύονται χαρακτηριστικά με ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία και στην παρουσία τους στη βιβλιογραφία.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από την προμήθεια των δορυφορικών εικόνων, μέχρι τη δημιουργία των τελικών χαρτογραφικών και των στατιστικών προϊόντων.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο αναφέρεται στη μελέτη περίπτωσης. Περιγράφεται η περιοχή μελέτης, ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας καθώς και η επαλήθευση της ορθότητας των μεθόδων.

Το Πέμπτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τη σύνοψη των κυριοτέρων αποτελεσμάτων, τα στατιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν, την ακρίβεια που επετεύχθη από την κάθε μέθοδο ξεχωριστά και τη σύγκριση των μεθόδων προκειμένου να ακολουθήσει η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το Έκτο Κεφάλαιο περιέχει τη συζήτηση των αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης μελέτης καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Ο Ρόλος της Τηλεπισκόπησης στην Παρακολούθηση της Βλάστησης

Η σημασία της χαρτογράφησης, ποσοτικοποίησης και παρακολούθησης των αλλαγών των φυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης και ιδιαίτερα των δασών έχει αποδειχθεί πολύ μεγάλη όσον αφορά τη μελέτη των παγκόσμιων αλλαγών (Nemani *et al.*, 1996).

Μέχρι σήμερα οι διάφορες έρευνες που προτείνουν αυτοματοποιημένες (ή μερικώς αυτοματοποιημένες) μεθόδους δεν έχουν πλήρως αξιοποιηθεί στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, η αξιοποίηση της δυνατότητας αξιοποίησης των νέων μεθόδων σε φυσικά οικοσυστήματα για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων των δασικών παραμέτρων βρίσκεται σε πολύ αρχικό στάδιο (Γρηγοριάδης, 2017).

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία για τη χαρτογράφηση και καταγραφή της βλάστησης, αποτελώντας, ένα πολύ σημαντικό μέσο παρακολούθησης της φυτοκάλυψης και κατηγοριοποίησης αυτής ειδικά για περιοχές που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις (Rouhggarden *et al.*, 1991, Treitz & Howarth, 1999).

Όλα τα είδη βλάστησης περιέχουν κοινά βιοφυσικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά, όπως η δομή του φύλλου, οι περιεχόμενες στο φύλλο χρωστικές ουσίες, η περιεκτικότητα σε διάφορα χημικά στοιχεία και η περιεχόμενη υγρασία στους ιστούς των φύλλων (Συλλαίος, 1990, Kokaly *et al.*, 2003). Αυτά τα χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος, την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει το ποσοστό ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Siegal & Gillespie, 1980).

Η συσχέτιση της φαινολογικής κατάστασης και βιοχημικής σύστασης των φυτών με τη φασματική τους απόκριση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μελετήθηκε από αρκετούς επιστήμονες, όπως οι Davids & Tyler, 2003, Schmidt & Skidmore, 2003, Kokaly *et al.*, 2003, Sims & Gamon, 2002 και Rogan *et al.*, 2002. Η συσχέτιση αυτή βασίζεται στην ιδιότητα της βλάστησης να χρησιμοποιεί τμήμα του φάσματος της ηλιακής ενέργειας για την ανάπτυξη της, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα (Ιερωνυμίδα, 2009).

2.2. Φασματικά χαρακτηριστικά της Βλάστησης

2.2.1. Φωτοδευτικές Χρωστικές

Η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική σύμφωνα με τον Καράταγλη (1995) επιτελείται μέσω της απορρόφησης του φωτός από τις χρωστικές των χρωματοφόρων. Οι χρωστικές είναι ουσίες που απορροφούν το φως για φωτοχημικές αντιδράσεις, αποτελώντας τα πιο σημαντικά συστατικά της φωτοσύνθεσης. Ο πιο δραστήριος ιστός από φωτοσυνθετική άποψη είναι ο ιστός του μεσόφυλλου. Τα κύτταρα του μεσόφυλλου έχουν ένα μεγάλο αριθμό χλωροπλαστών, οι οποίοι εκτός της χλωροφύλλης περιέχουν και άλλες χρωστικές.

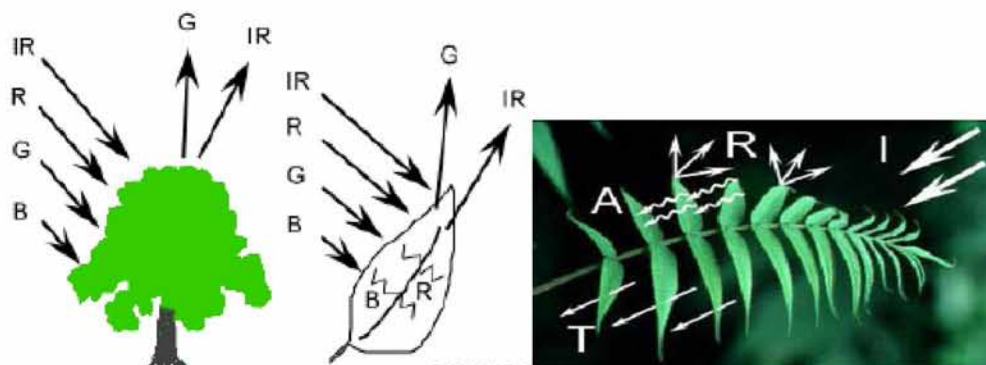
Φωτοδευτικές χρωστικές που συμμετέχουν στις αντιδράσεις για να παγιδεύσουν το φως κατά τη φωτοσύνθεση είναι οι χλωροφύλλες, τα καροτενοειδή (καροτένια και ξανθοφύλλες) και οι φυκοβιλίνες (φυκοκυανίνη και φυκοερυθρίνη). Υπάρχουν αρκετά είδη χλωροφυλλών που διαφέρουν μεταξύ τους μόνο σε λεπτομέρειες της μοριακής τους δομής. Οι χλωροφύλλες που υπάρχουν σε φωτοσυνθετικούς οργανισμούς είναι η a,b,c,d η βακτηριοχλωροφύλλη και αρκετά παράγωγα τους. Η a χλωροφύλλη χρωστική απορροφά κυρίως τα ιώδη ερυθρά και κυανά μήκη κύματος αντανάκλα όμως το πράσινο φως για αυτό φαίνεται και πράσινη (Καράταγλης, 1995).

2.2.2. Φασματική Απόκριση Βλάστησης

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη βλάστηση είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των εφαρμογών της φασματοσκοπίας και της τηλεπισκόπησης στη μελέτη και την ανάλυσή της. Οι βιολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες της βλάστησης επιδρούν στο συντελεστή ανάκλασης, στη μετάδοση και στην απορροφητικότητα (absorptance) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που προέρχεται από διάφορες περιοχές στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αν και τα συστατικά των φυτών (κλαδιά, άνθη) έχουν μια επίδραση στη φασματική απόκριση, η συμβολή τους είναι μικρή όταν συγκρίνεται με αυτή των φύλλων των φυτών (Tele Kyoto, 2014).

Τα περισσότερα από τα φυσικά υλικά παρουσιάζουν σχεδόν ίδια ανάκλαση τόσο στο κόκκινο τμήμα (**Red**: 0.6-0.7 μm) όσο και στο κοντινό υπέρυθρο (**Near Infrared**, NIR: 0.7-1.1 μm) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με εξαίρεση τη βλάστηση (Εικόνα 2.1.), η οποία παρουσιάζει ισχυρή απορρόφηση της κόκκινης ακτινοβολίας κυρίως από τη χλωροφύλλη και ισχυρή ανάκλαση της κοντινής υπέρυθρης (NIR), οπότε

απεικονίζεται φωτεινή στο κοντινό υπέρυθρο και σκοτεινή στο κόκκινο (Τσακαλίδης, 2007).

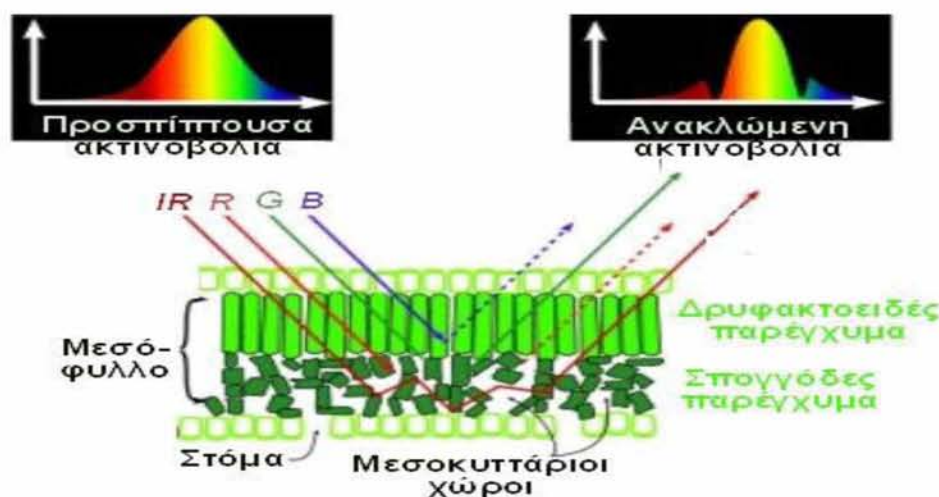


Εικόνα 2.1.: Απεικόνιση απορρόφησης & ανάκλασης ακτινοβολίας βλάστησης.
(Πηγές: *Fundamentals of Remote Sensing, Tutorial*,
Natural Resources Canada)

Η κατανόηση των δομικών τμημάτων των φύλλων που επηρεάζουν τον συντελεστή ανάκλασης του, είναι σημαντική για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των φασματοσκοπικών μετρήσεων (Ανδρώνης και Καραθανάση, 2016). Ο συντελεστής ανάκλασης ενός φύλλου γενικά δεν είναι εξαρτώμενος (τουλάχιστον έντονα) από το πάχος των φύλλων. Η ανακλαστικότητα επηρεάζεται εντονότερα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπου οι χρωστικές ουσίες των φύλλων απορροφούν την ενέργεια (Tele Kyoto, 2014). Οι οπτικές ιδιότητες των φύλλων έχει αποδειχθεί ότι συσχετίζονται με τη φωτοσυνθετική απόδοσή τους και με τα αποθέματα θερμικής ενέργειας (Ehleringer and Mooney, 1978, Gates, 1976).

Το **ορατό και το κοντινό υπέρυθρο** τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορεί να διαχωριστούν ποιοτικά σε φασματικές υποκατηγορίες προκειμένου να αξιολογηθούν οι βασικές ιδιότητες των **φύλλων** σε διαφορετικά συστατικά του (Tele Kyoto, 2014):

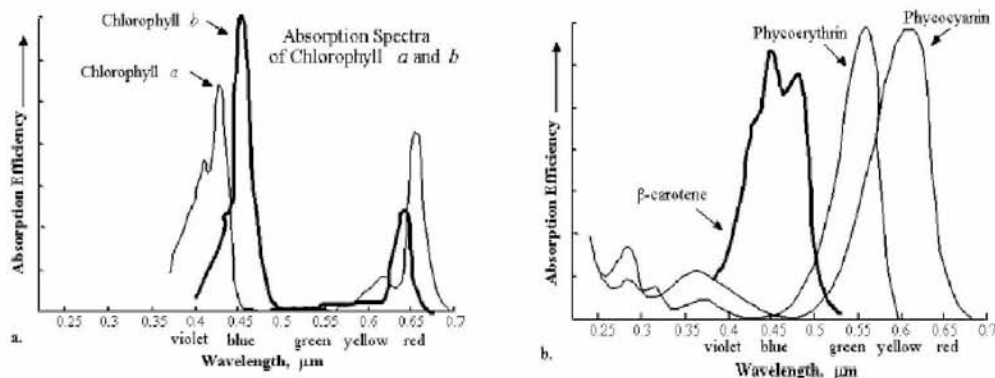
- Από **0.4μm–0.7μm**: Έχει παρατηρηθεί, ότι η έλλειψη ισχυρής ανακλαστικότητας από τα φύλλα στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ερυθρό και ιώδες τμήμα μπορεί να αποδοθεί στις χρωστικές ουσίες των φύλλων, και κυρίως στη χλωροφύλλη, που απορροφούν το ορατό φως ως φωτοδευσμειτικές χρωστικές για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Asner, 1998). Τα περισσότερα φυτά εμφανίζονται πράσινα (Εικόνα 2.2.) λόγω της μεγάλης (70-90%) απορρόφησης του φωτός από τη χλωροφύλλη στα **0.45 μm (μπλε) και 0.68 μm (κόκκινο)** και σχετικά λιγότερη απορρόφηση στα πράσινα μήκη κύματος (**0.55 μm**).



Εικόνα 2.2.: Δομή του φύλλου και αλληλεπίδραση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία (Πηγή: Μάκρας, 2007)

Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της ανάπτυξης των φυτών, η συγκέντρωση χλωροφύλλης είναι σχετικά χαμηλή έναντι των καροτενοειδών και η οπτική εμφάνιση ενός φύλλου είναι πολύ ανοιχτή πράσινη. Το **μπλε και κόκκινο φως** απορροφάται και χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση και τις φωτοχημικές αντιδράσεις. Δεδομένου ότι τα φυτά ωριμάζουν, η αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης είναι ανάλογη με άλλες χρωστικές και το φυτό εμφανίζεται από πράσινο έως σκούρο πράσινο. Κατά τη γήρανση, η σύνθεση της χλωροφύλλης παύει, με συνέπεια τη λιγότερη απορρόφηση φωτός στα μπλε και κόκκινα μήκη κύματος (Roy, 1989). Στο γερασμένο φυτό κυριαρχούν άλλες χρωστικές ουσίες (εκτός της χλωροφύλλης), με συνέπεια να κυριαρχεί ένα κίτρινο έως καφετί χρώμα (Tele Kyoto, 2014). Αυτός είναι επίσης ο λόγος που τα φύλλα φαίνονται πράσινα, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ το φθινόπωρο που η χλωροφύλλη είναι μειωμένη, μειώνεται η ανάκλαση στη περιοχή του πράσινου και αυξάνεται στη περιοχή του κόκκινου οπότε τα φύλλα εμφανίζονται κίτρινα ή κόκκινα. (Γεωργοπούλου, 2013).

Οι χλωροφύλλες a και b έχουν τα μέγιστα σημεία απορροφητικότητας τους στην **κόκκινη και στην μπλε περιοχή** του φάσματος. Στην μπλε περιοχή έχουμε μέγιστες επικαλύψεις με την απορροφητικότητα των καροτενοειδών, με ταυτόχρονη υψηλότερη συγκέντρωση της χλωροφύλλης από τα καροτενοειδή στα περισσότερα φύλλα, οπότε δε χρησιμοποιείται αυτή η φασματική ζώνη για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη και σε καροτενοειδή αντίστοιχα (Tele Kyoto, 2014). Η μέγιστη απορροφητικότητα στην κόκκινη περιοχή εμφανίζεται μεταξύ **0.66 και 0.68 μm** (Εικόνα 2.3.).



Εικόνα 2.3.: Χλωροφύλλη και καροτενοειδή
(Πηγή: Tele Kyoto, 2014)

Στη μετάβαση από το **κόκκινο στα υπέρυθρα** μήκη κύματος, ο συντελεστής ανάκλασης των φύλλων αυξάνεται πολύ, παράγοντας ένα ευδιάκριτο φασματικό χαρακτηριστικό γνώρισμα (Εικόνα 2.4.), το οποίο ονομάζεται **κόκκινη άκρη (red edge)** (Tele Kyoto, 2014). Ο προσδιορισμός με ακρίβεια της θέσης αυτής (Red Edge) έχει συσχετιστεί με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, με τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (Vogelmann, 1993), αλλά και με την καταπόνηση του φυτού (Lichtenthaler et al., 1996, Vogelmann et al., 1993, Vogelmann, 1993).

- **Από $0.7\mu\text{m}$ – $1.35\mu\text{m}$:** στο εγγύς υπέρυθρο (Near Infrared, NIR) παρατηρείται απότομη αύξηση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται, στο διάστημα $0.7\mu\text{m}$ – $0.8\mu\text{m}$, το οποίο εν συνεχεία παραμένει σχεδόν σταθερό (Εικόνα 2.4.) μέχρι τα $1.3\mu\text{m}$. Η αυξημένη ανάκλαση αποδίδεται στις πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις από τις επιφάνειες μεταξύ ενυδατωμένων τοιχωμάτων των κυττάρων και του ενδοκυτταρικού αέρα των σπογγωδών ιστών του μεσόφυλλου (Συλλαίος, 1990). Η ανάκλαση της βλάστησης στο **εγγύς υπέρυθρο NIR** είναι υψηλότερη από αυτή που παρουσιάζουν τα περισσότερα ανόργανα υλικά με αποτέλεσμα η βλάστηση να εμφανίζεται ανοιχτόχρωμη στα εν λόγω μήκη κύματος (Συλλαίος, 1990).

Στη φασματική κατηγορία από 0.75 έως $1.35 \mu\text{m}$, ο συντελεστής ανάκλασης (Εικόνα 2.4.) επηρεάζεται κυρίως από την εσωτερική δομή των φύλλων. Σε αυτήν τη φασματική ζώνη εμφανίζεται σχετικά υψηλότερος συντελεστής ανάκλασης, όταν συγκρίνεται με το ορατό φως, με πάνω από 50% της εισερχόμενης ακτινοβολίας να ανακλάται από τα ώριμα φύλλα. Ο συντελεστής ανάκλασης είναι στο υψηλότερό του σημείο στην πλήρη ωριμότητα και μειώνεται μέχρι την κατάρρευση του κυτταρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια της γήρανσης (Tele Kyoto, 2014).

Σε περίπτωση ασθένειας του φυτού, όπου η εσωτερική δομή του κυττάρου καταρρέει, ή όταν το φυτό φτάσει στο τελευταίο στάδιο ωριμότητας του, όταν οι μεσοκυττάριοι χώροι και κατ' επέκταση το φύλλο συρρικνώνονται, το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας μειώνεται. Σε αυτή την περίπτωση τα χρώματα που απεικονίζουν τη βλάστηση στις πολυφασματικές εικόνες γίνονται σκουρότερα, και η κατάσταση του φυτού δύναται να γίνει αντιληπτή μέρες πριν από την ορατή αλλαγή στο πράσινο χρώμα των φύλλων (Συλλαίος, 1990).

- **Από 1.35μm – 2.3μm:** σε αυτά τα μήκη κύματος η συμπεριφορά της βλάστησης επηρεάζεται ιδιαίτερα από το περιεχόμενο νερό στους ιστούς των φύλλων (Συλλαίος, 1990). Στα **1.45μm και 1.95μm** το ποσοστό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται με την αύξηση του νερού στους ιστούς των φύλλων (Εικόνα 2.4.), γεγονός που αποδίδεται στην υψηλή απορρόφηση της ακτινοβολίας, στα συγκεκριμένα μήκη κύματος, από το νερό (Συλλαίος, 1990).

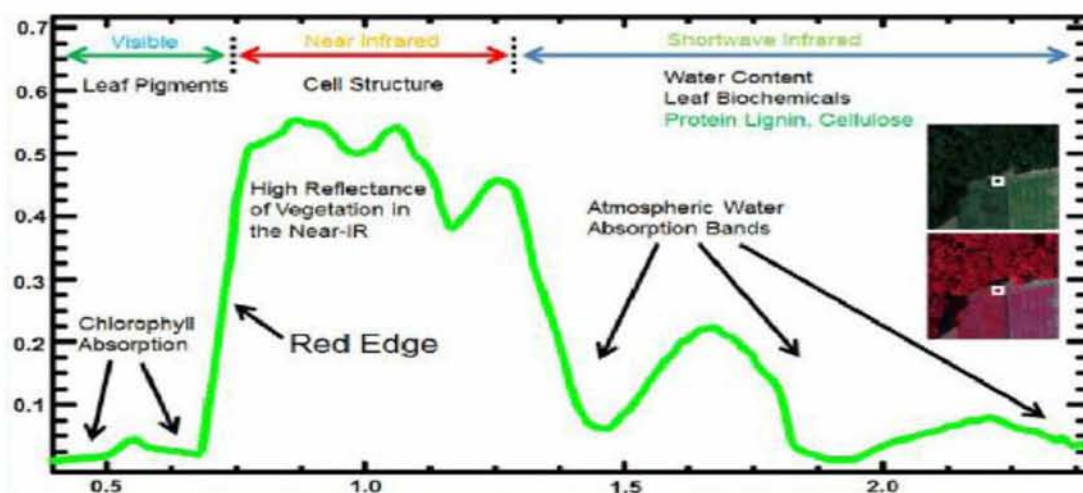
2.2.3. Φασματική Συμπεριφορά της Βλάστησης

Τα φασματικά χαρακτηριστικά σε ένα βιολογικό σύστημα, δεν παραμένουν στατικά, αλλά χαρακτηρίζονται με μια δυναμική σχέση αυτών στο χώρο και στο χρόνο (Μάκρας, 2007). Υπάρχει ένα σημαντικό ποσό φασματικής, εποχιακής και χωρικής μεταβλητότητας, η οποία πρέπει να κατανοηθεί για τη σωστή ανάλυση των δεδομένων της τηλεπισκόπησης (Swain and Davis, 1978).

Τα τρία στοιχεία της βλάστησης που επηρεάζουν τη φασματική ποσότητα και ποιότητα της ηλιακής αντανακλώμενης ακτινοβολίας που δέχονται οι δορυφόροι είναι η αφθονία, η σύνθεση και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται (Stow 1995).

Η συμπεριφορά της βλάστησης στα διάφορα μήκη κύματος καθορίζει τις φασματικές καμπύλες των φυτών (Εικόνα 2.4.), που διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σύνθεση, το είδος, την ανάπτυξη και την υγεία αυτών.

Μια ευρεία κατηγορία ενός δάσους μπορεί να περιέχει μια σειρά από φασματικές υπό-κατηγορίες με ξεχωριστές φασματικές διακυμάνσεις. Οι φασματικές υπό-κατηγορίες στο δάσος δημιουργούνται λόγω τους είδους και της πυκνότητας, ή είναι αποτέλεσμα της σκίασης ή διακυμάνσεις στο φωτισμό της εικόνας. Η δυναμική πίσω από την ανάμειξη δύο ή περισσότερων στοιχείων εδαφοκάλυψης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της εδαφοκάλυψης, εντός ενός εικονοστοιχείου, που αλληλεπιδρά με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Γκίνη, 2015).



Εικόνα 2.4.: Παράδειγμα φασματικής καμπύλης βλάστησης. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφονται οι βασικοί παράγοντες που ελέγχουν την ανάκλαση των φύλλων στα επιμέρους φάσματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αυτά διακρίνονται στον κάτω οριζόντιο άξονα.

(Πηγή: Tele Kyoto, 2014)

2.2.4. Πολυφασματικά Δεδομένα και Βλάστηση

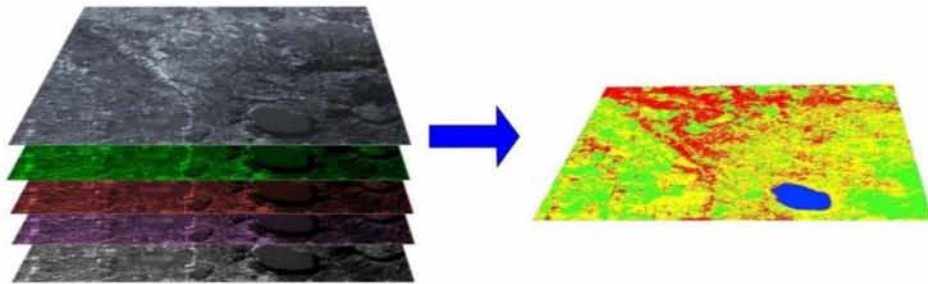
Τα πολυφασματικά συστήματα καταγραφής επιτρέπουν την παρακολούθηση του κύκλου ανάπτυξης και της υγείας των φυτών. Οι υπερφασματικοί αισθητήρες παρέχουν περισσότερο λεπτομερείς φασματικές καμπύλες, καθιστώντας εφικτή ακόμα και την αναγνώριση των βιοχημικών και βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης (Ιερωνυμίδη, 2009).

Η πολυφασματική εικόνα συνίσταται από επιμέρους εικόνες, που η καθεμία καταγράφει στενές περιοχές μηκών κύματος (φασματικά κανάλια). Η αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών της γήινης επιφάνειας και της ηλιακής ακτινοβολίας διαφοροποιείται με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το ίδιο υλικό εμφανίζεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε κανάλι (η βλάστηση εμφανίζεται σκουρόχρωμη στα κανάλια του ορατού και ανοιχτόχρωμη στο εγγύς υπέρυθρο).

Οι πολυφασματικές λήψεις, δίνουν τη δυνατότητα να ανιχνευθούν διαφορές μεταξύ βιοφυσικών στοιχείων της επιφάνειας, οι οποίες δεν είναι δυνατό να γίνουν αντιληπτές με την ανάλυση μιας μόνο φασματικής ζώνης (Καρπούζας, 2015). Ο στόχος είναι να γίνει αντιστοίχιση των φασματικών (Εικόνα 2.5.), με τις βιοφυσικές κατηγορίες (Γκίνης, 2015).

Ο βαθμός στον οποίο η μεταβολή ενός χαρακτηριστικού της βλάστησης, επιφέρει αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο καταγράφεται σε μια τηλεπισκοπική εικόνα, αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων για το ίδιο το χαρακτηριστικό (Μάκρας, 2007).

Οι πολυφασματικές εικόνες επιτρέπουν τον ποιοτικό διαχωρισμό επιφανειών ή αντικειμένων (δασικές περιοχές, στάδια ανάπτυξης και κατάσταση υγείας φυτών). (Ιερωνυμίδη, 2009).



Εικόνα 2.5.: Πολυφασματική εικόνα και αντιστοίχιση φασματικών με βιοφυσικές κατηγορίες. https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/en/latest/remote_sensing.html, (accessed, 1th February 2019)

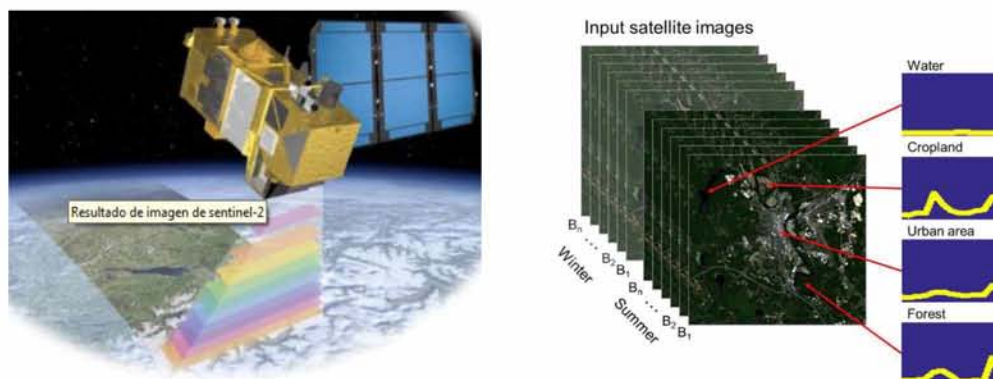
2.2.5. Sentinel 2

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια σημαντική πρόοδος αναφορικά με την αξιοποίηση των ανοικτών δεδομένων ως εργαλείο βιώσιμης οικονομικής ανάπτυξης και συνεργατικότητας. Το θεσμικό καθεστώς που διέπει τα ανοικτά δεδομένα είναι οι Οδηγίες **PSI (2003/98/EC)** και **INSPIRE (2007/2/EC)**, οι οποίες παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τον διαμοιρασμό των δεδομένων, τόσο σε τεχνικό όσο και σε νομικό επίπεδο (Συμεωνίδης κ.α., 2017).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος, European Space Agency, E.S.A. έχει υπό την αιγίδα της το πρόγραμμα **Copernicus**, το μεγαλύτερο στον κόσμο πρόγραμμα διαμοιρασμού ανοικτών δεδομένων παρατήρησης της Γης, ως συνέχεια του προγράμματος GMES (Global Monitoring for Environment and Security) για την «Παγκόσμια Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας». Στόχος του προγράμματος Copernicus είναι να παρέχει συνεχή, αξιόπιστα και ελεύθερα δεδομένα δορυφορικής τηλεπισκόπησης, με παγκόσμια κάλυψη, τα οποία να αξιοποιούν στο σύνολό τους τα δεδομένα των καινοτόμων δορυφορικών αποστολών Sentinel (Συμεωνίδης κ.α., 2017).

Τα δεδομένα αυτά είναι σημαντικά για τη βελτίωση της διαχείρισης του περιβάλλοντος, την κατανόηση και τον περιορισμό της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής, καθώς και τη διασφάλιση της ασφάλειας του πολίτη (Ψωμιάδης κ.α., 2017). Οι δορυφόροι Sentinel είναι εφοδιασμένοι με νέους, σύγχρονης τεχνολογίας αισθητήρες και έχουν στόχο την παρακολούθηση της Γης, σε ξηρά (Land Service) και θάλασσα,

της ατμόσφαιρας και της αλλαγής του κλίματος, καθώς και τη διαχείριση έκτακτων καταστάσεων και την ασφάλεια (Συμεωνίδης κ.α., 2017).



Εικόνα 2.6.: Δορυφόρος Sentinel-2

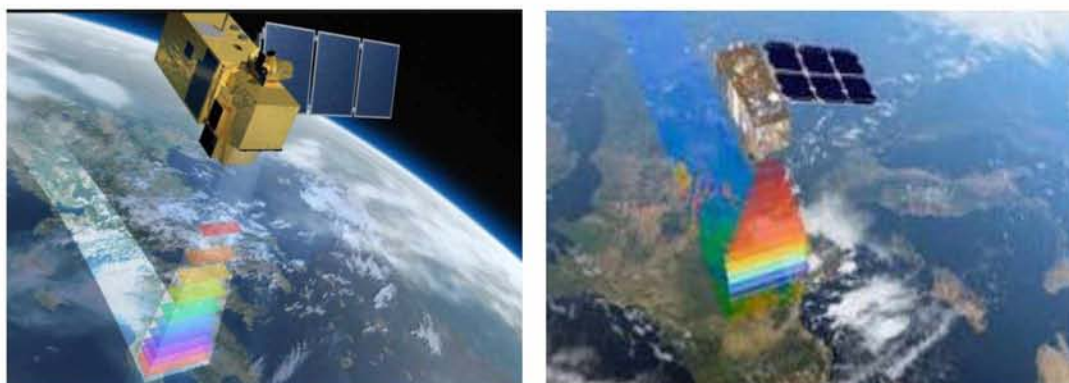
Πηγές: (Copernicus Tutorial: Working with Sentinel-2 products, Kim et al., 2018)

Ο δορυφόρος Sentinel-2 (Εικόνα 2.6.), παρέχει οπτικές εικόνες υψηλής ανάλυσης για την εκτέλεση επίγειων παρατηρήσεων και την υποστήριξη εφαρμογών που αφορούν κάθε είδος γεωεπιστήμης. Η πλήρης αποστολή Sentinel 2 αποτελείται από δύο δορυφόρους στην ίδια τροχιά αντιδιαμετρικά ο ένας από τον άλλο, με σκοπό την επίτευξη υψηλής περιόδου επαναληψιμότητας, της τάξης των 5 ημερών στον Ισημερινό και την πλήρη κάλυψη. Αποτελείται από δύο δίδυμους δορυφόρους, το Sentinel-2A, που ξεκίνησε στις 23 Ιουνίου 2015 και το Sentinel-2B ξεκίνησε στις 7 Μαρτίου 2017. Η ζώνη σάρωσης των δορυφόρων έχει πλάτος 290 km (Sentinel-2 User Handbook, 2015).

Η αποστολή καλύπτει την επιφάνεια της γης (Εικόνα 2.7.) με χωρική ανάλυση 10, 20 και 60 μέτρων, παρέχοντας δεδομένα κατάλληλα για την υλοποίηση μελετών που σχετίζονται με τη χαρτογράφηση της χρήσης/κάλυψης γης και την ποσοτικοποίηση των αλλαγών της (Ψωμιάδης κ.α., 2017).

Τα προϊόντα της αποστολής Sentinel-2 αναλύονται σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με την επεξεργασία και τις διορθώσεις που τους εφαρμόζονται (Sentinel-2 User Handbook, 2015). Τα προϊόντα των επιπέδων Level-1C και Level-2A είναι διαθέσιμα στους χρήστες μέσα από την εφαρμογή Copernicus Open Access Hub.

Τα προϊόντα Level-2A είναι ορθοανοιγμένα ενώ έχουν υποστεί και ατμοσφαιρική διόρθωση (Bottom-Of-Atmosphere reflectance). Στα προϊόντα περιλαμβάνεται και χάρτης ταξινόμησης (Scene Classification map για νέφη, σκιές νεφών, βλάστηση, έδαφος/έρημος, νερό, χιόνι) (Sentinel-2 User Handbook, 2015).



Εικόνα 2.7.: Sentinel 2

Πηγές: <https://theclippermag.com/index.php/science/crop-science/the-next-frontier-in-agriculture-science-sentinel-2/attachment/esa-sentinel-2/> (accessed, 22th April 2019)
https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/02/Colour_vision_for_Copernicus
 (accessed, 2 th January 2019)

Τα δεδομένα αυτά προορίζονται για την παρακολούθηση της βλάστησης και του εδάφους όμως, δεν αξιοποιούνται ακόμα ανάλογα της αξίας τους, κυρίως εξαιτίας της τεχνολογικής τους πολυπλοκότητας, αλλά και του μεγάλου όγκου τους (Συμεωνίδης κ.α., 2017).

Τα κανάλια του Sentinel-2 και η χρησιμότητα τους αποτυπώνονται στον Πίνακα 2.1.. Επίσης στην Εικόνα 2.8. αποτυπώνονται τα μήκη κύματος με τις διαφορετικές χωρικές διακριτικές ικανότητες.

Πίνακας 2.1.: Φασματικά κανάλια Sentinel-2, Πηγή: ESA, 2010

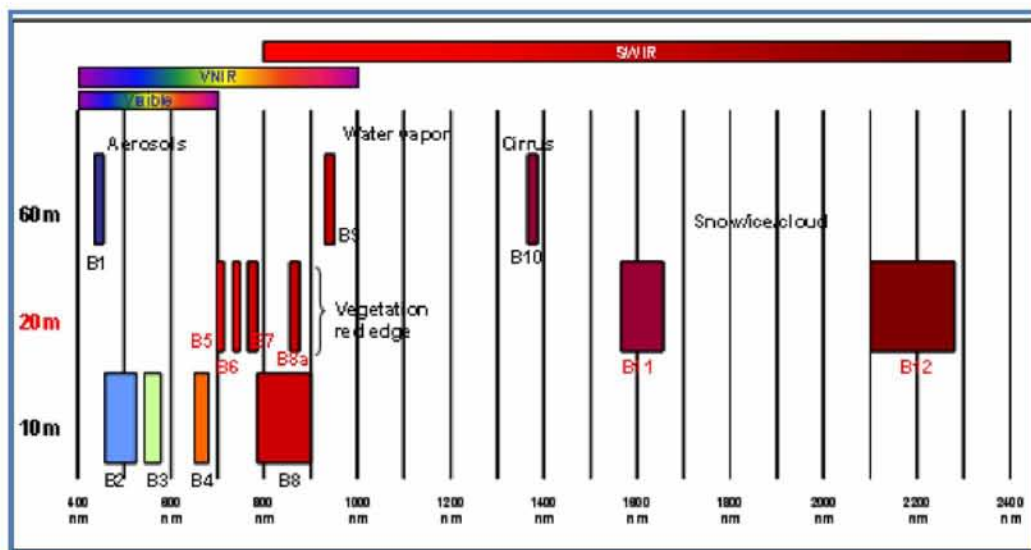
Band	Center λ center (nm)	Spatial resolution [m]	Purpose
1	443	60	Atmospheric correction (aerosol scattering).
2	490	10	Sensitive to vegetation senescing, carotenoid, browning and soil background; atmospheric correction (aerosol scattering).
3	560	10	Green peak, sensitive to total chlorophyll in vegetation.
4	665	10	Max. chlorophyll absorption.
5	705	20	Position of red edge; consolidation of atmospheric corrections/fluorescence baseline.
6	740	20	Position of red edge, atmospheric correction, retrieval of aerosol load.
7	783	20	Leaf Area Index (LAI), edge of the NIR plateau.
8	842	10	LAI
8a	865	20	NIR plateau, sensitive to total chlorophyll, biomass, LAI and protein; water vapour absorption reference; retrieval of aerosol load and type.
9	945	60	Water vapour absorption, atmospheric correction.
10	1375	60	Detection of thin cirrus for atmospheric correction.
11	1610	20	Sensitive to lignin, starch and forest above ground biomass. Snow/ice/cloud separation.
12	2190	20	Assessment of Mediterranean vegetation conditions. Distinction of clay soils for the monitoring of soil erosion. Distinction between live biomass, dead biomass and soil, e.g. for burn scars mapping.

Ο Sentinel-2 φέρει εξοπλισμό ικανό να πραγματοποιεί δειγματοληψίες σε 13 φασματικές ζώνες καταγραφής, χωρικής ανάλυσης 10, 20 και 60 m.:

Οι ζώνες κόκκινου, πράσινου, μπλε και NIR έχουν χωρική ανάλυση 10 μ., 490 nm (B2), 560 nm (B3), 665 nm (B4), 842 nm (B8),

Τέσσερις ζώνες βλάστησης και δύο λωρίδες SWIR έχουν χωρική ανάλυση 20 μ., 705 nm (B5), 740 nm (B6), 783 nm (B7), 865 nm (B8a), 1.610 nm (B11).

Τρεις ζώνες έχουν χωρική ανάλυση 60 m: 443 nm (B1), 945 nm (B9) και 1 375 nm (B10) (Sentinel-2 User Handbook, 2015).



Εικόνα 2.8.: Sentinel-2- Φασματικές ζώνες

(<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial/>)
(accessed 17th December, 2018)

2.3. Τεχνικές Χαρτογράφησης της βλάστησης των δασικών οικοσυστημάτων

2.3.1. Χρήση αεροφωτογραφιών

Η φωτοερμηνεία σε συνδυασμό με τη φωτογραμμετρία, μπορούν να ερμηνεύσουν, να χαρακτηρίσουν και να ταξινομήσουν την επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση αεροφωτογραφιών (Τομπουλίδου, 2011). Οι αεροφωτογραφίες ήταν και συνεχίζουν να είναι τα πιο διαδεδομένα σε χρήση τηλεπισκοπικά δεδομένα στη διαχείριση των φυσικών πόρων, στην απογραφή και στην παρακολούθησή τους. (Gillis & Leckie, 1993, Hall & Fent, 1996, Caylor, 2000).

2.3.2. Χρήση δορυφορικών δεδομένων

Η εξέλιξη της επιστήμης της δορυφορικής τηλεπισκόπησης εισήγαγε δεδομένα που προσφέρουν πλέον μεγάλη χωρική και φασματική ανάλυση σε σχέση με τις αεροφωτογραφίες (Τομπουλίδου, 2011). Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης των δορυφορικών εικόνων είναι η συνοπτική κάλυψη γης, το χαμηλό κόστος, η διαχρονική ανάλυση και η δυνατότητα συνδυασμού με άλλα δεδομένα (Gibson, 2013).

Η αποτύπωση των δασικών οικοσυστημάτων θεωρείται μια μέθοδος παρακολούθησης και αξιολόγησης μιας υφιστάμενης κατάστασης. Μια δασική απογραφή περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τους υπάρχοντες δασικούς πόρους και τα χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος (Corona, 2010). Η χαρτογράφηση μιας δασώδης επιφάνειας εμπεριέχει πληροφορίες σχετικά με τα όρια της, τα δασοπονικά είδη την πυκνότητα κάλυψης της και διάφορα ακόμα χαρακτηριστικά (Lund & Thomas, 1989).

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει προταθεί μία πληθώρα μεθοδολογιών χαρτογράφησης δασικών περιοχών, τόσο με χρήση πολυφασματικών (Somers και Asner 2014, Immitzer et al., 2016, Gudex-Cross et al., 2017), όσο και με χρήση υπερφασματικών δεδομένων (Dalponte et al., 2013, Fassnacht et al., 2014, Ghosh et al., 2014, Tagliabue et al., 2016).

Η μεγαλύτερη και πιο σημαντική χρησιμότητα των δορυφορικών δεδομένων είναι η διάκριση και χαρτογράφηση των δασικών εκτάσεων, όπως και ο ακριβής υπολογισμός της έκτασης που καταλαμβάνουν (Williams & Nelson 1986, Wolter et al., 1995). Χαρακτηριστικό παράδειγμα των Tompoulidou *et al.*, (2016) που χρησιμοποίησαν δεδομένα Landsat και υπολόγισαν με μεγάλη ακρίβεια τα δάση των πλατυφύλλων και κωνοφόρων δέντρων για όλη την Ελλάδα με ακρίβεια της τάξεως του 92%, όταν την ίδια στιγμή η Δασική Υπηρεσία βασίζεται σε δεδομένα διαχειριστικών μελετών και δασικής απογραφής του έτους 1985.

Οι Nelson et al., (1984) χρησιμοποιώντας δεδομένα του M.S.S. υπολόγισαν τα δάση πλατυφύλλων και κωνοφόρων των Η.Π.Α. Η στατιστική ανάλυση απέδειξε ότι το 74% των κωνοφόρων και το 80% των πλατυφύλλων είχαν ταξινομηθεί σωστά και ότι η ακρίβεια ταξινόμησης ήταν 85% ποσοστό αποδεκτό για τις δασικές απογραφές.

Ο Καρτέρης (1991) χρησιμοποίησε δορυφορικά δεδομένα SPOT για την ταξινόμηση των Μεσογειακών δασικών εκτάσεων με συνολική ακρίβεια της τάξης του 82%. Οι Καρτέρης και Μελιάδης (1992) αναφέρουν ότι ο συνδυασμός των καναλιών 3-4-5 του TM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση των ειδών, όπως μακί, πλατυφύλλων, αστικών περιοχών και ελαιώνων με συνολική ακρίβεια χρήστη 96,29%.

Η διάκριση των δασοπονικών ειδών όμως, παρουσιάζει αρκετά προβλήματα και τις περισσότερες φορές είναι πολύ δύσκολη η αναγνώριση των ειδών (Hopkins et al., 1988, Martin et al., 1998). Στην παγκόσμια βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες για την αναγνώριση των ειδών με αμφίλεγεμένα αποτελέσματα (Τομπουλίδου, 2011).

2.4. Fractional Vegetation Cover (FVC)

Οι πρώτες έρευνες στην παρακολούθηση της χερσαίας βλάστησης (Asrar et al., 1985, Choudhury, 1987, Tucker, 1979), διαπίστωσαν ότι απλοί μετασχηματισμοί πολυφασματικών μετρήσεων κοντά σε υπέρυθρα μήκη κύματος, έδωσαν ένα σήμα που ανταποκρινόταν στη σχετική ποσότητα της πράσινης βιομάζας και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της δυναμικής της βλάστησης (Behrenfeld et al., 2001). Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη φύλλων (Cab), ο δείκτης περιοχής φυλλώματος (LAI), η κλασματική κάλυψη βλάστησης (FVC) και το κλάσμα απορροφούμενης φωτοσυνθετικά ακτινοβολίας (FAPAR) συγκαταλέγονται μεταξύ των σημαντικότερων βιοφυσικών παραμέτρων που μπορούν να ανακτηθούν από δεδομένα τηλεπισκόπησης (Lichtenthaler, 1987).

Η Fractional Vegetation Cover FVC, αποτελεί βασική παράμετρο για προσομοιώσεις διεργασιών της γήινης επιφάνειας, για μελέτες παγκόσμιων περιβαλλοντικών αλλαγών (Yang et al., 2017), καθώς και για τον χαρακτηρισμό των συνθηκών βλάστησης της επιφάνειας της γης (Wang et al., 2018).

Αποτελεί ουσιαστική βιοφυσική μεταβλητή εισόδου για πολλά περιβαλλοντικά και οικολογικά μοντέλα (Liu et al., 2018), παίζει κρίσιμο ρόλο σε μελέτες του κύκλου του άνθρακα (Xiao et al., 2016) και για την προσομοίωση των κύκλων του νερού, (Jia et al., 2017). Το FVC αποτελεί σημαντική μικροκλιματική παράμετρο για τον χαρακτηρισμό της πυκνότητας της βλάστησης, καθώς και αποτελεσματικό δείκτη για την αξιολόγηση της απερίμωσης και της κατάστασης της ανάπτυξης των καλλιεργειών (Zhang et al., 2013).

Το FVC χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό της βλάστησης και του εδάφους σε διαδικασίες ενεργειακού ισοζυγίου, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής. Υπολογίζεται από τον δείκτη της περιοχής των φύλλων και από άλλες δομικές μεταβλητές και δεν εξαρτάται από μεταβλητές όπως η γεωμετρία του φωτισμού σε σύγκριση με το FAPAR (Weiss and Baret, 2016).

Η FVC αντιστοιχεί στο κλάσμα του εδάφους που καλύπτεται από την πράσινη βλάστηση. Πρακτικά ποσοτικοποιεί την κάλυψη της βλάστησης. Το FVC είναι ένας

πολύ καλός δείκτης για την αντικατάσταση των κλασσικών δεικτών βλάστησης για την παρακολούθηση των οικοσυστημάτων, επειδή είναι ανεξάρτητος από την κατεύθυνση φωτισμού και είναι ευαίσθητος στη βλάστηση.

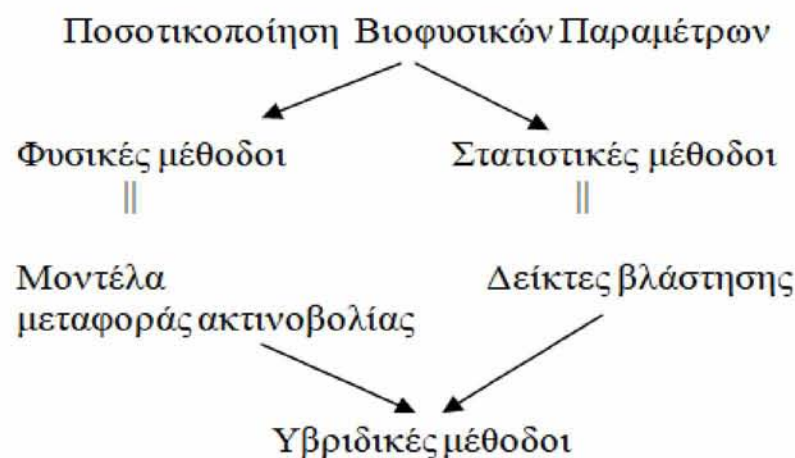
Το FVC είναι μια πολύ κατανοητή μεταβλητή αφού μπορεί να ερμηνευτεί άμεσα. Η χρονική εξέλιξη του μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για περιβαλλοντικές εφαρμογές. Αποτελεί ένα καλό δείκτη της έναρξης της καλλιεργητικής περιόδου και οι χρονοσειρές του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση της φυτικής κατάστασης μεταξύ των ετών για εφαρμογές στη δασοκομία.

Η FVC είναι μια πολύ σημαντική οικολογική και περιβαλλοντική παράμετρος, που προκύπτει είτε από επί τόπου μετρήσεις είτε από δεδομένα τηλεπισκόπησης (Bingfang et al., 2004).

2.5. Μέθοδοι υπολογισμού βιοφυσικών παραμέτρων

Η ποσοτικοποίηση των βιοφυσικών παραμέτρων από την τηλεπισκόπηση βασίζεται σε ένα στατιστικό ή φυσικό μοντέλο, που επιτρέπει την ερμηνεία των φασματικών παρατηρήσεων και τη μετάφρασή τους σε μία ή πολλαπλές επιφανειακές μεταβλητές, π.χ. διαγνωστικές ιδιότητες της υγείας της βλάστησης.

Χρησιμοποιώντας τη στατιστική ορολογία, προσομοιάζεται με πρόβλημα παλινδρόμησης (Fernandes and Leblanc, 2005). Κατά την τελευταία δεκαετία και τα δύο πεδία έχουν επεκταθεί πολύ, ιδιαίτερα οι στατιστικές προσεγγίσεις, οπότε προτιμάται ο συνδυασμός τους και η χρήση (Εικόνα 2.9.), των υβριδικών προσεγγίσεων (Rivera, 2014). Για μια πιο συστηματική κατηγοριοποίηση, οι μέθοδοι μπορούν να υποδιαιρεθούν σε 4 κατηγορίες.



Εικόνα 2.9.: Μέθοδοι υπολογισμού βιοφυσικών παραμέτρων
Πηγή: (Clevers, 2017)

2.5.1. Μέθοδοι παραμετρικής παλινδρόμησης (*Parametric regression methods*)

Οι παραμετρικές μέθοδοι υποθέτουν μια σχέση μεταξύ της φασματικής παρατήρησης και της βιοφυσικής παραμέτρου δημιουργώντας ρητές παραμετροποιημένες εκφράσεις, με βάση κάποια στατιστική ή φυσική γνώση μεταξύ της παραμέτρου και της φασματικής απόκρισης.

Τα παραμετρικά μοντέλα κάνουν περισσότερες παραδοχές από τις μη παραμετρικές μεθόδους. Εάν αυτές οι επιπλέον παραδοχές είναι σωστές, οι παραμετρικές μέθοδοι μπορούν να παράγουν πιο ακριβείς εκτιμήσεις. Ωστόσο, εάν οι παραδοχές είναι λανθασμένες, οι παραμετρικές μέθοδοι μπορούν να είναι πολύ παραπλανητικές. Για το λόγο αυτό συχνά δεν θεωρούνται ισχυρές. Οι παραμετρικές εξισώσεις είναι συχνά απλούστερες για να καταγράψουν και να υπολογιστούν ταχύτερα (Rivera, 2014).

Γενικά τα παραμετρικά μοντέλα περιλαμβάνουν δύο βήματα. Αρχικά μαθηματικούς συνδυασμούς των φασματικών καναλιών και στη συνέχεια συσχέτιση με το σύνολο δεδομένων των βιοφυσικών μεταβλητών. Η συσχέτιση γίνεται γραμμικά είτε μη γραμμικά (π.χ. εκθετική, πολυωνυμική).

Πολλοί φασματικοί αλγόριθμοι έχουν προταθεί για ενίσχυση φασματικών χαρακτηριστικών και για τη μείωση των ανεπιθύμητων επιδράσεων που προκαλούνται από μεταβολές στην ανακλαστικότητα του εδάφους, τη γεωμετρία του ήλιου και της προβολής, την ατμοσφαιρική σύνθεση και άλλες ιδιότητες φύλλων ή θόλων.

Αυτοί οι φασματικοί αλγόριθμοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους προσεγγίσεων:

- (1) διακριτές συνθέσεις φασματικής ζώνης και
- (2) συνεχείς συνθέσεις φασματικής ζώνης.

Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στην ευρεία οικογένεια των **δεικτών βλάστησης**. Οι δείκτες βλάστησης είναι μεταξύ των παλαιότερων τεχνικών για την ερμηνεία των φασματικών δεδομένων, αποτελούν τυπικές συνθέσεις δύο, τριών ή τεσσάρων φασματικών ζωνών σύμφωνα με απλές αριθμητικές εκφράσεις. Παρόλη τη χρησιμότητά τους σε πολλές εφαρμογές, κανένας από αυτούς δεν αξιοποιεί πλήρως τις διαθέσιμες φασματικές πληροφορίες (Rivera, 2014).

Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη παραμετρικών τεχνικών που εξειδικεύονται στην εκμετάλλευση του σχεδόν συνεχούς σήματος. Αντί να υπολογίζουν τους τύπους με βάση μερικές διακριτές ζώνες, οι τεχνικές αυτές αποσκοπούν στην απόσπαση πληροφοριών από το σχήμα συγκεκριμένων φασματικών περιοχών και στη συνέχεια στη συσχέτισή τους με μια βιοφυσικό παράμετρο.

Τα χρησιμοποιούμενα των συνεχών φασματικών συνθέσεων περιλαμβάνουν (Rivera, 2014):

- 1) red-edge position calculations , υπολογισμοί θέσης κόκκινης ακμής,
- (2) derivative-based indices, δείκτες βάσει παραγώγων,
- (3) integral-based indices αναπόσπαστα βασισμένοι δείκτες,
- (4) continuum removal, αφαίρεση συνεχούς.

2.5.1.1. Δείκτες Βλάστησης

Οι επιστήμονες ήδη από τη δεκαετία του 60 χρησιμοποιούν δεδομένα τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση των βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης (Τσακαλίδης, 2007). Σε αυτή την προσπάθεια συνέβαλλαν σε μεγάλο βαθμό οι “*δείκτες βλάστησης*” (Vegetation Indices - VIs) οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση των μεταβολών της φυσιολογικής κατάστασης και των βιοφυσικών ιδιοτήτων της βλάστησης, στην εκτίμηση παραμέτρων όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (Leaf area index, LAI), η κλασματική κάλυψη βλάστησης (FVC), η ποσότητα χλωροφύλλης, η ποσότητα πράσινης βιομάζας και η APAR (Absorbed photosynthetically active radiation) (Jensen, 2007).

Ο ρόλος των δεικτών βλάστησης είναι να μειώσουν τις πολυφασματικές παρατηρήσεις της εικόνας σε έναν αριθμητικό δείκτη, ο οποίος έχει βρεθεί ότι έχει καλή συσχέτιση με εσωτερικούς παράγοντες του οικοσυστήματος όπως η σπαργή των φύλλων, η κάλυψη της βλάστησης, η βιομάζα, ενώ παράλληλα να ελαχιστοποιεί τους εξωτερικούς παράγοντες που μπορεί να δημιουργούν «θόρυβο» στα δεδομένα όπως η γωνία κλίσης, ο προσανατολισμός του ήλιου, και τα σύννεφα (Baret και Guyot, 1991).

Οι δείκτες είναι μαθηματικές εκφράσεις αλγεβρικών συνδυασμών των φασματικών διαύλων της εικόνας (Γρηγοριάδης, 2017).

Οι περισσότεροι δείκτες βλάστησης στηρίζονται στην ιδιαιτερότητα της βλάστησης, προσπαθώντας με μικρές παραλλαγές να μας δώσουν πληροφορίες σχετικά με τα διάφορα βιοφυσικά χαρακτηριστικά της μεγιστοποιώντας την ακρίβεια (Τσακαλίδης, 2007). Ο Sellers, (1985) απέδειξε ότι η σχέση μεταξύ των δεικτών και των βιοφυσικών ποσοτήτων μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον τύπο βλάστησης, την εποχή, το μητρικό υλικό και την ποσότητα του νεκρού υλικού που βρίσκεται στις φυλλωσιές των φυτών. Οι δείκτες βλάστησης χρησιμοποιούνται ευρέως ως δείκτες ανάλυσης των διακυμάνσεων της φυτοκάλυψης μιας περιοχής, μεταξύ της βλάστησης και άλλων παραγόντων (Ahl et al., 2004, Geerken et al., 2005, Morawitz et al., 2006).

Οι δείκτες βλάστησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν ή να ανιχνεύσουν χαρακτηριστικά της βλάστησης (Gibson & Power 2000):

- Ανάλυση χωρικής κατανομής της βλάστησης
- Το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index – LAI)
- Την κλασματική κάλυψη της υγιούς βλάστησης (Fractional Vegetation Cover)

Περισσότεροι από 150 δείκτες βλάστησης έχουν δημοσιευτεί στην επιστημονική βιβλιογραφία αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό έχει σημαντική βιοφυσική βάση ή έχει μελετηθεί συστηματικά (Γεωργοπούλου, 2013).

2.5.1.2. Normalized Difference Vegetation Index NDVI

Ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης Normalized Difference Vegetation Index NDVI αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο δείκτη βλάστησης. Πλήθος μελετών αναφέρονται σε αυτόν και αποδεικνύουν τη χρησιμότητά του για την εκτίμηση φυσιολογικών και βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης (Tucker et al., 1985, 1986, Tucker και Sellers, 1986, Running, 1990, Justice et al., 1998,).

Ο NDVI αποτελεί απαραίτητη παράμετρο για την παρακολούθηση της βλάστησης σε περιοχές τοπικής αλλά και ευρείας κλίμακας και έχει αποδειχθεί πως είναι ένας σημαντικός και αποτελεσματικός δείκτης όσον αφορά το χαρακτηρισμό των ποικίλων ειδών της κάλυψης, της παραγωγικότητας, της βιομάζας και της οικοπεριβαλλοντικής ποιότητας. Συνήθως χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση της φυτοκάλυψης (Carlson and Ripley 1997, Myneni et al., 1997), στην οικολογική παρακολούθηση, την εκτίμηση της βιομάζας (Wessels et al., 2006), και στην παρακολούθηση της παραγωγικότητας (Chen et al., 2004). Ο δείκτης NDVI, χρησιμοποιείται στη χαρτογράφηση δασικών οικοσυστημάτων, λόγω της ικανότητάς του να διαχωρίζει την βλάστηση από τις υπόλοιπες κλάσεις (Jia et al., 2014, Mancino et al., 2014, Lin και Liu, 2016). Θεωρείται βασικό εργαλείο παρακολούθησης των εποχιακών αλλά και των διαχρονικών αλλαγών της βλάστησης (Holben, 1986).

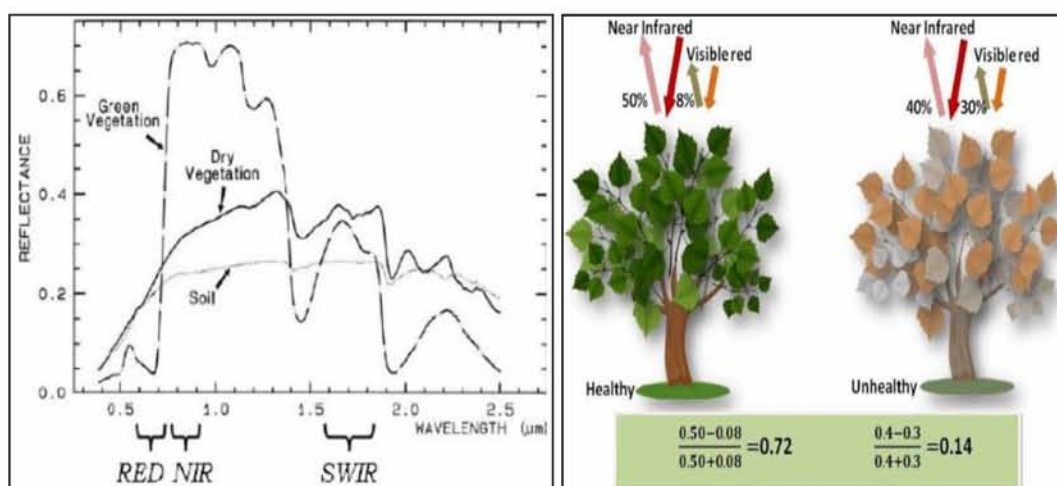
Ο δείκτης NDVI έχει αποδειχθεί ότι συνδέεται σημαντικά με τις βιοφυσικές ιδιότητες της βλάστησης στο πεδίο (Hope et al. 1993, McMichael, 1999) και γενικότερα είναι λιγότερο ευαίσθητος στις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και του μητρικού υλικού σε σχέση με ένα απλό δείκτη (Myneni and Asrar, 1994). Ο NDVI

προτιμάται για την παρακολούθηση της βλάστησης διότι αντισταθμίζει μερικώς τις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, την κλίση του εδάφους και τον προσανατολισμό θέσης (Peters et al., 1992), ενώ λειτουργεί κατά των επιδράσεων της διακύμανσης της διάχυσης του φωτισμού που προκαλείται από την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (Holben et al., 1986).

Η σπουδαιότητα του NDVI ανάγεται στο γεγονός ότι είναι ενδεικτικός του βαθμού της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας της υπό παρακολούθηση βλάστησης (Tieszen et al, 1997). Έχει βρεθεί ότι υπάρχει ισχυρή σχέση μεταξύ του δείκτη NDVI και της ποσότητας της ζωντανής βλάστησης ανεξάρτητα από τα είδη βλάστησης που επικρατούν σε κάθε περίπτωση (Gamon et al., 1995).

Ο NDVI, βασίζεται στην αντίθεση λόγω χρωστικών ουσιών της βλάστησης μεταξύ της μέγιστης απορρόφησης της χλωροφύλλης στο κόκκινο και της μέγιστης ανακλαστικότητας στο υπέρυθρο που προκαλείται από την κυτταρική δομή των φύλλων (Rouse, 1974). Όσο περισσότερη χλωροφύλλη υπάρχει στην επιφάνεια παρατήρησης, τόσο αυξάνεται η τιμή του δείκτη (Εικόνα 2.10).

Παρόλα αυτά αναφέρεται από την Gitelson (2004) ότι ο NDVI παρουσίασε ευαισθησία σε αλλαγές της συγκόμωσης και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας μόνο στην αρχή της βλαστικής περιόδου όταν η συγκόμωση κυμαίνονταν από 0 έως 40-50% και ο LAI από 0-1.2, ενώ όταν η συγκόμωση πλησίασε το 60% ο δείκτης παρουσίασε μειωμένη ευαισθησία.



Εικόνα 2.10.: Normalized Difference Vegetation Index, NDVI
 Πηγές: Copernicus Tutorial: Working with Sentinel-2 products,
 NASA ELO Remote Sensing Tutorial, 2017

Ο δείκτης *NDVI* χρησιμοποιεί τα φασματικά κανάλια (κόκκινο - *R*) και (εγγύς υπέρυθρο - *NIR*) και εκφράζεται μέσω της μαθηματικής εξίσωσης:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (2.5.1.2)$$

Οι τιμές του κυμαίνονται από -1 μέχρι 1, με τις υψηλότερες τιμές να δηλώνουν έντονη παρουσία βλάστησης και τιμές κάτω από 0 να δηλώνουν απουσία βλάστησης, νερό και μη διαπερατές επιφάνειες. Επιπλέον, η κλίμακα μέτρησης έχει την επιθυμητή ιδιότητα από το -1 έως το 1, με το 0 να αντιπροσωπεύει την κατά προσέγγιση τιμή μη βλάστηση (Silleos et.al, 2006). Μια ορισμένη αναλογία των τιμών τους, αρνητική ή θετική, αντιπροσωπεύει τη φωτεινότητα του εδάφους στο υπόβαθρο, η επίδραση του οποίου είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας στις ποσοτικές αξιολογήσεις της πράσινης βιομάζας (Silleos et.al, 2006). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη *NDVI* τόσο μεγαλύτερη είναι και η φυτοκάλυψη (Hsieh, 1995, Green et al., 1998, Lin et al., 2006).

2.5.1.3. Υπολογισμός *FVC* κατά Gutman and Ignatov, 1998

Το 1998, οι Gutman and Ignatov ανέπτυξαν ένα μοντέλο διχοτόμησης υποεικονοστοιχείων. Αυτό το μοντέλο υπέθετε ότι η απόκριση της τηλεπισκόπησης σε ένα εικονοστοιχείο αποτελείται από έδαφος και βλάστηση, στο οποίο συλλαμβάνονται οι πληροφορίες (*S*) από τον αισθητήρα τηλεχειρισμού και εκφράζονταν ως *Sveg*, για τις φασματικές πληροφορίες που συλλέγονταν από τα εικονοστοιχεία της πράσινης βλάστησης, και ως *Ssoil*, για τις φασματικές πληροφορίες που συλλέγονταν από εικονοστοιχεία γυμνού εδάφους. Το *S* αποτελούνταν από *Sveg* και *Ssoil* σε μια γραμμική σχέση, και τα βάρη αυτών των παραμέτρων ήταν οι αναλογίες των αντίστοιχων περιοχών τους σε εικονοστοιχεία. Όσον αφορά το *fc* αντιπροσώπευε το *FVC*, με την ακόλουθη εξίσωση :

$$f_c = \frac{(S - S_{soil})}{(S_{veg} - S_{soil})} \quad (2.5.1.3 \alpha)$$

Το *NDVI*, ως ο καλύτερος δείκτης της ανάπτυξης των φυτών και της χωρικής κατανομής της πυκνότητας της βλάστησης, εφαρμόστηκε για την εκτίμηση *FVC* μέσω της γραμμικής συσχέτισης:

$$f_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2.5.1.3 \beta)$$

όπου **NDVIveg** και **NDVIsoil** είναι οι τιμές NDVI εικονοστοιχείων βλάστησης και γυμνού εδάφους, αντίστοιχα.

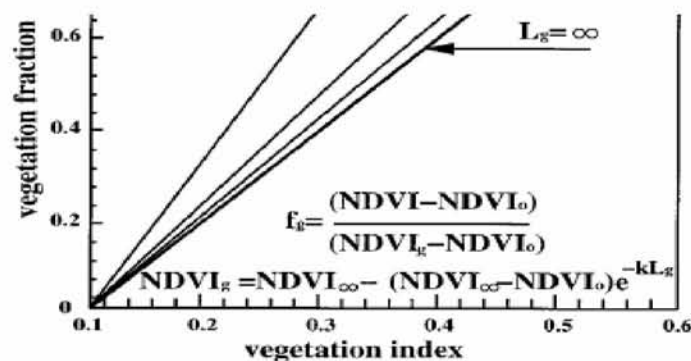
Ένα εικονοστοιχείο αποτελείται από δύο συστατικά: το έδαφος και τη βλάστηση, οπότε, στο μοντέλο των Gutman and Ignatov, (1998) το NDVI ενός εικονοστοιχείου ήταν το σταθμισμένο άθροισμα της βλάστησης NDVI (**NDVIveg**) και της μη βλάστησης NDVI (**NDVIsoil**).

Το μοντέλο εκφράζει τη σύνδεση της κλασματικής κάλυψης βλάστησης και του NDVI. Οι παράμετροι **NDVIveg** και **NDVIsoil** έχουν εξετάσει τις επιδράσεις του εδάφους και της βλάστησης. Θεωρητικά, το **NDVIsoil** θα πρέπει να είναι μηδέν για τους περισσότερους τύπους εδάφους, αλλά αλλάζει από -0,1 σε 0,2, λόγω των επιδράσεων πολλών παραγόντων. Το **NDVIveg** θα πρέπει να είναι το μέγιστο του NDVI, αλλά θα αλλάξει με τη χωρική ή χρονική αλλαγή, λόγω των επιδράσεων του τύπου της βλάστησης (Bingfang et.al., 2004). Έτσι, τα **NDVIveg** και **NDVIsoil** δεν μπορούν να είναι σταθερά ακόμη και στην ίδια εικόνα. Οι τύποι βλάστησης αλλάζουν με τον τύπο χρήσης της γης.

Το f_c θα είναι μέγιστο όταν το NDVI είναι μέγιστο, και το f_c θα είναι ελάχιστο όταν το NDVI είναι επίσης ελάχιστο. Τότε, η αναζήτηση των τιμών **NDVIsoil** και **NDVIveg** μετατρέπεται αυτόματα στην αναζήτηση των τιμών των **NDVImin** και **NDVImax** αντίστοιχα. Οπότε, το **NDVIsoil** ισούται με το **NDVImin** και το **NDVIveg** ισούται με **NDVImax**, **NDVIsoil** = **NDVImin** & **NDVIveg** = **NDVImax** και η εξίσωση (2.5.1.3 β), διαμορφώνεται στην (2.5.1.3 γ) μαθηματική έκφραση.

$$FVC = NDVI^* \quad \text{where:} \quad NDVI^* = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2.5.1.3 \gamma)$$

Gutman and Ignatov, (1998).



Διάγραμμα 2.1.: Κλασματική κάλυψη βλάστησης ως συνάρτηση του NDVI
Πηγή: Gutman and Ignatov, (1998).

Η εγκυρότητα της γραμμικής σχέσης σύμφωνα με τους Gutman and Ignatov, (1998), έχει επιβεβαιωθεί από τους Ormsby et al. (1987), Carlson et al. (1990), Phulpin et al. (1990), Myneni et al. (1992), Kustas et al. (1993), Wittich and Hansing (1995). Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες, η μη γραμμικότητα της σχέσης fg (NDVI) ήταν πέρα από την ανιχνευσιμότητα σε ένα ευρύ φάσμα πυκνοτήτων βλάστησης. Οι Wittich and Hansing (1995), όπως αναφέρεται στους Gutman and Ignatov, (1998), εκτίμησαν ότι το υπολειπόμενο σφάλμα της γραμμικής παλινδρόμησης δεν υπερέβαινε το $s = 0,1$, το οποίο αντιπροσώπευε τη χειρότερη περίπτωση σφάλματος σε fg , που σχετίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (2.5.1.3 γ).

Αυτό το συμπέρασμα ήταν σύμφωνο και με το Διάγραμμα 2.1. που έδειχνε ότι το σφάλμα σε fg που προέκυπτε από την υπόθεση της «πυκνής βλάστησης» ήταν αμελητέο όταν $fg = 0$ και σταδιακά αυξάνονταν με το fg . Ωστόσο, ακόμη και για $fg = 1$, το σφάλμα ήταν $s < 0,1$. Τα μεγαλύτερα σφάλματα προέκυψαν στην αρχή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Αντίθετα, τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για το fg αναμένονταν στην κορυφή της καλλιεργητικής περιόδου, όταν το Lg ήταν στο μέγιστο και πριν από την εποχή της καλλιέργειας, όταν το NDVI ήταν μικρό (Gutman and Ignatov, 1998).

Είναι γνωστό ότι υπήρχε αντίκτυπο της εδαφικής ανακλαστικότητας στη σχέση μεταξύ fg και NDVI, μέσω της μεταβλητής **NDVI₀** (Διάγραμμα 2.1.) [Jasinski, (1990), Myneni et al., (1992), Huete et al., (1994)]. Η **NDVI₂** αναμενόταν να εξαρτηθεί από τον τύπο, τη γεωμετρική δομή, την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και τη φυσιολογία (μεσόφυλλο) της βλάστησης [Curran, (1983), Carlson et al., (1990)]. Η παράγωγος fg οφειλόταν στην ατέλεια των δεδομένων NDVI: σφάλματα από την υπολειμματική μόλυνση από νέφος και την ατμοσφαιρική /γωνιακή /σκίαση. Αυτές οι επιδράσεις, σε συνδυασμό με τον εποχικό κύκλο και την παγκόσμια μεταβλητότητα των συνθηκών φωτισμού, εισήγαγαν συστηματικές μεροληψίες δεδομένου ότι οι **NDVI₂** και **NDVI₀** ήταν σταθερές (Gutman and Ignatov, 1998).

Όλα τα παραπάνω υπαγόρευαν την αναγκαιότητα βελτίωσης των δεδομένων NDVI για να ελαχιστοποιηθούν οι παραπάνω αποκλίσεις που μεταδίδονται απευθείας στο σύνολο δεδομένων fg . Το δορυφορικό προϊόν fg θεωρήθηκε ρεαλιστική περιγραφή της εποχικής παγκόσμιας κατανομής της βλάστησης και αποτέλεσε διαφορετικό τρόπο ερμηνείας τα ίδιων δεδομένων του δορυφορικού αισθητήρα (Gutman and Ignatov, 1998).

2.5.1.4. Υπολογισμός FVC κατά Carlson and Ripley, 1997

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα στην κλιμάκωση του NDVI παρατηρήθηκε από τους Carlson and Ripley, 1997. Η κλίμακα NDVI ορίστηκε ως :

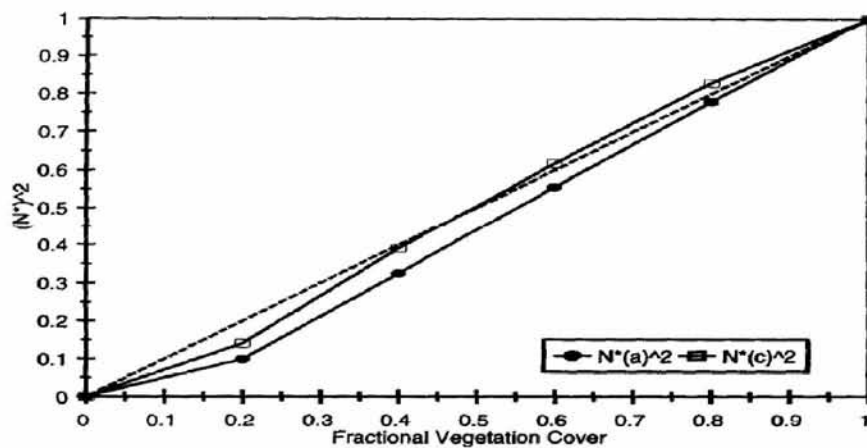
$$N^* = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0} \quad (2.5.1.4. \alpha)$$

όπου το $NDVI_0$ και το $NDVI_s$ αντιστοιχούν στις τιμές του NDVI για γυμνό έδαφος και σε επιφάνεια με πραγματική κάλυψη βλάστησης 100% αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας εξ 'ολοκλήρου διαφορετικές προσεγγίσεις και πηγή δεδομένων, ελήφθη ανεξάρτητα μία πανομοιότυπη σχέση (Διάγραμμα 2.2.) τετραγωνικής ρίζας μεταξύ N^* και Fg η οποία δηλώθηκε ως:

$$FVC = (NDVI^*)^2 \quad (2.5.1.4. \beta)$$

Carlson and Ripley, (1997)



Διάγραμμα 2.2.: Κλασματική κάλυψη βλάστησης ως συνάρτηση του τετραγώνου NDVI
Πηγή: Carlson and Ripley, (1997)

2.5.2. Μέθοδοι μη παραμετρικής παλινδρόμησης (Nonparametric regression methods)

Σε αντίθεση με τις μεθόδους παραμετρικής παλινδρόμησης, οι μη παραμετρικές μέθοδοι παλινδρόμησης ενισχύουν τη σχέση μεταξύ της εισόδου (φασματικής πληροφορίας) και της παραγωγής (βιοφυσικών μεταβλητών) με την τοποθέτηση ενός ευέλικτου μοντέλου απευθείας από τα παρατηρούμενα δεδομένα (Rivera, 2014).

Οι μη παραμετρικές μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε γραμμικές ή μη γραμμικές μεθόδους, ανάλογα με τη φύση του μετασχηματισμού.

➤ Linear nonparametric models

- *Principal component regression (PCR)*
- *Partial least squares regression (PLSR)*
- *Ridge regression (RR)*

Τα *μη παραμετρικά μοντέλα παλινδρόμησης* έχουν τη δυνατότητα να παράγουν προσαρμοστικές, ισχυρές σχέσεις που μόλις εκπαιδευθούν, είναι γρήγορες στην εφαρμογή. Τυπικά, είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την ισχυρή μη γραμμικότητα της λειτουργικής εξάρτησης μεταξύ της βιοφυσικής μεταβλητής και της παρατηρούμενης ανακλώμενης ακτινοβολίας (Rivera, 2014). Συνεπώς, είναι ισχυροί υποψήφιοι για επιχειρησιακές εφαρμογές. Υπάρχει μια αυξανόμενη ταξινόμηση των μη παραμετρικών προσεγγίσεων παλινδρόμησης.

➤ *Nonlinear non-parametric models*

- *Neural networks (NN)*
- *Decision tree learning*
- *Kernel methods*
 - Support vector machines (SVMs)
 - Kernel ridge regression (KRR)
 - Relevance vector machines (RVM)
 - Gaussian processes regression is based on Gaussian processes (GPs)

2.5.2.1. Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network)

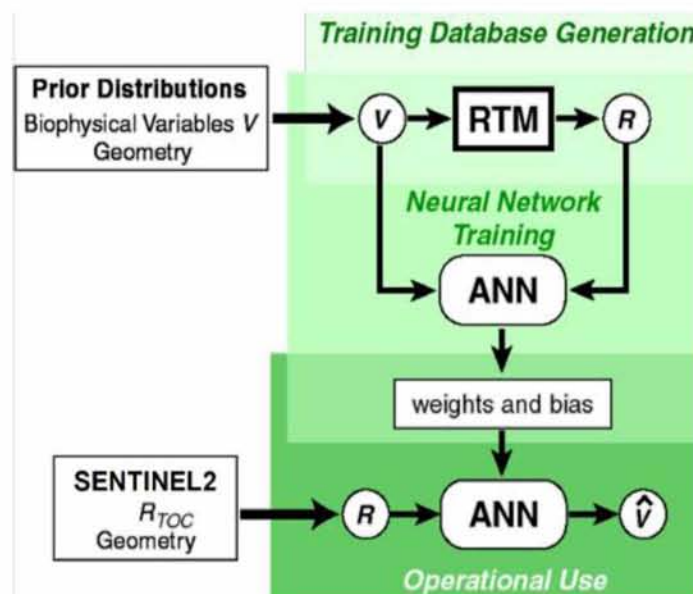
Τα νευρωνικά δίκτυα (NN) είναι μια συνδεδεμένη δομή νευρώνων οργανωμένη σε στρώματα, ένας νευρώνας είναι απλώς μια γραμμική παλινδρόμηση που ακολουθείται από μια μη γραμμική συνάρτηση. Οι νευρώνες διαφορετικών στρωμάτων διασυνδέονται με τους αντίστοιχους συνδέσμους (βάρη). Επομένως, στην περίπτωση χρήσης NN με μόνο έναν νευρώνα, τα αποτελέσματα θα ήταν παρόμοια (ή ελαφρώς καλύτερα) από αυτά που ελήφθησαν με γραμμική παλινδρόμηση (Rivera, 2014).

Συνίσταται στον καθορισμό της βέλτιστης δομής (τυπικά του αριθμού των επιπέδων και του αριθμού των νευρώνων ανά στρώματα) καθώς και των πιθανών μετασχηματισμών των εισόδων και εξόδων όπως η κανονικοποίηση. Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν για κάθε θεωρούμενο εικονοστοιχείο, ορίστηκαν κυρίως από τον τύπο των νευρώνων που χρησιμοποιήθηκαν, τον τρόπο με τον οποίο είναι οργανωμένοι και συνδεδεμένοι (η αρχιτεκτονική δικτύου) και τον κανόνα μάθησης (Weiss and Baret, 2016).

Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων συνδέονται με ένα «συνολικό» βάρος. Κάθε νευρώνας μετατρέπει το άθροισμα του σταθμισμένου σήματος από τους προηγούμενους νευρώνες σύμφωνα με μια δεδομένη συνάρτηση μεταφοράς (Weiss and Baret, 2016). Ο συνδυασμός των sigmoid και γραμμικών λειτουργιών αναγνωρίζεται ως ικανός να προσαρμόζει οποιοδήποτε τύπο συνάρτησης (Demuth and Beale 1998). Η επιλογή της "βέλτιστης" αρχιτεκτονικής δικτύου στηρίζεται στη RMSE (Root Mean Square Error) μεταξύ των εξόδων και των "πραγματικών" βιοφυσικών μεταβλητών καθώς και στον αριθμό των συντελεστών που πρέπει να προσαρμοστούν (Weiss and Baret, 2016).

Τυπικά ορίζεται από τρεις τύπους (Εικόνα 2.11.) παραμέτρων:

- (1) Το μοτίβο διασύνδεσης μεταξύ διαφορετικών στρώματα νευρώνων.
- (2) Τη διαδικασία μάθησης για την ενημέρωση των βαρών των διασυνδέσεων και
- (3) Τη συνάρτηση ενεργοποίησης που μετατρέπει την σταθμισμένη είσοδο ενός νευρώνα στην ενεργοποίησή της εξόδου (Haykin, 1999).



Εικόνα 2.11.: Σχηματικό διάγραμμα αλγόριθμου νευρωνικού δικτύου (Neural Network)
(Πηγή: Copernicus Tutorial: Working with Sentinel-2 products)

2.5.2.2. Υπολογισμός FVC (Neural Network) με πολυφασματικά δεδομένα Sentinel 2

Το ATBD (Algorithm Theoretical Based Document) περιγράφει τον προτεινόμενο αλγόριθμο για προϊόντα επιπέδου Sentinel 2. Τα προϊόντα level 2 προέρχονται από δεδομένα Sentinel 2 και αντιστοιχούν στο σύνολο βιοφυσικών μεταβλητών: LAI,

FAPAR (κλάσμα απορροφημένης φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας) και FVC, βασικές κλιματικές μεταβλητές (ECVs) (Essential Climate Variable) αναγνωρισμένες από διεθνείς οργανισμούς όπως το GCOS (Global Climate Observation System) και το GTOS (Global Terrestrial Observation System) (Weiss and Baret, 2016).

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βασίζεται σε συγκεκριμένα μοντέλα μεταφοράς ακτινοβολίας, και σε μεθόδους που έχουν ήδη αποδειχθεί αποτελεσματικές. Έχουν εφαρμοστεί για τη δημιουργία βιοφυσικών προϊόντων από τους αισθητήρες VEGETATION, MERIS, SPOT και LANDSAT (Weiss and Baret, 2016).

Συνίσταται κυρίως στη δημιουργία μιας περιεκτικής βάσης δεδομένων των χαρακτηριστικών της βλάστησης και των σχετικών ανακλάσεων Sentinel 2 (TOC Top of Canopy). Στη συνέχεια, τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της κομοσκεπής από τις ανακλάσεις TOC μαζί με τις αντίστοιχες γωνίες που καθορίζουν τη διαμόρφωση παρατήρησης (Weiss and Baret, 2016).

2.5.3. Μέθοδοι Φυσικής Ανάκτησης (Physically-based retrieval methods)

Οι φυσικοί αλγόριθμοι βασίζονται σε φυσικούς νόμους που διέπουν τις διαδικασίες απορρόφησης και σκέδασης. Η αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με την κομοσκεπή περιγράφεται από εξισώσεις μεταφοράς ακτινοβολίας (Myneni and Ross, 1991), η οποία υλοποιείται μαθηματικά σε μοντέλα μεταφοράς ραδιοσυχνοτήτων (RTMs) μεταξύ φύλλων και canopy (Rivera, 2014).

2.5.4. Υβριδικές Μέθοδοι (Hybrid methods)

Η υβριδική μέθοδος συνδυάζει στοιχεία στατιστικής (τυπικά μη παραμετρικά) με φυσικές μεθόδους. Προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τη γενικότητα των φυσικών μεθόδων, με την ευελιξία και την υπολογιστική αποτελεσματικότητα των μεθόδων της μη παραμετρικής μη γραμμικής παλινδρόμησης. Η ιδέα βασίζεται στην αντίστροφη χαρτογράφηση με ένα μη παραμετρικό μοντέλο που εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας προσομοιωμένα δεδομένα που παράγονται από μοντέλα μεταφοράς ακτινοβολίας (Rivera, 2014).

2.6. Fractional Vegetation Cover FVC - Μελέτες και Αποτελέσματα

Παρατίθενται, μελέτες και αποτελέσματα ερευνητών, με περιληπτική παρουσίαση της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε για τη συγγραφή της παρούσας μελέτης με στόχο την ανάδειξη της σημασίας της.

Ο δείκτης βλάστησης VI based mixture model χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό της κάλυψης της βλάστησης (FVC) από τηλεπισκοπικά δεδομένα. Δύο κομβικοί παράμετροι του μοντέλου είναι οι τιμές του δείκτη βλάστησης των εικονοστοιχείων με πλήρη κάλυψη βλάστησης και των εικονοστοιχείων του γυμνού εδάφους (που υποδηλώνονται ως V_x και V_n αντίστοιχα). Η αβεβαιότητα και η δυσκολία του ακριβούς προσδιορισμού των V_x και V_n περιορίζουν την ακρίβεια των εκτιμήσεων FVC που προκύπτουν και μειώνουν τη χρησιμότητα του VI μοντέλου. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη μέθοδος που ονομάζεται MultiVI για να εκτιμήσει ποσοτικά τις τιμές των V_x και V_n από το VI που αποκτήθηκαν σε δύο γωνίες θέασης. Το VI υπολογίστηκε από τα MODIS Δεδομένα (BRDF)/Albedo (MCD43A1). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με 10% πρόσθετο θόρυβο έδειξαν ότι η μέση τετραγωνική απόκλιση ρίζας (RMSD) της FVC ήταν περίπου 0,1 (η έγκυρη περιοχή FVC είναι [0, 1]). Άμεση αξιολόγηση έναντι 34 παγκόσμιων μετρήσεων FVC από την εκπόνηση της έκθεσης για τα ευρωπαϊκά όργανα τηλεανίχνευσης (VALERI) για τα έτη 2000 έως 2014 έδειξε ότι η ακρίβεια του MultiVI FVC ($R^2 = 0.866$, $RMSD = 0.092$) υπερβαίνει την τιμή της από την SPOT/VEGETATION bio GEO έκδοση 1 (GEOV1) FVC ($R^2 = 0,795$, $RMSD = 0,159$). Το MultiVI FVC εμφάνισε υψηλότερο συσχετισμό με το FVC αναφοράς VALERI από το κλάσμα MODIS της φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας με προϊόν (MCD15A2H, R^2 είναι 0.696). Η μέθοδος MultiVI μπορεί να εφαρμοστεί με ευελιξία σε περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο για την παρακολούθηση της FVC, με χάρτες V_x και V_n που παράγονται ως δύο σημαντικά υποπροϊόντα (Mu *et al.*, 2018).

Επιπλέον, αξιολογήθηκε η χρησιμότητα της υπερφασματικής απεικόνισης (HSI) επί του κινεζικού HJ-1-A μικρού δορυφόρου στη χαρτογράφηση της βλάστησης. Τα δεδομένα HJ-1/HSI χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης χρησιμοποιώντας τα in situ δεδομένα FVC, τα οποία στη συνέχεια εφαρμόστηκαν σε υποεικονοστοιχεία μοντέλου de-composition για την εκτίμηση FVC, του μοντέλου dimidiate pixel. Οι πληροφορίες του FVC στην περιοχή Shihezi, Xinjiang, της Κίνας, ανακτήθηκαν με βάση το μοντέλο pixel dimidiate. Διασταυρωμένος έλεγχος με τα δεδομένα FVC in situ, έδωσαν συντελεστή συσχέτισης 0,86 και μέσο τετραγωνικό

σφάλμα 10,9%. Η επαλήθευση απέδειξε ότι τα αποτελέσματα του FVC από τα HJ-1/HIS δεδομένα συσχετίζονται καλά με τις επί τόπου μετρήσεις, αποδεικνύοντας ότι τα δεδομένα HJ-1/ HSI είναι πολλά υποσχόμενα για τη μελέτη των πιθανών επιπτώσεων της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος στα άγρια και ημιάνυδρα τοπία (Zhang *et al.*, 2013).

Η θέση της «κόκκινης ακμής» (Red Edge Position) στη φασματική ανακλαστικότητα της βλάστησης αποτελεί ένα συμπληρωματικό στοιχείο για τη μέτρηση της περιεχόμενης χλωροφύλλης και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης. Ο Multi-Spectral Instrument (MSI) στον δορυφόρο ESA Sentinel-2 (S-2) προσέφερε την ευκαιρία για την εκτίμηση του REP σε πολύ υψηλότερη χωρική ανάλυση (20 m) από ότι ήταν προηγουμένως δυνατή με αισθητήρες διαστήματος όπως το Φασματόμετρο Μεσαίας Ανάλυσης (MERIS) ENVISAT. Αυτή η μελέτη στόχευε στην αξιολόγηση της δυνατότητας του αισθητήρα MS-S-2 για εκτίμηση της πυκνότητας σε χλωροφύλλη, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI) και της συγκέντρωση χλωροφύλλης σε φύλλα (Leaf Chlorophyll Concentration, LCC) χρησιμοποιώντας δεδομένα από πολλαπλά πεδία. Περιλαμβάνονται στις εκτιμήσεις πεδίου τα αποτελέσματα από το SEN3Exp στο Barrax, στην Ισπανία που αποτελείται από 35 μονάδες δειγματοληψίας (Elementary Sampling Units, ESU) των LCC και LAI οι οποίες έχουν αξιολογηθεί για συσχέτιση με προσομοιωμένα δεδομένα MSI χρησιμοποιώντας φασματόμετρο απεικόνισης αερομεταφοράς CASI. Η ανάλυση παρουσίασε αποτελέσματα από το SicilyS2EVAL, αποτελούμενη από 25 μονάδες ESU στη Σικελία της Ιταλίας, υποστηριζόμενη από μια ταυτόχρονη έκδοση Specim Aisa-δεδομένων Eagle. Επιπλέον, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του μοντέλου PROSAIL για παρόμοιες τιμές βιοφυσικών μεταβλητών στις μονάδες ESU. Αξιολογήθηκε το πεδίο εφαρμογής του S-2 για την ανάκτηση των βιοφυσικών μεταβλητών χρησιμοποιώντας τα συνδυασμένα σύνολα δεδομένων μέσω της διερεύνησης των σχετικών δεικτών βλάστησης (VIs) καθώς και την παρουσίαση της χλωροφύλλης κόκκινης ακμής (IRECI) και της Θέσης του κόκκινου άκρου Sentinel-2 (S2REP). Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές σχέσεις μεταξύ της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη και του LAI για προσομοιωμένα δεδομένα MSI χρησιμοποιώντας IRECI ή τον Δείκτη βλάστησης (NDVI), ενώ ο δείκτης S2REP και ο δείκτης χλωροφύλλης MERIS (MTCI) βρέθηκαν να έχουν τη μεγαλύτερη συσχέτιση για την ανάκτηση LCC (Frampton *et al.*, 2013).

Η κάλυψη βλάστησης (sy) είναι απαραίτητη για τη μοντελοποίηση των ανταλλαγών ενέργειας μεταξύ εδάφους ατμόσφαιρας νερού και ιχνοστοιχείων. Από σύνθετο ραδιόμετρο πολύ υψηλής ανάλυσης υπολογίστηκε ο (NDVI) από τον Απρίλιο του 1992 έως τον Μάρτιο του 1993, και πρόέκυψε ένα παγκόσμιο σύμπλεγμα 1 χλμ με βάση την ετήσια μέγιστη τιμή NDVI για κάθε εικονοστοιχείο σε σύγκριση με την τιμή NDVI που αντιστοιχεί έως 100% στην κάλυψη βλάστησης για κάθε τύπο Γης-Βιόσφαιρας. Αυτό το σύνολο δεδομένων είναι εξαρτώμενο από τα εικονοστοιχεία αλλά ανεξάρτητο από την εποχή, με την εποχική διακύμανση της πράσινης βλάστησης να υπολογίζεται από τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Ο αλγόριθμος των συγγραφέων διαπιστώθηκε ότι δεν είναι ευαίσθητος στη χρήση μιας συγκεκριμένης κάλυψης γης. Σε σύγκριση με ένα ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων που προέρχεται από τους DeFries et al. χρησιμοποιώντας μια πιο εξελιγμένη στατιστική προσέγγιση, το τρέχον σύνολο δεδομένων έχει παρόμοια χωρική κατανομή, αλλά συστηματικά μικρότερο sy (ιδιαίτερα πάνω από θάμνους και σε άγονη χωρίς κάλυψη γης). Έδωσε τιμές sy που συνολικά παρουσιάζονται σύμφωνες με αυτές που προκύπτουν από υψηλότερης ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων για τις περιοχές έρευνας στην Αριζόνα και στη Γερμανία (Zeng et al., 2000).

Ένα σύνολο μεθόδων συγκρίθηκε για την εκτίμηση της κάλυψης της βλάστησης (fc) σε μια περιοχή των 4000 km² του κεντρικού Νέου Μεξικού, ΗΠΑ. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν δοκιμάστηκαν ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας ορθοαναγωγή εικόνων true colour υψηλής ανάλυσης με χωρική ανάλυση 0,3 m. Οι απλές μέθοδοι που βασίστηκαν στο NDVI διεξήχθησαν ικανοποιητικά για την εκτίμηση του fc σε περιφερειακό επίπεδο αλλά παρουσιάστηκε υπερεκτιμημένο fc σε αραιοκατοικημένες περιοχές με φωτεινά εδάφη, και περιοχές με άφθονη μη φωτοσυνθετική βλάστηση. Συγκρίθηκαν, τα μοντέλα φασματικού μίγματος (Spectral Mixture Models) τριών, τεσσάρων και πέντε μελών (SMA3, SMA4, SMA5, Spectral Mixture Models) Τα μοντέλα παρήγαγαν παρόμοια ακρίβεια σε περιφερειακό επίπεδο, αλλά στο μοντέλο SMA5 υπολογίστηκε καλύτερα το fc για τα σπανιότερα τοπία (έντονα εδάφη, παράκτια βλάστηση). Αυτό απέδειξε ότι τα ετερογενή τοπία μπορούν να στρωματοποιηθούν σε σχετικά ομοιογενή, και τρία ή τέσσερα μέλη (endmembers) μπορεί να είναι επαρκή για τον χαρακτηρισμό της φασματικής μεταβλητότητας σε κάθε στρώμα. Συμπεριλαμβανομένου του NDVI μαζί με τις έξι ζώνες των δεδομένων ETM + παρέχεται επαρκής διαστασιολόγηση δεδομένων για την υποστήριξη του μοντέλου SMA πέντε μελών. Αυτό επέτρεψε μια πληρέστερη αναπαράσταση των φασματικών

τύπων για τον διαχωρισμό της πράσινης βλάστησης στην ημι-άνυδρη περιοχή. Η πράσινη ξυλώδης βλάστηση και η κάλυψη του πράσινου γρασιδιού θα πρέπει να αντιπροσωπεύονται φασματικά από δύο διαφορετικά endmembers στη SMA επειδή αυτοί οι δύο τύποι βλάστησης είναι φασματικά διαφορετικοί, ιδιαίτερα στο μήκος κύματος κοντά στο υπέρυθρο (NIR) (Xiao and Moody, 2005).

Οι δείκτες βλάστησης (VI) χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των διακυμάνσεων στην κάλυψη της βλάστησης τις προηγούμενες δεκαετίες. Η κάλυψη της βλάστησης υπολογίστηκε από προϋπολογισμένη βάση δεδομένων ανακλαστικότητας που βασίστηκε στην αναστροφή του μοντέλου PROSAIL. Διαπιστώθηκε ότι περιοχές με πολύ χαμηλή και χαμηλή δασική κάλυψη κυριαρχούσαν με έκταση 104 km² και 69,49 km² αντίστοιχα. Η κατηγορία της πολύ υψηλής κάλυψης δασικής βλάστησης ήταν πολύ χαμηλή περίπου 24 km² ενώ οι κατηγορίες της υψηλής και μεσαίας κάλυψης βλάστησης παρουσίασαν ενδιάμεση κυριαρχία καλύπτοντας έκταση 51,74 km² και 57 km² αντίστοιχα. Από το αποτέλεσμα συμπεραίνεται ότι η αξία των NDVI, RVI (Ratio Vegetation Index) και PSSRA (Pigment Specific Simple Ratio) ήταν στενά συνδεδεμένη με την κάλυψη της δασικής βλάστησης. Στην ανάλυση παλινδρόμησης παρατηρήθηκε υψηλή σχέση μεταξύ FCOVER και PSSRA (R² = 68%), ακολουθούμενη από NDVI (R² = 66%) και RVI (R² = 65%). Η χαμηλή σχέση βρέθηκε μεταξύ FCOVER και MCARI, Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (R² = 36,7%) ακολουθούμενη από DVI, Difference Vegetation Index (R² = 53,7%) και IRECI, Inverted Red-edge Chlorophyll Index (R² = 59%) (Gupta and Pandey, 2018).

Μια μέθοδος εκτίμησης της κάλυψης της βλάστησης (FVC), περιλάμβανε την ανάπτυξης μοντέλων βλάστησης σε ομοιογενή περιοχές, με την υπόθεση ότι όλα τα pixel FVC έχουν την ίδια βλάστηση στο μοντέλο ανάπτυξης. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δεν ισχύει σε ετερογενείς περιοχές, οπότε η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί για μεγάλες εκτάσεις. Επομένως, η μελέτη αυτή πρότεινε μια υψηλότερη χωρική ανάλυση για την εκτίμηση του FVC που εφαρμόστηκε σε ετερογενείς περιοχές με χρήση Landsat 8, και δεδομένα Land Image, & Global Land Surface Satellite Glass. Το FVC υπολογίστηκε σύμφωνα με τον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης από τα δεδομένα OLI του Landsat 8. Στη συνέχεια, ανεξάρτητα δυναμικά μοντέλα βλάστησης κατασκευάστηκαν για κάθε εικονοστοιχείο υψηλότερης ανάλυσης. Τέλος, τα δυναμικά μοντέλα βλάστησης και τα μοντέλα μεταφοράς ακτινοβολίας συνδυάστηκαν για τον υπολογισμό FVC στον Landsat 8. Τα αποτελέσματα επικύρωσης έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος (R² = 0.7757, RMSE = 0.0881) ήταν καλύτερη από την

προηγούμενη μέθοδο ($R^2 = 0.7038$, $RMSE = 0.1125$) είτε από κοινές μεθόδους που περιλάμβαναν το μοντέλο PROSAIL ($R^2 = 0.7457$, $RMSE = 0.1249$) (Tu *et al.*, 2018).

Η ποιότητα ζωής στα αστικά περιβάλλοντα συνδέεται στενά με την κάλυψη της βλάστησης. Η αστική ανάπτυξη δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα, οπότε οι υπεύθυνοι σχεδιασμού αναγκάζονται να εφαρμόσουν πολιτικές για τη βελτίωση της ποιότητας του αστικού περιβάλλοντος. Η χαρτογράφηση της βλάστησης για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των αστικών περιοχών είναι κρίσιμη. Δεδομένης της φασματικής πολυπλοκότητας του αστικού περιβάλλοντος και της αραιής βλάστησης στις περιοχές αυτές, απαιτείται η δημιουργία ενός αξιόπιστου χάρτη κάλυψης. Η βλάστηση στις περιοχές αυτές απαιτεί τη χρήση εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης. Σε αυτή τη μελέτη, λήφθηκε μια εικόνα μέτριας χωρικής ανάλυσης. Ως δεδομένα αναφοράς για την επικύρωση της εκτίμησης FVC χρησιμοποιήθηκαν εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης Ikonos. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε γραμμική και μη γραμμική παλινδρόμηση και το νευρωνικό δίκτυο μεταξύ του FVC που προέκυψε από την εικόνα Ikonos και των δεικτών βλάστησης στην εικόνα Landsat. Επιλέχθηκε τυχαία ένας αριθμός εικονοστοιχείων για την αξιολόγηση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μοντέλα νευρωνικού δικτύου, μη γραμμικής παλινδρόμησης και γραμμικής παλινδρόμησης είναι ακριβέστερα για την εκτίμηση της FVC αντίστοιχα (Kouchi *et al.*, 2013).

Μελετήθηκαν οι φασματικές ιδιότητες κάλυψης της βλάστησης (Vegetation Fraction VF) από 0% έως 100% στο ορατό και υπέρυθρο (NIR) μήκος φάσματος, προκειμένου να αναπτυχθεί μια τεχνική για την εκτίμηση της VF. Όταν η τιμή VF ήταν <60%, τέσσερις διακριτές και αρκετά ανεξάρτητες φασματικές ζώνες ανακλαστικότητας υπήρχαν στο ορατό μήκος του φάσματος: 400 έως 500 nm, 530 έως 600 nm, κοντά στα 670 nm και περίπου 700 nm. Όταν η VF κυμαινόταν μεταξύ 60% και 100%, η ανακλαστικότητα στο NIR μειώθηκε με αύξηση της VF. Η μειωμένη ανάκλαση στο NIR, μπορεί να είναι ένας περιοριστικός παράγοντας στη χρήση της φασματικής αυτής περιοχής για εκτίμηση της VF. Διαπιστώθηκε ότι για το VF > 60%, το περιεχόμενο πληροφοριών των φασμάτων ανακλαστικότητας σε ορατό εύρος μπορεί να εκφράζεται μόνο από δύο ανεξάρτητα ζεύγη φασματικών ζωνών: (1) το μπλε από 400 έως 500 nm και το κόκκινο κοντά στα 670 nm, (2) το πράσινο γύρω 550 nm και η περιοχή κόκκινης ακμής κοντά στα 700 nm. Προτάθηκε η χρησιμοποίηση μόνο του ορατού φάσματος για την ποσοτική εκτίμηση της VF. Οι πράσινες (ζώνη 700 nm) και οι κόκκινες (κοντά σε 670 nm) ανακλάσεις χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη νέων

δεικτών, οι οποίοι ήταν γραμμικοί ανάλογα με το VF που κυμαίνεται από 0% έως 100%. Η έννοια του δείκτη ατμοσφαιρικής αντοχής (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI) χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση δεικτών από τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Ο ορατός δείκτης στην ατμόσφαιρα με τη μορφή $VARI = (R_{green} - R_{red}) / (R_{green} + R_{red} - R_{blue})$ βρέθηκε να είναι ελάχιστα ευαίσθητος σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις επιτρέποντας την εκτίμηση της VF με σφάλμα <10% σε ένα ευρύ φάσμα ατμοσφαιρικών διακυμάνσεων. Η επικύρωση της νέας προτεινόμενης τεχνικής έγινε με τη χρήση συνόλου ανεξάρτητων δεδομένων από το σιτάρι και δεδομένων ανακλαστικότητας που ελήφθησαν για καλαμπόκι στη Νεμπράσκα. Το προβλεπόμενο πράσινο VF συγκρίθηκε με τις ανακτημένες τιμές από ψηφιακές εικόνες. Παρά το γεγονός ότι η αντίθεση ανάκλασης μεταξύ των ορατών καναλιών ήταν πολύ μικρότερη από ό, τι μεταξύ του ορατού και του NIR, η ευαισθησία των προτεινόμενων δεικτών σε μέτριες έως υψηλές τιμές του VF ήταν πολύ υψηλότερη από ό, τι για τον δείκτη βλάστησης NDVI, και το σφάλμα στην πρόβλεψη VF δεν υπερέβαινε το 10%. Οι προτεινόμενοι δείκτες συμπληρώνουν τον NDVI, ARVI, Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) και άλλους, οι οποίοι βασίζονται στην κόκκινη και στην υπέρυθρη ζώνη στην εκτίμηση VF, καθώς και ο Δείκτης Green Atmospherically Resistant Index (GARI), ο οποίος υπολογίζεται από το πράσινο και το υπέρυθρο (NIR) κανάλι (Gitelson, et al., 2002).

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το κλάσμα της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας που απορροφάται από την πράσινη βλάστηση (FAPAR) είναι βασικές κλιματικές μεταβλητές στα μοντέλα επιφανειακών διεργασιών. Το FVC αποτελεί σημαντική μεταβλητή διαχωρισμού της βλάστησης και του εδάφους για τις διαδικασίες του ενεργειακού ισοζυγίου. Πολλά δορυφορικά προϊόντα LAI, FAPAR και FVC προέρχονται από μέτρια έως μεγάλη χωρική ανάλυση. Η εκτόξευση του Sentinel-2 το 2015 παρείχε δεδομένα σε χωρική ανάλυση 10 μέτρων με υψηλή χρονική διακριτική ικανότητα. Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν η αξιολόγηση των επιδόσεων ενός αλγορίθμου βασισμένου σε νευρωνικό δίκτυο για την παραγωγή προϊόντων LAI, FAPAR και FVC σε χωρική ανάλυση 10 μέτρων και με υψηλή χρονική διακριτική ικανότητα. Ο αλγόριθμος είναι γενικός, και εφαρμόζεται χωρίς τη γνώση της κάλυψης γης. Μια σειρά χρονοσειρών υψηλής διακριτικής ικανότητας εικόνων SPOT4_HRVIR (16 σκηνές) και Landsat 8 (18 σκηνές) που αποκτήθηκαν το 2013 στη νοτιοδυτική περιοχή της Γαλλίας, χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των προϊόντων LAI, FAPAR και FVC. Για κάθε αισθητήρα και κάθε βιοφυσική μεταβλητή, ένα νευρωνικό

δίκτυο για πρώτη φορά εκπαιδεύτηκε σε μοντέλα PROSPECT + SAIL με προσομοίωση μοντέλου μεταφοράς top of canopy για πράσινο, κόκκινο, κοντινό και μέσο υπέρυθρο μήκος κύματος. Τα αποτελέσματά έδειξαν μια καλή χωρική και χρονική συνέπεια μεταξύ των μεταβλητών που προέρχονται από τους αισθητήρες: σχεδόν το ήμισυ των εικονοστοιχείων δείχνει μια διαφορά μεταξύ των εκτιμήσεων SPOT και LANDSAT κάτω από 0,5 μονάδες για LAI και 0,05 μονάδες για FAPAR και FVC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα παράγωγα προϊόντα συσχετίζονται έντονα με τις μετρήσεις πεδίου ($R^2 > 0.79$), που αντιστοιχούν σε $RMSE = 0.49$ για LAI, $RMSE = 0.10$ για FAPAR ($RMSE = 0.12$) για FVC. Συμπεραίνεται ότι ο προτεινόμενος γενικός αλγόριθμος παρέχει μια καλή βάση για την παρακολούθηση της εποχιακής μεταβολής των βιοφυσικών μεταβλητών βλάστησης για σημαντικές καλλιέργειες (Li *et al.*, 2015).

Τα υπάρχοντα προϊόντα FVC προέρχονται κυρίως από δεδομένα τηλεπισκόπησης χαμηλής ή μέσης ανάλυσης, σε αντίθεση με την ανάγκη πολλών εφαρμογών για δεδομένα FVC υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν δημιουργηθεί αρκετά προϊόντα FVC μεσαίας χωρικής ανάλυσης, χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος Global Land Surface Satellite (GLASS) που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό του FVC χρησιμοποιεί General Regression Neural Networks (GRNNs), και επιτυγχάνει ακρίβεια εκτίμησης, συγκρίσιμη με εκείνη του προϊόντος GEOV1 FVC. Ωστόσο, η υπολογιστική αποτελεσματικότητα της μεθόδου GRNNs είναι χαμηλή και μη ικανοποιητική για τη δημιουργία του μακροπρόθεσμου προϊόντος GLASS FVC. Ο στόχος της μελέτης ήταν να ανακαλυφθεί ένας αλγόριθμος για τη δημιουργία του προϊόντος GLASS FVC που έχει ακρίβεια συγκρίσιμη με αυτή της μεθόδου GRNNs και επαρκή υπολογιστική αποδοτικότητα.

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μέθοδοι:

- Back-Propagation Neural Networks (BPNNs),
- General Regression Neural Networks (GRNNs)
- Support Vector Regression (SVR),
- Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)

Μετά τη σύγκριση των επιδόσεων της ακρίβειας και της υπολογιστικής απόδοσης με τις άλλες τρεις μεθόδους, το μοντέλο MARS επιλέχθηκε προκαταρκτικά ως ο καταλληλότερος αλγόριθμος για τη δημιουργία του προϊόντος GLASS FVC. Τα αποτελέσματα επικύρωσης έδειξαν ότι η απόδοση του μοντέλου MARS ($R^2 = 0.836$, $RMSE = 0.1488$) ήταν συγκρίσιμη με εκείνη της μεθόδου GRNNs ($R^2 = 0.8353$, $RMSE = 0.1495$) και η FVC που παράγεται από το μοντέλο MARS είχε καλή χωρική και

χρονική συνέπεια με εκείνη που παράγεται από τη μέθοδο GRNNs. Επιπλέον, η υπολογιστική αποτελεσματικότητα του MARS ήταν πολύ υψηλότερη από εκείνη της μεθόδου GRNNs. Επομένως, το μοντέλο MARS ήταν ένας κατάλληλος αλγόριθμος για τη δημιουργία του προϊόντος GLASS FVC από το φασματόμετρο μέτρησης ανάλυσης (MODIS) (Yang *et al.*, 2016).

Η διαθεσιμότητα της κάλυψης των εικόνων Landsat σε μεγάλες περιοχές προσφέρει μια ευκαιρία για την παραγωγή της FVC με εξαιρετική χωρική ανάλυση. Ως εκ τούτου, ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να αναπτυχθεί ένας γενικός και αξιόπιστος αλγόριθμος εκτίμησης FVC της επιφάνειας της γης με δεδομένα Landsat υπό διάφορες συνθήκες επιφάνειας γης. Δύο μέθοδοι Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) model και Back-Propagation Neural Networks (BPNNs) εκπαιδεύτηκαν με τη χρήση δειγμάτων από μοντέλο PROSPECT και προσομοιώσεις μοντέλων (SAIL) που περιελάμβανε την ανάκλαση από Landsat και τις αντίστοιχες τιμές FVC και αξιολόγησε την επιλογή της μεθόδου που είχε καλύτερη απόδοση. Στη συνέχεια, το μοντέλο MARS, το οποίο είχε καλύτερες επιδόσεις στην επικύρωση, αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου για το FVC από δύο περιοχές μελέτης. Η επικύρωση της FVC υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο (Heihe: $R^2 = 0,825$, $RMSE = 0,097$, Chengde χρησιμοποιώντας Landsat 7 ETM+: $R^2 = 0,8571$, $RMSE = 0,078$, Chengde χρησιμοποιώντας Landsat 8 OLI: $R^2 = 0,8598$, $RMSE =$ έδειξε ότι η προτεινόμενη μέθοδος είχε καλές επιδόσεις. Η χωροχρονική αξιολόγηση της εκτιμώμενης FVC από τα δεδομένα Landsat 7 ETM+ και Landsat 8 OLI επιβεβαίωσε τη συνέπεια της προτεινόμενης μεθόδου. Όλα αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορούσε να αποκτήσει ικανοποιητική ακρίβεια και είχε το δυναμικό για την παραγωγή εκτιμήσεων FVC υψηλής ποιότητας από δεδομένα Landsat (Yang *et al.*, 2017).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων εκτίμησης FVC που χρησιμοποιούν δεδομένα τηλεπισκόπησης, και η αξιολόγηση της απόδοσής τους σε μια συγκεκριμένη περιοχή έχει μεγάλη σημασία. Ως εκ τούτου, η μελέτη αυτή αξιολόγησε αρχικά τρεις τύπους εκτίμησης FVC χρησιμοποιώντας στοιχεία του Landsat 7 ETM+ σε μια γεωργική περιοχή της λεκάνης απορροής ποταμού Heihe της Κίνας και στη συνέχεια πρότεινε μια στρατηγική συνδυασμού από διαφορετικά μεμονωμένα μοντέλα για τη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης της FVC, η οποία χρησιμοποίησε τις μεθόδους multiple linear regression (MLR) πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και Bayesian model average (BMA). Τα αποτελέσματα επικύρωσης έδειξαν ότι το μοντέλο ανάλυσης φασματικού

μίγματος με τρία endmembers (SMA3) πέτυχε την καλύτερη ακρίβεια εκτίμησης FVC (συντελεστής προσδιορισμού- $R^2 = 0,902$, $RMSE = 0,076$) μεταξύ των επτά επιμέρους μοντέλων χρησιμοποιώντας Landsat 7 ETM + δεδομένα. Επιπλέον, οι μέθοδοι συνδυασμού MLR και BMA θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ακρίβεια εκτίμησης FVC ($R^2 = 0,913$, $RMSE = 0,063$ και $R^2 = 0,904$, $RMSE = 0,069$ για MLR και BMA, αντίστοιχα). Θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τόσο οι μέθοδοι συνδυασμού MLR όσο και BMA που ενσωματώνουν εκτιμήσεις FVC από διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιώντας στοιχεία Landsat 7 ETM+ θα μπορούσαν να αποδυναμώσουν αποτελεσματικά τα σφάλματα εκτίμησης των επιμέρους μοντέλων και να βελτιώσουν την τελική ακρίβεια εκτίμησης της FVC (Jia et al., 2017).

Το προϊόν FVC Global Surface Satellite (GLASS), το οποίο παράγεται από τα δεδομένα MODIS μέτριας χωρικής διακριτικής ικανότητας, έχει αποδεκτή απόδοση. Ωστόσο, έχει ξεπεραστεί η αρχική διάρκεια ζωής λειτουργίας του MODIS. Δεδομένα ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας συνεχίστηκαν να παράγονται με ραδιομετρο Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) πάνω στο δορυφόρο Suomi National Polar-Orbiting Partnership (S-NPP), που σχεδιάστηκε ως διάδοχος του MODIS. Αναπτύχθηκε αλγόριθμος εκτίμησης FVC για τα δεδομένα VIIRS για τη διατήρηση των συνεχών εκτιμήσεων FVC σε περίπτωση αποτυχίας MODIS. Σε αυτή τη μελέτη, προτάθηκε ένας παγκόσμιος αλγόριθμος εκτίμησης FVC για δεδομένα επιφανείας VIIRS με βάση τις μεθόδους:

- Back propagating neural networks (BPNNs),
- General regression networks (GRNNs),
- Multivariate adaptive regression splines (MARS), και
- Gaussian process regression (GPR).

Τα δείγματα εξήχθησαν από το προϊόν GLASS FVC και την αντίστοιχη επιφάνεια Visible Infrared Imaging Radiometer Suite VIIRS το 2013. Οι αντανάκλασεις VIIRS των ζωνών κόκκινου και εγγύς υπέρυθρου (NIR) ήταν οι μεταβλητές εισόδου για αυτές τις μεθόδους. Τα ανεξάρτητα αποτελέσματα επικύρωσης έδειξαν ότι οι τέσσερις μέθοδοι θα μπορούσαν να επιτύχουν παρόμοιες και αξιόπιστες εκτιμήσεις FVC. Όσον αφορά την ακρίβεια της εκτίμησης της FVC, η μέθοδος GPR πέτυχε την καλύτερη απόδοση ($R^2 = 0,9019$, $RMSE = 0,0887$). Η μέθοδος MARS είχε το προφανές πλεονέκτημα της υπολογιστικής απόδοσης. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις της FVC επέτυχαν καλή χωρική και χρονικές συνέχειες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτίμησης FVC για τα δεδομένα VIIRS μπορεί να παράγει αξιόπιστα παγκόσμια δεδομένα FVC. (Liu et al.,

2018)

Οι αποστολές Sentinel-2 που φέρουν αισθητήρες πολλαπλών φασματικών οργάνων (MSI) με 13 πολυφασματικές ζώνες είναι δυνητικά χρήσιμες για την εκτίμηση της FVC. Ωστόσο, η απόδοση αυτών των ζωνών για εκτίμηση της FVC είναι ασαφής. Ο στόχος της μελέτης ήταν να αξιολογήσει την απόδοση των ανακλάσεων φασματικής ζώνης MSI Sentinel-2 στη εκτίμηση FVC. Τα δείγματα, των Sentinel-2 MSI και των αντίστοιχων τιμών FVC, προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο μεταφοράς PROSPECT + SAIL με διαφορετικές συνθήκες και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παλινδρόμησης (Random Forest Regression, RFR) για την ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης FVC και αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων συντελεστών στην εκτίμηση FVC. Αξιολογήθηκαν με δεδομένα πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τρεις σημαντικότερες ζώνες δεδομένων Sentinel-2 MSI για την εκτίμηση FVC ήταν η ζώνη 4 (κόκκινη), η ζώνη 12 (SWIR2) και η ζώνη 8a (NIR2). Η εκτίμηση FVC χρησιμοποιώντας αυτές τις ζώνες έχει μια συγκρίσιμη ακρίβεια (μέσος τετραγωνικός σφάλμα ρίζας (RMSE) = 0,085) με αυτή που χρησιμοποιεί όλες τις ζώνες (RMSE = 0,090). Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι η ζώνη 12 είχε καλύτερη απόδοση για την εκτίμηση της FVC από την πράσινη ζώνη (RMSE = 0,097). Ωστόσο, οι πρόσφατα προστεθείσες ζώνες κόκκινου άκρου, με χαμηλές βαθμολογίες στο μοντέλο RFR, έχουν μικρή σημασία για τη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης της FVC σε σύγκριση με τις ζώνες Red, NIR2 και SWIR2 (Wang et al., 2018).

Οι κανονικοποιημένοι δείκτες βλάστησης διαφοροποίησης (NDVI) υψηλής πυκνής βλάστησης (NDVI_h) και γυμνού εδάφους (NDVI_s), οι οποίοι αναγνωρίζονται ως βασικές παράμετροι για την εκτίμηση της Κλασματικής Βλάστησης (FVC), συνήθως λαμβάνονται με εμπειρικές στατιστικές μεθόδους. Ωστόσο, είναι συχνά δύσκολο να αποκτηθούν αποδεκτές τιμές NDVI_h and NDVI_s με δεδομένα χαμηλής ανάλυσης (1 χλμ.), σε άνυδρες, ημιάνυδρες και περιοχές με υψηλή βλάστηση. Η αβεβαιότητα των εκτιμώμενων NDVI_h και NDVI_s προκαλεί σημαντικά λάθη στις εκτιμήσεις FVC όταν χρησιμοποιείται ένα απλό γραμμικό μοντέλο μίξης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, προτάθηκε μια φυσική μέθοδο με χρήση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και του NDVI τα οποία εισάγονται σε ένα μοντέλο γραμμικού μίγματος για εκτίμηση του FVC και για τον υπολογισμό NDVI_h and NDVI_s. Το μοντέλο ενσωμάτωσε τις παραμέτρους της εικόνας (MODIS) Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) model parameters product (MCD43B1) και LAI. Δύο τύποι αξιολόγησης σχεδιάστηκαν 1) με δεδομένα προσομοίωσης και 2) με δορυφορικές

παρατηρήσεις. Η μέση τετραγωνική απόκλιση (RMSD) για προσομοιωμένα δεδομένα είναι μικρότερη από 0,117, ανάλογα με τον τύπο θορύβου που προστέθηκε στα δεδομένα. Στο πείραμα των πραγματικών δεδομένων, το RMSD για την καλλιεργήσιμη έκταση είναι 0,127, η οριζόντια έκταση είναι 0,075 και για το δάσος είναι 0,107. Οι πειραματικές περιοχές, αντίστοιχα, δεν είχαν πλήρως βλάστηση και μη-φυτικά εικονοκύτταρα σε ανάλυση 1 χλμ. Διαπιστώθηκε σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα κατά τη χρήση των στατιστικών μεθόδων και η RMSD κυμάνθηκε από 0.110 έως 0.363 με βάση τα πραγματικά δεδομένα. Η προτεινόμενη μέθοδος ήταν κατάλληλη για την παραγωγή NDVI and NDVI maps για την εκτίμηση FVC μόνο σε περιφερειακές και παγκόσμιες κλίμακες (Song *et al.*, 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1. Δεδομένα

Για την εκτίμηση της βιοφυσικής παραμέτρου της βλάστησης, FVC, με χρήση των πολυφασματικών δεδομένων Sentinel-2, ακολουθεί αναλυτική μεθοδολογική προσέγγιση. Παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής καθώς και τα δεδομένα που απαιτήθηκαν για τον υπολογισμό της. Ερευνήθηκαν τρεις μέθοδοι μέσω των δεικτών βλάστησης και του νευρωνικού δικτύου και η βέλτιστη επιλέχθηκε για τη δημιουργία του τελικού χαρτογραφικού προϊόντος FVC.

Για την εισαγωγή, ανάλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν:

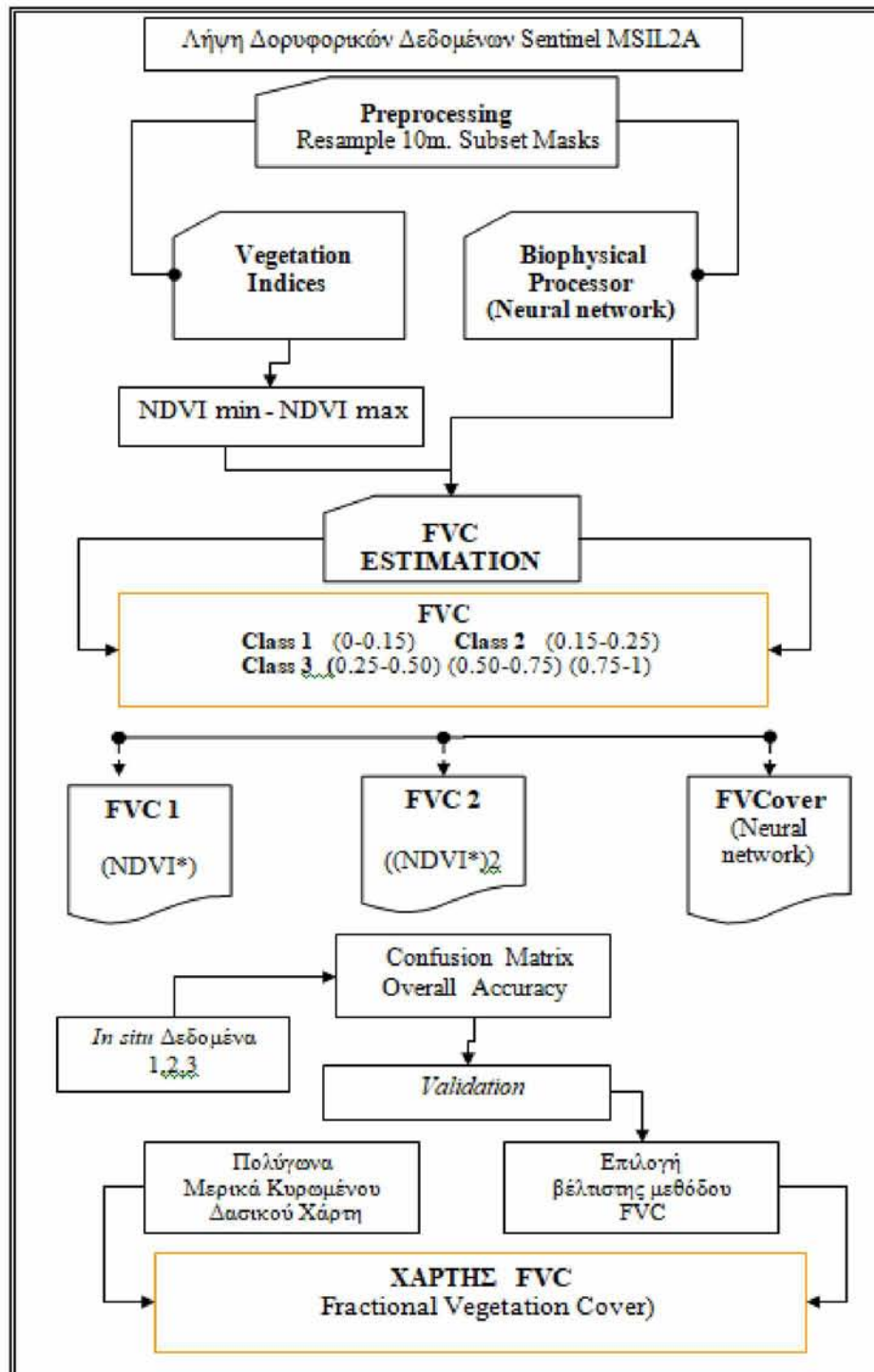
- Το ελεύθερο Λογισμικό επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων Snap (Sentinel Application Platform) το οποίο δημιουργήθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency - ESA)
- Συλλογή προϊόντων λογισμικού των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ESRI), Desktop εφαρμογή ArcMap 10.2.2.
- Το Google Earth στην προεργασία αξιολόγηση και τον εντοπισμό των δεδομένων πεδίου.

Τα Δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου ήταν:

- Ελεύθερα Δορυφορικά δεδομένα των πολυφασματικών αισθητήρων Sentinel -2 (S-2) από την πλατφόρμα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency, ESA) ESA's Sentinels Scientific Data Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>).
- Δορυφορικές εικόνες της πλατφόρμας Google Earth, για την προεκτίμηση της βλάστησης, με την μέθοδο της φωτοερμηνείας και το σχεδιασμό της δειγματοληψίας επί του πεδίου.
- Δεδομένα πεδίου που επιλέχθηκαν με την μέθοδο της τυχαίας δειγματοληψίας (sampling), με σκοπό τον έλεγχο ακρίβειας.
- Επιτόπιες παρατηρήσεις, φωτογραφίες και αυτοψίες
- Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System, GPS) για λήψη στοιχείων υπαίθρου.
- Διανυσματικό αρχείο μορφότυπου (.shp) των πολυγώνων του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη της Περιφερειακής Ενότητας Εύβοιας με κωδικούς δασικής πληροφορίας (ΔΔ, ΑΝΔΔ, ΑΔ, ΑΝΑΔ, ΠΔ & ΑΝΠΔ).

3.2. Διάγραμμα ροής εργασιών

Τα βήματα για τον εντοπισμό της βέλτιστης μεθόδου υπολογισμού του FVC παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής εργασιών:



Διάγραμμα 3.1.:Σχηματικό Διάγραμμα της διαδικασίας που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

3.3. Επιλογή κατάλληλων δορυφορικών δεδομένων

Αρχικά επιλέγηκε η περιοχή έρευνας-μελέτης. Ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής μελέτης επιλέγονται και τα δορυφορικά δεδομένα αντίστοιχης χωρικής διακριτικής ικανότητας. Όλα τα δεδομένα πρέπει να έχουν την ίδια χωρική διακριτική ικανότητα.

Προκειμένου να συσχετιστούν οι φασματικές τιμές έπρεπε να ανταποκρίνονται στις τιμές των δεδομένων πεδίου. Το μέγεθος του εικονοστοιχείου έπρεπε να ανταποκρίνεται στο μέγεθος της δειγματοληπτικής επιφάνειας 100 τ.μ. (10 X 10) οπότε πραγματοποιήθηκε επαναδειγματοληψία (resampling) της εικόνας στα 10 μ.

Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των προϊόντων ακολουθεί προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων. Η προεπεξεργασία των εικόνων αφορά όλα τα προπαρασκευαστικά βήματα που ήταν απαραίτητα για την βελτίωση της ποιότητας των αρχικών εικόνων. Αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της ψηφιακής επεξεργασίας και πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά διότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα επόμενα στάδια της ανάλυσης της εικόνας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ήδη βαθμονομημένα και ατμοσφαιρικά διορθωμένα. Ακολούθησε περιορισμός των αρχικών δορυφορικών δεδομένων στα όρια της περιοχής μελέτης. Εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της μάσκας για να απομακρυνθούν τα σύννεφα, οι σκιές και το υδάτινο στοιχείο (dark feature shadow, cloud shadow, water) προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα στην περαιτέρω επεξεργασία της εικόνας. Οι παραπάνω διαδικασίες υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού ανοικτού κώδικα Snap της Esa.

3.4. Μεθοδολογική προσέγγιση Υπολογισμού FVC

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι υπολογισμού της βιοφυσικής παραμέτρου Fractional Vegetation Cover *FVC*, μέσω δεικτών βλάστησης και των νευρωνικών δικτύων, όπως υπολογίζονται από τους δίαυλους των πολυφασματικών εικόνων Sentinel 2.

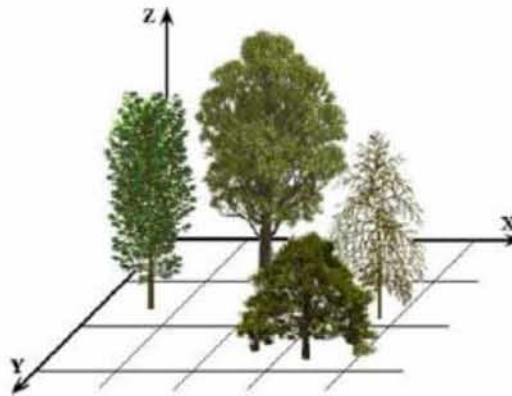
Στην περιοχή μελέτης υπήρχε πληθώρα συνδυασμών φασματικών υπογραφών, ποικιλομορφία στο περιεχόμενο και την υφή οπότε προτιμήθηκε να υπολογιστεί ο μη παραμετρικός αλγόριθμος του νευρωνικού δικτύου (Neural Network), για την εκτίμηση των βιοφυσικών μεταβλητών Sentinel 2.

Για τη μελέτη της ικανότητας και της αποτελεσματικότητας συσχέτισης των διαφορετικών δεικτών βλάστησης, επιλέχθηκε να υπολογιστεί η βιοφυσική μεταβλητή *FVC* μέσω των σχέσεων γραμμικών και μη που την συνδέουν με το *NDVI*.

Βάσει των μεθόδων υπολογισμού της FVC, όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2, σχεδιάστηκαν, στην περιοχή μελέτης, τρία μοντέλα, με τη βοήθεια του λογισμικού Snap. Τα μοντέλα ανταποκρίνονταν στους μαθηματικούς τύπους των δεικτών βλάστησης (FVC 1, FVC 2) και του νευρωνικού δικτύου (FVCover) εκτελώντας τις κατάλληλες μαθηματικές πράξεις.

Το νευρωνικό δίκτυο (NN) της εργαλειοθήκης του προγράμματος snap εκπαιδεύθηκε για να εκτιμήσει τα χαρακτηριστικά του θόλου από τις ανακλάσεις μαζί με τις αντίστοιχες γωνίες που καθόρισαν τη διαμόρφωση παρατήρησης της επεξεργασμένης πολυφασματικής εικόνας Sentinel MSIL2A.

Με τη χρήση των δεδομένων Sentinel-2, υπολογίστηκαν τα FVC 1, FVC 2 & FVCover, για την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης, και αξιολογήθηκε στη συνέχεια η ακρίβεια τους.



Εικόνα 3.1.: Παράδειγμα Χωρικής Δομής Βλάστησης
(Πηγή: Favorskaya and Jain, 2017)

Η βλάστηση δεν είναι ενιαία και ομοιόμορφη (Εικόνα 3.1.), αλλά διαρθρώνεται σε μικρότερες ή μεγαλύτερες επιφάνειες, οι οποίες διαφέρουν στη δομή, στη σύνθεσή, στα είδη που την αποτελούν, στην ηλικία τους (Ντάφης, 1986), οπότε η γνώση της χωρικής και ποσοτικής κατανομής της ήταν απαραίτητη.

Τα FVC 1, FVC 2 & FVCover, μετά τον υπολογισμό τους με τις τρεις ανωτέρω μεθόδους κατηγοριοποιήθηκαν (Zhang *et al.*, 2013), σε:

ΚΛΑΣΗ 1: $0.00 < FVC < 0.15$

ΚΛΑΣΗ 2: $0.15 < FVC < 0.25$

ΚΛΑΣΗ 3: $0.25 < FVC < 0.50$

$0.50 < FVC < 0.75$

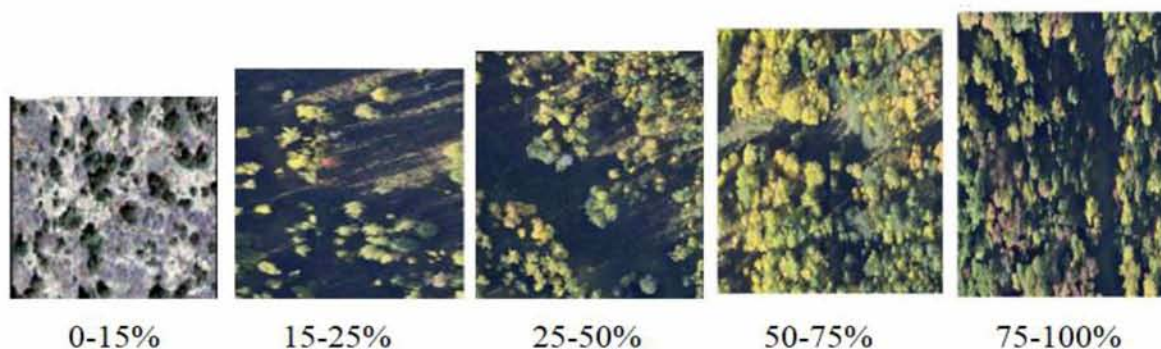
$0.75 < FVC < 1.00$

3.5. Μετρήσεις Δεδομένων Πεδίου

Η παράμετρος Fractional Vegetation Cover FVC είναι μια έννοια με συγκεκριμένα και παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά (Βασιλάκη Π., 2014). Απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτίμηση της από τα δορυφορικά δεδομένα ήταν η ύπαρξη μετρήσεων στο πεδίο. Οι επίγειες εκτιμήσεις μπορεί να συμπεριλαμβάνουν την κάλυψη βλάστησης, θάμνων ή και μικρών δένδρων τα οποία όμως μπορεί να μην είναι ορατά από τηλεσκοπικά δεδομένα. Επομένως η δυσκολία είναι μεγάλη όταν πρόκειται να συσχετιστούν δεδομένα τηλεπισκόπησης με δεδομένα που έχουν συλλεγεί στο πεδίο (Τσακαλίδης, 2007).

Για να αξιολογηθούν οι μέθοδοι υπολογισμού FVC ήταν απαραίτητα αξιόπιστα δεδομένα αναφοράς. Για την απόκτηση δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι καταγραφής στο πεδίο, έπειτα από σχεδιασμό της δειγματοληψίας.

Σκοπός της αυτοψίας ήταν η οπτική παρατήρηση και η φωτογράφιση των περιοχών ενώ παράλληλα, σημειώθηκαν οι συντεταγμένες σε σύστημα Ε.Γ.Σ.Α. 87. Τα χαρακτηριστικά των δειγματοληπτικών επιφανειών (10X10) σχεδιάστηκαν επί της πλατφόρμας Google Earth με τυχαία δειγματοληψία αφού προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες τους, εγκαταστάθηκαν στο έδαφος με τη βοήθεια συσκευής GPS (Global Position System). Επιλέχθηκαν δεδομένα στα οποία η κάλυψη βλάστησης (Εικόνα 3.2) περιείχε ένα ευρύ φάσμα τιμών από 0% μέχρι 100%.



Εικόνα 3.2.: Κάλυψη βλάστησης σε φάσμα τιμών από 0% μέχρι 100%.
(Πηγές: Favorskaya and Jain, 2017 & Xiao and Moody, 2005)

Σε κάθε δείγμα μετρήθηκε η κάλυψη βλάστησης και καταχωρήθηκε σε:

ΚΛΑΣΗ 1:	0	< Διάσπαρτη βλάστηση	< 15%
ΚΛΑΣΗ 2:	15%	< Αραιή βλάστηση	< 25%
ΚΛΑΣΗ 3:	25%	< Πυκνή βλάστηση	< 50 %
	50%	< Πολύ Πυκνή βλάστηση	< 75 %
	75 %	< Σύμπυκνη βλάστηση	< 100%

Τα διαστήματα των κλάσεων επιλέχθηκαν για την κωδικοποίηση και ερμηνεία των ποσοτικών μόνο κριτηρίων του Π.Δ. 32/2016 για τη διάκριση εκτάσεων με κριτήριο την κάλυψη βλάστησης, σύμφωνα με το οποίο:

«Με διάσπαρτη ή σποραδική δασική βλάστηση» θεωρούνται οι εκτάσεις που καλύπτονται από φρυγανική ή δασική βλάστηση σε ποσοστό φυτοκάλυψης μικρότερο του 15% επί του συνόλου της εδαφικής επιφάνειας,

«Με αραιή βλάστηση», θεωρούνται οι εκτάσεις που σύνολο της έκτασης η κάλυψη δασικής βλάστησης δεν υπερβαίνει το 25% ,

ενώ όταν η κάλυψη βλάστησης είναι άνω του 25% η έκταση θεωρείται ότι καλύπτεται με **«πυκνή βλάστηση»**.

Οι μετρήσεις πεδίου συσχετίστηκαν στη συνέχεια με τις κατηγοριοποιημένες φασματικές τιμές των FVC 1, FVC 2 & FVCover προκειμένου να γίνει εκτίμηση για το σύνολο της περιοχής μελέτης.

3.6. Δεδομένα Πεδίου & Δορυφορικά Δεδομένα

Το επόμενο βήμα ήταν να αποδοθούν οι χωρικές πληροφορίες των αρχείων προκειμένου να ολοκληρωθεί η σύγκριση μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και των δεδομένων που προέρχονται από τις εικόνες υπολογισμού των αλγορίθμων.

Μετά την εφαρμογή των τριών μεθόδων υπολογισμού FVC, ακολούθησε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και η καταγραφή των σφαλμάτων προκειμένου να τεκμηριωθεί η καλύτερη επίδοση του αλγόριθμου. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του πίνακα ακρίβειας (Congalton, 1991). Αξιολογήθηκε η ακρίβεια υπολογισμού των κλάσεων που πρόέκυψαν από την εφαρμογή των τριών αλγορίθμων.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας ήταν αναγκαία η σύγκριση μεταξύ δυο πηγών δεδομένων. Η σχέση μεταξύ των δυο πηγών πληροφορίας (εικονοστοιχεία θεματικού χάρτη και δεδομένα πεδίου) παρουσιάστηκε στον πίνακα σφαλμάτων (error matrix) μέσω των περιγραφικών στατιστικών που παρέχει (ακρίβεια χρήστη, ακρίβεια κατασκευαστή, ολική ακρίβεια) (Foody 2002, Wu και Shao 2002).

Το πρωταρχικό στατιστικό στοιχείο του πίνακα που εξετάστηκε ήταν η συνολική ακρίβεια (**overall accuracy**). Η ακρίβεια αυτή αντιπροσωπεύει το ποσοστό των σωστά ταξινομημένων εικονοστοιχείων και ισούται με τον συνολικό αριθμό των σωστά ταξινομημένων εικονοστοιχείων κάθε κατηγορίας προς το σύνολο των εικονοστοιχείων της κάθε κατηγορίας.

Στη συνέχεια, εξετάζοντας τον πίνακα, λήφθηκαν σημαντικά στοιχεία από την ακρίβεια του χρήστη (user's accuracy), δηλαδή την πιθανότητα του εικονοστοιχείου που είχε ταξινομηθεί σε κάποια κατηγορία να αντιπροσωπεύει αυτή τη κατηγορία και στη πραγματικότητα (Γεωργοπούλου, 2013).

Οι κλάσεις όπως προέκυψαν από τις μεθόδους υπολογισμού FVC, και μετά την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ήταν δυνατό να συσχετισθούν με τα αντίστοιχα πολύγωνα του μερικά κυρωμένου Δασικού Χάρτη της περιοχής μελέτης δίνοντας ποσοστά ταύτισης των κοινών περιοχών.

3.7. Τελική Παραγωγή Προϊόντος FVC

- **Δημιουργία χωρικής ΒΔ.**

Αναπτύχθηκε γεωβάση, σε GIS σύστημα, στην οποία καταχωρήθηκαν όλες οι πληροφορίες καθώς και οι τιμές των FVC που υπολογίσθηκαν μέσω των καταλλήλων μεθόδων και επεξεργασιών των δεδομένων. Οι κατηγορίες που δημιουργήθηκαν μετατράπηκαν από ψηφιδωτά αρχεία (raster) σε διανυσματικά (πολυγωνικά) και εξήχθησαν με τη βοήθεια GIS λογισμικού (ArcMap 10.2.2.), ως διανυσματικά αρχεία για την ευκολότερη περαιτέρω επεξεργασία τους.

- **Πολύγωνα Κυρωμένου Δασικού Χάρτη**

Τα πολύγωνα του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη με κωδικούς δασικής πληροφορίας (ΔΔ, ΑΝΔΔ, ΑΔ, ΑΝΑΔ, ΠΔ, & ΑΝΠΔ) της Περιφερειακής Ενότητας Εύβοιας αποκόπηκαν στα όρια της περιοχής μελέτης και χρησιμοποιήθηκαν ως μάσκα για την απαλοιφή των εκτάσεων με κωδικούς μη δασικής πληροφορίας (ΑΑ, ΑΝΑΑ, ΔΑ & ΑΝΔΑ) από την περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να μη συμπεριληφθούν στην εφαρμογή των αλγορίθμων. Αυτή η διαδικασία συνείσφερε στην παράλειψη των επιπρόσθετων σφαλμάτων. Στο τελευταίο επίπεδο έγινε η επιμέρους κατηγοριοποίηση των δασικών πολυγώνων του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη της περιοχής μελέτης, στις κλάσεις σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βέλτιστη μέθοδο υπολογισμού FVC.

- **Παραγωγή Χαρτών FVC**

Τα αποτελέσματα αποδόθηκαν χαρτογραφικά. Τα πολύγωνα που προέκυψαν δημιούργησαν το χάρτη FVC. Μέσω του προγράμματος ArcGIS ενώθηκαν όλες οι χωρικές πληροφορίες με τις κατάλληλες εντολές για γραφική χωρική αναπαράσταση και αποτύπωση όλων των ανωτέρω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. Περιοχή μελέτης

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το νότιο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας (Χάρτης 4.1.), που εκτείνεται μεταξύ γεωγραφικού πλάτους $37^{\circ} 54'$ έως $38^{\circ} 12'$ και γεωγραφικού μήκους $24^{\circ} 08'$ έως $24^{\circ} 37'$. Η συνολική έκταση της υπό μελέτη περιοχής ανέρχεται σε 584.3964 Km^2 .

Το υψόμετρο κυμαίνεται από την επιφάνεια της θάλασσας έως 1398 μ. στην ψηλότερη κορυφή Προφήτης Ηλίας στο όρος Όχη. Οι εγκάρσιες κλίσεις του εδάφους ποικίλουν από επίπεδες μέχρι απόκρημνες. Τα πετρώματα που κυριαρχούν είναι οι σχιστόλιθοι και τα σιπολινομάρμαρα.

Το κλίμα της υπό μελέτη περιοχής υπάγεται στο μεσογειακό τύπο κλίματος με βροχοπτώσεις κατά την χειμερινή περίοδο και ανομβρία με υψηλές θερμοκρασίες κατά τη θερινή περίοδο, έχει βιοκλιματικό χαρακτήρα έντονα μεσογειακό και ανήκει στον ημίξηρο υποόροφο με ήπιο χειμώνα.



Χάρτης 4.1.: Χαρτογραφική απεικόνιση Περιοχής Μελέτης

Η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης επιλέχθηκε, εξαιτίας της πολυετούς ενασχόλησης στην περιοχή καθώς και των μεγάλων δασικών εκτάσεων που περιλαμβάνει. Τα συμπεράσματα για την εκτίμηση **FVC** (Fractional Vegetation Cover), θεωρείται ότι θα

μπορούσαν να αποδειχθούν χρήσιμα για τη δασική υπηρεσία καθώς και να συμβάλουν στην αιφορική διαχείριση των οικοσυστημάτων της Ν. Εύβοιας.

Στην υπό μελέτη περιοχή απαντάται η παρακάτω ζώνη δασικής βλάστησης κατά Αθανασιάδη (1986) και σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης Braun-Blanquet (τάξη, σύνδεσμος, φυτοκοινωνία):

Ευμεσογειακή ζώνη βλάστησης: Quercetalia ilicis, Υποζώνες: Oleon Ceratonion, Quercion ilicis, Αυξητικοί χώροι: Oleo Ceratonietum, Oleo lentiscetum, Adrachno Quercetum, Orno- Quercetum ilicis. Σε αυτούς τους αυξητικούς χώρους εξαπλώνεται αποκλειστικά η χαλέπιος πεύκη με την διάπλαση των αείφυλλων πλατύφυλλων.

Στην περιοχή μελέτης απαντώνται αείφυλλα και φυλλοβόλα πλατυφύλλα (Εικόνα 4.1.), μακία βλάστηση που εμφανίζεται στη χαμηλή παραλιακή ζώνη και εμπλουτίζεται με υγρόφιλα στοιχεία (Ostrya Carpinifolia οστριά, Fraxinus ornus φράξος, δάφνη Laurus nobilis). Λίγο ψηλότερα σχεδόν κυριαρχεί η Quercus pubescens, χνοώδης δρυς με μεμονωμένα άτομα μεγάλης ηλικίας. Είναι το δένδρο που χαρακτηρίζει το τοπίο της περιοχής μαζί με τα πλατάνια (Platanus orientalis). Στα ψηλότερα σημεία εμφανίζεται σποραδικά η καστανιά (Castanea sativa). Ο Καστανόλογγος στη νότια πλευρά των ψηλότερων κορυφών είναι μία συστάδα 500 περίπου στρεμμάτων με αιωνόβιες καστανιές που περιβάλλεται από φρυγανότοπους (<https://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/c/AT2011105/>).



Εικόνα 4.1.: Περιοχή μελέτης

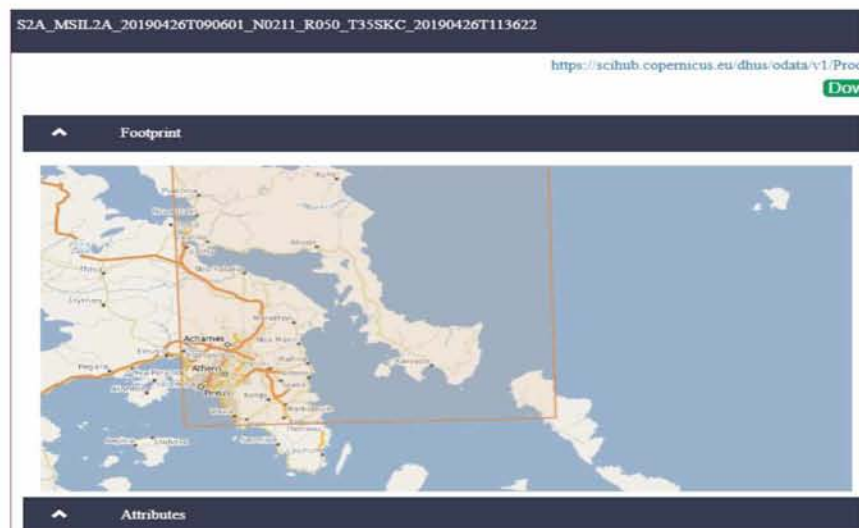
Η χαλέπιος πεύκη (Pinus halepensis) που χαρακτηρίζει τη βόρεια Εύβοια εξαπλώνεται σε πολύ μικρή έκταση στη νότια Εύβοια. Στις βόρειες ακτές συνυπάρχει η φτέρη με τις αφάνες (Sarcopoterium Spinosum). Οι ελαιώνες και οι βαθμιδωμένες καλλιέργειες της χαμηλής παραλιακής ζώνης υποχωρούν καθώς αυξάνεται το υψόμετρο και δίνουν τη θέση στους πλατανεώνες, τη δρυ και την καστανιά. Στην περιοχή εμφανίζεται μεγάλος αριθμός τύπων οικοτόπων με σπάνια και ενδημικά είδη που

καταγράφηκαν στα προγράμματα CORINE και NATURA (<https://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/c/AT2011105/>).

4.2. Δορυφορικά Δεδομένα περιοχής μελέτης

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα από το ζεύγος δορυφόρων Sentinel 2A και Sentinel 2B. Οι δορυφορικές εικόνες που επιλέχθηκαν ήταν διαθέσιμες στον ιστότοπο της E.S.A. (European Space Agency). Η πλατφόρμα βασίζεται στην υπηρεσία Sentinel-Hub της Sinergise, η οποία παρέχει προηγμένες υπηρεσίες αναζήτησης και θέασης στα δορυφορικά δεδομένα του Copernicus.

Με διερεύνηση στα μεταδεδομένα και στις εικόνες προεπισκόπησης (Εικόνα 4.2) των δεδομένων παρατήρησης της Γης που αποκτήθηκαν από τους δορυφόρους, πραγματοποιήθηκε η τελική επιλογή τους.



Εικόνα 4.2.: Copernicus Open Access Hub

Η πρώτη προτεραιότητα για την εύρεση των δορυφορικών εικόνων ήταν η υψηλή ποιότητα τους και η ημερομηνία λήψης τους, για τον εντοπισμό των φαινολογικών διαφοροποιήσεων της δασικής βλάστησης. Ο φαινολογικός κύκλος των αείφυλλων πλατύφυλλων της μελετώμενης περιοχής, είναι σχετικά σταθερός κατά τη διάρκεια του έτους, συγκριτικά με τον κύκλο των πλατύφυλλων ειδών, που δε διατηρούν το φύλλωμά τους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους γι αυτό επιλέχθηκε μια εικόνα την περίοδο της άνοιξης, (τέλη του Απριλίου 2019) με έντονη ανάπτυξη της ποώδους βλάστησης, κατά τη διάρκεια της ανθοφορίας.

Η λήψη της εικόνας πραγματοποιήθηκε στις 26 Απριλίου 2019. Επιπλέον η επιλεγμένη εικόνα έπρεπε να είναι ευκρινής, με σχεδόν μηδενική νεφοκάλυψη (<1%) ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα στη ψηφιακή ανάλυση. Η κατάσταση της ατμόσφαιρας και η φαινολογία της βλάστησης προσέδωσαν μια μοναδικότητα στην εικόνα ως προς τις συνθήκες λήψης της τη δεδομένη χρονική στιγμή. (Δημητρακόπουλος, 2010).

Το αρχείο που περιέχει τα δορυφορικά δεδομένα ακολουθεί συγκεκριμένη κωδικοποίηση:

S2A_MSIL2A_20190426T090601_N0211_R050_T35SKC_20190426T113622

Το πρώτο μέρος αφορά την ώρα και την ημερομηνία ανίχνευσης, το δεύτερο μέρος την ώρα και ημερομηνία που δημιουργήθηκε το επεξεργασμένο προϊόν, ενώ το τελευταίο μέρος 6 χαρακτήρων είναι ένα μοναδικό στοιχείο που χαρακτηρίζει το σύστημα αναφοράς UTM (MGRS – Military Grid Reference System).

Σε κάθε φάκελο των αρχείων του πρωτογενούς υλικού δορυφορικών δεδομένων, υπάρχει ένα αρχείο μεταδεδομένων με κατάληξη XML, στο οποίο περιέχονται σημαντικές πληροφορίες και στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες λήψης (Εικόνα 4.3.) της κάθε εικόνας (Συμεωνίδης Π., κ.α., 2017, Πρακτικά 2^ο Συνεδρίου).

Product

Aot retrieval accuracy: 0.0
Cloud cover percentage: 1.198908
Cloud shadow percentage: 0.216064
Dark features percentage: 0.321163
Degraded ancillary data percentage: 0.0
Degraded MSI data percentage: 0

Εικόνα 4.3.: Πληροφορίες λήψης εικόνας

Όλα τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα ήταν σε επίπεδο επεξεργασίας MSIL 2A και σε προβολικό σύστημα συντεταγμένων ελλειψοειδές UTM 34N WGS84.

4.3. Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων με χρήση του λογισμικού Snap

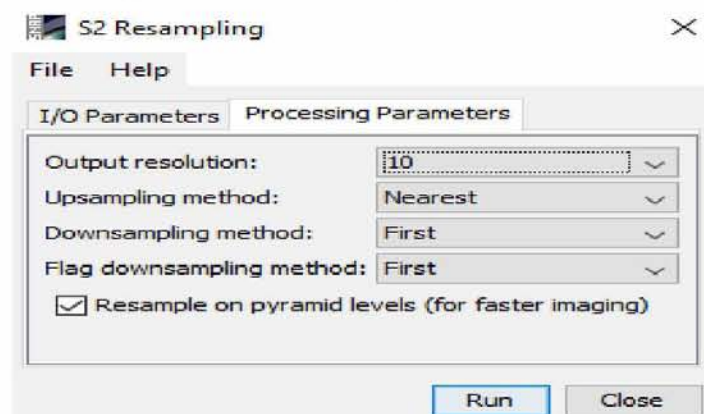
Για την επεξεργασία της εικόνας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Snap, προσφέροντας μεγάλο εύρος εργαλείων.



Εικόνα 4.4.: Όρια αρχικής δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 MSIL2A ημερομηνίας λήψης 26042019 σε natural (B4,B3,B2) και infrared (B8,B4,B3) απεικόνιση

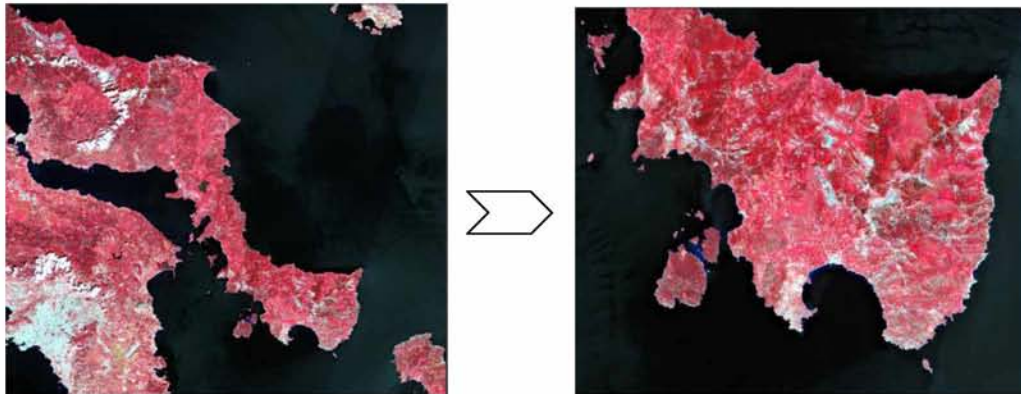
Η απεικόνιση της φασματικής πληροφορίας που περιλαμβάνουν τα κανάλια πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας συνδυασμούς τριών καναλιών (Εικόνα 4.4.), σε κάθε ένα από τα οποία αποδόθηκε ένα από τα τρία βασικά χρώματα (ερυθρό, πράσινο, ιώδες).

Αφού προστέθηκε η εικόνα Sentinel-2, επιπέδου επεξεργασίας MSIL2A, εκτελέστηκε επαναδειγματοληψία (S2 Resampling processor) και επιλέχθηκε χωρική ανάλυση 10 μέτρων οπότε τα φασματικά κανάλια με χωρική διακριτική ικανότητα 20 και 60 μ. επανασυναρμολογήθηκαν σε αυτό το μέγεθος με την επιλογή ως μεθόδου του πλησιέστερου γειτονικού σημείου (Εικόνα 4.5.).



Εικόνα 4.5.: Παράμετροι επαναδειγματοληψίας










Τα δεδομένα από την αποστολή Sentinel 2 καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις (10 000 km²), τα οποία λόγω του μεγέθους, δημιουργούν δυσκολίες στην επεξεργασία των δεδομένων. Το λογισμικό SNAP της ESA, προσφέρει μέσω της εντολής subset περιορισμό της χωρικής εμβέλειας των δεδομένων, ενώ παράλληλα επιλέγονται όλες οι ζώνες που ήταν απαραίτητες για την επεξεργασία. Ακολούθησε περικοπή της εικόνας στα όρια της περιοχής μελέτης (Εικόνα 4.6.).



Εικόνα 4.6.: Περικοπή αρχικής εικόνας στα όρια της περιοχής μελέτης

Τα προϊόντα Sentinel-2 MSIL2-A περιέχουν μάσκες σε διανυσματική μορφή (dark feature shadow, cloud shadow, cloud medium probability, cloud high probability snow or ice, water) οι οποίες δημιουργούνται ως προϊόντα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης.

Για την απομόνωση των pixel νεφών και υδάτινων επιφανειών και τη σύγκριση των δεδομένων εικονοστοιχείων σε ενιαίο πλαίσιο με κοινά δεδομένα αναφοράς, επιλέχθηκαν οι μάσκες που συνοδεύουν τα δορυφορικά δεδομένα όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 4.7., και ενώθηκαν μέσω της εντολής union με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέας μάσκας (new_mask_13) που συμπεριλάμβανε όλες τις επιμέρους. Η τελική μάσκα, με την εφαρμογή της κατάλληλης μαθηματικής έκφρασης (**Edit Expression**), μέσω της εντολής Band Maths, χρησιμοποιήθηκε για τη διατήρηση των καλύψεων χρήσεων γης της περιοχής με στόχο την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων για το βλασθητικό προφίλ της περιοχής.

Mask Manager X					
	Name	Type	Colour	Tra...	Description
<input type="checkbox"/>	sd_dark_feature_shadow	Maths		0.5	Dark feature shadow
<input type="checkbox"/>	sd_cloud_shadow	Maths		0.5	Cloud shadow
<input type="checkbox"/>	sd_water	Maths		0.5	Water
<input type="checkbox"/>	sd_cloud_medium_proba	Maths		0.5	Cloud (medium probability)
<input type="checkbox"/>	sd_cloud_high_proba	Maths		0.5	Cloud (high probability)
<input type="checkbox"/>	sd_snow_ice	Maths		0.5	Snow or Ice
<input type="checkbox"/>	new_mask_13	Maths		0.5	sd_dark_feature_shadow sd_cloud_shadow sd_water sd_cloud_medi...
<input type="checkbox"/>	new_mask_13_1	Maths		0.5	sd_dark_feature_shadow sd_cloud_shadow sd_water sd_cloud_medi...
<input type="checkbox"/>	samples	Geometry		0.5	Mask derived from geometries in 'samples'

Εικόνα 4.7.: Δημιουργία μάσκας (new_mask_13)

Για την αποφυγή παρεμβολών και σφαλμάτων από τις μετέπειτα διαδικασίες μέσω της εφαρμογής της εντολής *raster→masks→land/sea mask*, δημιουργήθηκε η νέα προς επεξεργασία εικόνα απαλλαγμένη από τις μάσκες που επιλέχθηκαν (Εικόνα 4.8.).



Εικόνα 4.8.: Απεικόνιση περιοχής μελέτης μετά την εφαρμογή ενιαίας μάσκας

4.4. Εφαρμογή Μεθοδολογίας

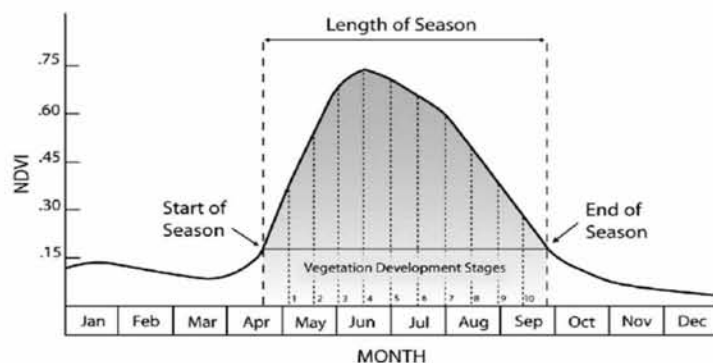
Η παράμετρος FVC αποτελεί βασική μεταβλητή σε πολλές περιβαλλοντικές μελέτες. Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν δημοσιευθεί για την ανάκτηση αυτής της παραμέτρου από δορυφορικά δεδομένα. Στη συγκεκριμένη εργασία τα δορυφορικά δεδομένα επεξεργάστηκαν κατάλληλα με τρεις διαφορετικές μεθόδους για να παραχθεί ένας ακριβής χάρτης με λεπτομερή στοιχεία για την κάλυψη βλάστησης της περιοχής. Για την εκτίμηση της Fractional Vegetation Cover (FVC) χρησιμοποιήθηκαν ως τεχνικές τηλεπισκόπησης εμπειρικές σχέσεις με τον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης NDVI. Η τρίτη μέθοδος υπολογισμού FVC βασίστηκε στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

4.4.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Υπολογίστηκε ο δείκτης NDVI της περιοχής μελέτης, με την εφαρμογή της μαθηματικής έκφρασης (4.4.1.) και την επιλογή των φασματικών καναλιών B4 (Red) και B8 (NIR) του Sentinel-2. Ο NDVI δεν έχει σταθερή τιμή (Εικόνα 4.9.) σε όλες τις εποχές του χρόνου.

$$NDVI = \frac{NIR_{B8} - R_{B4}}{NIR_{B8} + R_{B4}}$$

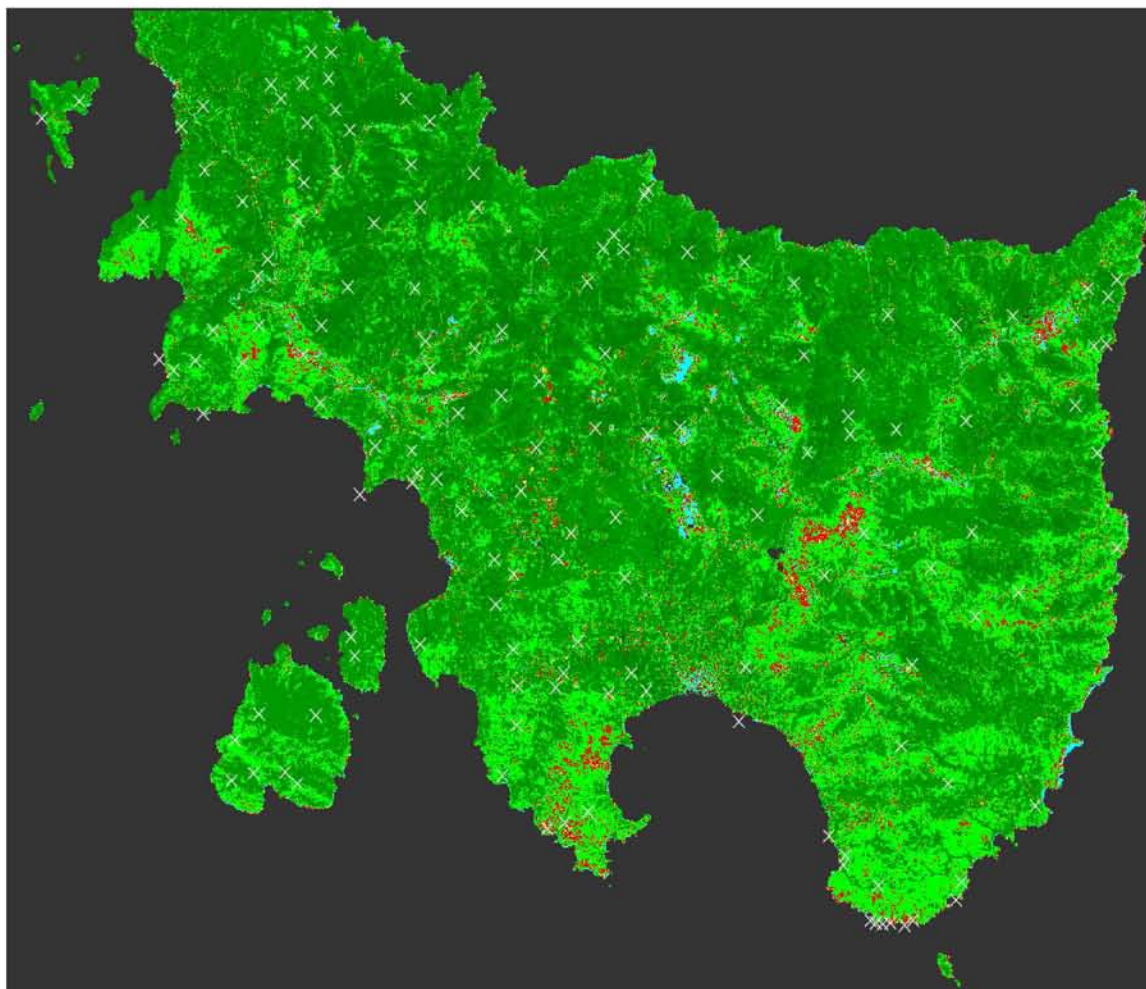
(4.4.1.)



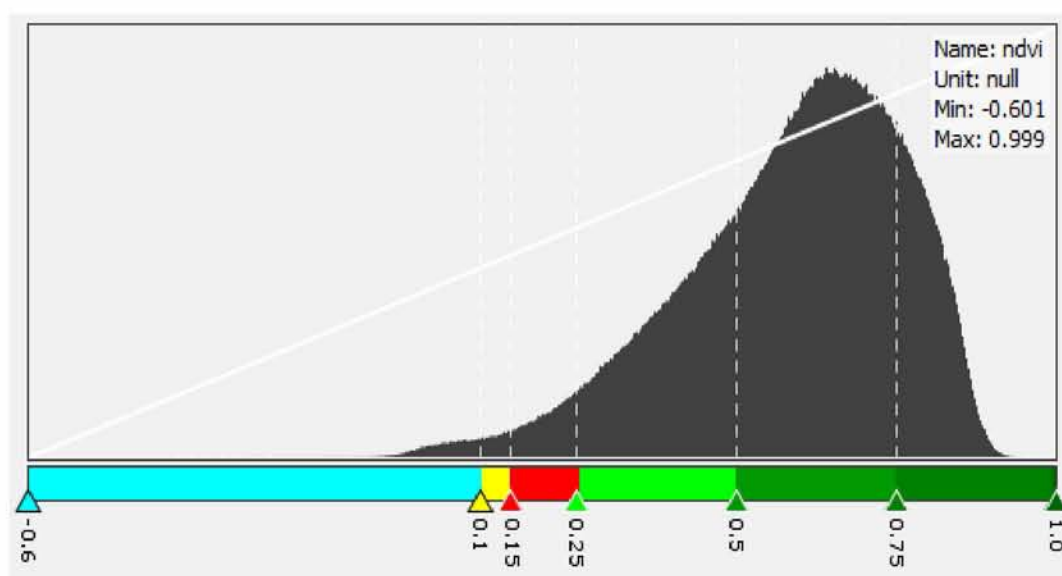
Εικόνα 4.9.: Εποχιακή διακύμανση NDVI

Επιλέχθηκε ο NDVI (Εικόνα 4.10), γιατί έχει αποδειχθεί «επαρκώς σταθερός ώστε να επιτρέπει ουσιαστικές συγκρίσεις των εποχιακών και των ετήσιων αλλαγών στην ανάπτυξη και τη δραστηριότητα της βλάστησης» (Huete et al., 2002).

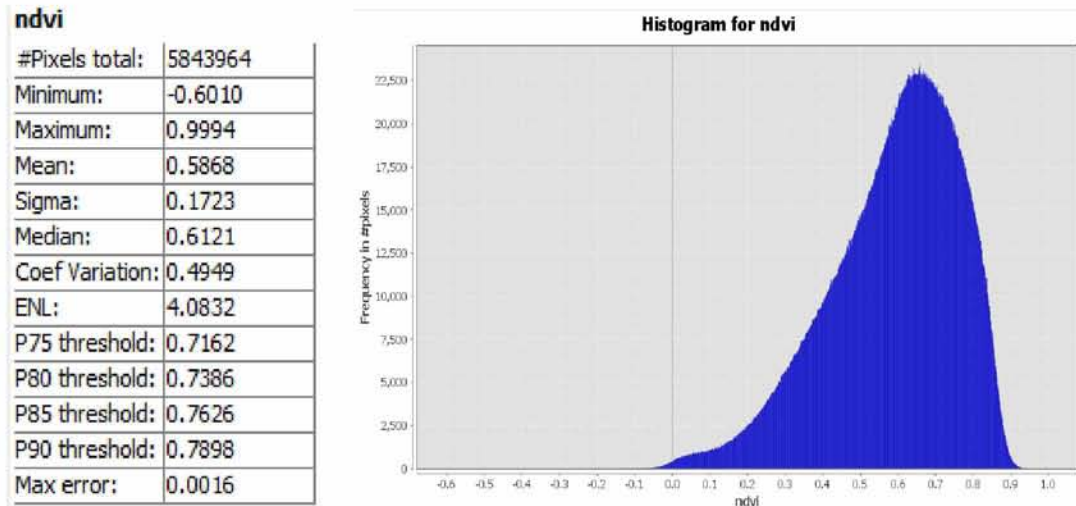
Ωστόσο, το υπόβαθρο του εδάφους ενδέχεται να προκαλέσει μεταβολές στο υπολογισμένο φαινολογικό προφίλ (Montandon and Small, 2008).



Εικόνα 4.10.: Απεικόνιση Κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI)



Στο στατιστικό διάγραμμα 4.1. του ιστογράμματος αποτυπώνεται η ποσοτική κατανομή των τιμών του NDVI, με τις συχνότητες εμφάνισης των τιμών της και τα στατιστικά δεδομένα των εικονοστοιχείων της.



Διάγραμμα 4.1.: Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος (NDVI)

4.4.2. NDVI min & max

Έχει αποδειχθεί, σύμφωνα με τη μαθηματική εξίσωση (4.4.2) των Gutman and Ignatov, (1998), ότι η Fractional Vegetation Cover FVC ακολουθεί γραμμική σχέση με το NDVI:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (4.4.2)$$

Gutman and Ignatov, (1998).

όπου τα NDVI_s=soil και NDVI_v=vegetation αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικές τιμές NDVI για γυμνό έδαφος (FVC = 0) και βλάστηση (FVC = 1), αντίστοιχα.

Κρίσιμο σημείο κατά την εφαρμογή της εξίσωσης (4.4.2) αποτέλεσε η σωστή αναγνώριση των τιμών NDVI_s και NDVI_v, οι οποίες είναι μοναδικές και ειδικές για την κάθε περιοχή και για την κάθε εποχή.

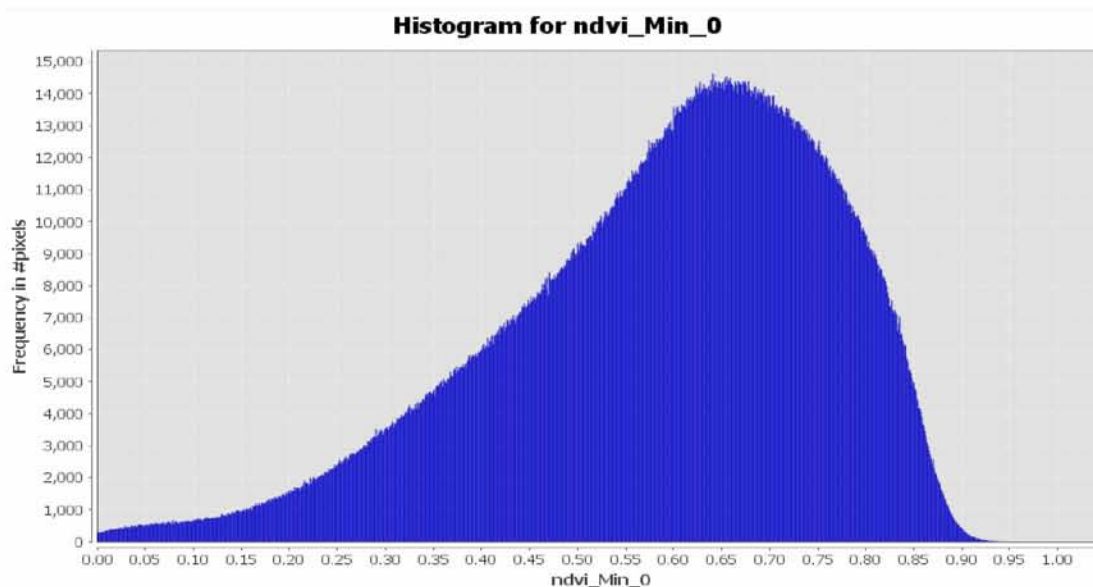
Σύμφωνα με δημοσιευμένες μελέτες, όπως αναφέρουν οι Jimenez-Munoz et.al (2009), τιμές δείχνουν ότι η τιμή NDVI_s κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0,2 και πιθανότατα μεταξύ 0,1 και 0,2 σύμφωνα με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη βιβλιοθήκη ASTER. Αυτό υποδηλώνει ότι μια μέση τιμή NDVI_s = 0,15 θα μπορούσε να είναι κατάλληλη στις περισσότερες περιπτώσεις. Χρησιμοποιώντας τα δείγματα βλάστησης

που περιλαμβάνονται στη φασματική βιβλιοθήκη ASTER (εξαιρουμένου του δείγματος ξηρού γρασιδιού), έχει ληφθεί τιμή $NDVI_v = 0,801 \pm 0,012$. Συνεπώς, όταν δεν υπάρχει εκ των προτέρων γνώση των τιμών $NDVI_s$ και $NDVI_v$, οι μέσες τιμές 0,15 και 0,9 θα μπορούσαν να θεωρηθούν αντίστοιχα ως αποδεκτές.

Η άλλη προσέγγιση συνίσταται στην ανάκτηση του $NDVI_s$ και $NDVI_v$ από το ιστόγραμμα $NDVI$. Όταν υπάρχουν αρκετά γυμνά εδάφη και εικονοστοιχεία πλήρους βλάστησης στην εικόνα, το ιστόγραμμα $NDVI$ εμφανίζει δύο χαρακτηριστικές κορυφές που μπορούν να συσχετιστούν με τις τιμές $NDVI_s$ και $NDVI_v$. Η πρώτη κορυφή σε χαμηλές τιμές $NDVI$ μπορεί να αναγνωριστεί ως $NDVI_s$, ενώ η δεύτερη κορυφή σε υψηλές τιμές $NDVI$ μπορεί να αναγνωριστεί ως $NDVI_v$ (Jimenez-Munoz et.al, 2009).

Προσεγγίσεις που επίσης έχουν προταθεί για την ανάκτηση των τιμών $NDVI_s$ & $NDVI_v$ είναι από τα στατιστικά στοιχεία της εικόνας. Μία από αυτές τις προσεγγίσεις συνίσταται στην επιλογή των ελάχιστων και μέγιστων τιμών $NDVI$ για ολόκληρη τη εικόνα ως $NDVI_s$ και $NDVI_v$. Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει ότι εικονοστοιχεία με $FVC = 0$ και εικονοστοιχεία με $FVC = 1$ υπάρχουν σε ολόκληρη την εικόνα. Η υπόθεση $NDVI_v = NDVI_{max}$ θα μπορούσε να θεωρηθεί κατάλληλη, ωστόσο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όταν λαμβάνεται $NDVI_s = NDVI_{min}$, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις αυτές οι τιμές θα μπορούσαν να είναι αρνητικές λόγω της ύπαρξης υδάτινων σωμάτων ή άλλων επιφανειών με αρνητικές τιμές $NDVI$ (Jimenez-Munoz et.al, 2009).

Στην παρούσα μελέτη σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα της εικόνας οι τιμές $NDVI$ παρουσίασαν ελάχιστη τιμή $NDVI_{min} = -0,6010$ και μέγιστη $NDVI_{max} = 0,9994$. Για την εφαρμογή της εξίσωσης (4.4.2) και για την ταύτιση των $NDVI_s = NDVI_{min}$ επιλέχθηκε να απομακρυνθούν οι αρνητικές τιμές που αντιπροσωπεύουν υδάτινες επιφάνειες. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε μια μάσκα νερού που να ανταποκρίνεται στις συνθήκες της περιοχής. Ως κατώφλι (threshold) για την αφαίρεση των αρνητικών τιμών ορίστηκε μετά από οπτική παρατήρηση της εικόνας και αλληπάλληλες δοκιμές η τιμή $NDVI_s = NDVI_{min} = 0$, θεωρώντας ότι επιτύχανε τον καλύτερο διαχωρισμό περιοχών με και χωρίς υδάτινο στοιχείο. Ως $NDVI_v = NDVI_{max}$ επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή των στατιστικών της εικόνας 0,9994. Έτσι προέκυψε το νέο ιστόγραμμα και τα νέα στατιστικά στοιχεία της εικόνας (Διάγραμμα 4.2.).

**ndvi_Min_0**

#Pixels total:	5836899
Minimum:	0.0000
Maximum:	0.9994
Mean:	0.5875
Sigma:	0.1710
Median:	0.6136
Coef Variation:	0.4934
ENL:	4.1077
P75 threshold:	0.7166
P80 threshold:	0.7396
P85 threshold:	0.7636
P90 threshold:	0.7896
Max error:	9.9944E-4

Διάγραμμα 4.2.: Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος (NDVI_Min_Max)

4.4.3. Υπολογισμός FVC

Αναπτύχθηκαν τεχνικές για να συμπεριληφθεί η Fractional Vegetation Cover (FVC) ως πρόσθετη μεταβλητή μοντέλου που εκτιμήθηκε από τον μετρούμενο κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης (NDVI) με την εφαρμογή των μεθόδων:

4.4.3.1. FVC 1 κατά Gutman and Ignatov, (1998)

Οι Gutman and Ignatov, 1998 ευνόησαν τη γραμμική σχέση μεταξύ NDVI και FVC αντί του τετραγώνου που φαίνεται στην Εξίσωση:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (4.4.3.1.)$$

Υπολογισμός FVC1 κατά Gutman and Ignatov, (1998)

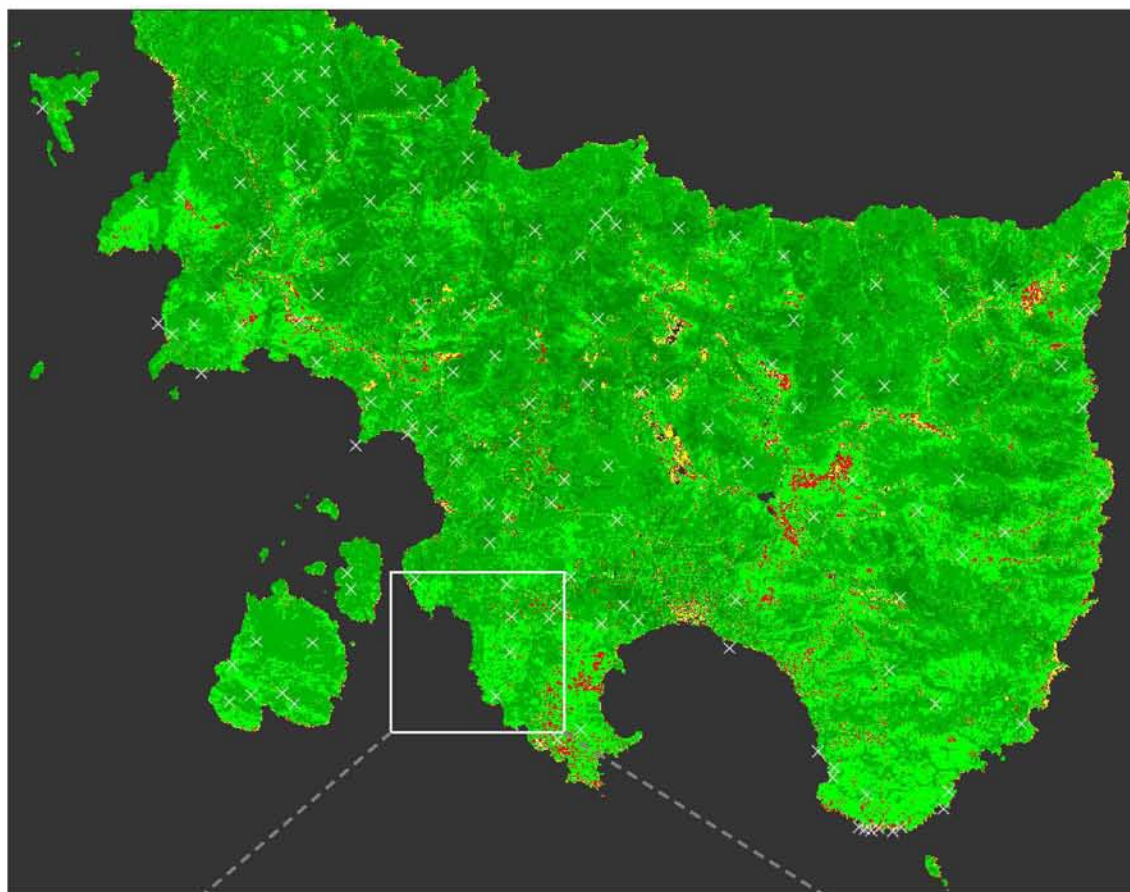
4.4.3.2. FVC 2 κατά Carlson and Ripley, (1997)

$$FVC = (NDVI^*)^2 \quad (4.4.3.2.)$$

Υπολογισμός FVC2 κατά Carlson and Ripley, (1997)

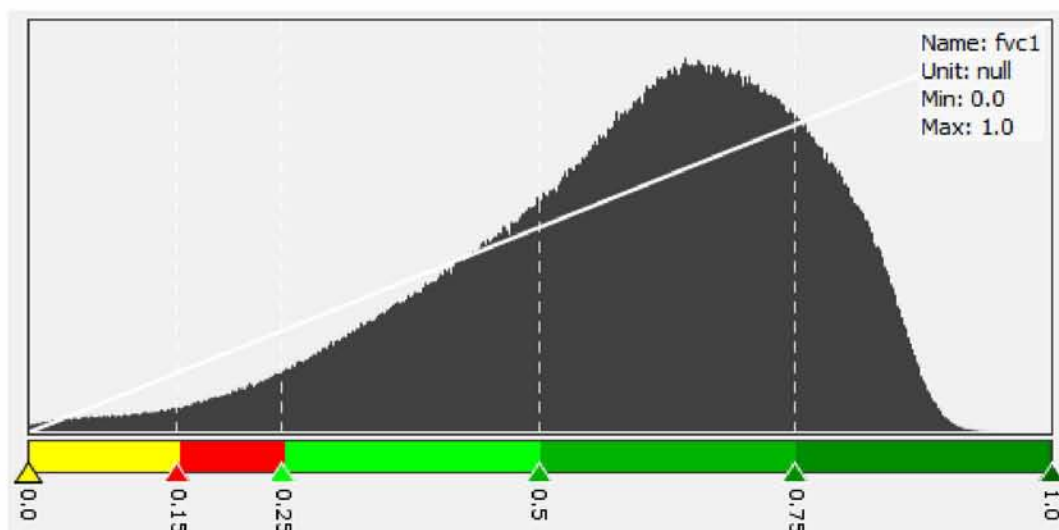
Με την εφαρμογή των εξισώσεων (4.4.3.1.) & (4.4.3.2.) υπολογίστηκαν τα **FVC 1**, **FVC 2** και αποδόθηκαν χωρικά. Τα αποτελέσματα βαθμονομήθηκαν σε κλάσεις (Εικόνες 4.11.&4.12) και κατηγοριοποιήθηκαν σε χρωματική κλίμακα. Το εύρος τιμών κυμάνθηκε από 0 έως 1.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Δ.4.3. - Δ.4.4.) παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δύο προϊόντων FVC1 & FVC2 (Συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων, ελάχιστες, μέσες και μέγιστες τιμές) καθώς και τα ιστογράμματά τους, δίνοντας τη δυνατότητα για μια σύντομη στατιστική περιγραφή των εικόνων.

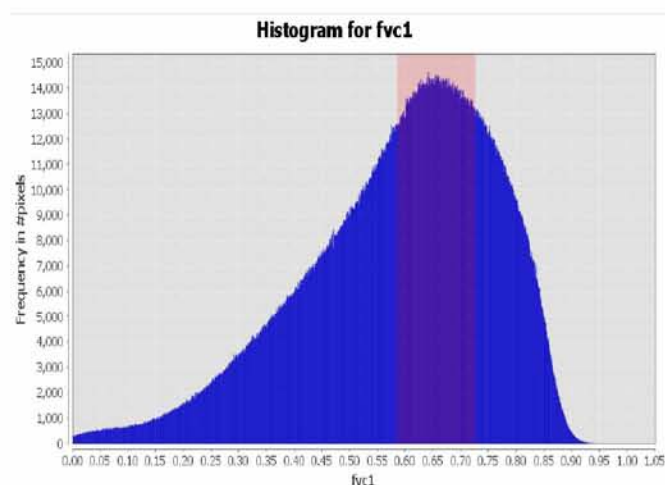


Εικόνα 4.11.: Υπολογισμός FVC 1

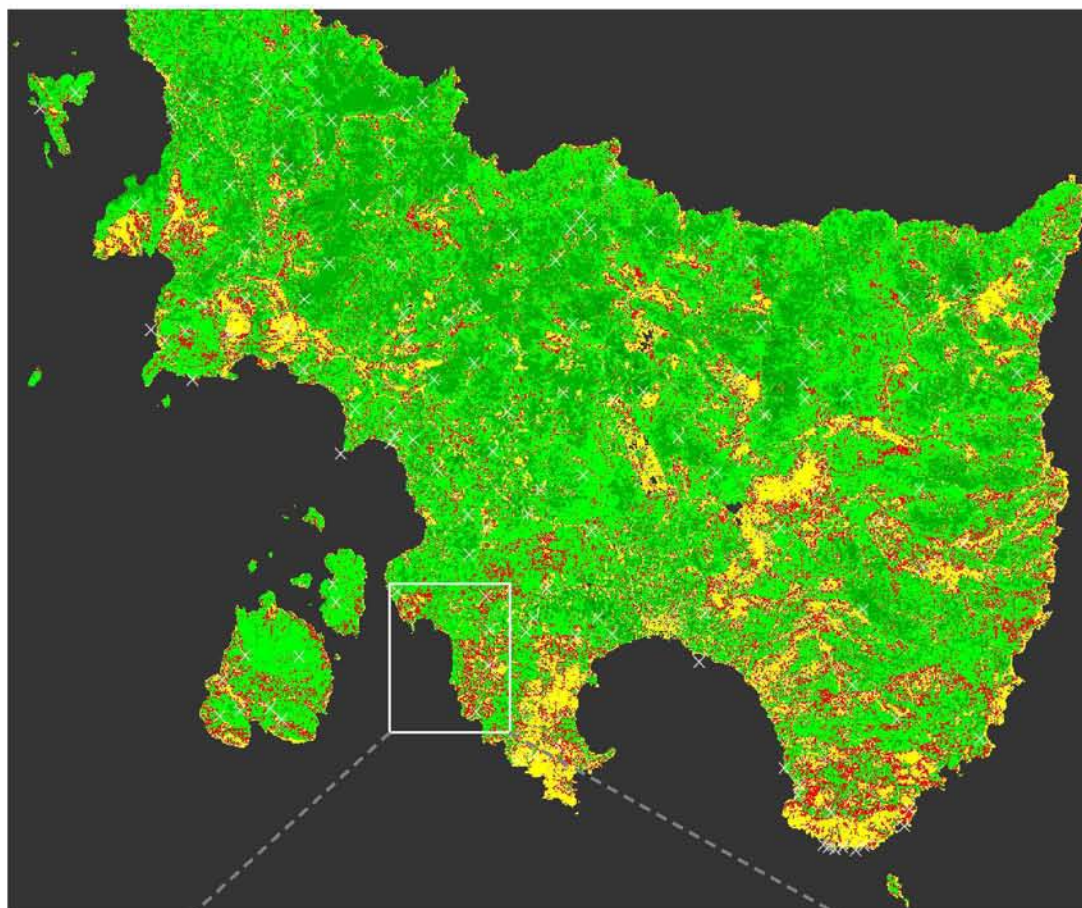


**fvc1**

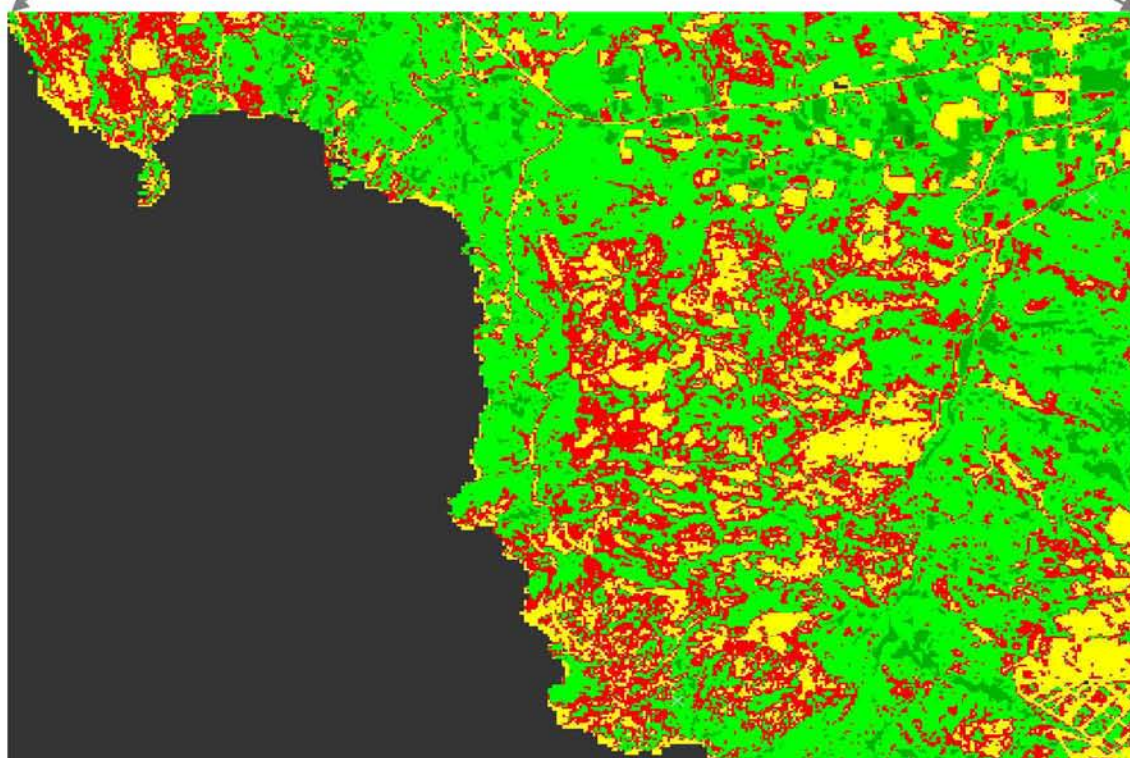
#Pixels total:	5836899
Minimum:	0.0000
Maximum:	1.0000
Mean:	0.5879
Sigma:	0.1711
Median:	0.6140
Coef Variation:	NaN
ENL:	NaN
P75 threshold:	0.7170
P80 threshold:	0.7400
P85 threshold:	0.7640
P90 threshold:	0.7900
Max error:	0.0010

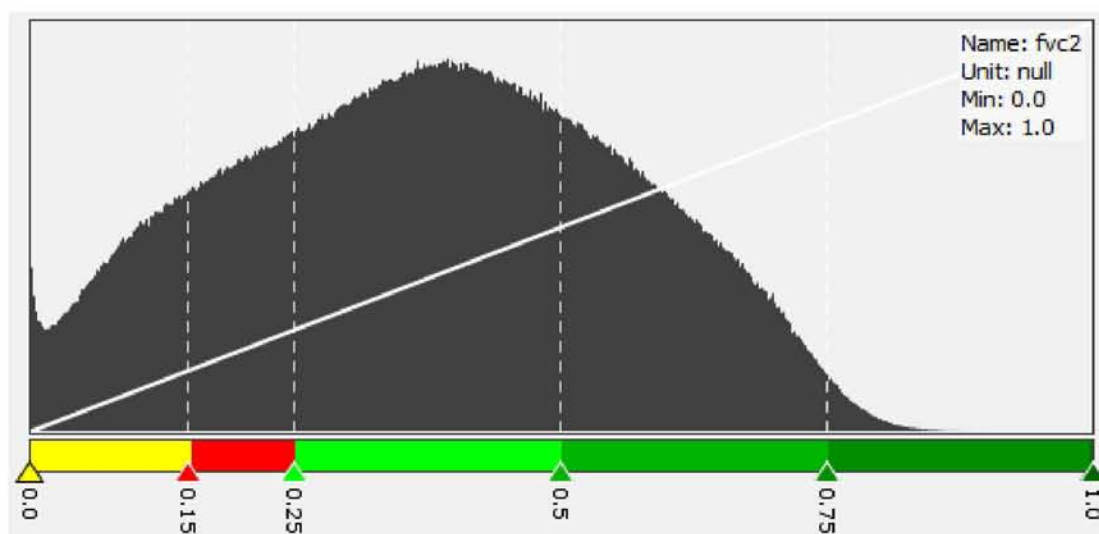


Διάγραμμα 4.3.: Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος *FVC 1*



Εικόνα 4.12.: Υπολογισμός FVC 2

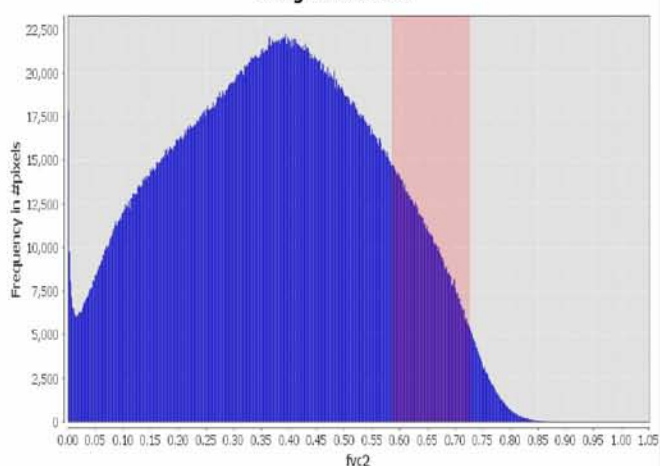




fvc2

#Pixels total:	5836899
Minimum:	0.0000
Maximum:	1.0001
Mean:	0.3749
Sigma:	0.1850
Median:	0.3770
Coef Variation:	NaN
ENL:	NaN
P75 threshold:	0.5137
P80 threshold:	0.5469
P85 threshold:	0.5821
P90 threshold:	0.6250
Max error:	0.0020

Histogram for fvc2



Διάγραμμα 4.4.: Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος *FVC 2*

4.4.3.3. FVCover (Neural Network)

Ως τρίτη μέθοδος υπολογισμού του FVC επιλέχθηκε η τεχνική που βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα.

Για τον υπολογισμό του FVCover από την εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου (Εικόνα 4.13.) έτσι όπως παρέχεται από το λογισμικό Snap απαιτήθηκαν:

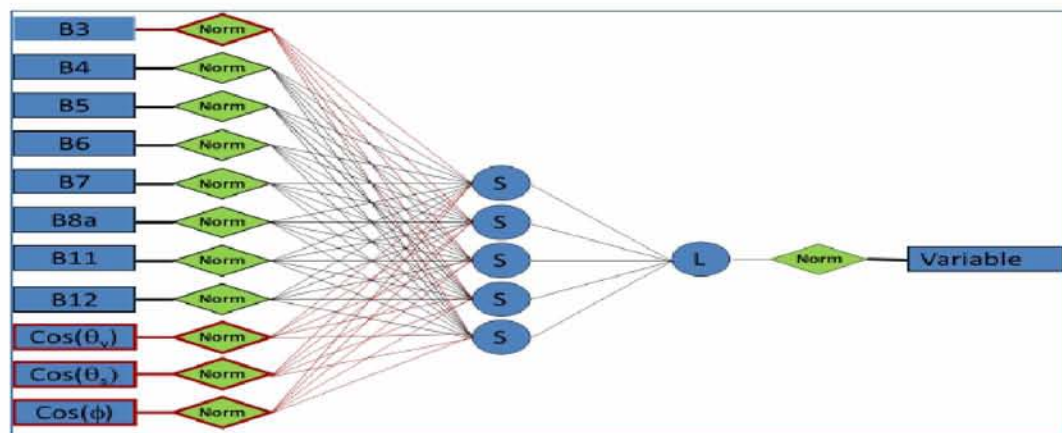
ένα επίπεδο εισόδου, κατασκευασμένο από 11 κανονικοποιημένα δεδομένα εισόδου: B3, B4, B5, B6, B7, B8a, B11, B12, $\cos(\text{view_zenith})$, $\cos(\text{sun_zenith})$, $\cos(\text{relative_azimuth_angle})$

ένα κρυφό επίπεδο με 5 νευρώνες με εφαπτομενικές λειτουργίες μεταφοράς σιγμοειδούς

ένα στρώμα εξόδου με γραμμική λειτουργία μεταφοράς

«Ο πραγματικός αλγόριθμος που εκτελείται στο SNAP εκτελεί το βήμα πρόβλεψης του νευρικού δικτύου, από το σύνολο προκαθορισμένων συντελεστών που υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της φάσης της κατάρτισης.» (ESA, SNAP, Toolbox –help).

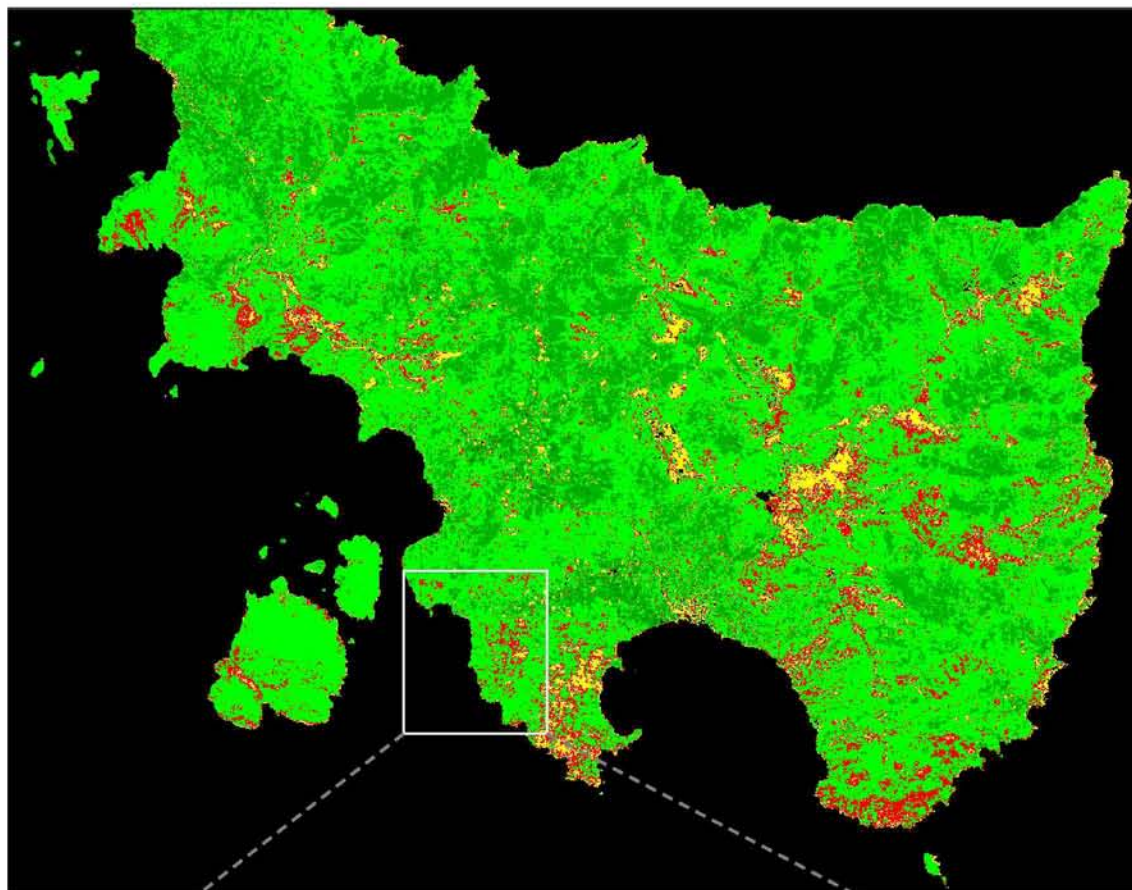
Το δίκτυο απαιτεί 65 συνοπτικούς συντελεστές και 6 συντελεστές μεροληψίας για προσαρμογή (Weiss and Baret, 2016).



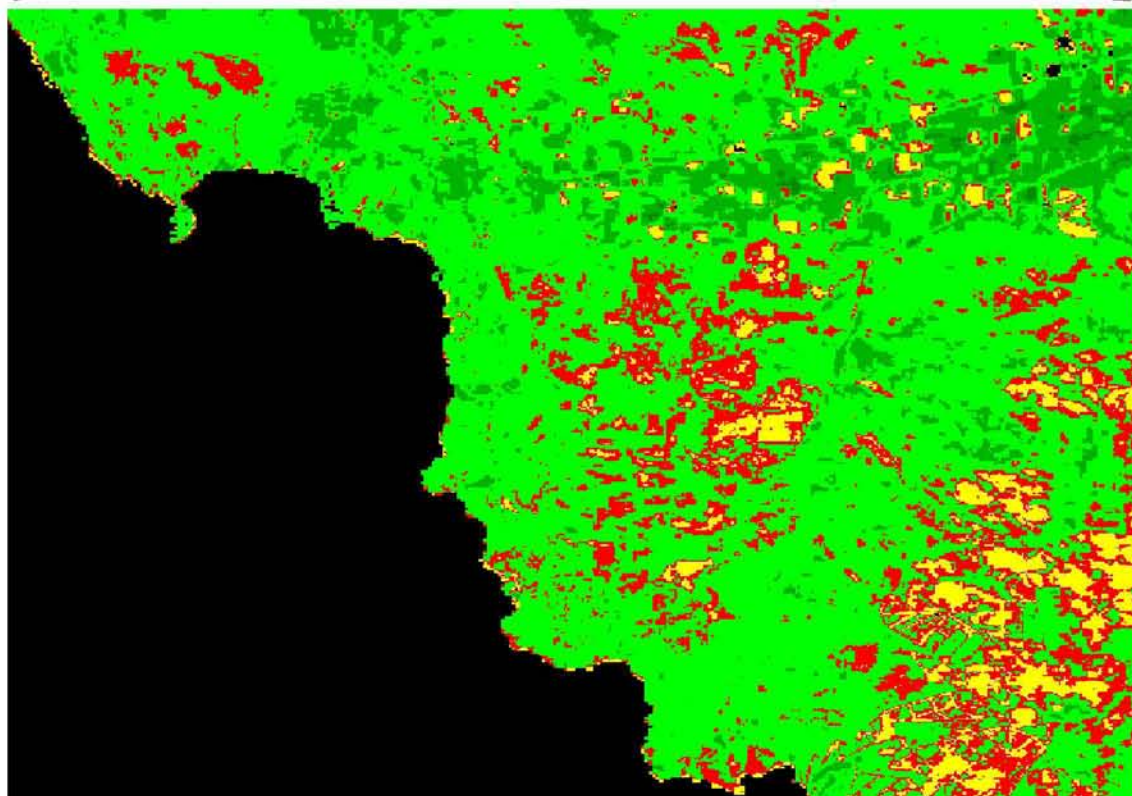
Εικόνα 4.13.: Δομή Νευρωνικού Δικτύου

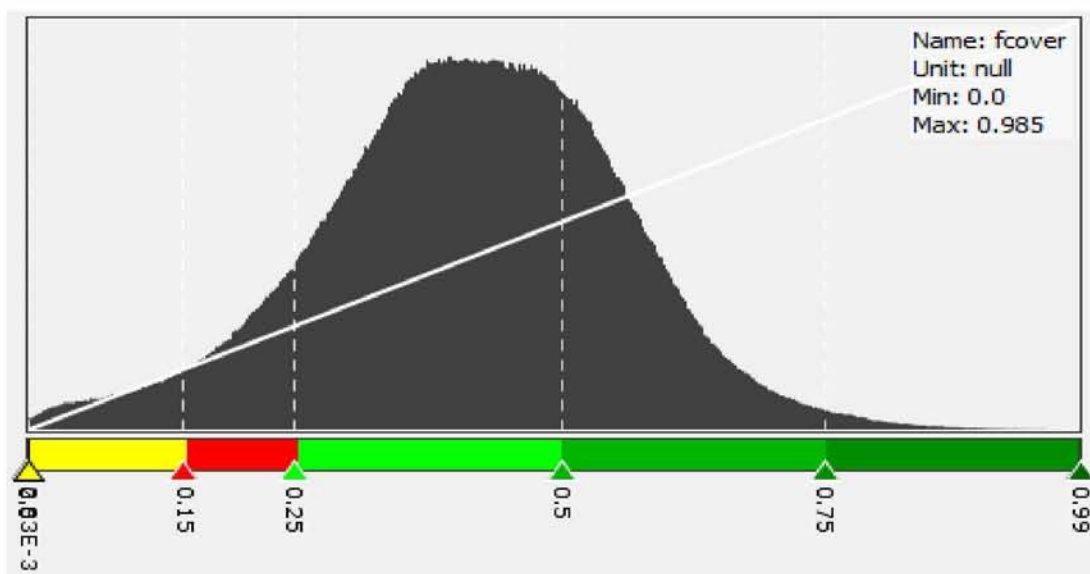
Πηγή: (Weiss and Baret, 2016)

Μετά την εφαρμογή όλων των ανωτέρω παραμέτρων στο πρόγραμμα Snap δημιουργήθηκε το **FVCover** (Εικόνα 4.14.).

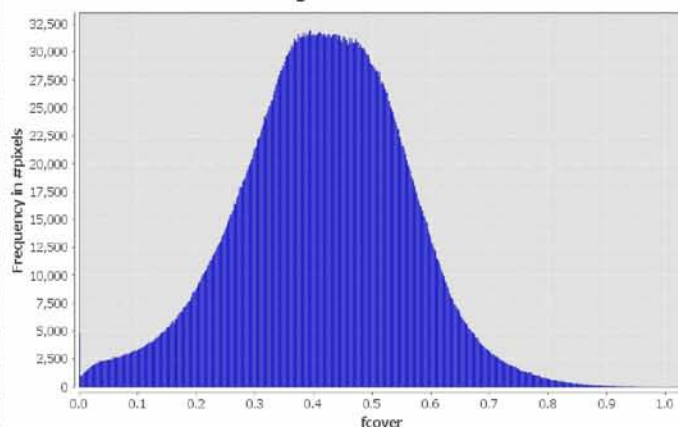


Εικόνα 4.14.: Υπολογισμός *FCover* (neural network)



**fcover**

#Pixels total:	5843964
Minimum:	0.0000
Maximum:	0.9851
Mean:	0.4137
Sigma:	0.1406
Median:	0.4175
Coef Variation:	NaN
ENL:	NaN
P75 threshold:	0.5098
P80 threshold:	0.5291
P85 threshold:	0.5541
P90 threshold:	0.5849
Max error:	0.0019

Histogram for fcover

*Διάγραμμα 4.5.: Υπολογισμός στατιστικών στοιχείων και απεικόνιση ιστογράμματος **FCover** (Neural Network)*

Στη συνέχεια τα δεδομένα μετατράπηκαν από το Παγκόσμιο Σύστημα WGS 84 στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ'87), πραγματοποιήθηκε εξαγωγή των FVC 1, FVC 2, FCover σε μορφότυπο *GeoTiff/BigTiff* και εισήχθηκαν σε λογισμικό GIS για τη δημιουργία των τελικών χαρτών.

4.5. Μετρήσεις δεδομένων πεδίου

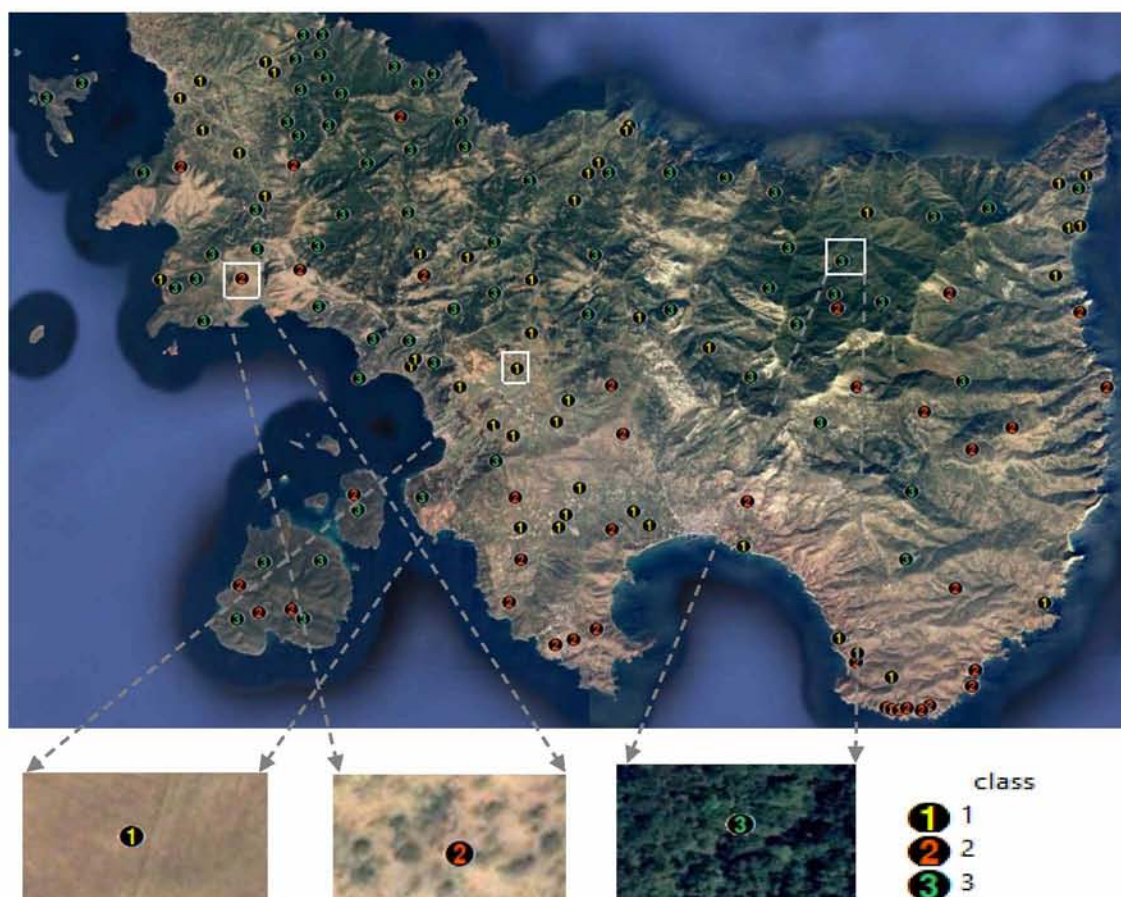
Η εκτίμηση *FVC* με τη χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης έπρεπε να επαληθευτεί με επιτόπια έρευνα. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό *FVC* από το *NDVI* και το *Neural Network* δοκιμάστηκαν και βαθμονομήθηκαν στη συνέχεια σε σχέση με τις *in situ* μετρήσεις.

Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται κατά τη λήψη δεδομένων πεδίου όπως αναφέρονται από τους Congalton και Green (1999) και από τον McCoy (2005), συνοψίζονται:

- στο μεγάλο κόστος και στο βαθμό δυσκολίας για τη συλλογή δεδομένων στο πεδίο,
- στη χρονική ταύτιση της λήψης των δεδομένων αναφοράς στο πεδίο και της λήψης της δορυφορικής εικόνας,
- στην ακριβή χωρική μεταφορά των δειγματοληπτικών επιφανειών στα τηλεσκοπικά δεδομένα,
- στην τήρηση των αρχών της αντικειμενικότητας και της αμεροληψίας του δείγματος όταν γίνεται η συλλογή των δεδομένων κάλυψης βλάστησης στο πεδίο
- στη δυσκολία εκτίμησης της κάλυψης βλάστησης από το έδαφος κάτω από την κομοστέγη (μεγάλο σφάλμα εκτίμησης)

Οικονομικοί λόγοι (αλλά και οικονομίας χρόνου) απέκλεισαν τον έλεγχο όλων των μονάδων του χάρτη, οπότε ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός αριθμού δειγματοληπτικών μονάδων. Τα δείγματα έπρεπε να είναι αντιπροσωπευτικά και αμερόληπτα (Τσακαλίδης, 2007). Οι αρχές αυτές τηρήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η επιλογή επαρκούς αριθμού δειγμάτων εκπαίδευσης (*training samples*) και δειγμάτων ελέγχου (*validation samples*), καθώς και η αντιπροσωπευτικότητά τους, ήταν πολύ κρίσιμη (Lu and Weng, 2007).

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από το Google Earth (Χάρτης 4.2.) της πιο πρόσφατης ημερομηνίας, για την προεργασία της περιοχής μελέτης, τη σωστή διασπορά των δεδομένων πεδίου, καθώς και τη φωτοερμηνεία για την τελική επιλογή τους. Ακολούθησε επίσκεψη στην περιοχή για λήψη βοηθητικών φωτογραφιών και επιτόπιων μετρήσεων. Οι εικόνες Google Earth αποδείχτηκαν πολύ αποτελεσματικές για την αναγνώριση των χαρακτηριστικών του εδάφους ώστε να ληφθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα εκπαίδευσης και ελέγχου.



Χάρτης 4.2.: Προεργασία Διασποράς Δεδομένων πεδίου στις κλάσεις 1,2,3, Δορυφορική Εικόνα Google Earth

Ο αριθμός των δεδομένων πεδίου που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο ακρίβειας ήταν ένας σημαντικός παράγοντας που έπρεπε να ληφθεί υπόψη. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία και λήφθηκαν δεδομένα πεδίου στην περιοχή μελέτης το χρονικό διάστημα από 2-5-2019 έως 9-05-2019. Για τα δεδομένα μέτρησης λήφθηκαν οι συντεταγμένες των κέντρων των δειγμάτων στο πεδίο, σε επιφάνειες 10X10 χρησιμοποιώντας Global Positioning System (GPS) και ταυτόχρονα εφαρμόστηκε η μέθοδος της κατηγοριοποίησης τους για την κάλυψη της βλάστησης:

ΚΛΑΣΗ 1:	0	< Διάσπαρτη βλάστηση	< 15%
ΚΛΑΣΗ 2:	15%	< Αραιή βλάστηση	< 25%
ΚΛΑΣΗ 3:	25%	< Πυκνή βλάστηση	< 50 %
	50%	< Πολύ Πυκνή βλάστηση	< 75 %
	75 %	< Σύμπυκνη βλάστηση	< 100%

Το μέγεθος του δείγματος καθορίστηκε στις 148 δειγματοληπτικές επιφάνειες. Τα κέντρα των δεδομένων πεδίου που μετρήθηκαν οι συντεταγμένες τους παρουσιάζονται

σε αναλυτικό Πίνακα του Παραρτήματος. Ο συνολικός αριθμός δεδομένων πεδίου ανά κατηγορία απεικονίζεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1.: Κατανομή Δεδομένων Πεδίου σε κλάσεις

A/A	Αριθμός Δεδομένων πεδίου ανά κατηγορία	ΚΛΑΣΕΙΣ
1	44	1
2	38	2
3	66	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

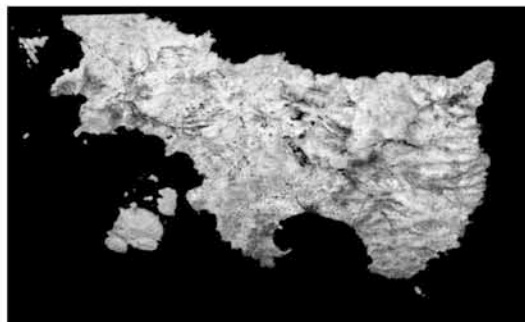
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. Κατηγοριοποίηση FVC 1, FVC 2 & FVCover

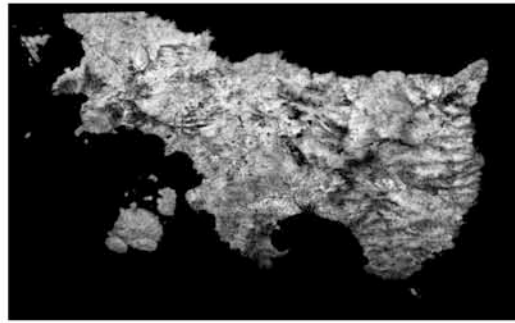
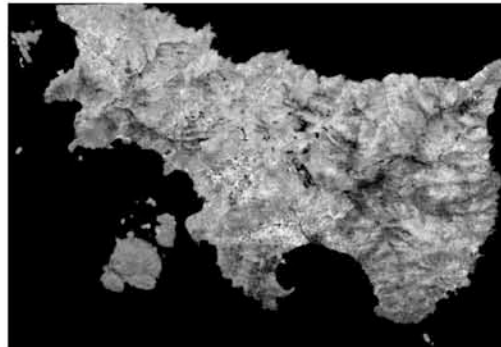
Η παραγωγή των θεματικών χαρτών επιτεύχθηκε με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για τη δημιουργία χάρτη **FVC** (Fractional Vegetation Cover).

Για την επεξεργασία και την ανάλυση των δεδομένων, επιλέχθηκε το Σύστημα Διαχείρισης Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGis, το οποίο παρέχει ένα ευρύ σύνολο εργαλείων για την αποτελεσματική διαχείριση των δεδομένων. Για τη χωρική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η Desktop εφαρμογή ArcMap 10.2.2. της εταιρείας ESRI. Το σύστημα αναφοράς που επιλέχθηκε για την αναπαράσταση των γεωγραφικών δεδομένων ήταν το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ'87), που έχει ορισθεί με βάση τα πλέον πρόσφατα γεωδαιτικά στοιχεία και παρέχει ένα ενιαίο και μοναδικό σύστημα συντεταγμένων για τον Ελλαδικό χώρο. Δίνει τη δυνατότητα άμεσης εφαρμογής του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού θέσης (Global Positioning System, GPS), αφού είναι απόλυτα συμβατό με το Παγκόσμιο Σύστημα WGS 84 που χρησιμοποιείται από το GPS.

Στο περιβάλλον των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, δημιουργήθηκε μια γεωβάση (Geodatabase), ως μια μορφή αποθήκευσης χωρικών δεδομένων, ειδικά σχεδιασμένη για το ArcGis, αφού αποτελείται από ένα σύνολο ομάδων οντοτήτων δεδομένων. Με τη βοήθεια της γεωβάσης, δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης απλών έως και πολύπλοκων μοντέλων γεωγραφικών δεδομένων.

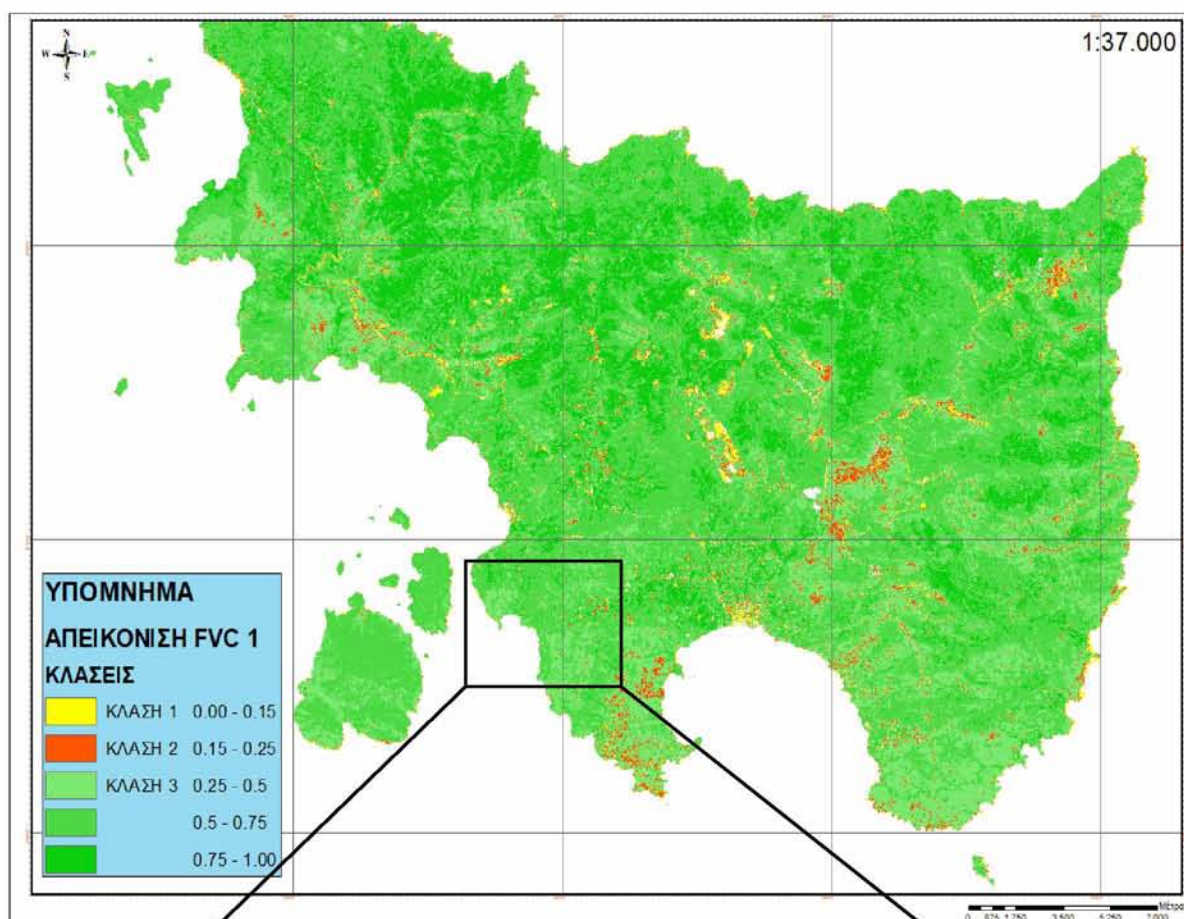


FVC1

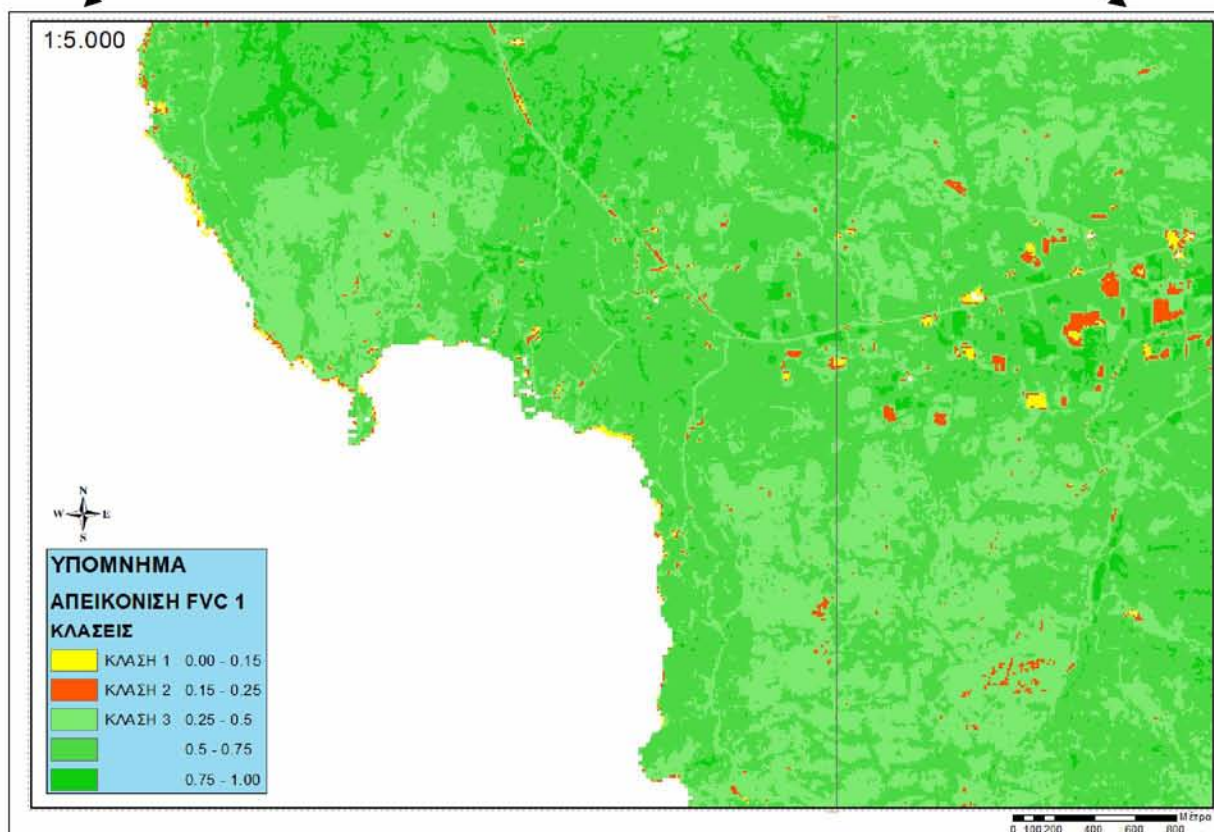
**FVC2****FVCover***Εικόνα 5.1.: Υπολογισμός Στατιστικών των εικονοστοιχείων των FVC 1, FVC 2, FVCover*

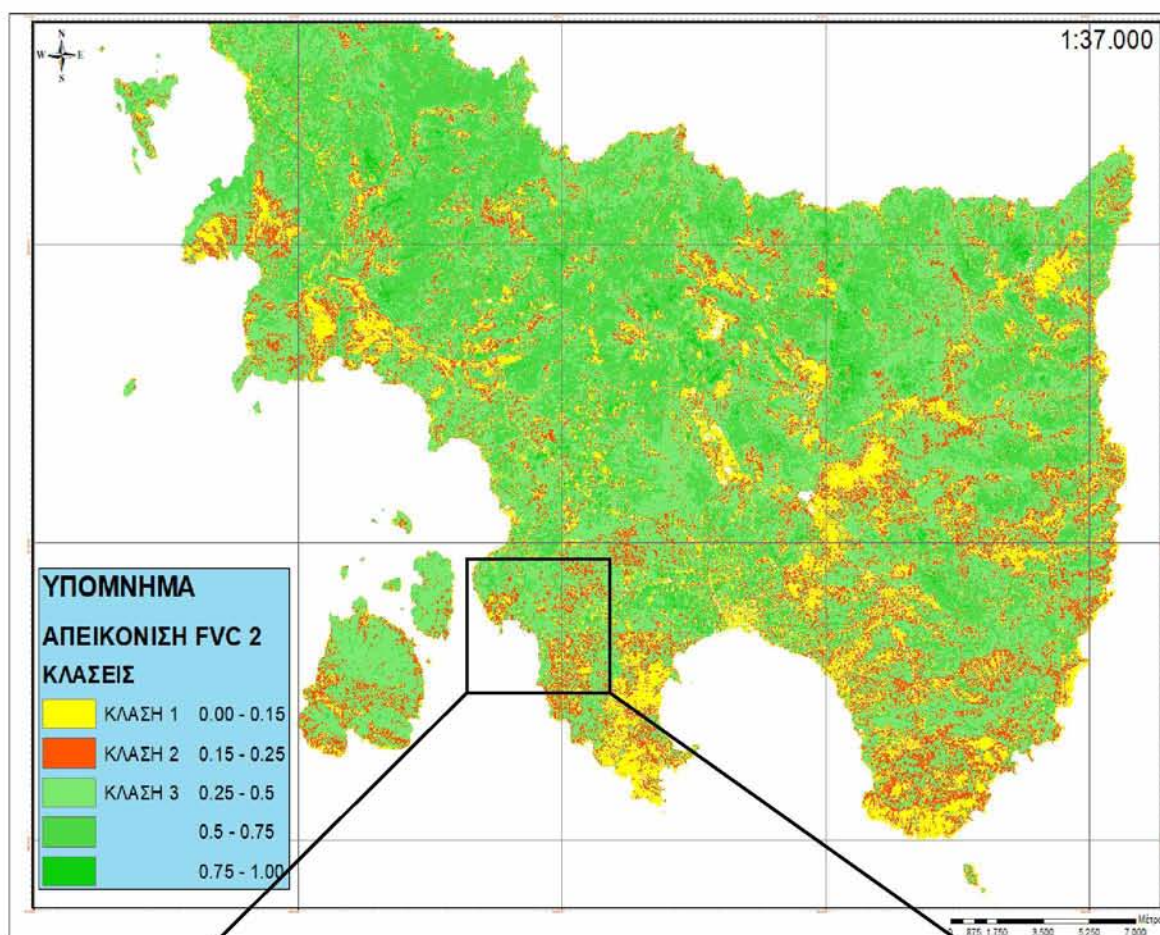
Μετά τον επαναυπολογισμό των στατιστικών στοιχείων των FVC 1, FVC 2, FVCover (Εικόνα 5.1.), ακολούθησε η κωδικοποίηση των τριών προϊόντων FVC: **FVC1, FVC2, FVCover** στις ακόλουθες κατηγορίες (Χάρτες 5.1., 5.2. & 5.3.):

- ΚΛΑΣΗ 1: $0.0 < \mathbf{FVC\ 1, FVC\ 2, FVCover} < 0.15$
 ΚΛΑΣΗ 2: $0.15 < \mathbf{FVC\ 1, FVC\ 2, FVCover} < 0.25$
 ΚΛΑΣΗ 3: $0.25 < \mathbf{FVC\ 1, FVC\ 2, FVCover} < 0.50$
 $0.50 < \mathbf{FVC\ 1, FVC\ 2, FVCover} < 0.75$
 $0.75 < \mathbf{FVC\ 1, FVC\ 2, FVCover} < 1.00$

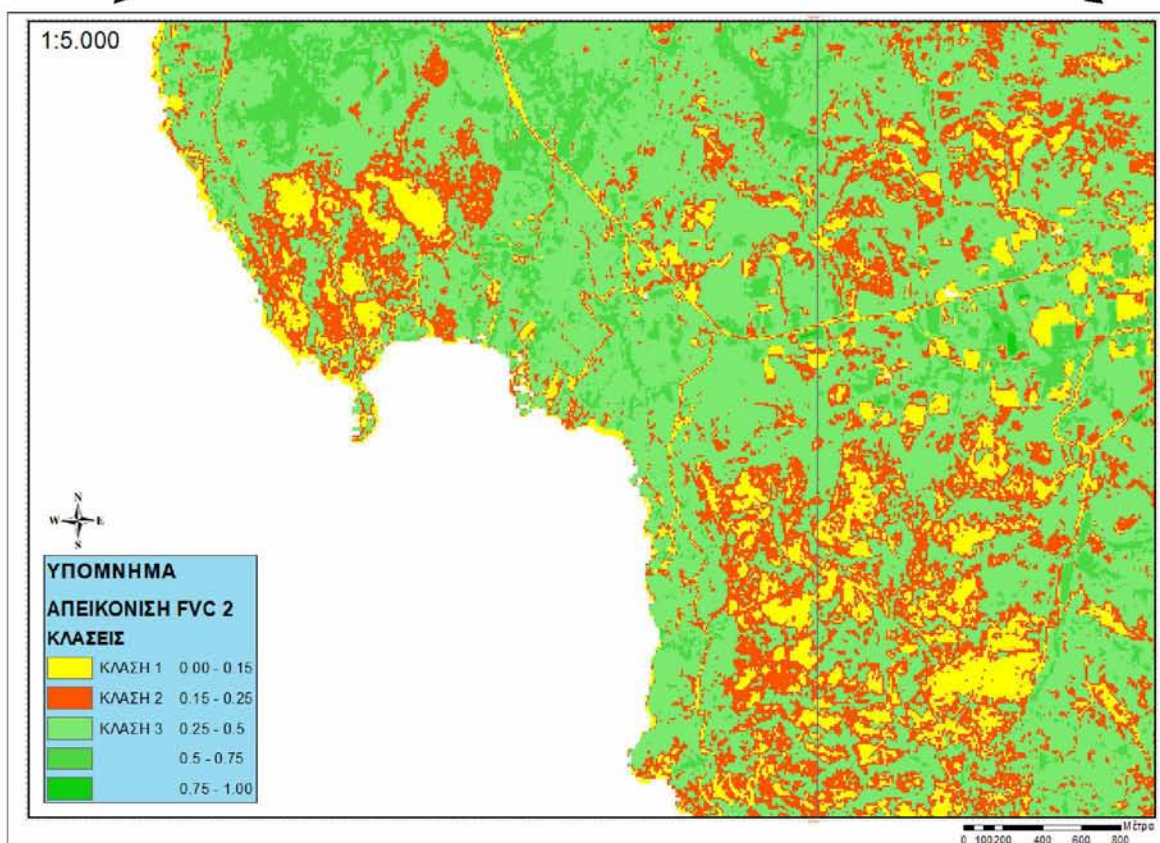


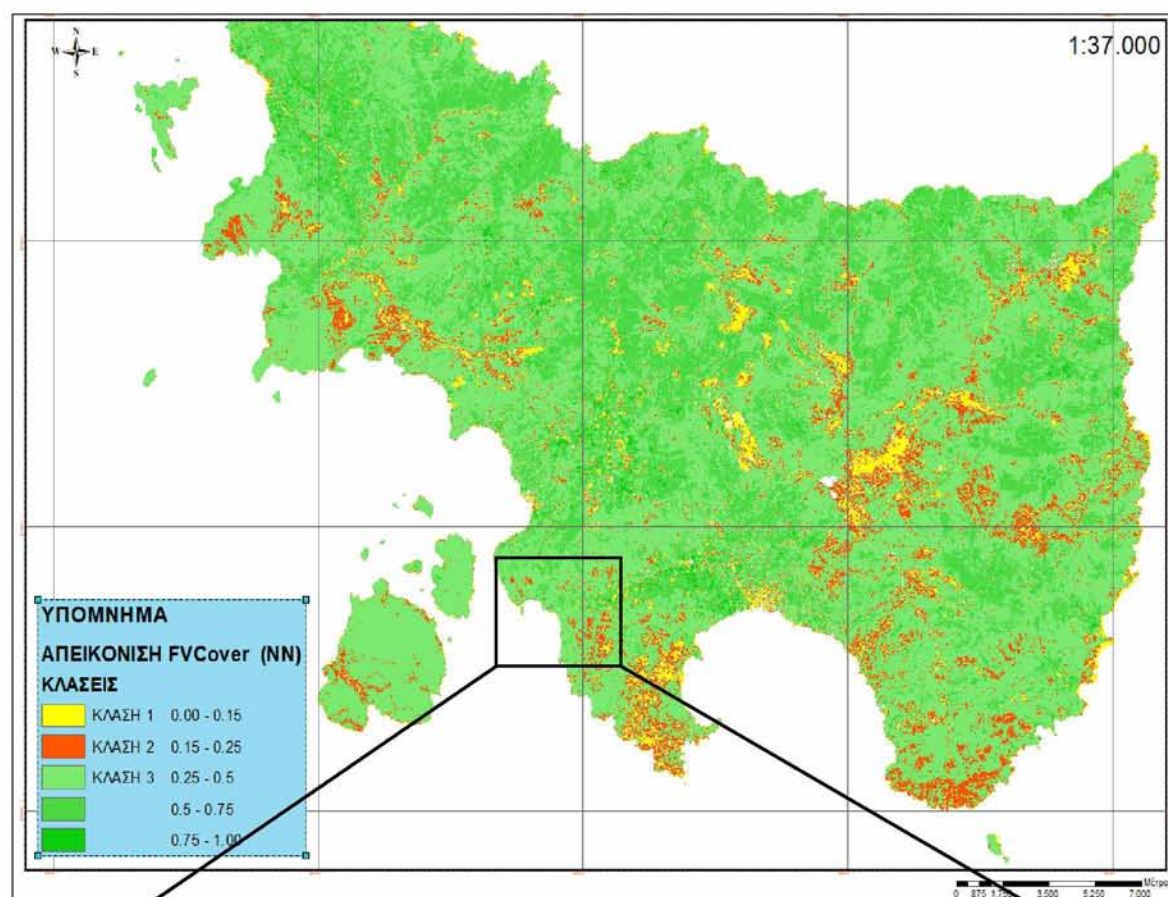
Χάρτης 5.1.: Χαρτογραφική απεικόνιση υπολογισμού FVC 1 σε κλάσεις



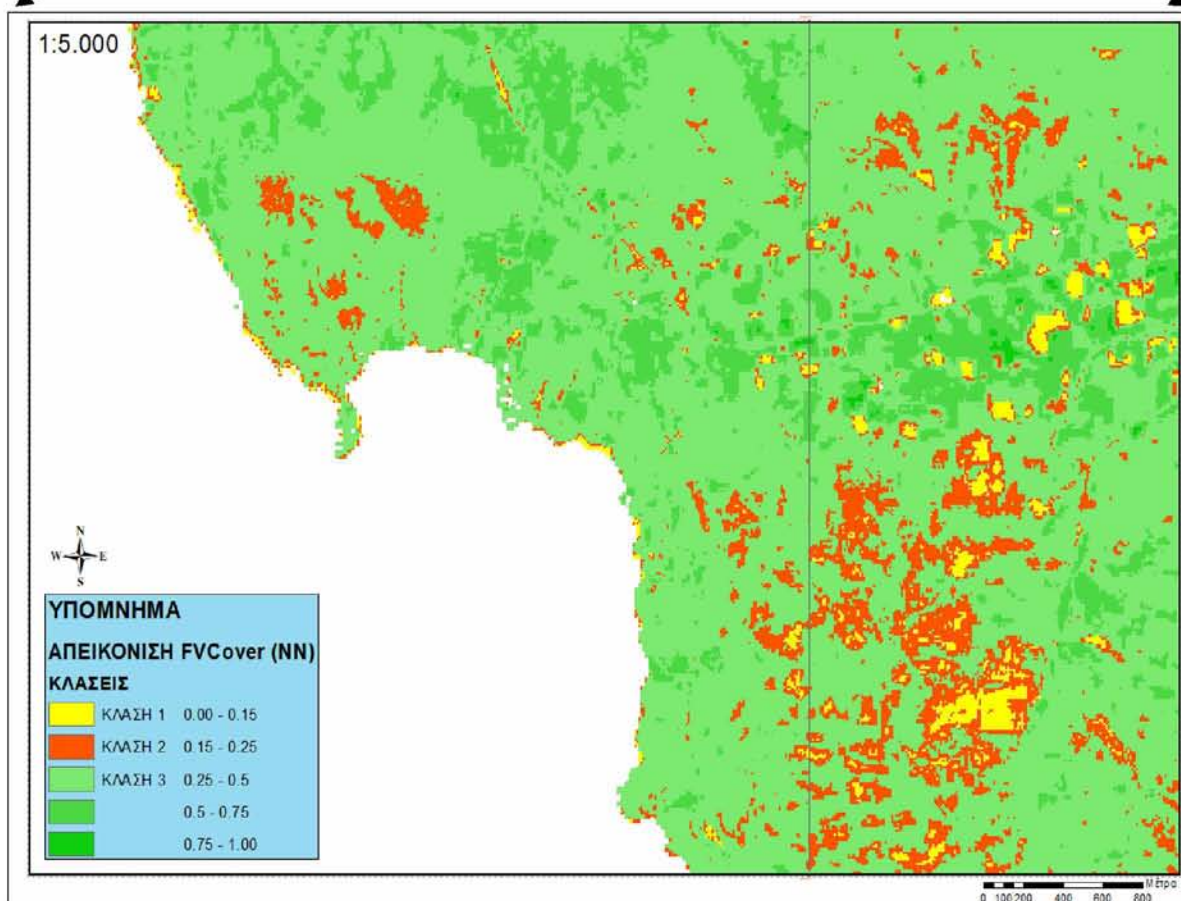


Χάρτης 5.2.: Χαρτογραφική απεικόνιση υπολογισμού FVC 2 σε κλάσεις





Χάρτης 5.3.: Χαρτογραφική απεικόνιση υπολογισμού FVCover σε κλάσεις



Από την απεικόνιση των εικονοστοιχείων της κάθε μεθόδου (Πίνακας 5.1.) ταξινομήθηκαν:

Πίνακας 5.1.: Κατανομή των εικονοστοιχείων της κάθε μεθόδου

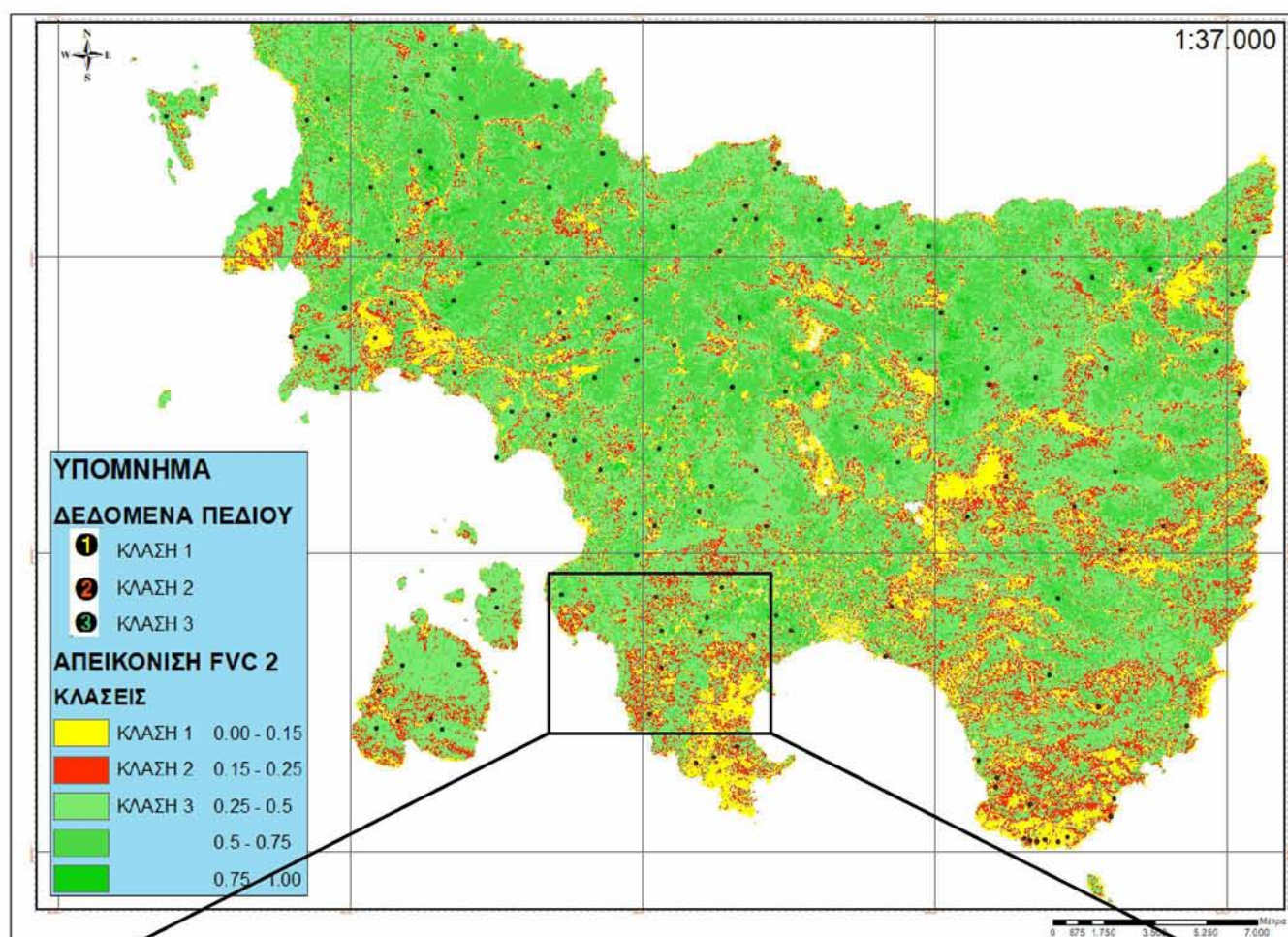
α/α	<i>FVC 1</i>	<i>FVC 2</i>	<i>FVCover</i>
ΚΛΑΣΗ 1 (0-0.15)	85.529 (1,537 %)	756.757 (13,606 %)	221.973 (3,986 %)
ΚΛΑΣΗ 2 (0.15-0.25)	151.260 (2,719 %)	786.510 (14,141 %)	451.947 (8,115 %)
ΚΛΑΣΗ 3 (0.25-0.5)	1.306.477 (23,490 %)	2.489.889 (44,767%)	3.362.563 (60,384%)
ΚΛΑΣΗ 3 (0.5-0.75)	3.022.844 (54,349 %)	1.478.199 (26,577 %)	1.487.906 (26,719 %)
ΚΛΑΣΗ 3 (0.75-1.0)	995.724 (17,902 %)	50.479 (0,907 %)	44.214 (0,793 %)
	5.561.834	5.561.834	5.568.603

5.2. Εκτίμηση Ακρίβειας Μεθόδων FVC

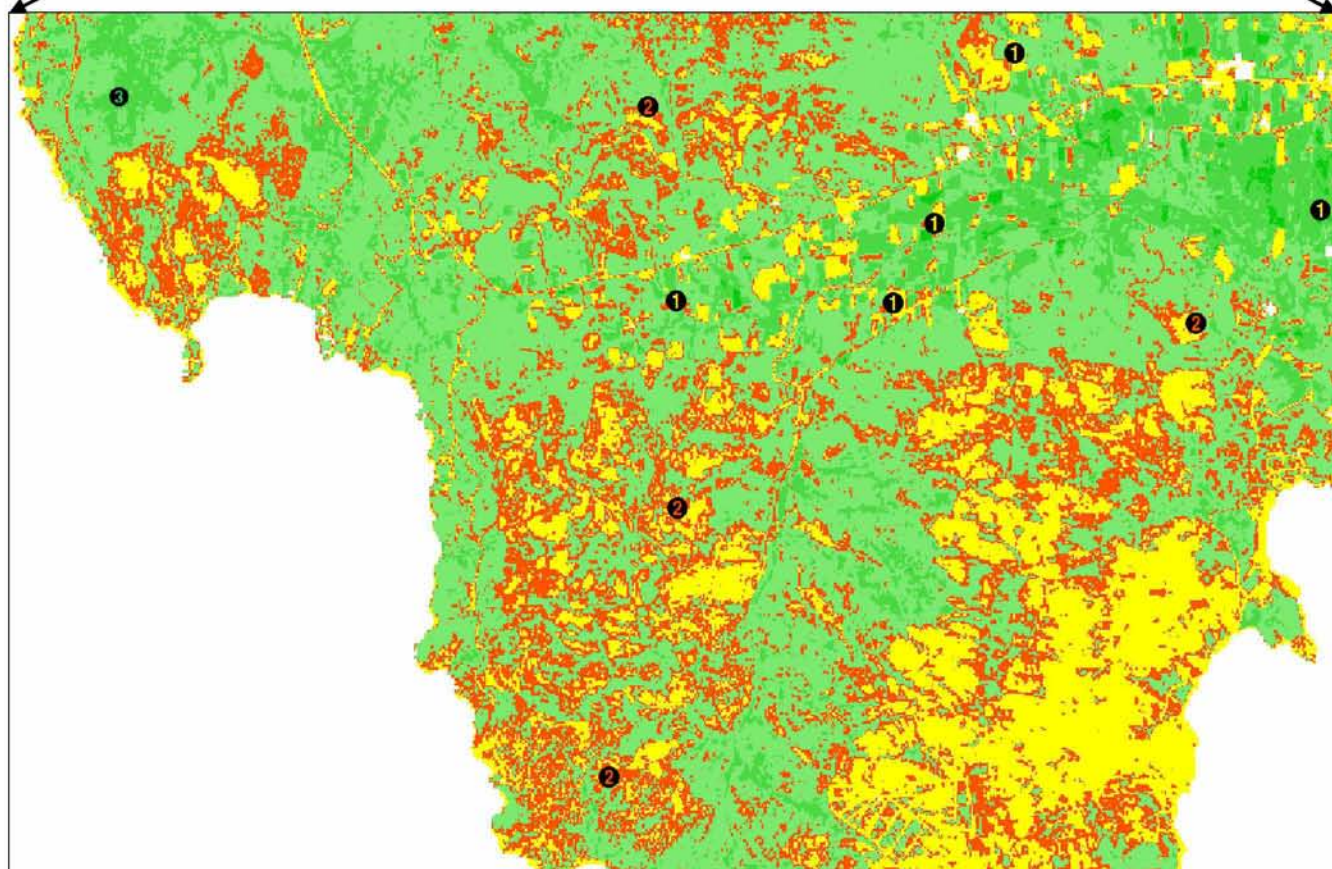
Οι πληροφορίες που παρείχαν οι παραγόμενοι χάρτες FVC 1, FVC 2, FVCover ήταν μια εκτίμηση της πραγματικής κατάστασης και αυτή η εκτίμηση θα έπρεπε να ελεγχθεί για το πόσο αυτό που απεικονίζει αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα.

Η εκτίμηση της ακρίβειας αποσκοπεί στην αξιολόγηση του αποτελέσματος, στην βελτίωση της ποιότητας της χαρτογράφησης βρίσκοντας τις διάφορες πηγές σφαλμάτων στη σύγκριση μεταξύ διαφόρων τεχνικών και αλγορίθμων (Congalton και Green, 1999).

Ο σκοπός της εκτίμησης της ακρίβειας ήταν η αναγνώριση και μέτρηση των σφαλμάτων και περιλάμβανε τη σύγκριση μεταξύ των δύο πηγών δεδομένων, των παραγόμενων χαρτών και των δεδομένων πεδίου (αναφοράς) από την μελετώμενη περιοχή. Τα δεδομένα αναφοράς θεωρούνται ακριβή και ότι ανταποκρίνονται απόλυτα στην πραγματικότητα. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν ζεύγη των δειγμάτων ελέγχου του πεδίου (Χάρτης 5.4.) με τις ταξινομημένες κλάσεις των μεθόδων εκτιμήσεων FVC.



Χάρτης 5.4.: Απεικόνιση εκτίμησης FVC 2 με διασπορά δεδομένων πεδίου



Αναπτύχθηκε ένα σύστημα επαλήθευσης συνεργιών για τη σύνδεση δειγμάτων πεδίου και των αποτελεσμάτων εκτιμήσεων των FVC, ικανό να βελτιώσει την ακρίβεια και την επιστημονικότητα της επαλήθευσης (Liu et.al., 2019).

Για την επαλήθευση της ορθότητας των μεθόδων η διαδικασία ακολουθήθηκε σε τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα υπολογίστηκε ο αριθμός των δειγμάτων με τυχαία δειγματοληψία, στο δεύτερο βήμα πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δεδομένων πεδίου με τις εκτιμήσεις FVC 1, FVC 2, FVCover και στο τρίτο βήμα υπολογίστηκε ο πίνακας σφαλμάτων παρέχοντας πληροφορίες για τη συνολική ακρίβεια του κάθε θεματικού χάρτη. Επιλέχθηκαν δεδομένα από κάθε κλάση ακολουθώντας τον εμπειρικό κανόνα που αναφέρουν οι Congalton και Green (1999), ότι για την κατασκευή του πίνακα σφαλμάτων απαιτούνται περίπου 50 δειγματοληπτικές επιφάνειες για κάθε κλάση.

Ο πίνακας σφαλμάτων ταξινόμησης ή αλλιώς πίνακας σύμπτωσης (*Confusion matrix*) είναι ένας πίνακας συχνότητων όπου τα αποτελέσματα της ταξινόμησης αντιστοιχούν στις γραμμές ενώ των δεδομένων αναφοράς στις στήλες. Στους Πίνακες (5.2., 5.3., 5.4.) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των εκτιμήσεων FVC 1, FVC 2, FVCover, από τα δεδομένα τηλεπισκόπησης με τις μετρήσεις πεδίου.

Πίνακας 5.2.: Έλεγχος ακρίβειας για FVC 1 (Confusion matrix)

FVC 1						
FVC 1 class data/ref. data	1	2	3	Sum	user accuracy	erros of comission
1	12	2	0	14	88,24%	11,76%
2	15	2	0	17	11,76%	88,24%
3	17	34	66	117	56,41%	43,59%
Sum	44	38	66	148		
producer accuracy	27,27%	5,26%	100%			
erros of omission	72,73%	94,79%	0%			
				80	54,054	overall accuracy

Στη διαγώνιο του πίνακα σφαλμάτων (*Confusion matrix*) βρίσκονται οι σωστά ταξινομημένες τιμές ο αριθμός των οποίων αν διαιρεθεί με το σύνολο των τιμών του πίνακα προκύπτει η συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης της κάθε κλάσης. Στον πίνακα σφαλμάτων ταξινόμησης ελέγχθηκε επίσης η ακρίβεια με την οποία η πραγματικότητα αντιπροσωπεύεται από το χάρτη (ακρίβεια του κατασκευαστή) (*producer's accuracy*) και ο *βαθμός ακρίβειας* με τον οποίο η χαρτογράφηση κάθε κατηγορίας αντιπροσώπευε την πραγματικότητα, ακρίβεια του χρήστη (*user's accuracy*). Η ακρίβεια του κατασκευαστή υπό στατιστική έκφραση ερμηνεύθηκε ως η πιθανότητα να γίνει σφάλμα παράλειψης (*omission errors*) ενώ η ακρίβεια του χρήστη ως η πιθανότητα να γίνει σφάλμα αναπλήρωσης (*commission errors*) (Καρτέρης 1990). Οι ακρίβειες εισήχθησαν στις μήτρες σφαλμάτων από τους Story και Congalton (1986) & (Congalton και Green, 2008).

Η ολική ακρίβεια (*overall accuracy*) ταξινόμησης προέκυψε από την διαίρεση των σημείων που ταξινομήθηκαν σωστά προς το σύνολο των σημείων. Σχετικά με την ολική ακρίβεια της ταξινόμησης των κλάσεων, παρατηρήθηκε μία τάση ανόδου από FVCover σε FVC 2 (από 79,729 % σε 89,867 %). Συγκεκριμένα, την υψηλότερη ακρίβεια (89,867 %) παρουσίασε η μέθοδος στην οποία χρησιμοποιήθηκε η σχέση του NDVI υψωμένη στο τετράγωνο. Αντίθετα, η ολική ακρίβεια έπεσε αρκετά στην πρώτη μέθοδο (FVC 1 54,054%) όπου επιχειρήθηκε να χρησιμοποιηθεί η γραμμική σχέση με τον NDVI.

Πίνακας 5.3.: Έλεγχος ακρίβειας για FVC2 (Confusion matrix)

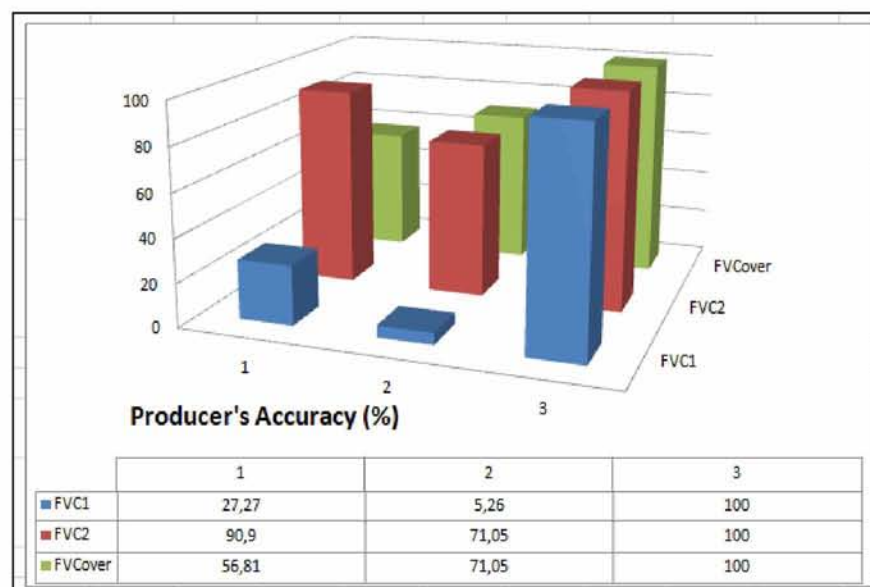
FVC 2						
FVC 2 class data/ref. data	1	2	3	Sum	user accuracy	erros of comission
1	40	10	0	50	80,00%	20%
2	4	27	0	31	87,09%	12,91%
3	0	1	66	67	98,50%	1,50%
Sum	44	38	66	148		
producer accuracy	90,90%	71,05%	100%			
erros of omission	9,10%	28,95%	0%			
				133	89,864	overall accuracy

Κάθε σφάλμα στον πίνακα ήταν μία εξαίρεση της επιφάνειας από μία κλάση όπου ανήκε πραγματικά και η τοποθέτησή της σε μία άλλη όπου δεν ανήκε (Τσακαλίδης, 2007).

Πίνακας 5.4.: Έλεγχος ακρίβειας για FVCover (Confusion matrix)

FVCover snap						
FVCover class data/ref. data	1	2	3	Sum	user accuracy	erros of comission
1	25	1	0	26	96,15%	3,85%
2	14	27	0	31	87,09%	12,91%
3	5	10	66	81	81,48%	18,52%
Sum	44	38	66	148		
producer accuracy	56,81%	71,05%	100%			
erros of omission	43,19%	28,95%	0%			
				118	79,729	overall accuracy

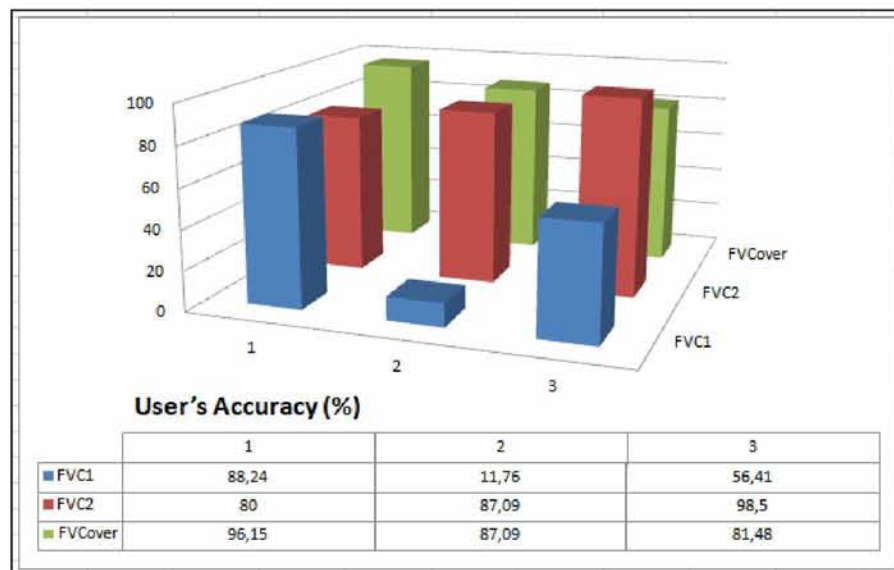
Η ακρίβεια του αναλυτή/παραγωγού (*producer's accuracy*) εκτίμησε το σφάλμα παράλειψης στις κλάσεις, και έδειξε πόσο καλά η μελετώμενη περιοχή έχει ταξινομηθεί, δηλαδή πόσο επιτυχώς έχουν ταξινομηθεί τα σημεία εκπαίδευσης σε κάποια κατηγορία από τον αλγόριθμο με τιμές όπως παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.1.:



Διάγραμμα 5.1.: Ακρίβεια του Αναλυτή/Παραγωγού (Producer's Accuracy)

Παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις της ταξινόμησης για την 1η κλάση με την καλύτερη εκτίμηση να επιτυγχάνεται από τη μέθοδο **FVC 2**, μειωμένη εκτίμηση της 2ης κλάσης με τη μέθοδο **FVC 1** και επιτυχή εκτίμηση της 3ης κλάσης με όλες τις μεθόδους.

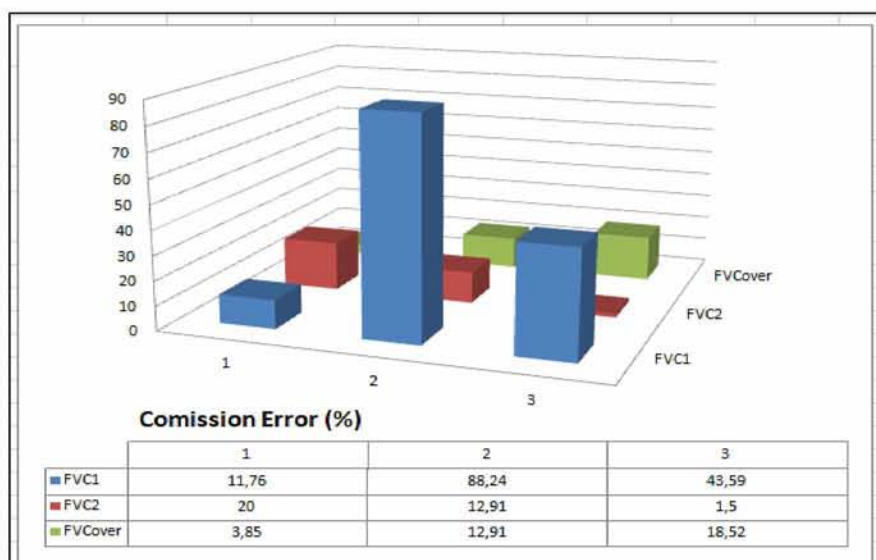
Η ακρίβεια του χρήστη (*user's accuracy*) εκτίμησε το σφάλμα (Διάγραμμα 5.2.) που προέκυψε από μεταφορά και παρέχει την πληροφορία κατά πόσο τοις εκατό τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν σε μια συγκεκριμένη κλάση, εκπροσωπούν την πραγματική κατηγορία στο έδαφος με τιμές (Story και Congalton, 1986):



Διάγραμμα 5.2.: Ακρίβεια του Χρήστη (*User's Accuracy*)

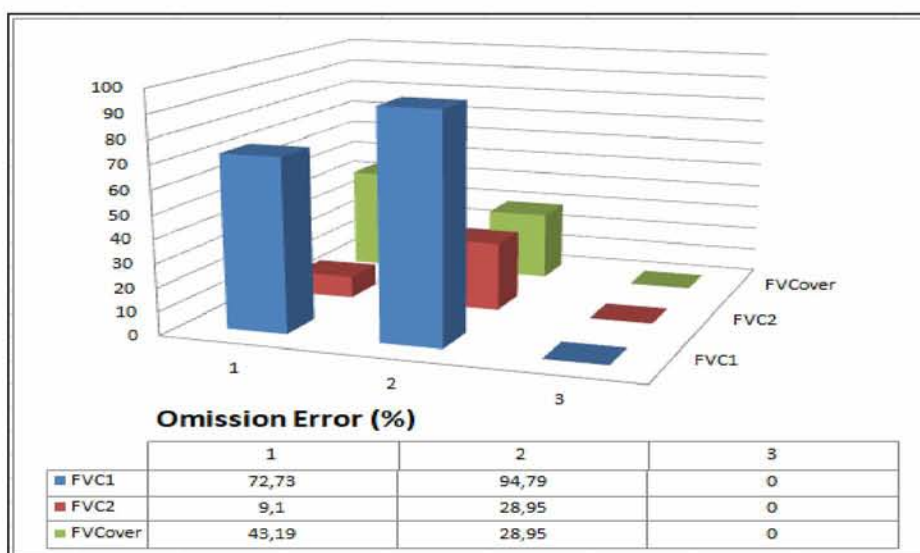
Παρατηρήθηκαν ικανοποιητικές ταξινομήσεις για την 1η κλάση με τις δυο πρώτες μεθόδους και άριστες για τη μέθοδο **FVCover**, μειωμένη εκτίμηση της 2ης κλάσης με τη μέθοδο **FVC 1** και επιτυχή εκτίμηση της 3ης κλάσης με τις μεθόδους **FVC 2 & FVCover**.

Το σφάλμα αναπλήρωσης (*commission errors*) ορίστηκε ως λανθασμένη τοποθέτηση μιας τιμής σε μία κλάση (Διάγραμμα 5.3.) όπου δεν ανήκει, το σφάλμα της *X* κατηγορίας σχετίστηκε με τον αριθμό των δειγματοληπτικών σημείων τα οποία ενώ ταξινομήθηκαν στη *X* κατηγορία, διαπιστώθηκε από τα δεδομένα αναφοράς ότι ανήκουν σε άλλες κατηγορίες (Schultink και Karteris 1981). Αν από το 100 αφαιρεθεί το ποσοστό της ακρίβειας του χρήστη (*user's accuracy*), προκύπτει το % ποσοστό του σφάλματος παρερμηνείας ($100 - \text{user's accuracy} = \% \text{ commission error}$) με τιμές:



Διάγραμμα 5.3.: Σφάλμα Αναπλήρωσης (Commission Errors)

Το σφάλμα παράλειψης (*omission errors*) αφορούσε την εξαίρεση μιας επιφάνειας από μία κλάση στην οποία ανήκε πραγματικά (Congalton και Green, 1999). Το **σφάλμα παράλειψης της X** κατηγορίας σχετίστηκε με τα δειγματοληπτικά σημεία τα οποία ενώ ταξινομήθηκαν σε άλλη κατηγορία διαπιστώθηκε από τα δεδομένα αναφοράς ότι ανήκουν στην υπόψη κατηγορία (Schultink και Karteris 1981). Αν από το 100 αφαιρεθεί το ποσοστό της ακρίβειας του αναλυτή, προέκυπτε το σφάλμα παράβλεψης ($100 - \text{producer's accuracy} = \text{omission error}$) με τιμές (Διάγραμμα 5.4.):



Διάγραμμα 5.4.: Σφάλμα Παράλειψης (Omission Errors)

Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, καθώς τόσο η ολική όσο και οι επιμέρους ακρίβειες κινήθηκαν σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Οι εκτιμήσεις FVC βοήθησαν πολύ στον διαχωρισμό των περιοχών με βλάστηση από αυτές χωρίς βλάστηση. Η πιο διακριτή κλάση από όλες τις μεθόδους ήταν η 3η. Οι εκτιμήσεις FVC δεν φαίνεται να βοήθησαν πολύ στον διαχωρισμό των κλάσεων 1 & 2 με μικρότερα ποσοστά κάλυψης βλάστησης.

Παρατηρήθηκε ότι δεν συμπεριφέρονται όλες οι κλάσεις με τον ίδιο τρόπο σε κάθε μέθοδο. Συγκεκριμένα, στην πρώτη μέθοδο παρατηρήθηκαν χαμηλές ακρίβειες στις κλάσεις 1 & 2. Φαίνεται πως σε όλες τις μεθόδους η κλάση 3 έχει ταξινομηθεί με υψηλή ακρίβεια. Τη χαμηλότερη ακρίβεια παρουσιάζουν οι εκτάσεις της 1^{ης} κλάσης. Οι άγονες εκτάσεις, οι οικισμοί και οι δρόμοι παρουσιάζουν τιμές που τείνουν στο μηδέν και ανήκουν στην 1η κλάση.

5.3. Αποτίμηση - Αποτελέσματα μεθόδων FVC - Επιλογή βέλτιστης μεθόδου

Τα πραγματικά δεδομένα πεδίου, συγκρινόμενα με τους χάρτες των τριών αλγορίθμων επαλήθευσαν τα αποτελέσματα και τόνισαν τα σφάλματα και τις αδυναμίες τους. Η ακρίβεια κάθε μοντέλου αξιολογήθηκε συγκρίνοντας την εκτιμώμενη (FVC) με τα δεδομένα πεδίου. Η επαλήθευση έδειξε ότι η εκτίμηση FVC με τη δεύτερη μέθοδο *FVC 2* ήταν η πιο απλή και λειτουργική και παρουσίασε την υψηλότερη συνολική ακρίβεια αλλά και την καλύτερη εκτιμώμενη ακρίβεια στην κάθε επιμέρους κλάση. Τα αποτελέσματα βρίσκονταν σε ισχυρή συμφωνία με την πραγματικότητα. Στη σύγκριση των FVC η μέθοδος *FVC 2* αποδείχθηκε μια νέα και αξιόλογη πηγή δεδομένων.

Η χρήση όλων των φασματικών καναλιών που δημιουργήθηκαν μέσω της μεθόδου FVCover δεν συνεισέφερε σημαντικά, πράγμα που σημαίνει ότι ορισμένα από αυτά επιδείνωσαν παρά βελτίωσαν την ακρίβεια. Η μέγιστη ακρίβεια επιτεύχθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν τα 4 κανάλια του NDVI, μέσω της σχέσης των *Carlson and Ripley, (1997)*.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν δυνατό να συγκριθούν αφού από την αναζήτηση της βιβλιογραφίας δεν προέκυψαν παρόμοιες μελέτες.

5.4. Ποσοστό Φυτοκάλυψης σε Δασικό Χάρτη

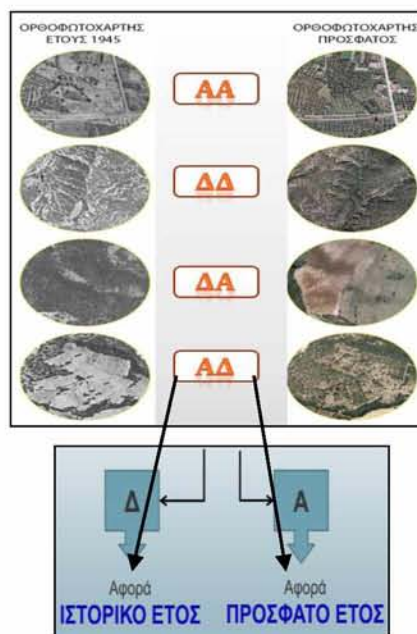
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δυνατότητα να καταγραφεί το ποσοστό φυτοκάλυψης σε κάθε δασική μονάδα για κάθε μια από τις κατηγορίες που υπολογίστηκαν και να παραχθεί ένα τελικό χαρτογραφικό προϊόν FVC.

Α. Πολύγωνα Μερικά Κυρωμένου Δασικού Χάρτη

Ο δασικός χάρτης περιλαμβάνει εκτάσεις που υπάγονται στις διατάξεις της δασικής νομοθεσίας, αποτυπωμένες από φωτοερμηνεία της παλαιότερης (1945 ή 1960) και πλησιέστερης προς τον χρόνο κατάρτισης του δασικού χάρτη (χρονικό διάστημα λήψης 2007-2009) αεροφωτογραφία.

Η κατάρτιση, θεώρηση, ανάρτηση και κύρωση του Δασικού Χάρτη της Π.Ε. Ευβοίας είχε ως αντικείμενο την οριοθέτηση και καταγραφή των εκτάσεων, που διέπονται από το προστατευτικό πλαίσιο των διατάξεων της δασικής νομοθεσίας. Η όλη διαδικασία συνίσταται στην έρευνα των εκτάσεων που είτε σήμερα είτε στο παρελθόν καλύπτονται από δασική βλάστηση, στην κωδικοποίηση των στοιχείων και στην ορθή απεικόνισή τους επί κατάλληλου χαρτογραφικού υλικού, σύμφωνα με τις ισχύουσες τεχνικές προδιαγραφές κατάρτισης δασικών χαρτών (97414/754/6-9-2007, ΦΕΚ 1811/Τεύχος Β'/10-09-2007).

Βασική χαρτογραφική μονάδα των Δασικών Χαρτών είναι το πολύγωνο κάλυψης. Ως πολύγωνο κάλυψης ορίζεται η συνεχόμενη έκταση γης, η οποία διακρίνεται σαφώς από άλλες γειτονικές λόγω της διαφορετικής κάλυψης ή μορφής της, λόγω φωτοερμηνείας ή ύπαρξης πράξης της Διοίκησης.



Εικόνα 5.2. Κωδικοποίηση πολυγώνων μορφής/κάλυψης Δασικού Χάρτη

Οι κατηγορίες μορφής/ κάλυψης με τις αντίστοιχες ενδείξεις, που εμφανίζονται στον «Δασικό Χάρτη» δημιουργούνται από το συνδυασμό (Εικόνα 5.2.) της απεικόνισης των εκτάσεων, στον Ιστορικό και Πρόσφατο Ορθοφωτοχάρτη:

α) ΔΔ: «Δασική» έκταση, στον «Ιστορικό Ορθοφωτοχάρτη 1945»

«Δασική» έκταση στις πρόσφατες Α/Φ.

β) ΑΔ: «Άλλης μορφής/ κάλυψης» έκταση στον «Ιστορικό Ορθοφωτοχάρτη 1945»

«Δασική» έκταση, στις πρόσφατες Α/Φ

γ) ΑΑ: «Άλλης μορφής/ κάλυψης» έκταση στον «Ιστορικό Ορθοφωτοχάρτη 1945»

«Άλλης μορφής/ κάλυψης» έκταση στις πρόσφατες Α/Φ.

δ) ΠΔ: Τελεσίδικες πράξεις και αποφάσεις χαρακτηρισμού (παρ. 18 του άρθρου 28 του ν. 2664/98), με τις οποίες η έκταση χαρακτηρίστηκε ως «Δασική».

ε) ΑΝ: Αναδασωτέα ή Δασωτέα έκταση με πράξη της αρμόδιας αρχής

Σε περίπτωση που σε κάποιο πολύγωνο παρουσιάζονται περισσότερες από μία κατηγορίες μορφής/ κάλυψης, τότε στο «Δασικό Χάρτη» εμφανίζεται η ένδειξη κατηγορίας μορφής/ κάλυψης, που προηγείται στην παρακάτω ιεράρχηση:

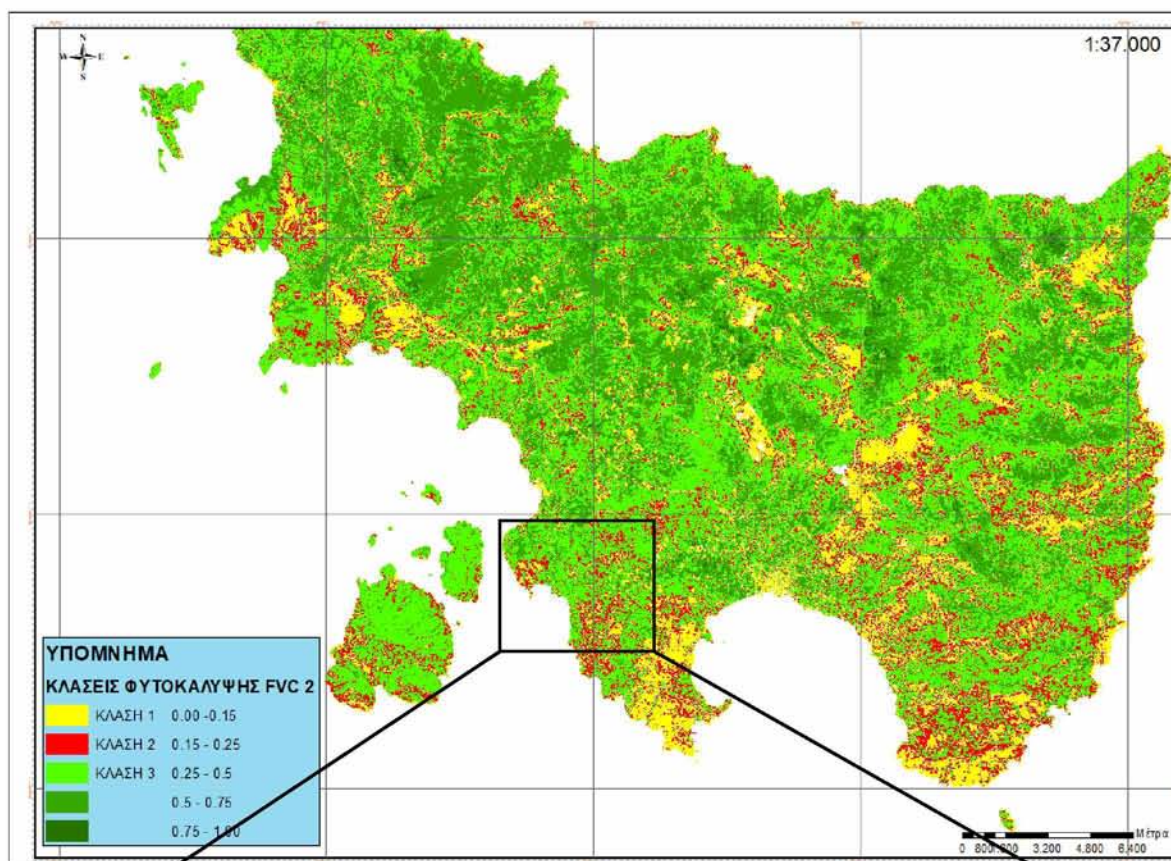
• ΑΝ

• ΠΔ

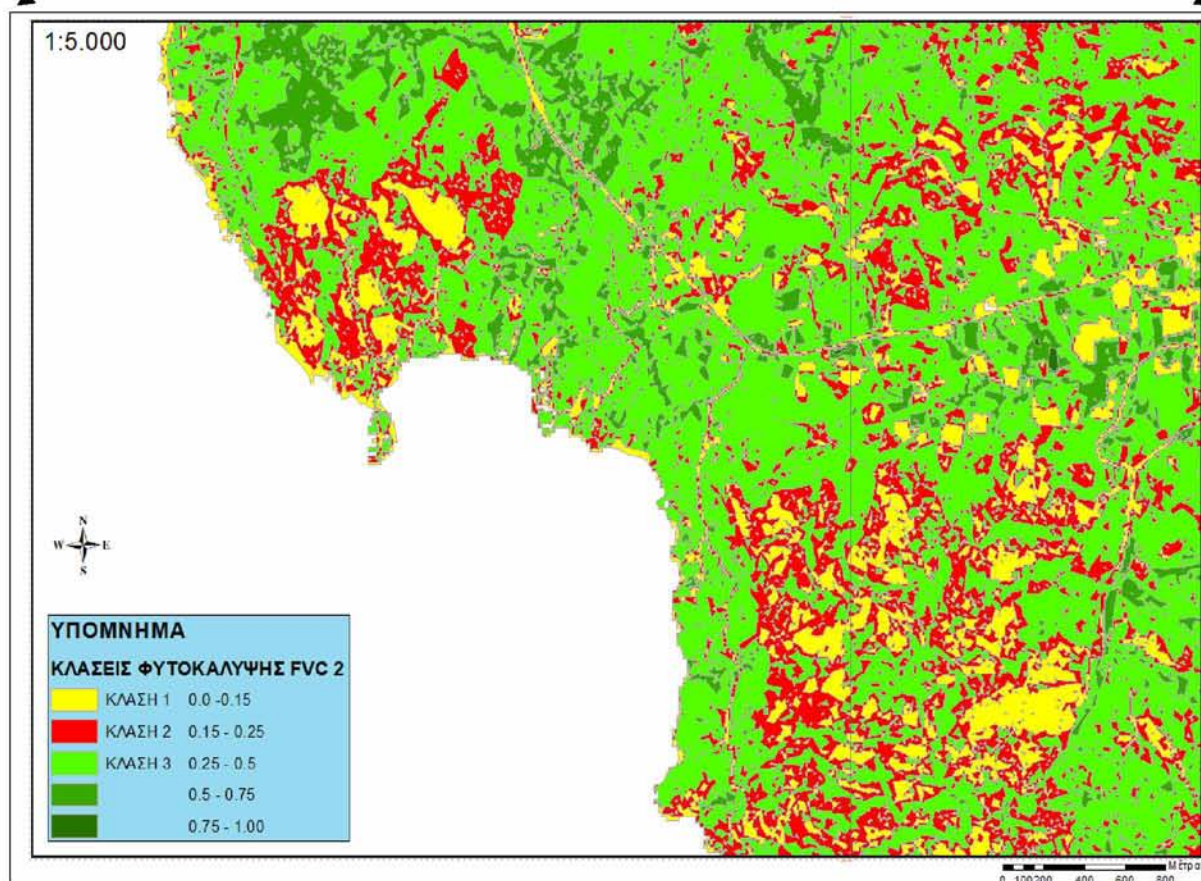
• ΔΔ ή ΔΑ ή ΑΔ ή ΑΑ

Β. Επεξεργασία Γεωχωρικών Δεδομένων

Σε περιβάλλον GIS ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων και η δημιουργία αντίστοιχης γεωχωρικής Βάσης Δεδομένων. Επιλέχθηκε η FVC 2 που παρουσίασε τα βέλτιστα αποτελέσματα για κάθε κλάση. Οι κλάσεις που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο *FVC 2* μετατράπηκαν από ψηφιδωτά αρχεία (raster) σε διανυσματικά (πολυγωνικά) μετά την εφαρμογή φίλτρου για την εξομάλυνση των αρχικών εικονοστοιχείων και εξήχθησαν με την κατάλληλη εντολή του λογισμικού (Χάρτης 5.5.) για την ευκολότερη περαιτέρω επεξεργασία τους σε περιβάλλον GIS.



Χάρτης 5.5.: Απεικόνιση κλάσεων φυτοκάλυψης FVC 2 σε διανυσματικό αρχείο και απόσπασμα μεγέθυνσης

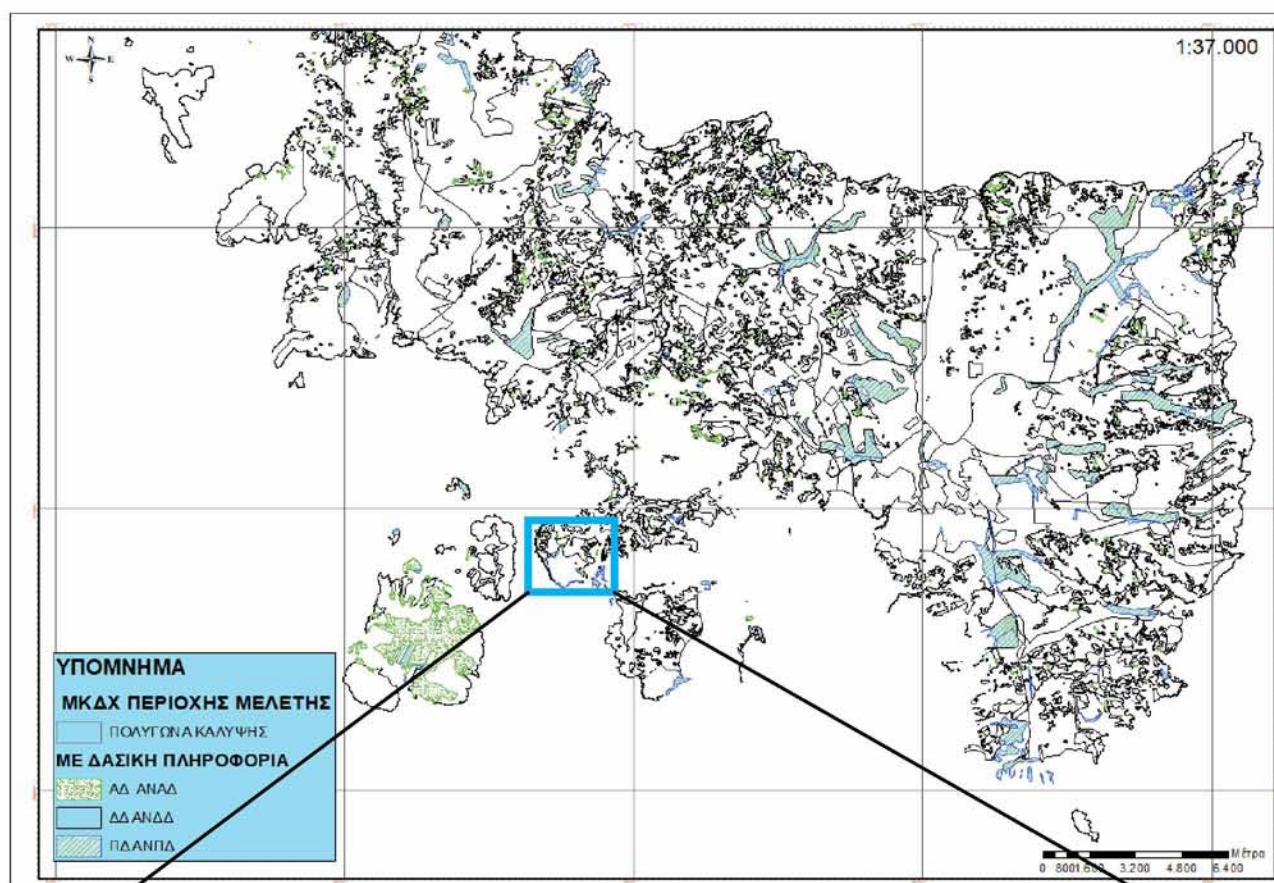


Αποδόθηκαν οι χωρικές πληροφορίες των αρχείων προκειμένου να ολοκληρωθεί η σύγκριση μεταξύ των διανυσματικών δεδομένων που περιέχουν τους κωδικούς του δασικού χάρτη και των δεδομένων που προέρχονται από την εφαρμογή του αλγόριθμου *FVC 2*.

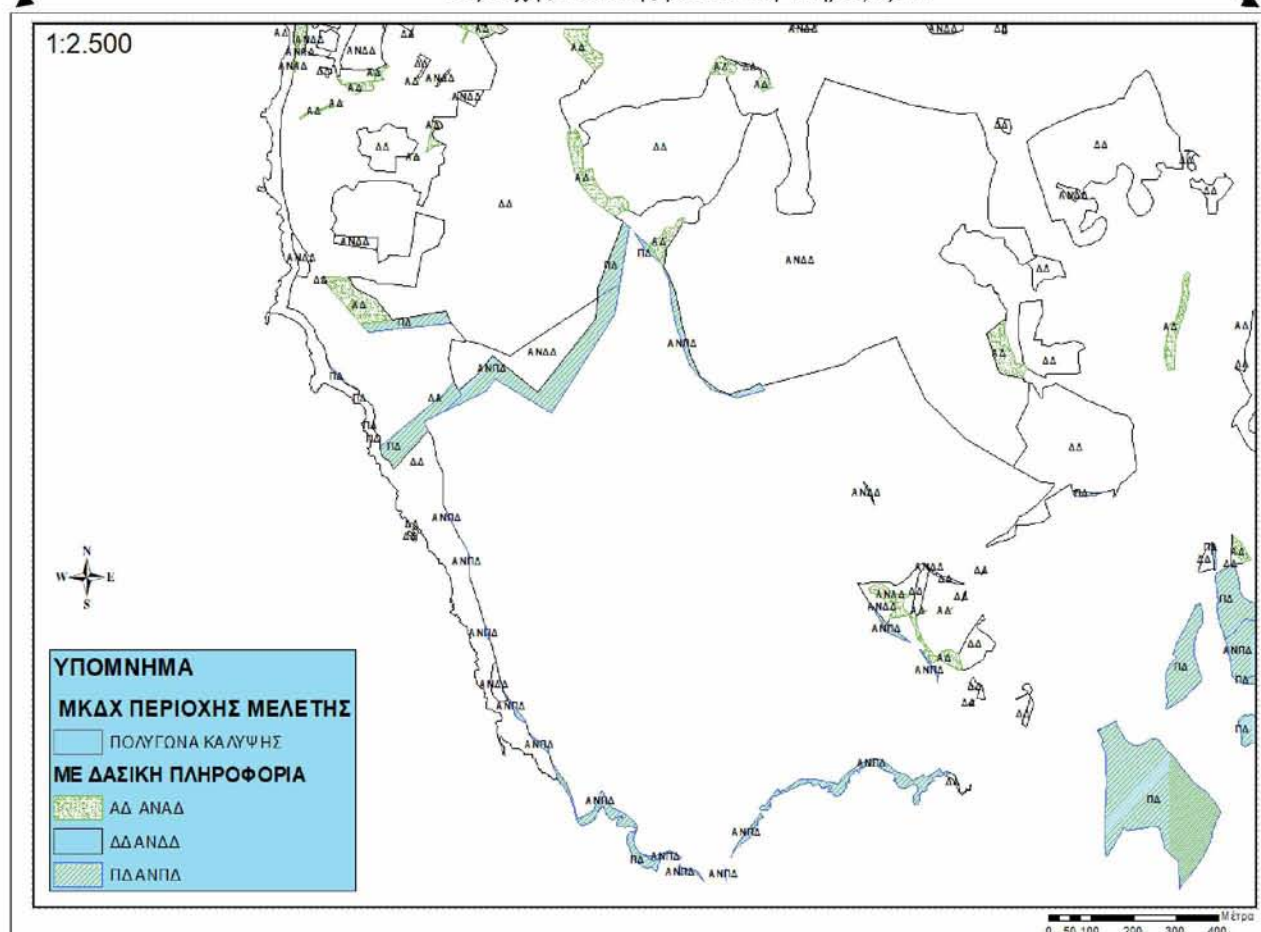
Όλα τα διανυσματικά αρχεία αποθηκεύτηκαν σε γεωβάση και ακολούθησαν πράξεις χωρικής ανάλυσης. Η πρώτη πράξη που εκτελέστηκε ήταν η πράξη της αποκοπής κατά την οποία περιορίστηκε το διανυσματικό αρχείο του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη όλης της Περιφερειακής Ενότητας Εύβοιας στα όρια της περιοχής μελέτης, (Χάρτης 5.6.) περιορίζοντας τα πολύγωνα στα όρια του επιτιθέμενου επιπέδου.

Σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό της βάσης δεδομένων διεκδίκησε ο κυρωμένος Δασικός Χάρτης, και οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στα πολύγωνα κάλυψης του. Αφαιρέθηκαν τα πολύγωνα που δεν περιέχουν δασικές πληροφορίες ώστε να μη συμπεριληφθούν στην περαιτέρω διαδικασία και χρησιμοποιήθηκαν τα πολύγωνα του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη με κωδικούς δασικής πληροφορίας (ΔΔ, ΑΝΔΔ, ΑΔ, ΑΝΑΔ, ΠΔ, & ΑΝΠΔ).

Αποκόπηκε το αρχείο *FVC 2* στα όρια των πολυγώνων του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη με πλήρη υπέρθεση των δυο αρχείων. Με τη πράξη αυτή υπολογίστηκε η τομή των αρχικών επιπέδων του επικαλυπτόμενου και του επιτιθέμενου) και το αποτέλεσμα ήταν ένα νέο παραγόμενο επίπεδο το οποίο περιείχε όλες τις ομάδες οντοτήτων των αρχικών επιπέδων στη γεωμετρική τομή των επιπέδων της περιοχής μελέτης. Με αυτή την διαδικασία ενώθηκαν οι πληροφορίες των δύο προϊόντων και δημιουργήθηκε ένα νέο αρχείο με τα ενωμένα στοιχεία τους να διαφαίνονται στο attribute table.



Χάρτης 5.6.: Πολύγωνα Μερικά Κυρωμένον Δασικού Χάρτη
 Περιοχής Μελέτης με δασική πληροφορία



Γ. Δημιουργία τελικού χάρτη FVC

Το τελευταίο στάδιο είχε ως στόχο τη δημιουργία του τελικού χάρτη FVC της περιοχής μελέτης ως μια απλή σύνθεση των παραπάνω παραγώγων. Για τη δημιουργία του, χρησιμοποιήθηκε το βέλτιστο αποτέλεσμα της μεθόδου *FVC 2* και των πολύγωνων που έχουν ταξινομηθεί στις κλάσεις 1,2 & 3 σε συνδυασμό με τις κωδικοποιημένες δασικές πληροφορίες των πολύγωνων του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη, στα όρια της περιοχής μελέτης.

Το ζητούμενο στο συγκεκριμένο στάδιο ήταν να διαχωριστούν τα πολύγωνα του ΜΚΔΧ στις κλάσεις 1, 2 & 3, συνδυαστικά, για την παραγωγή ενός ακριβέστερου χαρτογραφικού προϊόντος στην περιοχή μελέτης. Το κάθε πολύγωνο του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη ενισχύθηκε πλέον με πληροφορίες όλων των συνδυασμών των κατηγοριών ΔΔ, ΑΝΔΔ, ΑΔ, ΑΝΑΔ και ΠΔ, ΑΝΠΔ με τις κλάσεις FVC.

Μετά την εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθοδολογίας παράχθηκε ο χάρτης FVC (Χάρτης 5.7.) και ποσοτικοποιήθηκε η έκταση κάθε κατηγορίας (Διαγράμματα 5.5. & 5.6.), για τον υπολογισμό της έκτασης που καταλαμβάνει η κάθε κλάση.

Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες πράξεις στον πίνακα δεδομένων της γεωβάσης προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το πόση έκταση έχει ταξινομηθεί στην κάθε κλάση, για τον κάθε επιμέρους κωδικό δασικής πληροφορίας του Μερικά Κυρωμένου Δασικού Χάρτη:

Κωδικός ΔΔ, (Διάγραμμα 5.7.)

Κωδικός ΑΝ ΔΔ, (Διάγραμμα 5.8.)

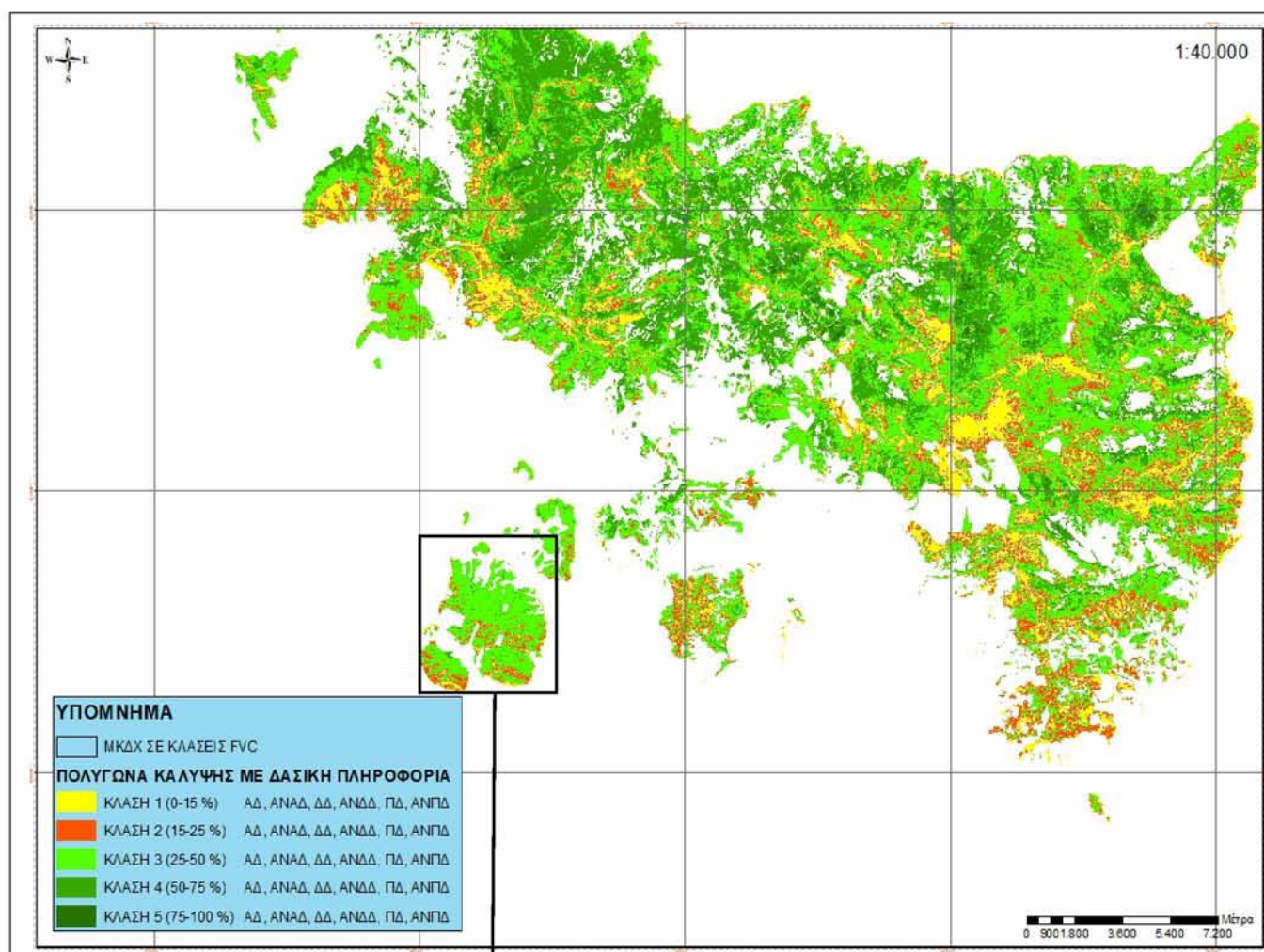
Κωδικός ΑΔ, (Διάγραμμα 5.9.)

Κωδικός ΑΝ ΑΔ, (Διάγραμμα 5.10.)

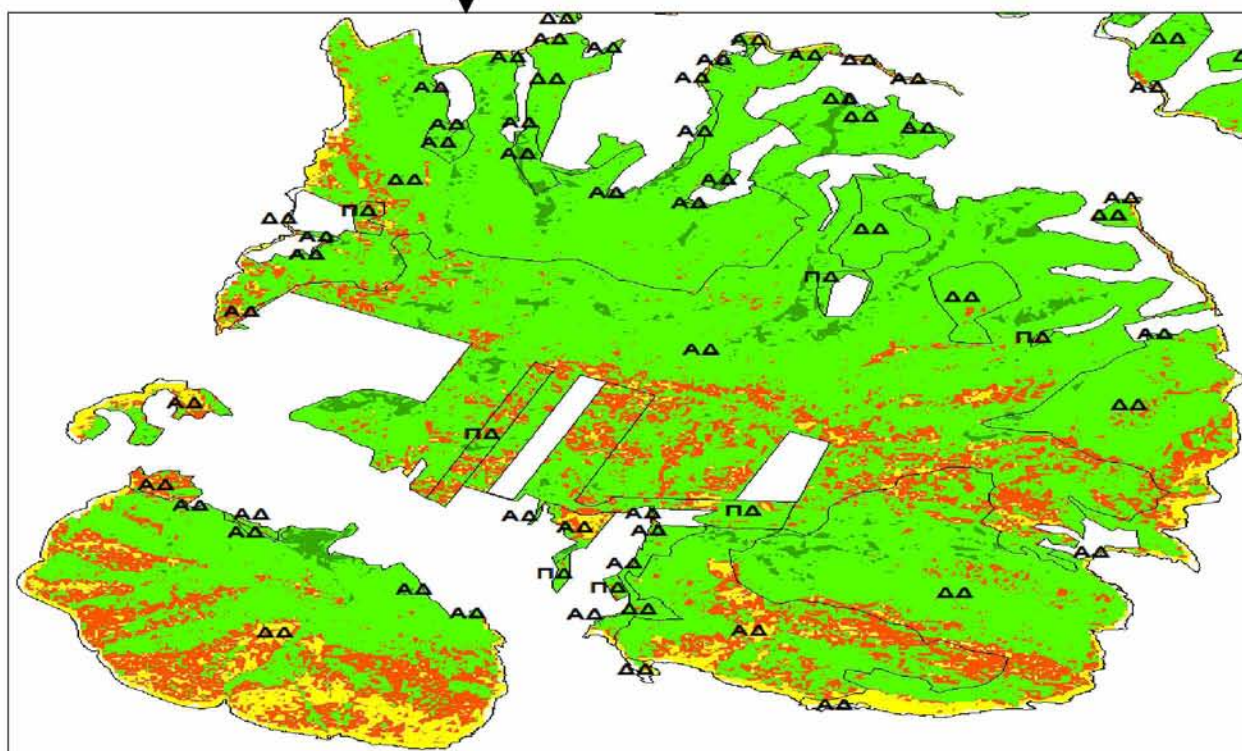
Κωδικός ΠΔ, (Διάγραμμα 5.11.)

Κωδικός ΑΝ ΠΔ, (Διάγραμμα 5.12.)

Η χωρική κατανομή FVC υποδεικνύει έντονη βλάστηση στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές με υψηλό βαθμό φυτοκάλυψης (Κλάση 3) ενώ στις άγονες βραχώδης εκτάσεις και όπου υπάρχουν οδοί παρατηρούνται σχετικά χαμηλότερες τιμές φυτοκάλυψης (Κλάσεις 1 & 2).

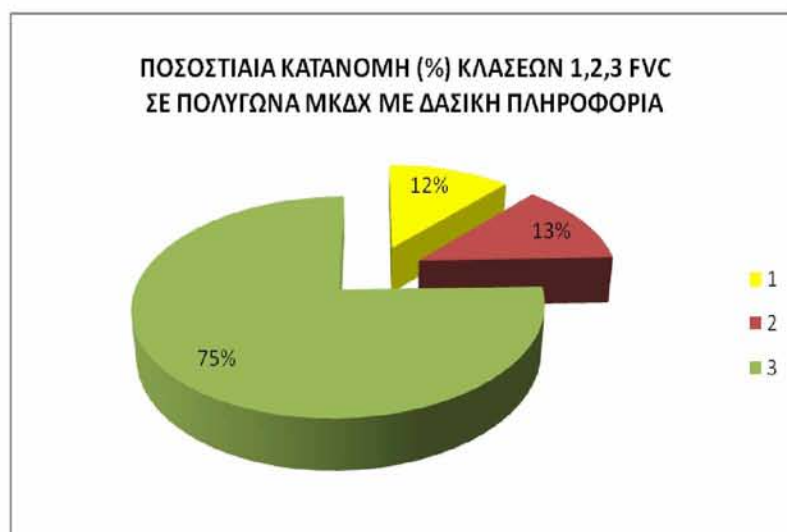


Χάρτης 5.7.: Χάρτης FVC





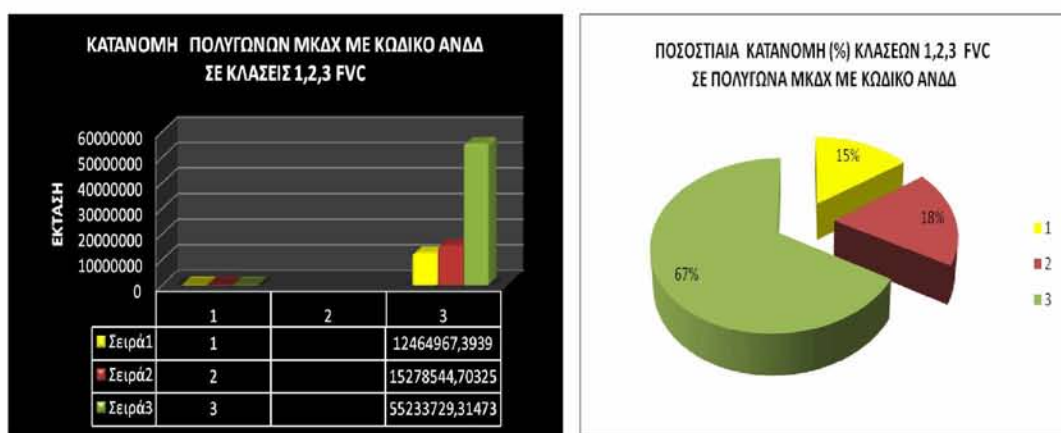
Διάγραμμα 5.5.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία στις κλάσεις FVC



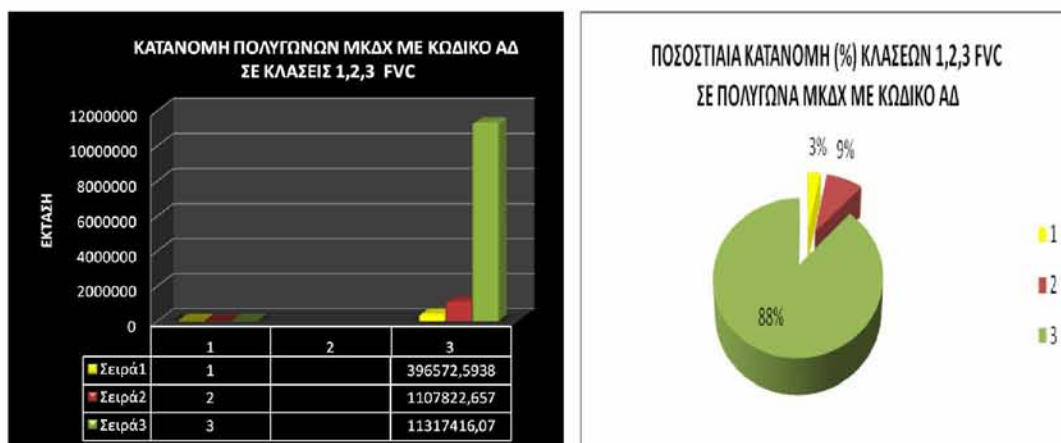
Διάγραμμα 5.6.: Κατανομή (%) κλάσεων FVC σε πολύγωνα ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία



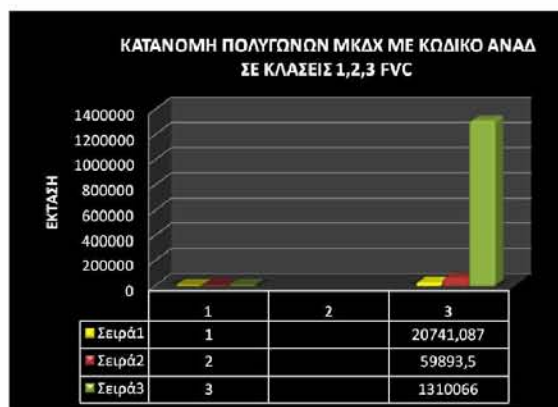
Διάγραμμα 5.7.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία ΔΔ στις κλάσεις FVC



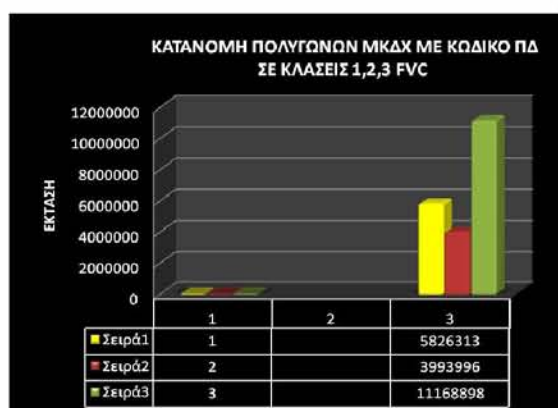
Διάγραμμα 5.8.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία ΑΝΔΔ στις κλάσεις FVC



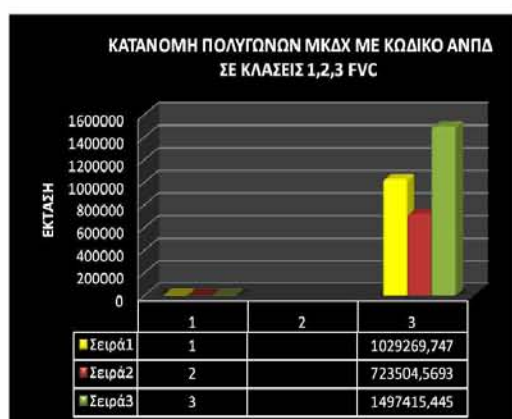
Διάγραμμα 5.9.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία ΑΔ στις κλάσεις FVC



Διάγραμμα 5.10.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία ΑΝΑΔ στις κλάσεις FVC



Διάγραμμα 5.11.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία ΠΔ στις κλάσεις FVC



Διάγραμμα 5.12.: Κατανομή πολυγώνων ΜΚΔΧ με δασική πληροφορία ΑΝΠΔ στις κλάσεις FVC

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Επίτευξη των στόχων της παρούσας μελέτης

Ο κύριος σκοπός της μελέτης ήταν να διερευνηθούν μεθοδολογίες εκτίμησης της βιοφυσικής παραμέτρου Fractional Vegetation Cover FVC, μέσω δεδομένων δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Η παρακολούθηση της FVC, εστιάστηκε στις φασματικές και χωρικές ιδιότητες της.

Αρχικά εκτιμήθηκε η μεταβλητή FVC αναπτύχθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα σε δορυφορική εικόνα και έγινε έλεγχος της ικανότητας μεταφοράς των αλγορίθμων. Σημαντική εφαρμογή των δορυφορικών δεδομένων ήταν η χαρτογράφηση της FVC, και ο υπολογισμός της έκτασης που καταλαμβάνει, με ακρίβεια όπως καθορίστηκε από τη χωρική διακριτική ικανότητα των διαθέσιμων εικόνων.

Τα αποτελέσματα κρίθηκαν θετικά καθώς μπόρεσαν να ικανοποιήσουν την απαίτηση για την ποσοτικοποίηση της παραμέτρου FVC, με την τηλεπισκόπηση να παρέχει μια φαινομενικά προφανή πηγή δεδομένων. Η ανάκλαση των φυτών αποτέλεσε έναν αξιόπιστο εκτιμητή, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό FVC με διαφορετικές μεθόδους από στοιχεία της δορυφορικής εικόνας.

A. Στην παρούσα μελέτη ο πρώτος επιμέρους στόχος, ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα πολυφασματικά δεδομένα **Sentinel-2** στον υπολογισμό και την εκτίμηση της βιογεωφυσικής παραμέτρου FVC. Η μελέτη ανέδειξε την καταλληλότητα της χρήσης των πολυφασματικών δεδομένων **Sentinel-2** αφού προσέφερε πληροφορίες με ικανοποιητική χωρική χρονική και φασματικά ανάλυση, εντελώς δωρεάν.

Η σειρά των δορυφόρων **Sentinel-2** από την ESA, δημιούργησε νέες ευκαιρίες για την ανάπτυξη τεχνικών που βοήθησαν στην χαρτογράφηση και παρακολούθηση της FVC. Η πολυφασματική λήψη των εικόνων, έδωσε τη δυνατότητα να ανιχνευτούν διαφορές μεταξύ βιοφυσικών στοιχείων, οι οποίες δεν ήταν δυνατό να γίνουν αντιληπτές με την ανάλυση μιας μόνο φασματικής ζώνης.

Οι δορυφορικές εικόνες **Sentinel-2** αποδείχτηκαν μια πολύ καλή επιλογή, καθώς η χωρική διακριτική ικανότητα των 10μ., συνιστά ένα σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας στην εκτίμηση FVC. 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.

Σε σύγκριση με τους χρησιμοποιούμενους οπτικούς αισθητήρες ΕΟ (SPOT, Landsat, RapidEye κ.λπ.) σήμερα το **Sentinel-2** έχει καλύτερη και ταχύτερη διαθεσιμότητα δεδομένων μέσω της ESA. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον τεράστιο όγκο δεδομένων και τον χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων που θα πρέπει να επενδυθούν για να αξιοποιηθούν πλήρως τα διαθέσιμα δεδομένα (Jaramaz et.al, 2013).

Ο σημαντικότερος αντίκτυπος του **Sentinel-2** στη διαχείριση της βλάστησης ήταν ο υπολογισμός FVC μέσω φασματικών δειγματοληψιών, παρέχοντας ολοκληρωμένες χωρικές και χρονικές πληροφορίες σχετικά με την ανταπόκριση των φυτών στο τοπικό τους περιβάλλον, που απαιτούνται για ειδικές προσεγγίσεις διαχείρισης (Jaramaz et.al, 2013), για την κατασκευή ή την επαλήθευση μοντέλων που περιγράφουν τις λειτουργίες των οικοσυστημάτων.

Ταυτόχρονα, η πλατφόρμα **Snap** που χρησιμοποιήθηκε, διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία δεικτών βλάστησης, και βιοφυσικών παραμέτρων, η χρήση των οποίων ήταν απλή. Διατίθεται δωρεάν από την ESA και είναι πλήρως προσαρμοσμένη στην επεξεργασία των εικόνων Sentinel-2. Το **Snap** είχε πολύ καλή συμβατότητα με το ArcGIS 10.2.2. της ESRI.

Β. Δεύτερο επιμέρους στόχο της μελέτης αποτέλεσε η αξιοποίηση και υιοθέτηση μεθόδων επεξεργασίας και ανάλυσης δορυφορικών εικόνων που θα μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες σχετικές με τη χαρτογράφηση της FVC. Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό FVC, ως χρήσιμης πληροφορίας από επιχειρησιακή άποψη, είχαν θεωρητικές βάσεις και ήταν εφαρμόσιμες. Το σημαντικό πλεονέκτημα τους ήταν ότι μπόρεσαν να αποδυναμώσουν στη διαδικασία εκτίμησης FVC τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας και του υπόβαθρου του εδάφους (Liu et.al., 2019).

Γ. Η αξιολόγηση των μεθόδων υπολογισμού Fractional Vegetation Cover FVC μέσω των δεικτών βλάστησης (Vegetation Indices) και των νευρωνικών δικτύων (Neural Network) και η επιλογή αυτής που εμφανίζει την υψηλότερη συσχέτιση ήταν ο **τρίτος επιμέρους στόχος της μελέτης.**

Όσο αφορά τις μεθόδους υπολογισμού - εκτίμησης FVC 1 & FVC 2 με χρήση του Δείκτη Βλάστησης NDVI:

- παρουσιάστηκε μεγάλη ευαισθησία στη βιοφυσική παραμέτρο της βλάστησης, με γραμμική απόκριση και ανταποκρίθηκαν σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών βλάστησης, διευκολύνοντας τον έλεγχο και την προσαρμογή του σε αυτές,

- μειώθηκαν οι εξωτερικές επιδράσεις (external effects) στα δεδομένα όπως αυτές που δημιουργούνται από τη γωνία πρόσπτωσης του Ηλίου, τη γωνία λήψης, και την ατμόσφαιρα και ήταν δυνατή η χωρική σύγκριση των δεδομένων,
- συσχετίστηκαν με πραγματικές μετρήσεις βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης ώστε να μπορεί ελέγχεται η ακρίβεια.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος FVC 2 των Carlson and Ripley, (1997), στην οποία χρησιμοποιήθηκε η σχέση του NDVI υψωμένη στο τετράγωνο είχε καλύτερη απόδοση από το τη μέθοδο FVC 1 με την υψηλότερη ακρίβεια (**89,867%**).

Οι μέθοδοι FVC 1 & FVC2 σε σχέση με τη μέθοδο του αυτοματοποιημένου αλγορίθμου Neural Network, υπολογισμού του FVCover, προϋποθέτουν τον υπολογισμό των μέγιστων και ελαχίστων τιμών στην περιοχή όπου εφαρμόζονται. Υπήρξαν δυσκολίες στην επιλογή των διαστημάτων εκτίμησης των NDVI_{max} και NDVI_{min}, οι οποίες ίσως επηρέασαν την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

Οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά είδη τύπων βλάστησης και σε διαφορετικές κλίμακες (Bingfang et al., 2004). Θεωρητικά, οποιαδήποτε από αυτές μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή, ανεξάρτητα από την ευαισθησία τους σε διάφορες περιβαλλοντικές συνιστώσες που θα μπορούσαν να περιορίσουν την αποτελεσματικότητά τους (Silleos et.al,2006).

Δ. Για την εκτίμηση της ακρίβειας των παραγόμενων χαρτών FVC (Fractional Vegetation Cover) με χρήση δεδομένων πεδίου ως τέταρτο επιμέρους στόχο, η συγκεκριμένη μελέτη απέδωσε σαφή και σχετικά ακριβή αποτελέσματα στην περιοχής μελέτης. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην εφαρμογή μεθόδων και στην αξιολόγηση της συνεισφοράς τους στην ακρίβεια εκτίμησης FVC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αξιοποίηση πληροφοριών βοήθησαν στη συνολική ακρίβεια, αν και στην περίπτωση της FVC 1 μεθόδου η ακρίβεια δεν ήταν ικανοποιητική.

Ο πίνακας σφαλμάτων ήταν ένας αποτελεσματικός τρόπος για να εκτιμηθεί η ακρίβεια των θεματικών χαρτών διότι περιλάμβανε τις επιμέρους ακρίβειες για κάθε κλάση, μαζί με τα σφάλματα παράλειψης και αναπλήρωσης. Μπόρεσε να δώσει πληροφορίες για τη συνολική ακρίβεια. Οι ακρίβειες του παραγωγού και του χρήστη αποτέλεσαν έναν τρόπο παρουσίασης της ακρίβειας των μεμονωμένων κλάσεων εκτός της συνολικής ακρίβειας.

Παρουσιάζοντας αναλυτικά τα αποτελέσματα, και συγκρίνοντας τα με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σαν αναφορά ο πίνακας σφαλμάτων επέτρεψε να εντοπιστούν οι κλάσεις που παρουσιάζουν αδυναμία. Με κατάλληλες επεμβάσεις κατά επιλογή,

μπορεί να βελτιωθεί μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία όσες φορές κρίνεται απαραίτητο, για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα ακρίβειας (Δημητρακόπουλος, 2010).

Εκτός όμως από την υψηλή ποιότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων, απαιτήθηκε και υψηλή ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων του πεδίου. Η καταγραφή των κατηγοριών βλάστησης έγινε με μετρήσεις πεδίου. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα στη διερεύνηση της συσχέτισης των δεικτών βλάστησης με την παράμετρο της βλάστησης FVC ήταν τα δεδομένα αναφοράς σε κατάλληλο χρόνο αφού συνέπιπτε χρονικά η λήψη τους, με τη λήψη της δορυφορικής εικόνας, τηρώντας τις προϋποθέσεις και τις αρχές της δειγματοληψίας.

Ε. Όσο αφορά τον πέμπτο επιμέρους στόχο αποδείχθηκε ότι τα πολύγωνα του μερικά κυρωμένου δασικού χάρτη της περιοχής μελέτης, αποτέλεσαν τη δεξαμενή της βάσης δεδομένων απομονώνοντας από την καταγραφή των οριογραμμών τους μόνο τη δασική πληροφορία και συσχετίζοντας τη με το βέλτιστο αποτέλεσμα της μεθόδου FVC 2. Τα στοιχεία που δημιουργήθηκαν μπορούν να αποτελέσουν τα θεμέλια για την τράπεζα πληροφορίας δασικής γης, την ενημέρωση των χαρτών βλάστησης καθώς και να συμβάλλουν στην απογραφή και χαρτογράφηση των δασικών οικοσυστημάτων της χώρας.

Η χρήση διαχρονικών δορυφορικών δεδομένων για την παρακολούθηση αλλαγών του *FVC* σε συνδυασμό με τον μερικά κυρωμένο δασικό χάρτη μπόρεσε να προσφέρει μία ολοκληρωμένη και γρήγορη καταγραφή των δεδομένων της περιοχής μελέτης σε πολύ μικρό χρόνο και χωρίς κόστος. Τόσο οι βιβλιογραφικές πηγές, όσο και τα στοιχεία της Δασικής υπηρεσίας τεκμηρίωσαν την εξαγόμενη εκτίμηση FVC, η οποία εναρμονίστηκε πλήρως με τα φυσικά οικοσυστήματα της περιοχής.

Τα αποτελέσματα που πρόέκυψαν από τη σύνθεση των θεματικών δεδομένων FVC και των πληροφοριακών δεδομένων των πολυγώνων του ΜΚΔΧ, για να έχουν συνεχή και συστηματική επιχειρησιακή χρήση θα πρέπει να εισαχθούν σε μια **διαχειριζόμενη τράπεζα δασικών πληροφοριών**, με δυνατότητες επεξεργασίας και απόκτησης των κάθε φορά κατάλληλων δεδομένων και ταυτόχρονα να υπάρχει:

- επαναλαμβανόμενη κάλυψη
- μακροχρόνια παρακολούθηση
- συστηματική κωδικοποίηση νέων δεδομένων
- συστηματική ενημέρωση των αλλαγών που προκύπτουν στην περιοχή μελέτης
- αντιπροσωπευτικά δεδομένα πεδίου της περιοχής μελέτης

ΣΤ. Η δημιουργία του τελικού χάρτη FVC με τη χρήση κανόνων με την καλύτερη συνολική ακρίβεια, αποτέλεσε τον τελευταίο επιμέρους στόχο της μελέτης. Με την επεξεργασία της γεωγραφική πληροφορίας των δεδομένων και της προτεινόμενης μεθοδολογίας, επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου χαρτογραφικού προϊόντος. Παρουσιάστηκαν διεξοδικά όλες οι διαδικασίες για την εξαγωγή των παράγωγων εικόνων από την ανάλυσή τους έως και τη σύνθεση των τελικών χαρτών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες αποδείχτηκαν λειτουργικές και αξιόπιστες στην συγκεκριμένη περίπτωση ενώ οι θεματικοί χάρτες που παρήχθησαν επιβεβαιώθηκαν με επιτόπιες παρατηρήσεις

6.2. Συνέργεια Τηλεπισκόπησης και GIS στην εκτίμηση FVC

Ο συνδυασμός των καναλιών της δορυφορικής εικόνας για την εξαγωγή της πληροφορίας FVC, η εφαρμογή τεχνικών οπτικής βελτίωσης της για να γίνουν εμφανή τα φασματικά και χωρικά χαρακτηριστικά της και η εφαρμογή αλγορίθμων για την εξαγωγή των επιθυμητών κατηγοριών, ήταν τεχνικές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης που έλαβαν μέρος στην παρούσα μελέτη με επιτυχία.

Η χρήση μεθόδων Τηλεπισκόπησης για τους σκοπούς που τέθηκαν μπόρεσε να δώσει σημαντικά αποτελέσματα με ικανοποιητικές ακρίβειες σε σύντομο χρονικό διάστημα, με δυνατότητες δυναμικής επεξεργασίας συνδυασμού με άλλα δεδομένα, εύκολης αναπαραγωγής, χωρικής/περιγραφικής απόδοσης και ελεύθερης απόκτησης δεδομένων.

Τα πλεονεκτήματα της τηλεπισκόπησης σύμφωνα με τους Townshend et al., (1981), που επιβεβαιώθηκαν και στην παρούσα εργασία ήταν:

- Η ικανότητα χωρικής αντίληψης των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων, σε σχέση με τις εργασίες υπαίθρου.
- Η κάλυψη της περιοχής μελέτης ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί χρονικά γρήγορα και, κατά συνέπεια, έγινε δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών δεδομένων από την ίδια περιοχή.
- Η συνοπτική απεικόνιση μεγάλων περιοχών στην πολυφασματική εικόνα Sentinel 2 κατέστη δυνατή την ταυτοποίηση ευρείας κλίμακας διαφοροποιήσεων των βιοφυσικών στοιχείων της περιοχής.
- Η δυνατότητα λήψεων από τους δορυφόρους έδωσε την ευκαιρία να μελετηθούν δυναμικά φαινόμενα. να γίνουν συγκρίσεις και να καταγραφούν φαινόμενα σε συνεχή βάση (monitoring).

Με τη χρήση της Τηλεπισκόπησης και των ΓΣΠ κατέστη δυνατή η δημιουργία μιας ψηφιακής βάσης δεδομένων ικανοποιητικής ακρίβειας, σε σχέση με την FVC. Με τη χρήση των GIS συνδυάστηκαν πολλές χωρικές μεταβλητές, αναβαθμίστηκε και ανακτήθηκε η χωρική πληροφορία και εξήχθηκαν πρότυπα χαρτογράφησης, συνδυάζοντας με διαφορετικούς τρόπους την πληροφορία.

Η Τηλεπισκόπηση και τα GIS συνέβαλλαν στη βελτίωση της περιβαλλοντικής γνώσης και διαχείρισης σε τοπικό επίπεδο. Η διαχείριση των φυσικών πόρων, και ο χωρικός σχεδιασμός της περιοχής θα μπορέσουν να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα που προσέφερε η επιτυχημένη χαρτογράφηση. Ο συνδυασμός των Γ.Π.Σ. με την Τηλεπισκόπηση αποδείχθηκε μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την χαρτογράφηση και την παρακολούθηση περιοχών ενδιαφέροντος λόγω της δυνατότητας συνεχούς ενημέρωσης των πληροφοριών που λαμβάνονται.

Η Τηλεπισκόπηση θεωρήθηκε μια ελκυστική μέθοδος στη μελέτη φυσικών διεργασιών εξαιτίας της δυνατότητας εξαγωγής και χρήσης των χωρικών δεδομένων (Γεωργοπούλου, 2013). Η εξοικείωση με την Τηλεπισκόπηση απαιτεί μεγάλη ενασχόληση και αφιέρωση χρόνου, καθώς παρέχει μία μεγάλη ποικιλία επιλογών και εργαλείων.

Η διαθεσιμότητα των δεδομένων υψηλής φασματικής ευκρίνειας και χωρικής διακριτικής ικανότητας, η εξάλειψη των περιορισμών στη χρήση και στον έλεγχο τους και η συνεχή απλοποίηση των διαδικτυακών εφαρμογών με τις οποίες επιτρέπεται η γρήγορη διανομή και ανταλλαγή δεδομένων, συνέβαλλε στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Η βιοφυσική παράμετρος *FVC* είναι ζωτικής σημασίας για την αντιπροσώπευση των εικονοστοιχείων στα μοντέλα της επιφάνειας της γης (Zeng et al., 2000), και ένας πολύ καλός υποψήφιος για την αντικατάσταση των κλασσικών δεικτών βλάστησης (Baret et al, 2006).

Το ζητούμενο ήταν η συνέργεια όλων των διαθέσιμων πόρων, και πλέον των δορυφορικών δεδομένων για την τράπεζα πληροφορίας δασικής γης, για την επιστημονική χαρτογράφηση της βλάστησης, για τις ανάγκες απογραφής έρευνας και διαχείρισης των φυσικών οικοσυστημάτων.

6.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

1. Διερεύνηση χρήσης *υπερφασματικών* αισθητήρων (hyperspectral) οι οποίοι περιλαμβάνουν εκατοντάδες διαύλους και χρησιμοποιούνται σε πολλές και πολύ μικρές περιοχές του οπτικού φάσματος. Μεταβάλλοντας την φασματική διαχωριστική ανάλυση (spectral resolution) του συστήματος θα επιτευχθεί διαφορετική ποιότητα στα αποτελέσματα εκτίμησης FVC. Όσο αυξάνεται η φασματική ανάλυση, τόσο μειώνεται ο αριθμός των μηκών κύματος που καταγράφει το κάθε φασματικό κανάλι του αισθητήρα, και επιτυγχάνεται ακριβέστερη απόδοση της φασματική καμπύλης του κάθε υλικού (Ιερωνυμίδης, 2009).
2. Δορυφορικά Δεδομένα πολύ υψηλής ευκρίνειας UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ως γέφυρα με δεδομένα πεδίου και αποτελέσματα αναστροφής δορυφορικών δεδομένων για την ανάλυση της επαλήθευσης, στηριζόμενοι στην παραδοχή ότι διαφορετικά συστήματα τηλεπισκόπησης μπορεί να παράγουν και διαφορετικούς τύπους ανάλυσης των δεδομένων.
3. Επιλογή τακτών χρονικών διαστημάτων παρατήρησης και καταγραφής της μεταβολής FVC για τη διαχείριση των φυσικών οικοσυστημάτων.
4. Διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων των φασμάτων εδάφους με τον δείκτη NDVI και την τελική επίδραση του στην εκτίμηση FVC.
5. Σε μελλοντική προσέγγιση θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εικόνες από πολλές χρονικές στιγμές μέσα στο έτος (χρονοσειρές) έτσι ώστε να καλυφθεί ο φαινολογικός κύκλος των διάφορων τύπων βλάστησης στις διαφορετικές εποχές αλλά και οι διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση FVC.
6. Δημιουργία μεθόδων που βασίζονται στην γνώση της περιοχής και των χαρακτηριστικών της (knowledge ή rule based method) θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο καθώς θα διαχειρίζονταν διαφορετικές πηγές δεδομένων στην τελική εκτίμηση FVC και στη δημιουργία ενός ακριβέστερου χάρτη.
7. Διερεύνηση ανάπτυξης ειδικών αλγόριθμων Neural Network για την ανίχνευση καταστάσεων ετερογένειας γειτονικών εικονοστοιχείων και ενδεχομένως προτάσεις εναλλακτικών μεθόδων ανάκτησης με ιδιαίτερη έμφαση στα μεσογειακά περιβάλλοντα, που χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό ποικιλομορφίας.
8. Διερεύνηση της αλλαγής των διαστημάτων διάκρισης των ποσοστών FVC. Ενδιαφέρον προς διερεύνηση θα είχε η διάκριση των εκτάσεων με δασική βλάστηση ή μη, βασισμένη στην ευρωπαϊκή νομοθεσία και σύγκριση με την ελληνική νομοθεσία

Έτσι θα υπήρχε η δυνατότητα της οπτικοποίησης των διαφορών που θα προέκυπταν από την εφαρμογή των διαφορετικών νομοθεσιών, στα φυσικά οικοσυστήματα.

9. Έλεγχος στα ετερογενή εικονοστοιχεία στα σημεία μίξης.

10. Παρά τον μεγάλο αριθμό δεικτών βλάστησης που χρησιμοποιούνται σήμερα, πρέπει να διεξαχθούν επιπλέον έρευνες για τον τρόπο με τον οποίο οι διαδικασίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αθανασιάδης, Ν., (1986). "*Δασική Φυτοκοινωνιολογία*", Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Ανδρώνης, Β., Καραθανάση, Β., (2016). "Χαρτογράφηση Πυκνότητας Βλάστησης με Χρήση Υπερφασματικών Απεικονίσεων." *Πρακτικά 8ου Διεπιστημονικού-Διαπανεπιστημιακού Συνεδρίου: Η Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη των ορεινών και των γεωγραφικά απομονωμένων περιοχών.*, Μέτσοβο, 22-24 Σεπτεμβρίου, Ε.Μ.Π..
- Βασιλάκη Π., (2014). "*Παρακολούθηση των αλλαγών της κάλυψης γης με τη χρήση δορυφορικών εικόνων.*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Γεωργοπούλου, Η., (2013). "*Χαρτογράφηση Χρήσεων/Κάλυψης γης σε ελληνικό χώρο με χρήση υπερφασματικών δεδομένων τηλεπισκόπησης και τεχνικών χωρικής ανάλυσης Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων.*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Γιαννάκης, Β., (2017). "*Η συμβολή της Δασοκομίας στην αντιμετώπιση ζητημάτων Κτηματολογίου.*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Γκίνης, Ι., (2015). "*Υποστήριξη της ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων με μεθόδους φασματικού διαχωρισμού εικονοστοιχείων.*" Ερευνητική Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Γρηγοριάδης Δ., (2017). "*Διερεύνηση του ρόλου χρήσης δορυφορικών εικόνων στην κατάρτιση του Δασολογίου βάσει του ισχύοντος νομικού πλαισίου.*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Δημητρακόπουλος Κ., (2010). "*Χαρτογράφηση χρήσης/κάλυψης γης με την αντικειμενοστραφή ταξινόμηση εικόνων SPOT.*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Δρουγκελίδης Φ., (2015). "*Διαχρονική παρακολούθηση των αλλαγών των χρήσεων γης σε δασική περιοχή με χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS).*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Ιερωνυμίδα, Ε., (2009). "*Ανάπτυξη μεθόδων συγχώνευσης τηλεπισκοπικών δεδομένων και εφαρμογή στην παρατήρηση βλάστησης σε περιοχές με προηγούμενη μεταλλευτική δραστηριότητα.*" Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Καράταγλης, Σ., (1995). "*Φυσιολογία Φυτών*", Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Art of text.
- Καρπούζας, Σ., (2015). "*Χρήση Χρονολογικής σειράς δορυφορικών εικόνων Landsat (1993-2001-2010) για τη χαρτογράφηση των αλλαγών χρήσης/κάλυψης γης του Δήμου Μεγάρων.*" Μεταπτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Καρτέρης Μ., (1990). "*Δασική Αεροφωτογραφία*", Β' Έκδοση, Θεσσαλονίκη, University Studio Press.
- Καρτέρης Μ., (1992). "*Τηλεπισκόπηση φυσικών πόρων και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών*", Θεσσαλονίκη.
- Καρτέρης, Μ.Α, Μελιάδης, Ι.Μ., (1992). "*Ταξινόμηση δασικών εκτάσεων με δορυφορικά δεδομένα.*" *Πρακτικά 5^{ου} Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου: Έρευνα και πράξη στα Ελληνικά Δάση.* Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Καλαμάτα.
- Μαλλίνης Γ., (2006). "*Αξιολόγηση της δυνατότητας χρησιμοποίησης δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής ευκρίνειας και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών*"

- στα πλαίσια σύνταξης του Δασολογίου." Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Ντάφης, Σ.Α., (1986). *"Εφαρμοσμένη Δασοκομική"*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Οικονομάκης Ν., (2008). *"Αξιολόγηση δεικτών βλάστησης για την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης από δορυφορικές εικόνες."* Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Παπαγεωργίου, Μ., (2016). *"Σύγκριση Θεματικών Χαρτών Χρήσεων/Καλύψεων γης από τηλεπισκοπικά προϊόντα για την ανάπτυξη υπηρεσιών οικοσυστήματος."* Μεταπτυχιακή Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Παπαδοπούλου Δ., (2008). *"Συγχώνευση δεδομένων πολύ υψηλής ευκρίνειας."* Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Παπαθανασόπουλος, Α., (2014). *"Δίκαιο των Δασικών Οικοσυστημάτων: Κατά άρθρο ερμηνεία - νομολογία"*, Εκδόσεις ΝΟΜΟΡΑΜΑ.ΝΤ.
- Συλλαίος, Ν., (1990). *"Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία"*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Συμεωνίδης, Π., Βάκκας, Θ., Τασκάρης, Σ., Αθανασοπούλου, Ε., Μαυρέλλης, Γ., (2017). *"GETOPENDATA: Πλατφόρμα διάθεσης και ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων Sentinel-2."* Πρακτικά 2ου Συνεδρίου Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και Χωρικής Ανάλυσης στη Γεωργία και στο Περιβάλλον", Hellas GIS, Αθήνα, 25-26 Μαΐου.
- Tele Kyoto, (2014). *"Χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης και χλωροφύλλης βάσει ανάλυσης υπερφασματικών εικόνων Casi."* Θεσσαλονίκη.
- Τομπουλίδου Μ., (2011). *"Αξιολόγηση της δυνατότητας διάκρισης των δασών και δασικών εκτάσεων της χώρας με ψηφιακή ανάλυση δορυφορικών δεδομένων."* Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Τσακαλίδης Σ., (2007). *"Χρήση της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην καταστολή των δασικών πυρκαγιών."* Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Ψωμιάδης, Ε., Δέρκας, Ν., Δαλέζιος, Ν., Σπυρόπουλος Ν., (2017). *"Εκτίμηση συσχέτισης δεικτών βλάστησης μεταξύ των δορυφορικών συστημάτων Worldview-2 και Sentinel-2."* Πρακτικά 2ου Συνεδρίου Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και Χωρικής Ανάλυσης στη Γεωργία και στο Περιβάλλον, Hellas GIS, Αθήνα, 25-26 Μαΐου.

Προεδρικά Διατάγματα - Υπουργικές Αποφάσεις:

- 97414/754/6-9-2007 (ΦΕΚ 1811/Τεύχος Β'/10-09-2007): *"Καθορισμός τεχνικών προδιαγραφών κατάρτισης δασικών χαρτών και λοιπών που αφορούν στην παρ. 5 του άρθρου 27 του Ν. 2664/1998."*
- Π.Δ. 32/2016 (ΦΕΚ 46/Α'/31-3-2016): *"Ορισμός επιστημονικών κριτηρίων και συνεκτιμώμενων στοιχείων για την υπαγωγή εκτάσεων στις περιπτώσεις των παραγράφων 1, 2 και 5 του άρθρου 3 του Ν. 998/1979"*.

Ξένη Βιβλιογραφία

- Ahl, D.E., Gower, S.T., Mackay, D.S., Burrows, S.N., Norman, J.M., & Diak, G.R. (2004). "Heterogeneity of light use efficiency in a northern Wisconsin forest: implications for modeling net primary production with remote sensing." *Remote Sensing of Environment*, 93, 168-178.
- Ali, I., Greifeneder, F., Stamenkovic, J., Neumann, M., and Notarnicola, C., (2015). "Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data." *Remote Sensing*, 7(12): 16398-16421.
- Asner, G.P., (1998). "Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance." *Remote Sensing of Environment*, 64:234-253.
- Asrar, G., Kanemasu, E.T., Jackson, R.D., and Pinter, P.J., Jr. (1985). "Estimation of total aboveground phytomass production using remotely sensed data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 17(3), pp. 211-220.
- Baret, F. and Guyot, G., (1991). "Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment." *Remote Sensing of Environment* 35, pp. 161-173.
- Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., McClain, C. R., Feldman, G. C., Los, S. O., Tucker, C. J., et al. (2001). "Biospheric primary production during an ENSO transition." *Science*, 291(5513), 2594.
- Bingfang, W., Miaomiao, L., Changzhen, Y., Weifeng, Z. and Changzhen, Y., (2004). "Developing method of vegetation fraction estimation by remote sensing for soil loss equation: a case in the upper basin of Miyun Reservoir." In *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 6, pp. 4352-4355).
- Carlson, T.N., Perry, E.M., and Schmugge, T.J., (1990). "Remote estimates of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields." *Agriculture and Forest Meteorology*, 52, 45- 70.
- Carlson, T.N., Ripley, D.A., (1997). "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index." *Remote Sensing of Environment*, vol. 62, no. 3, pp. 241-252.
- Carlson, T., (2007). "An overview of the "Triangle Method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery." *Sensors*, 7(8), pp.1612-1629.
- Caylor, J., (2000). "Aerial photography in the next decade." *Journal of Forestry*, 98, 17-19.
- Chen, I., Paulraj, A., (2004). "Towards a theory of supply chain management: the constructs and measurements." *Journal of Operations Management*, Vol. 22, Issue 2, p: 119-150
- Choudhury, B.J., (1987). "Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 22(2), pp.209-233.
- Clevers, J., (2017). "Using Sentinel 2 data for retrieving crop properties: The potato case." Workshop Agriculture and Earth Observation 4-5 July.
- Collins, J.B., Woodcock, C.E., (1996). "An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data." *Remote sensing of environment*, 56(1), 66-77.
- Congalton, G.R., (1991). "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data", *Remote Sensing of Environment*." 37(1), pp.35-46.

- Congalton, G.R., Green, K., (1999). "Assesing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices". *Lewis Publishers, Boca Raton London New York Washington, D.C.*
- Congalton, R.G. and Green, K., (2008). "Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices." CRC press.
- Corona, P., (2010). "Integration of forest mapping and inventory to support forest management." *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 3(3): 59-64.
- Curran, P.J., (1983). "Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index." *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)*, 309, 257- 270.
- Cushnie, J.L., (1987). "The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies." *International Journal of Remote Sensing*, 8, 15-29.
- Dalponte, M., Orka, H.O., Gobakken, T., Gianelle, D., and Næsset E., (2013). "Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 2632-2645.
- Davids, C., Tyler, A.N., (2003). "Detecting contamination-induced tree stress within the Chernobyl exclusion zone." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp 30-38.
- Demuth, H., and Beale, M., (1998). "User's guide for neural network toolbox for use with MATLAB." *The Mathworks Inc, Natick*, 3.
- Despotakis, V., Giaoutzi, M., & Nijkamp, P., (1991). "Spatial depiction of local sustainable development." *Serie Research Memoranda 0107*, VU University Amsterdam, Faculty of Economics, Business Administration and Econometrics.
- Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., (1978). "Leaf hairs: Effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub." *Oecologia*, 37, 183–200.
- European Space Agency, "Copernicus Tutorial: Working with Sentinel-2 products."
- ESA SNAP Toolbox –help, Sentinel 2 derived Biophysical parameters for yield modeling.
- Fassnacht, F.E., Neumann, C., Förster, M., Buddenbaum, H., Ghosh, A., Clasen, A., K. Joshi, P., and Koch, B., (2014). "Comparison of feature reduction algorithms for classifying tree species with hyperspectral data on three central European test sites." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(6): 2547-2561.
- Favorskaya, M.N., Jain, L.C., (2017). "Handbook on Advances in Remote Sensing and Geographic Information Systems." Springer.
- Fernandes, R., Leblanc, S., (2005). "Parametric (modified least squares) and non-parametric (theil-sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors." *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 303–316.
- Foody G.M., (2002). "Status of land cover classification accuracy assessment." *Remote Sensing of Environment*, 80, pp. 185–201
- Frampton, W.J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E.J., (2013). "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, pp. 83–92.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., PenAuelas, J., Valentini, R., (1995). "Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types." *Ecol. Appl.* 5, pp. 28-41.
- Gates, W.L., (1976). "An Essay on Climate Dynamics." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 57, 542–547.

- Geerken, R., Batikha, N., Celis, D., & DePauw, E. (2005). "Differentiation of rangeland vegetation and assessment of its status: Field investigations and MODIS and SPOT VEGETATION data analyses." *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4499-4526.
- Ghosh, A., Fassnacht, F.E., Joshi, P., and Koch, B., (2014). "A framework for mapping tree species combining hyperspectral and LiDAR data: Role of selected classifiers and sensor across three spatial scales." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 49-63.
- Gibson, P., & Power, C., (2000). "Introductory Remote Sensing: Digital Image Processing and Applications". *Routledge, 29 West 35th Street, New York, NY 10001*
- Gibson, P., (2013). "Introductory remote sensing principles and concepts", Routledge.
- Gillis, M.D., Leckie, D.G., (1993). "Forest inventory mapping procedures across Canada." Information report P1-X-114. Can. For. Serv., Petawawa Natl. For. Inst., Chalk River, Ont.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., Rundquist, D., (2002). "Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction." *Remote Sensing of Environment*, 80, pp.76-87.
- Gitelson Anatoly A., (2004). "Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation." *Journal of Plant Physiology*, 161, pp.165-173.
- Gonzalez, R. C., and Wintz, P., (1987). "*Digital image processing*", 2nd edition. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Green, E., Mumby, P., Edwards, A., Clark, C., & Ellis, A., (1998). "The assessment of mangrove areas using high resolution multispectral airborne imagery." *Journal of Coastal Research*, 433-443.
- Gudex-Cross, D., Pontius, J., and Adams, A., (2017). "Enhanced forest cover mapping using spectral unmixing and object-based classification of multi-temporal Landsat imagery." *Remote sensing of Environment* 196: 193-204.
- Gupta, S.K., Pandey, A.C., (2018). "Fraction of vegetation cover and its application in vegetation characterization in the Hazaribagh wildlife sanctuary Jharkhand, India." *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 7: 2560-2573.
- Gutman, G. and Ignatov, A. (1998). "The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models", *International Journal of Remote Sensing*, 19: 8, 1533- 1543.
- Hall, R.J., & Fent, L., (1996). "Influence of aerial film spectral sensitivity and texture on interpreting images of forest species composition." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22,350-359.
- Haykin, S., (1999). "Neural Networks - A Comprehensive Foundation." Prentice Hall, 2nd edition.
- Holben, B.N. (1986). "Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data." *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417-1434.
- Holben, B.N., Kimes, D.S., and Fraser, R.S., (1986). "Directional reflectance in AVHRR red and near-infrared bands for three cover types and varying atmospheric conditions." *Remote Sensing of Enviroment*. 19, pp. 213-236.
- Hope, A., Kimball, J., & Stow, D., (1993). "The relationship between tussock tundra spectral reflectance properties and biomass and vegetation composition." *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1861-1874.

- Hopkins, F.P., MacLean, A.L., Lillesand, T.M., (1988). "Assessment of Thematic Mapper Imagery for Forestry Applications under Lake States conditions." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (1), pp. 61-68.
- Hsieh H.C., C.C.C. (1995). "An analysis of vegetation greenness of Fu-shan with SPOT XS multitemporal data." *Bulletin of Taiwan Forest Research Institute New Series*, 10 (1), pp. 105-120 (in Chinese with English abstract).
- Huete, A., Justice, C., Liu, H., (1994). "Development of vegetation and soil indices for MODIS EOS." *Remote Sensing of Environment*, **49**, 224-234.
- Immitzer, M., Vuolo, F., Atzberger, C., (2016). "First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe." *Remote Sensing* 8(3): 166.
- Irons, J., Markham, B., Nelson, R., Toll, D., Williams, D., Latty, R. and Stauffer, M., (1985). "The effects of spatial resolution of the classification of thematic mapper data." *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1385-1403.
- Jaramaz, D., Perovic, V., Belanovic, S., Saljnikov, E., Cakmak, D., Mrvic, V. and Zivotic, L., (2013). "The ESA Sentinel-2 Mission Vegetation Variables for Remote Sensing of Plant Monitoring." In *Proceedings, 2nd International Scientific Conference*.
- Jasinski, M.F., (1990). "Sensitivity of the normalized difference vegetation index to subpixel canopy cover, soil albedo, and pixel scale." *Remote Sensing of Environment*, 32, 169-187.
- Jensen R.J., (2007). "Remote Sensing of the Environment, An Earth Resource Perspective." Second Edition. *Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458*.
- Jia, K., Liang, S., Zhang, L., Wei, X., Yao, Y., and Xie, X., (2014). "Forest cover classification using Landsat ETM+ data and time series MODIS NDVI data." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33: 32-38.
- Jia, K., Li, Y., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., (2017). "Combining Estimation of Green Vegetation Fraction in an Arid Region from Landsat 7 ETM + Data." *Remote Sensing*, 9, 1121.
- Jiménez-Muñoz, J., Sobrino, J., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J. and Martínez, P., (2009). "Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area." *Sensors*, 9(2), pp.768-793.
- Justice, C., Hall, D., Salomonson, V., Privette, J., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myleni, R., Knjazihhin, Y., Running, S., Nemani, R., Vermote, E., Townshed, J., Defries, R., Roy, D., Wan, Z., Huete, A., Leeuwen, W. van, Wolfe, R., Giglio, L., Muller, J. -P., Lewis, P., and Barnsley, M., (1998). "The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, pp. 1228-1249.
- Karteris, M.A., (1991). "Classification of mediterranean forested areas with SPOT data." Πρακτικά Συμποσίου "Fernerkundung in Der Forstwirtschaft- Stand und Entwicklungem"-Albert-Ludwigs Universität, Freiburg, Germany, σελ.11.
- Kim, M., Lee, J., Han, D., Shin, M., Im, J., Lee, J., Quackenbush, L.J. and Gu, Z., (2018). "Convolutional Neural Network-Based Land Cover Classification Using 2-D Spectral Reflectance Curve Graphs With Multitemporal Satellite Imagery." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(12), pp.4604-4617.

- Kokaly, R.F, Despain, D.G., Clark, R.N., Livo, E., (2003). "Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, pp. 437-456.
- Kouchi, H.S., Sahebi, M.R., Abkar, A.A., Zoej, M.J.V., (2013). "Fractional Vegetation Cover Estimation In Urban Environments." *International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information sciences*, Volume XL-1W3(October), pp. 5–8.
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., and Champagne C.,(2015). "Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **34**: 235-248.
- Kumar, L., Sinha, P., Taylor, S., and Alqurashi A.F., (2015). "Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation." *Journal of Applied Remote Sensing*, **9**(1): 097696-097696.
- Kustas, W. P., Schmugge, T. J., Humes, K. S., Jackson, T. J., Parry, R., Weltz, M. A., and Moran, M. S., (1993). "Relationships between evaporative fraction and remotely sensed vegetation index and microwave brightness temperature for semiarid rangelands." *Journal of Applied Meteorology*, **32**, 1781-1790.
- Li, W., Weiss, M., Waldner, F., Defourny, P., Demarez, V., Morin, D., Hagolle, O., Baret, F., (2015). "A Generic Algorithm to Estimate LAI, FAPAR and FCOVER Variables from SPOT4_HRVIR and Landsat Sensors: Evaluation of the Consistency and Comparison with Ground Measurements." *Remote Sensing*, **7**, pp.15494-15516.
- Lichtenthaler, H.K., (1987). "Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes." In: Colowick, S.P., Kaplan, N.O. (Eds.), *Methods in Enzymology*, Vol. 148, pp.350–382. San Diego: Academic Press.
- Lichtenthaler, H.K., Gitelson, A., Lang, M., (1996). "Non-Destructive Determination of Chlorophyll Content of Leaves of a Green and an Aurea Mutant of Tobacco by Reflectance Measurements." *Journal of Plant Physiology*, **148**, 483–493.
- Lin, S. and Liu, R., (2016). "A simple method to extract tropical monsoon forests using NDVI base,d on MODIS data: a case study in South Asia and Peninsula Southeast Asia." *Chinese geographical science*, **26**(1): 22-34.
- Lin, W.-T., Lin, C.-Y., & Chou, W.-C., (2006). "Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan." *Ecological Engineering*, **28**, 79-89.
- Liu, D., Yang, L., Jia, K., Liang, S., Xiao, Z., Wei, X., Yao, Y., Xia, M., Li, Y., (2018). "Global Fractional Vegetation Cover Estimation Algorithm for VIIRS Reflectance Data Based on Machine Learning Methods." *Remote Sensing*, **10**, 1648.
- Liu, Q., Zhang, T., Li, Y., Li, Y., Bu, C. and Zhang, Q., (2019). "Comparative Analysis of Fractional Vegetation Cover Estimation Based on Multi-sensor Data in a Semi-arid Sandy Area." *Chinese Geographical Science*, **29**(1), pp.166-180.
- Lu D., Mausel, P., Brondizio E., & Moran E., (2004). "Change detection techniques." *International journal of remote sensing*, **25**(12) 2365-2401.
- Lu, D., and Weng, Q., (2007). "A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance." *International journal of Remote sensing*, **28**(5), pp.823-870.
- Lund, H.G., and Thomas, C.E., (1989). "A primer on stand and forest inventory designs." *Gen. Tech. Rep. WO-54. Washington, DC: US Department of Agriculture Forest Service*. 96: p. 54.

- Mancino, G., Nolè, A., Ripullone, F., and Ferrara, A., (2014). "Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in Basilicata, southern Italy." *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(2): 75.
- Martin, M.E., Newman, S.D., Aber, J.D., Congalton, R.G., (1998). "Determining Forest Species Composition Using High Spectral Resolution Remote Sensing Data." *Remote Sensing of Environment* 65, pp. 249-254.
- McCoy, R.M., (2005). "*Field methods in remote sensing*." Guilford Press.
- McMichael, C.E. (1999). "Estimating CO₂ exchange at two sites in Arctic tundra ecosystems during the growing season using a spectral vegetation index." *International journal of remote sensing*, 20, 683-698.
- Meng, J., Du, X., and Wu, B., (2013). "Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation." *International Journal of Digital Earth*, 6(3): 203-218.
- Montandon, L.M. and Small, E.E., (2008). "The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI." *Remote Sensing of Environment*, 112(4), pp.1835-1845.
- Morawitz, D.F., Blewett, T.M., Cohen, A., & Alberti, M. (2006). "Using NDVI to assess vegetative land cover change in Central Puget Sound." *Environmental Monitoring and Assessment*, 114, 85-106
- Mu, X., Song, W., Gao, Z., McVicar, T.R., Donohue, R., Yan, G., (2018). "Fractional vegetation cover estimation by using multi-angle vegetation index." *Remote Sensing of Environment*, 216(June), pp. 44–56.
- Myneni, R., Ross, J., (1991). "Photon-vegetation interactions".
- Myneni, R. B., Asrar, G., Tanre, D., and Choudhury, B.J., (1992). "Remote sensing of solar radiation absorbed and reflected by vegetated land surfaces." *I.E.E.E. Transactions on Geosciences Remote Sensing*, 30, 302-314.
- Myneni, R., & Asrar, G. (1994). "Atmospheric effects and spectral vegetation indices." *Remote Sensing of Environment*, 47, 390-402.
- Myneni, R.B., Ramakrishna, N.R., Running, S.W., (1997). "Algorithm for the estimation of global land cover, LAI and FPAR based on radiative transfer models." *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 35: 1380-1393.
- NASA, (2017). "*Remote Sensing Tutorial*".
- Natural Resources Canada, "Fundamentals of Remote Sensing", Tutorial, Canada Centre
- Nelson, R.F., Latty, R.S., Mott, G., (1984). "Classifying northern forests using thematic mapper simulator data." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, pp. 607-617.
- Nemani, R.R., Running, S.W., Pielke, R.A., & Chase, T.N. (1996). "Global vegetation cover changes from coarse resolution satellite data." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, (1984–2012), 101, 7157-7162.
- Ormsby, J. P., Choudhury, B. J., & Owe, M. (1987). "Vegetation spatial variability and its effect on vegetation indices." *International Journal of Remote Sensing*, 8(9), 1301–1306.
- Peters, A.J., Reed, B.C., Eve, M.D., & McDaniel, K.C., (1992). "Remote sensing of broom snakeweed (*Gutierrezia sarothrae*) with NOAA-10 spectral image processing." *Weed Technology*, 1015-1020.
- Phulpin, T., Noilhan, J., and Stoll, M., (1990). "Parameters estimates of a soil-vegetation model using AVHRR data." *Proceedings of the 4th AVHRR data users meeting. Rothenburg*, , EUM P 06 (Darmstadt: EUMETSAT), pp. 125-129.

- Rivera Caicedo, J.P., (2014). "Optimized and Automated Estimation of Vegetation Properties: Opportunities for Sentinel-2." Phd Thesis, Universitat De Valencia.
- Rogan, J., Franklin, J., Roberts, D.A., (2002). "A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, pp. 143-156.
- Roughgarden, J., Running, S., Matson, P.A., (1991). "What does remote sensing do for ecology?" *Ecology*, 1918-1922.
- Rouse, J.W.Jr., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C., (1974). "Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation". *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD.*, 371p.
- Roy, P.S., (1989). "Spectral reflectance characteristics of vegetation and their use in estimating productive potential." *Proceedings: Plant Sciences*, Volume 99, Issue 1, pp 59-81.
- Running, S.W., (1990). "Estimating terrestrial primary productivity by combining remote sensing and ecosystem simulation." In *Remote Sensing and Biosphere Functioning*, edited by R.J. Hobbs and H.A. Mooney (New York: Springer-Verlag), pp. 65-86.
- Schmidt, K.S., Skidmore A.K., (2003). "Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 92-108.
- Schultink, G. and Karteris, M.A., (1981). "An Evaluation of Photographic Imagery Parameters Relating to Agricultural Inventories in the Dominican Republic." USDA.
- Sellers, P.J., (1985). "Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration." *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1335-1372.
- Sellers, P.J., Los, S.O., Tucker, C.J., Justice, C.O., Dazlich, D.A., Collatz, D.J., and Randall, D.A., (1996). "A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data." *Journal of Climate*, 9, 706-737.
- Sentinel-2 User Handbook, Esa, 2015
- Siegal, B.S., Gillespie A.R., (1980). "Remote Sensing in Geology." John Wiley & Sons, New York.
- Silleos, N.G., Alexandridis, T.K., Gitas, I.Z. and Perakis, K., (2006). "Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years." *Geocarto International*, 21(4), pp.21-28.
- Sims, D.A. and J.A. Gamon (2002). "Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 81, pp. 337-354.
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L., and Nathawat, M., (2015). "A review of radar remote sensing for biomass estimation." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5): 1779-1792.
- Somers, B., and Asner, G.P., (2014). "Tree species mapping in tropical forests using multi-temporal imaging spectroscopy: Wavelength adaptive spectral mixture analysis." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31: 57-66.
- Song, W., Mu, X., Ruan, G., Li, L., (2017). "Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, pp. 168-176.

- Story, M. and Congalton, R.G., (1986). "Accuracy assessment: a user's perspective." *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 52(3), pp.397-399.
- Stow, D.A., (1995). "Monitoring ecosystem response to global change: multitemporal remote sensing analyses." *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*, pp. 254-286.
- Swain, P.H., Davis, S., (1978). "Remote Sensing: The Quantitative approach". West Larfayette. Inc., USA.
- Tagliabue, G., Panigada, C., Colombo, R., Fava, F., Cilia, C., Baret, F., Vreys, K., Meuleman, K., and Rossini, M., (2016). "Forest species mapping using airborne hyperspectral APEX data." *Miscellanea Geographica*, 20(1): 28-33.
- Tieszen, L.L., Reed, B.C., Bliss, N.B., Wylie, B.K., & DeJong, D.D., (1997). "NDVI, C3 and C4 production, and distributions in Great Plains grassland land cover classes." *Ecological applications*, 7, 59-78.
- Tillack, A., Clasen, A., Kleinschmit, B., and Forster, M., (2014). "Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices." *Remote sensing of Environment*, **141**: 52-63
- Tompoulidou, M., Stefanidou, A., Grigoriadis, D., Dragozi, E., Stavrakoudis, D., and Gitas, I., (2016). "National fuel type mapping methodology using geographic object based image analysis and landsat 8 oli imagery". *GEOBIA 2016 : Solutions and Synergies. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC)*.
- Townshend, J.R., Hardy, J.R., Justice, C.O., Williams, D.F., Mitchell, C.W., Cook, A. and Hancock, P., (1981). *Terrain analysis and remote sensing* (No. Monograph).
- Treitz, P.M., Howarth, P.J., (1999). "Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems." *Progress in Physical Geography*, 23(3) 359-390.
- Tu, Y., Jia, K., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., Zhang, X., (2018). "Fractional vegetation cover estimation in heterogeneous areas by combining a radiative transfer model and a dynamic vegetation model." *International Journal of Digital Earth*, 0(0), pp. 1-17.
- Tucker, C.J., (1979). "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 8(2), pp. 127-150.
- Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M. J., and Ittersum, G. Van, (1985). "Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel 1980-1984." *Remote Sensing of Environment*, 17, pp. 233-249.
- Tucker, C.J., Justice, C.O., and Prince, S.D., (1986). "Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985." *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1571-1581.
- Tucker, C.J., and Sellers, P.J., (1986). "Satellite remote sensing of primary production." *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1395-1416.
- Vogelmann, J.E., Rock, B.N., Moss, D.M., (1993). "Red edge spectral measurements from sugar maple leaves." *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1563-1575.
- Vogelmann, T.C., (1993). "Plant Tissue Optics." *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 44, 231-251.
- Wang, B., Jia, K., Liang, S., Xie, X., Wei, X., Zhao, X., Yao, Y., Zhang, X., (2018). "Assessment of Sentinel-2 MSI Spectral Band Reflectances for Estimating Fractional Vegetation Cover." *Remote Sensing*, 10, 1927.

- Weiss, M., and Baret, F., (2016). "S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER, Version 1.1." In *ESA Contract n° 4000110612/14/I-BG* (p. 52). INRA Avignon, France.
- Wessels, K., Prince, S., Zambatis, N., MacFadyen, S., Frost, P., & Van Zyl, D. (2006). "Relationship between herbaceous biomass and 1-km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa." *International Journal of Remote Sensing*, 27, 951-973.
- Williams, D.L., Nelson, R.F., (1986). "Use of Remotely Sensed Data for Assessing Forest Stand Conditions in the Eastern U.S." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24 (1), pp. 130-138.
- Wittich, K.P., and Hansing, O., (1995). "Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data." *International Journal of Biometeorology*, 38, 209-215.
- Wolter, P.T., Mladenoff, D.J., Host, G.E., Crow T.R., (1995). "Improved forest classification in the northern lake states using multi-temporal Landsat imagery." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, pp. 1129–1143.
- Wu, W. and Shao, G., (2002). "Optimal combinations of data, classifiers, and sampling methods for accurate characterizations of deforestation." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(4), pp.601-609.
- Xiao, J., Moody, A., (2005). "A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA." *Remote sensing of environment*, 98, pp. 237–250.
- Xiao, Z., Wang, T., Liang, S., Sun, R., (2016). "Estimating the fractional vegetation cover from glass leaf area index product." *Remote Sensing*, 8, 337.
- Yang, L., Jia, K., Liang, S., Liu, J., Wang, X., (2016). "Comparison of Four Machine Learning Methods for Generating the GLASS Fractional Vegetation Cover Product from MODIS Data." *Remote Sensing*, 8, 682.
- Yang, L., Jia, K., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., Zhang X., (2017). "A Robust Algorithm for Estimating Surface Fractional Vegetation Cover from Landsat Data." *Remote Sensing*, 9, 857.
- Yuan, L. και Zhang, L.-Q, (2008). "Mapping large-scale distribution of submerged aquatic vegetation coverage using remote sensing." *Ecological Informatics*, 3(3) 245-251.
- Zeng, X., Dickinson, R.E., Walker, A., Shaikh, M., Defries, R.S., Qi, J., (2000). "Derivation and evaluation of global 1-km fractional vegetation cover data for land modeling." *J. Appl. Meteorol.*, 39, pp. 826-839.
- Zhang, X., Liao, C., Li, J., Sun, Q., (2013). "International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data." *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 21, pp. 506–512.

Διαδικτυακές Πηγές:

https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/en/latest/remote_sensing.html,

(accessed, 1th February 2019)

(<https://scihub.copernicus.eu/>),

(accessed, 29th April 2019)

<https://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/c/AT2011105/>,

(accessed, 2th March 2019)

<https://theclippermag.com/index.php/science/crop-science/the-next-frontier-in-agriculture-science-sentinel-2/attachment/esa-sentinel-2/>

(accessed, 22th April 2019)

https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/02/Colour_vision_for_Copernicus,

(accessed, 2 th January 2019)

<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

(accessed 17th December, 2018)