



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ MERIS/ENVISAT

Πτυχιακή εργασία της Μαρίας Καραμιχαλάκη

Επιβλέποντες:

(I) Ισαάκ Παρχαρίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής

(II) Όλγα Συκιώτη, Εντεταλμένη Ερευνήτρια
ΙΑΑΔΕΤ/ΕΑΑ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	6
Abstract	8
1. Εισαγωγή.....	10
2. Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης	12
2.1. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	12
2.1.1. Αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μια επιφάνεια	19
2.2. Δορυφορικοί αισθητήρες.....	20
2.2.1. Κατηγορίες δορυφορικών αισθητήρων	21
2.2.2. Χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων	24
2.2.3. Δορυφόρος ENVISAT – Αισθητήρας MERIS	26
3. Τηλεπισκόπηση σε μελέτες βλάστησης	29
3.1. Αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη βλάστηση.....	29
3.2. Δομή των φύλλων και ανακλαστικότητα από πολυεπίπεδους θόλους βλάστησης	30
3.3. NDVI.....	33
3.4. FAPAR.....	35
3.5. Συσχετισμός NDVI – FAPAR.....	37
3.6. Μελέτες βλάστησης στην Ελλάδα με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων	37
3.7. Φαινολογία φυτών.....	38
4. Υλικά και μέθοδοι	40
4.1. Δεδομένα	40
4.1.1. Δορυφορικά δεδομένα.....	40
4.1.2. Μετεωρολογικά δεδομένα.....	43
4.2. Μεθοδολογία	44
4.2.1. Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων NDVI και FAPAR και δημιουργία χρονοσειρών.....	44
4.2.2. Επεξεργασία μετεωρολογικών δεδομένων.....	46
4.3. Περιοχές μελέτης.....	49
4.4. Τύποι βλάστησης.....	55
5. Αποτελέσματα	59
6. Συζήτηση – συμπεράσματα	90
7. Ευχαριστίες.....	93
8. Βιβλιογραφία.....	97

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών και αφορά την αξιοποίηση μεθόδων και εφαρμογών Τηλεπισκόπησης για την μελέτη του περιβάλλοντος μέσω της διαχρονικής παρακολούθησης φυσικών οικοσυστημάτων βλάστησης. Αποτελεί το καταστάλαγμα των γνώσεων και της εμπειρίας από το διάστημα της φοίτησής μου στο τμήμα Γεωγραφίας και είναι αποτέλεσμα μεθοδικής και αφοσιωμένης εργασίας που διήρκεσε τρία εξάμηνα. Από την ποικιλία των ιδιαίτερων και ενδιαφέροντων επιστημονικών πεδίων με τα οποία εμπλέκεται η Γεωγραφική επιστήμη και τα οποία είχα την ευκαιρία να παρακολουθήσω κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου, το αντικείμενο της Τηλεπισκόπησης είναι αυτό που κέρδισε περισσότερο την προσοχή και το ενδιαφέρον μου, σε συνδυασμό με τους ευρύτερους τομείς του περιβάλλοντος και της φυσικής Γεωγραφίας. Το παρόν, αποτελεί πρωτότυπη ερευνητική εργασία, η οποία παρουσιάζει τα πρώτα αποτελέσματα της οικοφυσιολογικής μελέτης εκτάσεων οξιάς (*fagus sylvatica*), μαύρης πεύκης (*pinus nigra*), δρυός (*quercus sp.*) και ασφάκας (*phlomis fruticosa*) σε έξι επιλεγμένες περιοχές μελέτης στην Ελλάδα, με τη δημιουργία και επεξεργασία χρονοσειρών NDVI και fAPAR, οι οποίες παρήχθησαν από δορυφορικά δεδομένα MERIS/ENVISAT, για μια περίοδο εννέα ετών που εκτείνεται από 01 – 01 – 2003 έως 31 – 12 – 2011, και οι οποίες συσχετίζονται με μετεωρολογικούς παράγοντες για συγκεκριμένες περιοχές μελέτης. Τμήμα της παρούσας εργασίας έγινε δεκτό προς δημοσίευση, με τίτλο “*Monitoring of vegetation ecosystems in Greece using*

vegetation indices time series”¹ και θα παρουσιαστεί στο “10^ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας”.

Μαρία Καραμιχαλάκη,

Αθήνα, 2014

¹ Karamihalaki M., Sykioti O., Stagakis S. and Kyparissis A., Monitoring of vegetation ecosystems in Greece using vegetation indices time series, 10th International Congress of the Hellenic Geographical Society, Thessaloniki , 22-24/10/2014, accepted.

Αφιερώνεται στα αδέρφια μου

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα μέσω διαφόρων και πολύπλοκων λειτουργιών. Ένας από τους βασικούς παράγοντες σε αυτό, είναι η επίγεια βλάστηση μέσω της λειτουργίας της ως μια δεξαμενή/ πηγή άνθρακα. Ωστόσο, η κατανόηση για τη λειτουργία της βλάστησης, τις αλληλεπιδράσεις της με το κλίμα, τους βασικούς μηχανισμούς ελέγχου και την ευπάθειά της στην κλιματική αλλαγή δεν είναι εμπεριστατωμένη. Η παρακολούθηση της λειτουργίας της βλάστησης σε μεγάλες χρονικές κλίμακες είναι πολύ σημαντική. Ως εκ τούτου, η δορυφορική τηλεπισκόπηση διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη συστηματική παρακολούθηση της λειτουργίας των επίγειων οικοσυστημάτων, παρέχοντας τις απαιτούμενες χωροχρονικές θεματικές πληροφορίες, τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε τοπικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, η φαινολογία της βλάστησης, μελετά τις χρονικές περιόδους και διακυμάνσεις των εποχικών συμβάντων, όπως την έκπτυξη (leaf budburst) και τη γήρανση (leave senescence) των φύλλων, τα οποία θεωρούνται δείκτες των προσαρμοστικών αποκρίσεων ενός οικοσυστήματος στις κλιματικές συνθήκες. Επομένως, η κατανόηση της φαινολογίας φέρει σημαντικές πληροφορίες για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κλίματος και της βλάστησης και τις επιπτώσεις τους στις διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας, σε παγκόσμιες, περιφερειακές και τοπικές κλίμακες. Στη μελέτη αυτή, ορεινά δασικά οικοσυστήματα φυλλοβόλων και αειθαλών δέντρων με διαφορετικά οικοφυσιολογικά χαρακτηριστικά (*Fagus sylvatica*, *Quercus sp.* και *Pinus nigra*), αλλά και ένα χαμηλού ύψους φρυγανικό θαμνώδες φυτό (*Phlomis fruticosa*) μελετώνται σε διαφορετικές περιοχές στην Ελλάδα, οι οποίες φέρουν διαφορετικά τοπογραφικά και κλιματικά

χαρακτηριστικά. Για κάθε περιοχή μελέτης, δημιουργήθηκαν χρονοσειρές που εκτείνονται από 01/01/2003 έως 31/12/2011, για παραμέτρους σχετικές με τη βλάστηση (NDVI και fAPAR), που παρήχθησαν από δορυφορικά δεδομένα MERIS και συσχετίστηκαν με μετεωρολογικά δεδομένα (βροχόπτωση και θερμοκρασία εδάφους), όπου αυτά ήταν διαθέσιμα. Οι εποχικές διακυμάνσεις και συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων, καθώς επίσης και οι παρατηρήσεις στον κύκλο εποχικής ανάπτυξης των φύλλων, για κάθε ένα από τα είδη βλάστησης που μελετώνται, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με τη διαχρονική εξέλιξη του κάθε οικοσυστήματος. Οι συσχετίσεις με τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα παρέχουν πληροφορίες σε σχέση με την απόκριση των οικοσυστημάτων στις κλιματικές συνθήκες και τις κλιματικές μεταβολές.

Λέξεις κλειδιά: τηλεπισκόπηση, οικοσύστημα, MERIS, NDVI, fAPAR, Ελλάδα

Abstract

Climate change is explicitly interrelated with global carbon cycle in multiple and complex functions. One of the major components is terrestrial vegetation through its function as a carbon sink / source. However, our understanding on vegetation function, its interactions with climate, the key controlling mechanisms and its vulnerability to climate change are far from complete. Monitoring vegetation function on large temporal scales is very important. In this direction, satellite remote sensing plays a key role in the systematic monitoring of terrestrial ecosystems function by providing the required spatiotemporal thematic information either in global or in regional scale. In particular, vegetation phenology studying the timing of seasonal events such as leaf budburst and leaf senescence, are considered as indicators of ecosystem adaptive responses to climate conditions. Therefore, understanding of phenology brings important information on into both climate and vegetation interactions and their impacts on energy exchange processes in global, regional and local scales. In this study, mountainous forest ecosystems of deciduous and evergreen vegetation, with different ecophysiological characteristics (*Fagus sylvatica*, *Quercus sp.* and *Pinus nigra*) and a low height shrub (*Phlomis fruticosa*) as well, are studied in different locations in Greece with different topographic and climatic characteristics. For each study area, time-series spanning from 01/01/2003 to 31/12/2011 of NDVI and fAPAR vegetation parameters are extracted from MERIS satellite data. Seasonal variations and correlations between different parameters as well as observations on the seasonal leaf growth cycle of the species provide significant information on the interannual evolution of the ecosystem and for each location in Greece. Finally,

comparisons between the characteristics of the different ecosystems are performed and conclusions are drawn on their spatiotemporal evolution. Correlations with the available meteorological data, provide information on the response of ecosystems to climate and climate change.

Key words: remote sensing, ecosystem, MERIS, NDVI, fAPAR, Greece

1. Εισαγωγή

Η φαινολογία των χερσαίων οικοσυστημάτων αντανακλά την απόκριση της βιόσφαιρας στη δυναμική των κλιματικών και υδρολογικών συστημάτων της (Zhang et al., 2003). Τα τελευταία χρόνια, μια μεγάλη ποικιλία δορυφορικών αισθητήρων έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη δασικών οικοσυστημάτων, συμπεριλαμβανομένων παθητικών οπτικών συστημάτων και ενεργητικών συστημάτων radar, sonar και lidar. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ευρυζωνικοί δείκτες δασικών παραμέτρων, που προέρχονται από δορυφορικές μετρήσεις είναι οι αναλογικοί δείκτες (δείκτες βλάστησης), που έχουν υπολογισθεί με τη χρήση των ανακλαστικότητας που εμπίπτουν στο κοντινό υπέρυθρο και στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι δείκτες βλάστησης που προέρχονται από δορυφορικά δεδομένα, αποτελούν μία από τις πιο βασικές πηγές πληροφοριών για την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης και της χαρτογράφησης των αλλαγών των καλύψεων γης (Teillet et al., 1997). Μια μεγάλη ποικιλία δεικτών βλάστησης έχει αναπτυχθεί για την ποιοτική και την ποσοτική αξιολόγηση της βλάστησης με τη χρήση τηλεπισκοπικών μετρήσεων (Teillet et al., 1997). Ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάστησης είναι ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς/ normalized difference vegetation index (NDVI), που αναπτύχθηκε από τους Rouse et al. (1974). Το fAPAR αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη περιβαλλοντική παράμετρο, η οποία σχετίζεται με την υγεία και τα φαινολογικά στάδια της βλάστησης. Η χρήση μετεωρολογικών παραμέτρων σε μελέτες βλάστησης που διεξάγονται με τη χρήση δεικτών βλάστησης αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Δίνεται η δυνατότητα στο μελετητή να παρακολουθήσει την εξέλιξη

των οικοσυστημάτων με τη δυναμική του κλίματος και με τον τρόπο αυτό εξάγονται συμπεράσματα σε σχέση με τις διαφορετικές αποκρίσεις των οικοσυστημάτων υπό διαφορετικά κλιματικά καθεστώτα i) μεταξύ διαφορετικών ειδών, ii) μεταξύ οικοσυστημάτων ίδιας σύστασης, όπου μπορεί κανείς να παρατηρήσει την επίδραση του κλίματος στον κύκλο ανάπτυξης του ίδιου είδους, αλλά και iii) για ένα μεμονωμένο οικοσύστημα, με την παρατήρηση των διαχρονικών αλλαγών στον κύκλο ανάπτυξης ενός είδους. Αντίστροφα, η ίδια η δυναμική των οικοσυστημάτων, μελετώμενη μέσω των δεικτών βλάστησης, μπορεί να δώσει στοιχεία, σε σχέση με τη δυναμική του κλίματος, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, κυρίως όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης σε έξι φυσικά οικοσυστήματα στην Ελλάδα με τη χρήση των δεικτών NDVI και fAPAR, ο συσχετισμός μεταξύ τους, αλλά και ο συσχετισμός τους με μετεωρολογικούς παράγοντες, όπου αυτοί είναι διαθέσιμοι, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη διαχρονική εξέλιξη των μελετώμενων φυσικών οικοσυστημάτων.

2. Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης

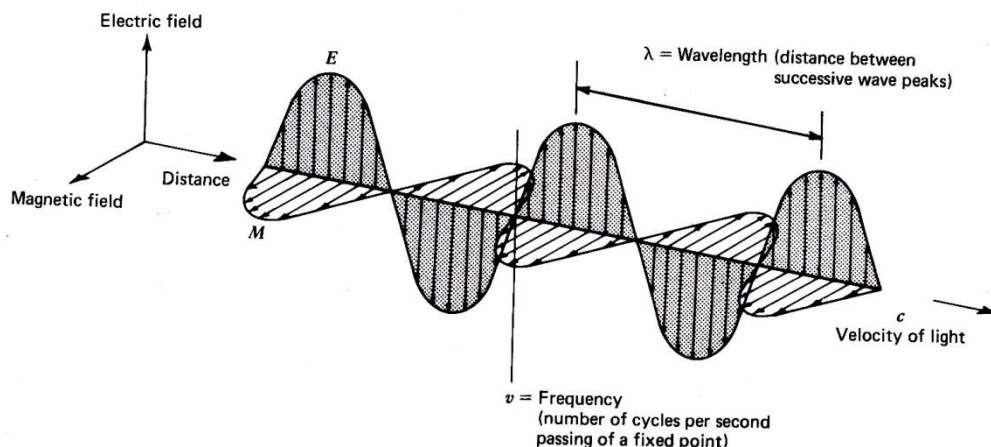
Η τηλεπισκόπηση μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία της απόκτησης και καταγραφής πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή ένα φαινόμενο από απόσταση. Περιλαμβάνει τη συλλογή, ανάλυση και ερμηνεία της πληροφορίας γύρω από ένα στόχο, για την αναγνώριση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τα αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς την απευθείας επαφή με αυτόν (Μερτίκας, 2009).

Στην περίπτωση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, η συλλογή της πληροφορίας πραγματοποιείται με ανιχνευτές οι οποίοι φέρονται από δορυφόρους. Οι αισθητήρες των δορυφορικών συστημάτων ανιχνεύουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που είτε ανακλάται είτε εκπέμπεται από κάποια επιφάνεια, σε διάφορες φασματικές περιοχές. Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες έχει διαμορφωθεί από την αλληλεπίδρασή της με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της γης και συνεπώς μεταφέρει πληροφορίες για τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας (Κ. Καρτάλης, Χ. Φειδάς, 2006).

2.1. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το ορατό φως είναι μόνο μία από τις πολλές μορφές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα ραδιοκύματα, η θερμότητα, οι υπεριώδεις ακτίνες και οι ακτίνες Χ είναι άλλες γνώριμες μορφές. Όλες αυτές οι μορφές ενέργειας είναι εγγενώς παρόμοιες και ακτινοβολούν σύμφωνα με τη βασική θεωρία των κυμάτων. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1., αυτή η θεωρία περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια,

όπως αυτή ταξιδεύει σε μια αρμονική ημιτονοειδή μορφή με την ταχύτητα του φωτός (c).

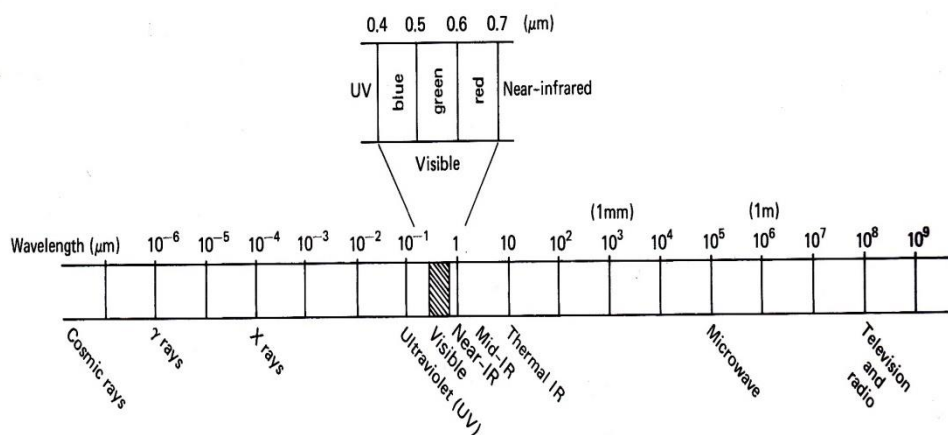


Εικόνα 1. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Οι συνιστώσες περιλαμβάνουν ένα ημιτονοειδές ηλεκτρικό κύμα (E) και ένα όμοιο μαγνητικό κύμα (M) σε ορθές γωνίες, όντας και τα δύο κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης. Πηγή: Lillesand and Kiefer, 2000.

Η απόσταση από το ένα μέγιστο στο άλλο είναι το μήκος κύματος λ , και ο αριθμός των μέγιστων που περνούν από ένα σταθερό σημείο στο χώρο ανά τη μονάδα του χρόνου, είναι η συχνότητα του κύματος ν . Από τη βασική φυσική, τα κύματα υπακούουν στη γενική σχέση

$$c = \nu \lambda \quad (\text{σχέση 1})$$

Αφού η ταχύτητα του φωτός, c είναι απαραίτητα μια μεταβλητή (3×10^8 m/sec), η συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ για κάθε δεδομένο κύμα είναι αντιστρόφως ανάλογα και κάθε όρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει ένα κύμα. Στην τηλεπισκόπηση είναι πιο συνήθης η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με βάση την περιοχή μήκους κύματος μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (εικόνα 2.).



Εικόνα 2. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Πηγή: Lillesand and Kiefer, 2000.

Η επικρατέστερη μονάδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μήκους κύματος κατά μήκος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι το μικρόμετρο (μm). Ένα μικρόμετρο ισοδυναμεί με $1 \times 10^{-6} \text{ m}$. Παρόλο που τα ονόματα (όπως υπεριώδεις ή μικροκύματα) σηματοδοτούν σε γενικές γραμμές τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για μεγαλύτερη ευκολία, στην πραγματικότητα δεν υπάρχει σαφή διαχωριστική γραμμή μεταξύ μιας ονομαστικής φασματικής περιοχής και της επόμενης. Οι τρόποι διαίρεσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος έχουν αυξηθεί κυρίως από τις διάφορες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την ανίχνευση κάθε τύπου ακτινοβολίας παρά από εγγενείς διαφορές στα ενεργειακά χαρακτηριστικά των διαφόρων μηκών κύματος. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι τα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση βρίσκονται κατά μήκος ενός συνεχούς φάσματος που χαρακτηρίζεται από αλλαγές μεγέθους πολλών δυνάμεων του 10. Επομένως, η χρήση λογαριθμικών διαγραμμάτων για την αποτύπωση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι αρκετά συχνή. Το «ορατό» τμήμα ενός τέτοιου διαγράμματος είναι εξαιρετικά μικρό, αφού η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού εκτείνεται μόνο από περίπου 0.4 μm

έως περίπου $0.7 \mu\text{m}$. Το μπλε χρώμα αποδίδεται κατά προσέγγιση στο εύρος από $0.4 - 0.5 \mu\text{m}$, το πράσινο από $0.5 - 0.6 \mu\text{m}$ και το κόκκινο από $0.6 - 0.7 \mu\text{m}$. Η υπεριώδης ενέργεια (UV) εφάπτεται στο τέλος της μπλε περιοχής του ορατού τμήματος του φάσματος. Εφαπτόμενες στο “κόκκινο τέλος” του ορατού τμήματος του φάσματος είναι τρεις διαφορετικές κατηγορίες υπέρυθρων (IR) κυμάτων: το κοντινό υπέρυθρο (από $0.7 - 1.3 \mu\text{m}$), το μέσο υπέρυθρο (από $1.3 - 3 \mu\text{m}$) και το θερμικό υπέρυθρο (πάνω από 3 και μέχρι $14 \mu\text{m}$). Σε πολύ μεγαλύτερα μήκη κύματος ($1 \text{ mm} - 1 \text{ m}$) είναι το μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Τα πιο συνήθη συστήματα ανίχνευσης λειτουργούν σε ένα ή περισσότερα από το ορατό, το υπέρυθρο και το μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι μέσα στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος μόνο η θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία σχετίζεται άμεσα με τη θερμότητα· η κοντινή και η μέση υπέρυθρη ενέργεια δεν σχετίζονται με αυτήν.

Παρόλο που πολλά χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας περιγράφονται πιο εύκολα με τη θεωρία των κυμάτων, μία άλλη θεωρία προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες σε σχέση με τον τρόπο με τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια αλληλεπιδρά με τη ύλη. Αυτή η θεωρία – η θεωρία των σωματιδίων – προτείνει ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συντίθεται από πολλές διακριτές μονάδες που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα. Η ενέργεια ενός φωτονίου δίνεται ως

$$Q = h\nu \quad (\text{σχέση 2})$$

όπου,

Q = ενέργεια ενός φωτονίου, σε joules (J)

h = σταθερά του Planck, $6,626 \times 10^{-34}$ J sec

ν = συχνότητα

Το κυματικό και το κβαντικό μοντέλο της συμπεριφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μπορούν να συσχετισθούν λύνοντας τη σχέση 1 ως προς ν και αντικαθιστώντας με το αποτέλεσμα το ν στη σχέση 2, ώστε να έχουμε

$$Q = hc / \lambda \quad (\text{σχέση 3})$$

Επομένως, γίνεται φανερό πως η ενέργεια ενός φωτονίου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματός του. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο χαμηλότερο του ενεργειακό του περιεχόμενο. Αυτό έχει σημαντική επίδραση στις εφαρμογές τηλεπισκόπησης, από την άποψη ότι η φυσικά εκπεμπόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, όπως είναι η μικροκυματική εκπομπή από στοιχεία του εδάφους, είναι πιο δύσκολο να ανιχνευθεί από ότι η ακτινοβολία σε μικρότερα μήκη κύματος, όπως η εκπεμπόμενη θερμική υπέρυθη ακτινοβολία. Το χαμηλότερο ενεργειακό φορτίο της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας, σημαίνει ότι σε γενικές γραμμές, τα συστήματα που λειτουργούν σε μεγάλα μήκη κύματος πρέπει να “σκανάρουν” μεγάλες περιοχές της Γης σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή, προκειμένου να κάνουν λήψη ενός ανιχνεύσιμου ενεργειακού σήματος.

Ο ήλιος είναι η πιο σημαντική πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την τηλεπισκόπηση. Παρόλα αυτά, όλη η ύλη σε θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν (0 K ή -273 °C) εκπέμπει συνεχώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Επομένως, τα χερσαία αντικείμενα είναι επίσης πηγές ακτινοβολίας, αν και είναι αρκούντως διαφορετικής μαγνητικής και φασματικής σύστασης από ότι είναι ο ήλιος. Η ποσότητα της ενέργειας που ακτινοβολεί ένα σώμα είναι, μεταξύ άλλων, συνάρτηση

της θερμοκρασίας επιφανείας του σώματος. Αυτή η ιδιότητα έχει εκφρασθεί από το νόμο των Stefan – Boltzmann, ο οποίος αναφέρει ότι

$$M = \sigma T^4 \quad (\text{σχέση 4})$$

όπου,

M = η ολική ροή ενέργειας που εκπέμπεται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφανείας, από ένα μέλαν σώμα, watts (W) m^{-2}

σ = σταθερά των Stefan – Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T = θερμοκρασία επιφανείας μέλανος σώματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο νόμος έχει εκφρασθεί για μια πηγή ενέργειας που συμπεριφέρεται σαν ένα μέλαν σώμα. Ένα μέλαν σώμα, είναι ένα υποθετικό, ιδανικό ακτινοβολών σώμα που απορροφά πλήρως και επανεκπέμπει όλη την ενέργεια που προσπίπτει σε αυτό. Τα πραγματικά αντικείμενα μόνο προσεγγίζουν αυτό το ιδανικό σώμα.

Όπως ακριβώς η συνολική ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα ποικίλει με τη θερμοκρασία, η φασματική κατανομή της εκπεμπόμενης ενέργειας ποικίλει επίσης. Το μήκος κύματος στο οποίο η καμπύλη ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος φτάνει στο ανώτατο όριο σχετίζεται με τη θερμοκρασία του, σύμφωνα με το νόμο του Wien

$$\lambda_m = A/T \quad (\text{σχέση 5})$$

όπου

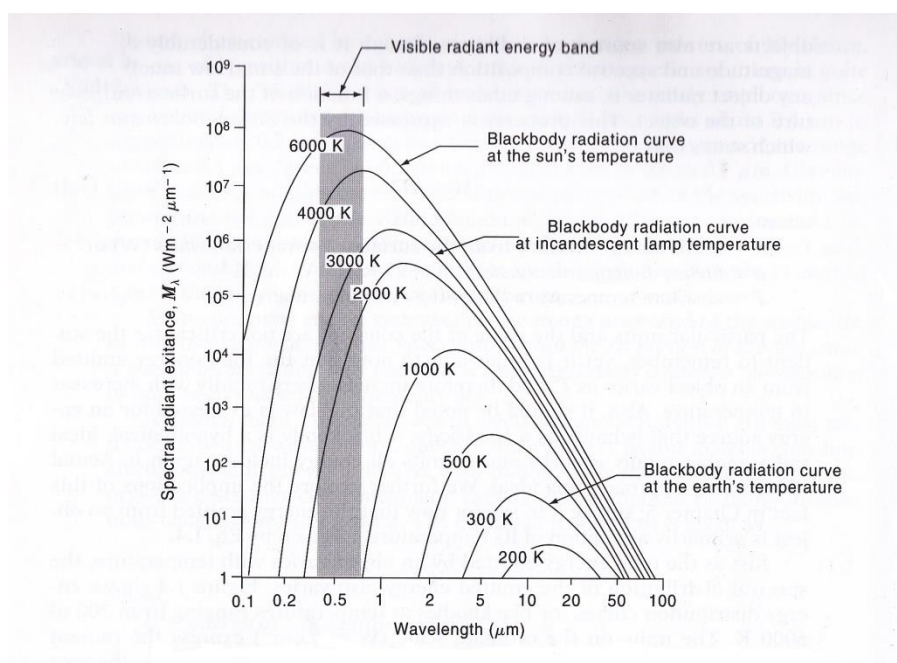
λ_m = το μήκος κύματος στο οποίο παρατηρείται το μέγιστο της ακτινοβολίας,
 μm

$A = 2898 \mu\text{m K}$

T = temperature, K

επομένως, για ένα μέλαν σώμα, το μήκος κύματος στο οποίο παρατηρείται το μέγιστο της ακτινοβολίας ποικίλει αντίστροφα με την απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται όταν ένα μεταλλικό σώμα όπως ένα κομμάτι σίδηρο θερμαίνεται. Όσο το αντικείμενο γίνεται σταδιακά θερμότερο, αρχίζει να λάμπει και το χρώμα του αλλάζει σταδιακά σε μικρότερα μήκη κύματος, από θαμπό κόκκινο, σε πορτοκαλί, σε κίτρινο και τελικά σε λευκό.

Ο ήλιος εκπέμπει ακτινοβολία όπως ένα μέλαν σώμα του οποίου η θερμοκρασία είναι περίπου 6000 K (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Η φασματική κατανομή της ενέργειας όπως ακτινοβολείται από ένα μέλαν σώμα σε διάφορες θερμοκρασίες. Πηγή: Lillesand and Kiefer, 2000.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος της γης (δηλαδή, η θερμοκρασία των υλικών της επιφάνειας, όπως το έδαφος, το νερό και η βλάστηση) είναι περίπου 300 K (27 °C). Από το νόμο του Wien, αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο της ακτινοβολίας από τα χαρακτηριστικά της γης εμφανίζεται σε μήκος κύματος περίπου 9,7 μm. Επειδή αυτή η ακτινοβολία σχετίζεται με τη χερσαία θερμότητα, ορίζεται ως «θερμική υπέρυθη»

ακτινοβολία. Αυτή η ενέργεια δεν είναι δυνατόν ούτε να φανεί ούτε να φωτογραφηθεί, όμως μπορεί να ανιχνευθεί με θερμικές συσκευές, όπως ραδιόμετρα και σαρωτές (Lillesand and Kiefer, 2000).

2.1.1. Αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μια επιφάνεια

Όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσκρούει σε μια επιφάνεια, τότε αυτή θα ανακλαστεί, θα σκεδαστεί, θα απορροφηθεί ή θα μεταδοθεί. Αυτές οι διαδικασίες δεν είναι αμιγείς· μια δέσμη φωτός μπορεί κατά ένα μέρος της να ανακλαστεί και κατά ένα μέρος της να απορροφηθεί. Οι διαδικασίες που τελικά λαμβάνουν χώρα εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τη γωνία που σχηματίζει η δέσμη της ακτινοβολίας κατά την τομή της με την επιφάνεια και την τραχύτητα της επιφάνειας. Η ανακλώμενη ακτινοβολία επιστρέφει από μια επιφάνεια, σχηματίζοντας την ίδια γωνία υπό την οποία την προσέκρουσε· επομένως, η γωνία της πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Αντίθετα, η σκεδαζόμενη ακτινοβολία, αφήνει την επιφάνεια στην οποία προσέκρουσε προς όλες τις κατευθύνσεις. Η έννοια της σκέδασης συχνά συμπεριλαμβάνεται στην έννοια της αντανάκλασης και ορίζεται ως “διάχυτη αντανάκλαση”. Είτε η προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται, είτε σκεδάζεται, είναι εν μέρει συνάρτηση των διακυμάνσεων της τραχύτητας της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αν ο λόγος της τραχύτητας προς το μήκος κύματος είναι χαμηλό (μικρότερο από 1), τότε η ακτινοβολία ανακλάται, ενώ αν ο λόγος είναι μεγαλύτερος από ένα, η ακτινοβολία σκεδάζεται. Μία επιφάνεια, η οποία ανακλά όλη την προσπίπτουσα ενέργεια είναι γνωστή ως κατοπτρική επιφάνεια ανάκλασης, ενώ μία επιφάνεια η οποία σκεδάζει όλη την προσπίπτουσα ενέργεια είναι μία “Λαμπερτιανή” (Lambertian) επιφάνεια ανάκλασης. Οι πραγματικές επιφάνειες όμως δεν είναι ούτε απόλυτα κατοπτρικές, ούτε απόλυτα “Λαμπερτιανές”. Παρόλα αυτά,

όσο πιο πολύ τείνει μια επιφάνεια να είναι “Λαμπερτιανή”, τόσο πιο κατάλληλη είναι στην περίπτωση των εφαρμογών Τηλεπισκόπησης. Οι περισσότερες φυσικές επιφάνειες που παρατηρούνται με τη χρήση συστημάτων τηλεπισκόπησης είναι προσεγγιστικά “Λαμπερτιανές” στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα αποτελεί το νερό. Το νερό γενικά έχει χαμηλή ανακλαστικότητα και επομένως σκούρα φασματική υπογραφή. Παρόλα αυτά, όταν το νερό δρα ως κατοπτρική επιφάνεια, τότε είναι δυνατόν να έχει μεγάλη ανακλαστικότητα. Ένα τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης απορροφάται. Αυτή η ενέργεια είναι στη συνέχεια διαθέσιμη να εκπεμφθεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και μπορεί να μετρηθεί από αισθητήρες που είναι συντονισμένοι στο θερμικό υπέρυθρο (Gibson, 2000).

2.2. Δορυφορικοί αισθητήρες

Τα καταγραφικά συστήματα που φέρονται από δορυφόρους ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των ραδιομέτρων (radiometer), τα οποία αποτελούν όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Εάν ο αισθητήρας περιλαμβάνει ένα φράγμα περίθλασης το οποίο διαχωρίζει την ακτινοβολία, που εκτείνεται σε μια περιοχή του φάσματος, σε μικρότερες φασματικές περιοχές, τότε αυτός ονομάζεται φασματοραδιόμετρο (spectroradiometer).

Η λειτουργία όλων των ραδιομέτρων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα ηλεκτρικά φορτισμένο φωτοευαίσθητο υλικό εκτεθεί σε ακτινοβολία, παράγονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα, η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, οι μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα μπορούν να μετρηθούν για τη

μέτρηση των μεταβολών στην ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην πλάκα με το φωτοευαίσθητο υλικό (Κ. Καρτάλης, Χ. Φειδάς, 2006).

2.2.1. Κατηγορίες δορυφορικών αισθητήρων

Οι δορυφορικοί αισθητήρες, ανάλογα με την πηγή της ακτινοβολίας που καταγράφουν, κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους παθητικούς και τους ενεργητικούς.

Οι παθητικοί αισθητήρες (passive sensors) αποτελούν συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από το παρατηρούμενο αντικείμενο/στόχο. Τα συστήματα αυτά ανιχνεύουν το τμήμα του φάσματος που εκτείνεται από την περιοχή των πολύ μικρών μηκών κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας έως την περιοχή του απώτερου υπέρυθρου ($0.38\mu\text{m} < \lambda < 1000\mu\text{m}$). Ανάλογα με την εφαρμογή, επιλέγεται και η αντίστοιχη φασματική περιοχή καταγραφής. Σημειώνεται ότι υπάρχουν διαθέσιμοι αισθητήρες για όλο το φάσμα, από το υπεριώδες έως το μακρινό υπέρυθρο, χωρίς όμως να χρησιμοποιούνται όλοι στην τηλεπισκόπηση. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε πολλές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος η απορρόφηση είναι μερική ή ολική, και κατά συνέπεια, η ακτινοβολία διαδίδεται μερικώς ή καθόλου από την ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα της εξάρτησης της ατμοσφαιρικής διάδοσης και της απορρόφησης της ακτινοβολίας από το μήκος κύματος είναι ο περιορισμός της περιοχής φάσματος που είναι αξιοποιήσιμο στη δορυφορική τηλεπισκόπηση στα μήκη κύματος από $0.4\mu\text{m}$ έως $12\mu\text{m}$ (ορατό έως θερμικό υπέρυθρο). Οι αισθητήρες δηλαδή των δορυφόρων λειτουργούν όπως και οι φωτογραφικές μηχανές, με τη διαφορά ότι, εκτός από τη μέτρηση της ενέργειας στο ορατό τμήμα του φάσματος, καταγράφουν την ενέργεια σε πολλές περιοχές του φάσματος και ονομάζονται για αυτό το λόγο πολυφασματικοί αισθητήρες (multispectral sensors). Κατά αυτό τον τρόπο νέφη, υδάτινες επιφάνειες,

δάση, καλλιεργήσιμες εκτάσεις και άλλου τύπου γήινες επιφάνειες διακρίνονται από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που καταγράφεται στις δορυφορικές εικόνες.

Κάθε εικόνα που καταγράφει την ακτινοβολία σε ένα τμήμα του φάσματος, περιέχει πληροφορίες εξαρτώμενες από τη φασματική περιοχή στην οποία έγινε η λήψη της εικόνας και αναφέρεται σαν εικόνα στο κανάλι x , όπου x ένας αριθμός αναφερόμενος στην περιοχή του φάσματος.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία αισθητήρων είναι οι θερμικοί αισθητήρες (thermal sensors) οι οποίοι ανιχνεύουν την εκπεμπόμενη από τη γη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία ($3\mu\text{m} - 15\mu\text{m}$). Οι αισθητήρες αυτού του είδους χρησιμοποιούν ανιχνευτές οι οποίοι είναι φωτοευαίσθητοι σε αυτήν την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι ανιχνευτές τους ψύχονται σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν για να περιοριστεί η εκπεμπόμενη από τους ίδιους θερμική ακτινοβολία. Οι θερμικοί αισθητήρες αποδίδουν στην ανιχνευόμενη θερμική ακτινοβολία μια θερμοκρασία με βάση μια θερμοκρασία αναφοράς μιας εσωτερικής πηγής ακτινοβολίας. Η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να φτάσει τους $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι θερμοκρασίες λαμπρότητας αποδίδονται σε μια εικόνα με επίπεδα του γκρι, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να παρουσιάζονται με ανοικτούς τόνους του γκρι και τις χαμηλότερες με σκούρους τόνους. Οι εικόνες αυτές, οι οποίες απεικονίζουν ποιοτικά τις σχετικές διαφορές των θερμοκρασιών στην επιφάνεια της γης, είναι επαρκείς για τις περισσότερες εφαρμογές. Η εκτίμηση της θερμοκρασίας σε απόλυτες τιμές απαιτεί ακριβή βαθμονόμηση και μέτρηση των θερμοκρασιών αναφοράς και λεπτομερή γνώση των θερμικών ιδιοτήτων του στόχου, των γεωμετρικών παραμορφώσεων και των ραδιομετρικών επιδράσεων.

Αντίθετα, οι ενεργητικοί ανιχνευτές (active sensors) χρησιμοποιούν δική τους πηγή ακτινοβολίας την οποία κατευθύνουν προς το υπό έρευνα αντικείμενο, αυτή στη συνέχεια ανακλάται στο στόχο (αντικείμενο ή περιοχή της επιφάνειας της γης), επιστρέφει και καταγράφεται από το σύστημα. Σε αυτούς τους ανιχνευτές, όπως τα ραντάρ που εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυμάτων, το επιστρεφόμενο σήμα έχει υποστεί αλλοίωση που εξαρτάται μεταξύ άλλων από τις ιδιότητες της επιφάνειας. Έτσι επιτυγχάνεται η αναγνώριση και μελέτη σωμάτων και φαινομένων, όπως των νεφικών πυρήνων των καταιγίδων, της βροχόπτωσης, των αέριων χημικών ενώσεων, των κατασκευών εδάφους, των ωκεάνιων συστημάτων κυκλοφορίας, των πετρελαιοκηλίδων κ.α. Από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του radar είναι η επιχειρησιακή του δυνατότητα να χρησιμοποιείται ημέρα και νύχτα, κάτω από όλες σχεδόν τις καιρικές συνθήκες, υπό την προϋπόθεση ότι ο δορυφόρος διέρχεται πάνω από την περιοχή σε συχνά χρονικά διαστήματα.

Οι αισθητήρες, επίσης, ανάλογα με τις διεργασίες ανίχνευσης της περιοχής ενδιαφέροντος διακρίνονται σε ανεικονιστές και απεικονιστές.

Οι ανεικονιστές (non – imaging sensors) μετρούν την ακτινοβολία η οποία προέρχεται από όλα τα σημεία της περιοχής που καταγράφεται, την ολοκληρώνουν σε μια μέση τιμή και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία που καταγράφεται χαρακτηρίζει το σύνολο της περιοχής που ανιχνεύεται, χωρίς να επιμερίζεται στα διάφορα σημεία της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα παθητικά συστήματα που εκτελούν αεροβολίσεις (soundings) δηλ. καταγραφές της κατακόρυφης κατανομής διαφόρων παραμέτρων στην ατμόσφαιρα, όπως τα μικροκυματικό ραδιόμετρο (microwave radiometer), καθώς και τα ενεργητικά συστήματα που εκτελούν μετρήσεις ύψους των στόχων στην επιφάνεια της γης, όπως το μικροκυματικό αλτίμετρο (microwave altimeter).

Οι απεικονιστές ή απεικονιστικά συστήματα (imaging sensors), που λειτουργούν καταγραφικά σε δύο διαστάσεις (μήκος και πλάτος), συνθέτουν μια εικόνα της περιοχής που ανιχνεύουν με βάση την ακτινοβολία που προέρχεται από κάθε σημείο της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τόσο παθητικοί αισθητήρες όπως ο απεικονιστής της κάμερας τηλεόρασης και ο οπτικός μηχανικός σαρωτής (optical mechanical scanner) όσο και ενεργητικοί αισθητήρες όπως το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (synthetic aperture radar).

Τέλος, οι αισθητήρες ανάλογα με τον τρόπο καταγραφής της ακτινοβολίας κατατάσσονται σε δύο άλλες κατηγορίες: τα συστήματα πλαισίου και τους σαρωτές (Καρτάλης και Φειδάς, 2006).

2.2.2. Χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων αναφέρονται στη χωρική (spatial), φασματική (spectral), ραδιομετρική (radiometric) και χρονική (temporal) διακριτική ικανότητα ή ανάλυση. Συγκεκριμένα:

Χωρική διακριτική ικανότητα (Spatial Resolution).

Είναι η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει δύο αντικείμενα στη σκηνή που βρίσκονται πολύ κοντά και ποσοτικά ισούται με τη μικρότερη απόσταση που μπορούν να έχουν δύο αντικείμενα, ώστε οι διαστάσεις τους να διακρίνονται χωριστά και καθαρά ή το ελάχιστο μέγεθος που πρέπει να έχει ένα αντικείμενο για να μπορεί να ανιχνευθεί. Εκφράζεται συνήθως σε μέτρα ή χιλιόμετρα και καθορίζεται από το στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης του αισθητήρα. Ως στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης (Instantaneous Field of View IFOV) καλείται η στερεά γωνία με την οποία ο αισθητήρας “βλέπει” την επιφάνεια της γης, η οποία καθορίζει την περιοχή της γήινης επιφάνειας που κατοπτεύεται από συγκεκριμένο ύψος λήψης, σε μια δεδομένη

στιγμή. Η περιοχή της γης που αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πεδίο κατόπτρευσης καλείται κελί ανάλυσης (resolution cell) και είναι αυτό που καθορίζει τη χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα.

Φασματική διακριτική ικανότητα (Spectral Resolution).

Σχετίζεται με το εύρος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες πραγματοποιεί καταγραφές ένας πολυφασματικός ανιχνευτής και των αριθμών των φασματικών καναλιών που αυτός χρησιμοποιεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα σε ένα κανάλι, τόσο μικρότερο είναι το εύρος της φασματικής περιοχής της ακτινοβολίας που καταγράφεται στο κανάλι αυτό. Όσο πιο μικρές σε εύρος είναι οι ζώνες, τόσο πιο μικρός ο αριθμός των ζωνών.

Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (Radiometric Resolution).

Ορίζεται ως η ευαισθησία του ανιχνευτή να ανιχνεύει διαφορές στην ισχύ του σήματος, δηλαδή διαφορές στην ένταση της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης από την επιφάνεια της γης ακτινοβολίας. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα είναι σημαντική καθώς η πραγματική πληροφορία που περιέχεται στα δορυφορικά δεδομένα καθορίζεται από τις ραδιομετρικές τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας. Έτσι, η ακρίβεια στην ανίχνευση μεταβολών στο σήμα σχετίζεται άμεσα με τη δυνατότητα ανίχνευσης των αντίστοιχων μεταβολών στα φυσικά χαρακτηριστικά των επιφανειών.

Χρονική διακριτική ικανότητα:

Αφορά τη συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή. Η χρονική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του δορυφόρου και κυμαίνεται από λίγα λεπτά (π.χ. 15' για τον MSG) για τους γεωστάσιμους

δορυφόρους, μέχρι μερικές εβδομάδες για τους δορυφόρους πολικής τροχιάς (π.χ. 18 ημέρες για τον Landsat – 5) (Καρτάλης και Φειδάς, 2006).

2.2.3. Δορυφόρος ENVISAT – Αισθητήρας MERIS

Την 1η Μαρτίου του 2002 ,ο ENVISAT τέθηκε σε τροχιά από τη βάση εκτόξευσης της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency, ESA), στο Κουρού της Γαλλικής Γουιάνας. Ο ENVISAT, φέροντας δέκα όργανα και με βάρος οκτώ τόνους, ήταν το μεγαλύτερο σκάφος παρατήρησης της Γης που έχει κατασκευαστεί. Η περίοδος παρατήρησης της Γης από τον ENVISAT διήρκησε δέκα χρόνια, διπλασιάζοντας τον προγραμματισμένο χρόνο ζωής του, ώσπου η επικοινωνία μαζί του χάθηκε ξαφνικά στις 8 Απριλίου του 2012. Ο ENVISAT ήταν ένας εξελιγμένος δορυφόρος πολικής τροχιάς, ο οποίος λάμβανε μετρήσεις από την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς, τη Γη και τους πάγους. Τα δεδομένα του ENVISAT βοήθησαν την επιστημονική μελέτη του πλανήτη και επέτρεψαν την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών. Επιπλέον, τα δεδομένα του διευκόλυναν την ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογικών και εμπορικών εφαρμογών.

Τεχνικά χαρακτηριστικά του ENVISAT:

- Καλύπτει ολόκληρη τη Γη σε 3 μέρες.
- Πετά σε ηλιοσύγχρονη τροχιά με μέσο υψόμετρο 799,8km και κλίση 98,55°.
- Ο χρόνος τροχιάς είναι 100,6 λεπτά με έναν κύκλο επανάληψης 35 ημερών

Ένα από τα όργανα του ENVISAT αποτέλεσε ο MERIS. Είναι ένα παθητικό οπτικό όργανο και συγκεκριμένα, είναι ένα μεσαίας χωρικής ανάλυσης απεικονιστικό φασματόμετρο που μετρά την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια

της Γης και τα σύννεφα στο ορατό και σχεδόν υπέρυθρο εύρος (390 nm έως 1040 nm). Έχει χωρική ανάλυση 300m (στο ναδίρ) και 15 φασματικές ζώνες στην περιοχή του ορατού και του υπέρυθρου, που μπορούν να προγραμματιστούν σε εύρος και θέση. Πρωταρχική αποστολή του ήταν η μέτρηση του χρώματος της θάλασσας στους ωκεανούς και τις παράκτιες περιοχές. Γνωρίζοντας το χρώμα της θάλασσας μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης, τη συγκέντρωση αιωρούμενων ιζημάτων και το φόρτο αιωρούμενων σωματιδίων πάνω από διάφορες θαλάσσιες περιοχές. Όλες αυτές οι παράμετροι βοηθούν στη μελέτη του κύκλου του άνθρακα και των θερμικών συνθηκών στην επιφάνεια των ωκεανών. Αυτά τα δεδομένα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη σωστή διαχείριση της αλιείας στις παράκτιες ζώνες. Ο MERIS, που είναι κατά κύριο λόγο αφιερωμένος στην παρατήρηση της ωκεάνιας βιολογίας και της ποιότητας του θαλασσινού νερού, μέσω παρατηρήσεων του χρώματος του νερού, συνεισφέρει επίσης σε σχετικές μελέτες για την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης. Συμπληρωμένος από τα RA-2 και AATSR, εκτελεί μια μοναδική συνεργική αποστολή για τον βιογεωφυσικό χαρακτηρισμό των ωκεανών και των παράκτιων ζωνών και κατά συνέπεια για τη μελέτη και παρακολούθηση του κλίματος και του παγκόσμιου περιβάλλοντος.

Ο MERIS προσφέρει χωρικές και φασματικές πληροφορίες παράλληλα. Διαθέτει μεγάλη ευελιξία· η πλήρως προγραμματιζόμενη επεξεργασία στο δορυφόρο επιτρέπει την επιλογή έως και 15 διαφορετικών φασματικών ζωνών με εύρος ζώνης στην περιοχή μεταξύ 2,5 nm και 30 nm. Τα δεδομένα πλήρους χωρικής ανάλυσης π.χ. 250 μέτρα στο ναδίρ, μεταδίδονται επάνω από παράκτιες ζώνες και επιφάνειες ξηράς. Δημιουργούνται συνεχώς δεδομένα μειωμένης χωρικής ανάλυσης, τα οποία λαμβάνονται στο δορυφόρο από έναν συνδυασμό 4×4 παρακείμενων pixel κατά

πλάτος και κατά μήκος της διαδρομής, έχοντας ως αποτέλεσμα μια ανάλυση περίπου 1000 μέτρων στο ναδίρ.

Το όργανο αυτό έχει βελτιστοποιηθεί για απόλυτη και σχετική ραδιομετρική απόδοση με τακτική ενημέρωση των παραμέτρων βαθμονόμησης που εφαρμόζονται στο δορυφόρο μέσω αποκλειστικού υλικού βαθμονόμησης για την επίτευξη μακροπρόθεσμης σταθερότητας. Τα δεδομένα του οργάνου υπόκεινται σε προκαταρκτική επεξεργασία κατά την πτήση και στο έδαφος για την παροχή φασματικών εικόνων της Γης που διορθώνονται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ατμόσφαιρας. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία χαρτών μεγάλης κλίμακας π.χ. για:

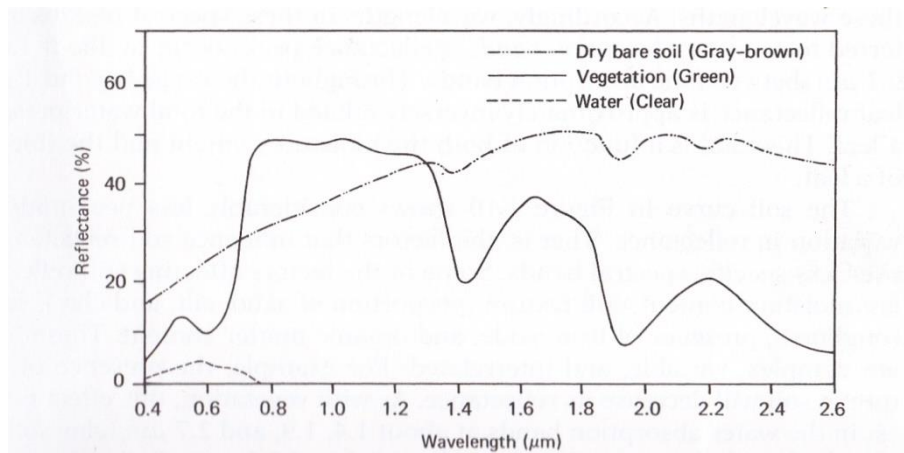
- τις συγκεντρώσεις των ωκεάνιων χρωστικών,
- την παρακολούθηση των παράκτιων νερών,
- τα σύννεφα και τους ατμούς του νερού,
- την κατάσταση και κατανομή της βλάστησης

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του MERIS, αφορούν τη ραδιομετρική ικανότητα, διότι τα σήματα που προέρχονται από τον ωκεανό είναι αδύναμα, σε αντίθεση με τα σήματα που προέρχονται από σύννεφα ή επιφάνειες της γης, τα οποία είναι ισχυρά (ESA Official Website).

3.Τηλεπισκόπηση σε μελέτες βλάστησης

3.1. Αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη βλάστηση

Τα χαρακτηριστικά ανάκλασης και απορρόφησης της βλάστησης είναι πολύπλοκα, διότι η βλάστηση έχει εποχικούς κύκλους· η ληφθείσα υπογραφή επομένως, θα ποικίλει σημαντικά, εξαρτώμενη από τη φάση του εποχικού κύκλου της βλάστησης. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί επίσης να μεταδοθεί μέσω της βλάστησης, όπου μπορεί να αλληλεπιδράσει με τα συστατικά μέρη. Μέσα στο ορατό φάσμα, η πράσινη βλάστηση έχει ένα κανάλι απορρόφησης (απορροφά περισσότερο) στο μπλε και στο κόκκινο τμήμα του φάσματος εξαιτίας της παρουσίας της χλωροφύλλης. Ακόμα και μέσα στο πράσινο τμήμα του φάσματος (όπου απαντώνται οι υψηλότερες τιμές ανάκλασης στο ορατό εύρος, μόνο 10 – 15 % της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται. Γενικά, η βλάστηση είναι ένας καλός απορροφητής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο ορατό τμήμα του φάσματος. Μια αξιοσημείωτη αλλαγή στις ιδιότητες της απορρόφησης και της ανάκλασης λαμβάνει χώρα στο κόκκινο/υπέρυθρο όριο, κοντά στα 0.7 μm , όπου η απορρόφηση από τα συστατικά της βλάστησης μειώνεται σημαντικά, ενώ η ανάκλαση αυξάνεται κατά πολύ. Η ανάκλαση είναι κατά προσέγγιση σταθερή μεταξύ των 0.7 και 1.3 μm , όμως μειώνεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (Gibson, 2000). Η τυπική φασματική υπογραφή της πράσινης υγιούς βλάστησης φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4. Φασματικές υπογραφές για i) ξηρό γυμνό έδαφος, ii) πράσινη υγιή βλάστηση και iii) νερό. Πηγή: Lillesand and Kiefer, 2000.

3.2. Δομή των φύλλων και ανακλαστικότητα από πολυεπίπεδους θόλους βλάστησης

Η φασματική απόκριση της βλάστησης, εξαρτάται πρωτίστως από τη δομή των φύλλων του φυτού. Τα φύλλα αποτελούνται από επίπεδα, τα οποία συνθέτονται από διαφορετικούς τύπους κυττάρων. Το ανώτερο ή εξωτερικό στρώμα σχηματίζεται από διάφανα προστατευτικά επιδερμικά κύτταρα, τα οποία μπορούν να διαπερασθούν από όλα τα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το επόμενο επίπεδο περιέχει θύλακες που περιέχουν πράσινη χρωστική ουσία (χλωροφύλλη), οι οποίοι ονομάζονται χλωροπλάστες. Αυτό το επίπεδο κυττάρων είναι υπεύθυνο για την πράσινη εμφάνιση της υγιούς ζωντανής βλάστησης. Όλα τα χρώματα της ορατής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκτός από το πράσινο απορροφώνται από τους χλωροπλάστες· το πράσινο ανακλάται πίσω στα μάτια μας ή προς το δορυφορικό αισθητήρα και επομένως η βλάστηση εμφανίζεται να είναι πράσινη. Μεταξύ 10 με 30% της συνολικής ποσότητας του ορατού φωτός που φθάνει στην επιφάνεια των φύλλων ανακλάται πίσω ως πράσινο φως. Άλλα μήκη κύματος της

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απορροφώνται επίσης από αυτό το επίπεδο κυττάρων των φύλλων, συμπεριλαμβανόμενου του υπέρυθρου. Παρόλα αυτά, τα μεγαλύτερα και ανομοιόμορφα μέρη κυττάρων, τα οποία και σχηματίζουν το σώμα του φύλλου (μεσόφυλλα κύτταρα), αντανακλούν περίπου το 60% της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας που φτάνει σε αυτό το επίπεδο του φύλλου. Επομένως η υγιής βλάστηση έχει μία υψηλότερη ή λαμπρότερη απόκριση στο κοντινό υπέρυθρο απ' ό,τι στο πράσινο τμήμα του φάσματος. Η υγιής ζωντανή βλάστηση μπορεί να διακριθεί από τη νεκρή βλάστηση με τη χρήση τόσο του ορατού, όσο και του υπέρυθρου τμήματος του φάσματος. Όταν ένα φύλλο πεθαίνει, τα κύτταρα που υπάρχουν μέσα του νεκρώνονται με αποτέλεσμα αυτά τα δρυφακτοειδή κύτταρα να χάνουν την πράσινη χρωστική τους. Ως εκ τούτου, το κόκκινο και το μπλε φως δεν απορροφώνται πια από αυτά τα κύτταρα και ανακλώνται πίσω μαζί με το πράσινο φως και επομένως η νεκρή βλάστηση εμφανίζεται κίτρινη ή καφέ. Τα μήκη κύματος στο κοντινό υπέρυθρο δεν ανακλώνται πια, αλλά απορροφώνται από τα νεκρά μεσόφυλλα κύτταρα, με τέτοιο τρόπο που η νεκρή βλάστηση εμφανίζεται σκούρα ή μαύρη στο κοντινό υπέρυθρο. Τέτοιες αλλαγές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της υγείας της βλάστησης.

Παρόλο που ένα μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ανακλάται πίσω, είτε στο πράσινο τμήμα του ορατού είτε στο κοντινό υπέρυθρο, δεν επιστρέφεται όλη η προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η ποσότητα που υπολείπεται μπορεί να εξηγηθεί από την απορρόφηση, αλλά και από τη διαπερατότητα μέσω χώρων μεταξύ των κυττάρων. Η διαπερατότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (εν αντιθέσει με την ανάκλαση ή την απορρόφηση) επίσης ποικίλει με το μήκος κύματος, για τη βλάστηση. Μέσα στο ορατό φάσμα, η διαπερατότητα της ακτινοβολίας είναι χαμηλή, όμως, όπως η ανακλαστικότητα, αυξάνεται σημαντικά μέσα στο κοντινό υπέρυθρο. Η

υπέρυθρη ακτινοβολία που διαπερνά μέσω ενός φύλλου, είναι στη συνέχεια διαθέσιμη για ανάκλαση, απορρόφηση και διαπέραση από φύλλα που βρίσκονται κάτω από αυτό. Σε ένα δασικό θόλο βλάστησης, αυτή η διαδικασία μπορεί να επεκταθεί μεταξύ έξι με οκτώ επίπεδα φύλλων· ένας λεπτός θόλος βλάστησης (δύο με τρία επίπεδα) υπέρυθρο, από ότι σε ένα παχύτερο θόλο βλάστησης. Ο βαθμός διαπερατότητας ποικίλει επίσης, εξαρτώμενο από τον τύπο και την πυκνότητα του θόλου βλάστησης. Σε ένα πυκνά αναπτυσσόμενο είδος (που αποτελεί το μόνο είδος σε μια έκταση), όπως ένα χωράφι σιταριού, μικρή ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διεισδύει μεταξύ των φύλλων της βλάστησης στο έδαφος, και οι αποκρίσεις τόσο στο πράσινο, όσο και στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, θα είναι κατά συνέπεια ισχυρές. Παρόλα αυτά, σε ένα ανοιχτό δάσος, με κενά μεταξύ των δέντρων, η ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος θα διεισδύσει στα κατώτερα στρώματα της υποκείμενης βλάστησης και επομένως η απόκριση από την επιφάνεια του ανώτατου στρώματος δεν θα είναι τόσο ισχυρή. Μερικές από τις ακτίνες που διεισδύουν στο θόλο βλάστησης θα ανακλαστούν πίσω, αλλά ίσως να ταξιδέψουν σε μια κατεύθυνση τέτοια που θα παρεμποδιστούν από το κάτω μέρος του ανώτατου στρώματος του θόλου και θα ανακλαστούν πίσω προς το έδαφος. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως “εσωτερική ανάκλαση” και έχει την επίδραση να μειώνει τη συνολική ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που επιστρέφει στον αισθητήρα. Επομένως, αν δει κανείς ένα μεικτό αγροτικό τοπίο υγιούς πράσινης βλάστησης, οι δασικές περιοχές ίσως να εμφανίζονται με ένα πράσινο σκουρότερο από ότι οι βοσκότοποι. Η ίδια επίδραση λαμβάνει χώρα μέσα στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (Gibson, 2000).

3.3. NDVI

Ο αλγόριθμος του NDVI αφαιρεί τις τιμές της κόκκινης ανακλαστικότητας από αυτές της κοντινής υπέρυθρης και διαιρεί το αποτέλεσμα με το άθροισμα των καναλιών του κόκκινου και του κοντινού υπέρυθρου και εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Αυτή η διατύπωση μας επιτρέπει να αντιμετωπίσουμε το γεγονός ότι δύο πανομοιότυπα μέρη βλάστησης θα μπορούσαν να έχουν διαφορετικές τιμές αν το ένα ήταν για παράδειγμα εκτεθειμένο υπό το φως λαμπερής ηλιοφάνειας και το άλλο κάτω από ένα συννεφιασμένο ουρανό. Τα φωτεινά εικονοστοιχεία θα είχαν μεγαλύτερες τιμές και ως εκ τούτου μια μεγαλύτερη απόλυτη διαφορά μεταξύ των καναλιών. Αυτό αποφεύγεται με τη διαίρεση του αθροίσματος των αντανakλάσεων. (Chimnarong et al. 2012).

Θεωρητικά, οι τιμές του NDVI αναπαρίστανται ως μια αναλογία που κυμαίνεται σε τιμή από το -1 έως το 1, πρακτικά όμως υπερβολικά αρνητικές τιμές αναπαριστούν το νερό και οι τιμές κοντά στο μηδέν αναπαριστούν το γυμνό έδαφος (Chimnarong et al. 2012), αν και γενικά αυτό είναι κάτι μεταβλητό, (ανάλογα με το δορυφορικό σύστημα από το οποίο προέρχονται οι εικόνες ή τα προϊόντα που χρησιμοποιεί κανείς για τον υπολογισμό του NDVI για κάποια περιοχή). Επίσης, οι τιμές του NDVI μπορούν να διαφέρουν σημαντικά, συναρτήσει της βαθμονόμησης του αισθητήρα, των ατμοσφαιρικών συνθηκών, της ανακλαστικότητας των επιφανειών και της επίδρασης της τοπογραφίας (ανάγλυφο) (Teillet et al., 1997). Η βασική πληροφορία

που παρέχει σε πρώτη φάση ο NDVI αφορά τον προσδιορισμό της παρουσίας βλάστησης σε μια περιοχή και της πυκνότητας αυτής. Είναι ένας αριθμητικός δείκτης που χρησιμοποιεί τα κανάλια του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και είναι κατάλληλος για την ανάλυση τηλεπισκοπικών μετρήσεων και την εκτίμηση του αν ο παρατηρούμενος στόχος περιέχει ζωντανή πράσινη βλάστηση ή όχι (Chimnarong et al. 2012).

Ο NDVI έχει μια ευρεία γκάμα εφαρμογών σε μελέτες που αφορούν τη βλάστηση, αφού χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της απόδοσης των καλλιεργειών και της φέρουσας ικανότητας των βοσκότοπων. Γενικά, ο NDVI παρέχει πληροφορίες για τη χωρική και χρονική κατανομή των οικοσυστημάτων βλάστησης, της βιομάζας, της ροής του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), της ποιότητας της βλάστησης και της υποβάθμισης του εδάφους (Nemani et al. 2003; Pettorelli et al. 2005). Συχνά συσχετίζεται με άλλες παραμέτρους του εδάφους, όπως το ποσοστό της κάλυψης του εδάφους, τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα του φυτού, τη διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος και την ποσότητα της βιομάζας (Chimnarong et al. 2012).

Γενικά, η υγιής βλάστηση απορροφά το μεγαλύτερο μέρος του ορατού φωτός που προσπίπτει πάνω της και ανακλά ένα μεγάλο μέρος της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η μη υγιής ή αραιή βλάστηση ανακλά περισσότερο ορατό φως και λιγότερο κοντινό υπέρυθρο. Από την άλλη μεριά, τα γυμνά εδάφη ανακλούν μετρίως το κόκκινο και υπέρυθρο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Chimnarong et al. 2012).

Από τη στιγμή που γνωρίζουμε τη συμπεριφορά των φυτών σε σχέση με το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες για τον NDVI

εστιάζοντας στα δορυφορικά κανάλια που είναι πιο ευαίσθητα στη βλάστηση (κόκκινο και κοντινό υπέρυθρο). Ως εκ τούτου, όσο μεγαλύτερη η διαφορά μεταξύ της ανακλαστικότητας στο κόκκινο και της ανακλαστικότητας στο κοντινό υπέρυθρο, τόσο εντονότερη η παρουσία βλάστησης (Chimnarong et al. 2012).

3.4. FAPAR

Το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, το οποίο ανήκει στην περιοχή του φάσματος από 0.4 – 0.7 μm , είναι γνωστό ως φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία/ photosynthetically active radiation (PAR). Το fAPAR αναφέρεται στο κλάσμα του PAR που απορροφάται από ένα θόλο βλάστησης. Το fAPAR είναι δύσκολο να υπολογισθεί απευθείας, συμπεραίνεται όμως μέσω μοντέλων που περιγράφουν τη μεταφορά της ηλιακής ακτινοβολίας στους θόλους βλάστησης, με τη χρήση τηλεπισκοπικών παρατηρήσεων ως περιορισμούς. Στις περιβαλλοντικές εφαρμογές, η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα φύλλα είναι μεγαλύτερης σπουδαιότητας από ότι από άλλα μέρη του φυτού (κορμός, κλαδιά κλπ.) (Gobron and Verstraete, 2009).

Η κατάσταση και η εξέλιξη της χερσαίας βλάστησης προσδιορίζεται από έναν μεγάλο αριθμό φυσικών, βιοχημικών και οικοφυσιολογικών μεταβλητών. Ελάχιστες από αυτές είναι απευθείας παρατηρήσιμες από το διάστημα, καθορίζουν όμως από κοινού το φράγμα της φωτοσυνθετικά ενεργού απορροφώμενης ακτινοβολίας (fAPAR), το οποίο δρα ως ένας ολοκληρωμένος δείκτης της κατάστασης και της υγείας του θόλου βλάστησης και φυσικά μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από τεχνικές τηλεπισκόπησης (Gobron, 2010).

Η συστηματική παρατήρηση του fAPAR είναι κατάλληλη για την αξιόπιστη παρακολούθηση του εποχικού κύκλου και της υπερετήσιας μεταβλητότητας της

φωτοσυνθετικής δραστηριότητας της βλάστησης πάνω από χερσαίες επιφάνειες. Επιπλέον, το fAPAR διαδραματίζει έναν κριτικό ρόλο στο ενεργειακό ισοζύγιο των οικοσυστημάτων, στην εκτίμηση της ισορροπίας του άνθρακα και στον προσδιορισμό της πρωτογενούς παραγωγικότητας του συνόλου της χερσαίας βλάστησης μέσα από μια σειρά διάφορων χρονικών και χωρικών αναλύσεων (Gobron and Verstraete, 2009). Χωρικά σαφείς περιγραφές του fAPAR, παρέχουν πληροφορίες για τη σχετική δύναμη και την τοποθεσία των χερσαίων δεξαμενών και των ροών άνθρακα. Αποτελεί μία από τις παραμέτρους επιφανείας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ποσοτικοποίηση της αφομοίωσης του διοξειδίου του άνθρακα από τα φυτά και της απελευθέρωσης του νερού μέσω της εξατμισιοδιαπνοής. Το fAPAR ποικίλλει στο χώρο και στο χρόνο, δεδομένων των διαφορών μεταξύ των ειδών και των οικοσυστημάτων, των καιρικών και κλιματικών διεργασιών και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Όντας μια μεταβλητή κλειδί στην καταγραφή του χερσαίου κύκλου του άνθρακα, αξιολογεί τα επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, αλλαγές στο fAPAR έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές ως δείκτες ερημοποίησης και για την παρακολούθηση της παραγωγικότητας αγροτικών, δασικών και φυσικών οικοσυστημάτων (Gobron and Verstraete, 2009).

Η παράμετρος fAPAR έχει αναγνωρισθεί ως «Απαραίτητη Κλιματική Μεταβλητή/ ESSENTIAL CLIMATE VARIABLE» (ECV) από το Παγκόσμιο Σύστημα Παρατήρησης του Κλίματος/ GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (GCOS).

Τα υπάρχοντα προϊόντα fAPAR, προέρχονται κυρίως από μεσαίας χωρικής ανάλυσης δορυφορικά όργανα παρατήρησης (π.χ. MERIS, MODIS και MISR), ούτως

ώστε τα προϊόντα αυτά να αποτελούν προϊόντα τοπικής και παγκόσμιας κλίμακας σε ποικιλία χωρικής και χρονικής διακριτικής ικανότητας.

3.5. Συσχετισμός NDVI – fAPAR

Οι τιμές των TOC (top of the canopy/ κορυφή του θόλου βλάστησης) NDVI και fAPAR αυξάνονται με την κάλυψη του εδάφους από το θόλο βλάστησης. Η λειτουργική τους απόκριση στον προσανατολισμό των φύλλων, της ηλιακής γωνίας στο ζενίθ, και το ατμοσφαιρικό οπτικό βάθος είναι παρόμοια. Για παράδειγμα, οι θόλοι βλάστησης με οριζόντια φύλλα έχουν υψηλότερες τιμές fAPAR και TOC NDVI, από ότι οι θόλοι βλάστησης με κάθετα φύλλα. Παρόλα αυτά, το fAPAR και ο NDVI αποκρίνονται διαφορετικά σε άλλες παραμέτρους, όπως είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους και οι οπτικές παράμετροι των φύλλων. Για παράδειγμα μια αύξηση στην ανακλαστικότητα του εδάφους αυξάνει το fAPAR όμως μειώνει τον NDVI (Myneni and Williams, 1994).

Γενικά, στη βιβλιογραφία, ο δείκτης NDVI και η παράμετρος fAPAR συνηθίζουν να παρουσιάζουν ισχυρή γραμμική σχέση (Sellers et al. 1992; Kodani et al. 2002; Di Bella et al. 2004; Fensholt et al. 2004), η οποία σε πολλές μελέτες επιβεβαιώνεται από πειραματικές παρατηρήσεις (Di Bella et al. 2004)

3.6. Μελέτες βλάστησης στην Ελλάδα με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων

Στην Ελλάδα οι μελέτες βλάστησης με εφαρμογές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, και συγκεκριμένα με τη χρήση δεικτών βλάστησης, είναι περιορισμένες. Σε μία παρόμοια μελέτη που έχει διεξαχθεί από τους Kyparissis et. al (2007) γίνεται χρήση εικόνων μεσαίας χωρικής διακριτικής ικανότητας από τα δορυφορικά όργανα MODIS των δορυφόρων Terra (EOS AM) και Aqua (EOS PM), ενώ για επίσης παρόμοια μελέτη από τους Stagakis et al (2007) χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από τον αισθητήρα

VGT του δορυφορικού συστήματος SPOT-4, συνδυαστικά με εικόνες από τον αισθητήρα MODIS. Τα προϊόντα MODIS και SPOT έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, σε παγκόσμιο επίπεδο, για την παρακολούθηση και τη μελέτη της βλάστησης. Ο αισθητήρας MERIS του δορυφόρου ENVISAT, του οποίου τα προϊόντα χρησιμοποιήθηκαν και για την διεξαγωγή της παρούσας μελέτης, έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την μελέτη οικοσυστημάτων βλάστησης και καλλιεργειών από πολλούς μελετητές (Dash et al. 2010; Zurita – Milla et al. 2009; Gitelson et al. 2005). Ο υπερφασματικός αισθητήρας CHRIS του δορυφόρου PROBA της ESA έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη φυσικών οικοσυστημάτων στην Ελλάδα (Stagakis et al., 2010, Stagakis et al., 2014).

3.7. Φαινολογία φυτών

Φαινολογία είναι ο επιστημονικός κλάδος που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό, την καταγραφή, τη μελέτη και τη διερεύνηση της έναρξης και λήξης των διάφορων σταδίων ανάπτυξης των φυτών από έτος σε έτος και σε σχέση πάντα με τις μεταβολές και τις αλλαγές του καιρού και του κλίματος. Ο βρετανός Charles Morren, το 1849, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τον όρο φαινολογία (phenology) για να ορίσει τον επιστημονικό κλάδο που μελετά σε ετήσια βάση τις δραστηριότητες των φυτών αλλά και των ζώων που είναι ορατές (φαίνονται). Στα ετήσια στάδια ανάπτυξης των φυτών περιλαμβάνεται η έκπτυξη των φύλλων, η ανθοφορία, το “πέταγμα” της γύρης, η ωρίμανση των καρπών, το κιτρίνισμα και η πτώση των φύλλων, η εμφάνιση ζιζανίων, η κατά πάχος ανάπτυξη των δένδρων κλπ. (Μπαλούτσος et al., 2006). Οι χρονικές στιγμές των γεγονότων του κύκλου ζωής έχουν αποτελέσει έναν εξαιρετικό βιοδείκτη, δεδομένης της ευαισθησίας τους και της εξάρτησής τους από πλήθος κλιματικών μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος ή η διαθεσιμότητα νερού. Πολλά φαινολογικά γεγονότα, όπως η ανθοφορία ή η έκπτυξη των φύλλων

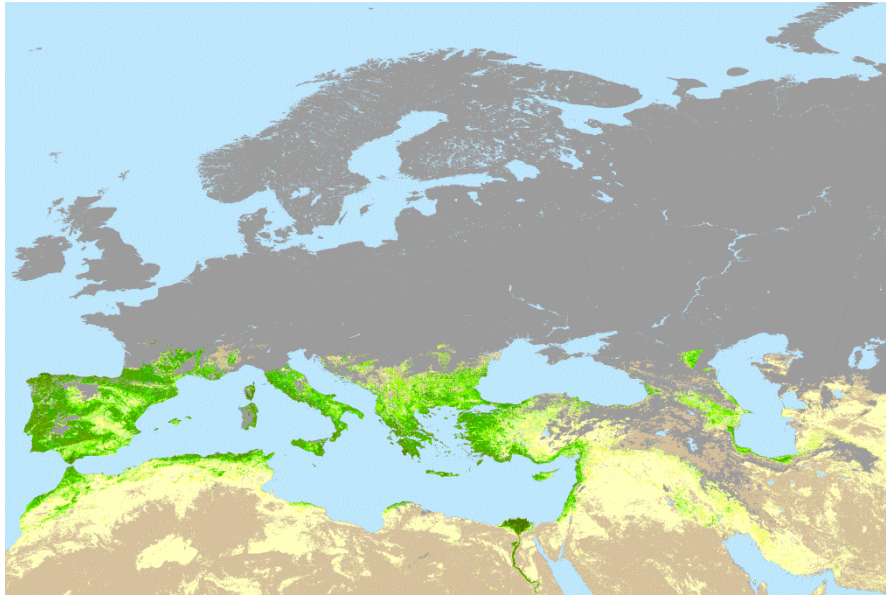
έχουν μετατοπιστεί χρονικά, ως απόκριση της τρέχουσας κλιματικής αλλαγής (Gordo and Sanz, 2005).

4. Υλικά και μέθοδοι

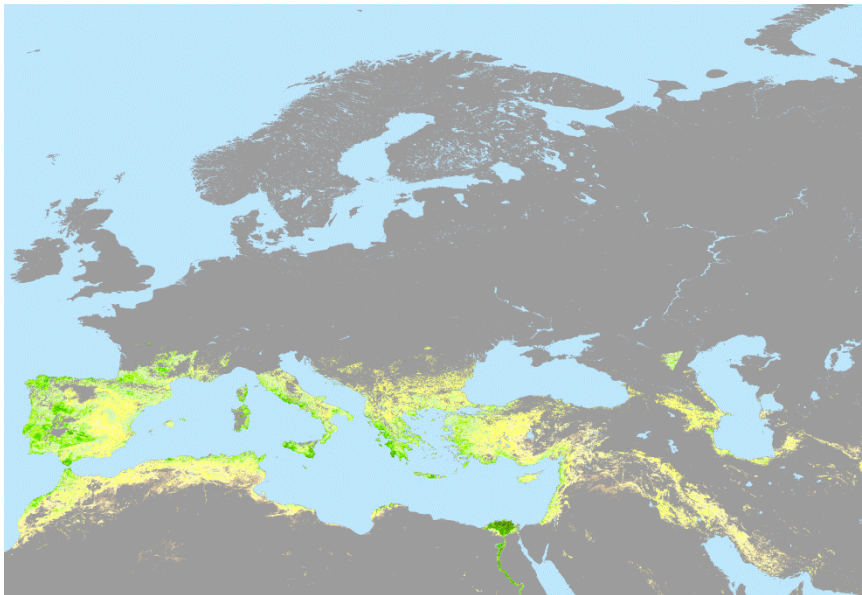
4.1. Δεδομένα

4.1.1. Δορυφορικά δεδομένα

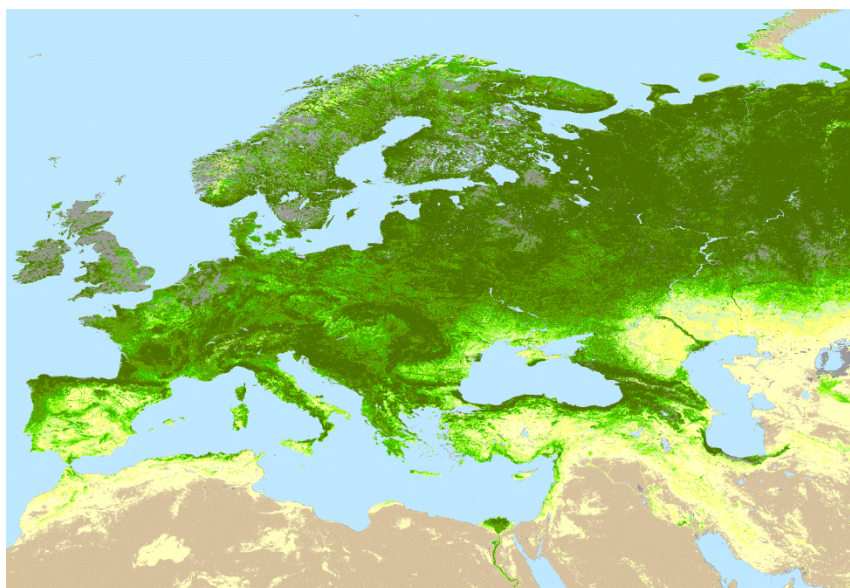
Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν συνθέσεις μέγιστων τιμών δεκαημέρων εικόνων NDVI και fAPAR, που παρήχθησαν από δορυφορικά δεδομένα MERIS/ENVISAT. Τα προϊόντα ENVISAT MERIS S10 είναι έχουν χωρική ανάλυση 0,008928571 degrees, δηλαδή 1 – 1,2 km. Οι τιμές τους αφορούν τη μέγιστη τιμή 10ημέρου των δεικτών βλάστησης NDVI και fAPAR που προέρχονται από οπτικά δορυφορικά δεδομένα μειωμένης χωρικής διακριτικής ικανότητας ENVISAT MERIS Level 2. Τα δεδομένα ελήφθησαν από την ιστοσελίδα του Flemish Institute for Technological Research (VITO) - Remote Sensing and Earth Observation Processes (TAP), το οποίο σε συνεργασία με την ESA παρέχει συγκεκριμένα δορυφορικά προϊόντα περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Τα δεδομένα ελήφθησαν σε φακέλους αρχείων, οι οποίοι, εκτός από τα δορυφορικά προϊόντα εικόνων NDVI και fAPAR, περιέχουν συνοδευτικά αρχεία μεταδεδομένων (metadata), καθώς επίσης και εικόνες μειωμένης χωρικής ανάλυσης που δημιουργήθηκαν για οπτικούς λόγους (Εικόνες 5, 6, 7 και 8). Είναι αξιοσημείωτη η διαφορά μεταξύ των εικόνων NDVI και fAPAR για το χειμώνα του 2007 (Εικόνες 5 και 6) και το καλοκαίρι (Εικόνες 7 και 8) του ίδιου έτους.



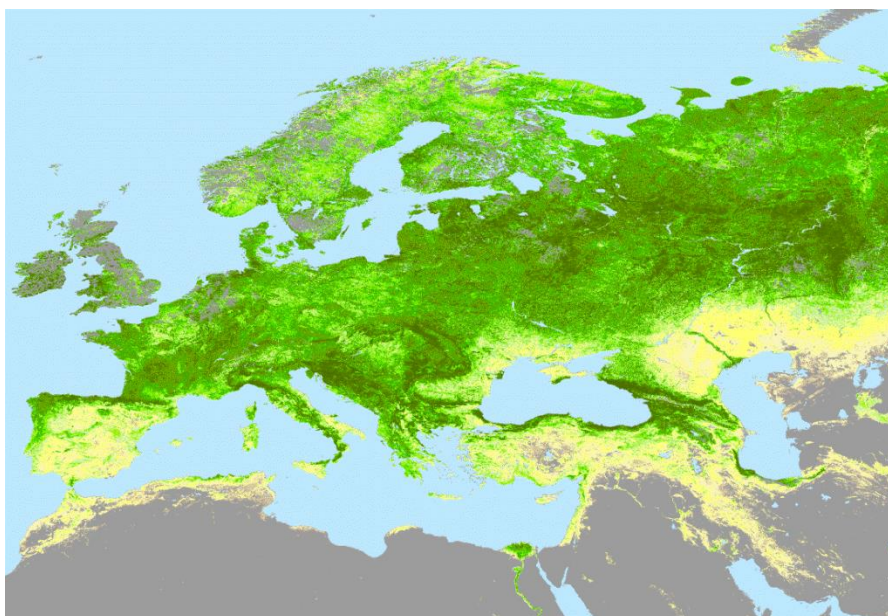
Εικόνα 5. Εικόνα μειωμένης χωρικής ανάλυσης που παρουσιάζει την απόκριση του NDVI πάνω από την Ευρώπη για το πρώτο δεκαήμερο του Ιανουαρίου του 2007.



Εικόνα 6. Εικόνα μειωμένης χωρικής ανάλυσης που παρουσιάζει την απόκριση του fAPAR πάνω από την Ευρώπη για το πρώτο δεκαήμερο του Ιανουαρίου του 2007.



Εικόνα 7. Εικόνα μειωμένης χωρικής ανάλυσης που παρουσιάζει την απόκριση του NDVI πάνω από την Ευρώπη για το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουλίου του 2007.



Εικόνα 8. Εικόνα μειωμένης χωρικής ανάλυσης που παρουσιάζει την απόκριση του fAPAR πάνω από την Ευρώπη για το δεύτερο δεκαήμερο του Ιουλίου του 2007.

4.1.2. Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, εξήχθησαν από τη βάση μετεωρολογικών δεδομένων National Climatic Data Center του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Οι συνόψεις των δεδομένων που παρέχονται από την προαναφερθείσα βάση δεδομένων, βασίζονται σε δεδομένα που ανταλλάσσονται στα πλαίσια των World Meteorological Organization (WMO) και World Weather Watch Program, σύμφωνα με το WMO Resolution 40 (Cg-XII), που αποτελεί την πολιτική και πρακτική του WMO για την ανταλλαγή μετεωρολογικών και σχετικών δεδομένων και προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων οδηγιών για τις σχέσεις των εμπορικών μετεωρολογικών δραστηριοτήτων. Τα δεδομένα/ προϊόντα που παρέχονται μέσω της υπηρεσίας είναι σε επίπεδο ημέρας (global surface summary of day product). Τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία αυτών των προϊόντων είναι τα «Integrated Surface Data» (ISD), τα οποία περιλαμβάνουν παγκόσμιας κλίμακας δεδομένα που λαμβάνονται από το Κλιματολογικό Κέντρο της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (USAF).

4.2. Μεθοδολογία

4.2.1.Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων NDVI και FAPAR και δημιουργία χρονοσειρών

Πρώτο βήμα αυτής της μελέτης αποτέλεσε η δημιουργία χρονοσειρών για τον δείκτη NDVI και την παράμετρο fAPAR. 648 δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνησή της (324 εικόνες NDVI και 324 εικόνες fAPAR). Οι χρονοσειρές εκτείνονται από 01/01/2003 έως 31/12/2011. Τα αρχικά δεδομένα ήταν σε μορφή ψηφιακής τιμής (digital number). Για την εξαγωγή των φυσικών τιμών των δεικτών, εφαρμόστηκε ο μαθηματικός μετασχηματισμός

$$\text{Physical value} = \text{DN} * \text{scale} - \text{offset}$$

όπου DN είναι η ψηφιακή τιμή για κάθε εικονοστοιχείο σε κάθε εικόνα. Αποτέλεσμα του παραπάνω μετασχηματισμού είναι τα pixels της εικόνας να έχουν νέες τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στις φυσικές τιμές, οι οποίες κυμαίνονται από -0,08 – 0,92 για τον NDVI και από 0 – 1 για το fAPAR. Στον Πίνακα 1. φαίνονται τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν, σύμφωνα με τα συνοδευτικά αρχεία μεταδεδομένων (metadata) που ελήφθησαν μαζί με τα δορυφορικά δεδομένα από την υπηρεσία παροχής τους.

NDVI					
<i>Description</i>	<i>minValue</i>	<i>maxValue</i>	<i>Scale</i>	<i>Offset</i>	<i>#bits</i>
Digital Number	0	250	0.004	-0.08	8
Physical value	-0.08	0.92			
Sea	254	254			8
Missing	255	255			8
Missing		0	0		8
FAPAR					
<i>Description</i>	<i>minValue</i>	<i>maxValue</i>	<i>Scale</i>	<i>Offset</i>	<i>#bits</i>
Digital Number	0	200	0.005	0	8
Physical value	0	1			
Sea	254	254			8
Missing	255	255			8

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά δορυφορικών εικόνων NDVI και fAPAR.

Από τις εικόνες, τα εικονοστοιχεία (pixels) που επιλέχθηκαν για την εξαγωγή των φυσικών τιμών των NDVI και fAPAR περιέχουν τις περιοχές που μελετώνται στην παρούσα εργασία (κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε επιφάνεια γης 1km x 1km).

Οι τιμές καταγράφηκαν σε υπολογιστικά φύλλα excel, 3.888 χιλιάδες τιμές συνολικά (1944 τιμές για τον NDVI και 1944 τιμές για τον fAPAR), για τα έξι οικοσυστήματα που μελετήθηκαν. Οι τιμές αυτές αφορούν τη μέγιστη τιμή

δεκαημέρου. Για να είναι περισσότερο διαχειρίσιμα τα δεδομένα, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τριών δεκαημέρων του κάθε μήνα, ούτως ώστε η χρονική διάταξη των δεδομένων να είναι πια σε μηνιαίο επίπεδο.

Στη συνέχεια, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων υλοποιήθηκε με τη δημιουργία γραφημάτων, τον υπολογισμό της συσχέτισης μεταξύ των NDVI και fAPAR (linear και polynomial) και τον υπολογισμό των περιγραφικών στατιστικών των μελετώμενων παραμέτρων.

Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ENVI. Η δημιουργία των μέσων μηνιαίων τιμών από τις αρχικές τιμές δεκαημέρων πραγματοποιήθηκε στο Microsoft Excel, ενώ η δημιουργία των γραφημάτων, ο υπολογισμός των περιγραφικών στατιστικών και η ανάλυση συσχέτισης μεταξύ των μελετώμενων παραμέτρων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού OriginPro.

4.2.2. Επεξεργασία μετεωρολογικών δεδομένων

Τα μετεωρολογικά δεδομένα αφορούν δύο από τα έξι σημεία μελέτης, το Νυμφαίο και το Λούρο, δεδομένης της περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων. Συγκεκριμένα, από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται κοντά στα μελετώμενα οικοσυστήματα, μόνο για δύο από αυτούς (τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται στην Καστοριά και στο Άκτιο χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των οικοσυστημάτων του Νυμφαίου και του Λούρου αντίστοιχα) υπήρχαν μεγάλες χρονοσειρές δεδομένων για την περίοδο μελέτης της παρούσας εργασίας, στη βάση δεδομένων του NOAA. Τα αρχικά δεδομένα είναι σε επίπεδο ημέρας και αντιστοιχούν στο μέσο όρο των τιμών που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν για κάθε ημέρα. Για κάθε σταθμό συλλέχθηκαν οι

αντίστοιχες χρονοσειρές (από 01/01/2003 – 31/12/2011) θερμοκρασίας επιφανείας και βροχόπτωσης. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των σημείων μελέτης και των σταθμών, καθώς επίσης και οι υψομετρικές διαφορές και αποστάσεις μεταξύ των σημείων μελέτης και των σταθμών, φαίνονται στους Πίνακες 2. και 3. αντίστοιχα

Περιοχή	Γεωγ. συντ/νες (μοίρες)	Υψόμετρο (m)
Νυμφαίο	Lat: 40°38'32.21"N Lon: 21°25'10.49"E	1.715
Μετεωρολογικός σταθμός Καστοριάς	Lat: 40°27'0.00" N Lon: 21°16'58.80"E	655
Λούρος	Lat: 39°10'10.72"N Lon: 20°50'53.57"E	95
Μετεωρολογικός σταθμός Ακτίου	Lat: 38°37'1.20"N Lon: 20°46'1.20"E	0

Πίνακας 2. Γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρο των σημείων μελέτης και των μετεωρολογικών σταθμών.

	Νυμφαίο - Σταθμός Καστοριά	Λούρος - Σταθμός Ακτίου
Υψομετρική διαφορά (m)	1.060	95
Απόσταση σε χιλιόμετρα (km)	24	63

Πίνακας 3. Υψομετρικές διαφορές και αποστάσεις μεταξύ των σημείων μελέτης και των μετεωρολογικών σταθμών.

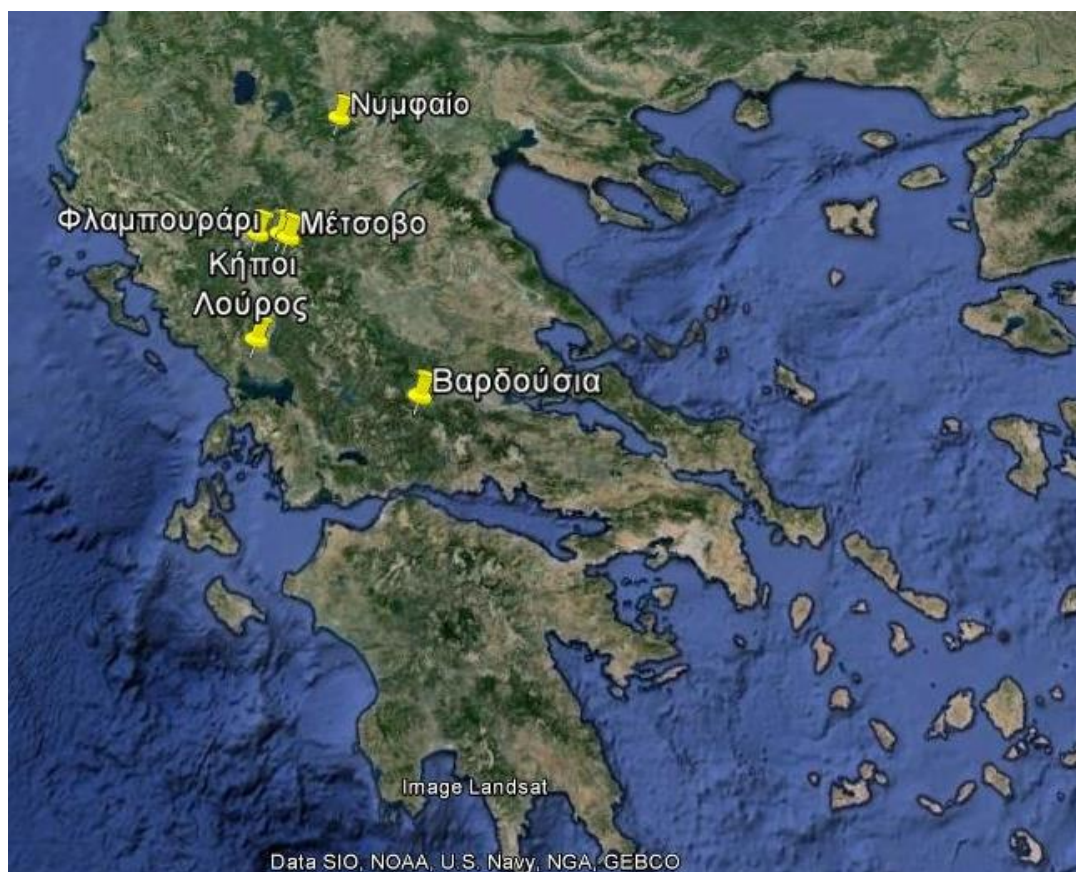
Δεδομένης της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των σημείων μελέτης και των σταθμών, χρησιμοποιήθηκε η απλή θεώρηση της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας, της μείωσης δηλαδή της θερμοκρασίας με το υψόμετρο κατά $6.49\text{ }^{\circ}\text{C} / 1000\text{m}$ (αναφορά). Αυτή η θεώρηση είναι ιδιαίτερα γενικευμένη. Μπορεί να ισχύει υπό «κανονικές» ατμοσφαιρικές συνθήκες, ωστόσο στην πραγματικότητα η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα μπορεί να επηρεάζεται από τα επίπεδα υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η χρήση της απλής αυτής μεθόδου, δεδομένου ότι το ενδιαφέρον της παρακολούθησης της θερμοκρασίας σε σχέση με τους δείκτες βλάστησης έγκειται στο επίπεδο συσχέτισης μεταξύ των τιμών και όχι στις απόλυτες τιμές της θερμοκρασίας. Η τεχνική αυτή βρήκε εφαρμογή κυρίως για

την περιοχή μελέτης του Νυμφαίου, σε σχέση με τον μετεωρολογικό σταθμό της Καστοριάς, αφού η υψομετρική διαφορά μεταξύ της περιοχής μελέτης του Λούρου και του μετεωρολογικού σταθμού του Ακτίου είναι αμελητέα (95 m).

Οι μονάδες των δεδομένων μετατράπηκαν από Fahrenheit (F) και ίντσες (in), σε Κελσίου (°C) και χιλιοστόμετρα (mm) για τη θερμοκρασία και τα κατακρημνίσματα αντίστοιχα. Από τις αρχικές ημερήσιες τιμές υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε μήνα, εφαρμόζοντας averaging σε υπολογιστικά φύλλα excel, προκειμένου να γίνει δυνατή η συσχέτισή τους με τις χρονοσειρές NDVI και fAPAR.

4.3. Περιοχές μελέτης

Οι επιλεγμένες περιοχές μελέτης αφορούν έξι φυσικά οικοσυστήματα (έξι σημεία 1km x 1km), εκ των οποίων τρεις δασικές εκτάσεις οξιάς (*Fagus sylvatica*), μία δασική έκταση δρυός (*Quercus sp.*), μία δασική έκταση μαύρης πεύκης (*Pinus nigra*) και μία έκταση ασφάκας (*Phlomis fruticosa*). Τα σημεία μελέτης είναι τα: Νυμφαίο(*Fagus sylvatica*) , Κήποι (*Quercus sp.*), Φλαμπουράρι (*Pinus nigra*), Μέτσοβο (*Fagus sylvatica*), Λούρος (*Phlomis fruticosa*) και Βαρδούσια (*Fagus sylvatica*) από Βορρά προς Νότο, και στο εξής θα αναφέρονται με τις παραπάνω ονομασίες, οι οποίες αποδίδονται στις τοποθεσίες τους. Η τοποθεσία και οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο των περιοχών μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 9 και στον Πίνακα 4 αντίστοιχα.



Εικόνα 9. Γεωγραφική τοποθεσία περιοχών μελέτης. Η εικόνα αποτελεί στιγμιότυπο οθόνης δορυφορικής εικόνας Landsat από την πλατφόρμα Google Earth.

Περιοχή	Γεωγ. συντ/νες (μοίρες)	Υψόμετρο (m)
Νυμφαίο	Lat: 40°38'32.21"N Lon: 21°25'10.49"E	1.715
Κήποι	Lat: 39°50'53.58"N Lon: 20°49'49.28"E	985
Φλαμπουράρι	Lat: 39°50'21.43"N Lon: 20°59'59.99"E	1.170
Μέτσοβο	Lat: 39°48'45.01"N Lon: 21° 3'12.85"E	1.455
Λούρος	Lat: 39°10'10.72"N Lon: 20°50'53.57"E	95
Βαρδούσια	Lat: 38°47'2.40"N Lon: 21°57'36.00"E	1.575

Πίνακας 4. Γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρο περιοχών μελέτης.

Σημείο 1: Νυμφαίο

Δεδομένου του οικολογικού του ενδιαφέροντος, η ευρύτερη περιοχή αυτού του σημείου μελέτης, έχει συμπεριληφθεί στο Ευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο προστατευόμενων περιοχών “*Natura 2000*”. Η προστατευόμενη περιοχή έχει καταχωρηθεί στο δίκτυο με τον κωδικό GR1340006 και το όνομα Όρος Βέρνον –

Κορυφή Βίτσι. Γεωμορφολογικά, η περιοχή ανήκει στην οροσειρά της Πίνδου, που αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά οικοσυστήματα στην Ελλάδα λόγω της χλωρίδας και της πανίδας της. Στην περιοχή κυριαρχούν τα δασικά οικοσυστήματα οξίας (*fagus sylvatica*), τα οποία συμβάλλουν στην κατακράτηση μέρους των αερίων ρύπων, αποφορτίζοντας το ήδη επιβαρημένο και υποβαθμισμένο φυσικό περιβάλλον της πεδιάδας του Αμυνταίου, σύμφωνα με την επίσημη βάση δεδομένων του δικτύου Natura 2000. Το σημείο μελέτης βρίσκεται κοντά στο ομώνυμο ορεινό χωριό, το οποίο διοικητικά υπάγεται στο Δήμο Αμυνταίου του νομού Φλώρινας και το οποίο χαρακτηρίζεται από την άριστη διαχείριση πολιτιστικού αποθέματος και φυσικού περιβάλλοντος. Το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης είναι ορεινό και το κλίμα που επικρατεί είναι ηπειρωτικό, με δροσερά καλοκαίρια, βροχερό φθινόπωρο και βαρείς χειμώνες με μεγάλο ποσοστό χιονόπτωσης, ενώ το χιόνι πολλές φορές κρατάει ως το Μάιο.

Σημεία 2, 3 και 4: Κήποι, Φλαμπουράρι και Μέτσοβο

Οι τρεις αυτές περιοχές μελέτης ανήκουν στο ευρύτερο σύνολο του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου, το οποίο ιδρύθηκε το 2005. Βρίσκεται στη βορειοδυτική Ελλάδα και διοικητικά ανήκει στις Περιφερειακές Ενότητες Ιωαννίνων και Γρεβενών. Αποτελεί το μεγαλύτερο χερσαίο Εθνικό Πάρκο της Ελλάδας, με έκταση 1.969.741 στρέμματα περιλαμβάνοντας στα όρια του ολόκληρη την περιοχή του Ζαγορίου, περιοχές της Κόνιτσας και του Μετσόβου, καθώς και το δυτικό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Γρεβενών. Το Εθνικό Πάρκο περιλαμβάνει το δεύτερο σε ύψος βουνό της Ελλάδας, το Σμόλικα (2.637m), την οροσειρά της Τύμφης, τον ορεινό όγκο του Λύγκου, της Βασιλίτσας, του Μιτσικελίου και άλλα χαμηλότερα βουνά. Εντός της προστατευόμενης περιοχής πηγάζουν οι ποταμοί Αώος, Βοϊδομάτης

και Βενέτικος καθώς και οι παραπόταμοι του Αράχθου: Βάρδας και Ζαγορίτικος. Εντυπωσιακό στοιχείο του Εθνικού Πάρκου αποτελούν τα φαράγγια και οι χαράδρες με κυριότερα το φαράγγι του Βίκου, το οποίο αποτελεί το βαθύτερο φαράγγι παγκοσμίως και τη χαράδρα του Αώου στην περιοχή των Ιωαννίνων, τα φαράγγια Πορτίτσας, Μικρολίβαδου και Τσούργιακα στην περιοχή των Γρεβενών. Οι ψηλές και απόκρημνες κορυφές δημιουργούν ένα έντονο και πολυσχιδές ανάγλυφο με ποικιλία οικοτόπων και ειδών. Οι εναλλαγές οικοσυστημάτων προσφέρουν στην περιοχή μοναδικές εικόνες όλες τις εποχές του χρόνου, όπως αυτές που δημιουργούν οι χρωματικές εναλλαγές των δασικών ειδών του Όρλιακα. Σε όλη την έκταση του Εθνικού Πάρκου, φιλοξενούνται πολλά σπάνια, ενδημικά και απειλούμενα είδη συνθέτοντας μια εξαιρετική βιοποικιλότητα, η οποία καθορίζει και την ιδιαίτερη οικολογική αξία της περιοχής.

Η οικολογική αξία του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου είναι αναγνωρισμένη σε εθνικό, ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Στα όριά του περικλείονται οι Εθνικοί Δρυμοί Πίνδου (Βάλια Κάλντα) και Βίκου – Αώου, έντεκα περιοχές που ανήκουν στο Πανευρωπαϊκό Δίκτυο Προστατευόμενων Περιοχών «NATURA 2000», το ιδιαίτερου φυσικού κάλλους τοπίο του Όρους Όρλιακας, μια περιοχή που έχει χαρακτηριστεί ως Βιογενετικό Απόθεμα (στο εσωτερικό της Βάλια Κάλντα), ένα σημαντικό τμήμα του Γεωπάρκου Βίκου – Αώου (μέλος του Ευρωπαϊκού Δικτύου Γεωπάρκων της UNESCO) και έντεκα καταφύγια άγριας ζωής (σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου).

Οι περιοχές μελέτης «Κήποι» και «Φλαμπουράρι» τοποθετούνται κοντά στα ομώνυμα χωριά, τα οποία ανήκουν στο σύμπλεγμα χωριών των Ζαγοροχωρίων, τα οποία περικλείονται στο σύνολό τους στο Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου. Τα

κυρίαρχα είδη βλάστησης των δύο περιοχών είναι η δρυς (*quercus* sp.) και η μαύρη πεύκη (*pinus nigra*) για τους «Κήπους» και το Φλαμπουράρι αντίστοιχα. Και οι δύο περιοχές μελέτης υπάγονται διοικητικά στο Δήμο Ζαγορίου.

Η περιοχή μελέτης «Μέτσοβο» τοποθετείται μεταξύ δύο περιοχών, οι οποίες είναι καταχωρημένες στο δίκτυο “*Natura 2000*”, και κατ’ επέκταση ανήκουν στο ευρύτερο σύνολο του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου. Η πρώτη περιοχή Natura έχει καταχωρηθεί στο δίκτυο με τον κωδικό GR2130001 και το όνομα Εθνικός Δρυμός Βίκου – Αωού και τοποθετείται βορειοδυτικά της περιοχής μελέτης. Η δεύτερη, έχει καταχωρηθεί στο δίκτυο με τον κωδικό GR2130006 και το όνομα περιοχή Μετσόβου (Ανήλιο – Κατάρα) και τοποθετείται νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης. Η γεωγραφική απομόνωση της περιοχής, η σχετικά μικρή ανθρώπινη παρέμβαση, καθώς επίσης και η μεγάλη ποικιλία βιοτόπων και μικροκλιματικών συνθηκών, ευνοούν την ανάπτυξη διαφορετικών φυτικών ειδών, μεταξύ των οποίων υπάρχουν σπάνια φυτά που αποτελούν είδη υπό εξαφάνιση, σύμφωνα με το δίκτυο “*Natura 2000*”. Το κυρίαρχο είδος βλάστησης στην περιοχή μελέτης είναι η δασική οξιά (*Fagus sylvatica*). Το κοντινότερο αστικό κέντρο της περιοχής είναι η παραδοσιακή κωμόπολη του Μετσόβου και η περιοχή μελέτης υπάγεται διοικητικά στον ευρύτερο Δήμο Μετσόβου.

Σημείο 5: Λούρος:

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται κοντά στον ποταμό Λούρο, σε απόσταση 800 μέτρων από αυτόν. Ο κοντινότερος οικισμός είναι αυτός του Λούρου και της Νέας Κερασούντας, ενώ διοικητικά υπάγεται στο Δήμο Πρέβεζας. Η περιοχή είναι πεδινή/ ημιπεδινή με υψόμετρο περίπου 100 μέτρα. Βρίσκεται στα όρια της περιοχής του δικτύου Natura 2000 που έχει καταχωρηθεί με το όνομα «Αμβρακικός Κόλπος, Δέλτα

Λούρου και Αράχθου (Πέτρα, Μύτικας, Ευρύτερη Περιοχή) και τον κωδικό GR2110001. Το κυρίαρχο είδος βλάστησης στην περιοχή μελέτης είναι η ασφάκα (*Phlomis fruticosa*).

Σημείο 6: Βαρδούσια.

Οι περιοχή βρίσκεται στην οροσειρά των Βαρδουσίων, η οποία αποτελεί το νοτιότατο άκρο της οροσειράς της Πίνδου και αποτελεί ένα από τα λίγα βουνά στην Ελλάδα με αλπικά χαρακτηριστικά. Περισσότερες από 10 κορυφές του υπερβαίνουν τα 2000 μέτρα ύψος και εκτείνεται 30 χιλιόμετρα από Βορρά προς Νότο και 15 χιλιόμετρα από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι χαμηλότερες κλίσεις της οροσειράς καλύπτονται κυρίως από δάση οξιάς και δρυός. Επίσης, η περιοχή μελέτης βρίσκεται κοντά σε μία από τις προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura 2000, η οποία έχει καταχωρηθεί με το όνομα «Όρη Βαρδούσια» και τον κωδικό GR2450001 και τοποθετείται στα νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης. Η παρουσία ενός μεγάλου αριθμού ενδημικών και σπάνιων φυτών, κυρίως σε εξωδασικές συστάδες φυτών, σηματοδοτεί την περιοχή ως πολύ σημαντική από οικολογικής απόψεως. Το κυρίαρχο είδος βλάστησης στην περιοχή μελέτης είναι η δασική οξιά (*Fagus sylvatica*). Διοικητικά ανήκει στο Δήμο Δωρίδος της περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας.

4.4. Τύποι βλάστησης

Fagus sylvatica.

Η δασική οξιά (*Fagus sylvatica*) είναι ένα φυλλοβόλο δέντρο με θερινό κύκλο ανάπτυξης. Παρουσιάζει άνθιση τους μήνες Απρίλιο – Μάιο και ωρίμανση καρπών κατά τη διάρκεια των μηνών Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου. Το ύψος του κυμαίνεται τυπικά στα 25 με 30 m και η διάμετρος του κορμού στο 1.5 m. Είναι ψυχρόβιο, πολύ σκιανθεκτικό και δημιουργεί πυκνή συγκρόμωση. Σχηματίζει αμιγή ή μεικτά δάση, απαιτεί νωπά, περιεκτικά σε οργανική ουσία, γόνιμα εδάφη και είναι ιδιαίτερα ευάλωτο στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Είναι τυπικό είδος των δασών της Ευρώπης (εκτός από τα βορειότερο τμήμα της) και εξαπλώνεται ανατολικά μέχρι τη Ρουμανία, ενώ η παρουσία του στον ελλαδικό χώρο αποτελεί το νοτιότερο άκρο εξάπλωσής του. Στην Ελλάδα εμφανίζεται τυπικά σε υψόμετρα από 1000 έως 1.800 m, στη ζώνη δασών οξιάς – ελάτης και ορεινών παραμεσόγειων κωνοφόρων, όπως της υβριδογενούς ελάτης (*Abies borisii – regis*) και της Μαύρης Πεύκης (*Pinus nigra*). Η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από ψυχρή υγρόφιλη, μεσευρωπαϊκή βλάστηση και το κλίμα είναι ορεινό, μεσογειακό, με δριμείς χειμώνες όπου το χιόνι διαρκεί για μερικούς μήνες, ενώ η ξηρή περίοδος περιορίζεται σε ένα με ενάμισι μήνα. Τα δάση *Fagus sylvatica* εμφανίζονται συνήθως σε νησίδες και προτιμούν βόρειες εκθέσεις (BA,B,ΒΔ) και πυριτικά πετρώματα (Σταγάκης 2012).

Quercus sp.

Τα μελετώμενα είδη δρυός είναι η ευθύφλοιος (*Quercus cerris*) και η πλατύφυλλη (*Quercus frainneto*). Και τα δύο είδη είναι φυλλοβόλα δέντρα με θερινό

κύκλο ανάπτυξης που φτάνουν έως και τα 25 m ύψος (το είδος *Quercus cerris*, σε εξαιρετικές περιπτώσεις φτάνει έως και τα 35m), με διάμετρο κορμού έως και 2m. Η άνθιση και των δύο ειδών παρατηρείται τους μήνες Απρίλιο – Μάιο, ενώ η ωρίμανση των καρπών του *Q. frainneto* είναι μονοετής και του *Q. cerris* διετής (Σεπτέμβριος – Νοέμβριος). Και τα δύο είδη δρυός απαιτούν βαθιά νωπά και γόνιμα εδάφη για την ανάπτυξή τους. Το είδος *Q. Cerris* είναι μέτρια φωτόφιλο και ανθεκτικό στο ψύχος, ενώ το *Q. frainneto* χαρακτηρίζεται ως ημισκιάφυτο και σχετικά ψυχρόβιο και υγρόβιο. Στον ελλαδικό χώρο συναντώνται τυπικά στην παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης, σε υψόμετρα από 600 έως 1000m, σε αμιγείς ή μικτές συστάδες, με άλλα είδη του γένους τους ή άλλα φυλλοβόλα. Η ζώνη αυτή αποτελεί τη συνέχεια της ευμεσογειακής ζώνης βλάστησης, η οποία είναι μια σχεδόν συνεχής λωρίδα κατά μήκος των ακτών της ηπειρωτικής χώρας. Συνεπώς, η παραμεσογειακή ζώνη περιλαμβάνει περιοχές υψηλότερες και προς το εσωτερικό της χώρας. Το κλίμα της ζώνης αυτής χαρακτηρίζεται ως μεταβατικό από μεσογειακό προς ηπειρωτικό, με σχετικά δριμύεις χειμώνες – θερμοκρασία συχνά υπό τους 0°C, συχνές βροχοπτώσεις, διάρκεια χιονιού για μερικές εβδομάδες – και ξηρά καλοκαίρια (Σταγάκης, 2012).

Pinus nigra.

Η μαύρη πεύκη είναι ένα αειθαλές κωνοφόρο δένδρο το οποίο ανήκει στα χαρακτηριστικά είδη της παραμεσογειακής περιοχής και ευδοκίμει ιδιαίτερα σε όλη τη νότια Ευρώπη. Εξαπλώνεται φυσικά από την Ισπανία και το Μαρόκο, μέχρι την Τουρκία και την Κύπρο. Συναντάται επίσης στην Κριμαία της Ουκρανίας και στη Β. Αφρική. Σε ορισμένα τμήματα του ευρωπαϊκού ενδιαιτήματός της αναπτύσσεται σε δροσερό/κρύο εύκρατο κλίμα. Οι βόρειες ποικιλίες είναι πολύ ανθεκτικές στον παγετό και αντέχουν σε θερμοκρασίες έως -30 C°, ενώ οι νότιες ποικιλίες ανέχονται

θερμοκρασίες έως $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Είναι είδος μακρόβιο, ανθεκτικό στην ξηρασία, σε χαμηλές θερμοκρασίες και στους ανέμους, ολιγαρκές και ικανό να προσαρμόζει τη φυσιολογία του σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Εποικίζει ποικίλους οικολογικούς θώκους όπως, για παράδειγμα, εκτάσεις που εγκαταλείφθηκαν από τη γεωργία και την κτηνοτροφία. Σχηματίζει εκτεταμένα δάση με άτομα που φθάνουν σε ύψος τα 20 – 40 m και σπανιότερα τα 50m. Ο κορμός της μαύρης πεύκης είναι ευθύς και η κόμη της πυραμιδοειδής στην αρχή και αργότερα ομπρελοειδής. Κάθε 2 – 3 έτη εμφανίζει ένα μέγιστο στο σχηματισμό κώνων και σπόρων οι οποίοι ωριμάζουν κατά τη χειμερινή περίοδο και πέφτουν στο έδαφος έως την επόμενη άνοιξη. Δε διατηρεί κλειστούς κώνους, ούτε σπέρματα σε λήθαργο. Προσαρμόζεται σε πολλούς τύπους εδαφών και πλήθος ενδιαιτημάτων διαφορετικών τοπογραφικών χαρακτηριστικών. Στα Βαλκάνια, συνήθως συναντάται σε φτωχά ασβεστολιθικά εδάφη, ενώ συνηθίζει να ευδοκιμεί και σε ποτζολικά (podzolic) εδάφη, σύμφωνα με τη Δασολογική Υπηρεσία του Γεωπονικού Τμήματος των ΗΠΑ (USDA Forest Service). Τα εδάφη αυτά είναι εξελιγμένα όξινα εδάφη με γκριζόφαιο χρώμα στην επιφάνεια, που σχηματίστηκαν επάνω σε πυριτιούχα ανώριμα εδάφη. Απαντούν σε ορεινές περιοχές που δέχονται υψηλή μέση ετήσια βροχόπτωση (άνω των 700mm). Τα εδάφη αυτά είναι συνήθως ακατάλληλα για καλλιέργεια. Τα διάφορα υποείδη μαύρης πεύκης έχουν σκούρο καφέ έως σκούρο γκρι φλοιό, ο οποίος είναι χαραγμένος από μικρές ρωγμές, σε φολιδωτές πλάκες. Οι ρίζες του είναι πλάγιες και βαθιές. Τα φύλλα του είναι μακριά (8 – 15 cm), σκληρά και έχουν τη μορφή μυτερών βελονών που σχηματίζουν δυάδες. Τα αρσενικά άνθη του είναι κίτρινα, με μήκος 1 – 2 cm κατά την εποχή της γονιμοποίησης το Μάιο – Ιούνιο και εμφανίζονται σε μεγάλες ομάδες κατά μήκος των κλαδιών. Τα θηλυκά άνθη του είναι μωβ και έχουν οβάλ σχήμα.

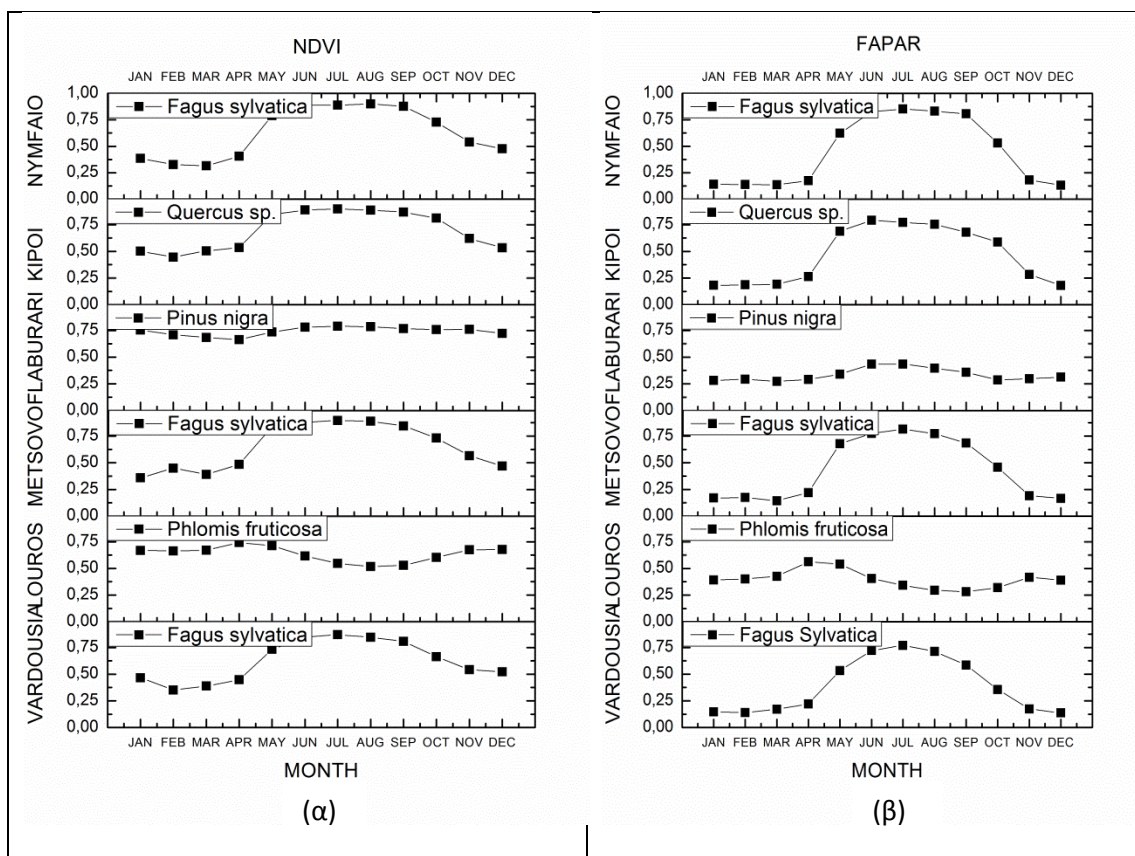
Phlomis fruticosa.

Το είδος *Phlomis fruticosa* (κοινή ονομασία: ασφάκα) είναι ένα μαλακόφυλλο, ημιφυλλοβόλο, φρύγανο (Sykioti et al. 2011) που παρουσιάζει εποχιακό διμορφισμό των φύλλων. Το ύψος και η διάμετρός του μπορούν να φθάσουν τα 2m. Κυριαρχεί στα φρυγανικά οικοσυστήματα της Ελλάδας και γενικά της ανατολικής μεσογείου (Greuter et al. 1986). Ιδιαίτερα μεγάλη εξάπλωση παρουσιάζει σε υποβαθμισμένα οικοσυστήματα, π.χ. λόγω υπερβόσκησης, πυρκαγιάς ή άλλων ανθρωπογενών επιδράσεων. Συναντάται σε μεγάλη ποικιλία μικροβιοτόπων, από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι τα 1300 m υψόμετρο και από ακάλυπτες περιοχές, έως κάτω από τη σκιά δέντρων. Το είδος *Phlomis fruticosa* μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό για την εφαρμογή τηλεπισκοπικών μεθόδων παρακολούθησης ιδιοτήτων της βλάστησης λόγω της έντονης εποχικότητας που παρουσιάζουν τα φυσιολογικά, βιοχημικά και φαινολογικά χαρακτηριστικά του υπό την επίδραση των κλιματικών παραμέτρων. Όταν το φύλλωμα των θάμνων βρίσκεται σε πλήρη ανάπτυξη, το έδαφος καλύπτεται από τον πυκνό θόλο. Κατά τη διάρκεια όμως των ζεστών και ξηρών καλοκαιρινών μηνών, το *Phlomis fruticosa* απορρίπτει ένα μέρος του φυλλώματός του, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται κενά στο θόλο και στα μεσοδιαστήματα των θάμνων, με αποτέλεσμα μέρος του εδάφους να μένει ακάλυπτο (Stagakis et al. 2010).

5. Αποτελέσματα

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε οικοσυστήματος, εκφράζονται μέσω των διαφορετικών αποκρίσεων στη δυναμική του περιβάλλοντος, οι οποίες στην παρούσα μελέτη ανιχνεύονται μέσω των χρονοσειρών NDVI και fAPAR. Παρόλα αυτά, και οι έξι μελετώμενες περιοχές παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα όσον αφορά τόσο το δείκτη NDVI, όσο και την παράμετρο fAPAR. Εντούτοις, η εποχικότητα εκφράζεται διαφορετικά σε κάθε οικοσύστημα και ακολουθεί διαφορετικά μοτίβα, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στον τύπο βλάστησης του κάθε οικοσυστήματος και στα οικοφυσιολογικά χαρακτηριστικά του.

Στο Γράφημα 1 (α. και β.) φαίνονται τα μοτίβα των NDVI και fAPAR για τη συνολική περίοδο μελέτης και στους Πίνακες 5 και 6 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά των NDVI και fAPAR και τα αποτελέσματα των αναλύσεων της γραμμικής και πολυωνυμικής συσχέτισης μεταξύ των NDVI και fAPAR, αντίστοιχα για όλες τις περιοχές μελέτης.



Γράφημα 1. Μέσος όρος των μηνιαίων τιμών όλων των ετών των NDVI και fAPAR (γενικό μοτίβο διακύμανσης των NDVI και fAPAR για τα 9 χρόνια της περιόδου μελέτης), για όλα τα μελετώμενα οικοσυστήματα.

NDVI	Min.	Max.	Mean	std
Nymfaio	0,204	0,920	0,650	0,236
Kipoi	0,148	0,909	0,695	0,189
Flabourari	0,236	0,84	0,742	0,088
Metsovo	0,072	0,908	0,652	0,218
Louros	0,468	0,781	0,635	0,081
Vardousia	0,212	0,896	0,632	0,209
fAPAR	Min.	Max.	Mean	std
Nymfaio	0,070	0,905	0,482	0,318
Kipoi	0,085	0,848	0,466	0,263
Flabourari	0,16	0,47	0,334	0,072
Metsovo	0,110	0,878	0,452	0,285
Louros	0,225	0,652	0,397	0,095
Vardousia	0,070	0,858	0,412	0,259

Πίνακας 5. Περιγραφικά στατιστικά των NDVI και fAPAR για όλες τις περιοχές μελέτης.

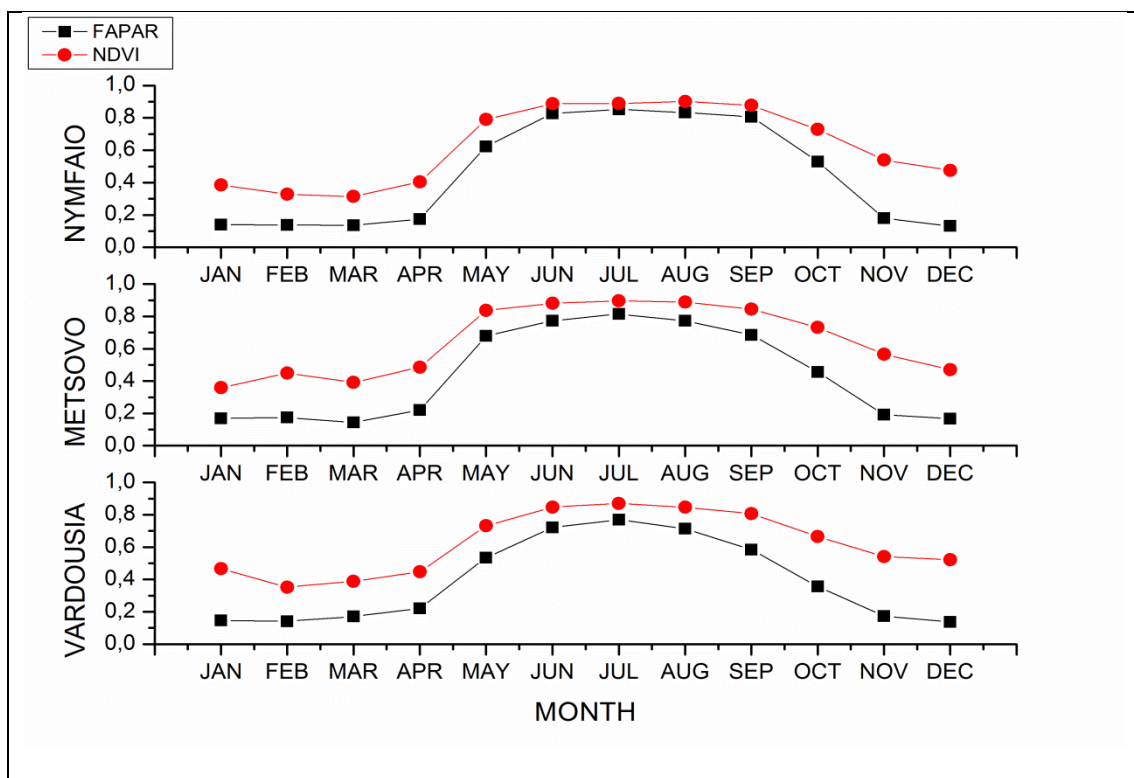
r^2	Nymfaio	Kipoi	Flabourari	Metsovo	Louros	Vardous
Linear	0,90	0,89	0,04	0,88	0,71	0,78
2 nd order polynomial	0,97	0,95	0,05	0,93	0,75	0,89

Πίνακας 6. Αποτελέσματα συσχέτισης (γραμμικής και πολυωνυμικής) για όλες τις περιοχές μελέτης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης ανά τύπο οικοσυστήματος. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων αφορά τόσο τις πλήρεις χρονοσειρές από το 2003 έως το 2011, όσο και το μέσο όρο των μηνιαίων τιμών όλων των ετών των NDVI και fAPAR, δηλαδή το γενικό μοτίβο των παραμέτρων μέσα στην περίοδο μελέτης. Οι ασυνέχειες που παρατηρούνται στις καμπύλες των fAPAR και NDVI οφείλονται σε εικονοστοιχεία που δεν περιέχουν πληροφορίες (missing data pixels), τα οποία συχνά οφείλονται σε συνθήκες έντονης νεφοκάλυψης.

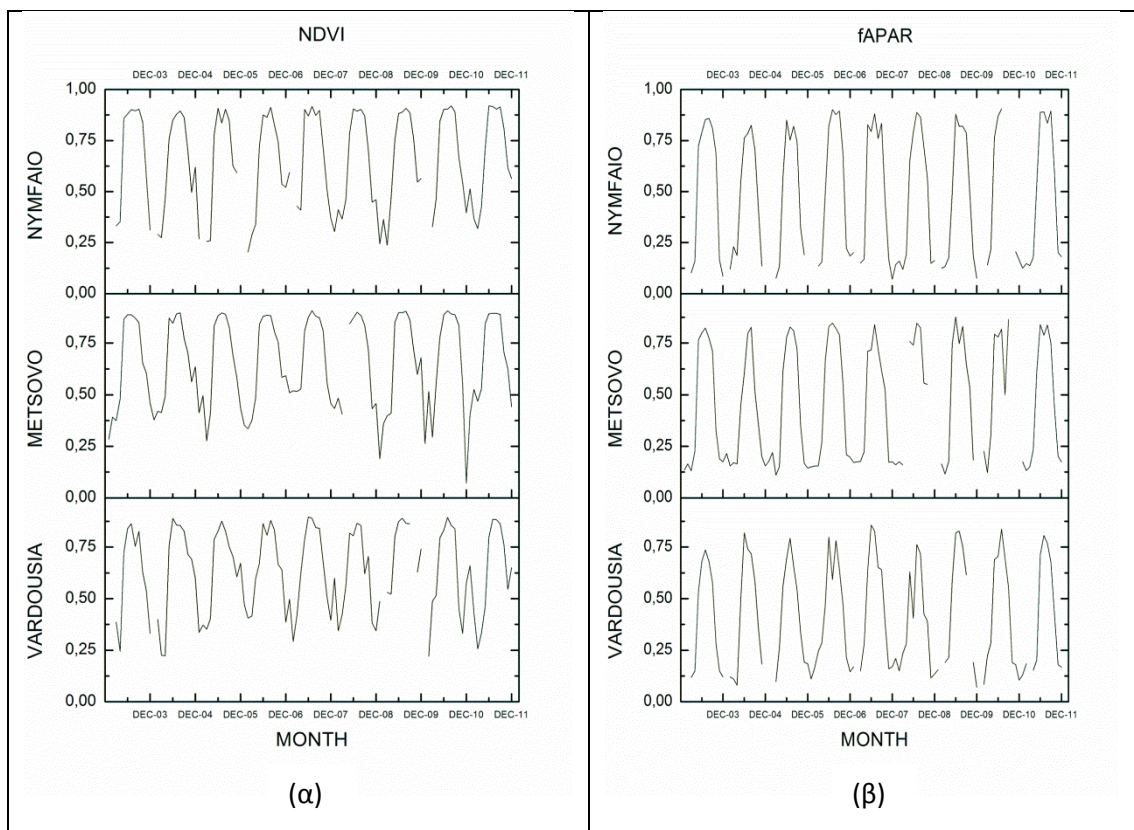
Νυμφαίο, Μέτσοβο και Βαρδούσια (*Fagus sylvatica*)

Για τα τρία φυσικά οικοσυστήματα *Fagus sylvatica*, οι τιμές των NDVI και fAPAR παρουσιάζουν χαρακτηριστικά άνοδο και πτώση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινόπωρου, γεγονότα που συμπίπτουν με τις περιόδους έκπτυξης και πτώσης των φύλλων αντίστοιχα (Σταγάκης et al. 2007), όπως φαίνεται στο Γράφημα 2.



Γράφημα 2. Μέσος όρος των μηνιαίων τιμών όλων των ετών των NDVI και fAPAR (γενικό μοτίβο διακύμανσης των NDVI και fAPAR για τα 9 χρόνια της περιόδου μελέτης), για τις περιοχές του Νυμφαίου, του Μετσόβου και των Βαρδουσίων.

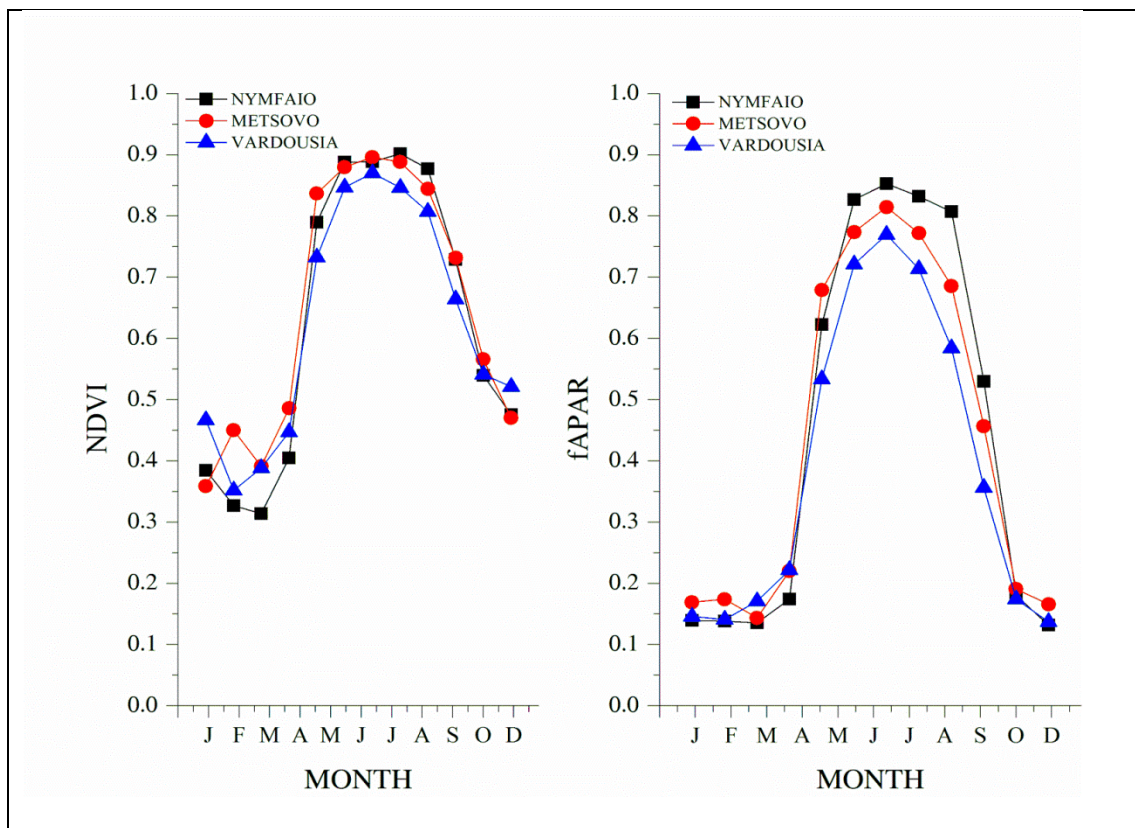
Οι καμπύλες των NDVI και fAPAR ακολουθούν γενικά σχήμα καμπάνας, παρόλο που τα χαρακτηριστικά των μοτίβων των καμπυλών δείχνουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των ετών (Γραφήματα 3 (α) και (β)).



Γράφημα 3. Πλήρεις χρονοσειρές των NDVI και fAPAR, για τις περιοχές μελέτης του Νυμφαίου, του Μετσόβου και των Βαρδουσίων.

Συγκεκριμένα, ο NDVI ξεκινά με χαμηλές τιμές μεταξύ Δεκεμβρίου και Ιανουαρίου με μεταβλητά ελάχιστα, γεγονός που εξαρτάται από τη χρονιά, κυρίως για το Μέτσοβο και τα Βαρδούσια. Οι μετρηθείσες ελάχιστες τιμές του NDVI είναι 0,2 (Φεβρουάριος 2006), 0,07 (Δεκέμβριος 2010) και 0,21 (Ιανουάριος 2003) για το Νυμφαίο, το Μέτσοβο και τα Βαρδούσια αντίστοιχα (Πίνακας 5). Ο NDVI αυξάνεται σχεδόν γραμμικά από το χειμώνα στο καλοκαίρι, φτάνοντας στο μέγιστό του κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών (Ιούνιος – Αύγουστος). Οι υψηλότερες παρατηρηθείσες τιμές είναι 0,92 για το Νυμφαίο, 0,91 για το Μέτσοβο και 0,90 για τα Βαρδούσια (Πίνακας 5). Για συγκεκριμένες χρονιές, μια μικρή πτώση των τιμών μέσα στη θερινή περίοδο (midseason depression) παρατηρείται τον Ιούλιο (π.χ. το 2006, το 2008 και

το 2011). Αφού φτάσουν στα μέγιστα τους, οι καμπύλες του NDVI μειώνονται γραμμικά μέχρι το τέλος της κάθε χρονιάς. Και για τα τρία αυτά σημεία μελέτης, παρόλο που οι μέγιστες τιμές κάθε χρονιάς για τον NDVI δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, παρουσιάζεται αξιοσημείωτη μεταβλητότητα στις χαμηλότερες τιμές του. Αυτό παρατηρείται περισσότερο στο Μέτσοβο και στα Βαρδούσια (Γράφημα 3α). Οι μέσες τιμές του NDVI στο Νυμφαίο και στο Μέτσοβο είναι παρόμοιες (περίπου στο 0,65) και ελαφρώς υψηλότερες από τις αντίστοιχες των Βαρδουσίων (Πίνακας 5). Οι τιμές της τυπικής απόκλισης αυξάνονται από τα Βαρδούσια προς το Νυμφαίο (Πίνακας 5). Συνοψίζοντας, οι υψηλότερες τιμές του NDVI παρουσιάζουν μία κλίση από Βορρά προς Νότο για τα τρία οικοσυστήματα *Fagus sylvatica*, όπως φαίνεται στο (Γράφημα 4).

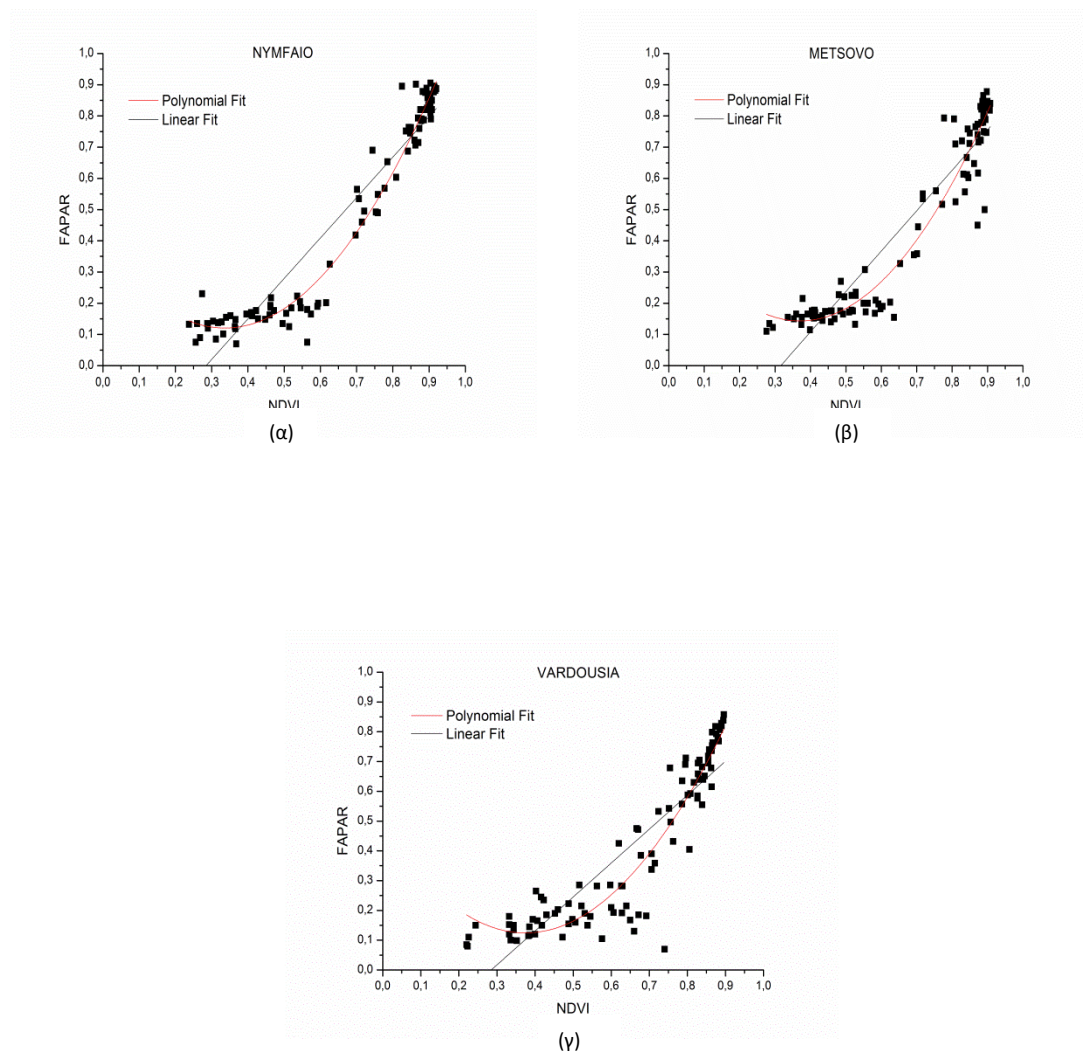


Γράφημα 4. Μέση ετήσια διακύμανση (για όλη την περίοδο μελέτης) των NDVI και fAPAR.

Παρά την ισχυρή εποχικότητα, το δομικό μοτίβο του NDVI μεταβάλλεται μεταξύ των χρόνων, ειδικά στις ελάχιστες τιμές (Γράφημα 3α). Εν τέλει, μια ελαφριά φθίνουσα κλίση παρατηρείται στις υψηλότερες και στις μέσες τιμές από το Νυμφαίο στα Βαρδούσια (Πίνακας 5).

Όπως παρατηρήθηκε για τον NDVI, το fAPAR παρουσιάζει επίσης ισχυρή εποχικότητα (Γράφημα 3β). Οι χαμηλότερες παρατηρηθείσες τιμές, λαμβάνουν χώρα το Δεκέμβριο. Οι τιμές φτάνουν το 0,07 για το Νυμφαίο (Δεκέμβριος 2007), 0,11 για το Μέτσοβο (Μάρτιος 2005) και 0,07 για τα Βαρδούσια (Δεκέμβριος 2009) (Πίνακας 5). Μια μικρή ενδιάμεση άνοδος (διπλή κορυφή ελάχιστων) παρατηρείται το Δεκέμβριο του 2007 και για τα 3 οικοσυστήματα οξιάς. Το Μέτσοβο παρουσιάζει ακόμα δύο ενδιάμεσες ανόδους, το Δεκέμβριο του 2003 και του 2004. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των χαμηλότερων τιμών, για όλη την περίοδο μελέτης. Από την άνοιξη, το fAPAR αυξάνει γραμμικά μέχρι το καλοκαίρι και τον Ιούλιο φτάνει στην υψηλότερη τιμή του, που κυμαίνεται περίπου στο 0,91 για το Νυμφαίο, 0,88 για το Μέτσοβο και 0,86 για τα Βαρδούσια. Μικρές πτώσεις (midseason depression) είναι παρούσες τα έτη 2005, 2007, 2009 και 2011 στο Νυμφαίο, το 2004, 2009, 2010 και 2011 στο Μέτσοβο και το 2003, 2006 και 2008 στα Βαρδούσια (Γράφημα 3.β). Γενικά, οι υψηλότερες τιμές μειώνονται από Βορρά προς Νότο, όπως φαίνεται στο (Γράφημα 4). Το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές του fAPAR, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Συνοψίζοντας, οι καμπύλες του fAPAR δείχνουν έντονη εποχικότητα και στις τρεις αυτές περιοχές μελέτης με μέγιστα τους θερινούς μήνες (Ιούλιος – Αύγουστος) (Γράφημα 2.β.) και μέγιστες τιμές, μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις που μειώνονται από Βορρά προς Νότο (Πίνακας 5).

Υπολογίστηκε η συσχέτιση μεταξύ των NDVI και fAPAR με την εφαρμογή πολυωνυμικής και γραμμικής παλινδρόμησης. Όπως φαίνεται στα Γραφήματα 5(α), 5(β) και 5(γ), ο δείκτης NDVI και η παράμετρος fAPAR είναι ισχυρά συσχετισμένα. Υπάρχει ισχυρή γραμμική σχέση των NDVI και fAPAR, όμως η πολυωνυμική σχέση τους φαίνεται να είναι ακόμα ισχυρότερη (Πίνακας 6). Επιπλέον, τα οικοσυστήματα παρουσιάζουν σχετικά μικρότερες συσχετίσεις, βαθμιαία από Βορρά προς Νότο.



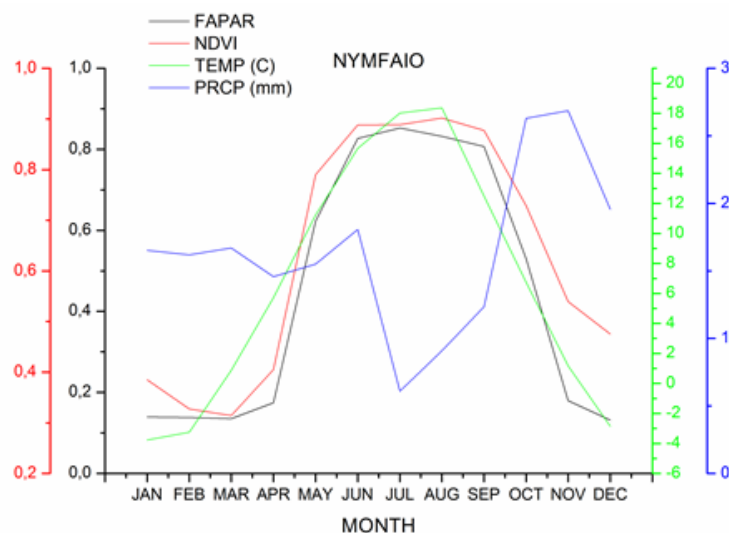
Γράφημα 5. Σχέση (γραμμική και πολυωνυμική) μεταξύ των NDVI και fAPAR για τα τρία οικοσυστήματα *Fagus sylvatica* (α) Νυμφαίο, (β) Μέτσοβο, (γ) Βαρδούσια.

Οι παρατηρηθείσες τιμές των NDVI και fAPAR δείχνουν επίσης να επηρεάζονται από τη γεωγραφική τοποθεσία, παρουσιάζοντας μια σαφή διαβάθμιση από Βορρά

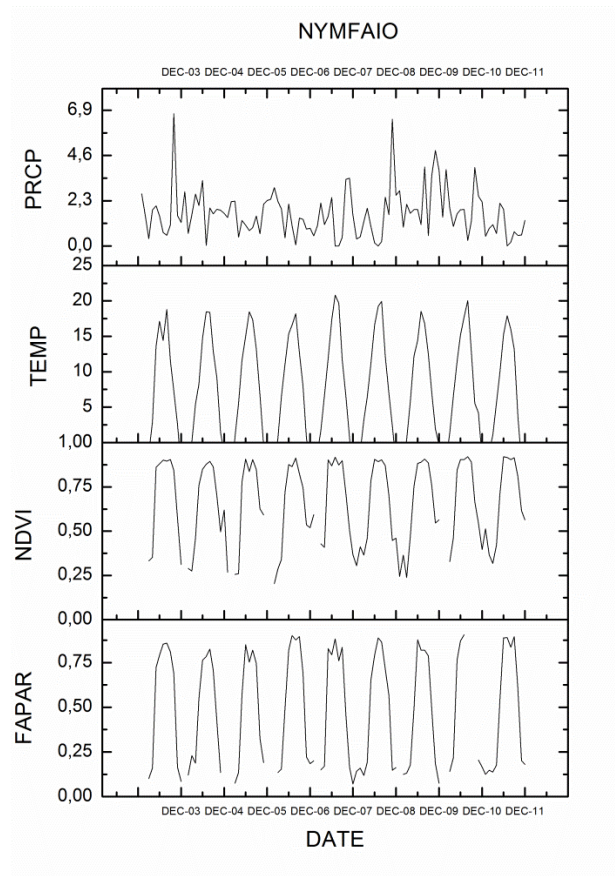
προς Νότο (Γράφημα 4). Πράγματι, η ζωτικότητα και η ανάπτυξη της οξιάς (*Fagus sylvatica*) έχουν ήδη συσχετισθεί στο παρελθόν με συνθήκες θερμοκρασίας που εξαρτώνται από το υψόμετρο (Dittmar and Elling 2006). Σε αυτήν την περίπτωση, αυτό μπορεί να εξηγήσει επίσης την απόκλιση των τιμών μεταξύ της περιοχής του Μετσόβου και της περιοχής των Βαρδουσίων, δεδομένου ότι η διαφορά υψομέτρου μεταξύ των δύο περιοχών είναι αμελητέα. Ειδικά το Μάιο, ο NDVI και η παράμετρος fAPAR φαίνονται να είναι ισχυρά συνδεδεμένα· εντούτοις, αυξάνονται πιο γρήγορα στο Μέτσοβο από ότι στο Νυμφαίο (Γράφημα 4). Αυτό αντιτίθεται στο γενικό μοτίβο της παρατηρηθείσας τάσης Βορρά – Νότου. Παρόλα αυτά, μπορεί να εξηγηθεί από το υψηλότερο υψόμετρο της περιοχής μελέτης (Πίνακας 4) του Νυμφαίου, το οποίο περιλαμβάνει μια καθυστέρηση στην έκπτυξη των φύλλων (leaf budburst). Από την άλλη πλευρά, το γήρας των φύλλων (leave senescence) ακολουθεί το μοτίβο Βορρά – Νότου. Το γήρας των φύλλων στο Νυμφαίο ξεκινά τον Οκτώβριο, ενώ στο Μέτσοβο και τα Βαρδούσια τον Σεπτέμβριο. Επιπλέον, οι υψηλές τιμές του NDVI το καλοκαίρι, για το Μέτσοβο και το Νυμφαίο είναι παρόμοιες, υποδεικνύοντας κορεσμό. Σύμφωνα με τη Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS), ο NDVI τείνει να κορεσθεί σε θόλους πολύ πυκνής βλάστησης. Από την άλλη, οι μέγιστες τιμές του fAPAR ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη πυκνότητα και ζωτικότητα για το δασικό θόλο βλάστησης του Νυμφαίου. Η προαναφερθείσα εξήγηση, μπορεί επίσης να υποστηρίζεται από την ισχυρή μη-γραμμική σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων.

Για την περιοχή μελέτης του Νυμφαίου, η διαθεσιμότητα μετεωρολογικών δεδομένων, επέτρεψε την περαιτέρω ανάλυση του μελετώμενου οικοσυστήματος, σε σχέση με τους μετεωρολογικούς παράγοντες της θερμοκρασίας επιφανείας και της βροχόπτωσης. Στο Γράφημα 6, φαίνεται το ετήσιο μοτίβο της διακύμανσης των

NDVI και fAPAR, για τη συνολική περίοδο μελέτης σε σχέση με τους προαναφερθέντες μετεωρολογικούς παράγοντες. Ο θερινός κύκλος ανάπτυξης του *Fagus sylvatica* εκφράζεται και μέσω της πορείας της καμπύλης της θερμοκρασίας σε σχέση με τις καμπύλες των NDVI και fAPAR. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία ξεκινάει να αυξάνεται το Φεβρουάριο και οι καμπύλες των NDVI και fAPAR φαίνονται να ανταποκρίνονται σε αυτήν την αύξηση το Μάρτιο, ακριβώς ένα μήνα μετά. Αντιστρόφως ανάλογη μοιάζει να είναι η πορεία της καμπύλης των κατακρημνισμάτων γεγονός που οφείλεται πιθανά στο θερινό κύκλο ανάπτυξης και ενδεχομένως δείχνει ότι το *Fagus sylvatica* δεν επηρεάζεται άμεσα από τα κατακρημνίσματα (των οποίων τα επίπεδα παρουσιάζονται αρκετά χαμηλά) ή ότι η απόκριση του σε αυτά εκφράζεται σε διάστημα έξι μηνών. Στο Γράφημα 7, παρουσιάζονται οι πλήρεις χρονοσειρές των μετεωρολογικών παραμέτρων, μαζί με τις χρονοσειρές των NDVI και fAPAR για το οικοσύστημα *Fagus sylvatica* στην περιοχή του Νυμφαίου.



Γράφημα 6. Μέση ετήσια διακύμανση για τη συνολική περίοδο μελέτης των NDVI, fAPAR, της θερμοκρασίας και των κατακρημνισμάτων για την περιοχή μελέτης του Νυμφαίου.



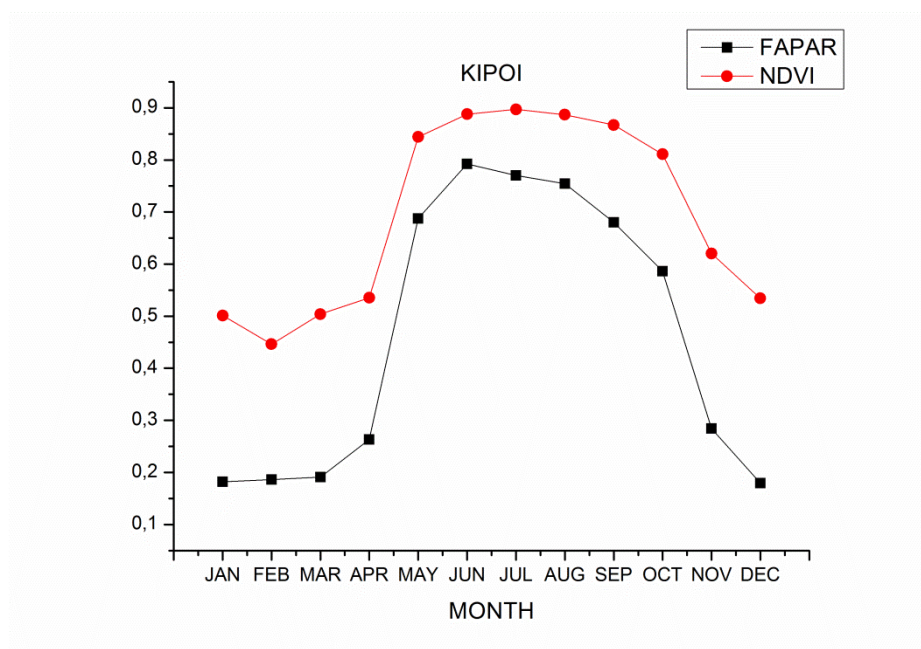
Γράφημα 7. Πλήρεις χρονοσειρές των NDVI, fAPAR, θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων για την περιοχή μελέτης του Νυμφαίου.

Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που καταγράφηκε για την περιοχή μελέτης του Νυμφαίου, είναι 20,1 °C και αντιστοιχεί στον Ιούλιο του 2007, ενώ η ελάχιστη είναι - 7,5 και αντιστοιχεί στο Φεβρουάριο του 2003. Η μέγιστη τιμή των κατακρημνισμάτων παρατηρείται τον Οκτώβριο του 2003 και είναι ίση με 6,7 mm.

Κήποι:

Για το φυσικό οικοσύστημα *Quercus sp.*, στην περιοχή «Κήποι», το ετήσιο μοτίβο των NDVI και fAPAR, όπως φαίνεται στο Γράφημα 8, ακολουθεί σχήμα

καμπάνας με χαρακτηριστική άνοδο και πτώση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου, που όπως στην περίπτωση των οικοσυστημάτων *fagus sylvatica*, συμπίπτουν με τις περιόδους έκπτυξης και γήρατος των φύλλων αντίστοιχα.

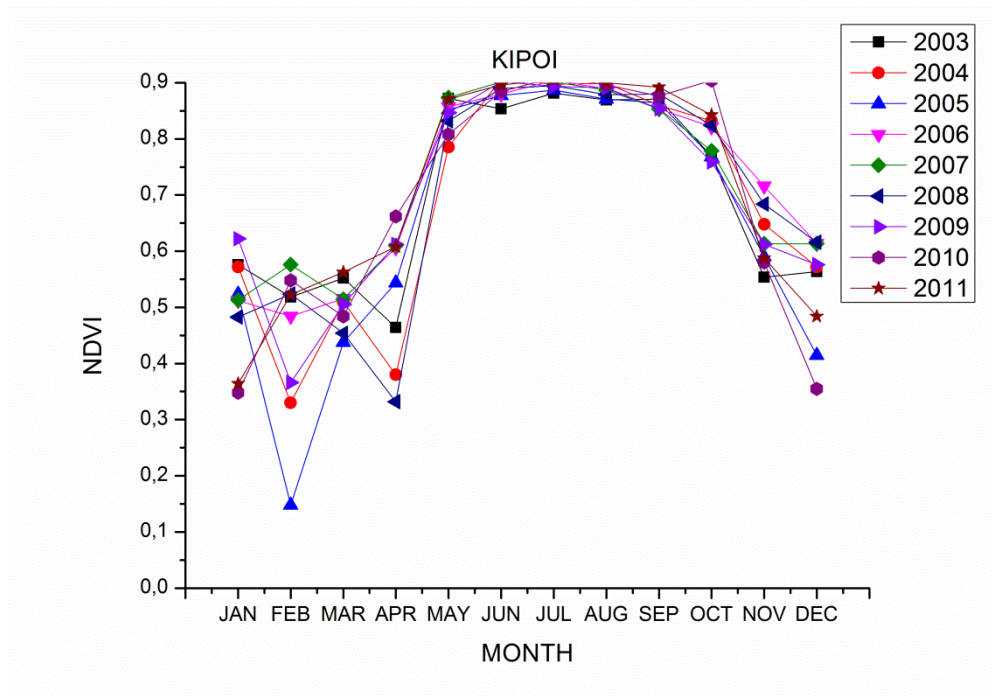


Γράφημα 8. Μέσος όρος των μηνιαίων τιμών όλων των ετών των NDVI και fAPAR (γενικό μοτίβο διακύμανσης των NDVI και fAPAR για τα 9 χρόνια της περιόδου μελέτης), για την περιοχή μελέτης Κήποι.

Συγκεκριμένα, για τον δείκτη NDVI, η μικρότερη τιμή που καταγράφηκε είναι 0,148 και αντιστοιχεί στο Φεβρουάριο του 2005. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε είναι 0,909 και αναφέρεται στον Ιούλιο του 2010. Η η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του NDVI είναι 0,695 και 0,189 αντίστοιχα (Πίνακας 5).

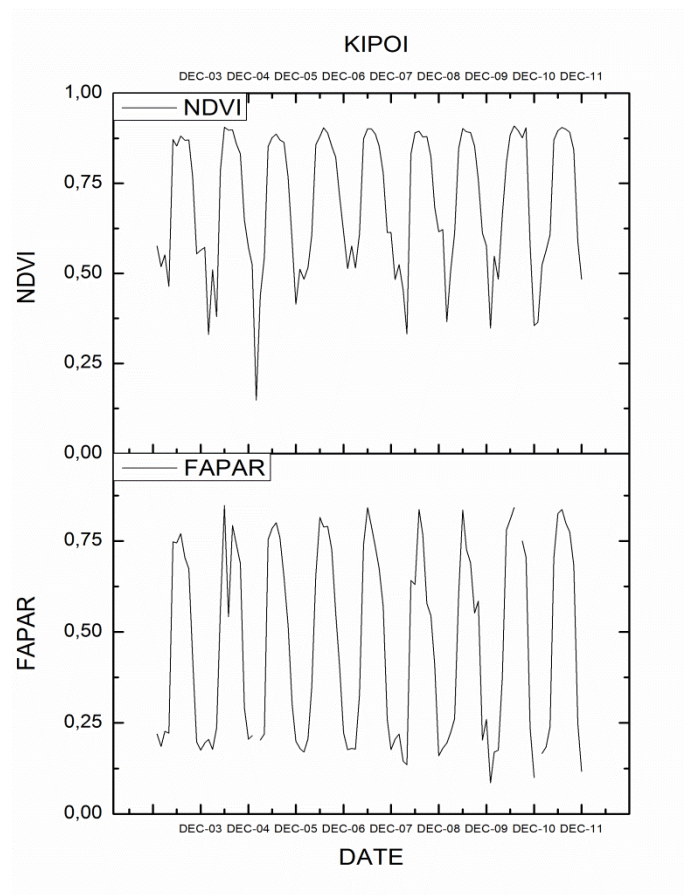
Το γενικό ετήσιο μοτίβο του NDVI θέλει τις τιμές του να ξεκινούν περίπου από το 0,4 το Φεβρουάριο και να αυξάνονται σταδιακά μέχρι τον Απρίλιο περίπου στο 0,5. Από τον Απρίλιο μέχρι το Μάιο, υπάρχει μια τυπική απότομη αύξηση για όλα τα έτη από το 0,5 στο 0,8 – 0,85. Γενικά, ο NDVI παρουσιάζει ισχυρή εποχικότητα, με υψηλές τιμές από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο, οι οποίες παρουσιάζουν μόνο ελαφρές

– σχεδόν αμελητέες διακυμάνσεις μέσα στην περίοδο αυτή, μετά το πέρας της οποίας, οι τιμές μειώνονται γραμμικά μέχρι το Δεκέμβριο (Γράφημα 9).



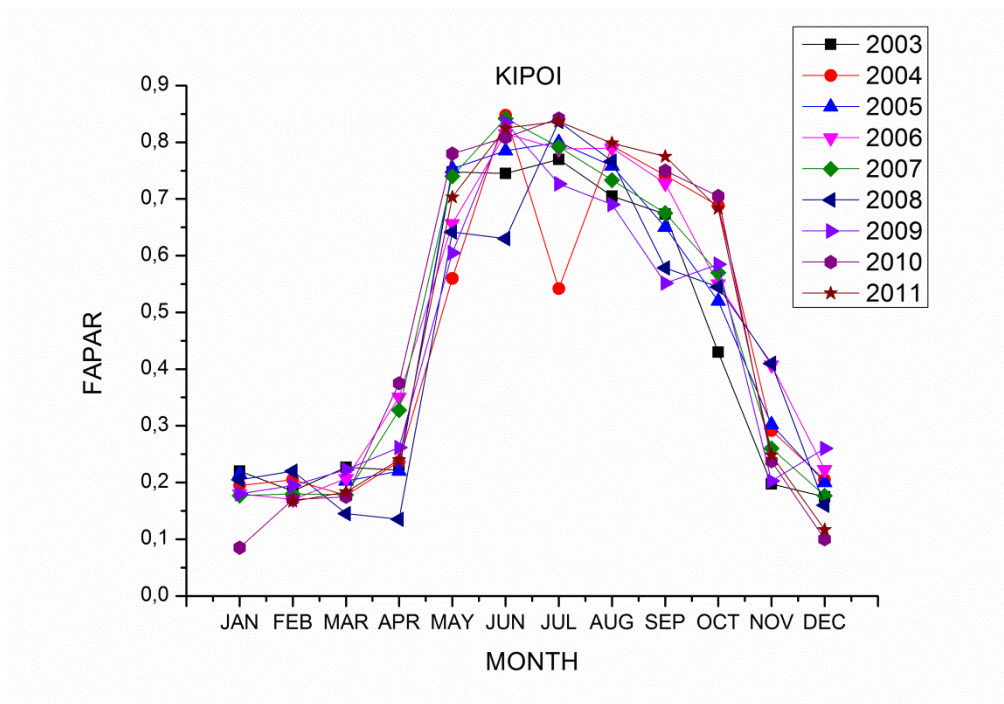
Γράφημα 9. Χρονοσειρά NDVI ανά έτος, για την περιοχή μελέτης Κήποι.

Ελαφριά πτώση των τιμών του NDVI παρατηρείται μέσα στις θερινές περιόδους των ετών 2003 και 2010 (midseason depression), ενώ διπλές κορυφές ελάχιστων τιμών παρατηρούνται κατά τις χειμερινές περιόδους 2002-03, 2003-04, 2005-06, 2006-07, 2007-08 και 2009-10 (Γράφημα 10).



Γράφημα 10. Πλήρεις χρονοσειρές των NDVI και fAPAR για την περιοχή μελέτης Κήποι.

Για την παράμετρο fAPAR, η μικρότερη τιμή που καταγράφηκε για την περιοχή είναι 0,085 και αναφέρεται στον Ιανουάριο του 2010. Η μέγιστη τιμή είναι 0,848 και παρατηρείται τον Ιούνιο του 2004. Η μέση τιμή του fAPAR για την περιοχή είναι 0,466 και η τυπική απόκλιση 0,263 (Πίνακας 5). Όπως ο NDVI, το fAPAR παρουσιάζει επίσης ισχυρή εποχικότητα, με μέγιστες τιμές κατά τους θερινούς μήνες και ελάχιστες τιμές κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο (Γράφημα 11). Διπλές κορυφές ελάχιστων τιμών παρατηρούνται τους χειμώνες των 2003 – 2004, 2007 – 2008 και 2009 – 2010 (Γράφημα 10).



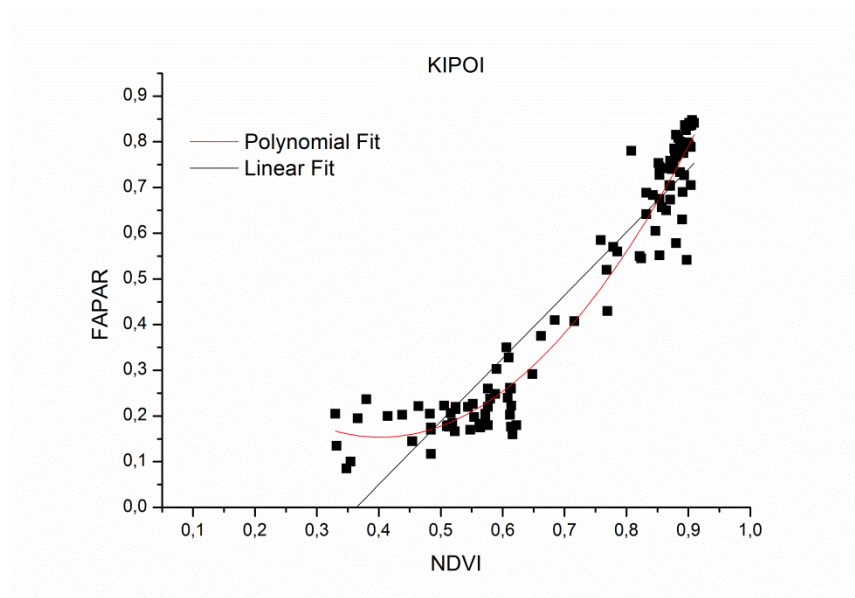
Γράφημα 11. Χρονοσειρά fAPAR ανά έτος, για την περιοχή μελέτης Κήποι.

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 11, γενικά, οι τιμές του fAPAR κυμαίνονται περίπου στο 0,2 από τον Ιανουάριο έως το Μάρτιο ή τον Απρίλιο, αναλόγως τη χρονιά, και στη συνέχεια έχουν μια γραμμική ανοδική πορεία έως τις αρχές Μαΐου. Εξαιρέση σε αυτό αποτελούν τα έτη 2008 και 2010. Συγκεκριμένα, για το έτος 2008, ενώ η καμπύλη ξεκινά περίπου στο 0,2 τον Ιανουάριο με ελαφριά ανοδική κλίση έως τον Φεβρουάριο, στη συνέχεια μειώνεται περίπου στο 0,1 μέχρι τον Απρίλιο όπου ξεκινάει πια να αυξάνει γραμμικά έως τις αρχές Μαΐου, όπως και για τα υπόλοιπα έτη. Για το έτος 2010, η καμπύλη ξεκινά από περίπου 0,1 τον Ιανουάριο, για να φτάσει περίπου στο 0,2 το Φεβρουάριο και να διατηρήσει αυτή την τιμή έως το Μάρτιο, όπου θα αρχίσει να αυξάνει σχεδόν γραμμικά έως το Μάιο, όπως και για τα υπόλοιπα έτη. Μετά το Μάιο και μέχρι τον Ιούλιο οι τιμές αυξάνουν περίπου μέχρι το 0,8 και συνεχίζουν με ελαφριά πτωτική τάση έως τον Οκτώβριο (με ποικίλες ελαφρές

διακυμάνσεις, αναλόγως τη χρονιά), όπου θα ξεκινήσουν να μειώνονται γραμμικά έως το Νοέμβριο περίπου μέχρι το 0,2, ενώ για τα περισσότερα έτη, η πτώση θα συνεχιστεί έως το Δεκέμβριο μέχρι το 0,1. Για το έτος 2004, παρατηρείται μια απότομη πτώση στο 0,5 κατά τον Ιούλιο η οποία είτε οφείλεται σε εσφαλμένες τιμές των αρχικών δεδομένων, είτε σηματοδοτεί κάποιο ακραίο γεγονός που έλαβε χώρα εκείνη την περίοδο στην περιοχή (π.χ. πυρκαγιά).

Γενικά, ο NDVI δείχνει να εμφανίζει μεγαλύτερη ομοιογένεια μεταξύ των ετών, σε σχέση με τον fAPAR, οι καμπύλες του οποίου παρουσιάζουν εντονότερες διαφοροποιήσεις από έτος σε έτος, όπως φαίνεται στα Γραφήματα 9 και 11.

Η σχέση μεταξύ των NDVI και fAPAR φαίνεται να είναι ισχυρή για το δασικό οικοσύστημα *Quercus sp.* Η γραμμική σχέση παρουσιάζεται ισχυρή, με τιμή 0,89 και ακόμα πιο ισχυρή είναι η μη-γραμμική/ πολυωνυμική σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων, με τιμή 0,95 (Πίνακας 6, Γράφημα 12).



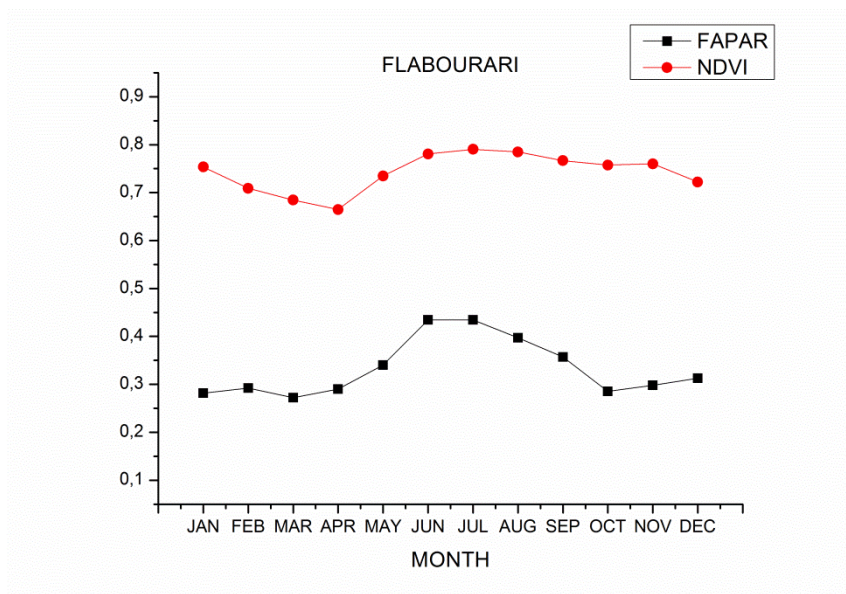
Γράφημα 12. Σχέση (γραμμική και πολυωνυμική) μεταξύ των NDVI και fAPAR για την περιοχή μελέτης Κήποι.

Γενικά, το ετήσιο μοτίβο των δύο μελετώμενων παραμέτρων για το δασικό οικοσύστημα δρυός παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με τα τρία δασικά οικοσυστήματα οξιάς (*fagus sylvatica*). Οι καμπύλες τους ακολουθούν σχήμα καμπάνας και η ανάλυση συσχέτισης έδωσε παρόμοια αποτελέσματα τόσο για τη γραμμική, όσο και για την πολυωνυμική σχέση μεταξύ των NDVI και fAPAR. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προαναφερθείσα παρατήρηση αφορά περισσότερο τις περιοχές του Νυμφαίου και του Μετσόβου από ότι αυτήν των Βαρδουσίων, σε σχέση με την περιοχή των Κήπων. Αυτό είναι πιθανό να εξηγείται από τη γεωγραφική θέση (γεωγραφικό πλάτος), αφού η περιοχή μελέτης των Βαρδουσίων βρίσκεται πολύ νοτιότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις περιοχές (Εικόνα 9). Η ομοιότητα αυτή μεταξύ των μοτίβων, εξηγείται πιθανά από αιτίες που σχετίζονται με τις οικοφυσιολογικές παραμέτρους και τη φαινολογία των δύο ειδών. Πράγματι, τα είδη *Fagus sylvatica* και *Quercus sp.* (*Quercus cerris* και *Quercus frainneto*), όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι φυλλοβόλα δέντρα, με θερινό κύκλο ανάπτυξης και άνθιση κατά τους μήνες Απρίλιο – Μάιο. Η περίοδος ωρίμανσης είναι παρόμοια μεταξύ των *Quercus frainneto* (Σεπτέμβριος – Νοέμβριος) και *Fagus sylvatica* (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος) ενώ για το είδος *Quercus cerris*, η περίοδος ωρίμανσης είναι επίσης παρόμοια με αυτήν του *Fagus sylvatica*, με τη διαφορά ότι ακολουθεί διετή κύκλο, ενώ για τα δύο άλλα είδη ο κύκλος ωρίμανσης είναι μονοετής.

Φλαμπουράρι

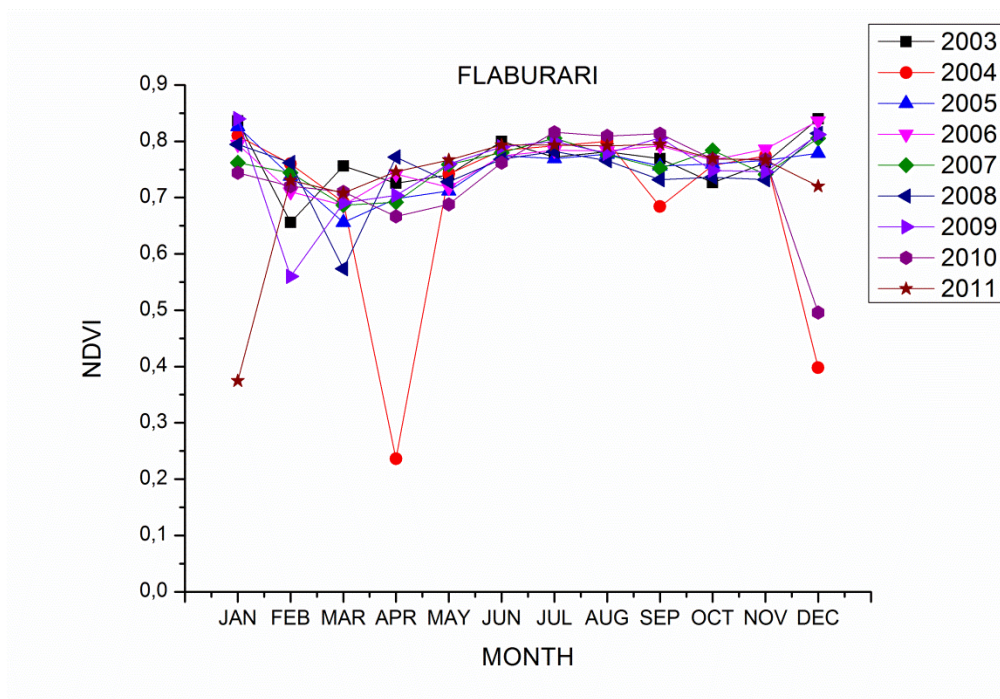
Το γεγονός ότι η μαύρη πεύκη (*Pinus nigra*) είναι ένα δέντρο αειθαλές, έχει ως αποτέλεσμα τα επίπεδα του NDVI να αποτυπώνονται σε ένα μοτίβο σχετικά σταθερό κατά τη διάρκεια του έτους, με μια μικρή άνοδο τον Απρίλιο και μια μικρή

πτώση το Νοέμβριο, όπως φαίνεται στο Γράφημα 13. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο NDVI, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ένας δείκτης που μετρά την πυκνότητα της βλάστησης και σε πολύ μικρότερο βαθμό σχετίζεται με την υγεία της. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα του NDVI για ένα θόλο βλάστησης αειθαλών ειδών, αναμένεται να μην παρουσιάζουν ιδιαίτερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους. Παρόλα αυτά, στο ετήσιο μοτίβο γίνεται διακριτή μια ελαφριά άνοδος που ξεκινάει τον Απρίλιο και διαρκεί μέχρι τον Ιούλιο και μία χαρακτηριστική ελαφριά πτώση που ξεκινάει το Νοέμβριο και διαρκεί έως τον Απρίλιο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό, σε πρώτο επίπεδο είναι πιθανό να οφείλεται σε παράγοντες που αφορούν τις φαινολογικές φάσεις της βλάστησης (έκπτυξη, γήρας κλπ.). Σε δεύτερο επίπεδο, οι διακυμάνσεις αυτές είναι πιθανό να οφείλονται στην ύπαρξη μικρότερων πληθυσμών φυλλοβόλων ειδών στην περιοχή μελέτης, (π.χ. *Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.), των οποίων η ανάπτυξη και η απόρριψη των φύλλων επηρεάζουν τη συνολική απόκριση του θόλου βλάστησης, όπως αυτή μελετάται μέσω των τιμών του NDVI.

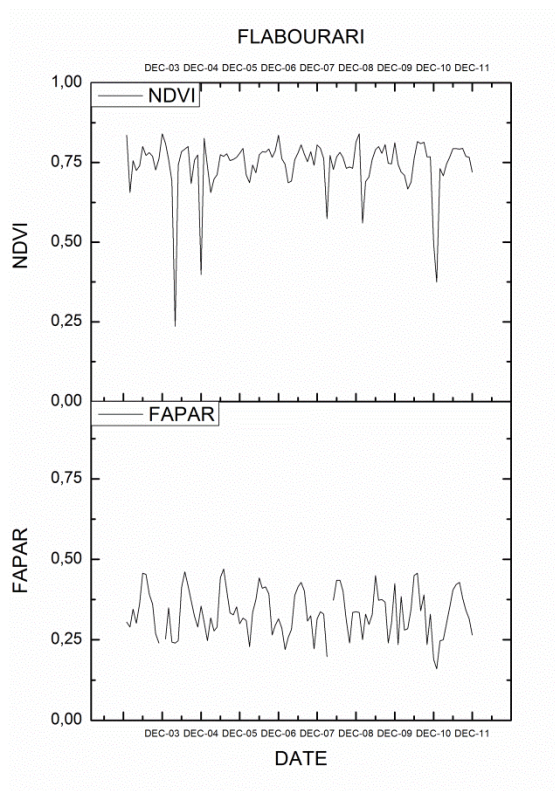


Γράφημα 13. Μέσος όρος των μηνιαίων τιμών όλων των ετών των NDVI και fAPAR (γενικό μοτίβο διακύμανσης των NDVI και fAPAR για τα 9 χρόνια της περιόδου μελέτης), για την περιοχή μελέτης Φλαμπουράρι.

Έτσι, ο NDVI ξεκινάει περίπου στο 0,6 – 0,7 τον Απρίλιο και συνεχίζει να αυξάνεται περίπου μέχρι το 0,7 – 0,8 μέχρι τον Ιούνιο και παραμένει περίπου σε αυτά τα επίπεδα μέχρι το Νοέμβριο και στο σημείο αυτό οι τιμές του ξεκινούν να παρουσιάζουν έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ των ετών, έως το Απρίλιο. Έντονες πτώσεις των τιμών παρατηρούνται τον Απρίλιο και το Δεκέμβριο του 2004 και το Δεκέμβριο του 2010 (Γραφήματα 14 και 15).



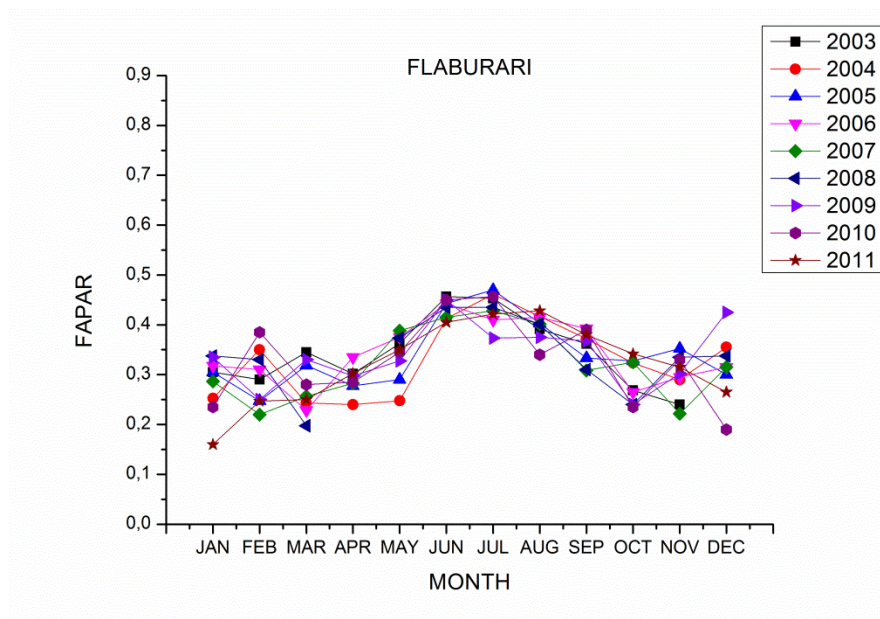
Γράφημα 14. Χρονοσειρά NDVI ανά έτος, για την περιοχή μελέτης Φλαμπουράρι.



Γράφημα 15. Πλήρεις χρονοσειρές των NDVI και fAPAR για την περιοχή μελέτης Φλαμπουράρι.

Η μέγιστη τιμή του NDVI που καταγράφηκε στην περιοχή μελέτης «Φλαμπουράρι» είναι 0,84 και εντοπίζεται σε δύο διαφορετικές περιόδους, i) τον Δεκέμβριο του 2003 και ii) τον Ιανουάριο του 2009. Η ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε είναι 0,236 και αντιστοιχεί στον Απρίλιο του 2004. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση είναι 0,742 και 0,088 αντίστοιχα. Η μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης καταδεικνύει τη μικρή διασπορά των τιμών του NDVI, από το μέσο όρο τους (Πίνακας 5).

Σε αντίθεση με τον NDVI, το ετήσιο μοτίβο της παραμέτρου fAPAR ακολουθεί ελαφρώς σχήμα καμπάνας (Γράφημα 13). Οι τιμές ξεκινούν να αυξάνονται τους μήνες Μάρτιο – Απρίλιο από το 0,2 – 0,3 έως το 0,4 – 0,5 κατά τους μήνες Ιούνιο – Ιούλιο. Στη συνέχεια μειώνεται στα αρχικά του επίπεδα έως τον Οκτώβριο - Νοέμβριο, μετά το πέρας του οποίων, για τις περισσότερες χρονιές υπάρχει μία (και σε κάποιες περιπτώσεις 2) εκ νέου αύξηση – μικρότερη αυτή τη φορά – που λαμβάνει χώρα μέσα σε έναν από τους μήνες από Νοέμβριο έως Μάρτιο, γεγονός που αποτυπώνεται στις διπλές και τριπλές κορυφές μεγίστων στην καμπύλη του fAPAR (Γραφήματα 15 και 16).

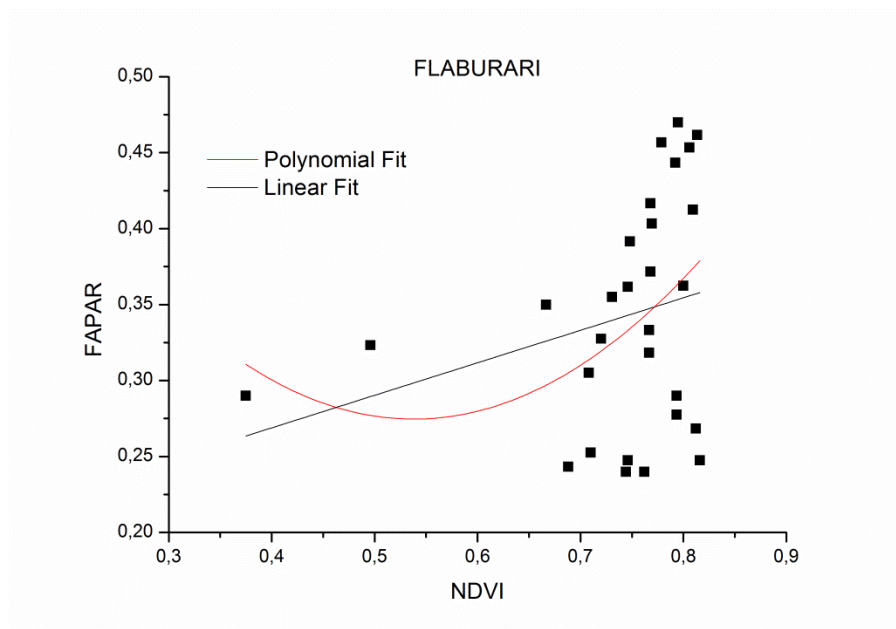


Γράφημα 16. Χρονοσειρά fAPAR ανά έτος, για την περιοχή μελέτης Φλαμπουράρι.

Η μέγιστη τιμή του fAPAR που καταγράφηκε στην περιοχή μελέτης «Φλαμπουράρι» είναι 0,47, η ελάχιστη 0,16, η μέση τιμή 0,334 και η τυπική απόκλιση 0,072. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή του fAPAR σε αυτήν την περιοχή είναι η μικρότερη μέγιστη τιμή μεταξύ των πέντε μελετώμενων περιοχών και όπως φαίνεται και από τη μέση τιμή, οι τιμές fAPAR δεν ήταν υψηλές, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιοχές. Όπως προέκυψε για τον NDVI, έτσι και για την παράμετρο fAPAR, υπάρχει μικρή διασπορά των τιμών από το μέσο όρο τους, όπως φαίνεται από τη χαμηλή τιμή της τυπικής απόκλισης (Πίνακας 5).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ των NDVI και fAPAR (Πίνακας 6, Γράφημα 17). Τόσο η γραμμική, όσο και η πολυωνυμική προσέγγιση είναι πολύ κοντά στο μηδέν (0,04 και 0,05 αντίστοιχα), που σημαίνει ότι οι δύο μελετώμενοι παράμετροι είναι ασυσχέτιστοι για την περιοχή μελέτης του Φλαμπουραρίου, γεγονός που δε συναντάται σε κανένα από τα υπόλοιπα

μελετώμενα οικοσυστήματα. Γίνεται φανερό πως η αιτία έγκειται στο γεγονός ότι το μελετώμενο οικοσύστημα του Φλαμπουραρίου είναι το μόνο από τα συνολικά έξι μελετώμενα οικοσυστήματα, στο οποίο το κυρίαρχο είδος βλάστησης είναι αιθαλές (το είδος *Phlomis fruticosa* στην περιοχή του Λούρου είναι ημιφυλλοβόλο). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές του NDVI να παραμένουν σε σχετικά σταθερά επίπεδα με ελαφρές μόνο διακυμάνσεις, τη στιγμή που η παράμετρος fAPAR, παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, αφού το fAPAR είναι περισσότερο συνδεδεμένο με τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και την παραγωγικότητα της βλάστησης.

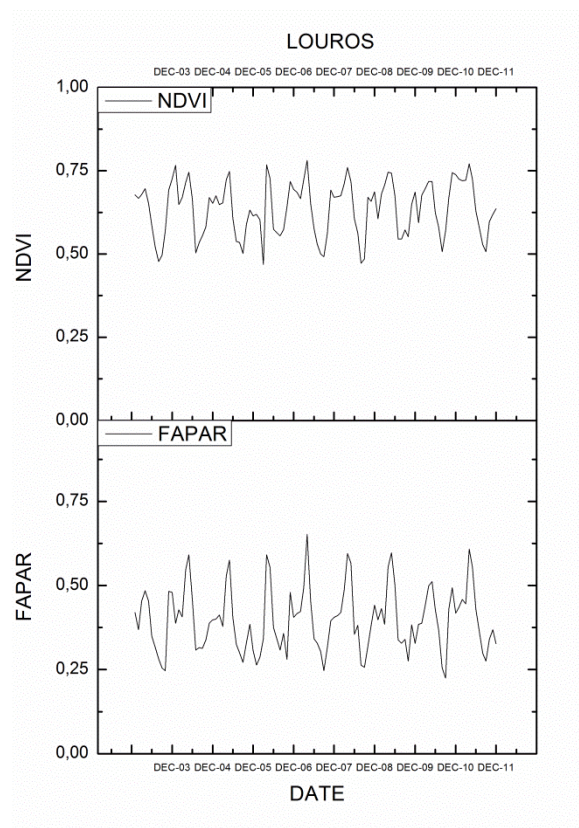


Γράφημα 17. Σχέση (γραμμική και πολυωνυμική) μεταξύ των NDVI και fAPAR για την περιοχή μελέτης Φλαμπουράρι.

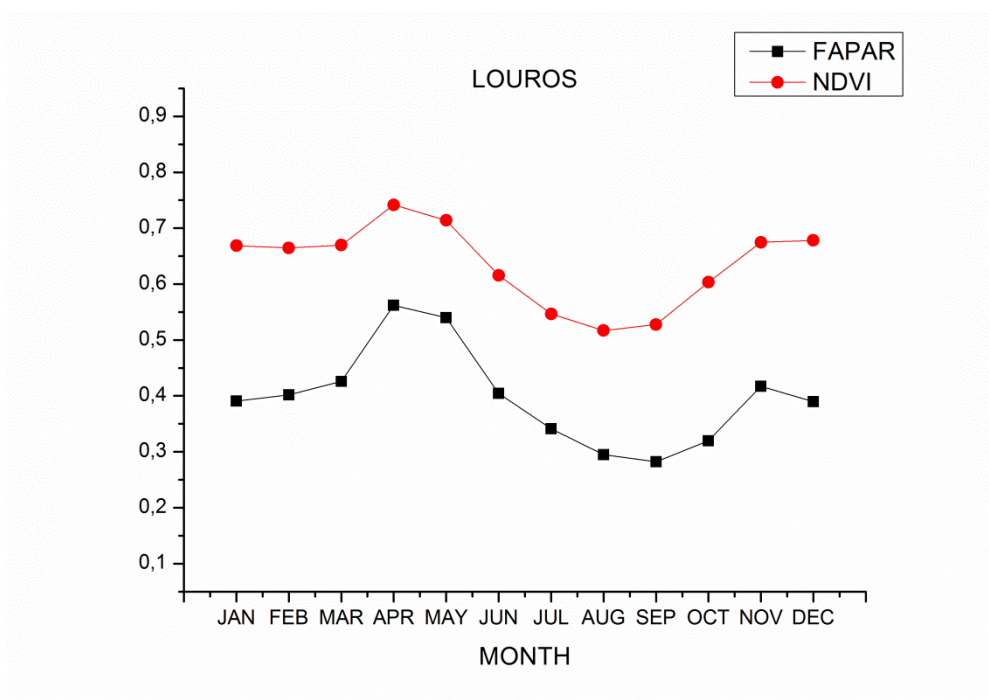
Λούρος

Η φωτοσυνθετική δραστηριότητα του *Phlomis fruticosa* παρουσιάζει εξάρσεις κατά τις ευνοϊκές για αυτό περιόδους του έτους (άνοιξη και φθινόπωρο), ενώ μειώνεται κατά την περίοδο της ξηρασίας (Αύγουστος – Σεπτέμβριος) (Καραμπουρνιώτης και Λιακόπουλος, 2009). Κατά τη διάρκεια της ζεστής και ξηρής

περιόδου του καλοκαιριού, η βιομάζα των φύλλων μειώνεται δραστικά και επομένως εμφανίζονται κενά στο θόλο βλάστησης και μέρη του εδάφους μένουν ακάλυπτα (Stagakis et al. 2010). Αυτό το μοτίβο εποχικότητας αποτυπώνεται στις καμπύλες των NDVI και fAPAR, όπως φαίνεται στο Γράφημα 18. Στο γενικό μοτίβο των τιμών τους, τα NDVI και fAPAR, για το φυσικό οικοσύστημα ασφάκας στην περιοχή μελέτης «Λούρος», για τη συνολική περίοδο μελέτης, φαίνεται να ακολουθούν απόλυτα το ένα το άλλο (Γράφημα 19).

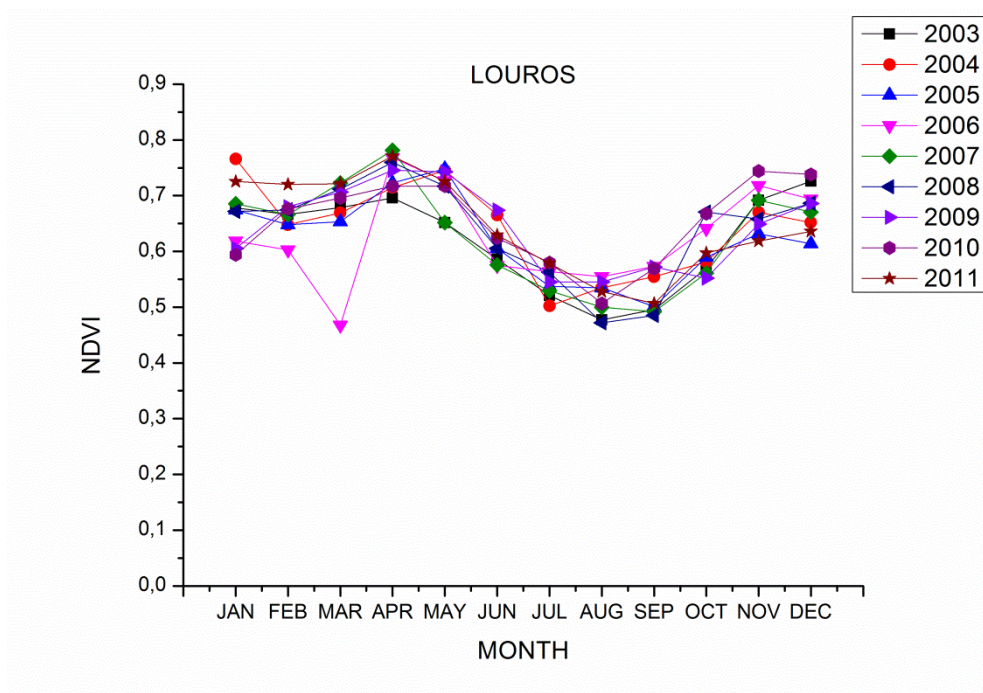


Γράφημα 18. Πλήρεις χρονοσειρές των NDVI και fAPAR για την περιοχή μελέτης Λούρος.

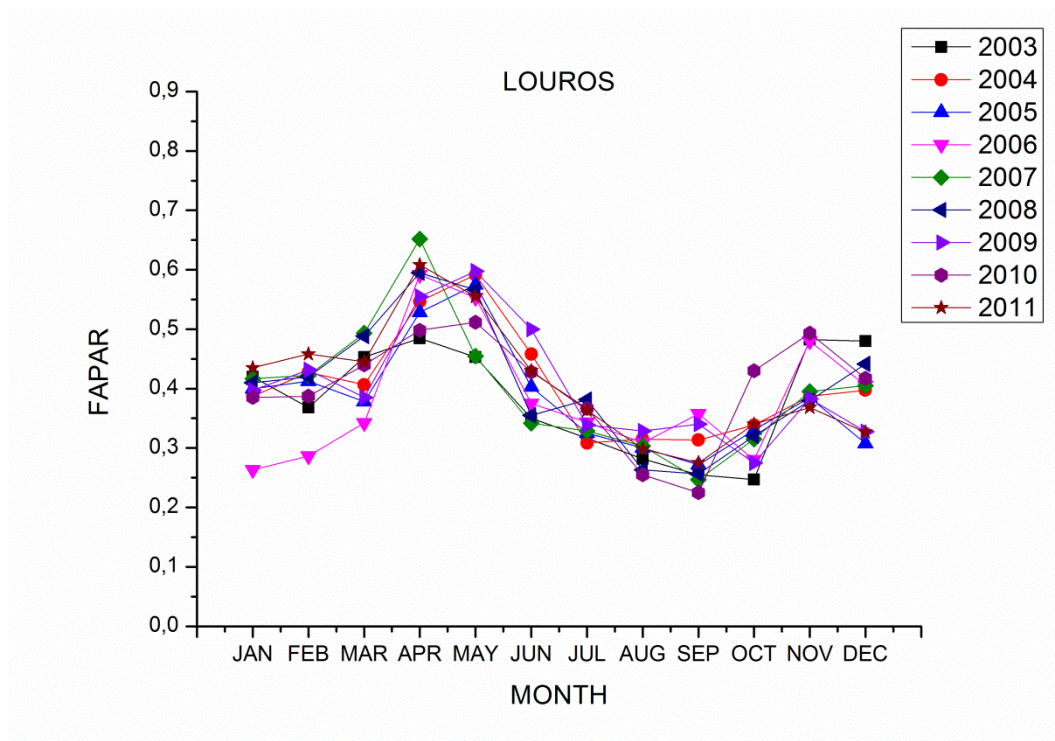


Γράφημα 19. Μέσος όρος των μηνιαίων τιμών όλων των ετών των NDVI και fAPAR (γενικό μοτίβο διακύμανσης των NDVI και FAPAR για τα 9 χρόνια της περιόδου μελέτης), για την περιοχή μελέτης Λούρος.

Επιπλέον, όπως γίνεται φανερό στα Γραφήματα 20 και 21, οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν μεταξύ των ετών, τόσο ο δείκτης NDVI, όσο και η παράμετρος fAPAR είναι ελάχιστες έως αμελητέες και αφορούν περισσότερο τις απόλυτες τιμές τους, παρά το ετήσιο μοτίβο τους.



Γράφημα 20. Χρονοσειρά NDVI ανά έτος, για την περιοχή μελέτης Λούρος.

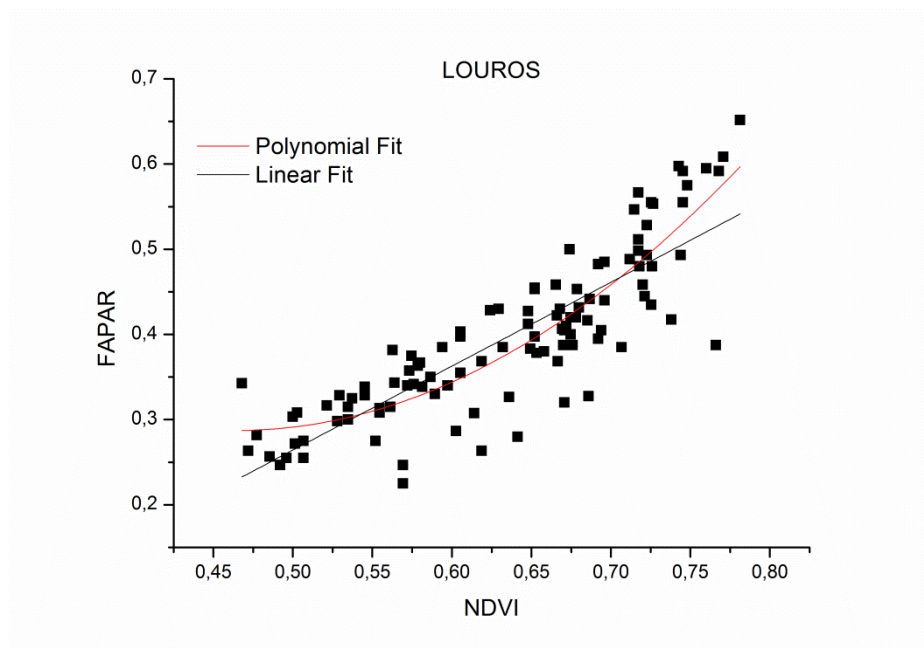


Γράφημα 21. Χρονοσειρά fAPAR ανά έτος, για την περιοχή μελέτης Λούρος.

Για τον δείκτη NDVI η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε είναι ίση με 0,781 και αντιστοιχεί στον Απρίλιο του 2007. Η ελάχιστη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στο Μάρτιο του 2006 είναι ίση με 0,468, μια τιμή αρκετά υψηλή, η οποία δείχνει ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις ή απότομες εναλλαγές μεταξύ των τιμών κάτι που φαίνεται επίσης και από την τιμή της τυπικής απόκλισης, η οποία ισούται με 0,081 και επιβεβαιώνει τη μικρή διασπορά των τιμών από το μέσο όρο τους. Η μέση τιμή είναι ίση με 0,635 (Πίνακας 5).

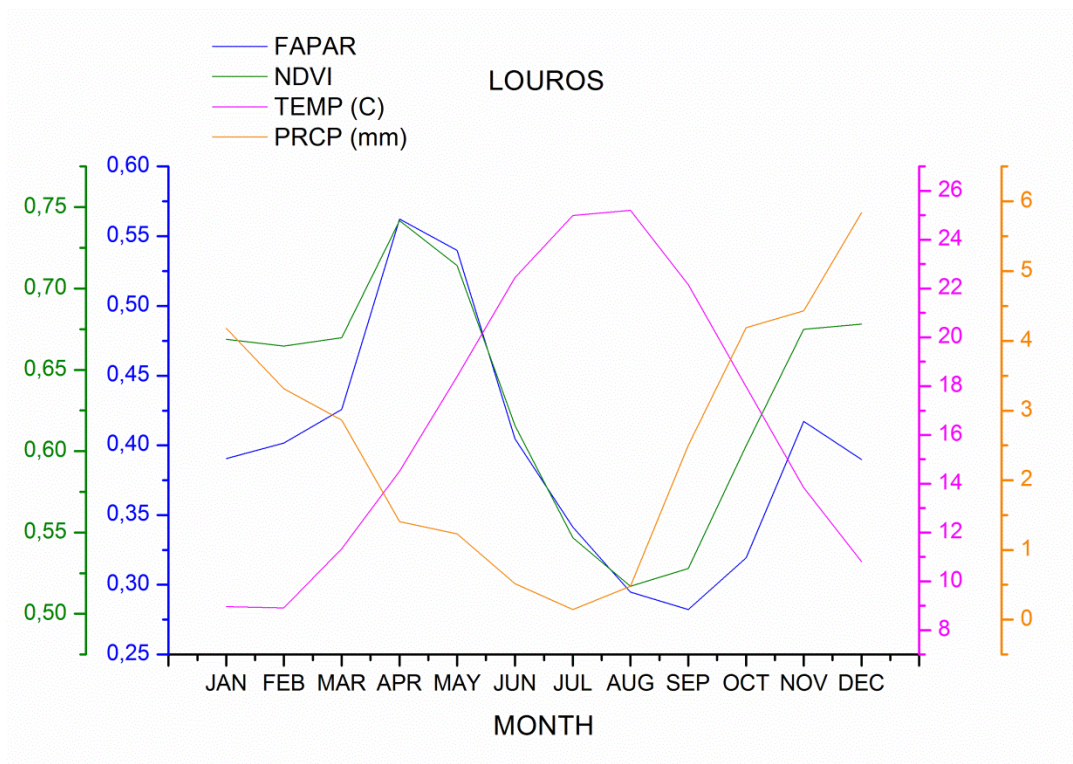
Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις ισχύουν και για τα περιγραφικά στατιστικά της παραμέτρου fAPAR, για την οποία η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε ισούται με 0,652 και αναφέρεται στον Απρίλιο του 2007, όπως και η μέγιστη τιμή του NDVI. Η ελάχιστη τιμή είναι 0,225 και αναφέρεται στο Σεπτέμβριο του 2010. Η μέση τιμή είναι 0,397 και η τυπική απόκλιση 0,095 (Πίνακας 5).

Η σχέση μεταξύ των NDVI και fAPAR παρουσιάζεται ισχυρή για το μελετώμενο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*, όσον αφορά τη γραμμική τους σχέση ($r^2 = 0,71$) και ελάχιστα περισσότερο την πολυωνυμική σχέση τους ($r^2 = 0,75$) (Πίνακας 6, Γράφημα 22).



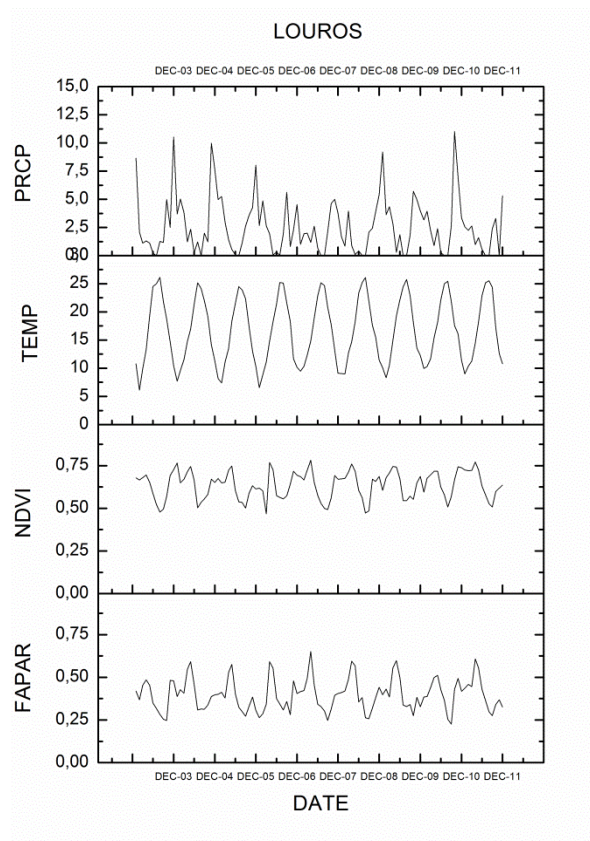
Γράφημα 22. Σχέση (γραμμική και πολυωνυμική) μεταξύ των NDVI και FAPAR για την περιοχή μελέτης Λούρος.

Στο Γράφημα 23 φαίνεται η διακύμανση των NDVI και fAPAR σε σχέση με τη θερμοκρασία επιφανείας και τα κατακρημνίσματα. Η βροχόπτωση δείχνει να επηρεάζει το οικοσύστημα ασφάκας, όπως φαίνεται από την απόκριση των NDVI και fAPAR σε αυτήν. Συγκεκριμένα, όταν τα κατακρημνίσματα αρχίζουν να αυξάνουν τον Ιούλιο, το οικοσύστημα φαίνεται να ανταποκρίνεται σε αυτόν τον παράγοντα τον Αύγουστο με Σεπτέμβριο, έναν με δύο μήνες μετά, όπως μαρτυρά η πορεία των NDVI και fAPAR. Τα κατακρημνίσματα ξεκινούν να μειώνονται τον Ιανουάριο και μέχρι τον Ιούλιο, γεγονός που επίσης ακολουθούν ο NDVI και το fAPAR, με καθυστέρηση τριών μηνών, δηλαδή μέχρι το Απρίλιο και η πτώση τους συνεχίζεται μέχρι τον Αύγουστο.



Γράφημα 23. Μέση ετήσια διακύμανση, για τη συνολική περίοδο μελέτης, των NDVI, fAPAR, της θερμοκρασίας και των κατακρημνισμάτων για την περιοχή μελέτης του Λούρου.

Η θερμοκρασία φαίνεται να ακολουθεί πορεία αντιστρόφως ανάλογη αυτής των NDVI και fAPAR, γεγονός που καταδεικνύει ότι η περίοδος ανάπτυξης του *Phlomis fruticosa* λαμβάνει χώρα όταν η θερμοκρασία είναι μέτρια προς χαμηλή, περίπου στους 10 – 14 °C. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που καταγράφηκε για την περιοχή μελέτης του Λούρου, είναι 26,1 °C και αντιστοιχεί στον Αύγουστο του 2003, ενώ η ελάχιστη είναι 6,1 και αντιστοιχεί στο Φεβρουάριο του 2003. Η μέγιστη τιμή των κατακρημνισμάτων παρατηρείται τον Οκτώβριο του 2010 και είναι ίση με 11 mm. Στο Γράφημα 24, παρουσιάζονται οι πλήρεις χρονοσειρές των μετεωρολογικών παραμέτρων, μαζί με τις χρονοσειρές των NDVI και fAPAR για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* στην περιοχή του Λούρου.



Γράφημα 24. Πλήρεις χρονοσειρές των NDVI, fAPAR, θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων για την περιοχή μελέτης του Λούρου.

6. Συζήτηση – συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα της οικοφυσιολογικής μελέτης τεσσάρων διαφορετικών ειδών βλάστησης, για έξι φυσικά οικοσυστήματα στην Ελλάδα. Οι χρονοσειρές των NDVI και fAPAR, οι οποίες εξήχθησαν από δορυφορικά δεδομένα MERIS/ENVISAT, καλύπτουν μία περίοδο εννέα ετών, από τον Ιανουάριο του 2003 έως το Δεκέμβριο του 2011. Οι τιμές των NDVI και fAPAR παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα, με χαρακτηριστική άνοδο και πτώση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου, γεγονός που συμπίπτει με τις περιόδους έκπτυξης και ωρίμανσης των φύλλων αντίστοιχα. Εξαίρεση σε αυτό, αποτελεί το οικοσύστημα ασφάκας (*Phlomis Fruticosa*) στην περιοχή μελέτης του Λούρου, το οποίο ακολουθεί ένα περισσότερο εξατομικευμένο εποχικό μοτίβο ανάπτυξης, το οποίο αποδίδεται στα οικοφυσιολογικά χαρακτηριστικά του και περιγράφεται αναλυτικά στο σχετικό κεφάλαιο.

Οι τιμές των NDVI και fAPAR παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση όσον αφορά τα φυλλοβόλα οικοσυστήματα της παρούσας μελέτης (*Fagus sylvatica*, *Quercus sp.* και το ημιφυλλοβόλο *Phlomis fruticosa*), ενώ παρουσιάζονται ασυσχέτιστα για το αειθαλές *Pinus nigra*. Παρόλο που στη βιβλιογραφία, ο NDVI και ο fAPAR συχνά παρουσιάζουν ισχυρή γραμμική σχέση (Sellers et al. 1992; Kodani et al. 2002; Di Bella et al. 2004; Fensholt et al. 2004), σε αυτή τη μελέτη, (για όλα τα οικοσυστήματα εκτός του δασικού οικοσυστήματος μαύρης πεύκης), η μη – γραμμική/ πολυωνυμική τους σχέση παρουσιάζεται ελαφρώς υψηλότερη, σε σχέση με τη γραμμική σχέση τους.

Για τα οικοσυστήματα των περιοχών μελέτης «Νυμφαίο» και «Λούρος», ο συσχετισμός των NDVI και fAPAR με τους μετεωρολογικούς παράγοντες της θερμοκρασίας επιφανείας και των κατακρημνισμάτων, έδειξε ότι οι τιμές των NDVI και fAPAR στο οικοσύστημα οξιάς (*Fagus sylvatica*) στο Νυμφαίο επηρεάζεται και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ δείχνει να μην επηρεάζεται άμεσα από τα επίπεδα των κατακρημνισμάτων. Αντίθετα, οι τιμές των NDVI και fAPAR στο οικοσύστημα ασφάκας (*Phlomis fruticosa*) στο Λούρο δείχνουν να συσχετίζονται περισσότερο με τις τιμές των κατακρημνισμάτων, ενώ ο εποχικός κύκλος ανάπτυξής τους δεν ακολουθεί άνοδο και πτώση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου αντίστοιχα και συνεπώς δείχνει να επηρεάζεται λιγότερο από την άνοδο και πτώση της θερμοκρασίας.

Τα γενικά χαρακτηριστικά του κάθε οικοσυστήματος, όπως αυτά προέκυψαν από την παρούσα μελέτη συνοψίζονται στον Πίνακα 7.

Περιοχή μελέτης	Νυμφαίο	Κήποι	Φλαμπουράρι	Μέτσοβο	Λούρος	Βαρδούσια
Είδος βλάστησης	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus sp.</i>	<i>Pinus nigra</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Phlomis fruticosa</i>	<i>Fagus sylvatica</i>
Mean NDVI	0,65	0,695	0,742	0,652	0,635	0,632
Min. NDVI	0,204	0,148	0,236	0,072	0,468	0,212
Max. NDVI	0,92	0,909	0,84	0,908	0,781	0,896
Mean fAPAR	0,482	0,466	0,334	0,452	0,397	0,412
Min. fAPAR	0,07	0,085	0,16	0,11	0,225	0,07
Max. fapar	0,905	0,848	0,47	0,878	0,652	0,858
Μήνας έκπτυξης	Απρίλιος	Απρίλιος	Απρίλιος	Απρίλιος	Μάρτιος και Σεπτέμβριος	Απρίλιος
Μήνας πτώσης/γήρανσης	Σεπτέμβριος	Σεπτέμβριος	Ιούλιος - Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Απρίλιος και Νοέμβριος	Σεπτέμβριος

Πίνακας 7. Συνοπτικός πίνακας χαρακτηριστικών των μελετώμενων οικοσυστημάτων.

Μελλοντικές εργασίες:

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η επέκταση της παρούσας μελέτης μελλοντικά, με τη χρήση και τη συσχέτιση επιπλέον παραμέτρων βλάστησης (π.χ. LAI), ή και των ήδη μελετώμενων παραμέτρων, μέσω εναλλακτικών δεκτών (π.χ. MODIS, AVHRR) με στόχο τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων.

7. Ευχαριστίες

Πολλοί είναι οι άνθρωποι και οι παράγοντες που συνέβαλαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω, ξεκινώντας από τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ισαάκ Παρχαρίδη, του οποίου τα μαθήματα με ενέπνευσαν να επιλέξω τον τομέα της Τηλεπισκόπησης, και ο οποίος ανέλαβε τη συνεπίβλεψη της παρούσας εργασίας. Ο κύριος Παρχαρίδης υποστήριξε τις επιλογές μου και με βοήθησε στην υλοποίηση των στόχων μου, φέρνοντάς με σε επαφή με τους ανθρώπους του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΑΔΕΤ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Εκεί, απασχολήθηκα για ένα χρονικό διάστημα δύο μηνών, στα πλαίσια της πρακτικής άσκησης του προγράμματος σπουδών του τμήματος Γεωγραφίας, αρχικά υπό την ευθύνη του Ερευνητή Βασίλη Αμοιρίδη, τον οποίο ευχαριστώ θερμά. Ο τελευταίος, με έφερε σε επαφή με τη συνάδελφο του Όλγα Συκιώτη, Εντεταλμένη Ερευνήτρια του ΙΑΑΔΕΤ. Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να αφιερώσω λίγα παραπάνω λόγια για τη συγκεκριμένη γυναίκα, την οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου για τις μοναδικές ευκαιρίες που μου προσφέρθηκαν μέσα από τη συνεργασία μας. Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μου ανατέθηκε από την κυρία Όλγα Συκιώτη, η οποία ανέλαβε τη συνεπίβλεψή της και με υποστήριξε στο μέγιστο βαθμό. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας, απέκτησα ερευνητική εμπειρία, ανέπτυξα την ικανότητά της επιστημονικής τεκμηρίωσης των εργασιών μου και μου δόθηκε η ευκαιρία να είμαι σε καθημερινή επαφή με το αντικείμενο της Τηλεπισκόπησης, για ένα διάστημα 18

μηνών. Στην κυρία Όλγα Συκιώτη οφείλω επίσης την αποδοχή μέρους της παρούσας μελέτης προς δημοσίευση, στο 10^ο Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας. Για όλα τα παραπάνω, την ευχαριστώ θερμά και ειλικρινά, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις πολύτιμες συμβουλές της και τη συνεχή υποστήριξή της.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά το μεταδιδακτορικό ερευνητή Σταύρο Σταγάκη από το τμήμα Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων για την πολύτιμη και πρόθυμη βοήθειά του, με τις εξειδικευμένες γνώσεις του σε θέματα οικολογίας και φυσιολογίας των φυτών, καθώς επίσης και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ίδιου τμήματος, Άρη Κυπαρίσση για την εξ' αποστάσεως επόπτευση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σε όλους τους καθηγητές μου από το Τμήμα Γεωγραφίας, για την εμπειρία και τη γνώση που μου προσέφεραν σε ποικίλους τομείς της Γεωγραφικής επιστήμης, αποτελώντας παράλληλα άριστα παραδείγματα ήθους και ευπρέπειας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ξεχωριστά τον Επίκουρο Καθηγητή Πέτρο Κατσαφάδο, για την προθυμία του να με βοηθήσει κατά την αναζήτηση μετεωρολογικών δεδομένων για την παρούσα εργασία.

Φτάνοντας στο τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για το πολύτιμο αγαθό της εκπαίδευσης, το οποίο μου προσέφερε. Ένα ακόμα “ευχαριστώ”, σε όσους με στήριξαν ηθικά και μου συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω του φορείς, οργανισμούς και υπηρεσίες παροχής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, και συγκεκριμένα την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) και το Flemish Institute for Technological Research (VITO) για την παροχή των δορυφορικών δεδομένων ENVISAT MERIS

S10, καθώς επίσης και το Joint Research Centre, για την ανάπτυξη του αλγορίθμου εξαγωγής των παραμέτρων βλάστησης (MGVI) για τα προϊόντα MERIS L2. Για την παροχή των μετεωρολογικών δεδομένων, οφείλω να ευχαριστήσω το National Climatic Data Center του NOAA.

8. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T. and Hatfield J. L., 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76, 300-306.

Barret F. and Weiss M., 2012. Geoland2: Towards an Operational GMES land Monitoring Core Service: BioPar Methods Compendium LAI, FAPAR, FCOVER, NDVI, BP-RP-BP038, Issue 1.51, Gio-GL Lot1, GMES Initial Operations Date Issued: 28.03.2013, Issue: I1.00, 48p.

Bergmeier E. and Dimopoulos P., 2001. *Fagus sylvatica* forest vegetation in Greece: Syntaxonomy and gradient analysis. *Journal of Vegetation Science*, 12, 109-126.

Biondi F., 1992. Development of a tree-ring network for the Italian Peninsula. *Tree Ring Bulletin*, 52, 15–29.

Chimnarong V., Rethinam S., Seechan M. and Pliansinchai U. 2012. Opportunity for application of remote sensing and gis approach for sugarcane production estimate in Thailand. The 33rd Asian Conference on Remote Sensing.

Cufar K., Prislan P., de Luis M. and Gricar J., 2008. Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees*, 22, 749-748.

- Dash J., Jeganathan C., Atkinson P. M., 2010. The use of MERIS Terrestrial Chlorophyll Index to study spatio-temporal variation in vegetation phenology over India. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1388–1402.
- Di Bella C. M., Paruelo J. M., Becerra J. E., Bacour C. and Baret F., 2004. Effect of senescent leaves on NDVI based estimates of fAPAR: Experimental and modeling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 23, 5415-5427.
- Di Filippo A., Biondi F., Cufar K., De Luis M., Grabner M., Maugeri M., Presutti Saba E., Schirone B. and Piovesan G., 2007. Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography* 34, 1873–1892.
- Dittmar C. and Elling W., 2006. Phonological phases of common beech (*Fagus sylvatica* L.) and their dependence on region and altitude in Southern Germany. *European Journal of Forest Research*, 125, 181 – 188.
- Eckstein D., 2004. Change in past environments-secrets of the tree hydrosystem. *New Phytologist*, 163, 1–4.-
- Fensholt R., Sandholt I. and Schultz Rasmussen M., 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote sensing of Environment*, 91, 490-507.
- Gibson P. (2000). *Introductory Remote Sensing: Principles and concepts*. London: Rootledge.
- Gitelson A., Vina A., Ciganda V., Donald C. Rundquist D., and Arkebauer T. 2005. *Geophysical Research Letters*, 32, 108403, doi:10.1029/2005gl022688.

Gobron N.

Gobron N., 2010. Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) FAPAR and Rectified Channels over Terrestrial Surfaces. Institute for Environment and Sustainability, Document Number: S3-L2-SD-03-C13-JRC-ATBD FAPAR v2.0-100701

Gobron N. and Verstraete M., 2009. Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR). GTOS Secretariat NRC, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Gordo O. and Sanz J. J., 2005. Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia*, 146, 484–495

Gutierrez E., 1988. Dendroecological study of *Fagus silvatica* L. in the Montseny Mountains (Spain). *Acta Oecologica*, 9, 301–309.

Jump A. S. and Peñuelas J., 2006. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters* 8, 1010– 1020.

Kerr J.T. and Ostrovsky M., 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 18, 6, 299-305.

Kodani E., Awaya Y., Tanaka K. and Matsumura N., 2002. Seasonal patterns of canopy structure, biochemistry and spectral reflectance in a broad-leaved deciduous *Fagus Crenata* canopy. *Forest Ecology and Management*, 167, 233-249.

Lebourgeois F., Breda N., Ulrich E. and Granier A., 2005. Climate-tree- growth relationship of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19, 385–401.

Lillesand T. and Kiefer R. (2000). Remote Sensing and Image Interpretation. USA: John Wiley & sons, Inc.

Martinez B., Camacho F., Verger A., Garcia-Haro F.J. and Gilabert M.A., 2013. Intercomparison and quality assessment of MERIS, MODIS and SEVIRI FAPAR products over the Iberian Peninsula. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21, 463–476.

Myneni R. B. and Williams D. L., 1994. On the Relationship between FAPAR and NDVI. Remote Sensing of Environment, 49, 200-211.

Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J. et al., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 300, 1560–1563.

Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., and Stenseth N.C., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology and Evolution, 20, 9, 503-510.

Piovesan G., Biondi F., Bernabei M., Di Filippo A., and Schirone B., 2005. Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network. Acta Oecologica, 27, 197–210.

Rozas V., 2001. Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. Annals of Forest Science, 58, 237–251

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. and Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III Final Report, Greenbelt Maryland US, 371p.

Sellers P. J., Berry J. A., Collatz G. J., Field C. B. and Hall E G., 1992. Canopy Reflectance, Photosynthesis, and Transpiration. III. A Reanalysis Using Improved Leaf Models and a New Canopy Integration Scheme. *Remote Sensing of Environment*, 42, 187-216.

Stagakis S., Markos N., Sykioti O. and Kyparissis A., 2014. Tracking seasonal changes of leaf and canopy light use efficiency in a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using field measurements and multi-angular satellite hyperspectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97, 138–151.

Stagakis S., Markos N., Sykioti O. and Kyparissis A., 2010. Monitoring canopy biophysical and biochemical parameters in ecosystem scale using satellite hyperspectral imagery: An application on a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using multiangular CHRIS/PROBA observations. *Remote Sensing of Environment*, 114, 977–994,

Stagakis S., Markos N., Levizou E. and Kyparissis A., 2007. Forest ecosystem dynamics using SPOT and MODIS satellite images, ESA SP-363, ENVISAT Symposium, April 2007, Montreux (Switzerland).

Sykioti O., Paronis D., Stagakis S. and Kyparissis A., 2011. Band Depth analysis of CHRIS/PROBA data for the study of a Mediterranean natural ecosystem. Correlations with Leaf optical properties and ecophysiological parameters. *Remote Sensing of Environment*, 115, 752–766.

Teillet P. M., Staenz K. and Williams D. J., 1997. Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices of Forested Regions. *Remote Sensing of Environment*, 61, 139-149.

Tsiripidis I., Bergmeier E. and Dimopoulos P., 2007. Geographical and ecological differentiation in Greek Fagus forest vegetation. *Journal of Vegetation Science*, 18, 743-750.

Zhang X., Friedl M., Schaaf C., Strahler A., Hodges J., Gao F., Reed B. and Huete A., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475.

Zurita – Milla R., Kaiser G., Clevers J., Schneider W. and Schaepman M., 2009. Downscaling time series of MERIS full resolution data to monitor vegetation seasonal dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1874–1885.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Καραμπουρνιώτης Γ. και Λιακόπουλος Γ. (2009). Οικοφυσιολογία Μεσογειακών Φυτών. Εργαστήριο Φυσιολογίας και Μορφολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονικής Βοτεχνολογίας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Καρτάλης Κ. και Φείδας Χ. (2006). Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Γκιούρδας, Αθήνα.

Μερτίκας Σ. (2006). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση εικόνας. Ίων, Αθήνα.

Μπαλούτσος Γ., Μπουρλέτσικας Α. και Καούκης Κ., 1996. Η Φαινολογία και οι Εφαρμογές της στο Περιβάλλον και στην Αλλαγή του Κλίματος.

Σταγάκης Σ., 2012. Αξιολόγηση και χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της δυναμικής χερσαίων οικοσυστημάτων, διδακτορική διατριβή, Τμήμα Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Εργαστήριο Βοτανικής.

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

 Natura 2000

<http://natura2000.eea.europa.eu/#>

 European Commission, FAPAR

<http://fapar.jrc.ec.europa.eu/Home.php>

 European Space Agency (ESA)

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Envisat

<http://earth.esa.int/instruments/meris/>

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-3-olci-wiki/->

[/wiki/Sentinel%20Three%20OLCI/Global+Vegetation+Index+\(FaPAR\)](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-3-olci-wiki/-/wiki/Sentinel%20Three%20OLCI/Global+Vegetation+Index+(FaPAR))

 US Geological Survey (USGS)

http://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php