

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΟΤΑΝΙΚΗΣ

**Αξιολόγηση και χρήση τεχνικών
τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της
δυναμικής χειρσαίων οικοσυστημάτων**

Σταύρος Σταγάκης
Βιοεπιστήμων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2012

Σταύρος Σταγάκης
Βιοεπιστήμων, B.Sc.

Αξιολόγηση και χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση
της δυναμικής χειρσαίων οικοσυστημάτων

Διδακτορική διατριβή

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του
Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Εργαστήριο Βοτανικής

Επιβλέπων Καθηγητής: Άρης Κυπαρίσσης
Επίκουρος Καθηγητής Βιολογίας και Τεχνολογίας
Φυτών του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και
Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Ημερομηνία παρουσίασης: 1 Ιουνίου 2012

Τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής



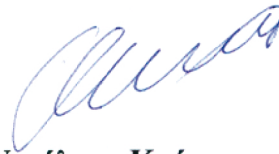
Ιφιγένεια Κεραμιτσόγλου
Εντεταλμένη Ερευνήτρια Γ'
Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών



Γεωργία Πετροπούλου
Επίκουρη Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Πατρών



Γεώργιος Γραμματικόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστημίου Πατρών



Νικόλαος Κούτσιας
Λέκτορας
Πανεπιστημίου Δυτικής Ελλάδας

Τα μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής



Ιωάννης Μανέτας
Καθηγητής
Πανεπιστημίου Πατρών



Όλγα Συκιώτη
Εντεταλμένη Ερευνήτρια Γ'
Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Ο Επιβλέπων



Αρης Κυπαρίσσης
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Στον αγώνα για ένα κόσμο ελεύθερο

Ο ήλιος ανεβαίνει, κατεβαίνει μέσα στο κρανίο μου.
Στο ένα μελίγγι μου ανατέλνει ο ήλιος, στο άλλο βασιλεύει ο ήλιος.

Τ' άστρα λάμπουν μέσα στο μυαλό μου, οι ιδέες, οι άνθρωποι και τα ζώα
βόσκουν μέσα στο λιγόχρονο κεφάλι μου,
τραγούδια και κλάματα γιομώνουν τα στρουφιχτά κοχύλια των αυτιών μου
και τρικυμίζουν μια στιγμή τον αγέρα·

σβήνει το μυαλό μου, κι όλα, ουρανός και γης, αφανίζονται.

Νίκος Καζαντζάκης
«Ασκητική»

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι αποτέλεσμα αναζητήσεων, συζητήσεων, μετρήσεων, αναλύσεων και πειραμάτων στα πεδία της οικοφυσιολογίας και της τηλεπισκόπησης. Ο μαγικός κόσμος των φυτών δεν θα είχε κεντρίσει το ενδιαφέρον μου αν δεν είχα την τύχη να παρακολουθήσω τα μαθήματα του επίκουρου καθηγητή Άρη Κυπαρίσση ως προπτυχιακός φοιτητής στο Τμήμα Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Ο ίδιος καθηγητής επίσης με εισήγαγε στο πεδίο της τηλεπισκόπησης και στα εντυπωσιακά επιτεύγματα της επιστήμης και της τεχνολογίας όσον αφορά την παρακολούθηση της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα. Ως επιβλέποντα καθηγητή μου, τον ευχαριστώ πολύ για την ατελείωτη υπομονή που έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, την ακούραστη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε σε κάθε στάδιο των εργασιών μου και τον ξεχωριστό τρόπο με τον οποίο μου μετέδωσε τις γνώσεις και την εμπειρία του.

Πολλά “ευχαριστώ” επίσης στην λέκτορα Έφη Λεβίζου, οι γνώσεις και ο χαρακτήρας της οποίας βοήθησαν καταλυτικά όχι μόνο σε διάφορα κομμάτια της διατριβής μου, αλλά στον συνολικό τρόπο εργασίας και ολοκλήρωσης της επιστημονικής ομάδας του Εργαστηρίου Βοτανικής του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών. Φυσικά, τίποτα δεν θα ήταν το ίδιο αν από το εργαστήριο έλειπε ο υποψήφιος διδάκτορας Νίκος Μάρκος με τον οποίο μοιραστήκαμε αξέχαστες εμπειρίες μετρήσεων πεδίου και στον οποίο οφείλω ένα μέρος των αποτελεσμάτων μου χάρη στο μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου που ανέπτυξε. Να ευχαριστήσω επίσης την Δρ. Κατερίνα Ιώβη για την πολύτιμη συνεργασία της, καθώς και όλους τους προπτυχιακούς φοιτητές και φοιτήτριες που συνεργαστήκαμε αυτά τα χρόνια.

Θεωρώ τον εαυτό μου ιδιαίτερα τυχερό που υπήρξα μέλος της μικρής αλλά ιδιάζουσας επιστημονικής ομάδας του Εργαστηρίου Βοτανικής του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών. Το συνολικό κλίμα στο εργαστήριο και στις εξορμήσεις μας στο πεδίο αυτά τα χρόνια ήταν κατά την άποψη μου κάτι σπάνιο και ιδιαίτερα σημαντικό για την απόδοση κάθε δραστηριότητάς μου. Ήταν αποτέλεσμα των ισότιμων και ειλικρινών σχέσεων που αναπτύχθηκαν μεταξύ των μελών του εργαστηρίου καθώς και των πολυδιάστατων προσωπικοτήτων που το συνέθεταν κάθε περίοδο. Αυτό το πλέγμα σχέσεων συνέβαλε αποφασιστικά στην διαμόρφωση τόσο της επιστημονικής μου ταυτότητας αλλά και πολλών πλευρών της προσωπικότητας και του χαρακτήρα μου.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής μου, καθηγητή Ιωάννη Μανέτα, επίκουρο καθηγητή Γεώργιο Γραμματικόπουλο, επίκουρη καθηγήτρια Γεωργία Πετροπούλου, ερευνήτρια Ιφιγένεια Κεραμιτσόγλου και τον λέκτορα Νικόλαο Κούτσια για τα πολύτιμα σχόλια και παρατηρήσεις τους που βοήθησαν στην τελική διαμόρφωση της παρούσας διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην ερευνήτρια Όλγα Συκιώτη, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου, η οποία με βοήθησε πολύ στις πρώτες μου επαφές με τα δεδομένα τηλεπισκόπησης ώστε να κατανοήσω τις βασικές τους αρχές και να αναπτύξω δεξιότητες στον χειρισμό και την ανάλυση τους. Την ευχαριστώ επίσης για την υπέροχη συνεργασία και την στήριξη που μου προσέφερε καθ’ όλη την διάρκεια της μελέτης μου.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω θερμά την Ακαδημία Αθηνών που μου προσέφερε υποτροφία για την οικονομική υποστήριξη των σπουδών μου ως υποψήφιου διδάκτορα, καθώς επίσης και το πρόγραμμα ERASMUS/PLACEMENTS μέσω του οποίου κατάφερα να κάνω ένα μέρος του

διδασκατορικού μου στο Ινστιτούτο “Instituto de Agricultura Sostenible”, στην Κόρδοβα της Ισπανίας. Να ευχαριστήσω επίσης τον Dr. Pablo J. Zarco-Tejada, ο οποίος δέχθηκε να καθοδηγήσει την μελέτη μου στην Ισπανία και όλους τους συνεργάτες μου στο Ινστιτούτο.

Πολλά από τα δεδομένα που χρησιμοποίησα στην διατριβή αυτή προέρχονται από προσφορές κάποιων οργανισμών και υπηρεσιών. Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) μας παρείχε πολύτιμα μετεωρολογικά αρχεία, ενώ χρησιμοποιήθηκαν επίσης δορυφορικά δεδομένα που είναι προϊόντα επεξεργασίας και ανάλυσης πολλών διαφορετικών επιστημονικών ομάδων και οργανισμών διαστήματος. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους επιστήμονες που εργάστηκαν και εργάζονται για την επεξεργασία, την διαμόρφωση και την ελεύθερη παροχή αυτών των δεδομένων. Επίσης, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) ευχαριστείται θερμά για την ελεύθερη παροχή μετεωρολογικών οργάνων.

Για το τέλος άφησα τα αγαπημένα μου πρόσωπα, στα οποία οφείλω απεριόριστη ευγνωμοσύνη για την συμπαράσταση και την αγάπη τους. Αυτά είναι που μου δίνουν την ζωτική ενέργεια για οτιδήποτε καταφέρνω στη ζωή μου. Ξεχωριστό και μεγάλο “ευχαριστώ” όμως αξίζουν οι γονείς μου που με στήριξαν με κάθε τρόπο όλα αυτά τα χρόνια.

Σταύρος Σταγάκης

Χανιά, Ιούνιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
Βασικές αρχές τηλεπισκόπησης.....	1
Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	3
Πηγές Η/Μ ακτινοβολίας.....	5
Αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα.....	7
Αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την επιφάνεια της γης.....	11
Αισθητήρες και πλατφόρμες.....	14
Δορυφορική τηλεπισκόπηση (Satellite remote sensing).....	15
Τηλεπισκόπηση εναέριων μέσων (Airborne remote sensing).....	18
Χαρακτηριστικά τηλεπισκοπικών εικόνων και αισθητήρων.....	19
Υπερφασματική τηλεπισκόπηση (Hyperspectral remote sensing).....	24
Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στα χερσαία οικοσυστήματα.....	27
Δομή και φασματική συμπεριφορά του φύλλου και του θόλου.....	27
Δείκτες βλάστησης.....	30
Μοντέλα ανακλαστικότητας θόλου (Canopy reflectance models).....	33
Εκτίμηση πρωτογενούς παραγωγικότητας.....	34
Άλλες εφαρμογές.....	38
ΣΚΟΠΟΣ	41
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	43
Είδη και περιοχές μελέτης.....	43
Fagus sylvatica.....	43
Quercus sp.....	43
Phlomis fruticosa.....	45
Citrus sinensis.....	45
Μετρήσεις στο πεδίο.....	47
Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index - LAI).....	47
Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών φύλλου (χλωροφύλλες – καροτενοειδή).....	50
Δυναμικό νερού (Ψ).....	51
Ανακλαστικότητα φύλλου.....	52
Ποιότητα φρούτων.....	52
Μετεωρολογικά Δεδομένα.....	54
Δορυφορικά δεδομένα.....	55
NOAA AVHRR.....	55
Επεξεργασία της χρονοσειράς NDVI του αρχείου AVHRR (GIMMS).....	58
SPOT VGT.....	60
EOS MODIS.....	61
Διόρθωση των χρονοσειρών δεικτών βλάστησης πολυφασματικών δεδομένων μέσω της ανάλυσης BISE (Best Index Slope Extraction).....	66
CHRIS/PROBA.....	67
Ανάλυση φασμάτων του αισθητήρα CHRIS και υπολογισμός δεικτών.....	72
Δεδομένα εναέριας πλατφόρμας.....	76
Μοντέλο εκτίμησης της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (ModSat).....	80
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	85
Αποτύπωση της δυναμικής των οικοσυστημάτων μέσω των επίγειων μετρήσεων.....	87
Διακυμάνσεις των μετρημένων οικοφυσιολογικών παραμέτρων.....	87
Βαθμονόμηση των μετρήσεων της παραμέτρου LAI.....	88
ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	90
Εκτίμηση οικοφυσιολογικών παραμέτρων μέσω δορυφορικών πολυφασματικών δεδομένων.....	90
Αξιολόγηση του προϊόντος NDVI από τον SPOT (VGT-S10).....	90
Οι δυνατότητες των πολυφασματικών δεικτών του MODIS (MOD09A1).....	93
Η ακρίβεια του προϊόντος LAI από τον MODIS (MOD15A2).....	101

Η δυναμική του οικοσυστήματος <i>Quercus</i> sp. στον χρόνο μέσω του αρχείου AVHRR (GIMMS)	103
Αξιολόγηση των χρονοσειρών GIMMS μέσω του αρχείου SPOT.....	103
Μελέτη της επίδρασης των κλιματικών παραμέτρων στην αναπτυξιακή δραστηριότητα του οικοσυστήματος <i>Quercus</i> sp.....	105
Η συμπεριφορά του οικοσυστήματος <i>Quercus</i> sp. στον χρόνο	107
Εκτίμηση της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) μέσω του ανεπτυγμένου δορυφορικού μοντέλου ModSat και του προϊόντος MODIS (MOD17A2)	111
ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	118
Παρακολούθηση βιοφυσικών και βιοχημικών ιδιοτήτων του θόλου στο οικοσύστημα <i>Phlomis fruticosa</i> μέσω του υπερφασματικού δορυφόρου CHRIS/PROBA	118
Η υπερφασματική πληροφορία του CHRIS	118
Οι σχέσεις μεταξύ των οικοφυσιολογικών παραμέτρων και των φασμάτων ανακλαστικότητας	118
Οι σχέσεις μεταξύ των οικοφυσιολογικών παραμέτρων και των παραγώγων των φασμάτων ανακλαστικότητας	121
Οι σχέσεις μεταξύ των οικοφυσιολογικών παραμέτρων και των δεικτών βλάστησης που προτείνονται στην βιβλιογραφία	123
Η ανάλυση των πειραματικών συνδυασμών πάνω στην φόρμουλα $NDSI_{(x,y)}$	125
Η ανάλυση των πειραματικών συνδυασμών πάνω στην φόρμουλα $SSI_{(x,y)}$	129
Διάκριση βιοφυσικών και βιοχημικών δεικτών	132
Εκτίμηση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ε) μέσω υπερφασματικών δεδομένων στο οικοσύστημα <i>Phlomis fruticosa</i>	134
Εξέταση σε επίπεδο φύλλου	134
Εξέταση σε επίπεδο θόλου	135
Μελέτη του υδατικού στρες και της ποιότητας φρούτων σε οπωρώνα ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευσης μέσω δεικτών βλάστησης στενών καναλιών του αερομεταφερόμενου αισθητήρα MCA-6	141
Ανίχνευση της υδατικής κατάστασης	141
Ανίχνευση της ποιότητας φρούτων	145
Ανάλυση χωρικής κλίμακας	147
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	151
Παρακολούθηση των αναπτυξιακών αλλαγών της βλάστησης μέσω πολυφασματικών δεδομένων	151
Η σχέση του LAI με τον NDVI	151
Δυνατότητες των πιο εξελιγμένων πολυφασματικών δεικτών	153
Μελέτη συμπεριφοράς οικοσυστημάτων στο χρόνο μέσω αρχείου δορυφορικών δεδομένων	157
Συμπεριφορά του δάσους δρυών (<i>Quercus</i> sp.) σε σχέση με το κλίμα.....	157
Μετατόπιση ζωνών βλάστησης λόγω κλιματικών αλλαγών	159
Οι αλλαγές στην συμπεριφοράς της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα	162
Παρακολούθηση αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων της βλάστησης μέσω υπερφασματικών δεδομένων.....	165
Δυνατότητες των υπερφασματικών-πολυγωνιακών αισθητήρων.....	165
Εντοπισμός του LAI	167
Εντοπισμός των φωτοσυνθετικών χρωστικών	168
Εντοπισμός της υδατικής κατάστασης της βλάστησης μέσω τηλεπισκόπησης	171
Πολυφασματικά δεδομένα	171
Υπερφασματικά δεδομένα	173
Ο PRI ως δείκτης υδατικής κατάστασης	175
Υδατική κατάσταση και ποιότητα φρούτων σε καλλιέργειες	176
Δορυφορική εκτίμηση της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων	178
Μοντέλα LUE πολυφασματικών δεδομένων	179
Εκτίμηση της ε μέσω υπερφασματικών δεδομένων	183
Προοπτικές επέκτασης της παρούσας έρευνας	189
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	191
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	195
ABSTRACT	197
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	199

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

APAR	Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που έχει απορροφηθεί από την βλάστηση (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, μmol φωτονίων $\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$)
AVHRR	Σειρά πολυφασματικών (multispectral) αισθητήρων παρακολούθησης της γης (Advanced Very-High-Resolution Radiometer) μεταφερόμενοι από τις δορυφορικές πλατφόρμες NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)
BISE	Μέθοδος διόρθωσης χρονοσειρών δεικτών βλάστησης (Best Index Slope Extraction)
CAR	Συνολικά καροτενοειδή
CHL	Συνολικές χλωροφύλλες
CHLa	Χλωροφύλλη α
CHLb	Χλωροφύλλη β
CHRIS	Υπερφασματικός πολυγωνιακός (hyperspectral multiangle) αισθητήρας παρακολούθησης της γης (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) ενσωματωμένος στην διαστημική πλατφόρμα PROBA (Project for On Board Autonomy)
CRI	Φασματικός δείκτης των συνολικών καροτενοειδών επιπέδου φύλλου (Carotenoid Reflectance Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
$D_x Z^\circ$	Η πρώτη παράγωγος του φάσματος ανακλαστικότητας σε μήκος κύματος $x \text{ nm}$ και γωνία παρακολούθησης Z°
ϵ	Η αποδοτικότητα χρήσης φωτός από την βλάστηση για την μετατροπή του σε βιομάζα (Light Use Efficiency – LUE, $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ απορ. φωτονίων)
Eddy flux	Τεχνική μέτρησης ατμοσφαιρικών ροών μέσω κατάλληλων οργάνων τοποθετημένων σε ψηλή κατασκευή (πύργος). Γνωστή επίσης ως Eddy correlation και Eddy covariance
EVI	Φασματικός δείκτης πράσινης βλάστησης (Enhanced Vegetation Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
FAPAR	Το ποσοστό της προσπίπτουσας φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον θόλο της βλάστησης (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation)
FWHM	Μέθοδος ορισμού του φασματικού εύρους για κάθε κανάλι ενός τηλεπισκοπικού αισθητήρα (Full Width Half Maximum)
GIMMS	Αρχείο παγκόσμιων χρονοσειρών NDVI (1981 – 2006) μέσω των δορυφορικών παρατηρήσεων των AVHRR (Global Inventory Modeling and Mapping Studies)
GPP	Ολική πρωτογενής παραγωγικότητα (Gross Primary Productivity, $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
IR	Ακτινοβολία στο υπέρυθρο φάσμα (Infrared)
λ	Μήκος κύματος ακτινοβολίας (nm)
LAI	Δείκτης φυλλικής επιφάνειας του θόλου της βλάστησης (Leaf Area Index, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
LUE	Η αποδοτικότητα χρήσης φωτός από την βλάστηση για την μετατροπή του σε βιομάζα (Light Use Efficiency, $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ απορ. φωτονίων)
MANTIS	Μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου βασισμένο σε επίγειες φυσιολογικές και μετεωρολογικές μετρήσεις
MCA-6	Αερομεταφερόμενος (airborne) αισθητήρας έξι στενών φασματικών καναλιών

MODIS	Δορυφορικός πολυφασματικός (multispectral) αισθητήρας παρακολούθησης της γης (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)
ModSat	Μοντέλο εκτίμησης της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας μέσω δορυφορικών και μετεωρολογικών δεδομένων
MTVI	Φασματικός δείκτης πράσινης βλάστησης (Modified Triangular Vegetation Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
$NDSI_{(x,y)}Z^\circ$	Φασματικός δείκτης τύπου κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Spectral Index) της ανακλαστικότητας στα μήκη κύματος x και y nm και γωνία παρακολούθησης Z°
NDVI	Ο πιο διαδεδομένος φασματικός δείκτης πράσινης βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
NDWI	Φασματικός δείκτης υδατικής κατάστασης της βλάστησης (Normalised Difference Water Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
NIR	Ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (Near Infrared)
OSAVI	Φασματικός δείκτης πράσινης βλάστησης (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
PAR	Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, λ : 400 – 700 nm (Photosynthetically Active Radiation, $\mu\text{mol φωτονίων m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)
PRI	Φασματικός δείκτης ευαίσθητος στην κατάσταση εποξειδωσης των ξανθοφυλλών και την φωτοσυνθετική απόδοση (Photochemical Reflectance Index)
R_xZ°	Η ανακλαστικότητα σε μήκος κύματος x nm και γωνία παρακολούθησης Z°
RDI	Μέθοδος χειρισμού άρδευσης καλλιεργειών μέσω παροχής περιορισμένης ποσότητας νερού σε συγκεκριμένες αναπτυξιακές φάσεις (Regulated Deficit Irrigation)
RDVI	Φασματικός δείκτης πράσινης βλάστησης (Renormalized Difference Vegetation Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
SPOT	Σειρά δορυφόρων παρακολούθησης της γης (Satellite Pour l'Observation de la Terre)
SR	Ο πρώτος φασματικός δείκτης πράσινης βλάστησης που χρησιμοποιήθηκε σε εικόνες τηλεπισκόπησης και γενικότερα οι φασματικοί δείκτες τύπου απλής αναλογίας (Simple Ratio)
$SSI_{(x,y)}Z^\circ$	Φασματικός δείκτης τύπου απλής αφαίρεσης (Simple Subtracion Index) της ανακλαστικότητας μεταξύ των μηκών κύματος x και y nm σε γωνία παρακολούθησης Z°
TA	Η οξύτητα του χυμού των φρούτων (Titratable Acidity, %)
TSS	Η περιεκτικότητα του χυμού των φρούτων σε σάκχαρα (Total Soluble Solids, °Brix)
UAV	Μη-επανδρωμένο εναέριο όχημα (Unmanned Aerial Vehicle)
VGT	Πολυφασματικός (multispectral) αισθητήρας παρακολούθησης της γης (VEGETATION) μεταφερόμενος από τις δορυφορικές πλατφόρμες SPOT
VPD	Έλλειμμα ατμοσφαιρικής υγρασίας (Vapor Pressure Deficit, Pa)
WI	Φασματικός δείκτης υδατικής κατάστασης της βλάστησης (Water Index). Αναλυτικά στους Πίνακες 7 και 10
Ψ	Δυναμικό νερού (MPa)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικές αρχές τηλεπισκόπησης

Η τηλεπισκόπηση ως επιστημονικό πεδίο έχει δεχθεί διάφορους ορισμούς (π.χ. Barrett & Curtis 1976, Colwell 1966, Fischer et al. 1976, Lintz & Simonett 1976, White 1977), οι οποίοι συγκλίνουν σε μία κεντρική έννοια: την συλλογή πληροφοριών από απόσταση. Βάσει αυτού του γενικού ορισμού, τα μάτια μας είναι ένα εξαιρετο παράδειγμα συσκευής τηλεπισκόπησης. Είμαστε σε θέση να συλλέγουμε πληροφορίες για το περιβάλλον μας αναλύοντας την ποσότητα και τη φύση της ενέργειας ορατού φωτός από μια εξωτερική πηγή (όπως ο ήλιος ή μια λάμπα) καθώς αντανακλάται από αντικείμενα μέσα στο οπτικό μας πεδίο. Αν και η γενικευμένη έννοια της τηλεπισκόπησης μπορεί να περιλαμβάνει πολλά καθημερινά παραδείγματα αλλά και επιστημονικά πεδία (π.χ. αστροφυσική), ο όρος «τηλεπισκόπηση» θεωρείται συνώνυμος με την χρήση τεχνητών δορυφόρων παρακολούθησης της γης λόγω της εισαγωγής του την δεκαετία του 1960 για την περιγραφή του νέου εξελισσόμενου πεδίου δορυφορικών εφαρμογών. Ωστόσο, η τηλεπισκόπηση της επιφάνειας της γης δεν περιορίζεται μόνο στην χρήση δορυφορικών αισθητήρων και μπορεί να περιλαμβάνει αερομεταφερόμενους ή ακόμα και επίγειους αισθητήρες. Ένας περισσότερο ειδικός ορισμός της τηλεπισκόπησης που αφορά την παρακολούθηση της γης δίνεται από τον Campbell (2002):

Τηλεπισκόπηση είναι η πρακτική της άντλησης πληροφοριών σχετικά με την επιφάνεια της γης μέσω απεικονίσεων από απόσταση, χρησιμοποιώντας μια ή περισσότερες περιοχές του φάσματος της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

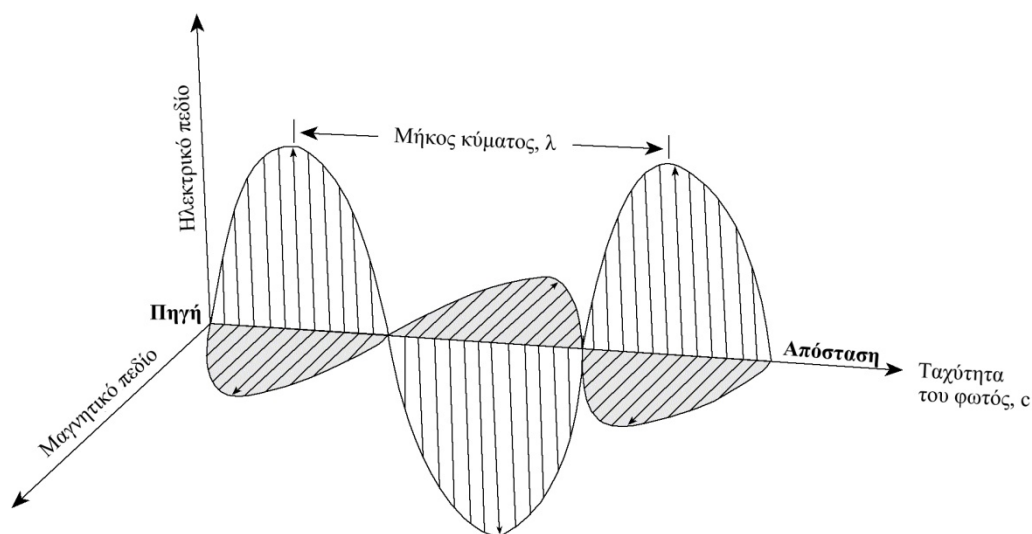
Μιας και η πρακτική της τηλεπισκόπησης εστιάζει στην εξέταση εικόνων της γήινης επιφάνειας, οι απαρχές της μπορούν να εντοπιστούν στην ανακάλυψη της φωτογραφίας από τον Louis Daguerre το 1839. Το 1858 καταγράφεται για πρώτη φορά η επιφάνεια της γης από αερόστατο αποτελώντας την πρώτη εφαρμογή μεθόδου τηλεπισκόπησης βάσει του ορισμού που δόθηκε παραπάνω. Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα εφαρμόστηκε ευρέως η λήψη φωτογραφιών από αεροσκάφη, η χρήση και η επεξεργασία των οποίων εντατικοποιήθηκε κατά την διάρκεια των δύο παγκοσμίων πολέμων. Από την δεκαετία του 1920 ξεκινάει η εφαρμογή αεροφωτογραφιών για διάφορων τύπων μελέτες όπως γεωλογική χαρτογράφηση, αποτίμηση των εδαφών και των δασών και εξαγωγή γεωργικών στατιστικών. Η παγκόσμια οικονομική κρίση την δεκαετία του 1930 έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην προώθηση των τεχνικών μελέτης των φυσικών πόρων μέσω αεροφωτογραφιών, λόγω της ανησυχίας που προκάλεσαν οι πρώτες ενδείξεις των αρνητικών επιπτώσεων που έχουν οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στο περιβάλλον και της ταυτόχρονης ανάγκης διεύρυνσης των προοπτικών οικονομικής ανάπτυξης. Ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος οδήγησε στην μελέτη του μη-ορατού φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ειδικότερα στις περιοχές του υπερύθρου και των μικροκυμάτων. Αν και η ύπαρξη των περιοχών αυτών ήταν ήδη γνωστή, οι πολεμικές συνθήκες επιτάχυναν την ανάπτυξη της υπάρχουσας γνώσης και των εφαρμογών της. Στην μεταπολεμική εποχή η γνώση και η τεχνολογία των μεθόδων τηλεπισκόπησης επεκτάθηκε δειλά προς πολιτικές ή επιστημονικές εφαρμογές, αλλά η ανακάλυψη νέων τεχνολογιών διατηρούνταν μυστική λόγω του ψυχρού πολέμου. Το 1956 εμφανίζεται μια αξιοσημείωτη εφαρμογή της υπέρυθρης φωτογραφίας στην μελέτη των φυτικών ασθενειών

(Colwell 1956), η οποία αποτέλεσε ορόσημο στην ανάπτυξη του επιστημονικού πεδίου της τηλεπισκόπησης.

Την δεκαετία του 1960 υπήρξε ταχεία εξέλιξη του τομέα, με τον πρώτο μετεωρολογικό δορυφόρο (TIROS-1) να εκτοξεύεται τον Απρίλιο του 1960. Ο δορυφόρος αυτός ήταν σχεδιασμένος για κλιματολογικές και μετεωρολογικές παρατηρήσεις, αλλά παρείχε τις βάσεις για την επικείμενη ανάπτυξη των δορυφόρων παρατήρησης της γήινης επιφάνειας. Την περίοδο αυτή, μερικά από τα όργανα τηλεπισκόπησης που αρχικά αναπτύχθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς αποδεδειγμένα από το καθεστώς μυστικότητας που διατηρούνταν και προωθήθηκαν για πολιτικές εφαρμογές λόγω της ταχείας τεχνολογικής ανάπτυξης που έκανε διαθέσιμα πιο προηγμένα όργανα για στρατιωτική χρήση. Λόγω της επέκτασης του ανιχνεύσιμου φασματικού πεδίου έξω από το ορατό φάσμα και της εισαγωγής των διαστημικών απεικονίσεων, ο όρος «αεροφωτογραφία» δεν ήταν πια επαρκής και εισήχθη ο όρος «τηλεπισκόπηση». Το 1972 τέθηκε σε τροχιά ο πρώτος δορυφόρος που σχεδιάστηκε για την παρακολούθηση του χερσαίου περιβάλλοντος (Landsat 1) και παρείχε συστηματικές παρατηρήσεις μεγάλων περιοχών της γήινης επιφάνειας σε διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με πρακτικές εφαρμογές σε πολλά ερευνητικά πεδία.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι συλλογής δεδομένων είναι κατά κανόνα επίγειες παρατηρήσεις ή μετρήσεις που συνήθως περιορίζονται χωρικά και χρονικά. Από τα ισχυρότερα πλεονεκτήματα της τηλεπισκόπησης είναι ότι προσφέρει την ανιχνεύσιμη πληροφορία σε πολλαπλές κλίμακες. Η σημαντικότερη διάσταση των δεδομένων τηλεπισκόπησης είναι η χωρική, αφού δίνεται η δυνατότητα συνοπτικής απεικόνισης μεγάλων περιοχών σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Τα δεδομένα αυτά καθιστούν δυνατή την μελέτη ευρείας χωρικής κλίμακας διαφοροποιήσεων των φυσιογραφικών στοιχείων μιας περιοχής και την σύγκριση μεταξύ των δεδομένων διαφορετικών περιοχών. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα κάλυψης γεωγραφικών περιοχών που παρουσιάζουν δυσκολίες προσέγγισης και μελέτης μέσω παραδοσιακών μεθόδων συλλογής δεδομένων. Η τηλεπισκόπηση δίνει με αυτόν τον τρόπο την δυνατότητα επέκτασης της χωρικά περιορισμένης αντίληψης των παραδοσιακών μεθόδων μέτρησης ώστε να επιτευχθεί μια διευρυμένη κατανόηση των πολύπλοκων και δυναμικών λειτουργικών συστημάτων του πλανήτη. Η δεύτερη διάσταση που εισάγεται μέσω των μεθόδων τηλεπισκόπησης είναι η χρονική. Τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης της γης δίνουν την δυνατότητα διαχρονικών απεικονίσεων με σταθερή επαναληψιμότητα και για μακρά περίοδο και μάλιστα με μεγάλο βαθμό αντικειμενικότητας. Οι ιδιότητες αυτές προσφέρουν την ικανότητα μελέτης δυναμικών φαινομένων, διαχρονικών συγκρίσεων και καταγραφής στοιχείων ή φαινομένων σε συνεχή βάση (long-term monitoring). Μια τρίτη διάσταση που εισάγεται μέσω της τεχνολογίας των τηλεπισκοπικών οργάνων είναι η φασματική, διότι δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης σε πολλές διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να ανιχνευτούν διαφορές μεταξύ βιοφυσικών ή βιοχημικών ιδιοτήτων των στοιχείων, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτές με την ανάλυση μιας μόνο φασματικής ζώνης. Επιπρόσθετες διαστάσεις που μπορούν να εντοπιστούν στις μεθόδους τηλεπισκόπησης είναι η γωνία παρατήρησης του αισθητήρα και η πόλωση της ακτινοβολίας, ενώ ένα επιπλέον προσόν της τηλεπισκόπησης σε σχέση με πολλές παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης είναι και η έλλειψη διατάραξης ή καταστροφής του αντικειμένου μέτρησης.

Παρόλα αυτά, το ερώτημα που παραμένει και αποτελεί ευρύ πεδίο της τρέχουσας έρευνας είναι «πόσες δυνατότητες παρέχει η τηλεπισκόπηση στην μελέτη της γήινης επιφάνειας;». Δηλαδή, κατά πόσον είναι δυνατή, και με τι λεπτομέρεια, η καταγραφή φαινομένων, διεργασιών ή ιδιοτήτων των μελετώμενων αντικειμένων μέσω της ανιχνεύσιμης φασματικής συμπεριφοράς τους.



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση της κυματικής φύσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα μεταξύ τους και κυμαίνονται σε άξονα κάθετο της κατεύθυνσης διάδοσης της ακτινοβολίας.

Η ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη των αισθητήρων τις τελευταίες δυο δεκαετίες διευρύνει όλο και περισσότερο το φάσμα των δυνατοτήτων των τηλεπισκοπικών μεθόδων. Ωστόσο, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα απαιτούν συνήθως και επίγειες παρατηρήσεις για την βαθμονόμηση και την αξιολόγηση τους. Οι παραδοσιακές μέθοδοι σε καμία περίπτωση δεν υποτιμώνται ή παραγκωνίζονται από την εισαγωγή των νέων τεχνολογιών. Αντιθέτως, αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία χτίζονται οι νέες μέθοδοι και επεκτείνεται η χωρικά και χρονικά περιορισμένη επίγεια πληροφορία.

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Όπως ορίστηκε παραπάνω, η τηλεπισκόπηση βασίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής (H/M) ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια παράγεται μέσω πολλών μηχανισμών όπως η αλλαγή των ενεργειακών επιπέδων των ηλεκτρονίων, η επιτάχυνση των ηλεκτρικών φορτίων, η αποσύνθεση των ραδιενεργών ουσιών και η θερμική κίνηση ατόμων και μορίων. Οι πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του ήλιου παράγουν πλήρες φάσμα H/M ακτινοβολίας, το οποίο μεταδίδεται στο διάστημα χωρίς να υπόκειται μεγάλες αλλαγές. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να περιγραφεί από το κυματικό μοντέλο ή το μοντέλο σωματιδίων. Στο πρώτο, η H/M ενέργεια θεωρείται ότι διαδίδεται στο χώρο με την μορφή ημιτονοειδών κυμάτων (Σχήμα 1). Τα κύματα αυτά χαρακτηρίζονται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και ταλαντώνονται συμφασικά και κάθετα προς την κατεύθυνση μετάδοσης της ακτινοβολίας. Αμφότερα τα πεδία διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) (Nunnally 1973, Young 1994).

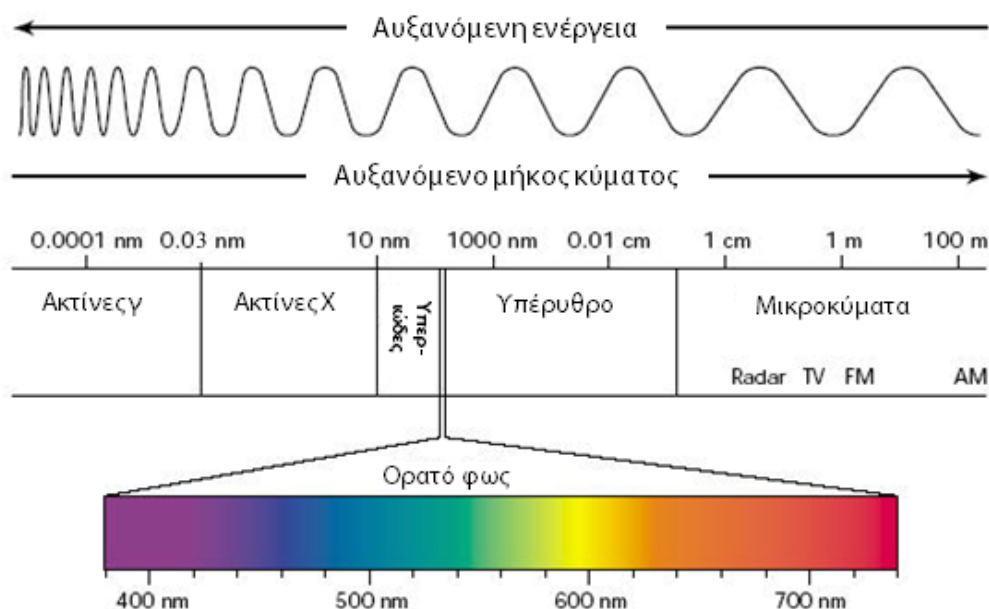
Το χαρακτηριστικό της H/M ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται περισσότερο στην τηλεπισκόπηση είναι το μήκος κύματος (λ). Το τελευταίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των κορυφών δύο διαδοχικών κυμάτων (Σχήμα 1) και μετράται συνήθως σε υποδιαιρέσεις του μέτρου ($\text{nm} = 10^{-9}$ m, $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m). Η συχνότητα (ν) είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό της H/M

ακτινοβολίας που σχετίζεται με το μήκος κύματος ($c = \lambda\nu$) και ορίζεται ως ο αριθμός των κορυφών που περνούν από ένα σημείο σε δεδομένη χρονική περίοδο. Η συχνότητα συνήθως μετράται σε hertz, μονάδα η οποία αντιστοιχεί σε ένα κύκλο το δευτερόλεπτο, και είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος. Τα περισσότερα χαρακτηριστικά της Η/Μ ενέργειας μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας την κυματική φύση της ακτινοβολίας. Ωστόσο, η σωματιδιακή έκφραση της Η/Μ ενέργειας είναι επίσης χρήσιμη σε μερικά σημεία της τηλεπισκόπησης, όπως για παράδειγμα όταν το ζητούμενο είναι η ποσοτικοποίηση της ενέργειας που μετράται από έναν αισθητήρα. Η θεωρία των σωματιδίων εκφράζει ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απορροφάται και εκπέμπεται σε διακριτές μονάδες που αποκαλούνται φωτόνια. Η ποσότητα της ενέργειας που κατέχει ένα φωτόνιο συγκεκριμένου μήκους κύματος δίνεται από την εξίσωση:

$$Q = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

όπου Q είναι η ενέργεια ενός φωτονίου (J) και h είναι η σταθερά του Planck ($6.6262 \cdot 10^{-34}$ J s). Από την Εξίσωση 1 προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερο είναι το περιεχόμενο σε ενέργεια (Σχήμα 2).

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχει τεχνητά χωριστεί σε μερικές μεγάλες κατηγορίες (Σχήμα 2) και κάποιες υποκατηγορίες τους. Οι χρήσιμες περιοχές του φάσματος για την τηλεπισκόπηση θεωρείται έως τώρα ότι ξεκινούν από την υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: την εγγύς υπεριώδη (UV-A: 0.32 – 0.40 μm), την μακρά υπεριώδη (UV-B: 0.28 – 0.32 μm) και την άκρα υπεριώδη (UV-C < 0.28 μm). Η εγγύς υπεριώδης είναι γνωστή για την ικανότητα της να προκαλεί φθορισμό στο ορατό φάσμα σε μερικά υλικά και γι' αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας σε μερικές τηλεπισκοπικές εφαρμογές. Εν τούτοις, η υπεριώδης ακτινοβολία υπόκειται σε έντονα φαινόμενα σκεδασμού στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την αυξημένη



Σχήμα 2. Η βασική κατηγοριοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και η σχέση μεταξύ μήκους κύματος και ενέργειας. Η σχηματική αναπαράσταση των κατηγοριών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δεν είναι ακριβής όσον αφορά τις αναλογίες μεγεθών κάθε κατηγορίας.

δυσκολία χρησιμοποίησης της στην δορυφορική τηλεπισκόπηση.

Αν και το ορατό φάσμα αποτελεί ένα πολύ μικρό μέρος του συνολικού H/M φάσματος, η σπουδαιότητα του στην τηλεπισκόπηση είναι πολύ μεγάλη. Τα όρια του ορίζονται από την ευαισθησία της ανθρώπινης όρασης (0.38 – 0.72 μm). Τα περισσότερα χρώματα που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος είναι δυνατόν να προκύψουν από την μίξη τριών χρωμάτων που ονομάζονται βασικά χρώματα. Τα βασικά χρώματα που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε. Το κάθε ένα από αυτά έχει την ιδιότητα να μην προκύπτει από κανένα συνδυασμό των άλλων δύο και συγχρόνως όλα τα υπόλοιπα χρώματα να προκύπτουν από την μίξη των τριών βασικών σε κατάλληλες αναλογίες. Για παράδειγμα, ένα κίτρινο υλικό απορροφά την μπλε ακτινοβολία, ανακλώντας την πράσινη και την κόκκινη. Αντίστοιχα, το κυανό χρώμα προκύπτει από την απορρόφηση της κόκκινης ακτινοβολίας και την ανάκλαση της μπλε και της πράσινης. Το μαύρο χρώμα προκύπτει από έντονη απορρόφηση και των τριών βασικών χρωμάτων, ενώ η έντονη ανάκλαση τους σε ίσες αναλογίες παράγει το λευκό φως.

Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος από το ορατό φάσμα αποτελούν την υπέρυθη περιοχή. Το κομμάτι αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο του ορατού και εκτείνεται από 0.72 έως 15 μm . Λόγω της ευρείας έκτασης του, συμπεριλαμβάνει ακτινοβολία με διάφορες ιδιότητες. Δύο βασικές κατηγορίες μπορούν να διακριθούν. Η πρώτη συνίσταται στην εγγύς (0.72 – 1.30 μm) και την μέση (1.30 – 3 μm) υπέρυθη ακτινοβολία, οι ιδιότητες των οποίων είναι πολύ κοντά στο ορατό φάσμα. Η εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία συμπεριφέρεται με τρόπο ανάλογο της ορατής όσον αφορά τα οπτικά συστήματα και επομένως είναι δυνατόν να εντοπιστεί μέσω φιλμ, φίλτρων και καμερών με σχεδιασμούς όμοιους με αυτούς που χρησιμοποιούνται για το ορατό φως. Η δεύτερη κατηγορία υπέρυθρης ακτινοβολίας αποτελεί το μακρό υπέρυθρο φάσμα που φτάνει έως τα όρια της περιοχής των μικροκυμάτων. Η ακτινοβολία αυτή είναι αξιακά διαφορετική από το ορατό, το εγγύς και το μέσο υπέρυθρο φάσμα. Ενώ η πρώτη κατηγορία υπέρυθρου μαζί με το ορατό αποτελούν ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται στην επιφάνεια της γης, η μακρά υπέρυθη ακτινοβολία εκπέμπεται από την γη ως θερμική ενέργεια. Συχνά αναφέρεται και ως θερμικό υπέρυθρο φάσμα (3 – 14 μm).

Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση εκτείνονται από 1 mm έως 1 m και αποτελούν τα γνωστά μικροκύματα. Από την τεράστια αυτή φασματική περιοχή τα μικρότερα μήκη κύματος έχουν περισσότερα κοινά με την θερμική ακτινοβολία, ενώ τα μεγαλύτερα μήκη κύματος ομοιάζουν με τα ραδιοκύματα των εμπορικών εκπομπών (π.χ. ραδιόφωνο, τηλεόραση).

Πηγές H/M ακτινοβολίας

Οι πρωταρχικές πηγές ενέργειας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κάθε είδους είναι ηλεκτρικά φορτία σε επιταχυνόμενη κίνηση. Όλα τα υλικά με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός (0 K, -273°C) εκπέμπουν H/M ακτινοβολία λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων τους. Η ποσότητα και τα μήκη κύματος της ενέργειας που εκλύεται εξαρτώνται από την θερμοκρασία του εκάστοτε σώματος. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της ύλης, η συνολική ποσότητα εκπεμπόμενης ενέργειας επίσης αυξάνεται, ενώ το μήκος κύματος της μέγιστης εκπομπής μειώνεται. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά μέσω της θεωρίας του μέλανος σώματος (Nunnally 1973, Young 1994). Ως μέλαν σώμα έχει οριστεί ένα υποθετικό υλικό που συμπεριφέρεται ως η ιδανική πηγή ενέργειας. Απορροφά και εκπέμπει το 100% της προσπίπτουσας σε αυτό ενέργειας και η απόδοση του μεταβάλλεται συναρτήσει μόνο της θερμοκρασίας του. Το μέλαν σώμα αποτελεί μια υποθετική οντότητα διότι στην φύση κάθε αντικείμενο ανακλά έστω και μια μικρή ποσότητα ακτινοβολίας. Ωστόσο, η συμπεριφορά του

μέλανος σώματος είναι δυνατόν να προσεγγιστεί μέσω εργαστηριακών οργάνων βάσει των οποίων η επιστημονική έρευνα έχει ορίσει τους κανόνες που συσχετίζουν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία με την θερμοκρασία των αντικειμένων.

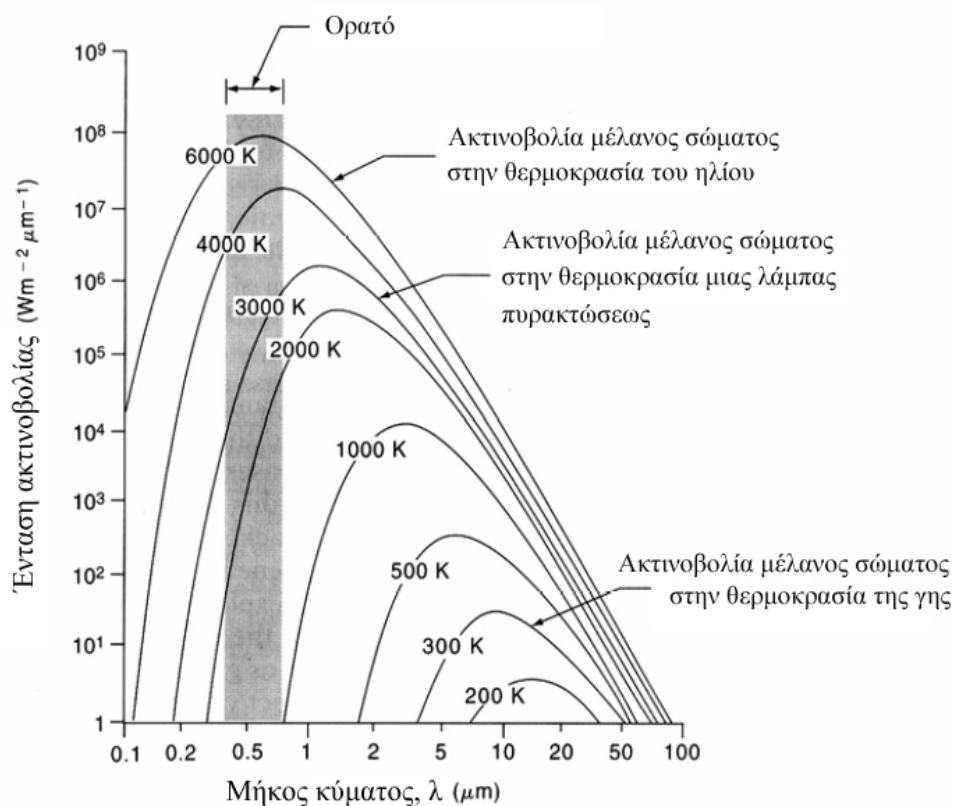
Ο νόμος του Kirchhoff δηλώνει ότι ο λόγος της εκπεμπόμενης προς την απορροφημένη ακτινοβολία είναι ο ίδιος για κάθε μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Ο νόμος αυτός διευθετεί την βάση του ορισμού της εκπεμπτικότητας (emissivity, ε), δηλαδή του λόγου της εκπομπής ενός αντικειμένου (M) προς αυτή ενός μέλανος σώματος της ίδιας θερμοκρασίας (M_b):

$$\varepsilon = M/M_b \quad (2)$$

Η εκπεμπτικότητα (ε) ενός αληθινού μέλανος σώματος είναι 1 και του ακριβώς αντίθετου υποθετικού σώματος (λευκό σώμα – τέλειος ανακλαστήρας) είναι 0. Τα φυσικά σώματα λαμβάνουν τιμές εκπεμπτικότητας μεταξύ των δύο υποθετικών άκρων (0 – 1) και συχνά τους αποδίδεται ο όρος «γκρίζα σώματα». Η εκπεμπτικότητα είναι επομένως ενδεικτική της αποδοτικότητας των φυσικών σωμάτων ως εκπομπείς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Τα σώματα που απορροφούν μεγάλες ποσότητες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και εν συνεχεία επανεκπέμπουν την ενέργεια αυτή χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές εκπεμπτικότητας.

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann ορίζει την σχέση μεταξύ της ολικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (W) και της θερμοκρασίας (T):

$$W = \sigma T^4 \quad (3)$$



Σχήμα 3. Φασματική κατανομή της ενέργειας που εκπέμπεται από μέλανα σώματα διαφόρων θερμοκρασιών.

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ($5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ watts m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). Η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του. Εν συνεχεία, ο νόμος μετατόπισης του Wien περιγράφει την σχέση μεταξύ του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας ενός μέλανος σώματος:

$$\lambda = 2897.8/T \quad (4)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος στο οποίο η ένταση της ακτινοβολίας είναι μέγιστη και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία του. Βάσει των δύο παραπάνω νόμων προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος αυξάνεται και η ενέργεια που εκπέμπεται από αυτά, ενώ ταυτόχρονα το μήκος κύματος της μέγιστης ακτινοβολίας μειώνεται (Σχήμα 3). Τέλος, ο νόμος του Planck εμπεριέχει ως συνέπειες τους δύο παραπάνω νόμους και δίνει την μαθηματική έκφραση της φασματικής κατανομής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος σε συγκεκριμένη θερμοκρασία:

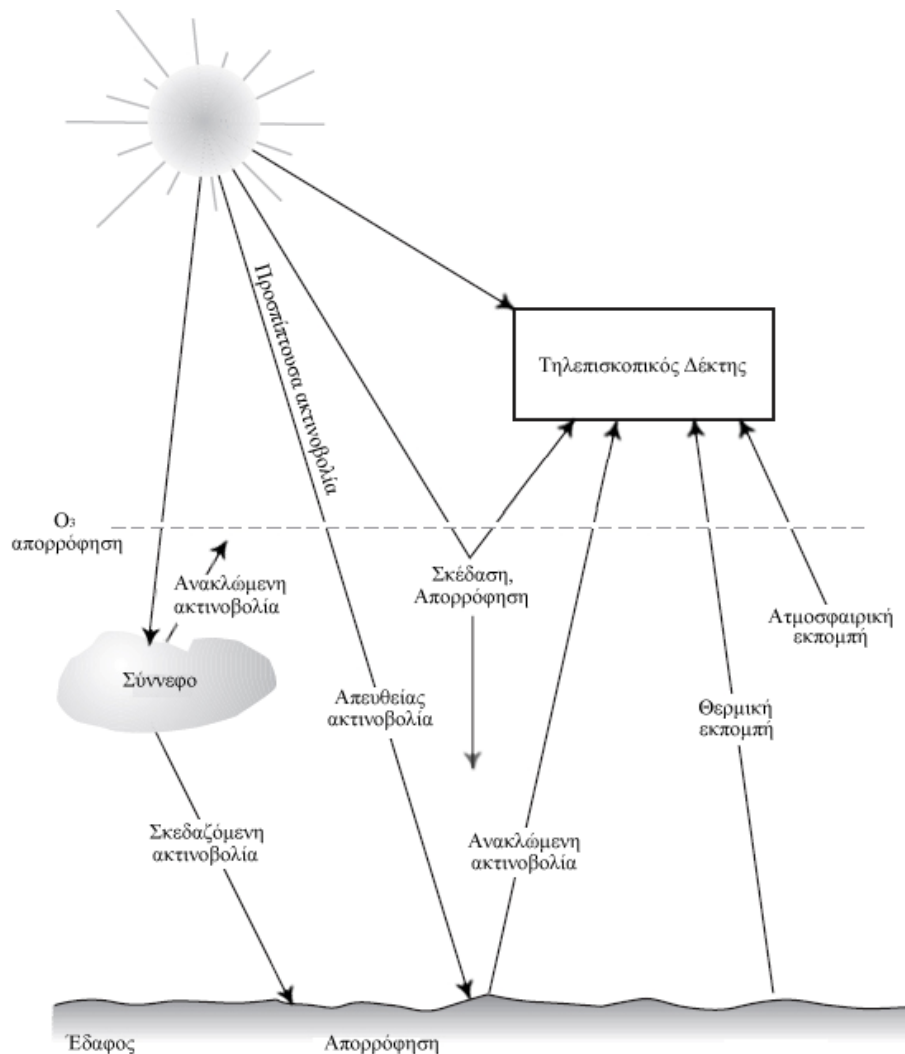
$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1} \quad (5)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck ($6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$), c η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), k η σταθερά του Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T είναι η απόλυτη θερμοκρασία και λ το μήκος κύματος.

Αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα

Η ακτινοβολία που ανιχνεύει ένας δορυφορικός αισθητήρας έχει περάσει από το σύνολο της γήινης ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα τις έντονες επιδράσεις πολλαπλών φαινομένων αλληλεπίδρασης της Η/Μ ακτινοβολίας με τα ατμοσφαιρικά στρώματα (Σχήμα 4). Αντιθέτως, τα δεδομένα που προέρχονται από επίγειους και αερομεταφερόμενους τηλεπισκοπικούς αισθητήρες δεν αντιμετωπίζουν έντονη επιβάρυνση της ποιότητας τους λόγω ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Έντονα φαινόμενα όπως ομίχλη, θολούρα, καπνός και σκόνη στην ατμόσφαιρα είναι αντιληπτά από την ανθρώπινη όραση γιατί περιορίζουν αισθητά την ατμοσφαιρική ποιότητα. Ωστόσο, ακόμα και σε καθαρές ατμοσφαιρικές συνθήκες οι οπτικές επιδράσεις της ατμόσφαιρας είναι πολυάριθμες, μολονότι πολύ κοινότοπες για να αναγνωριστεί η σημασία τους. Σε οποιοδήποτε ατμοσφαιρικές συνθήκες, όταν η ηλιακή ακτινοβολία περνά μέσα από την ατμόσφαιρα της γης, υπόκειται μεταβολές από πολλαπλές φυσικές διεργασίες που περιλαμβάνουν την σκέδαση, την απορρόφηση και την διάθλαση (Campbell 2002, Chahine 1983, Kaufman 1984, Kerle et al. 2004, Young 1994).

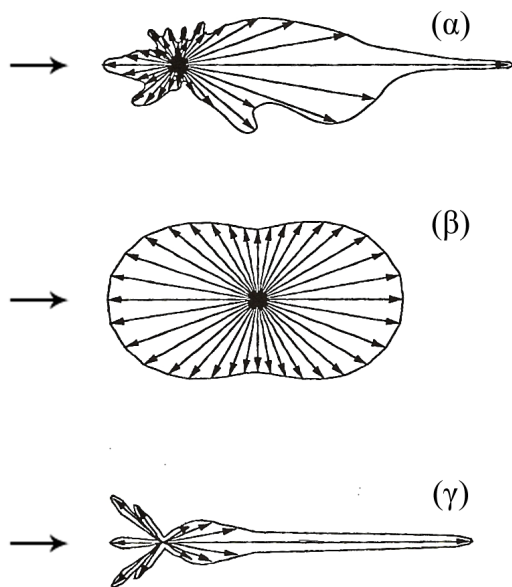
Η σκέδαση αποτελεί το φαινόμενο ανακατεύθυνσης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας λόγω αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (αεροζόλ) ή μεγάλων μορίων ατμοσφαιρικών αερίων (Σχήμα 5). Τα αεροζόλ βρίσκονται κατά 99% στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα (Chameides & Davis 1982). Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται από το μέγεθος και την αφθονία των σωματιδίων, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την απόσταση που αυτή διανύει μέσα στην ατμόσφαιρα. Μέσω του φαινομένου της σκέδασης κάποιο ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ανακατευθύνεται προς το διάστημα, ενώ ένα άλλο θα κατευθυνθεί προς την επιφάνεια της γης. Η πιο κοινή μορφή σκέδασης ονομάζεται Rayleigh και συμβαίνει όταν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια ή μόρια έχουν πολύ μικρή διάμετρο σε σχέση με το



Σχήμα 4. Αναπαράσταση των βασικών αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα και την γη πριν φτάσει σε έναν δορυφορικό αισθητήρα.

μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Σχήμα 5β). Τα ίχνη σκόνης στην ατμόσφαιρα και κάποια μεγάλα μόρια ατμοσφαιρικών αερίων, όπως το άζωτο (N_2) και το οξυγόνο (O_2), είναι από τις συχνότερες αιτίες της σκέδασης Rayleigh. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει ακόμα και όταν επικρατούν απόλυτα καθαρές ατμοσφαιρικές συνθήκες και γι' αυτό το λόγο αποκαλείται επίσης σκέδαση καθαρής ατμόσφαιρας. Είναι η κυρίαρχη διαδικασία σκέδασης στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (9 – 10 km) και εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Σχήμα 6). Η ένταση του φαινομένου σκέδασης Rayleigh αυξάνεται εκθετικά (τέταρτη δύναμη) όσο μειώνεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό ευθύνεται για το γαλάζιο χρώμα του ουρανού κατά τη διάρκεια της μέρας, καθώς επίσης και για τα πορτοκαλοκόκκινα χρώματα του ουρανού κατά την διάρκεια της ανατολής και της δύσης του ηλίου.

Μεγάλα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, όπως η σκόνη, η γύρη, ο καπνός και τα σταγονίδια νερού, προκαλούν την επονομαζόμενη σκέδαση Mie. Τα σωματίδια αυτά έχουν διάμετρο σχεδόν ίση με το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας και επηρεάζουν το φασματικό κομμάτι του ορατού και των κοντινών περιοχών του. Οι μεταβολές του μεγέθους, του



Σχήμα 5. Συμπεριφορές σκέδασης τριών κατηγοριών ατμοσφαιρικών σωματιδίων: (α) Σχετικά μεγάλα ακανόνιστου σχήματος σωματίδια (ατμοσφαιρική σκόνη ή καπνός), (β) ατμοσφαιρικά μόρια, (γ) μεγάλα σταγονίδια νερού (Lynch & Livingston 1995).

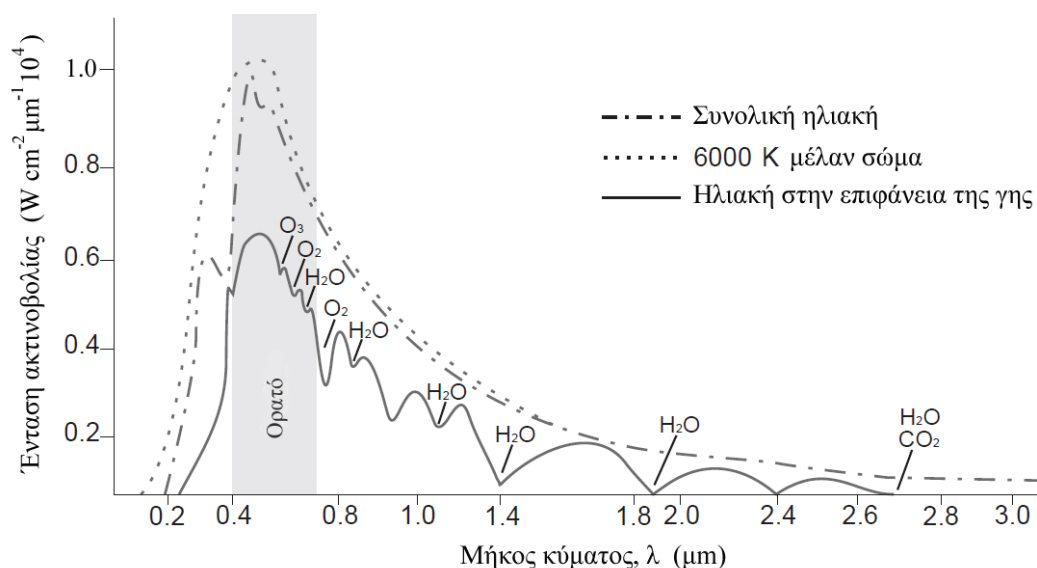
σχήματος και της σύστασης των σωματιδίων επηρεάζουν το φαινόμενο σκέδασης Mie, το οποίο εξαρτάται επίσης από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται κυρίως στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (0 – 5 km) όπου τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους βρίσκονται σε αφθονία. Ένα τρίτο φαινόμενο σκέδασης προκαλείται από σωματίδια που είναι πολύ μεγαλύτερα του μήκους κύματος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, όπως μεγάλα σταγονίδια νερού (από τα οποία αποτελούνται κυρίως τα σύννεφα) και σωματίδια σκόνης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μη-επιλεκτική σκέδαση και επηρεάζει ισομερώς τα διαφορετικά μήκη κύματος, με αποτέλεσμα την παρατηρούμενη θολούρα λευκού ή γκρι χρώματος. Οι επιδράσεις της σκέδασης στην τηλεπισκόπηση είναι ιδιαίτερης σημασίας. Λόγω της σκέδασης Rayleigh το υπεριώδες και μπλε φάσμα δεν συνίσταται προς χρήση όταν τα δεδομένα προέρχονται από

διαστημικές πλατφόρμες. Επίσης, η σκέδαση κατευθύνει ένα ποσοστό της ενέργειας εκτός του παρατηρούμενου αντικειμένου ή του οπτικού πεδίου του αισθητήρα μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την καταγραφόμενη χωρική και φασματική λεπτομέρεια. Με άλλα λόγια η σκέδαση υποβαθμίζει μέσω διαφόρων επιδράσεων την ποιότητα της τηλεπισκοπικής απεικόνισης.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα οφείλεται κυρίως σε τρία αέρια: το όζον (O_3), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και τους υδρατμούς (H_2O) (Σχήμα 7). Το όζον (O_3) σχηματίζεται από την αλληλεπίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας υψηλού ενεργειακού επιπέδου με τα μόρια οξυγόνου (O_2) στα υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα (οι υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 εντοπίζονται στην στρατόσφαιρα σε υψόμετρα 20 – 30 km). Παρόλο που οι φυσιολογικές συγκεντρώσεις O_3 είναι πολύ μικρές (0.1 – 0.2 ppm στην στρατόσφαιρα), το όζον επιτελεί πολύ σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή ισορροπία του πλανήτη. Απορροφά ακτινοβολία υψηλής ενέργειας (μικρού μήκους κύματος, κυρίως με $\lambda < 0.24 \mu m$) αποτρέποντας την μετάδοση της στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) βρίσκεται επίσης σε χαμηλές συγκεντρώσεις (περίπου 0.03% κατ' όγκο ξηρής ατμόσφαιρας), κυρίως σε



Σχήμα 6. Η σκέδαση Rayleigh προκαλείται από σωματίδια ή μόρια με διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και είναι μέγιστη σε μικρά μήκη κύματος. Στο σχήμα παρουσιάζεται μια απλουστευμένη αναπαράσταση της εξάρτησης της σκέδασης Rayleigh από το μήκος κύματος.

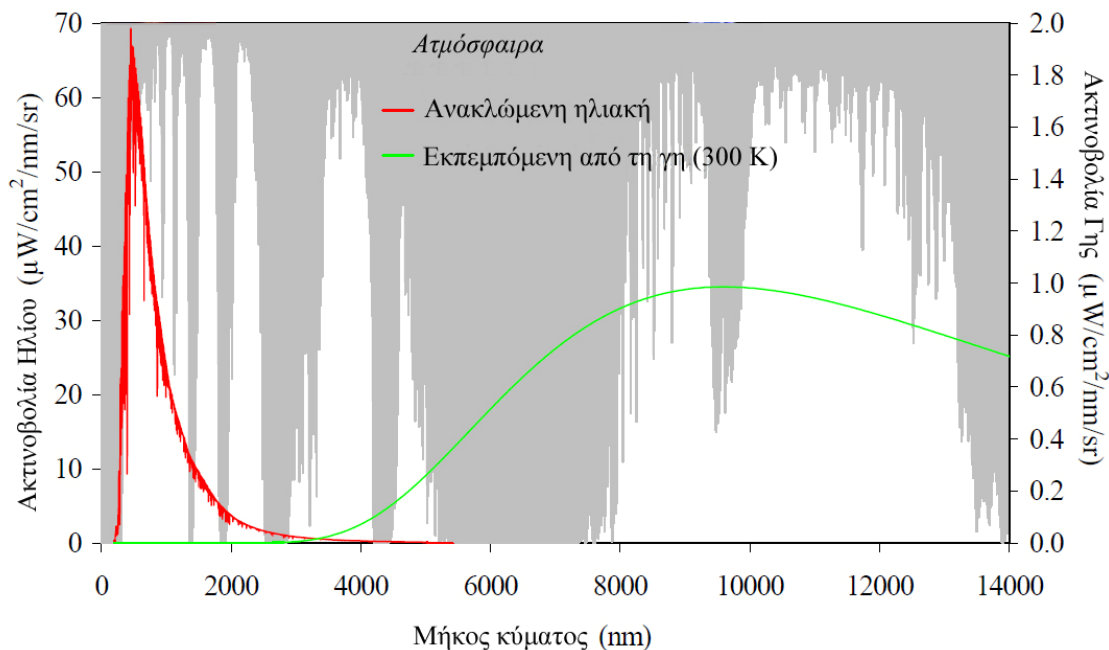


Σχήμα 7. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του ηλίου πριν και μετά την επίδραση της ατμόσφαιρας της γης σε σχέση με την ιδανική εκπομπή του μέλανος σώματος σε θερμοκρασία 6000 K.

χαμηλά ατμοσφαιρικά στρώματα. Η κατανομή του θεωρείται σχετικά ομοιογενής αλλά επηρεάζεται ισχυρά από τοπικά φαινόμενα όπως εκρήξεις ηφαιστειών ή ανθρώπινες δραστηριότητες. Η καύση ορυκτών πόρων για την παραγωγή ενέργειας έχει οδηγήσει σε αύξηση των επιπέδων CO_2 στην ατμόσφαιρα τα τελευταία εκατό χρόνια. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι σημαντικό στην τηλεπισκόπηση λόγω της ισχυρής απορρόφησης του στο μέσο και μακρύ υπέρυθρο φάσμα, κυρίως στην περιοχή 13 – 17.5 μm .

Η ατμοσφαιρική υγρασία (H_2O) εντοπίζεται κατά 99% στην τροπόσφαιρα σε ποσοστά 0 – 3 % κατ' όγκο. Η ατμοσφαιρική υγρασία διαφέρει από τα σταγονίδια νερού που δρουν ως σκεδαστές, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Είναι γνωστό από την καθημερινή εμπειρία ότι η ποσότητα της υγρασίας παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις χωρικά και χρονικά. Ως αποτέλεσμα και εν αντιθέσει με τα αέρια O_3 και CO_2 , οι επιδράσεις των υδρατμών στην ακτινοβολία παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με την περιοχή και την χρονική περίοδο. Επιπροσθέτως, η απορρόφηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας είναι κατά πολύ εντονότερη από αυτή που επιφέρουν όλα τα υπόλοιπα αέρια μαζί. Δύο από τις πιο σημαντικές περιοχές απορρόφησης της ατμοσφαιρικής υγρασίας είναι το φάσμα 5.5 – 7 μm και η περιοχή με $\lambda > 27 \mu\text{m}$, όπου η απορρόφηση μπορεί να ξεπεράσει το 80% σε μεγάλες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικής υγρασίας.

Συνεπώς, η ακτινοβολία μεταδίδεται επιλεκτικά μέσω της ατμόσφαιρας της γης, ανάλογα του μήκους κύματος. Οι περιοχές του H/M φάσματος που δεν επηρεάζονται σημαντικά από την ατμοσφαιρική απορρόφηση ονομάζονται ατμοσφαιρικά παράθυρα (Σχήμα 8). Οι θέσεις, τα μεγέθη και η λειτουργικότητα των ατμοσφαιρικών παραθύρων καθορίζεται από τα φάσματα απορρόφησης των ατμοσφαιρικών αερίων. Οι περιοχές που ταυτοποιούνται ως ατμοσφαιρικά παράθυρα είναι εμφανούς σημασίας για την τηλεπισκόπηση αφού καθορίζουν τα μήκη κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τεχνικές αποφεύγοντας τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας. Τα κύρια ατμοσφαιρικά παράθυρα περιλαμβάνουν το ορατό, το οποίο είναι ταυτόχρονα και το ενεργειακό μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 8), περιοχές του εγγύς και του μέσου υπέρυθρου, το θερμικό υπέρυθρο (κυρίως 10.2 – 12.4 μm , το οποίο αποτελεί και το μέγιστο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τη γη) και τα μικροκύματα (> 1 mm).

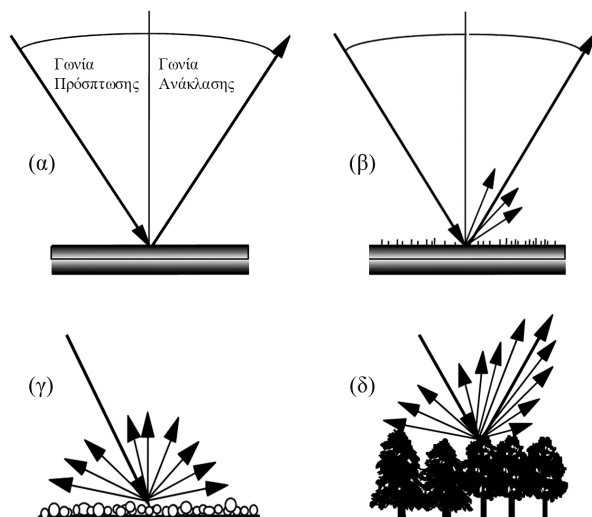


Σχήμα 8. Η κατανομή της ανακλώμενης και της εκπεμπόμενης ενέργειας από την γη σε σχέση με την διαπερατότητα της ατμόσφαιρας. Η σκιασμένη περιοχή του γραφήματος εκφράζει την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λόγω των ατμοσφαιρικών αερίων.

Τέλος, η διάθλαση αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο η κατεύθυνση της Η/Μ ακτινοβολίας κάμπτεται καθώς διέρχεται από ένα υλικό που μεταδίδει φως σε ένα άλλο. Ένα καθημερινό παράδειγμα διάθλασης είναι η φαινομενική μετατόπιση ενός αντικειμένου που βρίσκεται κάτω από το νερό όταν παρατηρείται πάνω από την επιφάνεια του. Η διάθλαση συμβαίνει στην ατμόσφαιρα καθώς το φως διέρχεται μέσω των ατμοσφαιρικών στρωμάτων μεταβαλλόμενης διαύγειας, υγρασίας και θερμοκρασίας. Οι διακυμάνσεις των παραμέτρων αυτών επηρεάζουν την πυκνότητα των ατμοσφαιρικών στρωμάτων με αποτέλεσμα οι ακτίνες του φωτός να κάμπτονται καθώς μεταδίδονται από το ένα στρώμα στο άλλο. Ένα κοινό αποτέλεσμα διάθλασης στην ατμόσφαιρα είναι η τρεμάμενη όψη ενός αντικειμένου όταν παρατηρείται από απόσταση σε μία ζεστή καλοκαιρινή ημέρα.

Αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την επιφάνεια της γης

Όταν η Η/Μ ακτινοβολία φθάσει στην επιφάνεια της γης, τρεις είναι οι βασικές διεργασίες αλληλεπίδρασης με τα στοιχεία που συναντά. Μπορεί να ανακλαστεί καθώς προσπίπτει με μια αδιαφανή επιφάνεια, να απορροφηθεί από το υλικό στο οποίο προσπίπτει, καθώς επίσης και να μεταδοθεί μέσα από αυτό (Campbell 2002, Kerle et al. 2004, Nunnally 1973, Young 1994). Οι αναλογίες των τριών αυτών διεργασιών εξαρτώνται από την φύση της επιφάνειας, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την γωνία πρόσπτωσης της. Η ανάκλαση συνιστά την ανακατεύθυνση της ακτινοβολίας καθώς προσπίπτει σε μια επιφάνεια και εξαρτάται από την φύση και την δομή της τελευταίας σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Εάν η επιφάνεια είναι λεία σε σχέση με το μήκος κύματος, η ανάκλαση ονομάζεται κατοπτρική (Σχήμα 9α,β). Αυτός ο τύπος ανάκλασης ανακατευθύνει το σύνολο (ή το μεγαλύτερο ποσοστό) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια μοναδική κατεύθυνση, με την γωνία πρόσπτωσης να ισούται

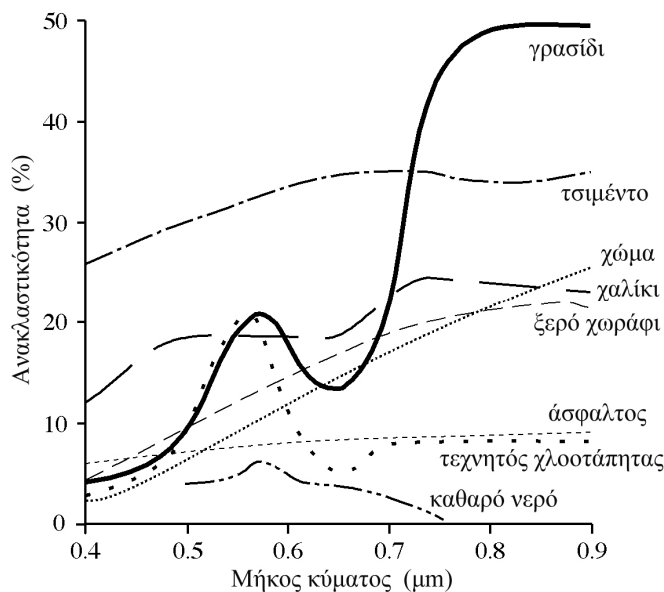


Σχήμα 9. Τύποι ανάκλασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. (α) Η ιδανική κατοπτρική ανάκλαση όπου το σύνολο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακατευθύνεται σε μια μοναδική κατεύθυνση με γωνία πρόσπτωσης ίση με την γωνία ανάκλασης. (β) Μη-ιδανική κατοπτρική ανάκλαση όπου ένα μικρό ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας ανακατευθύνεται σε γωνίες διαφορετικές της γωνίας πρόσπτωσης. (γ) Η ιδανική διάχυτη ανάκλαση όπου η ακτινοβολία σκεδάζεται ισότιμα προς όλες τις κατευθύνσεις. (δ) Παράδειγμα ανάκλασης σε μια φυσική επιφάνεια (θόλος δάσους) όπου η ανάκλαση σκεδάζεται ανισότιμα προς όλες τις κατευθύνσεις.

με την γωνία ανάκλασης. Στο ορατό φάσμα η κατοπτρική ανάκλαση συμβαίνει σε επιφάνειες όπως ένας καθρέφτης, ένα λείο μέταλλο ή η επιφάνεια αδιατάραχτου υδάτινου σώματος. Εάν η επιφάνεια είναι τραχιά σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε η ακτινοβολία σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις και η ανάκλαση ονομάζεται διάχυτη (Σχήμα 9γ,δ). Ο τέλειος διάχυτος ανακλαστής ορίζεται ως επιφάνεια Lambert και παρέχει ισότιμη ανάκλαση ανεξάρτητα της γωνίας παρατήρησης. Για αυτόν τον λόγο η ανάκλαση μιας επιφάνειας Lambert χαρακτηρίζεται επίσης ως ισοτροπική. Στο ορατό φάσμα οι περισσότερες φυσικές επιφάνειες συμπεριφέρονται ως διάχυτοι ανακλαστές αλλά απέχουν από την ιδανική επιφάνεια Lambert σε βαθμό που καθορίζεται από την δομή τους, την αρχιτεκτονική τους και την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Η ανάκλαση των περισσότερων φυσικών επιφανειών παρουσιάζει ανισοτροπία, δηλαδή η ποσότητα της ακτινοβολίας που ανακλάται από αυτές διαφέρει

ανάλογα με την κατεύθυνση παρατήρησης. Τα πολύπλοκα χαρακτηριστικά ανάκλασης μίας επιφάνειας ή ενός αντικείμενου σε σχέση με τις γωνίες φωτισμού και παρατήρησης περιγράφονται μαθηματικά από την συνάρτηση κατανομής αμφικατευθυνόμενης ανακλαστικότητας (bidirectional reflectance distribution function – BRDF) (Nicodemus et al. 1977). Ωστόσο, η θεωρία της επιφάνειας Lambert χρησιμοποιείται συχνά για μια απλοποιημένη προσέγγιση της οπτικής συμπεριφοράς των παρατηρούμενων αντικειμένων μέσω τηλεπισκόπησης.

Η συμπεριφορά μιας επιφάνειας ή ενός σώματος όσον αφορά τις διαδικασίες ανάκλασης απορρόφησης και μετάδοσης της ακτινοβολίας στα διαφορετικά μήκη κύματος αποτελεί την φασματική απόκριση του. Στην τηλεπισκόπηση μελετάται η ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από τα στοιχεία της γήινης επιφάνειας, η οποία φτάνει στον δέκτη και μετράται από αυτόν. Μέσω της ακτινοβολίας αυτής προκύπτει η αναγνώριση ή η εξέταση των επιθυμητών χαρακτηριστικών. Όσον αφορά την ανακλώμενη ενέργεια, το μέγεθος που υπολογίζεται συχνότερα είναι η αναλογία της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία, το οποίο είναι αδιάστατο και ονομάζεται ανακλαστικότητα. Ανάλογα χαρακτηριστικά ενός υλικού είναι η απορροφητικότητα και η διαπερατότητα του, οι αναλογίες των οποίων δύσκολα μετρώνται μέσω της τηλεπισκόπησης. Η ανακλαστικότητα κάθε υλικού κυμαίνεται ανάλογα το μήκος κύματος και η γραφική αναπαράστασή της συνιστά την φασματική υπογραφή του. Οι φασματικές υπογραφές διαφέρουν ανάλογα με το αντικείμενο, τη δομή και τη σύσταση του και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση και την μελέτη των ιδιοτήτων των στοιχείων της γήινης



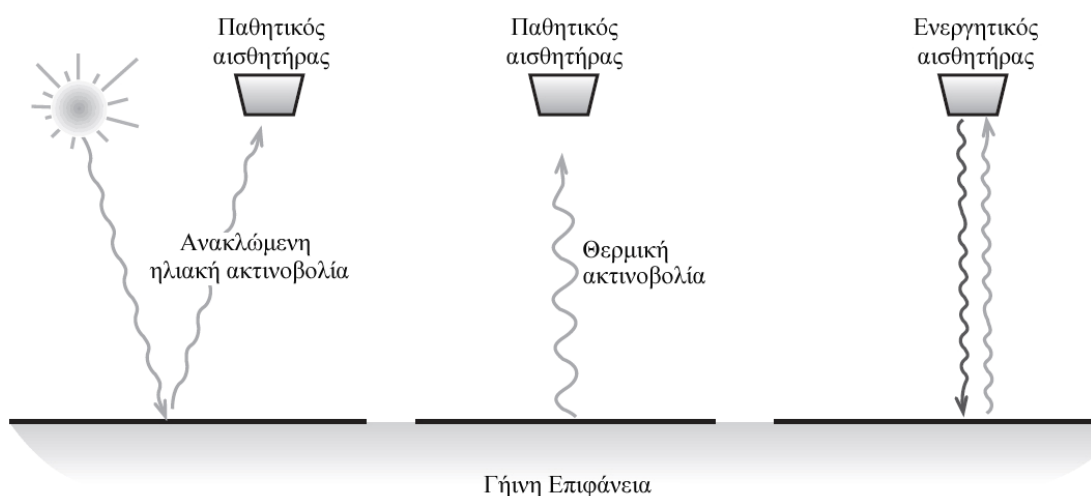
Σχήμα 10. Φάσματα ανακλαστικότητας διαφορετικών αντικειμένων στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο. Το πρότυπο ανακλαστικότητας κάθε υλικού αποτελεί την φασματική υπογραφή του.

επιφάνειας (Σχήμα 10). Για παράδειγμα, τα φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης στο ορατό φάσμα εξαρτώνται κυρίως από την βιοχημική σύσταση των φύλλων και την εσωτερική δομή τους. Όμως και άλλα χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα και η δομή του θόλου είναι εξίσου καίρια στον καθορισμό του φάσματος ανακλαστικότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, στην περίπτωση του γρασιδιού η ανακλαστικότητα του μπλε και κόκκινου φάσματος είναι χαμηλότερη σε σχέση με το πράσινο και το εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της απορρόφησης των φωτοσυνθετικών χρωστικών (κυρίως των χλωροφυλλών) στην μπλε και κόκκινη περιοχή που δίνει το πράσινο χρώμα στην υγιή βλάστηση. Παρόλα αυτά, η ιδανική συνθήκη αναγνώρισης κάθε αντικειμένου από την φασματική υπογραφή του δεν ανταποκρίνεται πάντα στην πραγματικότητα λόγω τεχνολογικών περιορισμών των τηλεπισκοπικών αισθητήρων αλλά και μεταβολής των φασματικών αποκρίσεων των στοιχείων στο χρόνο και στο χώρο.

Αισθητήρες και πλατφόρμες

Η τηλεπισκόπηση της επιφάνειας της γης επιτελείται μέσω ποικιλίας διαφορετικών οργάνων που καταγράφουν Η/Μ ακτινοβολία σε διάφορες περιοχές του φάσματος. Ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα, διακρίνονται δύο τεχνικές τηλεπισκόπησης: τα παθητικά και τα ενεργητικά συστήματα (Σχήμα 11) (Campbell 2002, Kerle et al. 2004, Silva 1978). Οι παθητικοί αισθητήρες βασίζονται σε φυσικές πηγές ενέργειας και αυτές είναι η ακτινοβολία του ηλίου που ανακλάται από την επιφάνεια της γης και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την γη λόγω της θερμοκρασίας της. Οι παθητικοί αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν είναι διαθέσιμη η φυσική πηγή ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι οι αισθητήρες που βασίζονται στην ανάκλαση της ηλιακής ενέργειας είναι λειτουργικοί μόνο κατά την διάρκεια της ημέρας, ενώ ταυτόχρονα περιορίζονται από τις κυμαινόμενες συνθήκες φωτισμού και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τα συστήματα που εντοπίζουν το θερμικό υπέρυθρο της γης είναι λειτουργικά ανεξάρτητα των συνθηκών φωτισμού αλλά περιορίζονται επίσης από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Από την άλλη, οι ενεργητικοί αισθητήρες παρέχουν οι ίδιοι την ενεργειακή πηγή, εκπέμποντας ακτινοβολία προς την επιφάνεια-στόχο. Στην συνέχεια ανιχνεύουν την ανακλώμενη από τον στόχο ακτινοβολία. Οι ενεργητικοί αισθητήρες έχουν την ικανότητα λειτουργίας οποιαδήποτε στιγμή ανεξαρτήτως ώρας ή εποχής και παρέχουν πιο ελεγχόμενες μετρήσεις αφού ρυθμίζουν οι ίδιοι τις συνθήκες που ακτινοβολείται ο στόχος. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση μικρών κύματος που δεν παρέχει επαρκώς ο ήλιος, όπως τα μικροκύματα. Ένα επιπρόσθετο προσόν των συστημάτων που λειτουργούν στο μικροκυματικό φάσμα είναι ότι διαπερνούν την ατμόσφαιρα και τα νέφη, παρέχοντας την δυνατότητα μέτρησης ανεξαρτήτως ατμοσφαιρικών συνθηκών. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας για την λειτουργία τους. Τέτοια συστήματα είναι τα ραντάρ, οι συσκευές παλμικού laser (lidar) και τα ηχοβολιστικά (sonar), και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την μέτρηση αποστάσεων όσο και για απεικόνιση.

Προκειμένου ο αισθητήρας να συλλέξει και να καταγράψει την ενέργεια που ανακλάται ή εκπέμπεται από μια επιφάνεια-στόχο, πρέπει να ενσωματωθεί σε μια σταθερή πλατφόρμα υπερκείμενη της επιφάνειας-στόχου. Η φύση, η ακρίβεια και η λεπτομέρεια της πληροφορίας που είναι δυνατόν να εξαχθεί από ένα σύστημα τηλεπισκόπησης εξαρτάται τόσο από τον αισθητήρα



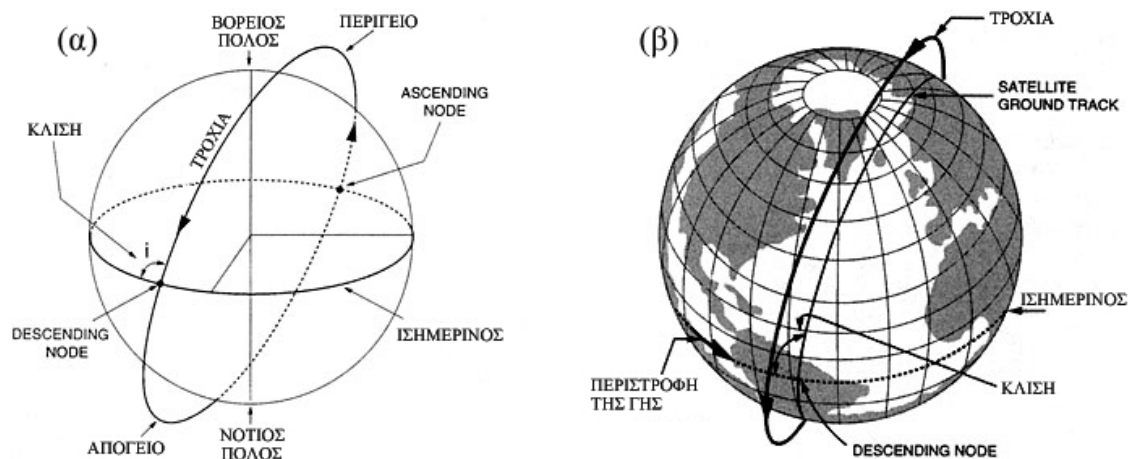
Σχήμα 11. Σχηματική αναπαράσταση της βασικής αρχής διάκρισης των συστημάτων τηλεπισκόπησης σε παθητικούς και ενεργητικούς αισθητήρες ανάλογα την πηγή της ανιχνεύσιμης ενέργειας.

που χρησιμοποιείται όσο και από την πλατφόρμα που είναι ενσωματωμένος. Οι επίγειοι αισθητήρες τοποθετούνται συνήθως σε ψηλές σταθερές κατασκευές ή μεταφέρονται από γερανούς και χρησιμοποιούνται συχνά για την καταγραφή λεπτομερών στοιχείων που συγκρίνονται με την πληροφορία πιο μακρινών αισθητήρων όπως οι αερομεταφερόμενοι και οι δορυφορικοί. Ο σκοπός τους είναι συνήθως η αξιολόγηση και η βαθμονόμηση των μακρινών αισθητήρων, καθώς και η μελέτη περίπλοκων μεθόδων ή τεχνικών. Τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται ως εναέριες πλατφόρμες τηλεπισκοπικών αισθητήρων είναι συνήθως αεροπλάνα ή ελικόπτερα και το ύψος των παρατηρήσεων από τους αισθητήρες που μεταφέρουν κυμαίνεται από 100 m έως και 40 km. Στην δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται κυρίως δορυφόροι, αλλά μερικές φορές και διαστημικοί σταθμοί. Οι δορυφόροι παρατήρησης γης εκτοξεύονται στο διάστημα μέσω πυραύλων και τίθενται σε τροχιά συνήθως σε ύψη από 150 km έως και 36000 km. Το γεγονός ότι ένα αεροσκάφος πετά πολύ πιο κοντά στη γη απ' ότι βρίσκεται ένας δορυφόρος έχει ως γενικό αποτέλεσμα την διάκριση περισσότερης πληροφορίας σε σχέση με τον δορυφόρο. Ωστόσο, παρόλο που ένας δορυφορικός αισθητήρας μπορεί να έχει μικρότερη διακριτική ικανότητα, προσφέρει τα πλεονεκτήματα της επαναληψιμότητας και της τεράστιας χωρικής κάλυψης λόγω της σταθερής τροχιάς του γύρω από τη γη.

Δορυφορική τηλεπισκόπηση (Satellite remote sensing)

Οι ικανότητες και τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων τηλεπισκόπησης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της τροχιάς του δορυφόρου. Μία κανονική τροχιά σχηματίζει μια έλλειψη γύρω από το κέντρο της γης που χαρακτηρίζεται από τέσσερα σημεία. Αυτό που απέχει περισσότερο από τη γη (απόγειο), αυτό που είναι πιο κοντά στη γη (περίγειο), το σημείο που ο δορυφόρος διασχίζει τον ισημερινό κινούμενος από το νότο προς τον βορά (ascending node) και το αντίστοιχο σημείο του ισημερινού που διασχίζει ο δορυφόρος όταν κινείται από τον βορά προς το νότο (descending node) (Σχήμα 12). Στην πραγματικότητα όμως οι δορυφόροι δεν εκτελούν μια κανονική ελλειπτική τροχιά λόγω της διαστρέβλωσης του μαγνητικού πεδίου της γης από την πεπλατυσμένη μορφή της γης, την βαρύτητα του φεγγαριού και άλλες επιδράσεις. Η κλίση της τροχιάς ενός δορυφόρου (inclination) αποτελεί την γωνία που σχηματίζει το επίπεδο της τροχιάς του με το επίπεδο του ισημερινού (Σχήμα 12). Η γωνία αυτή καθορίζει – μαζί με το οπτικό πεδίο του αισθητήρα – τα γεωμετρικά πλάτη που μπορεί να φτάσει η παρατήρηση. Εάν η κλίση της τροχιάς είναι 60° , τότε η προβολή της τροχιάς του δορυφόρου στην επιφάνεια της γης (ίχνη του δορυφόρου – satellite ground track) κυμαίνεται ανάμεσα στα γεωγραφικά πλάτη 60° στα βόρεια έως 60° στα νότια. Μία τροχιά με κλίση από 80° έως 100° ονομάζεται πολική και επιτρέπει την παρατήρηση του συνόλου του πλανήτη, ακόμα και των πόλων. Αυτό συμβαίνει λόγω του συνδυασμού της περιστροφής της γης γύρω από τον εαυτό της ($\Delta - A$) και της τροχιάς του δορυφόρου ($B - N$). Καθώς ο δορυφόρος περιστρέφεται γύρω από τη γη από πόλο σε πόλο, τα γεωγραφικά μήκη που καλύπτει αλλάζουν λόγω της περιστροφής της γης, με αποτέλεσμα τα ίχνη του δορυφόρου να μετατοπίζονται προς τα δυτικά. Η φαινομενική αυτή μετατόπιση επιτρέπει στον δορυφόρο να καλύπτει διαφορετική περιοχή του πλανήτη σε κάθε περιστροφή του.

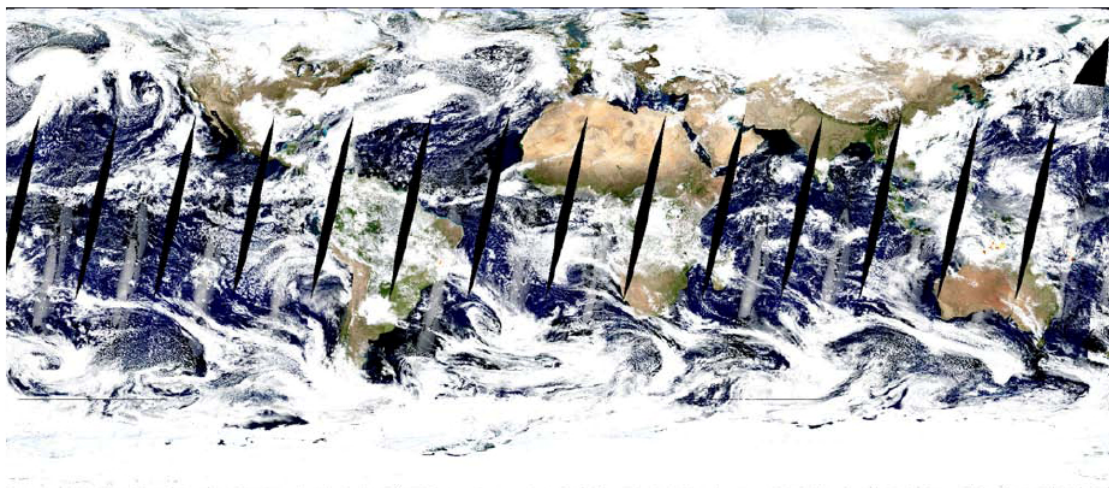
Ο χρόνος που χρειάζεται ένας δορυφόρος να ολοκληρώσει μια περιστροφή γύρω από την γη (περίοδος) αυξάνεται με την απόσταση του από την γη (τρίτος νόμος του Kepler). Παραδείγματος χάριν, ένας δορυφόρος σε πολική τροχιά με μέσο ύψος 806 km από το επίπεδο της γης, έχει περίοδο 101 λεπτά και ταχύτητα στην επιφάνεια της γης 23700 km/h ή 6.5 km/s. Είναι δηλαδή περίπου 60 φορές ταχύτερος από ένα μέσο αεροσκάφος. Σε ύψος περίπου 36000 km, ένας



Σχήμα 12. (α) Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς ενός δορυφόρου και (β) ένα σχηματικό παράδειγμα μιας πολικής τροχιάς.

δορυφόρος έχει την ίδια περίοδο με την επιφάνεια της γης, οπότε αν τοποθετηθεί σε τροχιά παράλληλη με τον ισημερινό (κλίση 0°) παραμένει σταθερός σε σχέση με την επιφάνεια της γης (γεωστατική τροχιά - GEO). Οι γεωστατικοί δορυφόροι προσφέρουν συνεχή κάλυψη του μισού περίπου πλανήτη (45%) και είναι ιδανικοί για την παρακολούθηση των μετεωρολογικών παραμέτρων και για τις τηλεπικοινωνίες. Οι πιο κοντινές στη γη τροχιές των δορυφόρων κυμαίνονται συνήθως από 150 km έως 1000 km (low-earth orbit – LEO) και προσφέρουν μικρότερη στιγμιαία κάλυψη γήινης επιφάνειας αλλά μεγαλύτερη ανάλυση στα δεδομένα τους. Τέτοιοι δορυφόροι, που εκτελούν συνήθως πολικές τροχιές, καθώς περιστρέφονται γύρω από τη γη «σαρώνουν» ένα κομμάτι από αυτή (swath), το εύρος του οποίου ποικίλει από δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιόμετρα (Εικόνα 1). Ο χρόνος που χρειάζεται ένας δορυφόρος για να επαναλάβει δύο διαδοχικές όμοιες τροχιές πάνω από το ίδιο σημείο της γης ονομάζεται τροχιακός κύκλος. Η περίοδος επισκεψιμότητας διαφέρει από τον τροχιακό κύκλο, καθώς είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών απεικονίσεων του ίδιου σημείου. Η επισκεψιμότητα καθορίζεται τόσο από τον τροχιακό κύκλο όσο και από το εύρος της περιοχής που σαρώνεται από τον δορυφόρο σε μια τροχιά (swath). Σε πολικές τροχιές, οι περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη σαρώνονται συχνότερα από την ζώνη του ισημερινού λόγω της αυξημένης αλληλοεπικάλυψης των παρακείμενων εύρων σάρωσης που έρχονται σε κοντινότερες αποστάσεις κοντά στους πόλους (Εικόνα 1).

Ιδανικά, όλες οι παρατηρήσεις μιας περιοχής της γης από ένα παθητικό δορυφορικό αισθητήρα θα έπρεπε να συμβαίνουν κάτω από ομοιόμορφες συνθήκες φωτισμού, ούτως ώστε να μην υπάρχουν εξωτερικές επιδράσεις στο λαμβανόμενο σήμα. Στην πραγματικότητα, η φωτεινότητα που καταγράφεται από δορυφορικούς αισθητήρες δεν είναι άμεσα ενδεικτική των συνθηκών στην επιφάνεια της γης λόγω των διαφοροποιήσεων στο γεωγραφικό πλάτος, την ώρα της ημέρας και την εποχή όπου οι συνθήκες φωτισμού αλλάζουν δραματικά. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκαν οι ηλιοσύγχρονες τροχιές, ούτως ώστε να μειωθεί μια πολύ βασική διακύμανση φωτισμού, αυτή της ώρας της ημέρας. Οι ηλιοσύγχρονες τροχιές είναι ουσιαστικά πολικές τροχιές που με προσεκτική επιλογή του ύψους και της κλίσης της τροχιάς ($98^\circ - 99^\circ$) εκμεταλλεύονται την βαρυτική επίδραση της διόγκωσης της γης στον ισημερινό, ούτως ώστε το επίπεδο της τροχιάς να περιστρέφεται συγχρόνως με την εποχιακή κίνηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, τα



Εικόνα 1. Κάλυψη της γης σε μια ημέρα μέσω ενός δορυφόρου ηλιοσύγχρονης τροχιάς (EOS MODIS). Οι διακριτές λωρίδες απεικόνισης αντιστοιχούν στις διαδοχικές τροχιές του δορυφόρου στην καθοδική τους φάση (από βορρά προς νότο). Ο συγκεκριμένος αισθητήρας (MODIS) χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο εύρος οπτικού πεδίου που του επιτρέπει να σαρώνει πλάτος εδάφους 2330 km σε κάθε τροχιά του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σχεδόν πλήρη απεικόνιση της γης μέσα σε μια μόνο ημέρα.

σημεία του ισημερινού που διασχίζει ο δορυφόρος σε κάθε τροχιά μετακινούνται ανατολικά περίπου 1° κάθε μέρα, ώστε σε ένα έτος η τροχιά να μετακινηθεί συνολικά 360° για να καταλήξει στο αρχικό σημείο. Έτσι, ο δορυφόρος που ακολουθεί ηλιοσύγχρονη τροχιά παρατηρεί κάθε σημείο της γης την ίδια τοπική ώρα (ηλιακή) κάθε μέρα του χρόνου, αποφεύγοντας έτσι την διακύμανση της ώρας παρατήρησης ως πηγή διακυμάνσεων στο φωτισμό. Αν και η ιδανική τοπική ώρα παρατήρησης ποικίλει ανάλογα με το αντικείμενο και την τηλεπισκοπική μέθοδο που εφαρμόζεται, οι περισσότεροι δορυφόροι παρατήρησης γης τοποθετούνται σε τροχιά σχεδιασμένη για παρατήρηση κάθε σημείου ανάμεσα στις 9:30 και τις 10:30 π.μ. (τοπική ώρα). Η ώρα αυτή αποτελεί το βέλτιστο κοινό σημείο μεταξύ διαφορετικών τηλεπισκοπικών εφαρμογών και συγχρόνως την ώρα που η νεφοκάλυψη των τροπικών περιοχών παρουσιάζει ελάχιστο. Ωστόσο, η φωτισμένη περιοχή της γης είναι ορατή από έναν δορυφόρο σε ηλιοσύγχρονη τροχιά μόνο κατά το καθοδικό μέρος της πορείας του (από βορρά προς νότο). Κατά το ανοδικό πέρασμα είναι ορατή από τον δορυφόρο η σκιασμένη πλευρά της γης, επιτρέποντας την καταγραφή νυχτερινών απεικονίσεων σε περίπτωση που είναι διαθέσιμοι θερμικοί ή ενεργητικοί αισθητήρες.

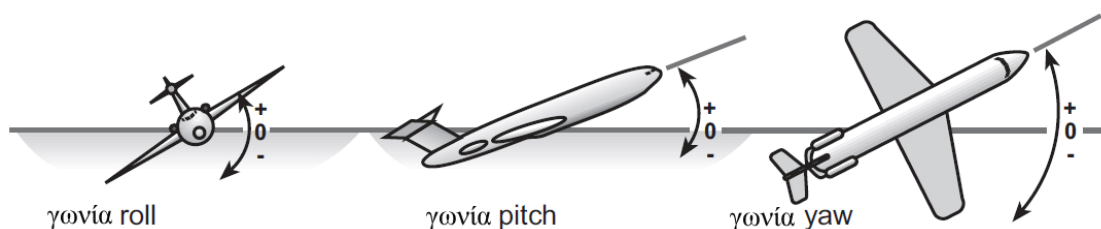
Τα δεδομένα που αποκτώνται μέσω δορυφορικών συστημάτων μεταδίδονται ηλεκτρονικά στη γη, εφόσον ο δορυφόρος παραμένει στην τροχιά του κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Υπάρχουν τρεις τρόποι λήψης των δεδομένων από ένα δορυφόρο. Ο πρώτος είναι η απευθείας μετάδοσή τους στη γη, μέσω ενός σταθμού λήψης που βρίσκεται στο έδαφος (Ground Receiving Station, GRS), εφόσον βέβαια ο τελευταίος βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του δορυφόρου. Εάν δεν συμβαίνει αυτό, τα δεδομένα μπορεί να αποθηκευτούν στο δορυφόρο και να μεταδοθούν αργότερα σε κάποιο σταθμό λήψης (GRS). Εναλλακτικά, η λήψη των δεδομένων μπορεί να γίνει μέσω ενός δορυφορικού συστήματος ευθυγράμμισης και αναμετάδοσης δεδομένων (Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS), το οποίο αποτελείται από μία σειρά τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων που βρίσκονται σε γεωστατικές τροχιές και επικοινωνούν μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση τα δεδομένα μεταδίδονται από τον ένα δορυφόρο στον άλλο μέχρι να προσεγγίσουν τον κατάλληλο σταθμό λήψης στο έδαφος (GRS). Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους σταθμούς λήψης (GRS) βρίσκονται σε ακατέργαστη ψηφιακή μορφή. Εκεί οι εικόνες υφίστανται επεξεργασία ώστε να

διορθωθούν οι συστηματικές, γεωμετρικές και ατμοσφαιρικές παραμορφώσεις και μετατρέπονται σε μία τυπική και ευρέως αναγνωρίσιμη μορφή. Υπάρχουν επίσης συστήματα επεξεργασίας εικόνων που λειτουργούν σε σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (near real-time processing systems) και χρησιμοποιούνται για την γρήγορη παροχή (μετά από λίγες ώρες από την απόκτηση των πρωτογενών δεδομένων) ψηφιακών εικόνων χαμηλής ανάλυσης. Τέτοια προϊόντα έχουν χαμηλή χωρική και ραδιομετρική ποιότητα, είναι όμως χρήσιμα για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας της συνολικής ποιότητας των δεδομένων, πριν αυτά να φτάσουν στους τελικούς χρήστες.

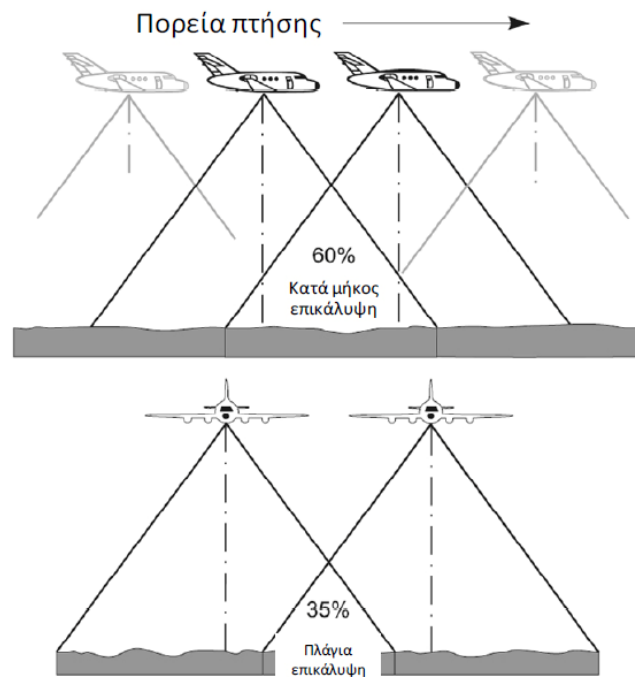
Τηλεπισκόπηση εναέριων μέσων (Airborne remote sensing)

Για την διεξαγωγή εναέριων τηλεπισκοπικών μετρήσεων, αισθητήρες με κάθετη ή πλάγια οπτική ενσωματώνονται σε ένα αεροσκάφος. Το αεροσκάφος εκτελεί πτήσεις πάνω από την μελετώμενη περιοχή ούτως ώστε να συλλεχθούν οι εναέριες απεικονίσεις μέσω του ενσωματωμένου αισθητήρα. Το υψόμετρο που επιλέγεται για την πτήση είναι άμεσα συνδεδεμένο με την διακριτική λεπτομέρεια που είναι επιθυμητή, αλλά και την έκταση της περιοχής που μελετάται. Σε χαμηλά υψόμετρα πτήσης ο αισθητήρας διακρίνει περισσότερη λεπτομέρεια της γήινης επιφάνειας αλλά το οπτικό πεδίο του αισθητήρα καλύπτει μικρότερη επιφάνεια (Cracknell & Hayes 1991). Εκτός από το υψόμετρο πτήσης, ο προσανατολισμός του αεροσκάφους επηρεάζει επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τηλεπισκοπικών δεδομένων που λαμβάνονται (Lillesand et al. 2004, McCloy 1995, Silva 1978). Ο προσανατολισμός του αεροσκάφους επηρεάζεται από τις συνθήκες του ανέμου και μπορεί να διορθωθεί έως ένα βαθμό από τους χειρισμούς του πιλότου ή του συστήματος πλοήγησης. Ο προσανατολισμός ενός αεροσκάφους περιγράφεται από τρεις γωνίες σε σχέση με την πορεία της πτήσης που ονομάζονται γωνία κύλισης (roll), γωνία μετάπτωσης (pitch) και γωνία εκτροπής (yaw) (Σχήμα 13). Οι γωνίες αυτές είναι ουσιαστικά οι αποκλίσεις από ένα σύστημα αξόνων x , y , z , με τον άξονα x να συμπίπτει με την κατεύθυνση της πτήσης. Οι γωνίες αυτές υπολογίζονται σε τακτικά διαστήματα κατά την διάρκεια της πτήσης μέσω ειδικών οργάνων που είναι ενσωματωμένα στο αεροσκάφος. Οι μετρήσεις αυτές είναι απαραίτητες για την διόρθωση των δεδομένων στη συνέχεια.

Η ταχύτητα του αεροσκάφους κυμαίνεται από 150 έως 750 km/h, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του αισθητήριου συστήματος. Σε περίπτωση που ο αισθητήρας λαμβάνει διαδοχικές εικόνες (π.χ. αεροφωτογραφία), η ταχύτητα του αεροσκάφους θα πρέπει να προσαρμοστεί ούτως ώστε να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των δύο συνεχόμενων απεικονίσεων (Σχήμα 14). Επίσης, για την κάλυψη μιας περιοχής, η πορεία της πτήσης ενός αεροσκάφους σχεδιάζεται συνήθως με τέτοιο τρόπο ώστε η σάρωση να γίνεται σε ευθείες λωρίδες που να επικαλύπτονται ως ένα σημείο μεταξύ τους και να καλυφθεί το σύνολο της περιοχής (Σχήμα 14). Τα δεδομένα των εναέριων τηλεπισκοπικών μεθόδων συνήθως αποθηκεύονται σε κάποια συσκευή



Σχήμα 13. Οι τρεις γωνίες του αεροσκάφους (κύλισης - roll, μετάπτωσης - pitch, εκτροπής - yaw) που επηρεάζουν την γεωμετρία των εναέριων τηλεπισκοπικών εικόνων.

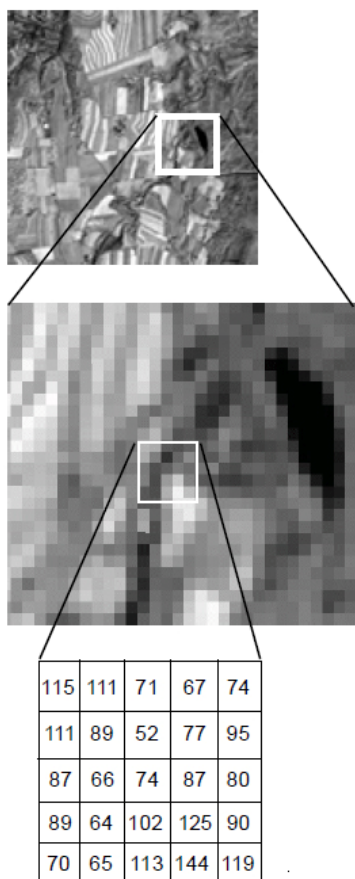


Σχήμα 14. Σχεδιασμός της πορείας πτήσης για την κάλυψη μιας περιοχής μέσω τηλεπισκόπησης εναέριων μέσων. Το παράδειγμα αναφέρεται στον τρόπο επικάλυψης κατακόρυφων αεροφωτογραφιών.

στο αεροσκάφος και λαμβάνονται μετά το τέλος της πτήσης. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα απ' ευθείας μετάδοσης τους σε κάποιο επίγειο σταθμό λήψης. Η τηλεπισκόπηση εναέριων μέσων είναι δυνατόν να προσφέρει πολύ υψηλή διακριτική ικανότητα με λεπτομέρεια που φτάνει ακόμα και μερικά εκατοστά. Αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα της σε σχέση με την δορυφορική τηλεπισκόπηση. Ωστόσο, δεν μπορεί να προσφέρει την τεράστια χωρική κάλυψη και την επαναληψιμότητα που προσφέρουν τα δορυφορικά δεδομένα. Από την άλλη, η συχνότητα κάλυψης μιας περιοχής από ένα δορυφορικό αισθητήρα μπορεί να είναι πολύ μικρή για ορισμένες εφαρμογές, στις οποίες ένα ευέλικτο αεροσκάφος μπορεί να είναι πιο χρήσιμο. Τέλος, οι καιρικές συνθήκες είναι πολύ συχνά απαγορευτικές για την διεξαγωγή αεροπορικών τηλεπισκοπικών πτήσεων, κάτι που αποτελεί ένα επιπλέον περιοριστικό παράγοντα στην τηλεπισκόπηση εναέριων μέσων.

Χαρακτηριστικά τηλεπισκοπικών εικόνων και αισθητήρων

Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα σε συντριπτική πλειοψηφία υφίστανται και χρησιμοποιούνται με την μορφή εικόνων. Είναι απαραίτητη η διάκριση των εννοιών φωτογραφίας και εικόνας στην τηλεπισκόπηση. Ο όρος εικόνα αναφέρεται σε κάθε διδιάστατη γραφική αναπαράσταση, ανεξαρτήτως των μέσων ανίχνευσης και καταγραφής, των μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται, της επεξεργασίας που έχει υποστεί ή της σύνθεσης μέσω της οποίας έχει προκύψει. Ο όρος φωτογραφία αναφέρεται παραδοσιακά σε ένα συγκεκριμένο τύπο εικόνων, όπου το φως ανιχνεύεται και καταγράφεται σε μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια (φίλμ) μέσω χημικών αντιδράσεων. Τα φωτογραφικά φίλμ ανιχνεύουν μήκη κύματος στην περιοχή του ορατού και του εγγύς υπερώθρου ($0.3 - 0.9 \mu\text{m}$) και την καταγράφουν αναλογικά. Τα δεδομένα σε αναλογική



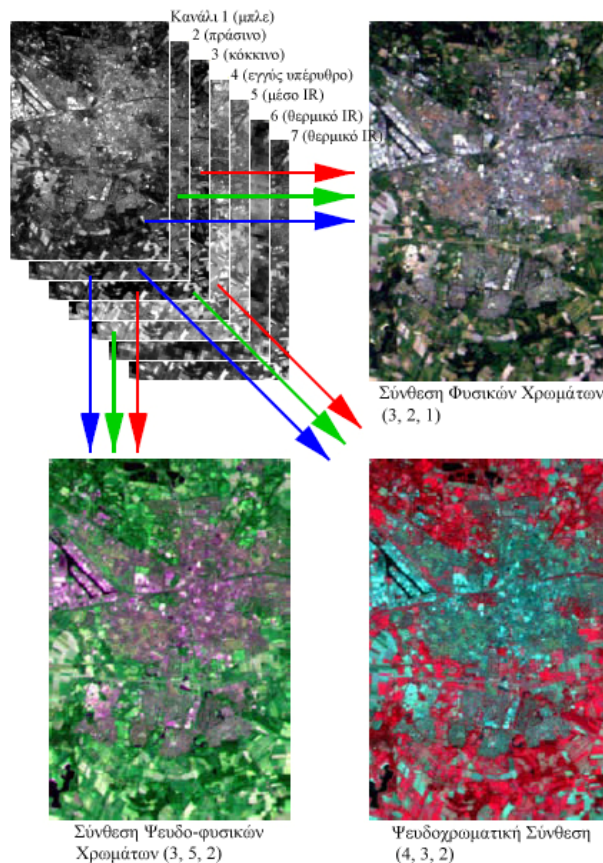
Σχήμα 15. Μια ψηφιακή εικόνα αποτελείται από χιλιάδες μικρά εικονοστοιχεία. Σε κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί ένας ψηφιακός αριθμός που αντιπροσωπεύει τον βαθμό φωτεινότητας του.

μορφή βρίσκονται σε συνεχή κατανομή κατά μήκος της εικόνας. Ωστόσο, με τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα μια φωτογραφία μπορεί να μετατραπεί επίσης σε ψηφιακή μορφή μέσω της υποδιαίρεσης των συνεχών αναλογικών δεδομένων σε μικρές ισομεγέθεις περιοχές που αποκαλούνται εικονοστοιχεία (pixels) (Σχήμα 15). Επιπροσθέτως, το φιλμ μπορεί να αντικατασταθεί από μια παράταξη φωτοευαίσθητων ανιχνευτών για την απευθείας ψηφιακή καταγραφή μιας εικόνας. Όταν μια εικόνα αναπαρίστανται ψηφιακά ως πίνακες αριθμών, τα δεδομένα που περιέχει μπορούν να υποστούν μαθηματικές και στατιστικές επεξεργασίες αυξάνοντας τις δυνατότητες απεικόνισης, εξέτασης, ανάλυσης και εξαγωγής δεδομένων ή συμπερασμάτων από αυτές (Campbell 2002, Jensen 1996, Nichols 1983).

Τα ψηφιακά τηλεπισκοπικά δεδομένα μπορεί να προκύψουν από μια οικογένεια οργάνων που συστηματικά σαρώνουν τμήματα της επιφάνειας της γης, καταγράφοντας φωτόνια που ανακλώνται ή εκπέμπονται από ξεχωριστά κομμάτια της επιφάνειας και αποτελούν τα εικονοστοιχεία της τελικής εικόνας. Μία ψηφιακή εικόνα αποτελείται συνήθως από χιλιάδες εικονοστοιχεία που είναι δυσδιάκριτα στο ανθρώπινο μάτι όταν επισκοπείται στην ολότητα της. Κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστά την φωτεινότητα ενός σημείου στην εικόνα ως ψηφιακό αριθμό (Σχήμα 15). Κάθε ψηφιακός αριθμός καταγράφεται ως μια σειρά δυαδικών τιμών που είναι γνωστά ως bit. Κάθε bit αυξάνει και τον αριθμό των διαθέσιμων ψηφιακών τιμών φωτεινότητας ως δύναμη του 2 (2^x). Με αυτόν τον τρόπο ο αριθμός των bit καθορίζει την ραδιομετρική ανάλυση μιας ψηφιακής

εικόνας, την ελάχιστη δηλαδή διαφορά ενέργειας που μπορεί να διακριθεί από έναν αισθητήρα. Όσο πιο ευαίσθητος είναι ο αισθητήρας στην ανίχνευση μικρών διαφορών ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ενέργειας, τόσο πιο μεγάλη η ραδιομετρική του ανάλυση. Συνήθως κάθε εικονοστοιχείο διαθέτει ξεχωριστές τιμές φωτεινότητας που αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιοχές του Η/Μ φάσματος. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται κανάλια ή μπάντες και συνήθως επικεντρώνονται στα διαφορετικά χρώματα του ορατού και σε κάποια τμήματα του υπερύθρου φάσματος.

Για την οπτική επισκόπηση μιας ψηφιακής εικόνας χρησιμοποιείται ένα ή συνδυασμός περισσότερων καναλιών. Όταν χρησιμοποιείται ένα μόνο κανάλι, τότε η εικόνα παρουσιάζεται μέσω διαβαθμίσεων του γκριζου τόνου που αποτελεί την φωτεινότητα κάθε εικονοστοιχείου. Η χρήση των ψηφιακών τιμών τριών διαφορετικών καναλιών για την εκπροσώπηση των τριών βασικών χρωμάτων (μπλε, πράσινο, κόκκινο) δίνει μια χρωματική σύνθεση στην εικόνα που βοηθάει την επισκόπηση της. Τα δεδομένα κάθε καναλιού αντιπροσωπεύονται από ένα από τα βασικά χρώματα και ανάλογα με την σχετική φωτεινότητα του κάθε εικονοστοιχείου σε κάθε κανάλι, τα βασικά χρώματα συνδυάζονται σε διαφορετικές αναλογίες για να δώσουν όλα τα

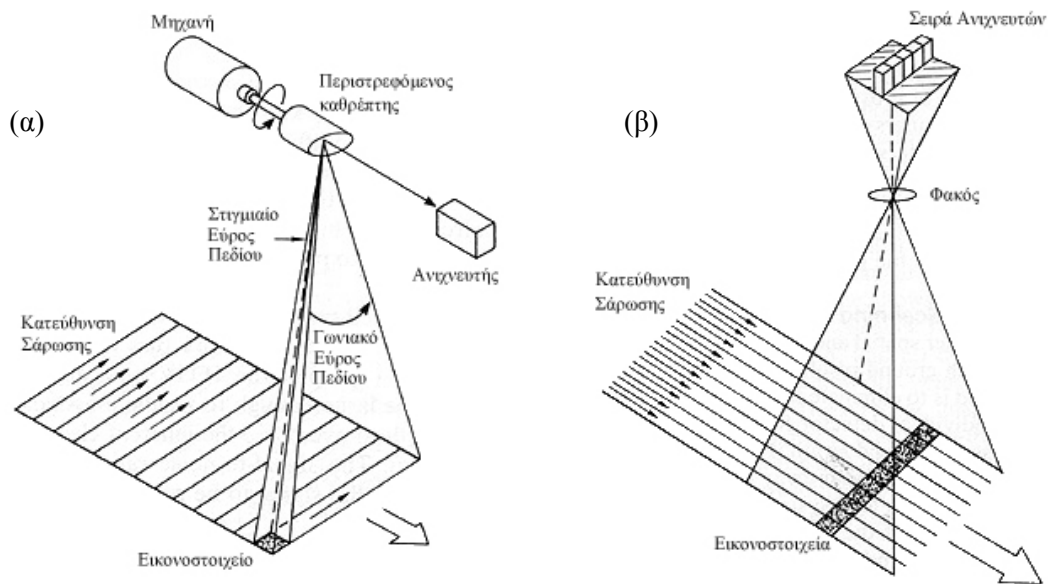


Σχήμα 16. Για την δημιουργία μιας έγχρωμης οπτικής επισκόπησης μιας πολυφασματικής εικόνας χρησιμοποιούνται τρία από τα διαθέσιμα κανάλια για την αντιπροσώπευση των τριών βασικών χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Ανάλογα με τις φασματικές περιοχές που συνδυάζονται προκύπτει και μια διαφορετικού τύπου σύνθεση χρωμάτων.

χρώματα. Εάν τα κανάλια που χρησιμοποιούνται στην σύνθεση αυτή είναι όντως αντιπροσωπευτικά της ανακλαστικότητας των τριών βασικών χρωμάτων όπως τα αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι (μπλε, πράσινο, κόκκινο), η εικόνα αποκαλείται ως σύνθεση αληθινών χρωμάτων (true colour composite) (Σχήμα 16). Όταν κανάλια που χρησιμοποιούνται για την έγχρωμη σύνθεση μιας εικόνας δεν αντιστοιχούν στα τρία βασικά, τότε παράγεται μια σύνθεση «ξένη» προς την αντίληψη μας και ονομάζεται ψευδοχρωματική σύνθεση (false colour composite). Μία συνήθης ψευδοχρωματική σύνθεση τηλεπισκοπικών εικόνων προκύπτει από την χρήση της ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο, το κόκκινο και το πράσινο κανάλι εκφρασμένα ως κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα (RGB) αντίστοιχα (Σχήμα 16). Το αποτέλεσμα της σύνθεσης αυτής ομοιάζει με την τύπωση της έγχρωμης υπέρυθρης φωτογραφίας (colour-infrared photography, CIR). Το πιο έντονο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου σύνθεσης είναι ότι η βλάστηση παρουσιάζεται με κόκκινες προς μωβ

αποχρώσεις λόγω της έντονης ανάκλασης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ένας άλλος κοινός τύπος σύνθεσης εκφράζει με πράσινο χρώμα την ανάκλαση της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ το κόκκινο και το μπλε εκφράζεται από τα αντίστοιχα κανάλια. Αυτός ο τύπος σύνθεσης ομοιάζει με τα αληθινά χρώματα, τονίζοντας όμως πολύ πιο έντονα την βλάστηση και διακρίνοντας περισσότερο τους διαφορετικούς τύπους της. Γι' αυτό το λόγο ονομάζεται σύνθεση ψευδο-φυσικών χρωμάτων (pseudo-natural colour composite) (Σχήμα 16).

Υπάρχουν δύο ειδών όργανα (πολυφασματικοί σαρωτές) που παράγουν ψηφιακές εικόνες, οι οπτικοί-μηχανικοί σαρωτές (optical-mechanical scanners) και οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν συσκευές συζευγμένου φορτίου (charge-coupled device, CCD) (Campbell 2002, Kerle et al. 2004). Οι οπτικοί-μηχανικοί σαρωτές χρησιμοποιούν κινούμενους καθρέπτες ή φακούς για την συστηματική στόχευση του οπτικού πεδίου στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 17α). Καθώς ένα τέτοιο όργανο σαρώνει την επιφάνεια της γης, παράγει ηλεκτρικό ρεύμα με κυμαινόμενη ένταση καθώς η φωτεινότητα που λαμβάνει μεταβάλλεται. Με τη χρήση φίλτρων είναι δυνατός ο διαχωρισμός της λαμβανόμενης ενέργειας σε διαφορετικές φασματικές περιοχές (κανάλια) που αναπαριστώνται από διαφορετικές ροές ηλεκτρικού ρεύματος. Η μετατροπή του συνεχούς αναλογικού σήματος σε διακριτές ψηφιακές τιμές (analog-to-digital, A-to-D conversion) επιτυγχάνεται χωρίζοντας το σε



Σχήμα 17. Γενικές αρχές λειτουργίας των δύο τύπων πολυφασματικών σαρωτών (multispectral scanners). (α) Οι οπτικοί-μηχανικοί σαρωτές (optical-mechanical scanners) εκτελούν σάρωση διαγραμμιζόμενης τροχιάς (cross-track) ή αλλιώς σάρωση whiskbroom. (β) Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούν συσκευές συζευγμένου φορτίου (charge-coupled device, CCD) εκτελούν σάρωση διαμήκουσ τροχιάς (along-track) ή αλλιώς σάρωση pushbroom.

όμοια διαστήματα κατά τα οποία λαμβάνεται μια μέση τιμή. Το γεγονός ότι η διακύμανση του αναλογικού σήματος μέσα σε κάθε διάστημα αντικαθίσταται από μια μόνο τιμή στην ψηφιακή μορφή του, κάνει το διάστημα αυτό πολύ σημαντικό για την διακριτική ικανότητα του αισθητήρα.

Η συσκευή συζευγμένου φορτίου (charge-coupled device, CCD) είναι μια πολύ μικρή πλάκα πάνω στην οποία βρίσκονται διατεταγμένα στοιχεία ενός ημιαγώγιμου υλικού ευαίσθητου στο φως (συνήθως πυριτίου). Κάθε φωτοευαίσθητο στοιχείο μιας συσκευής CCD (ανιχνευτής) μπορεί να είναι τόσο μικρό έως και 1 μm διάμετρο και να είναι ευαίσθητο στην ορατή και εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους σε μία ή περισσότερες παράλληλες γραμμές (Σχήμα 17β) ανάλογα τον αριθμό των καναλιών που διαθέτει – κάθε γραμμή αντιστοιχεί και σε ένα κανάλι. Κάθε ανιχνευτής συλλέγει τα φωτόνια που προσπίπτουν στην επιφάνεια του και συσσωρεύει φορτίο ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας για κάθε εικονοστοιχείο. Οι συσκευές CCD είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην ανίχνευση ακόμα και αμυδρής ακτινοβολίας. Επιπλέον, τείνουν να ανταποκρίνονται γραμμικά στην φωτεινότητα και έτσι παράγουν εικόνες υψηλής συνέπειας με την πραγματική φωτεινότητα που υπερβαίνουν και την αναλογική φωτογραφία. Σε αντίθεση με τους οπτικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούν φίλτρα και πρίσματα για τον διαχωρισμό του φωτός στις διαφορετικές φασματικές περιοχές, οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες συνήθως χρησιμοποιούν μέσα περίθλασης λόγω της αποδοτικότητας, του μικρού μεγέθους και βάρους τους.

Η λογική σάρωσης ενός οπτικού σαρωτή βασίζεται στην χρήση του μηχανισμού περιστροφής (π.χ. περιστρεφόμενου κατόπτρου) σε διεύθυνση κάθετη με την κίνηση της πλατφόρμας. Η κίνηση του μηχανισμού καλύπτει τμηματικά μια γραμμή του οπτικού πεδίου του αισθητήρα, ενώ η ταυτόχρονη μετατόπιση της πλατφόρμας δίνει την επόμενη γραμμή, οδηγώντας τελικά στην

σύνθεσης μιας πλήρους ψηφιδωτής εικόνας του περιβάλλοντος (Σχήμα 17α). Αυτός ο τρόπος σάρωσης ονομάζεται διαγραμμιζόμενη τροχιάς (cross-track) ενώ παρομοιάζεται επίσης με τον τρόπο καθαρισμού από ένα μικρό βουρτσάκι και ονομάζεται σάρωση whiskbroom. Αντίθετα, οι γραμμές μια πλάκας ανιχνευτών CCD μπορούν να τοποθετηθούν στο εστιακό επίπεδο του αισθητήρα ώστε το οπτικό τους πεδίο να είναι μια λεπτή παραλληλόγραμμη λωρίδα εδάφους. Καθώς η πλατφόρμα του αισθητήρα κινείται, το οπτικό πεδίο (ή εύρος πεδίου) του αισθητήρα κινείται μαζί με τα ίχνη της, σαρώνοντας όλο και μεγαλύτερο κομμάτι από την λωρίδα της γης (Σχήμα 17β). Αυτός ο τρόπος σάρωσης παρομοιάζεται αντίστοιχα με τον τρόπο καθαρισμού μιας μεγάλης σκούπας και ονομάζεται σάρωση pushbroom ή αλλιώς διαμήκους τροχιάς (along-track).

Το στιγμιαίο εύρος πεδίου (instantaneous field of view, IFOV) ορίζεται ως η περιοχή που είναι ορατή από τον αισθητήρα σε μια χρονική στιγμή, αναστέλλοντας θεωρητικά την κίνηση της πλατφόρμας και της μηχανικής κίνησης του σαρωτή (Σχήμα 17α). Επομένως, το στιγμιαίο εύρος πεδίου ορίζει την μικρότερη περιοχή που είναι δυνατόν να καταγραφεί από τον αισθητήρα και άρα το ελάχιστο όριο της χωρικής λεπτομέρειας του εδάφους που αναπαριστάται στην ψηφιακή εικόνα (χωρική διακριτική ικανότητα). Το μέγεθος του μικρότερου δυνατού στοιχείου της γήινης επιφάνειας που μπορεί να διακριθεί εξαρτάται άμεσα από το υψόμετρο του αισθητήρα. Ωστόσο, τα δεδομένα μιας τελικής εικόνας μπορεί να έχουν μικρότερη λεπτομέρεια στα εικονοστοιχεία τους απ' ό,τι ορίζεται από το στιγμιαίο εύρος πεδίου του αισθητήρα και της απόστασης του από τη γη, λόγω της επεξεργασίας που έχουν υποστεί. Για τον λόγο αυτό είναι θεμιτή η διάκριση των εννοιών «μέγεθος εικονοστοιχείου» και «χωρική διακριτικότητα». Το στιγμιαίο εύρος πεδίου δεν υφίσταται σε σαρωτές διαμήκους τροχιάς (along-track). Το εύρος πεδίου (field of view, FOV) ή γωνιακό εύρος πεδίου (Σχήμα 17) περιγράφει την συνολική γωνία που είναι δυνατόν να σαρωθεί από τον αισθητήρα και υφίσταται και για τους δύο τύπους σαρωτών. Το εύρος πεδίου καθορίζει και το πλάτος σάρωσης (swath width) της εικόνας, το οποίο εκφράζεται ως το πλάτος της λωρίδας σάρωσης στο έδαφος.

Το ύψος και η ταχύτητα της πλατφόρμας θα πρέπει να συμβαδίζει με τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταφέρει. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος τηλεπισκόπησης θα πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε οι ανιχνευτές του αισθητήρα να είναι σε θέση να λαμβάνουν αρκετή ποσότητα φωτονίων από κάθε σημείο του εδάφους που σαρώνεται για να παράγουν δυνατό σήμα. Το διάστημα που απαιτείται από κάθε αισθητήρα ώστε να παράγει ένα ακριβές σήμα για κάθε σημείο της γης λέγεται χρόνος παραμονής (dwell time). Επίσης, το εύρος φωτεινότητας που μπορεί να καταγραφεί σωστά από ένα αισθητήρα είναι η δυναμική του εμβέλειας (dynamic range). Οι σαρωτές pushbroom έχουν την δυνατότητα μεγαλύτερου χρόνου παραμονής για κάθε εικονοστοιχείο σε σχέση με τους whiskbroom λόγω της γραμμής ανιχνευτών που διαθέτουν. Έτσι, έχουν δυνατότητες υψηλότερης ραδιομετρικής, χωρικής και φασματικής ανάλυσης. Στις καταγραφές κάθε αισθητήρα υπεισέρχεται επίσης ένα ποσοστό θορύβου (noise), δηλαδή αποκρίσεις που δεν σχετίζονται με την πραγματική φωτεινότητα του στόχου. Ο θόρυβος δημιουργείται εν μέρει από συσσωρευμένα ηλεκτρονικά λάθη των διαφορετικών εξαρτημάτων του αισθητήρα. Για αποτελεσματική χρήση, τα συστήματα τηλεπισκόπησης πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα επίπεδα θορύβου να είναι μικρά σε σχέση με το σήμα (φωτεινότητα του στόχου). Η συνθήκη αυτή πρέπει να παραμένει σε ισχύ για ολόκληρη τη δυναμική εμβέλεια του αισθητήρα και ειδικότερα σε χαμηλά επίπεδα σήματος (σημεία χαμηλής φωτεινότητας) όπου ο θόρυβος είναι πιο αισθητός. Τα χαρακτηριστικά αυτά του οργάνου μετρώνται χρησιμοποιώντας τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο (signal-to-noise ratio, S/N ή SNR). Σε αυτόν τον λόγο ισχυρό ρόλο διαδραματίζουν το μέγεθος του εικονοστοιχείου, η δυναμική εμβέλεια του αισθητήρα,

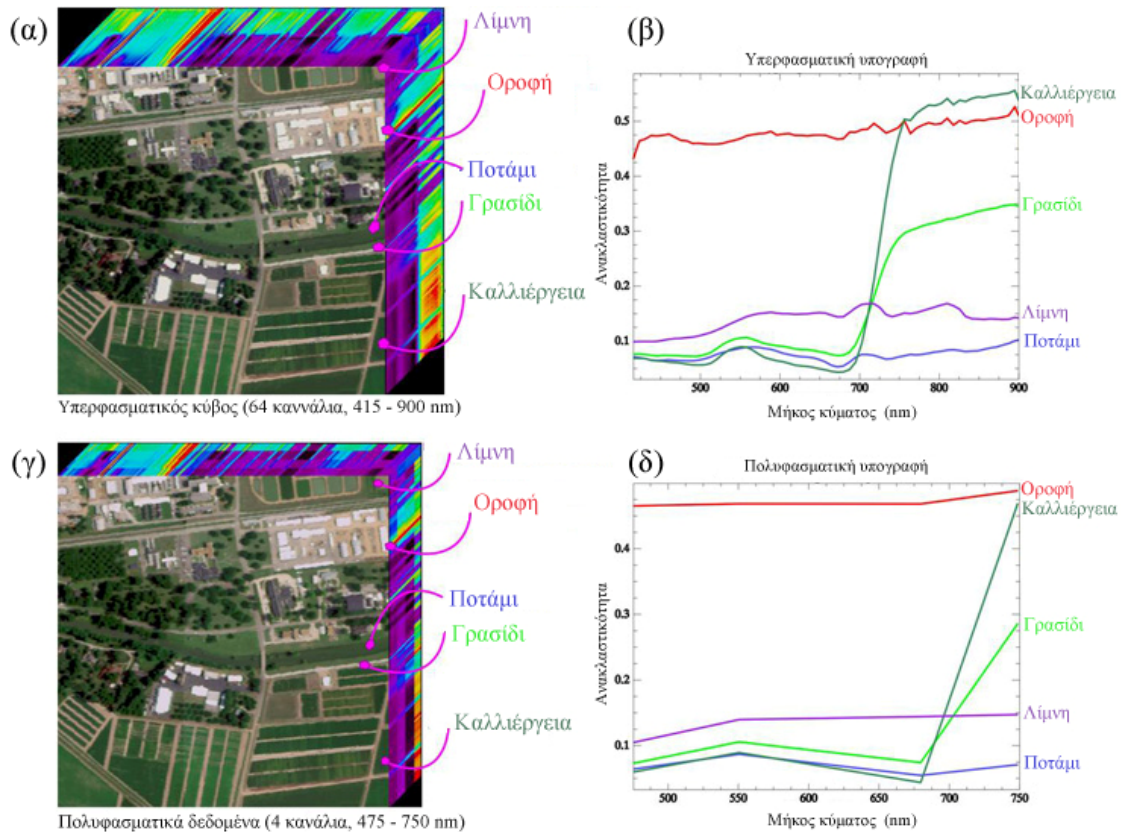
το ύψος και η ταχύτητα της πλατφόρμας. Στις τελικές εικόνες βέβαια υπεισέρχεται θόρυβος και από εξωτερικές πηγές όπως η ατμόσφαιρα.

Τα φίλτρα και τα μέσα περίθλασης που χρησιμοποιούνται από τους αισθητήρες για τον ορισμό των φασματικών ορίων κάθε καναλιού έχουν σαν αποτέλεσμα η ευαισθησία να μεταβάλλεται μέσα στα όρια των φασματικών περιοχών που εντοπίζονται από κάθε κανάλι, καθώς επίσης και τα όρια κάθε καναλιού να μην είναι απόλυτα. Η ευαισθησία του σήματος κάθε καναλιού είναι μέγιστη στα μήκη κύματος που βρίσκονται στη μέση των φασματικών ορίων του και ελάχιστη στις δύο άκρες του. Επομένως, η φασματική ευαισθησία ενός αισθητήρα συχνά καθορίζεται μέσω του ορισμού του συνολικού πλάτους στο ήμισυ του μεγίστου (full width half maximum, FWHM). Μέσω του FWHM, τα όρια κάθε καναλιού του αισθητήρα ορίζονται στο επίπεδο που η απόκριση του οργάνου φτάνει στο μισό της μέγιστης τιμής. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται και η φασματική ανάλυση του αισθητήρα, η οποία περιγράφει την ικανότητα του να ξεχωρίζει στενά εύρη μήκους κύματος. Όσο στενότερα είναι τα εύρη μηκών κύματος που είναι δυνατόν να εντοπιστούν, τόσο πιο υψηλή είναι η φασματική ανάλυση του αισθητήρα. Αναλόγως της φασματικής ανάλυσης, οι αισθητήρες διακρίνονται χοντρικά σε πανχρωματικούς (panchromatic), πολυφασματικούς (multispectral) και υπερφασματικούς (hyperspectral). Οι πανχρωματικοί αισθητήρες καταγράφουν την ενέργεια που ανακλάται από μία μεγάλη περιοχή του φάσματος (συνήθως στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο), χωρίς να διαχωρίζουν τα διαφορετικά χρώματα μεταξύ τους. Οι πολυφασματικοί αισθητήρες είναι οι πιο διαδεδομένοι στην τηλεπισκόπηση και καταγράφουν την ενέργεια ξεχωριστά σε διάφορες περιοχές του φάσματος. Η πιο προηγμένη μορφή πολυφασματικών αισθητήρων χαρακτηρίζονται ως υπερφασματικοί διότι έχουν την ικανότητα διάκρισης πολλών – μπορεί και εκατοντάδων – συνεχόμενων και πολύ στενών φασματικών περιοχών στο ορατό, εγγύς και μέσο υπέρυθρο φάσμα. Η πολύ υψηλή φασματική ανάλυση των υπερφασματικών αισθητήρων επιτρέπει την λεπτομερή αναγνώριση των φασματικών ταυτοτήτων των παρατηρούμενων στόχων.

Τέλος, η χρονική ανάλυση (ή χρόνος επανεπίσκεψης) είναι μια σημαντική παράμετρος των συστημάτων τηλεπισκόπησης. Είναι βεβαίως ένα χαρακτηριστικό μόνο των δορυφορικών αισθητήρων και εξαρτάται από την τροχιά τους γύρω από τη γη. Ορίζεται ως η απόλυτη χρονική περίοδος για έναν δορυφορικό αισθητήρα να απεικονίσει την ίδια περιοχή με την ίδια οπτική γωνία για δεύτερη φορά. Συμπίπτει ουσιαστικά με τον τροχιακό κύκλο του κάθε δορυφόρου. Για τους ηλιοσύγχρονους δορυφόρους παρατήρησης της γης, η περίοδος αυτή διαρκεί συνήθως μερικές μέρες και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του σημείου-στόχου, το εύρος πεδίου του δορυφόρου και άλλα τροχιακά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Η χρονική ανάλυση που προσφέρουν τα δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης είναι πολύ σημαντική για την παρακολούθηση κάποιων δυναμικών φαινομένων ή περιστατικών μικρής διάρκειας και είναι συνήθως από τις σημαντικότερες παραμέτρους – σε σημείο μάλιστα να ανταγωνίζεται όλες τις παραπάνω – σε κάποιες εφαρμογές (π.χ. παρακολούθηση της δυναμικής της βλάστησης).

Υπερφασματική τηλεπισκόπηση (Hyperspectral remote sensing)

Η τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει την εξέταση των παρατηρούμενων αντικειμένων σε διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η συνηθισμένη μορφή τηλεπισκοπικών αισθητήρων – που επικρατούσε τις τελευταίες τρεις δεκαετίες – βασίζεται στην χρήση λίγων και σχετικά μεγάλου φασματικού εύρους περιοχών. Τέτοιου τύπου αισθητήρες ονομάζονται πολυφασματικοί (multispectral) και διαθέτουν συνήθως τέσσερα με επτά κανάλια τα οποία εντοπίζονται κυρίως στην μπλε (420–480 nm), την πράσινη (530 – 580 nm), την κόκκινη (610–680 nm), την εγγύς υπέρυθρη (780–980 nm), την μέση υπέρυθρη (1.2 – 2.1 μm) και την θερμική υπέρυθρη (10.3 –



Σχήμα 18. Παράδειγμα ενός (α) υπερφασματικού κύβου και (β) των φασμάτων ανακλαστικότητας κάποιων στοιχείων της υπερφασματικής εικόνας. (γ) Μια αντίστοιχη δομή κύβου πολυφασματικών δεδομένων και (δ) η φασματική πληροφορία που αυτά περιέχουν. Η επιφανειακή εικόνα του υπερφασματικού κύβου απεικονίζει την περιοχή σε αληθινά χρώματα, ενώ οι πλαϊνές πλευρές του αναπαριστούν τα ακριανά στοιχεία της εικόνας όπως καταγράφηκαν από τα 64 συνεχόμενα κανάλια. Τα διαφορετικά χρώματα των πλευρικών επιφανειών αντιστοιχούν στις μεταβαλλόμενες φασματικές ιδιότητες των στοιχείων στα διαφορετικά κανάλια.

12.5 μm) περιοχή του φάσματος. Το φασματικό εύρος ενός καναλιού πολυφασματικού αισθητήρα είναι συνήθως γύρω στα 50 με 100 nm στο ορατό και πολύ παραπάνω από 100 nm στην υπέρυθρη περιοχή. Αντίθετα, η υπερφασματική τηλεπισκόπηση, η οποία κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στις εφαρμογές παρακολούθησης των οικοσυστημάτων τα τελευταία χρόνια, βασίζεται στην εξέταση πολλών και στενών φασματικών καναλιών (Bart 1994). Το φασματικό εύρος των περισσότερων υπερφασματικών οργάνων εντοπίζεται γύρω στα 10 nm. Εάν το φάσμα που καλύπτει ο αισθητήρας ξεκινά από τα 400 nm και φτάνει έως τα 1100 nm, φτάνουν περίπου 70 ξεχωριστά κανάλια για να συντάξουν ένα συνεχές φάσμα ανακλαστικότητας του στόχου. Σε υπερφασματικούς αισθητήρες που καλύπτουν και την μέση υπέρυθρη περιοχή, τα κανάλια ξεπερνάν τα 200. Τα υπερφασματικά δεδομένα αναπαριστώνται συχνά γραφικά ως μια τρισδιάστατη δομή, τον υπερφασματικό κύβο. Οι άξονες x, y του κύβου αυτού αποτελούν το μήκος και το πλάτος μιας συνηθισμένης εικόνας δύο διαστάσεων, ενώ ο άξονας z αποτελείται από την συσσώρευση των φασματικών δεδομένων καθώς τα διαδοχικά κανάλια στοιβάζονται το ένα μετά το άλλο (Σχήμα 18). Με αυτόν τον τρόπο τονίζεται γραφικά η ποσότητα της φασματικής

πληροφορίας που προσφέρουν τα υπερφασματικά δεδομένα κάνοντας σαφές ότι τα υπερφασματικά δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν είτε ως εικόνες είτε ως φασματικές καμπύλες.

Η φασματική ανάλυση των αισθητήρων περιορίζεται τεχνικά κυρίως λόγω των μεγάλων ταχυτήτων κίνησης των αερομεταφερόμενων και δορυφορικών πλατφορμών που οδηγούν αναπόφευκτα σε πολύ μικρό χρόνο παραμονής (dwell time). Ο περιορισμένος χρόνος παραμονής οδηγεί σε μεγάλα ποσοστά θορύβου (SNR) και αντισταθμίζεται μέσω της διεύρυνσης του φασματικού εύρους των καναλιών. Για τον λόγο αυτό, οι αισθητήρες της τεχνολογίας των οπτικών-μηχανικών σαρωτών σχεδιάζονται αναγκαστικά με διευρυμένο φασματικό εύρος ανά κανάλι. Το εμπόδιο αυτό ξεπεράστηκε χάρη στην τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων που εκμεταλλεύονται συσκευές συζευγμένου φορτίου (CCD). Μέσω των CCD αυξήθηκε κατά πολύ ο ρυθμός δειγματοληψίας των ανιχνευτών και δόθηκε η δυνατότητα μείωσης του εύρους των καναλιών. Προς αυτή την κατεύθυνση βοηθάει τόσο η αυξημένη ευαισθησία και απόδοση των CCD, όσο και δυνατότητα σάρωσης διαμήκους τροχιάς (along-track ή pushbroom). Οι οπτικοί-μηχανικοί σαρωτές εφαρμόζουν την σάρωση διαγραμμιζόμενης τροχιάς (cross-track ή whiskbroom), όπου μέσω μηχανικά περιστρεφόμενων καθρεπτών μετρώνται ένα-ένα τα εικονοστοιχεία κάθε γραμμής σάρωσης. Αντιθέτως, μέσω της σάρωσης διαμήκους τροχιάς μετράται ταυτόχρονα μία ολόκληρη σειρά εικονοστοιχείων μέσα στο εύρος πεδίου του αισθητήρα. Επομένως, αυξάνεται ο χρόνος παραμονής για κάθε εικονοστοιχείο και δίνεται η δυνατότητα μείωσης του φασματικού εύρους των καναλιών.

Παρόλο που η υπερφασματική τηλεπισκόπηση ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές, όπως περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, αποτελεί ταυτόχρονα μια ειδική κατηγορία τηλεπισκοπικών δεδομένων με πιο εξελιγμένα όργανα και ειδικότερες εφαρμογές. Τα υπερφασματικά δεδομένα παρέχουν τέτοια λεπτομέρεια και ακρίβεια που επιτρέπουν την έρευνα φαινομένων και ιδιοτήτων που διευρύνουν τα πλαίσια των παραδοσιακών μεθόδων τηλεπισκόπησης. Η ικανότητα εξαγωγής συνεχούς φασματικής απόκρισης των αντικειμένων-στόχων επεκτείνει την τηλεπισκόπηση στον χώρο της φασματοσκοπίας, της επιστήμης που αφοσιώνεται στην λεπτομερή εξέταση φασματικών δεδομένων υψηλής ακρίβειας και της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη. Η υπερφασματική τηλεπισκόπηση, για παράδειγμα, είναι ικανή να εφαρμόσει τεχνικές κλασικής φασματοσκοπίας για την μελέτη ατμοσφαιρικών αερίων και να τις χρησιμοποιήσει επίσης για την ορθή, ακριβή και λεπτομερή φασματική μέτρηση της γήινης επιφάνειας (Curran 1994, Curran & Kupiec 1995). Τα υπερφασματικά δεδομένα της επιφάνειας της γης διαθέτουν την λεπτομέρεια και την ακρίβεια για την σύγκρισή τους με τις φασματικές αποκρίσεις (φασματικές ταυτότητες) των υλικών που έχουν συλλεχτεί επίγεια, εναέρια ή δορυφορικά και έχουν κατανεμηθεί σε βάσεις δεδομένων οι οποίες αποτελούν τις φασματικές βιβλιοθήκες. Επίσης, είναι ικανά να αποτυπώσουν τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά φαινομένων απορρόφησης ή εκπομπής. Ωστόσο, τα όργανα της υπερφασματικής τηλεπισκόπησης διαφέρουν από αυτά της συμβατικής φασματοσκοπίας λόγω του γεγονότος ότι συλλέγουν πληροφορίες, όχι από σημειακούς στόχους, αλλά από περιοχές της γήινης επιφάνειας. Τα υπερφασματικά όργανα διαφέρουν επίσης και από τα υπόλοιπα όργανα τηλεπισκόπησης λόγω της ασυνήθιστα υψηλής φασματικής, χωρικής και ραδιομετρικής ανάλυσης αλλά και της προσεκτικής βαθμονόμησης τους. Κάποιοι υπερφασματικοί αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα σε 200 και πλέον κανάλια σε 10 με 12 bit. Λόγω των ικανοτήτων και της βαθμονόμησης τους, τα όργανα αυτά επεκτείνουν τα όρια της τηλεπισκόπησης όχι μόνο υπό την έννοια του εύρους των εφαρμογών της, αλλά εισάγοντας επίσης νέες έννοιες και τεχνικές ανάλυσης.

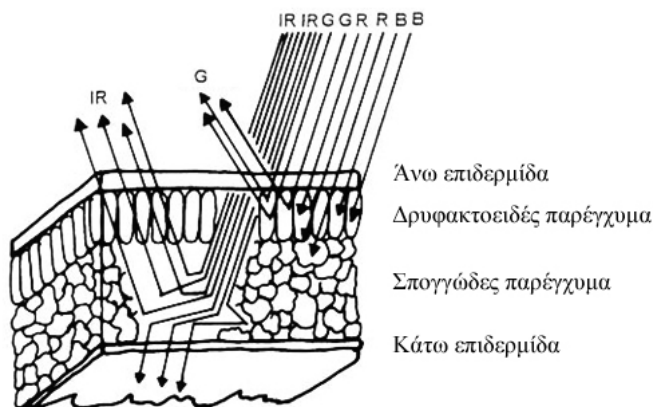
Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στα χερσαία οικοσυστήματα

Τα ιδιαίτερα και καινοτόμα χαρακτηριστικά των τηλεσκοπικών συστημάτων και μεθόδων αποδεικνύονται εξαιρετικά χρήσιμα στην μελέτη της βλάστησης. Ανάλογα με το πεδίο μελέτης επιλέγονται και τα κατάλληλα συστήματα εντοπισμού ή παρακολούθησης που θα εξυπηρετήσουν καλύτερα τον εκάστοτε σκοπό. Η πιο κοινή εφαρμογή τηλεπισκοπικών εικόνων είναι στην χαρτογράφηση φυσικών ή καλλιεργούμενων εκτάσεων γης. Ωστόσο, οι ιδιαίτερες δυνατότητες των συστημάτων τηλεπισκόπησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή πλήθους παραμέτρων της βλάστησης που μπορεί να είναι χρήσιμες στην διαχείριση δασικών εκτάσεων, στον σχεδιασμό και την παρακολούθηση καλλιεργειών και καλλιεργητικών πρακτικών, αλλά και στην παρακολούθηση και κατανόηση φυσικών φαινομένων και διεργασιών μεγάλης κλίμακας. Οι δορυφόροι παρακολούθησης της γης προσφέρουν την δυνατότητα της απευθείας εξέτασης περιβαλλοντικών προτύπων μεγάλης κλίμακας και των μεταβολών τους στο χρόνο. Η χωρική διάσταση των δεδομένων αυτών φτάνει την παγκόσμια κάλυψη, ενώ η χρονική διάσταση τους προσφέρει ημερήσια επανάληψη και αρχεία ολόκληρων δεκαετιών. Αυτές οι δυνατότητες έχουν ισχυρό αντίκτυπο στην αντίληψη και την επιστημονική θεώρηση των περιβαλλοντικών θεμάτων ανοίγοντας νέες προοπτικές στην κατανόηση θεμελιακών διαδικασιών που αποτελούν την βάση των παγκόσμιων κλιματικών και βιολογικών προτύπων.

Η επείγουσα ανάγκη διεύρυνσης της οικολογικής έρευνας χωρικά και χρονικά καταδεικνύεται από τις αυξανόμενες ανθρωπογενείς πιέσεις στους φυσικούς πόρους του πλανήτη που μεταβάλλουν την λειτουργία των οικοσυστημάτων σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα. Παρόλο που οι βασικές διεργασίες που συμβάλλουν στους βιογεωχημικούς κύκλους και η γενική δομή των κύκλων αυτών είναι γνωστές σε ικανοποιητικό βαθμό, οι ποσότητες των συστατικών που συμβάλλουν στο εσωτερικό των κύκλων, οι ρυθμοί μεταβολής τους και η διακύμανση τους χωρικά και χρονικά δεν είναι πλήρως κατανοητά. Επίσης, οι επιδράσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις διεργασίες αυτές είναι ελλιπώς γνωστές. Για την κατανόηση των ανθρωπογενών επιδράσεων στους βιογεωχημικούς κύκλους και της σημασίας τους σε σχέση με τις φυσικές διακυμάνσεις τους, είναι απαραίτητη η χρήση λεπτομερών δεδομένων σε πολλαπλές κλίμακες. Η τηλεπισκόπηση παρέχει τα κατάλληλα μέσα, μέσω των οποίων μπορούμε να παρατηρήσουμε τον δυναμικό χαρακτήρα της βίωσης της γης και να διευρύνουμε την περιορισμένη αντίληψη των παραδοσιακών μεθόδων έρευνας.

Δομή και φασματική συμπεριφορά του φύλλου και του θόλου

Οι περισσότερες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης στην μελέτη της βλάστησης εξαρτώνται από την γνώση των φασματικών ιδιοτήτων του φύλλου και του θόλου. Οι ιδιότητες αυτές κατανοούνται αρχικά μέσω της λεπτομερούς εξέτασης της δομής του φύλλου (Curran 1989). Το τυπικό έλασμα ενός φύλλου δικότυλου φυτού φέρει εξωτερικά επιδερμίδα (άνω και κάτω επιδερμίδα) και εσωτερικά της υπάρχει το μεσόφυλλο (Σχήμα 19). Συνήθως, στην κάτω επιδερμίδα εντοπίζονται τα στόματα, τα οποία επιτρέπουν την κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του φύλλου. Το μεσόφυλλο αποτελείται από δύο διαφορετικούς ως προς την μορφολογία τους ιστούς, το δρυφακτοειδές και το σπογγώδες παρεγχύμα. Τα δύο αυτά παρεγχύματα φέρουν τους χλωροπλάστες – τα πλαστίδια που περιέχουν φωτοσυνθετικές χρωστικές (χλωροφύλλες και καροτενοειδή) – και σε αυτά λαμβάνει χώρα η φωτοσύνθεση. Μέσα στο μεσόφυλλο εντοπίζεται επίσης ο αγωγός ιστός και άλλοι τύποι κυττάρων. Τα δρυφακτοειδή κύτταρα είναι πολύ κοντά το ένα με το άλλο, σχηματίζοντας στενούς μεσοκυτταρικούς χώρους διαμέτρου συνήθως λιγοστών μικρομέτρων. Οι χώροι αυτοί επαρκούν για την κυκλοφορία ενός λεπτού στρώματος αερίων

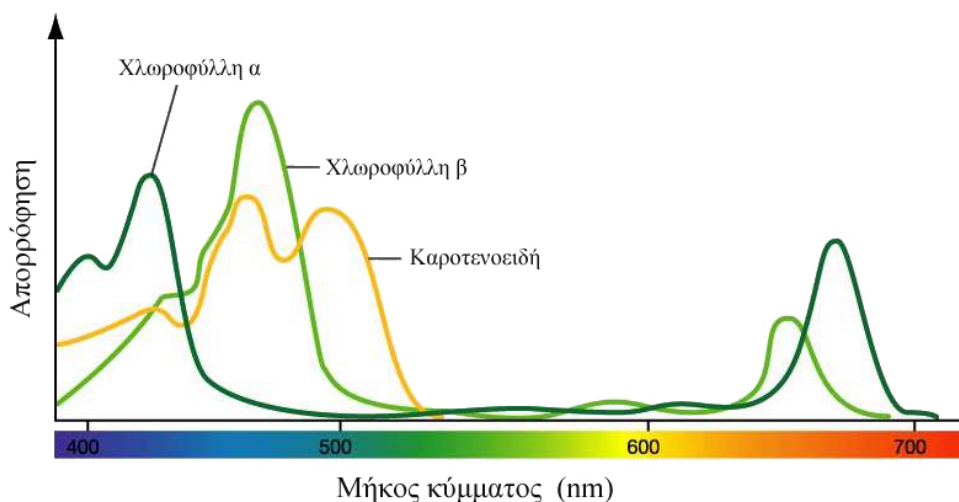


Σχήμα 19. Διάγραμμα της διατομής ενός υποθετικού τυπικού φύλλου και οι αλληλεπιδράσεις των δομικών στοιχείων του με την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Όπου R, G, B και IR η ακτινοβολία στο ερυθρό, πράσινο, μπλε και υπέρυθρο φάσμα αντίστοιχα.

ανάμεσα από τα κύτταρα ώστε να λαμβάνει χώρα η φωτοσύνθεση. Αντιθέτως, το σπογγώδες παρέγχυμα αποτελείται από κύτταρα που συνήθως έχουν ακανόνιστο σχήμα και αφήνουν μεταξύ τους μεγάλους μεσοκυτταρικούς χώρους. Στις θέσεις της κάτω επιδερμίδας που υπάρχουν στόματα, το σπογγώδες παρέγχυμα σχηματίζει αμέσως πίσω από αυτά ανοικτές κοιλότητες. Έτσι, το CO_2 που εισέρχεται στο φύλλο διαμέσου των στομάτων συγκεντρώνεται πρώτα στις κοιλότητες αυτές και από εκεί διοχετεύεται στους μεσοκυτταρικούς χώρους του

σπογγώδους και στη συνέχεια του δρυφακτοειδούς παρεγχύματος (Μποζαμπαλίδης 1993, Ridge 2005). Παρόλο που η δομή του φύλλου δεν είναι όμοια σε όλα τα φυτά, η παραπάνω περιγραφή παρέχει σε γενικές γραμμές τα κύρια κοινά στοιχεία της πλειοψηφίας των φυτών, ιδιαίτερα αυτών που είναι συνήθως σημαντικά σε μελέτες τηλεπισκόπησης.

Η φασματική απόκριση του φύλλου στην ορατή περιοχή του φάσματος ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από τις χλωροφύλλες. Το φως που διασχίζει τους ανώτερους ιστούς του φύλλου απορροφάται ισχυρά από τις χλωροφύλλες και τις άλλες βοηθητικές χρωστικές του μεσόφυλλου για να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία σύνθεσης υδρογονανθράκων από CO_2 και H_2O (φωτοσύνθεση). Ωστόσο, οι χλωροφύλλες δεν απορροφούν ισότιμα το σύνολο της διερχόμενης ακτινοβολίας. Η απορρόφηση των χλωροφυλλών και των άλλων φωτοσυνθετικών χρωστικών επικεντρώνεται στο ορατό φάσμα, στο οποίο η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι αρκετή ώστε να ενεργοποιήσει την απαιτούμενη ροή ηλεκτρονίων, αλλά συγχρόνως ικανοποιητικά ασθενής για την αποφυγή υπερβολικών βλαβών των βιολογικών μορίων. Η μπλε και η κόκκινη ακτινοβολία απορροφάται σε ποσοστό 70 με 90%, ενώ σε πολύ μικρότερο ποσοστό απορροφάται η πράσινη (Σχήμα 20). Συνεπώς ένα σημαντικό ποσοστό της πράσινης ακτινοβολίας ανακλάται από τα υγιή φύλλα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φαίνονται πράσινα στην ανθρώπινη οπτική αντίληψη. Η φασματική συμπεριφορά του φύλλου στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα δεν ελέγχεται από την απορρόφηση των χρωστικών αλλά κυρίως από την δομή του σπογγώδους παρεγχύματος. Η επιδερμίδα είναι συνήθως σχεδόν διαφανής όσον αφορά την υπέρυθρη ακτινοβολία, οπότε ελάχιστη ποσότητα υπέρυθρης ακτινοβολίας ανακλάται από την εξωτερική δομή του φύλλου. Εξάιρεση αποτελούν φυτά που έχουν αναπτύξει μορφολογικούς μηχανισμούς προστασίας στην επιφάνεια των φύλλων τους, όπως για παράδειγμα ισχυρά ανακλαστικό στρώμα εφυμενίδας ή τριχών. Η ακτινοβολία που εισέρχεται στο εσωτερικό του φύλλου σκεδάζεται ισχυρά από του ιστούς του μεσόφυλλου και κυρίως από το σπογγώδες παρέγχυμα και τις κοιλότητες που αυτό σχηματίζει (Σχήμα 19). Πολύ μικρό ποσοστό της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας απορροφάται από το φύλλο· το μεγαλύτερο ποσοστό σκεδάζεται με ανοδική (ανακλώμενη ακτινοβολία) ή καθοδική (διαβιβαζόμενη ακτινοβολία) πορεία. Κάποιες μελέτες υποστηρίζουν ότι το δρυφακτοειδές παρέγχυμα παίζει επίσης ισχυρό ρόλο στην σκέδαση της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας. Σε κάθε

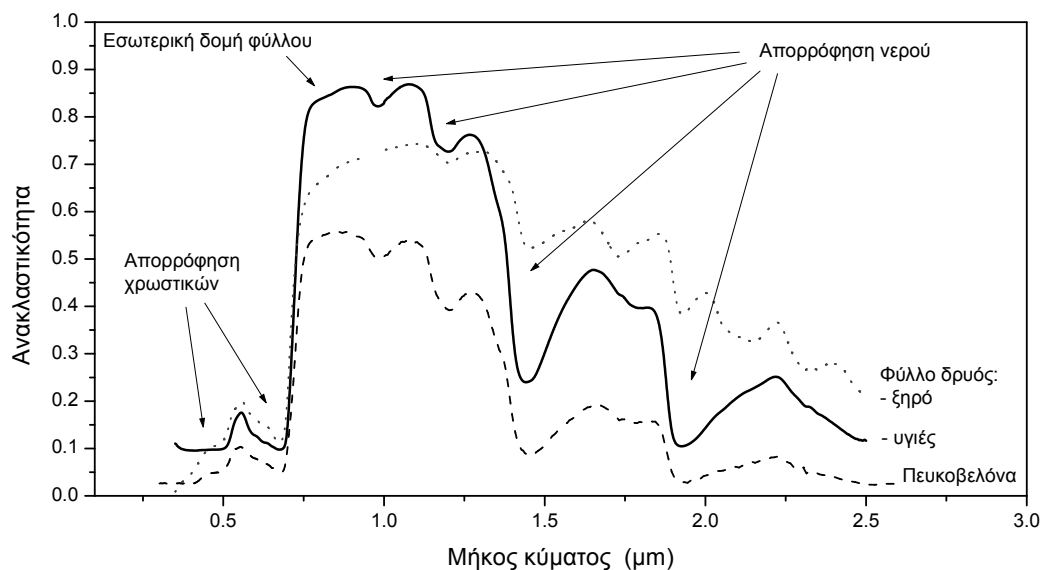


Σχήμα 20. Φάσματα απορρόφησης των φωτοσυνθετικών χρωστικών του φύλλου (χλωροφύλλη α, χλωροφύλλη β, καροτενοειδή).

περίπτωση πάντως η εσωτερική δομή του φύλλου είναι αυτή που ευθύνεται για την έντονη ανάκλαση του εγγύς υπέρυθρου από την ζώσα βλάστηση. Τέλος, στο μέσο υπέρυθρο φάσμα (μήκη κύματος πάνω από 1.3 μm), οι φασματικές ιδιότητες του φύλλου επηρεάζονται ιδιαίτερα από το περιεχόμενο του σε νερό λόγω της απορρόφησης που εμφανίζουν τα μόρια νερού σε μήκη κύματος της περιοχής αυτής (Cugran 1989, Knipling 1970).

Στις παρυφές του ορατού φάσματος, καθώς η απορρόφηση της κόκκινης ακτινοβολίας από τις χλωροφύλλες εξασθενεί, η ανακλαστικότητα αυξάνεται απότομα (Σχήμα 21). Η ανάκλαση του υπέρυθρου είναι πολύ εντονότερη από αυτή του πράσινου χρώματος. Η ιδιότητα αυτή κάνει την εγγύς υπέρυθρη περιοχή πολύ χρήσιμη για την μελέτη της βλάστησης. Επίσης, διευκολύνει τον διαχωρισμό των περιοχών που καλύπτονται από βλάστηση από το γυμνό έδαφος σε τηλεπισκοπικές εικόνες, αφού το τελευταίο φαίνεται πολύ πιο σκούρο στο εγγύς υπέρυθρο. Επιπλέον, οι διαφορές της ανακλαστικότητας διαφορετικών ειδών είναι συχνά εντονότερες στο εγγύς υπέρυθρο απ' ό,τι στο ορατό, διευκολύνοντας την αναγνώριση διαφορετικών ειδών ή τύπων βλάστησης. Οι φασματικές ιδιότητες των φύλλων μεταβάλλονται στα διαφορετικά αναπτυξιακά στάδια των φυτών και σε περιπτώσεις ασθενειών ή άλλων συνθηκών καταπόνησης (π.χ. ξηρασία). Σε γενικά πλαίσια, οι συνθήκες καταπόνησης και η φυσιολογική ανάπτυξη επηρεάζουν όλες τις φασματικές περιοχές του φύλλου ταυτόχρονα. Οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών επηρεάζουν το ορατό φάσμα, οι μεταβολές στην εσωτερική δομή και την μορφή του φύλλου επηρεάζουν το εγγύς υπέρυθρο και οι μεταβολές της εσωτερικής υγρασίας επηρεάζουν το μέσο υπέρυθρο φάσμα (Σχήμα 21). Επομένως, οι μεταβολές του φάσματος ανακλαστικότητας ενός φύλλου είναι ενδεικτικές των αλλαγών στην υγεία και την ακμαιότητα του φυτού.

Η γνώση της φασματικής συμπεριφοράς μεμονωμένων φύλλων είναι σημαντική για την κατανόηση των φασματικών χαρακτηριστικών του θόλου της βλάστησης, αλλά δεν είναι αρκετή για την αποσαφήνιση της συμπεριφοράς της ανακλαστικότητας του θόλου ακόμα και αν η κάλυψη του εδάφους από τον θόλο είναι πλήρης. Οι θόλοι της βλάστησης σχηματίζονται από πολλά διαφορετικά φύλλα που μπορεί να διαφέρουν ως προς το μέγεθος, τον προσανατολισμό, το σχήμα και τα βιοχημικά χαρακτηριστικά. Επίσης, ένας θόλος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από



Σχήμα 21. Φάσματα ανακλαστικότητας ενός φύλλου δρυός (*Quercus robur*) σε φυσική κατάσταση και μετά από ξήρανση, και ενός φύλλου πεύκου (*Pinus edulis*) σε φυσική κατάσταση (Clark et al. 2007).

διαφορετικά επίπεδα ή στρώματα φύλλων, με τα ανώτερα στρώματα να σχηματίζουν σκιάσεις που καλύπτουν τα χαμηλότερα στρώματα. Η δομή του θόλου και η θέση του ηλίου δημιουργούν πολύπλοκα συμπλέγματα αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας εντός του θόλου που συνδυάζουν την ανακλαστικότητα και την διαπερατότητα των φύλλων με την σκίαση των διαφορετικών επιπέδων και καθορίζουν την συνολική ανακλαστικότητα του θόλου. Η σκίαση ελαττώνει την ανακλαστικότητα του θόλου σε τιμές χαμηλότερες από αυτές που παρατηρούνται στα μεμονωμένα φύλλα. Θεωρείται ότι το ποσοστό του ορατού φάσματος που ανακλάται από ένα φύλλο είναι περίπου 10%, ενώ από ένα τυπικό θόλο 3 – 5%. Αντίστοιχα, το εγγύς υπέρυθρο φάσμα ανακλάται από ένα φύλλο σε ποσοστό 50%, ενώ από έναν θόλο κατά 35% (Knipling 1970). Η σχετική μείωση του ποσοστού της ανακλαστικότητας του εγγύς υπέρυθρου φάσματος ανάμεσα στο φύλλο και στον θόλο είναι πολύ μικρότερη αυτής του ορατού. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι η εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία διαπερνά τα φύλλα σε ποσοστό 50 – 60%. Έτσι, η εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία μεταβιβάζεται σε κάποιο ποσοστό στα χαμηλότερα στρώματα φύλλων, το οποίο ανακλάται από αυτά και το έδαφος και αναμεταδίδεται μέσω του θόλου προς την ατμόσφαιρα. Έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την ανακλαστικότητα του θόλου μέσω των οπτικών χαρακτηριστικών των φύλλων, του εδάφους, της δομής του θόλου και της θέσης του ηλίου (Hall et al. 1995).

Δείκτες βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης είναι αδιάστατες ραδιομετρικές μετρήσεις της βλάστησης που εκμεταλλεύονται την φασματική απόκριση των στοιχείων του θόλου. Ένας δείκτης βλάστησης αποτελείται από διάφορους μαθηματικούς συνδυασμούς φασματικών τιμών, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι για την απόδοση μίας τιμής που υποδεικνύει κάποιες ιδιότητες της βλάστησης. Η απλούστερη μορφή ενός δείκτη βλάστησης είναι ο λόγος ή η αφαίρεση μεταξύ δύο ψηφιακών τιμών δύο διαφορετικών καναλιών μιας τηλεπισκοπικής εικόνας. Η συνηθέστερη λογική σχεδιασμού ενός δείκτη βλάστησης είναι η χρήση μιας μαθηματικής σχέσης μεταξύ δύο

φασματικών περιοχών που εμφανίζουν αντίστροφη απόκριση σε ένα βιοφυσικό φαινόμενο ώστε η παραγόμενη τιμή του δείκτη να δίνει έμφαση στο φαινόμενο αυτό. Είναι επίσης σύνηθες να χρησιμοποιούνται δύο φασματικές περιοχές από τις οποίες μόνο η μια να είναι ευαίσθητη σε κάποιο χαρακτηριστικό της βλάστησης και η άλλη να μένει ανεπηρέαστη από αυτό, αποτελώντας έτσι την περιοχή αναφοράς. Εάν όμως χρησιμοποιηθούν δυο φασματικά κανάλια που έχουν όμοια απόκριση σε ένα φαινόμενο και η μαθηματική σχέση τους είναι απλή όπως ένας λόγος, τότε ο δείκτης αυτός στερείται ευαισθησίας στο παρατηρούμενο φαινόμενο.

Το φαινόμενο της έντονης φασματικής αντίθεσης της βλάστησης ανάμεσα στο ορατό και το υπέρυθρο φάσμα έχει χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό πολυάριθμων δεικτών βλάστησης. Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό της φασματικής απόκρισης της βλάστησης και δεν παρατηρείται στο γυμνό έδαφος ή σε τεχνητές δομές. Μάλιστα, η αντίθεση του ερυθρού από το εγγύς υπέρυθρο φάσμα είναι σχετικά ήπια σε περιοχές με αραιή βλάστηση ενώ εντείνεται σε περιοχές πλήρους κάλυψης του εδάφους από βλάστηση πυκνού θόλου. Επομένως, ένας απλός λόγος μεταξύ των δύο αυτών περιοχών είναι ενδεικτικός της ύπαρξης αλλά και της ακμαιότητας της βλάστησης. Ο λόγος της ανακλαστικότητας του εγγύς υπέρυθρου προς του ερυθρού (R_{NIR}/R_{red}) ήταν ο πρώτος δείκτης βλάστησης που χρησιμοποιήθηκε σε εικόνες τηλεπισκόπησης (Jordan 1969) και ονομάστηκε SR (Simple Ratio). Με την κανονικοποίηση του SR στα όρια τιμών $-1 - 1$ (Deering 1978) προέκυψε ο δείκτης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ο οποίος είναι αδιαμφισβήτητο ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάστησης έως και σήμερα. Ο NDVI προκύπτει από τον λόγο της διαφοράς της ανακλαστικότητας των περιοχών εγγύς υπέρυθρο και ερυθρό προς το άθροισμα τους:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red}) \quad (6)$$

Ο NDVI έχει το πλεονέκτημα ότι είναι αρκετά απλός στον υπολογισμό του, ενώ ταυτόχρονα οι ιδιότητες του ως κανονικοποιημένο κλάσμα ελαχιστοποιούν κάποιους τύπους επιδράσεων στις ραδιομετρικές μετρήσεις των καναλιών που χρησιμοποιεί.

Ωστόσο, οι δείκτες βλάστησης επηρεάζονται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες που δεν έχουν να κάνουν με τις ιδιότητες της βλάστησης. Οι κυριότερες αιτίες θορύβου εντοπίζονται στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, την ανάκλαση του εδάφους, την θέση του ηλίου, την θέση του αισθητήρα, την τοπογραφία της περιοχής, την βαθμονόμηση του αισθητήρα ή τυχόν θόρυβο που σχετίζεται με την ομαλή λειτουργία του οργάνου τηλεπισκόπησης. Επίσης, η δομή και η σύνθεση του θόλου της βλάστησης επιδρά συνήθως στις τιμές των δεικτών βλάστησης και σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την γεωμετρία φωτισμού και παρατήρησης (θέση του ηλίου σε σχέση με τη θέση του αισθητήρα). Οι παραπάνω παράγοντες επιδρούν αρχικά στις ποσότητες τις ακτινοβολίας των διαφορετικών περιοχών του φάσματος που ανιχνεύει ο αισθητήρας. Οι διακυμάνσεις αυτές ελαττώνονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του δείκτη βλάστησης. Για παράδειγμα, ο λόγος δύο περιοχών του φάσματος όπως ο SR και σε μεγαλύτερο βαθμό ο κανονικοποιημένος λόγος τους (π.χ. NDVI) ελαττώνει τις επιδράσεις που μπορεί να υφίσταται κάθε κανάλι μεμονωμένα. Όμως πολλοί τύποι επιδράσεων, όπως αυτές της ατμόσφαιρας, επηρεάζουν με διαφορετική ένταση τις διαφορετικές περιοχές του φάσματος και συνεπώς είναι ικανές να μεταβάλλουν την τιμή ενός δείκτη. Η επεξεργασία της εικόνας όσον αφορά τους παραπάνω παράγοντες είναι πολύ σημαντική για την περαιτέρω ελάττωση του θορύβου που υφίσταται στους δείκτες βλάστησης.

Οι εφαρμογές των δεικτών βλάστησης εξαρτώνται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των τηλεπισκοπικών οργάνων από τα οποία εξάγονται. Τις πρώτες δεκαετίες ανάπτυξης της τηλεπισκόπησης όπου επικρατούσαν τα πολυφασματικά δεδομένα (multispectral data), οι δείκτες

βλάστησης που ήταν δυνατόν να υπολογισθούν ήταν πολύ περιορισμένοι. Οι εφαρμογές στα χερσαία οικοσυστήματα περιοριζόντουσαν συνήθως στη χρήση του NDVI, μέσω του οποίου ήταν δυνατόν να μελετηθούν οι εποχιακές διακυμάνσεις της φαινολογίας των οικοσυστημάτων, η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, οι επιπτώσεις της ξηρασίας, των ανθρωπογενών επεμβάσεων ή των φυσικών καταστροφών. Άλλες μελέτες χρησιμοποίησαν τον NDVI ή άλλους δείκτες βλάστησης ως εργαλεία χαρτογράφησης της βλάστησης ενώ υπήρξαν επίσης και εφαρμογές σε αγροτικές πρακτικές. Από πολύ νωρίς ο δείκτης NDVI συσχετίστηκε με τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index - LAI), το ποσοστό της απορροφούμενης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation - FAPAR), και το ποσοστό φυτοκάλυψης της περιοχής (fractional vegetation cover - fc) (Asrar et al. 1984, Baret & Guyot 1991, Curran 1980, Goward & Huemmrich 1992, Running & Nemani 1988, Sellers 1985, Tucker et al. 1981, Tucker & Sellers 1986). Αυτές οι παράμετροι είναι πολύ σημαντικές στην μελέτη της πρωτογενούς παραγωγικότητας και του κύκλου του άνθρακα και γι' αυτό τον λόγο η παραγωγή παγκόσμιων χαρτών NDVI αποτέλεσε πολύ ενδιαφέρον στοιχείο στην μελέτη των κλιματικών αλλαγών.

Παρόλη την εντυπωσιακή δυναμική που προσφέρει η προοπτική της απευθείας μετατροπής του NDVI σε παραμέτρους βλάστησης όπως ο LAI ή το FAPAR σε μεγάλη χωρική κλίμακα, στην πράξη είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα. Σχετικές έρευνες έχουν δείξει ότι οι εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα στον NDVI (ή και άλλους δείκτες βλάστησης) και τις παραμέτρους της βλάστησης δεν είναι εύκολα γενικεύσιμες. Συνήθως, κάθε τέτοια εμπειρική σχέση εξαρτάται από τον τύπο βλάστησης, τις ιδιαιτερότητες του σημείου μέτρησης, τα χαρακτηριστικά του οργάνου τηλεπισκόπησης και την φαινολογική περίοδο. Επίσης, ο NDVI αναγνωρίστηκε ότι φτάνει σε κορεσμό σε σχετικά μέτρια ανάπτυξη της πυκνότητας του θόλου (τιμές LAI 3-5) (Begue 1993, Goel 1989) καθώς και ότι επηρεάζεται ισχυρά από εξωτερικούς παράγοντες όπως η γεωμετρία φωτισμού και παρατήρησης, η αρχιτεκτονική του θόλου, το έδαφος, η τοπογραφία, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και η βαθμονόμηση του αισθητήρα (Bannari et al. 1995, Burgess et al. 1995, Campbell & Norman 1998, Goel 1989, Gutman 1991, Hapke et al. 1996, Holben 1986, Holben et al. 1990, Huete 1988, Huete et al. 1992, Kaufman 1984, Kaufman & Tanre 1992, Ross 1981). Οπότε, η εφαρμογή τέτοιων εμπειρικών σχέσεων σε μεγάλη χωρική κλίμακα και για βάθος χρόνου, χωρίς τις απαραίτητες προϋποθέσεις ή πληροφορίες είναι παρακινδυνευμένη (Gobron et al. 1997, Goward & Huemmrich 1992, Huemmrich & Goward 1997). Κάποιοι από τους παραπάνω περιοριστικούς παράγοντες θα μπορούσαν να μετριαστούν βελτιώνοντας την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου δείκτη βλάστησης. Για τον λόγο αυτό πολλές μελέτες επικεντρώθηκαν στον σχεδιασμό βελτιωμένων δεικτών που να παράγουν σταθερότερες μετρήσεις σε σχέση με τον NDVI (Broge & Leblanc 2001, Gitelson et al. 1996, Haboudane et al. 2004, Huete 1988, Huete et al. 2002, Huete et al. 2006, Huete et al. 1994, Kaufman & Tanre 1992, Major et al. 1990, Roujean & Breon 1995).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπερφασματικών αισθητήρων (hyperspectral sensors) επέτρεψε την διεύρυνση των μεθόδων ανάλυσης και την εξερεύνηση περισσότερων βιολογικών παραμέτρων μέσω του λεπτομερούς φάσματος ανακλαστικότητας. Μέσω των πολλών και στενών καναλιών των υπερφασματικών αισθητήρων δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού πιο ειδικών δεικτών βλάστησης που μπορούν να επικεντρωθούν στον υπολογισμό των διαφορετικών βιοχημικών συστατικών της βλάστησης όπως οι φωτοσυνθετικές χρωστικές ή το νερό και επομένως μπορούν να εκτιμηθούν πιο έγκαιρα και με περισσότερη ακρίβεια οι συνθήκες καταπόνησης. Επίσης, μέσω του αναλυτικού φάσματος είναι δυνατή η εφαρμογή προηγμένων μεθόδων διόρθωσης των φασματικών δεδομένων της επιφάνειας της γης, ποσοτικοποιώντας την

απορρόφηση των συστατικών της ατμόσφαιρας. Αν και υπάρχει ήδη μεγάλη ποικιλία προτεινόμενων δεικτών που μπορούν να εφαρμοστούν σε υπερφασματικά δεδομένα (Broge & Leblanc 2001, Haboudane et al. 2004, Zarco-Tejada et al. 2005), ο περιορισμένος αριθμός μελετών στο πεδίο αυτό δεν επιτρέπει ακόμα την εξαγωγή ασφαλών και γενικεύσιμων συμπερασμάτων όσον αφορά την εφαρμογή τους. Παρόλα αυτά, τα υπερφασματικά δεδομένα ανοίγουν νέους ορίζοντες στις μεθόδους ανάλυσης των δεδομένων τηλεπισκόπησης που μπορεί να σχετίζονται αλλά σίγουρα ξεπερνούν την απλή εφαρμογή μαθηματικών τύπων στα επιμέρους κανάλια τους. Αυτές οι μέθοδοι συνήθως εκμεταλλεύονται το σύνολο της φασματικής πληροφορίας που είναι διαθέσιμη και υπόσχονται αυξημένη λεπτομέρεια και ακρίβεια στα αποτελέσματα τους. Σε αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνονται η παραγωγή του φάσματος ανακλαστικότητας (Demetriades-Shah et al. 1990), η κανονικοποίηση γραμμής βάσης (baseline normalization ή continuum removal) (Clark & Roush 1984) και η ανάλυση φασματικής ανάμιξης (spectral mixture analysis) (Roberts et al. 1997, 1993, Ustin et al. 1993). Τέλος, η αντιστροφή των μοντέλων μετάδοσης ακτινοβολίας στο θόλο (canopy radiative transfer models) και ο συνδυασμός τους με υπερφασματικά δεδομένα ανακλαστικότητας είναι μια ευρέως εφαρμόσιμη μέθοδος για την εξαγωγή χαρακτηριστικών της βλάστησης τα τελευταία χρόνια (Cho et al. 2008, Jacquemoud et al. 2009). Ωστόσο, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των δεικτών βλάστησης είναι η απλότητα και η αμεσότητα της χρήσης τους. Για την εφαρμογή τους δεν είναι απαραίτητη καμία υπόθεση ή βοηθητική πληροφορία εκτός από την ίδια την φασματική μέτρηση που χρησιμοποιείται στον μαθηματικό τύπο του δείκτη. Αντιθέτως, για πολλές πιο σύνθετες αναλύσεις είναι απαραίτητη η γνώση ή η υπόθεση περισσότερων δεδομένων για την περιοχή μελέτης, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, τις συνθήκες λήψης των εικόνων, τα χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος και άλλες παράμετροι, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πολύ σύνθετες και μεταβαλλόμενες χωρικά και χρονικά.

Μοντέλα ανακλαστικότητας θόλου (Canopy reflectance models)

Το μείζον πρόβλημα στην εφαρμογή των δεικτών βλάστησης για την εξαγωγή παραμέτρων βλάστησης είναι η δυσκολία γενίκευσης των εμπειρικών σχέσεων μεταξύ του δείκτη και της εκτιμώμενης παραμέτρου. Η κυριότερη εναλλακτική μέθοδος για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών της βλάστησης είναι μέσω της μοντελοποίησης της μετάδοσης και των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας μέσα στον θόλο. Τέτοια μοντέλα συνδυάζουν την φασματική συμπεριφορά του φύλλου με τη δομή του θόλου, την ανακλαστικότητα του εδάφους και την γεωμετρία φωτισμού και παρατήρησης για να παράγουν την αναμενόμενη φασματική συμπεριφορά του οικοσυστήματος (Hall et al. 1995). Το ζητούμενο όμως όταν χρησιμοποιείται σαν δεδομένο το φάσμα ανακλαστικότητας είναι η αντιστροφή τέτοιων μοντέλων για την εκτίμηση των παραμέτρων της βλάστησης. Οι μέθοδοι για την αντιστροφή τέτοιων μοντέλων είναι αρκετά πολύπλοκες και περιλαμβάνουν μεθόδους αριθμητικής βελτιστοποίησης (numerical optimization methods) (Jacquemoud et al. 2000, 1995), δημιουργία πινάκων παραπομπής (look-up tables) (Combal et al. 2003, Knyazikhin et al. 1998a, 1998b, Weiss et al. 2000) ή δημιουργία τεχνητών νευρωνικών δικτύων (artificial neural networks) (Bacour et al. 2006, Fang & Liang 2005, Walthall et al. 2004, Weiss & Baret 1999).

Οι δύο τελευταίες μέθοδοι απαιτούν μια εκπαιδευτική βάση δεδομένων που να αποτελείται από φάσματα ανακλαστικότητας θόλου συνδεδεμένα με τις αντίστοιχες βιοφυσικές παραμέτρους μέσω των οποίων προκύπτουν. Οι επιδόσεις τους βασίζονται στην ακρίβεια των βάσεων δεδομένων και τις μεθόδους μέσω των οποίων αυτές προέκυψαν. Ιδανικά, τέτοιες προσεγγίσεις θα πρέπει να βασίζονται για την ανάπτυξη τους πάνω σε δεδομένα πεδίου, τα οποία είναι φυσικά πολύ

περιορισμένα όσον αφορά την χωρική τους κάλυψη. Η προσέγγιση μέσω αριθμητικής βελτιστοποίησης (numerical optimization) προσφέρει μεν μια απευθείας εκτίμηση των ζητούμενων βιοφυσικών παραμέτρων από τα παρατηρούμενα φάσματα ανακλαστικότητας, αλλά περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις πολύπλοκες υπολογιστικές μεθόδους που προϋποθέτει. Ο υπολογιστικός φόρτος που δημιουργούν τέτοια μοντέλα έχει ως αποτέλεσμα η εφαρμογή τους να γίνεται απαγορευτική για μεγάλες γεωγραφικές περιοχές (Jacquemoud et al. 2000). Ένα κοινό μειονέκτημα όλων των μεθόδων αντιστροφής των μοντέλων ανακλαστικότητας θόλου έγκειται στο γεγονός ότι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων θόλου μπορεί να αντιστοιχούν σε πανομοιότυπα φάσματα ανακλαστικότητας (Atzberger 2004, Combal et al. 2003). Αυτό το φαινόμενο κάνει την επιλογή των αρχικών παραμέτρων σημαντική και επομένως η εκ των προτέρων γνώση μερικών χαρακτηριστικών της περιοχής που μελετάται γίνεται απαραίτητη (Atzberger 2004, Combal et al. 2003, Houborg et al. 2007).

Εκτίμηση πρωτογενούς παραγωγικότητας

Η πρωτογενής παραγωγικότητα της βλάστησης είναι ζωτικής σημασίας για όλα τα έμβια όντα του πλανήτη συμπεριλαμβανομένου φυσικά και του ανθρώπου. Όχι μόνο επειδή παρέχει βασικά υλικά αγαθά, όπως τροφή, ένδυση και ξυλεία, αλλά επίσης διότι δημιουργεί το περιβάλλον που είναι κατάλληλο για να είναι ο πλανήτης κατοικήσιμος. Η πρωτογενής παραγωγικότητα του πλανήτη τράβηξε περισσότερο την προσοχή των επιστημόνων τα τελευταία χρόνια επειδή συνδέεται απευθείας με τον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα. Η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ έχει αυξηθεί κατά 31% από το 1750 (IPCC 2001) λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και μπορεί να αλλάξει την ενεργειακή ισορροπία της γήινης επιφάνειας με αποτέλεσμα την μεταβολή του κλιματικού συστήματος (Knutson et al. 1999, Scott et al. 2000). Ωστόσο, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ δεν έχει αυξηθεί τόσο πολύ όσο αναμενόταν από υπολογισμούς που λάμβαναν υπ' όψιν τους όλες τις γνωστές πηγές και αποθήκες άνθρακα (Fan et al. 1998). Ένας παράγοντας στον οποίο αποδίδεται η διαφορά αυτή είναι η χερσαία βλάστηση, η οποία είναι ικανή να αποθηκεύσει σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικού CO₂ (Fan et al. 1998, Wofsy et al. 1993). Υπολογίζεται ότι τα χερσαία οικοσυστήματα απορροφούν περίπου 60 Gt άνθρακα ετησίως μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης (Janzen 2004). Η διαδικασία αυτή θεωρείται ότι επηρεάζεται ισχυρά από τις αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα και την αλλαγή του κλίματος (Nemani et al. 2002, 2003, Schimel et al. 2000). Τα μεγέθη, η δυναμική και οι επιδράσεις στην απορρόφηση άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα είναι ακόμα αβέβαια (Barford et al. 2001) και από το γεγονός αυτό πηγάζει η ανάγκη παρακολούθησης των διαδικασιών στην επιφάνεια της γης με σκοπό την κατανόηση του κύκλου του άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα (Running et al. 1999).

Οι πύργοι μέτρησης ροών Eddy (Eddy flux towers) προσφέρουν την δυνατότητα μέτρησης των ανταλλαγών CO₂, υδρατμών και ενέργειας μεταξύ των χερσαίων οικοσυστημάτων και της ατμόσφαιρας σε μακροπρόθεσμη και συνεχή βάση (Baldocchi et al. 2001, Running et al. 1999). Μέσω των μετρήσεων αυτών μπορεί να υπολογιστεί η πρωτογενής παραγωγικότητα της γύρω περιοχής με σχετικά άμεσο και αξιόπιστο τρόπο (Falge et al. 2002). Παρόλο που έχει στηθεί ένα αξιόλογο παγκόσμιο δίκτυο πύργων μέτρησης που αριθμεί σήμερα πάνω από 500 πύργους και 30 τοπικά δίκτυα (FLUXNET, <http://www.daac.ornl.gov/FLUXNET/fluxnet.html>), τα δεδομένα που προσφέρουν δεν είναι αρκετά από μόνα τους για την περιγραφή της παγκόσμιας ροής άνθρακα. Ένας πύργος Eddy παρέχει μετρήσεις ροής CO₂ που αφορούν μια συγκεκριμένη περιοχή (ίχνος πύργου - tower footprint), το μέγεθος και το σχήμα της οποίας εξαρτάται από το ύψος του πύργου, την τοπογραφία της περιοχής, τα φυσικά χαρακτηριστικά του θόλου, την ταχύτητα και την

κατεύθυνση του ανέμου (Osmond et al. 2004, Schmid 2002). Οι γραμμικές διαστάσεις του ίχνους ενός πύργου Eddy κυμαίνονται τυπικά από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως ένα χιλιόμετρο. Υπό αυτές τις συνθήκες το δίκτυο FLUXNET παρέχει μια χωρικά περιορισμένη οπτική των ροών άνθρακα. Εν τούτοις, αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο βαθμονόμησης και αξιολόγησης μοντέλων και προϊόντων παραγωγικότητας μεγάλης κλίμακας (Heinsch et al. 2005, Turner et al. 2003a). Η μοντελοποίηση του κύκλου του άνθρακα απαιτεί παραμετροποίηση του συνόλου της χερσαίας επιφάνειας του πλανήτη (Hall et al. 1995) και μάλιστα σε χωρικά και χρονικά συνεχή βάση, το οποίο είναι δυνατό μόνο με την χρήση τηλεπισκόπησης. Μοντέλα που επιχειρούν να κάνουν παγκόσμιες εκτιμήσεις της πρωτογενούς παραγωγικότητας χρησιμοποιούν συνήθως τηλεπισκοπικές εικόνες, οι οποίες προσφέρουν τεράστια χωρική κάλυψη και δυναμικά επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.

Πολλές πρώιμες μελέτες πάνω στην σχέση των δορυφορικών τηλεπισκοπικών εικόνων με την πρωτογενή παραγωγικότητα συνέδεσαν τον δείκτη NDVI απευθείας με την καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα (Net Primary Productivity – NPP) σε ετήσια κλίμακα (Goward et al. 1985, Tucker et al. 1986). Ωστόσο, μια τέτοια σχέση αποδεικνύεται σημαντικά μεταβαλλόμενη λόγω των κλιματικών μεταβολών από έτος σε έτος ή την αλλαγή διαχείρισης της περιοχής (Briggs et al. 1998, Diallo et al. 1991, Wylie et al. 1991). Από τότε, ποικιλία εφαρμογών έχουν χρησιμοποιήσει δεδομένα τηλεπισκόπησης σε διαφορετικούς αλγόριθμους για την εκτίμηση πρωτογενούς παραγωγικότητας σε μεγάλη χωρική κλίμακα (Aber & Federer 1992, Heimann & Keeling 1989, Potter et al. 1993, Prince & Goward 1995, Ruimy et al. 1996, Running & Hunt 1993, Sellers et al. 1996). Μια από τις ευρύτερα εφαρμοσμένες προσεγγίσεις για την μοντελοποίηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας είναι μέσω της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (light use efficiency – LUE) (Monteith 1972, 1977), η οποία εκφράζει την ολική πρωτογενή παραγωγικότητα (Gross Primary Productivity – GPP) ως προϊόν της απορροφημένης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (Absorbed Photosynthetically Active Radiation - APAR) και της αποδοτικότητας (ϵ) με την οποία η απορροφημένη ακτινοβολία μετατρέπεται σε βιομάζα:

$$GPP = \epsilon * APAR \quad (7)$$

Η προσέγγιση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός βασίζεται στην θεωρία της λειτουργικής σύγκλισης (Field 1991), υποθέτοντας ότι τα φυτά αναπτύσσουν την επιφάνεια των φύλλων του θόλου τους για να απορροφήσουν το φως σε σχέση με την διαθεσιμότητα των πόρων ως αποτέλεσμα της εξελικτικής διαδικασίας που έχει ως γνώμονα την βελτιστοποίηση της αποθήκευσης άνθρακα (Goetz et al. 1999). Η Εξίσωση 7 θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια θεμελιώδης και θεωρητική αρχή ή αλλιώς να εξελιχθεί σε ένα πιο σαφές μηχανιστικό μοντέλο. Οι παράμετροι ϵ και APAR καθορίζουν τον μέγιστο εφικτό ρυθμό φωτοσύνθεσης. Οι περιβαλλοντικοί και οι φυσιολογικοί παράγοντες που ελαττώνουν τον φωτοσυνθετικό ρυθμό μέσω ποικιλίας μηχανισμών επιδρούν είτε στην απορρόφηση της ακτινοβολίας (APAR), είτε στην αποδοτικότητα της απορρόφησης αυτής (ϵ), ή και στα δύο. Για παράδειγμα, η μακροχρόνια υδατική καταπόνηση ή η απουσία θρεπτικών συστατικών στο έδαφος μπορεί να μειώσει την λειτουργική φυλλική επιφάνεια του θόλου, οπότε και την απορροφούμενη ακτινοβολία (APAR). Οι ίδιες συνθήκες έχουν επίδραση επίσης στην αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ) μέσω της ελάττωσης ή της αναστολής της φωτοσυνθετικής διαδικασίας λόγω του κλεισίματος των στομάτων των φύλλων, την απενεργοποίηση ενζύμων και την ενεργοποίηση των φωτοπροστατευτικών μηχανισμών (Bjorkman & Demmig-Adams 1994, Gamon et al. 1997). Η αποδοτικότητα (ϵ) διαφοροποιείται επίσης ανάλογα με το είδος, την ηλικία και τον αναπτυξιακή φάση των φυτών (Field et al. 1994).

Περίπλοκες είναι επίσης και οι σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών ειδών με τις περιβαλλοντικές συνθήκες όσον αφορά την αποδοτικότητα της φωτοσύνθεσης λόγω των διαφορετικών προσαρμογών και μηχανισμών προστασίας κάθε είδους (Field & Mooney 1986, Prince & Goward 1996, Turner et al. 2003b).

Η συνεισφορά της τηλεπισκόπησης στα μοντέλα αποδοτικότητας χρήσης φωτός αφορά συνήθως την ποσότητα APAR, η οποία μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω ως το γινόμενο του ποσοστού της απορροφούμενης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (FAPAR) επί το σύνολο της προσπίπτουσας φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR):

$$APAR = FAPAR * PAR \quad (8)$$

Το FAPAR εξαρτάται από την φυλλική επιφάνεια του θόλου (LAI) και μπορεί να υπολογιστεί είτε μέσω δεικτών βλάστησης, είτε μέσω μοντέλων ανακλαστικότητας θόλου, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η PAR μπορεί επίσης να προσδιοριστεί μέσω τηλεπισκοπικών δεδομένων (Frouin & Pinker 1995) ή να μοντελοποιηθεί βάσει των επίγειων καταγραφών. Ο συντελεστής ε αποτελεί την κρισιμότερη παράμετρο ενός μοντέλου LUE διότι είναι δυναμικά αποκρινόμενος στις κυμαινόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και χωρικά μεταβαλλόμενος λόγω της διαφορετικής σύστασης των ειδών. Οι μέθοδοι μοντελοποίησης μιας τέτοιας παραμέτρου κρίνουν σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία του μοντέλου. Η πιο απλή θεώρηση θέτει την παράμετρο ε σταθερή χωρικά και χρονικά, ώστε οι μεταβολές στην πρωτογενή παραγωγικότητα να καθορίζονται από την απορρόφηση του φωτός. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι περιβαλλοντικές καταπονήσεις εκφράζονται στα οικοσυστήματα μέσω της μείωσης του APAR, δηλαδή την ελάττωσης της φωτοσυνθετικά ενεργής φυλλικής βιομάζας (Kumar & Monteith 1981, Myneni et al. 1995, Russell et al. 1989). Η προσέγγιση αυτή, παρόλο που σε κάποια οικοσυστήματα (π.χ. λιβάδια ή φυλλοβόλα δάση) και υπό μεγάλης χρονικής κλίμακας θεώρηση (π.χ. ετήσια παραγωγικότητα) μπορεί να συμβαδίζει ικανοποιητικά με τις πραγματικές τιμές (Gamon et al. 1993a, Russell et al. 1989), είναι απαγορευτικά απλοποιημένη για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την παγκόσμια ροή άνθρακα και την μελέτη της συμπεριφοράς των οικοσυστημάτων σε σχέση με το μεταβαλλόμενο κλίμα. Ειδικά εάν το ζητούμενο είναι η εφαρμογή του μοντέλου με λεπτομερή χρονική ακρίβεια (π.χ. ημερήσια παραγωγικότητα), τότε τα φαινόμενα περιορισμού της φωτοσύνθεσης λόγω κλιματικών και αναπτυξιακών παραγόντων θα πρέπει να ενσωματωθούν στην λειτουργία του αλγορίθμου.

Ανταποκρινόμενες στην ανάγκη μοντελοποίησης LUE μέσω μεταβαλλόμενης αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ε), πιο πρόσφατες προσεγγίσεις εισάγουν παραμέτρους που εξετάζουν τις επιδράσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών στα οικοσυστήματα και τις μετριάζουν χωρικά βάσει του τύπου βλάστησης (Potter et al. 1993, Prince & Goward 1995, Ruimy et al. 1994). Τα μοντέλα που προκύπτουν είναι πολύ πιο περίπλοκα από τις Εξισώσεις 7 και 8, αλλά μοιράζονται μια κοινή θεώρηση. Ορίζουν μία μέγιστη δυνατή ροή της απορροφούμενης ακτινοβολίας για κάθε είδος ή τύπο βλάστησης και την ελλοτώνουν μέσω παραγόντων που σχετίζονται με τις περιοριστικές περιβαλλοντικές ή φυσιολογικές συνθήκες. Κάποια βασικά θέματα που προκύπτουν μέσω της εισαγωγής περισσότερων δεδομένων και παραγόντων στον βασικό αλγόριθμο είναι τα μέσα υπολογισμού των παραγόντων αυτών, η ακρίβεια τους και η χρονική και χωρική κλίμακα που αυτά είναι διαθέσιμα (Hall et al. 1995, Sellers et al. 1995). Έως και σήμερα, η χρήση απλοποιημένων παραδοχών στον σχεδιασμό, η εξάρτηση από επίγεια δεδομένα φτωχής χωρικής κάλυψης και η χρήση θεωρητικών και υποθετικών δεδομένων στην λειτουργία τέτοιων μοντέλων αποτελούν βασικούς περιορισμούς στην ευρεία αποδοχή των αποτελεσμάτων τους. Η μεγαλύτερη πρόκληση

είναι ο σχεδιασμός τηλεπισκοπικών συστημάτων και μεθόδων, που να είναι ικανοί να παρέχουν το σύνολο των απαραίτητων πληροφοριών σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να παρακαμφθούν εξωτερικά συστήματα υποθετικών δεδομένων και μεγάλου υπολογιστικού φόρτου. Η δημιουργία μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας για την καταγραφή της μεταβαλλόμενης πρωτογενούς παραγωγικότητας έχει ήδη επιχειρηθεί. Οι Prince & Goward (1995) ανέπτυξαν το μοντέλο GLO-PEM, το οποίο παρήγαγε εκτιμήσεις ολικής και καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας σε παγκόσμια κλίμακα και ανάλυση 8x8 km μέσω δορυφορικών εικόνων ανάλογης ανάλυσης. Το τρέχον και πιο υποσχόμενο εγχείρημα εκτίμησης της παγκόσμιας πρωτογενούς παραγωγικότητας επιτελείται από την NASA (National Aeronautics and Space Administration) και χρησιμοποιεί κυρίως δεδομένα των δορυφόρων MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί βασίζεται επίσης στην θεώρηση LUE και ονομάζεται MOD17 (Running et al. 2000). Παρόλο που ο αλγόριθμος MOD17 και τα δεδομένα εισόδου του υπόκεινται σε συνεχείς βελτιώσεις για περίπου μία δεκαετία, τα αποτελέσματα του δεν έχουν φθάσει ακόμα στο επιθυμητό επίπεδο (Heinsch et al. 2006, Mu et al. 2007, Sims et al. 2006, Turner et al. 2006, 2005, Wu et al. 2010, Zhao et al. 2005).

Ωστόσο, η ποικιλία των αναδυόμενων αισθητήρων νέας τεχνολογίας, όπως οι υπερφασματικοί, παρέχουν ένα ευρύτερο πεδίο εργαλείων για την ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης της πρωτογενούς παραγωγικότητας. Η πιο υποσχόμενη μέθοδος σχετίζεται με την ανακλαστικότητα των φύλλων γύρω από τα 531 nm, η οποία είναι μια περιοχή που επηρεάζεται από τους φωτοπροστατευτικούς μηχανισμούς των φύλλων (Gamon et al. 1990, 1992, Penuelas et al. 1995a). Η ιδιαιτερότητα της μικρής αυτής περιοχής του φάσματος των φύλλων οδήγησε στον σχεδιασμό ενός δείκτη βλάστησης που ονομάστηκε PRI (Photochemical Reflectance Index) και χρησιμοποιεί έναν κανονικοποιημένο λόγο δύο περιοχών του φάσματος όπως και ο NDVI:

$$PRI = (R_{531} - R_{ref}) / (R_{531} + R_{ref}) \quad (9)$$

Όπου R_{531} είναι η ανακλαστικότητα στα 531 nm και R_{ref} είναι η ανακλαστικότητα σε ένα μήκος κύματος αναφοράς, το οποίο δεν επηρεάζεται από τους φωτοπροστατευτικούς μηχανισμούς και συγχρόνως ομαλοποιεί το σήμα στα 531 nm. Ως κανάλι αναφοράς έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται η ανακλαστικότητα στα 570 nm (Gamon et al. 1997, Penuelas et al. 1995a). Για την επιτυχή εφαρμογή ενός τέτοιου δείκτη είναι απαραίτητη η χρήση πολύ στενών φασματικών καναλιών, με FWHM 10 nm ή και στενότερα (Grace et al. 2007). Η ιδιαιτερότητα του δείκτη PRI είναι ότι είναι δυναμικά αποκρινόμενος στις ημερήσιες μεταβολές φωτοπροστασίας του φυτού (Gamon et al. 1990) και ειδικότερα στον κύκλο των ξανθοφυλλών. Λόγω της άμεσης σχέσης που έχουν οι μηχανισμοί αυτοί με την ρύθμιση της ροής της ενέργειας που κατευθύνεται προς την διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Demmig-Adams & Adams 1996, Demmig-Adams et al. 1996), ο PRI θεωρείται ικανός να αποδώσει μια άμεση μέτρηση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ). Υπάρχουν πολλές έρευνες που έχουν αποδείξει ότι ο PRI συνδέεται ισχυρά με την ϵ από το επίπεδο φύλλου (Gamon et al. 1997, Penuelas et al. 1995a, 1997b) και μικρής κλίμακας θόλου (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1992, Nichol et al. 2006, Styliniski et al. 2002, Trotter et al. 2002) έως και οικοσυστήματος (Drolet et al. 2005, 2008, Garbulsky et al. 2008, Nichol et al. 2000, 2002, Rahman et al. 2004) για διάφορα είδη και περιβάλλοντα. Η προοπτική αυτή δίνει νέα πνοή στον σχεδιασμό των μοντέλων αποδοτικότητας χρήσης φωτός, στα οποία δίνεται η δυνατότητα μιας άμεσης εκτίμησης της πρωτογενούς παραγωγικότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων βασιζόμενα εξολοκλήρου σε συστήματα τηλεπισκόπησης.

Άλλες εφαρμογές

Παραδοσιακά, η μεγαλύτερη δυναμική της τηλεπισκόπησης είναι η ικανότητα παραγωγής αντικειμενικών χαρτών για περιοχές πολύ μεγαλύτερες από αυτές που είναι δυνατόν να σχεδιαστούν μόνο με επίγεια μέσα. Όταν τα δεδομένα των τηλεπισκοπικών εικόνων είναι ικανά να αποτυπώσουν με κατανοητό τρόπο αντικείμενα ή διαδικασίες, οι χάρτες που παράγονται μας επιτρέπουν να διευρύνουμε σε μεγάλη κλίμακα την οπτική μας όσον αφορά τα οικολογικά πρότυπα και τις διεργασίες τους. Ιστορικά, η αεροφωτογραφία αποτέλεσε χρήσιμο εργαλείο για την χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών (Knipling 1969, Lillesand & Kiefer 1987). Σε αντίθεση με την πολύ υψηλή χωρική διακριτικότητα που προσέφερε η αεροφωτογραφία, πολλοί σύγχρονοι απεικονιστές λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερη χωρική ανάλυση (τυπικά με IFOV λίγων έως και χιλιάδων μέτρων). Ωστόσο, έχουν προστεθεί άλλα πλεονεκτήματα στα σύγχρονα συστήματα τηλεπισκόπησης, όπως η ψηφιακή μορφή δεδομένων και η αυξημένη φασματική ανάλυση. Επίσης, η επαναληψιμότητα των απεικονίσεων και η συνεχής παρακολούθηση προσθέτει μία ακόμη διάσταση στα δεδομένα, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εξέταση διαδικασιών όπως οι αλλαγές στην φαινολογία των οικοσυστημάτων και τις χρήσεις της γης (Hall et al. 1991, Malingreau et al. 1989). Η εξερεύνηση της φασματικής και χρονικής πληροφορίας σε χωρικό περιβάλλον προσφέρει δυναμικούς νέους τρόπους στον διαχωρισμό χαρακτηριστικών και λειτουργικών καταστάσεων. Ο συνδυασμός χωρικών, χρονικών και φασματικών διαστάσεων σε μια δομημένη μορφή πολυδιάστατων δεδομένων δύναται να αποκαλύψει σημαντικά οικολογικά πρότυπα και διαδικασίες. Τα δεδομένα τέτοιας μορφής αποτελούν βασικά συστατικά εργαλείων χαρτογράφησης και μοντελοποίησης (Geographic Information Systems – GIS, Jensen 1996) που αποτελούν αναπτυσσόμενο τομέα στην οικολογική έρευνα. Η οικολογία τοπίου (Landscape ecology, Turner & Gardner 1991) και η παγκόσμια οικολογία (Global ecology, Walker & Steffen 1996) αποτελούν παραδείγματα νέων πεδίων έρευνας που αναδύονται από την σύνθεση δεδομένων προτύπου και διαδικασίας.

Η κύρια χρήση της τηλεπισκόπησης ακόμα και σήμερα είναι για την εκτίμηση της ποικιλίας, του τύπου και της έκτασης των στοιχείων που καλύπτουν την επιφάνεια της γης, το οποίο είναι ουσιαστικό ζητούμενο σε πολλές οικολογικές εφαρμογές. Η κατασκευή χαρτών δεδομένων χρήσης γης, οι οποίοι αντανakλούν τις ανθρωπογενείς επιδράσεις στο φυσικό περιβάλλον είναι επίσης συχνή εφαρμογή της τηλεπισκόπησης σήμερα (Hurt et al. 2001). Υπάρχει ποικιλία προσεγγίσεων χαρτογράφησης, οι οποίες διαφέρουν όσον αφορά τις δυνατότητες λεπτομερούς διάκρισης των στοιχείων της επιφάνειας της γης και των χρήσεων για τις οποίες προορίζονται (Franklin & Wulder 2002). Η συνήθης μέθοδος χαρτογράφησης σήμερα είναι η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων ομαδοποίησης (statistical clustering methods) σε πολυφασματικά δεδομένα τηλεπισκόπησης. Η εισαγωγή της χρονικής διάστασης στα τηλεπισκοπικά δεδομένα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αναγνώριση των διαφορετικών τύπων βλάστησης. Ενώ χρησιμοποιώντας μόνο μια εικόνα είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν οι διαφορετικοί τύποι βλάστησης διότι έχουν παρόμοια φασματική συμπεριφορά (Raven et al. 1986), η διαθεσιμότητα μιας χρονικής αλληλουχίας απεικονίσεων επιτρέπει την εκμετάλλευση των διαφορετικών εποχιακών προτύπων ανάπτυξης κάθε τύπου βλάστησης για τον διαχωρισμό τους (Gamon et al. 1995). Η φασματική διάσταση είναι επίσης ιδιαίτερα χρήσιμη στην χαρτογράφηση της βλάστησης. Τα υπερφασματικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές ώστε να αξιοποιηθεί η πλούσια φασματική πληροφορία που προσφέρουν. Η ανάλυση φασματικής ανάμιξης (spectral mixture analysis) αποτελεί μία ιδιαίτερα χρήσιμη διαδικασία για τον διαχωρισμό φασματικά παρόμοιων συστατικών της επιφάνειας της γης (Roberts et al. 1998). Μέσω τη ανάλυσης αυτής είναι δυνατόν να

αναπαρασταθούν συγκριτικά τα επίπεδα πράσινης και νεκρής βιομάζας που σχετίζονται με την σύνθεση της βλάστησης, τις εποχιακές διακυμάνσεις της ή τα επίπεδα διατάραξης της (Gamon et al. 1993a, Roberts et al. 1998). Η ικανότητα ακριβούς αποτύπωσης των κυρίαρχων ειδών ή λειτουργικών τύπων βλάστησης πρόκειται να βελτιώσει τα μοντέλα λειτουργίας των οικοσυστημάτων για τα οποία είναι ουσιώδης η ταξινόμηση της βλάστησης. Επίσης, η έρευνα στον τομέα του σχεδιασμού μοντέλων κινδύνου πυρκαγιάς και διαχείρισης φυσικών πόρων εξαρτώνται άμεσα από την ακρίβεια των μεθόδων χαρτογράφησης της βλάστησης.

Μια διαφορετική οπτική στην χαρτογράφηση των χερσαίων οικοσυστημάτων παρέχεται από ενεργητικά συστήματα τηλεπισκόπησης (light detection and ranging – LIDAR, interferometric synthetic aperture radar – InSAR). Τα συστήματα αυτά παρέχουν την δυνατότητα δομικών μετρήσεων των στοιχείων στην επιφάνεια της γης και επομένως είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές σε χερσαία οικοσυστήματα και ιδιαίτερα στα δάση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χαρτογράφηση του τύπου κάλυψης του εδάφους, αλλά επίσης παρέχουν και δεδομένα ύψους του θόλου (Zhou et al. 2009). Τα δεδομένα αυτά είναι εξαιρετικά χρήσιμα στην εκτίμηση της βιομάζας και των αποθηκών άνθρακα των δασών (Popescu et al. 2004), οι οποίες είναι ουσιαστικές παράμετροι στην έρευνα του παγκόσμιου κύκλου του άνθρακα και των κλιματικών αλλαγών. Η τεχνολογία των συστημάτων LIDAR προσφέρει λεπτομερή δομικά δεδομένα που αφορούν τον θόλο της βλάστησης και σε συνδυασμό με πολυφασματικά δεδομένα είναι δυνατόν να υπολογιστούν πολύ χρήσιμες παράμετροι όπως το πάχος των κορμών, ο όγκος και η πυκνότητα του θόλου, ακόμα και σε κλίμακα μεμονωμένου δέντρου (Reutebuch et al. 2005).

Ποικιλία τηλεπισκοπικών εφαρμογών εντοπίζονται επίσης στο πεδίο της γεωργίας ακριβείας (precision agriculture). Το πεδίο αυτό βασίζεται στην γνώση της φυσικής χωρικής διακύμανσης πολλών παραμέτρων που επηρεάζουν την αγροτική παραγωγή (π.χ. τύπος, ποιότητα και υγρασία εδάφους, ηλιακή ακτινοβολία, βαθμός αποστράγγισης). Η γνώση αυτή χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί ο σχεδιασμός των γεωργικών πρακτικών (π.χ. λίπανση, άρδευση, όργωμα, ψέκασμα) και η εφαρμογή τους σε διαφορετικούς βαθμούς κατά μήκος της καλλιέργειας, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε περιοχής. Τα αναγκαία δεδομένα για την ανάπτυξη τεχνικών γεωργίας ακριβείας είναι δυνατόν να αποκτηθούν από συστήματα τηλεπισκόπησης διότι τα τελευταία είναι ικανά να αποδώσουν χαρτογραφικές αναπαραστάσεις των αγροτικών περιοχών και συνεχή παρακολούθηση των διακυμάνσεων πολλών απαραίτητων παραμέτρων όπως οι ιδιότητες του εδάφους (Post et al. 1988), η ανάπτυξη (Haboudane et al. 2004), η υδατική κατάσταση (Sepulcre-Canto et al. 2006) και η φυσιολογική κατάσταση των φυτών (Suarez et al. 2010). Τέτοιου τύπου δεδομένα μπορούν να συνδυαστούν με σύγχρονο αγροτικό εξοπλισμό, εφοδιασμένο με συστήματα GPS (Global Positioning System), για την εφαρμογή των κατάλληλων αγροτικών πρακτικών ανά περιοχή και καλλιέργεια (Vanden Heuvel 1996).

Η τηλεπισκόπηση μέσω δορυφορικών αισθητήρων έχει επιτρέψει την διεξαγωγή μελετών παγκόσμιας κλίμακας. Οι μελέτες αυτές έχουν συμβάλει στην αναγνώριση των αλλαγών που συμβαίνουν στα οικοσυστήματα του πλανήτη και αποτελούν ενδείξεις των επιδράσεων των κλιματικών αλλαγών (Lucht et al. 2002). Η συνεχής χαρτογράφηση της γης από τους δορυφόρους τις τρεις τελευταίες δεκαετίες περιγράφει τις μεταβολές που συντελούνται στην δομή της βλάστησης, την πρωτογενή παραγωγικότητα και την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου. Στα δάση του βορρά, τα οποία αποτελούν σημαντικές αποθήκες άνθρακα, παρατηρείται επιμήκυνση της αναπτυξιακής περιόδου και επέκταση της κατανομής τους ακόμα πιο βόρεια (Myneni et al. 2001, Zhou et al. 2001). Επίσης, σημαντικές εφαρμογές έχει η τηλεπισκόπηση σε οικολογικές μελέτες βιοποικιλότητας και κατανομής ειδών. Οι τάσεις μεταβολής της βλάστησης σε μεγάλη κλίμακα είναι δυνατόν να μετρηθούν μέσω της τηλεπισκόπησης και να παρέχουν έτσι απευθείας

εκτιμήσεις για την εξαφάνιση ενδιαιτημάτων. Επίσης, συμβάλουν στον εντοπισμό των αλλαγών που συμβαίνουν στις κατανομές των ειδών και στην μοντελοποίηση των ρυθμών εξαφάνισής τους (Brooks et al. 2002, Myers et al. 2000). Δορυφορικά πολυφασματικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των ρυθμών αποψίλωσης των τροπικών δασών (Achard et al. 2002) καθώς επίσης και για την μελέτη των συνεπειών των ανθρώπινων παρεμβάσεων στην βιωσιμότητα των δασών (Siegert et al. 2001). Τέλος, ποικίλες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης σχετίζονται με τον κίνδυνο και τα αποτελέσματα των πυρκαγιών. Έχει στηθεί ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα που βασίζεται σε πολυφασματικούς αισθητήρες για τον σχεδόν άμεσο εντοπισμό πυρκαγιών (Global Fire Monitoring Center – GFMC, <http://www.fire.uni-freiburg.de/>) και έχει επιχειρηθεί να χαρτογραφηθούν οι περιοχές που έχουν καεί παγκοσμίως (Tansey et al. 2004).

ΣΚΟΠΟΣ

Ο γενικός σκοπός της έρευνας είναι η αποτίμηση των δυνατοτήτων που προσφέρονται από την τηλεπισκόπηση όσον αφορά την παρακολούθηση χερσαίων οικοσυστημάτων μέσω της ανασκόπησης των διαθέσιμων δεδομένων και των αντίστοιχων εφαρμογών τους, καθώς και η εξέταση των εφαρμόσιμων μεθοδολογιών για την μελέτη του δυναμικού χαρακτήρα της βλάστησης. Πρώτο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση αποτέλεσε η αξιολόγηση των διαθέσιμων τηλεπισκοπικών δεδομένων βάσει επίγειων οικοφυσιολογικών μετρήσεων ώστε να βρεθούν τα δεδομένα και οι μεθοδολογίες μέσω των οποίων προκύπτουν χρήσιμα αποτελέσματα. Ακολούθως, αυτά εφαρμόστηκαν κατάλληλα ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί το μεγάλο αρχείο δορυφορικών δεδομένων σε συνδυασμό με το αντίστοιχο των μετεωρολογικών καταγραφών για να προκύψει έρευνα της δυναμικής σχέσης κλίματος – βλάστησης. Σε δεύτερο στάδιο, εξερευνήθηκαν οι πιο σύγχρονες πειραματικές τεχνολογίες αισθητήρων και εφαρμόστηκαν νέες μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης συγκριτικά με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο εξετάστηκαν οι προοπτικές των δυνατοτήτων της τηλεπισκόπησης για μελλοντικές εφαρμογές.

Απώτερος στόχος της μελέτης είναι η αξιοποίηση των καταλληλότερων δεδομένων για τον σχεδιασμό μεθοδολογιών μέσω των οποίων θα καθίσταται εφικτή η εκτίμηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων. Η πληροφορία αυτή σε παγκόσμιο επίπεδο θα διευρύνει την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της βιόσφαιρας, της ατμόσφαιρας και του κλίματος και θα συμβάλει σε μια ολοκληρωμένη οπτική των επιπτώσεων που έχουν οι ανθρωπογενείς πιέσεις στους φυσικούς πόρους και τις κλιματικές αλλαγές.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Είδη και περιοχές μελέτης

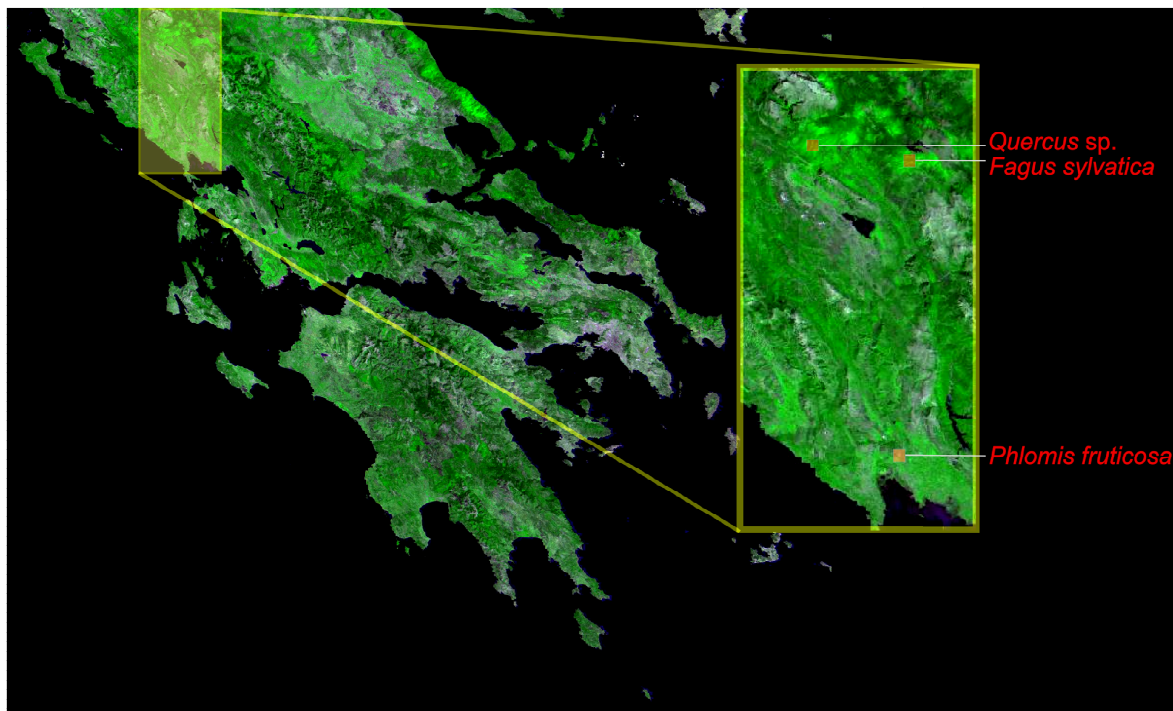
Fagus sylvatica

Η δασική οξιά (*Fagus sylvatica*) είναι ένα φυλλοβόλο δέντρο με θερινό κύκλο ανάπτυξης. Παρουσιάζει άνθιση τους μήνες Απρίλιο - Μάιο και ωρίμανση καρπών κατά την 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 συγκόμωση. Σχηματίζει αμιγή ή μικτά δάση, απαιτεί νωπά, περιεκτικά σε οργανική ουσία, γόνιμα εδάφη και δεν αντέχει την ατμοσφαιρική ρύπανση. Είναι τυπικό είδος των δασών της Ευρώπης (εκτός από το βορειότερο τμήμα της) και εξαπλώνεται ανατολικά μέχρι την Ρουμανία, ενώ η παρουσία του στον ελλαδικό χώρο αποτελεί το νοτιότερο άκρο εξάπλωσης του. Στην Ελλάδα εμφανίζεται τυπικά σε υψόμετρα από 1000 έως 1800 m, στην 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 ενάμιση μήνα. Τα δάση *Fagus sylvatica* εμφανίζονται συνήθως σε νησίδες και προτιμούν βόρειες εκθέσεις (BA, B, ΒΔ) και πυριτικά πετρώματα.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας μελετήθηκε ένα δάσος οξιάς (*Fagus sylvatica*) νοτιοδυτικά της τεχνητής λίμνης του Μετσόβου (φράγμα πηγών Αώου) (Lat 39° 47.95', Lon 21° 1.34'), σε υψόμετρο 1270 – 1371 m. Η περιοχή αυτή δεν παρουσιάζει έντονες κλίσεις ενώ καλύπτεται αποκλειστικά από το συγκεκριμένο είδος. Επιπλέον, το δάσος είναι αρκετά πυκνό και κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου δεν εμφανίζονται κενά στο θόλο. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν την συγκεκριμένη περιοχή ιδανική για εξαγωγή δορυφορικών δεδομένων για την μελέτη της οξιάς. Ωστόσο, η περιοχή καθαρού δάσους οξιάς δεν καλύπτει πολύ μεγάλη έκταση, με την παρουσία της μαύρης Πεύκης (*Pinus nigra*) να είναι έντονη στις γύρω περιοχές. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η περιοχή καλύπτεται συχνά από χιόνι.

Quercus sp.

Τα μελετώμενα είδη δρυός είναι η ευθύφλοιος (*Quercus cerris*) και η πλατύφυλλη (*Quercus frainetto*). Και τα δύο είδη είναι φυλλοβόλα δέντρα με θερινό κύκλο ανάπτυξης που φτάνουν έως και 25 m ύψος (το είδος *Q. cerris* σε εξαιρετικές περιπτώσεις τα 35 m) με διάμετρο κορμού έως και 2 m. Η άνθιση και των δύο ειδών παρατηρείται τους μήνες Απρίλιο – Μάιο, ενώ η ωρίμανση των καρπών του *Q. frainetto* είναι μονοετής και του *Q. cerris* διετής (Σεπτέμβριος - Νοέμβριος). Αμφότερα τα μελετώμενα είδη δρυός απαιτούν βαθιά, νωπά και γόνιμα εδάφη για την ανάπτυξη τους. Το είδος *Q. cerris* είναι μέτρια φωτόφιλο και ανθεκτικό στο ψύχος, ενώ το *Q. frainetto* χαρακτηρίζεται ως ημισκιάφυτο και σχετικά ψυχρόβιο και υγρόβιο. Στον ελλαδικό χώρο συναντώνται τυπικά στην παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης σε υψόμετρα από 600 έως 1000 m, σε αμιγείς ή μικτές συστάδες με άλλα είδη του γένους τους ή άλλα φυλλοβόλα. Η ζώνη αυτή αποτελεί την συνέχεια της ευμεσογειακής ζώνης βλάστησης, η οποία είναι μια σχεδόν συνεχής λωρίδα κατά μήκος των ακτών της ηπειρωτικής χώρας. Συνεπώς, η παραμεσογειακή ζώνη περιλαμβάνει



Εικόνα 2. Οι θέσεις των περιοχών μελέτης του ελλαδικού χώρου όπως αποτυπώνονται σε μία δορυφορική εικόνα ψευδοχρωματικής σύνθεσης. Η εικόνα προέρχεται από τον δορυφόρο EOS MODIS στην μέγιστη χωρική διακριτικότητα του (250 m) και αποτελεί την βέλτιστη σύνθεση των παρατηρήσεων του πρώτου 16ήμερου του Σεπτεμβρίου 2008. Στην ψευδο-φυσική χρωματική σύνθεση που παρουσιάζεται, ως πράσινο χρώμα τέθηκε η ανακλαστικότητα του εγγύς υπερύθρου ούτως ώστε να τονιστεί η πυκνότητα και ο τύπος βλάστησης.

περιοχές υψηλότερες και προς το εσωτερικό της χώρας. Το κλίμα της ζώνης αυτής χαρακτηρίζεται ως μεταβατικό από μεσογειακό προς ηπειρωτικό, με σχετικά δριμείς χειμώνες – θερμοκρασία συχνά υπό το 0°C, συχνές βροχοπτώσεις, διάρκεια χιονιού για μερικές εβδομάδες – και ξηρά καλοκαίρια.

Η περιοχή μελέτης των ειδών αυτών βρίσκεται στο Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου, ανατολικά του χωριού Κήποι (Lat 39° 50.66', Lon 20° 49.05') σε υψόμετρο 773 – 796 m. Τα δύο μελετώμενα είδη (*Quercus cerris*, *Quercus frainetto*) είναι τα κυρίαρχα στην ευρύτερη περιοχή, ενώ συναντώνται επίσης άλλα φυλλοβόλα είδη όπως η μακεδονική δρυς (*Q. trojana*), η χνοώδης δρυς (*Q. pubescens*), η οστρυνά (*Ostrya carpinifolia*), ο γάβρος (*Carpinus orientalis*, *Carpinus betulus*), η κρανιά (*Cornus mass*) και ο φράξος (*Fraxinus ornus*). Επίσης μπορεί κανείς να συναντήσει και αείφυλλα είδη όπως το πουρνάρι (*Quercus coccifera*) ή είδη αρκεύθων (*Juniperus communis* και *Juniperus oxycedrus*). Η επιλεγμένη περιοχή για την εξαγωγή δορυφορικών δεδομένων (έως 1 km χωρική ανάλυση) και τις μετρήσεις πεδίου είναι όσο το δυνατόν πιο πυκνή, χωρίς την παρουσία άλλων ειδών εκτός των δύο κυρίαρχων, χωρίς κενά στο θόλο, μονοπάτια ή δρόμους. Συνεπώς, τον χειμώνα δεν υπάρχουν παρεμβολές άλλων ειδών βλάστησης στο σήμα που λαμβάνει ο δορυφόρος και την άνοιξη καταγράφεται η έκπτυξη φύλλων των δύο κυρίαρχων ειδών. Σε πλήρη ανάπτυξη, το έδαφος καλύπτεται ολοκληρωτικά από τον θόλο του δάσους, ενώ το φθινόπωρο παρατηρείται η σταδιακή αποδόμηση των χλωροφυλλών και ταυτόχρονη πτώση των φύλλων. Στην περιοχή μελέτης παρατηρήθηκε νωρίτερη έκπτυξη φύλλων του είδους *Quercus frainetto* σε σχέση με το *Quercus cerris*. Όσον αφορά τα δορυφορικά δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης (8 km) που

εξήχθησαν για το δάσος δρυών, η έκταση που καλύπτουν είναι πολύ πιθανόν να περιλαμβάνει και άλλα είδη, εκτός των δύο κυρίαρχων.

Phlomis fruticosa

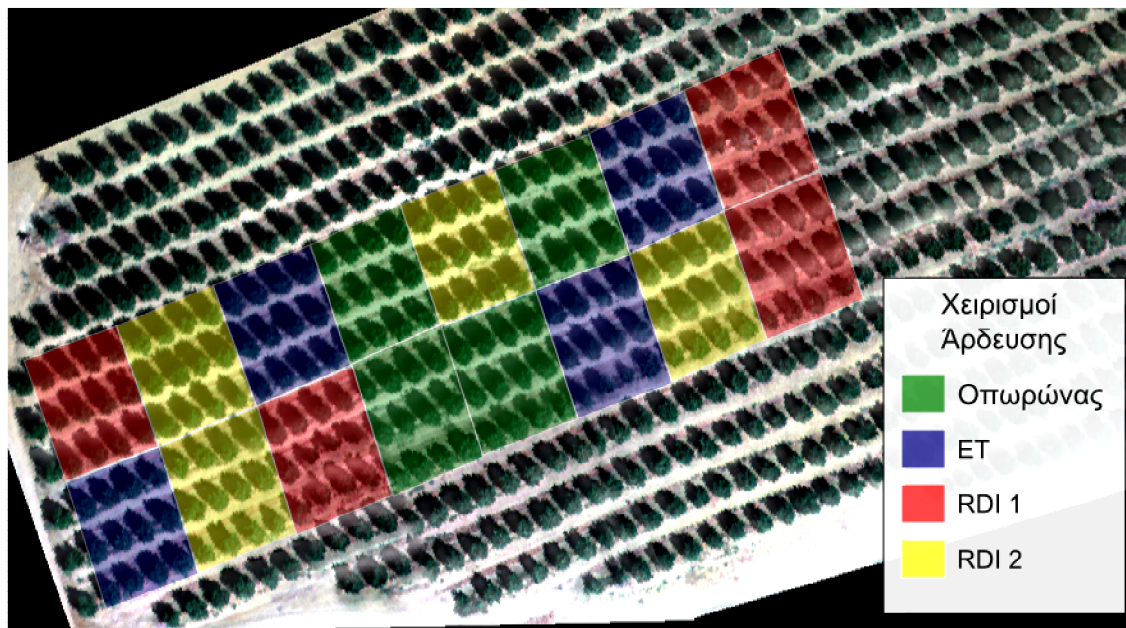
Το είδος *Phlomis fruticosa* (κοινή ονομασία: ασφάκα) είναι ένας μαλακόφυλλος, ημιφυλλοβόλος, πολυετής θάμνος, που παρουσιάζει εποχιακό διμορφισμό των φύλλων. Το ύψος και η διάμετρος του μπορούν να φτάσουν τα 2 m. Κυριαρχεί στα φρυγανικά οικοσυστήματα της Ελλάδας και γενικά της ανατολικής Μεσογείου (Greuter 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 έως 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 εποχιακότητας που παρουσιάζουν τα φυσιολογικά, βιοχημικά και φαινολογικά χαρακτηριστικά του υπό την επίδραση των κλιματικών παραμέτρων (Kyparissis & Manetas 1993, Kyparissis et al. 1995).

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε για την μελέτη του συγκεκριμένου είδους μέσω τηλεπισκοπικών μεθόδων βρίσκεται στην περιοχή του Λούρου Πρεβέζης (Lat 39° 10.13', Lon 20° 51.00') και σε υψόμετρο 59 m. Αποτελείται από μία ευρεία περιοχή φρυγανικού οικοσυστήματος που κυριαρχεί το είδος *Phlomis fruticosa* ($> 0.25 \text{ km}^2$). Το μέσο ύψος των θάμνων στην περιοχή είναι κοντά στο 1.5 m, η βλάστηση είναι ιδιαίτερα πυκνή, ενώ το τοπίο είναι σχεδόν επίπεδο. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένας «καθαρός» ασφακώνας αν και ανάμεσα στους θάμνους εμφανίζονται αραιά κάποια δέντρα (*Pyrus amygdaliformis*, *Olea europea*). Όταν το φύλλωμα των θάμνων βρίσκεται σε πλήρη ανάπτυξη, το έδαφος καλύπτεται ολοκληρωτικά από τον πυκνό θόλο. Κατά την διάρκεια όμως των ζεστών και ξηρών καλοκαιρινών μηνών, το *Phlomis fruticosa* απορρίπτει ένα μέρος του φυλλώματος του με αποτέλεσμα να εμφανίζονται κενά στον θόλο και στα μεσοδιαστήματα των θάμνων ούτως ώστε μέρος του εδάφους να μένει ακάλυπτο.

Citrus sinensis

Ένας οπωρώνας πορτοκαλιών (*Citrus sinensis* cv. "Powell") αποτέλεσε το πεδίο μελέτης που διήρκεσε δύο συνεχή έτη 2009-2010. Ο οπωρώνας βρίσκεται στις απέραντες καλλιεργούμενες εκτάσεις της Ανδalousίας, κοντά στο χωριό La Campana, Σεβίλλη (Lat 37° 48.00', Lon -5° 24.00'). Τα δέντρα φυτεύτηκαν το 1997 σε αποστάσεις 7 m x 4 m (358 δέντρα/ha) σε βαθύ αλλουβιακό έδαφος παχιάς έως ημι-αμμώδους υφής. Το κλίμα της περιοχής είναι Μεσογειακό, που χαρακτηρίζεται από ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και δροσερούς και υγρούς χειμώνες, με μέση ετήσια βροχόπτωση πάνω από 550 mm και εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration – ET) υπολογισμένη μέσω της εξίσωσης Penman-Monteith (Allen et al. 1998) πάνω από 1300 mm.

Ο οπωρώνας ποτίζεται με αυτόματο σύστημα σταγόνas με 10 ειδικές συσκευές (pressure-compensation emitters 1.6 l/h) για κάθε δέντρο. Ένα κομμάτι 0.6 ha του οπωρώνα χωρίστηκε σε ομάδες 12 δέντρων όπου εφαρμόστηκαν 4 διαφορετικοί χειρισμοί άρδευσης και κάθε ένας επαναλαμβανόταν 4 φορές (Εικόνα 3). Ο χειρισμός του συνολικού οπωρώνα (προγραμματισμένος με βάση τις πρακτικές του εμπορίου, αποκαλούμενος ως «Οπωρώνας») συγκρίθηκε με τρεις διαφορετικούς χειρισμούς: i) «ET», όπου το πότισμα προγραμματίστηκε έτσι ώστε να καλύπτει πλήρως τις ανάγκες του δέντρου (βασισμένο στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής), ii) «RDI-1», προγραμματισμένο σαν το «ET», εκτός από την περίοδο ελλειμματικής άρδευσης (από 11 Ιουνίου



Εικόνα 3. Εναέρια σύνθεση των διαδοχικών απεικονίσεων από το UAV MCA-6 (χωρική διακριτικότητα 30 cm, σύνθεση αληθινών χρωμάτων) πάνω από τον πορτοκαλεώνα κοντά στο χωριό La Campana, Σεβίλλη (Lat 37° 48.00', Lon -5° 24.00'). Οι ομάδες δέντρων που υπέστησαν διαφορετικούς χειρισμούς άρδευσης παρουσιάζονται με τα αντίστοιχα χρώματα. Ως «οπωρώνας» αναφέρεται η εμπορική διαχειριστική πρακτική, «ET» ονομάζεται η διαχείριση που σχεδιάστηκε για την πλήρη κάλυψη των αναγκών σε νερό, ενώ RDI 1 και 2 ονομάζονται δύο διαφορετικοί χειρισμοί ελλειμματικής άρδευσης.

έως 22 Σεπτεμβρίου), όπου μόνο το 37% του ET εφαρμοζόταν, και iii) «RDI-2», ίδιο με το RDI-1 αλλά με εφαρμοζόμενη δόση ίση με 50% του ET κατά την διάρκεια της περιόδου ελλειμματικής άρδευσης. Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε βάσει της μεθόδου FAO (Food and Agriculture Organization) (Allen et al. 1998) μέσω της εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0) που υπολογιστηκε από τις μετρήσεις αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού εγκατεστημένου 10 km από το πεδίο μελέτης και του συντελεστή του καλλιεργούμενου είδους μετά από την προσαρμογή του τελευταίου στις τοπικές συνθήκες.

Μετρήσεις στο πεδίο

Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index - LAI)

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας ορίστηκε από τον Watson (1947) ως το συνολικό εμβαδόν της μίας πλευράς των φύλλων ανά μονάδα εμβαδού του εδάφους.

$$LAI = \frac{\text{Leaf Area}}{\text{Ground Area}}, \quad [m^2/m^2] \quad (10)$$

Ένας παραπλήσιος ορισμός του LAI που επίσης συναντάται στην βιβλιογραφία περιορίζει την μέτρηση της φυλλικής επιφάνειας στην επιφάνεια εδάφους που καλύπτεται από φύλλα ή αλλιώς στην κάθετη προβολή της κόμης ενός φυτού σε οριζόντιο έδαφος. Η διαφορά των παραπάνω ορισμών έγκειται στην χωρική κλίμακα που δίνεται στον LAI. Ενώ κυρίως σε αγροτικές εφαρμογές είναι ζητούμενος ο LAI ενός φυτού, σε οικολογικές μελέτες μεγάλης χωρικής κλίμακας που εμπλέκουν βιογεωχημικά μοντέλα και τηλεπισκοπικές μεθόδους, ζητούμενος είναι ο LAI μιας περιοχής ή η διακύμανση του LAI σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Οι παραπάνω ορισμοί του LAI είναι ταυτόσημοι μόνο σε περιοχές που είναι πλήρως καλυμμένες από βλάστηση. Οι Carlson & Ripley

Πίνακας 1. Χρονοδιάγραμμα των μετρήσεων πεδίου που εκτελέστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Παράμετρος	Μέθοδος	Είδος	Διάρκεια					
			2005	2006	2007	2008	2009	2010
LAI	Έμμεση Άμεση	<i>Fagus sylvatica</i>						
	Έμμεση Άμεση	<i>Quercus</i> sp.						
	Έμμεση Άμεση	<i>Phlomis fruticosa</i>						
	Έμμεση Άμεση	<i>Citrus sinensis</i>						
Χλωροφύλλες	Εκχύλιση CCM	<i>Fagus sylvatica</i>						
	Εκχύλιση CCM	<i>Quercus</i> sp.						
	Εκχύλιση CCM	<i>Phlomis fruticosa</i>						
	Εκχύλιση CCM	<i>Citrus sinensis</i>						
Καροτενοειδή	Εκχύλιση	<i>Fagus sylvatica</i>						
		<i>Quercus</i> sp.						
		<i>Phlomis fruticosa</i>						
		<i>Citrus sinensis</i>						
Δυναμικό νερού	Θάλαμος πίεσης	<i>Fagus sylvatica</i>						
		<i>Quercus</i> sp.						
		<i>Phlomis fruticosa</i>						
		<i>Citrus sinensis</i>						
Ανακλαστικότητα φύλλου	Φασματο- ραδιόμετρο	<i>Fagus sylvatica</i>						
		<i>Quercus</i> sp.						
		<i>Phlomis fruticosa</i>						
		<i>Citrus sinensis</i>						
Ποιότητα φρούτων	pHμετρο – διαθλασιόμετρο	<i>Fagus sylvatica</i>						
		<i>Quercus</i> sp.						
		<i>Phlomis fruticosa</i>						
		<i>Citrus sinensis</i>						

(1997) διαχώρισαν τις δύο αυτές οπτικές υπολογισμού του LAI και τον όρισαν ως σφαιρικό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (global LAI) όταν περιλαμβάνεται το γυμνό έδαφος στον υπολογισμό του LAI και ως τοπικό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (local LAI) όταν το γυμνό έδαφος δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό του LAI. Άρα, ο τοπικός LAI θα είναι πάντα ίσος ή μεγαλύτερος του σφαιρικού LAI και η σχέση των δύο είναι άμεσα συνδεμένη με το ποσοστό φυτοκάλυψης της περιοχής (fractional vegetation cover – fc):

$$global\ LAI = fc * local\ LAI \quad (11)$$

Στην παρούσα διατριβή, καθώς και στο μεγαλύτερο ποσοστό της σχετικής βιβλιογραφίας, υιοθετείται ο πρώτος ορισμός του Watson (1947), δηλαδή ο σφαιρικός LAI. Παρόλα αυτά, όλες οι περιοχές μελέτης που διεξήχθησαν μετρήσεις LAI ήταν προσεκτικά επιλεγμένες ούτως ώστε η βλάστηση να είναι πυκνή και να μην υπάρχουν μέρη με εκτεθειμένο έδαφος, οπότε στην περίπτωση της μελέτης αυτής δεν υπάρχει θέμα διάκρισης των δυο οπτικών υπολογισμού του LAI.

Σύμφωνα με τον ορισμό του, ο LAI είναι μια αδιάστατη ποσότητα που χαρακτηρίζει τον θόλο ενός οικοσυστήματος. Σχετίζεται με μια σειρά καθοριστικών παραμέτρων για κάθε οικοσύστημα, όπως το μικροκλίμα μέσα και κάτω από τον θόλο, την διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας και την κρίσιμη επιφάνεια μέσω της οποίας συμβαίνουν οι ανταλλαγές αερίων ανάμεσα στο θόλο και την ατμόσφαιρα. Οπότε ο δείκτης LAI είναι ένας βασικός παράγοντας των βιογεωχημικών κύκλων στα οικοσυστήματα. Μοντέλα φωτοσύνθεσης θόλου και παραγωγικότητας οικοσυστημάτων χρησιμοποιούν επίσης τιμές LAI σαν δεδομένα εισόδου για ποσοτικοποιημένες αναλύσεις παραγωγικότητας, μιας και ο δείκτης αυτός είναι απαραίτητος για την μετατροπή των δεδομένων ανταλλαγών αερίων από επίπεδο φύλλου σε επίπεδο θόλου ή οικοσυστήματος. Προς αυτή την κατεύθυνση η χαρτογράφηση και η παρακολούθηση της δυναμικής του LAI σε μεγάλη χωρική κλίμακα, είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των παγκόσμιων ροών CO₂ και συνεπώς για την έρευνα των παγκόσμιων κλιματικών αλλαγών (Fassnacht et al. 1997).

Παρόλα αυτά, ο δείκτης LAI είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί σωστά λόγω της μεγάλης χωρικής και χρονικής του ετερογένειας (Baldocchi et al. 1984, Neumann et al. 1989). Πολλές επίγειες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση του LAI και μπορούν να διαχωριστούν σε άμεσες και έμμεσες μεθόδους. Περιληπτικά, οι άμεσες μέθοδοι βασίζονται στην μέτρηση φυλλικής επιφάνειας συνήθως κάποιου αντιπροσωπευτικού δείγματος φύλλων. Είναι συνήθως χρονοβόρες, με πολλές πρακτικές δυσκολίες και μπορεί να είναι καταστροφικές στα αείφυλλα είδη. Οι έμμεσες μέθοδοι είναι μη-καταστροφικές, πιο εύχρηστες και πιο γρήγορες από τις άμεσες και βασίζονται στην μετάδοση της ακτινοβολίας μέσα από τον θόλο χρησιμοποιώντας την θεωρία μετάδοσης της ακτινοβολίας (radiative transfer theory) (Anderson 1971, Ross 1981) για τον υπολογισμό της τιμής του δείκτη. Συνέπεια αυτού είναι οι μετρήσεις αυτές να περιλαμβάνουν την φραγή της ακτινοβολίας από τον κορμό, τα κλαδιά και τους μίσχους, οπότε όλες οι έμμεσες μέθοδοι υπολογίζουν μια τιμή που έχει οριστεί ως PAI (Plant Area Index). Η τιμή που πρέπει να αφαιρεθεί από το PAI για να έχουμε καθαρό LAI ορίζεται σαν WAI (Wood Area Index) και αποτελεί την τιμή που προκύπτει από την φραγή της ακτινοβολίας από μη-φυλλικά μέρη του θόλου. Σε ένα φυλλοβόλο δάσος για παράδειγμα, η τιμή WAI μπορεί να μετρηθεί το χειμώνα όπου δεν υπάρχουν φύλλα στον θόλο.

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε μια έμμεση μέθοδος βασισμένη στην μέτρηση ακτινοβολίας κάτω και πάνω από τον θόλο καθώς και μια μη-καταστροφική άμεση μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε φυλλοβόλα είδη μέσω συλλογής φύλλων σε παγίδες κατά την πτώση τους το φθινόπωρο (Πίνακας 1). Η γενική αρχή της έμμεσης μεθόδου διατυπώθηκε από τους Monsi & Saeki (1953) που διεύρυναν τον νόμο των Beer-Lambert για θόλους φυτών. Ο νόμος

αυτός εκφράζει την μείωση της ακτινοβολίας σε ένα ομοιογενές μέσο. Η ακτινοβολία που διέρχεται μέσα από ένα τέτοιο μέσο απορροφάται ανάλογα της οπτικής απόστασης. Η μέθοδος υπολογισμού του LAI μέσω της αντιστροφής της εξίσωσης Beer-Lambert προϋποθέτει την μέτρηση της απευθείας ακτινοβολίας πάνω από τον θόλο (I_o) και της ακτινοβολίας που μεταβιβάζεται κάτω από τον θόλο (I):

$$I = I_o * e^{(-k * LAI)} \quad \text{ή} \quad LAI = - \frac{1}{k} \ln \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (12)$$

Όπου k ο συντελεστής απορρόφησης, ο οποίος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την κατανομή γωνιών και αζιμούθιου των φύλλων (Jones 1992), την αρχιτεκτονική του θόλου, την ιδιαίτερη δομή του σημείου μέτρησης καθώς και την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας του ηλίου (Campbell 1986). Παρόλα αυτά, όταν όλες οι μετρήσεις LAI χρησιμοποιώντας την παραπάνω μέθοδο εκτελούνται μια σταθερή ώρα της ημέρας (π.χ. τοπικό μεσημέρι), στο ίδιο σημείο μέτρησης και μόνο σε ημέρες με καθαρό ουρανό, έχει προταθεί ότι ένας σταθερός συντελεστής απορρόφησης k μπορεί να εφαρμοστεί (Breda 2003). Για τον υπολογισμό του k μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσες μέθοδοι για τον υπολογισμό του LAI και κατόπιν μέσω αντιστροφής της Εξίσωσης 12 να υπολογιστεί το k για κάθε είδος ή σημείο μέτρησης.

Μία πιο περίπλοκη μέθοδος υπολογισμού του LAI, που βασίζεται επίσης στις παραπάνω αρχές, εισάγει στον υπολογισμό της ακτινοβολίας που μεταβιβάζεται μέσα από το θόλο την ακτινοβολία που σκεδάζεται από φύλλα και κλαδιά. Το πλήρες μοντέλο μεταβίβασης και σκεδασμού της ακτινοβολίας μέσα στον θόλο περιγράφεται από τους Norman & Jarvis (1974, 1975), αλλά λόγω της πολυπλοκότητας του εφαρμόζεται μια πιο απλοποιημένη μορφή του, η οποία μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$LAI = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)} \quad (13)$$

Όπου:

- $K = \frac{1}{2 \cos \theta}$
- θ : γωνία του ηλίου (sun zenith angle)
- $f_b = 1 - f_d$ ($f_d = \frac{PAR_{\text{πλήρως σκιασμένο}}}{PAR_{\text{φωτισμένο}}}$)
- $\tau = \frac{PAR_{\text{κάτω από τον θόλο}}}{PAR_{\text{πάνω από τον θόλο}}}$
- $A = 0.283 + 0.785\alpha - 0.159\alpha^2$
- α : απορροφητικότητα φύλλου

Η απορροφητικότητα του φύλλου (α) κυμαίνεται τυπικά γύρω στο 0.9, οπότε το A παίρνει την τιμή 0.86. Επίσης, σε μία συνεφιασμένη μέρα το f_b μηδενίζεται, οπότε η Εξίσωση 13 παίρνει τη μορφή:

$$LAI = - \frac{\ln \tau}{A} \quad (14)$$

Για την εξαγωγή του LAI χρησιμοποιήθηκαν τα όργανα Sunfleck PAR Ceptometer SF-80 και AccuPAR PAR/LAI Ceptometer LP-80. Και τα δύο όργανα είναι της Decagon Devices, Inc., (Pullman, Washington-USA) και διαθέτουν 80 ανεξάρτητους, γραμμικώς διατεταγμένους αισθητήρες για την μέτρηση του PAR (Photosynthetically Active Radiation) σε μήκη κύματος 400-700 nm. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις του PAR πάνω από τον θόλο (ή εναλλακτικά έξω από τον θόλο) και κάτω από τον θόλο μπορούμε βάσει των Εξισώσεων 12 και 13 να υπολογίσουμε τον LAI. Για το σύνολο των οικοσυστημάτων εξήχθησαν τιμές LAI βάσει και των δύο έμμεσων μεθόδων ώστε να αξιολογηθεί η ακρίβεια τους ανά οικοσύστημα. Στην δεύτερη έμμεση μέθοδο (Εξίσωση 13) το f_b υπολογίζεται από τις διαδοχικές μετρήσεις ενός αισθητήρα PAR του οργάνου Sunfleck σε τεχνητή πλήρη σκίαση και σε πλήρη έκθεση στην ακτινοβολία του ηλίου. Το όργανο AccuPAR υπολογίζει το f_b αυτόματα μέσω των μετρήσεων του PAR πάνω από τον θόλο και της υπολογιζόμενης τιμής συνολικής ακτινοβολίας βάσει των δεδομένων τοποθεσίας μέτρησης και γωνίας ηλίου. Εφαρμόστηκαν δύο πρωτόκολλα μετρήσεων για την εξαγωγή του LAI κατά περίπτωση της δομής του οικοσυστήματος: (1) *Phlomis fruticosa*: επιλογή και σήμανση 10 αντιπροσωπευτικών θάμνων σε περιοχή 0.01 km² και μέτρηση LAI καθ' ενός ξεχωριστά. Ο μέσος όρος των 10 ατόμων θεωρείται αντιπροσωπευτικός του οικοσυστήματος μιας και είναι ομοιογενές. (2) Δασικά είδη (*Quercus* sp., *Fagus sylvatica*): κάλυψη χώρου τουλάχιστον 200 m² στα σημεία μέτρησης μέσω επαναληπτικών μετρήσεων (1-2 sec) ακτινοβολίας κάτω από τον θόλο τηρώντας σταθερή ταχύτητα βηματισμού. Όλες οι μετρήσεις έγιναν κοντά στο μεσημέρι (τοπική ώρα).

Η άμεση μέθοδος εφαρμόστηκε στα φυλλοβόλα δασικά είδη (*Quercus* sp., *Fagus sylvatica*) και βασίζεται σε παγίδες συγκεκριμένου εμβαδού (0.5 m²) κατανεμημένες ομοιόμορφα κάτω από το θόλο της περιοχής που μετράται. Στην περιοχή μέτρησης του *Quercus* sp. τοποθετήθηκαν συνολικά 8 παγίδες LAI σε δύο διακριτά μέρη μέτρησης της έμμεσης μεθόδου. Με αυτόν τον τρόπο οι 4 παγίδες χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του ενός μέρους και οι άλλες τέσσερις του άλλου. Στην περιοχή μέτρησης του *Fagus sylvatica* τοποθετήθηκαν συνολικά 6 παγίδες χωρίς να χωρίζονται σε διακριτά μέρη της περιοχής μέτρησης. Κατά την πτώση των φύλλων το φθινόπωρο τα παγιδευμένα φύλλα συλλέγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ξηραίνονται (στους 80 °C για 48 h) και κατόπιν ζυγίζονται για να υπολογιστεί το ξηρό βάρος (gr). Η επιφάνεια φύλλου ενός δείγματος περίπου 100 φύλλων για κάθε είδος μετρήθηκε με χρήση σαρωτή (scanner) και προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας ούτως ώστε να υπολογιστεί μία μέση ειδική μάζα φύλλου (Leaf specific mass – LSM) για κάθε είδος λαμβάνοντας υπ' όψιν τον αγωγό ιστό του φύλλου. Τέλος, για να μετατραπεί το συνολικό ζυγισμένο ξηρό βάρος σε φυλλική επιφάνεια διαιρείται με το LSM (gr/dm²)*10⁻² και κατόπιν για να μετατραπεί σε LAI (m²/m²), διαιρείται με το εμβαδόν της παγίδας. Ο τελικός LAI είναι το άθροισμα όλων των δειγματοληψιών.

Συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών φύλλου (χλωροφύλλες – καροτενοειδή)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον ποσοτικό προσδιορισμό της χλωροφύλλης α, της χλωροφύλλης β και των ολικών καροτενοειδών περιλάμβανε δειγματοληψίες από το πεδίο και εκχύλιση με διάλυμα ακετόνης 80% στο εργαστήριο με χρήση φασματοραδιόμετρου Hitachi U-2800 (Tokyo, Japan). Η λεπτομερής εργαστηριακή διαδικασία έχει ως εξής: με χρήση φελλοτρυπητήρα κόβουμε δισκία με σταθερό εμβαδό από τα φύλλα. Αφού κόψουμε τους δίσκους σε μικρά κομματάκια, εκχυλίζουμε σε γουδί με άμμο και μικρή ποσότητα CaCO₃, χρησιμοποιώντας ως εκχυλιστικό, διάλυμα ακετόνης 80%. Το εκχύλισμα φυγοκεντρείται για 10 λεπτά στα 4950 g και το υπερκείμενο, αφού ογκομετρηθεί, φωτομετρείται στα 470, 646, 663 και 720 nm. Η απορρόφηση (A) στα 720 nm οφείλεται σε πιθανό σκεδασμό και η τιμή αυτή αφαιρείται

από τις αντίστοιχες στα 470, 646 και 663 nm. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ουσιών σε µg/ml εκχυλίσματος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις (Lichtenthaler & Wellburn 1983):

$$\text{Χλωροφύλλη } \alpha, \mu\text{g/ml, } Chla = 12.21 * A_{663} - 2.81 * A_{646} \quad (15)$$

$$\text{Χλωροφύλλη } \beta, \mu\text{g/ml, } Chlb = 20.13 * A_{646} - 5.03 * A_{663} \quad (16)$$

$$\text{Καροτενοειδή, } \mu\text{g/ml, } Car = \frac{1000 * A_{470} - 3.27 * Chla - 104.3 * Chlb}{229} \quad (17)$$

Στο πεδίο χρησιμοποιήθηκε το χλωροφυλλόμετρο CCM-200 της OPTI-SCIENCES, Inc., (Hudson, USA). Το όργανο αυτό μετράει μια σχετική τιμή συγκέντρωσης χλωροφύλλης (CCI, Chlorophyll Content Index) για μία μικρή περιοχή του φύλλου η οποία τοποθετείται στον θάλαμο του οργάνου. Η τιμή CCI είναι ενδεικτική της απορρόφησης της ακτινοβολίας όταν διέρχεται μέσα από το φύλλο. Το όργανο εκπέμπει σε δύο μήκη κύματος, το ένα στην περιοχή που απορροφούν οι χλωροφύλλες στο ερυθρό ενώ το άλλο χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει της δομικές διαφορές του φυλλικού ιστού. Η τεχνική αυτή είναι γρήγορη και μη-καταστροφική και επομένως μπορεί να εφαρμοστεί για την δειγματοληψία μεγάλου αριθμού φύλλων στο πεδίο. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης χλωροφυλλών μέσω της σχετικής τιμής του οργάνου (CCI) είναι απαραίτητη η κατασκευή μιας πρότυπης καμπύλης για κάθε είδος που να συνδέει το CCI με την συγκέντρωση χλωροφυλλών. Οι πρότυπες καμπύλες κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο μετρώντας τα δείγματα με το CCM-200 και εκχυλίζοντας την ίδια επιφάνεια του φύλλου που εισέρχεται στο θάλαμο του οργάνου βάσει της μεθόδου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Στα δασικά είδη (*Quercus* sp., *Fagus sylvatica*), δειγματοληψίες φύλλων διεξήχθησαν στα εξωτερικά μέρη του θόλου (φύλλα φωτός) καθώς και μέσα στο θόλο (φύλλα σκιάς). Για κάθε τύπο φύλλου το δείγμα μέτρησης με το CCM-200 αποτελούταν από περισσότερα από 100 φύλλα διάσπαρτα σε όλη την περιοχή μελέτης, καθώς και ένα μικρό ποσοστό από κάθε τύπο μεταφερόταν στο εργαστήριο για την κατασκευή πρότυπων καμπυλών και παρακολούθηση των καροτενοειδών (Πίνακας 1). Συγκεκριμένα, για τα δασικά είδη χρησιμοποιήθηκε φελλοτρυπητήρας εμβαδού 0.349 cm² για την εξαγωγή ενός δίσκου από κάθε φύλλο για 20 φύλλα φωτός και 20 φύλλα σκιάς. Στις αρχές κάθε αναπτυξιακής περιόδου όπου τα φύλλα είναι μικρά, χρησιμοποιήθηκε φελλοτρυπητήρας εμβαδού 0.146 cm² για την αποφυγή του κεντρικού νεύρου των φύλλων. Πιο συχνές εργαστηριακές εκχυλίσσεις τελούνταν κατά την έκπτυξη και κατά την πτώση των φύλλων, την άνοιξη και το φθινόπωρο, για την παρακολούθηση των γρήγορων αναπτυξιακών αλλαγών. Όσον αφορά το είδος *Phlomis fruticosa*, η μέτρηση με το CCM-200 δεν ήταν δυνατή λόγω μεγάλου πάχους φύλλου, οπότε οι μετρήσεις χρωστικών φύλλου περιελάμβαναν συλλογή 60 φύλλων από το επάνω μέρος του θόλου κατά μήκος ολόκληρης της περιοχής μελέτης και μεταφορά στο εργαστήριο μέσα σε αεροστεγώς κλεισμένα πλαστικά σακουλάκια, για εκχύλιση και φωτομέτρηση (Πίνακας 1). Για τα φύλλα του είδους αυτού χρησιμοποιήθηκε φελλοτρυπητήρας εμβαδού 0.146 cm², εξαγωγή ενός δίσκου από κάθε φύλλο για 56 φύλλα.

Δυναμικό νερού (Ψ)

Το δυναμικό νερού μετρήθηκε στο πεδίο με χρήση θαλάμου πίεσης τύπου Scholander (SKPM 1400, Skye Instruments Ltd., UK). Η μέτρηση όλων των ειδών έγινε σε κλαδιά μήκους 10 – 15 cm και όχι σε φύλλα λόγω μικρού πάχους μίσχου για τις δυνατότητες του συγκεκριμένου οργάνου. Τα

προς μέτρηση μέρη του φυτού καλύπτονται με αλουμινόχαρτο και κλείνονται αεροστεγώς με χρήση πλαστικής σακούλας για 10 min πριν τη μέτρηση ούτως ώστε να έχει σταματήσει η διαπνοή και να έχει επέλθει ισορροπία του δυναμικού νερού στο δείγμα. Ακολούθως, κόβονται και τοποθετούνται αμέσως στον θάλαμο πίεσης. Η τιμή του δυναμικού νερού καθορίζεται από το μέγεθος της πίεσης που χρειάζεται για να γίνει η εκροή νερού από το ξύλωμα του βλαστού.

Σε όλα τα είδη οι μετρήσεις εκτελούνταν κατά τη διάρκεια του τοπικού μεσημεριού και το δείγμα αποτελούνταν από εξωτερικά μέρη του θόλου που δέχονται απευθείας ηλιακή ακτινοβολία. Το μέγεθος του δείγματος αποτελούνταν τυπικά από περίπου 10 κλαδάκια διαφορετικών ατόμων κατά μήκος της περιοχής μελέτης (Πίνακας 1).

Κατ' εξαίρεση, οι μετρήσεις δυναμικού νερού στον οπωρώνα (*Citrus sinensis*) διεξήχθησαν με διαφορετικό πρωτόκολλο. Βάσει των αποτελεσμάτων των Goldhamer & Fereres (2001), σε πυκνούς οπωρώνες τα σκιασμένα φύλλα που βρίσκονται κοντά στον κορμό του δέντρου δεν είναι απαραίτητο να καλυφθούν και να κλειστούν αεροστεγώς μιας και η διαπνοή τους είναι ήδη σε πολύ χαμηλά επίπεδα και παρουσιάζουν το ίδιο δυναμικό νερού με το ξύλωμα. Έτσι, δύο σκιασμένα φύλλα από το εσωτερικό της κόμης και κοντά στον κορμό από κάθε δέντρο αποκόπτονταν και μετρούνταν άμεσα. Οι μετρήσεις εκτελούνταν κατά τη διάρκεια του τοπικού μεσημεριού με θάλαμο πίεσης (PWSC Model 3000, Soil Moisture Equipment Corp., California). Το ένα από τα δύο κεντρικά δέντρα κάθε ομάδας μετριόταν ούτως ώστε να αποφεύγονται οι επιδράσεις των ποτισμάτων γειτονικών ομάδων. Οι μετρήσεις στον οπωρώνα επαναλαμβανόντουσαν ανά δεκαήμερο με πιο συχνή παρακολούθηση σε περιόδους έντονης καταπόνησης και αλλαγών ποτίσματος (Πίνακας 1).

Ανακλαστικότητα φύλλου

Η ανακλαστικότητα φύλλου μετρήθηκε στο πεδίο για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* χρησιμοποιώντας τα φορητά φασματοραδιόμετρα UNISPEC (PP Systems, Amesbury, USA) και USB4000 Spectrometer (Ocean Optics Inc., Dunedin FL, USA) εξοπλισμένο με μανταλάκι φύλλου (CI-700LP, CID, Camas WA, USA). Για την βαθμονόμηση των οργάνων στο πεδίο χρησιμοποιήθηκε πρότυπο υλικό βαθμονόμησης (WS-1, Ocean Optics, Dunedin FL, USA). Και τα δύο όργανα ανακλαστικότητας που χρησιμοποιήθηκαν διαθέτουν εύρος ανίχνευσης στην ορατή και εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (400 – 1000 nm). Η φασματική ανάλυση του πρώτου φτάνει κοντά στα 3 nm, ενώ του δευτέρου στα 0.2 nm.

Το δείγμα φύλλων αποτελούνταν από 60 φύλλα φωτός (από εξωτερικά μέρη του θόλου που δέχονται απευθείας ηλιακή ακτινοβολία) διάσπαρτα σε ολόκληρη την περιοχή μέτρησης και οι μετρήσεις εκτελούνταν κατά τη διάρκεια του τοπικού μεσημεριού (Πίνακας 1). Τα φάσματα ανακλαστικότητας των φύλλων από τα δύο φορητά φασματοραδιόμετρα μετατράπηκαν (interpolation) σε μία κοινή φασματική ανάλυση (1 nm) πριν την χρήση τους στις περαιτέρω αναλύσεις.

Ποιότητα φρούτων

Για την μέτρηση της ποιότητας των φρούτων αρχικά έγινε εξαγωγή και φιλτράρισμα του χυμού των φρούτων. Η οξύτητα του χυμού (Titratable Acidity – TA, %) υπολογίστηκε βάσει της διαδικασίας που περιγράφεται από τους Garner et al. (2008). Το pH κάθε δείγματος χυμού μετρήθηκε χρησιμοποιώντας πεχάμετρο (pH-Burette 24 Crison, Spain). 6 gr χυμού από κάθε δείγμα αναμιγνύονται με 50 ml νερού και τιτλοδοτούνται με 0.1 N NaOH έως το σημείο pH 8.2,

μετρώντας τον συνολικό όγκο (ml) του NaOH που προστέθηκε. Για τον υπολογισμό της οξύτητας χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$\%Acid = \frac{(ml\ NaOH\ used) \times (0.1\ N\ NaOH) \times (miliequivalent\ factor) \times 100}{grams\ of\ sample} \quad (18)$$

Όπου miliequivalent factor είναι ένας συντελεστής εξαρτώμενος από το κυρίαρχο οξύ του χυμού φρούτου. Για το εσπεριδοειδές της παρούσας μελέτης (*Citrus sinensis*), το κιτρικό οξύ κυριαρχεί στον χυμό και έχει συντελεστή (miliequivalent factor) 0.064. Για την εκτίμηση της περιεκτικότητας του χυμού σε σάκχαρα υπολογίστηκε το περιεχόμενο των δειγμάτων σε διαλυτά σωματίδια (total soluble solids – TSS, °Brix) με τη βοήθεια διαθλασίμετρου (Atago, ATC-1E, Japan).

Τα φρούτα συλλέχθηκαν από τα δύο κεντρικά δέντρα κάθε δωδεκάδας στις 8 Απριλίου 2010 και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο (Πίνακας 1). Οχτώ φρούτα ανά δέντρο επιλέχθηκαν τυχαία για φυσικοχημικό και οργανοληπτικό χαρακτηρισμό των παραμέτρων TSS και TA, από τα οποία υπολογίστηκε επίσης ο λόγος TSS/TA που λειτουργεί ως δείκτης της ποιότητας φρούτων. Κάθε δείγμα αποτελούταν από τον χυμό των 8 φρούτων που επιλέχθηκαν από κάθε δέντρο για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών τιμών ποιότητας φρούτου κάθε δέντρου. Περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων αφορούσε τον υπολογισμό του μέσου όρου των παραμέτρων για τα δύο κεντρικά δέντρα κάθε ομάδας.

Μετεωρολογικά Δεδομένα

Για την παρακολούθηση των κλιματικών παραμέτρων στις περιοχές μελέτης του ελλαδικού χώρου, εγκαταστάθηκαν από το εργαστήριο βοτανικής του τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί πλησίον των σημείων μέτρησης κάθε οικοσυστήματος. Στα τέλη του 2005 εγκαταστάθηκε ένας μετεωρολογικός σταθμός στη λίμνη των πηγών Αωού στο Μέτσοβο (Lat 39° 49.13', Lon 21° 4.9') σε υψόμετρο 1345 m, και ένας μετεωρολογικός σταθμός στους Κήπους Ζαγορίου (Lat 39° 51.80', Lon 20° 47.58') σε υψόμετρο 750 m για την παρακολούθηση των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στα οικοσυστήματα των ειδών *Fagus sylvatica* και *Quercus* sp. αντίστοιχα. Στις αρχές του 2006 εγκαταστάθηκε ο τρίτος μετεωρολογικός σταθμός στο χωριό Πέτρα Πρεβέζης (Lat 39° 9.4', Lon 20° 48.94') σε υψόμετρο 2 m, για την παρακολούθηση των κλιματικών παραμέτρων του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa*. Οι τρεις σταθμοί διαθέτουν αυτοεκκενούμενο ψηφιακό μετρητή βροχόπτωσης (Model 52203, RM Young Co., Traverse City, MI, USA), θερμόμετρο με κάλυμμα για την ακτινοβολία (Model 110S, NRG Systems Inc., Hinesburg, VT, USA), αισθητήρα PAR (Model LI-190SZ, Li-Cor, Lincoln, NE, USA) και αυτόματο σύστημα αποθήκευσης των δεδομένων (Stylitis-41, Symmetron, Athens, Greece) με βήμα 5 λεπτών. Οι σταθμοί διαθέτουν επίσης φωτοβολταϊκό σύστημα με μπαταρία (USP10 - 12V/10W, Phaesun GmbH, Memmingen, Germany) για την αυτονομία τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

Εκτός από τα σύγχρονα μετεωρολογικά δεδομένα που προσφέρουν οι εγκατεστημένοι μετεωρολογικοί σταθμοί, στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκε επίσης η συμπεριφορά του δάσους δρυών (*Quercus* sp.) την τελευταία 25ετία μέσω του αρχείου δορυφορικών καταγραφών. Για τον λόγο αυτό αναζητήθηκε κάποιο αρχείο μετεωρολογικών καταγραφών για την περιοχή του Ζαγορίου που να καλύπτει το διάστημα αυτό. Υπάρχει μετεωρολογικό αρχείο για το Μέτσοβο και το Σκαμνέλι αλλά δυστυχώς περιέχει μεγάλα κενά και διαστήματα προβληματικών καταγραφών. Το πιο πλήρες και αξιόπιστο μετεωρολογικό αρχείο στην ευρύτερη περιοχή αφορά την πόλη των Ιωαννίνων (Lat 39° 40.2', Lon 20° 51.4', υψόμετρο 470 m) και προέρχεται από τις καταγραφές της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) που ξεκινούν το έτος 1951. Τα εν λόγω μετεωρολογικά δεδομένα αφορούν ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας.

Δορυφορικά δεδομένα

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ποικιλία διαφορετικών τηλεπισκοπικών δεδομένων για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους και την εφαρμογή τους στην μελέτη των χαρακτηριστικών και της λειτουργίας των χερσαίων οικοσυστημάτων. Κατά πλειοψηφία χρησιμοποιήθηκαν προϊόντα δορυφορικών αισθητήρων, καθώς επίσης και δεδομένα από μια εναέρια πλατφόρμα (Πίνακας 2). Τα πολυφασματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν υποστεί σειρά διορθώσεων και επεξεργασιών από τις υπεύθυνες επιστημονικές ομάδες των αντίστοιχων οργανισμών διαστήματος πριν χρησιμοποιηθούν στην μελέτη αυτή. Ωστόσο, στα περισσότερα από αυτά ήταν αναγκαία η εφαρμογή κάποιων επιπλέον διορθώσεων στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Αντιθέτως, στα υπερφασματικά δεδομένα και στα δεδομένα της εναέριας πλατφόρμας ήταν απαραίτητη η εφαρμογή του συνόλου των επεξεργασιών στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μιας και προσφέρθηκαν–συλλέχθηκαν σε πρωτογενή μορφή. Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζεται μια γενική περιγραφή των χαρακτηριστικών κάθε τύπου δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε. Για τα δορυφορικά πολυφασματικά δεδομένα παρουσιάζεται επίσης μια σύνοψη των κύριων επεξεργασιών που έχουν υποστεί από τις υπεύθυνες επιστημονικές ομάδες πριν χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της μελέτης. Οι επιπλέον επεξεργασίες που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής στα πολυφασματικά δεδομένα παρουσιάζονται σε ξεχωριστές παραγράφους.

NOAA AVHRR

Τα συστήματα AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer) μεταφέρονται από

Πίνακας 2. Οι αισθητήρες, τα προϊόντα και οι ιδιότητες των δορυφορικών και εναέριων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Πλατφόρμα - Αισθητήρας	Προϊόν	Εξαχθείσες Παράμετροι	Χρονικό Βήμα	Χωρική Ανάλυση	Διαθεσιμότητα
<i>Πολυφασματικοί</i>					
NOAA AVHRR	GIMMS	NDVI	15 ημέρες	8 km	1981-2006
SPOT VGT	VGT-S10	NDVI	10 ημέρες	1 km	1998-Σήμερα
EOS MODIS	MOD15A2	LAI	8 ημέρες	1 km	2000-Σήμερα
	MOD17A2	GPP	8 ημέρες	1 km	2000-Σήμερα
	MOD09A1	Δείκτες ανακλαστικότητας (Πίνακας 7)	8 ημέρες	500 m	2000-Σήμερα
<i>Υπερφασματικοί</i>					
CHRIS/PROBA	Mode 1	Δείκτες ανακλαστικότητας (Πίνακας 10)	Κατά παραγγελία, μέγιστη συχνότητα 15 ημέρες	34 m	2006-Σήμερα
<i>Αερομεταφερόμενοι</i>					
UAV MCA-6		NDVI, RDVI, MTVI, R ₇₀₀ /R ₆₇₀ , PRI, PRI ₅₁₅		30 cm	

τους περιβαλλοντικούς δορυφόρους πολικής τροχιάς (Polar Operational Environmental Satellites - POES) του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) εδώ και 3 δεκαετίες. Αν και ο αρχικός σχεδιασμός του αισθητήρα σκόπευε σε πιο στενές εφαρμογές, κυρίως παρακολούθησης μετεωρολογικών παραμέτρων, ο AVHRR είναι ο πρώτος αισθητήρας που προσέφερε τις βάσεις των παγκόσμιων σειρών δεδομένων αποτίμησης περιβαλλοντικών θεμάτων, αποτελώντας σήμερα την μεγαλύτερη συλλογή δορυφορικών δεδομένων παρακολούθησης της γης. Έχουν τεθεί σε τροχιά επιτυχώς 13 πλατφόρμες NOAA (Πίνακας 3) με συστήματα AVHRR από το 1978 έως σήμερα. Ο πρώτος αισθητήρας AVHRR ήταν ένα ραδιόμετρο τεσσάρων καναλιών στην πλατφόρμα TIROS-N και εκτοξεύθηκε τον Οκτώβριο του 1978. Μία βελτιωμένη έκδοση του (AVHRR/2) που διέθετε 5 κανάλια εκτοξεύθηκε τον Ιούνιο του 1981 με την πλατφόρμα NOAA-7, ενώ η τελευταία έκδοση του αισθητήρα (AVHRR/3) διαθέτει 6 κανάλια και τέθηκε πρώτη φορά σε τροχιά με την πλατφόρμα NOAA-15 τον Μάιο του 1998 (Πίνακας 3). Τα κανάλια του AVHRR καταγράφουν ακτινοβολία στο ορατό και υπέρυθρο φάσμα, διαθέτοντας ένα κανάλι στο ορατό, δύο στο υπέρυθρο (εγγύς και μέσο) και τρία στο θερμικό υπέρυθρο. Τα κανάλια και οι εφαρμογές τους παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.

Οι δορυφόροι NOAA κάνουν 14 περιστροφές της γης ανά ημέρα σε υψόμετρο 833 km σαρώνοντας ζώνη εύρους (swath width) 2399 km σε κάθε τροχιά. Παρέχουν έτσι καθημερινά πλήρη κάλυψη της γης από πόλο σε πόλο αν και οι περιοχές στα άκρα των περιοχών σάρωσης υπόκεινται σε έντονες γεωμετρικές και γωνιακές επιδράσεις. Η μέση τιμή στιγμιαίου εύρους πεδίου (instantaneous field-of-view - IFOV) κυμαίνεται στα 1.4 milliradians, προσφέροντας μέγιστη χωρική διακριτικότητα στην επιφάνεια της γης περίπου 1.1 km. Τα δεδομένα αυτού του επιπέδου ανάλυσης αναφέρονται ως τοπικής κάλυψης (Local Area Coverage - LAC). Επιπροσθέτως, οι δέκτες AVHRR αναπροσαρμόζουν την πρωτογενή φασματική πληροφορία αυτόματα για τον υπολογισμό των δεδομένων σφαιρικής κάλυψης (Global Area Coverage - GAC). Τα δεδομένα σφαιρικής κάλυψης σχηματίζονται από την επιλογή κάθε τρίτης γραμμής δεδομένων πλήρους ανάλυσης (LAC) από τις οποίες υπολογίζεται η μέση τιμή τεσσάρων από κάθε πέντε εικονοστοιχεία, δίνοντας την τιμή που προκύπτει σε ένα εικονοστοιχείο ανάλυσης GAC. Η

Πίνακας 3. Η ακολουθία εκτόξευσης και οι διάρκειες λειτουργίας των δορυφόρων NOAA με αισθητήρες AVHRR. Με γκρι φόντο σημαίνονται οι δορυφόροι που χρησιμοποιήθηκαν από τις επιστημονικές ομάδες (Pinzon et al. 2005, Tucker et al. 2005) για την κατασκευή της 25ετούς χρονοσειράς NDVI του αρχείου GIMMS.

Δορυφόρος	Ημερομηνία εκτόξευσης	Έναρξη λειτουργίας	Τέλος λειτουργίας	GIMMS
TIROS-N	13/10/1978	19/10/1978	30/1/1980	
NOAA-6	27/6/1979	27/6/1979	16/11/1986	
NOAA-7	23/6/1981	24/8/1981	7/6/1986	1981-1985
NOAA-8	28/3/1983	3/5/1983	31/10/1985	
NOAA-9	12/12/1984	25/2/1985	7/11/1988	1985-1988
NOAA-10	17/9/1986	17/11/1986	30/8/2001	
NOAA-11	24/9/1988	8/11/1988	13/9/1994	1988-1994
NOAA-12	14/5/1991	14/05/1991	5/4/2001 (σε αναμονή)	
NOAA-13	9/8/1993	Απέτυχε		
NOAA-14	30/12/1994	30/12/1994	σε λειτουργία	1995-2000
NOAA-15	13/5/1998	13/5/1998	σε λειτουργία	
NOAA-16	21/9/2000	20/3/2001	σε λειτουργία	2001-2003
NOAA-17	24/6/2002	15/10/2002	σε λειτουργία	2004-2006
NOAA-18	20/5/2005	10/6/2005	σε λειτουργία	

Πίνακας 4. Τα γενικά χαρακτηριστικά των καναλιών των αισθητήρων AVHRR και οι προτεινόμενες εφαρμογές τους. Να σημειωθεί ότι υπάρχουν μικρές διαφορές από αισθητήρα σε αισθητήρα ενώ το κανάλι 3A εισήχθη στην τρίτη έκδοση του AVHRR (1998 – σήμερα).

Κανάλι	Εύρος (μm)	Διακριτικότητα (km)	Εφαρμογή
1	0.58 - 0.68 (κόκκινο)	1.09	Ημερήσια χαρτογράφηση νεφών/επιφάνειας/βλάστησης
2	0.72 - 1.10 (εγγύς υπέρυθρο)	1.09	Χαρτογράφηση επιφανειακού νερού/πάγου/βλάστησης, Όρια νερού-εδάφους
3A (AVHRR/3)	1.58 - 1.64 (μέσο υπέρυθρο)	1.09	Εντοπισμός πάγου/χιονιού
3B	3.55 - 3.93 (θερμικό υπέρυθρο)	1.09	Θαλάσσια επιφανειακή θερμοκρασία, Νυχτερινή χαρτογράφηση νεφών
4	10.30 - 11.30 (θερμικό υπέρυθρο)	1.09	Θαλάσσια επιφανειακή θερμοκρασία, Ημερήσια και νυχτερινή χαρτογράφηση νεφών
5	11.50 - 12.50 (θερμικό υπέρυθρο)	1.09	

προκύπτουσα χωρική διακριτικότητα για τα GAC δεδομένα είναι 4 km.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι σειρές δεδομένων GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies), οι οποίες προσφέρουν χάρτες του δείκτη NDVI που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη και είναι διαθέσιμες για διάστημα 25 ετών (Pinzon et al. 2005, Tucker et al. 2005). Παρήχθησαν από επιστημονικές ομάδες (Pinzon et al. 2005, Tucker et al. 2005) χρησιμοποιώντας τα δύο πρώτα κανάλια του AVHRR (κόκκινο – εγγύς υπέρυθρο) από τα προϊόντα ανάλυσης 4 km (GAC). Το πλεονέκτημα των προϊόντων GAC έναντι των LAC (1.1 km) είναι ότι το αρχείο των δεδομένων GAC είναι παγκόσμιας κάλυψης και συνεχές από τον Ιούλιο του 1981 μέχρι σήμερα, ενώ το αρχείο των δεδομένων LAC παρουσιάζει κενά. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους δορυφόρους NOAA AVHRR 7, 9, 11, 14, 16 και 17 για την δημιουργία του αρχείου GIMMS (Πίνακας 3). Η δημιουργία ενός τόσο μεγάλου αρχείου δεδομένων και μάλιστα από διαφορετικούς δορυφόρους και αισθητήρες προϋποθέτει μία σειρά από λεπτομερείς διορθώσεις. Διακυμάνσεις στις τιμές του NDVI σε μια τέτοια σειρά δεδομένων μπορεί να προκύψουν από διάφορους παράγοντες όπως η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά του κάθε αισθητήρα, η γεωμετρία παρατήρησης, οι συνθήκες φωτισμού, τα κυμαινόμενα αεροζόλ (έντονα φαινόμενα προκαλούνται από ηφαιστειακές εκρήξεις) και άλλα φαινόμενα που δεν έχουν σχέση με τις πραγματικές μεταβολές της βλάστησης.

Το προϊόν GIMMS παρέχεται προς χρήση μετά από την εφαρμογή σειράς επεξεργασιών από τις υπεύθυνες ομάδες επιστημόνων (Pinzon et al. 2005, Tucker et al. 2005). Οι επεξεργασίες αυτές περιγράφονται συνοπτικά στις ακόλουθες παραγράφους.

Η πρώτη επεξεργασία που έχουν υποστεί τα πρωτογενή δεδομένα (GAC) είναι η γεωαναφορά τους σε ένα σταθερό πλαίσιο εικονοστοιχείων ανάλυσης 8 km δεκαπενθήμερης σύνθεσης. Μειώνοντας την διακριτικότητα των πρωτογενών δεδομένων από 4 km σε 8 km, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια πλοήγησης (≤ 1 εικονοστοιχείο), ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα που εισέρχονται λόγω αποκλίσεων της θέσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα του δορυφόρου. Κάθε συντιθέμενη εικόνα παγκόσμιας κάλυψης έχει ελεγχθεί για την ακρίβεια της γεωαναφοράς της

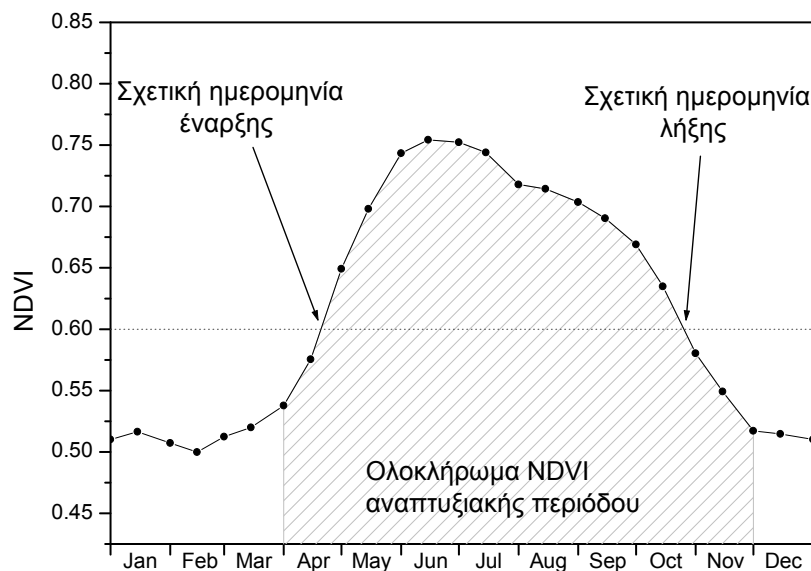
συγκρίνοντας την με χάρτες αναφοράς των ακτογραμμών κάθε ηπείρου. Οι εικόνες που ενδεχομένως περιείχαν σφάλματα πλοήγησης > 1 εικονοστοιχείου έχουν εξεταστεί λεπτομερειακά ούτως ώστε να εντοπιστούν οι μέρες που χρησιμοποιήθηκαν στην σύνθεση και είχαν σφάλματα πλοήγησης. Οι μέρες αυτές έχουν υποστεί επιπλέον επεξεργασία για την διόρθωση τους ή έχουν απορριφθεί όταν τα σφάλματα ήταν αδύνατον να διορθωθούν. Η δεκαπενθήμερη σύνθεση των εικόνων έχει γίνει επιλέγοντας την μέγιστη τιμή NDVI για κάθε εικονοστοιχείο 8 km από τα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα (Maximum Value Compositing – MVC).

Η ραδιομετρική βαθμονόμηση των δεδομένων αυτών είναι κρίσιμη διαδικασία που προϋποθέτει μεγάλη ακρίβεια λόγω των μακρών χρονοσειρών δεδομένων και των διαρκών αλλαγών των δορυφόρων και των αισθητήρων. Η βαθμονόμηση των δύο πρώτων καναλιών του NOAA-14 (Vermote & Kaufman 1995) χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την βαθμονόμηση των δεδομένων του NOAA-7. Επιπροσθέτως, έχει εφαρμοστεί η τεχνική βαθμονόμησης του Los (1998) και οι επιδράσεις της γωνίας του ηλίου έχουν διορθωθεί μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται από τον Pinzon (2002). Για την επεξεργασία των δεδομένων του NOAA-16 χρησιμοποιήθηκε η προ-πτήσης (preflight) βαθμονόμηση των δύο πρώτων καναλιών και τα δεδομένα ανακλαστικότητας των ερήμων. Επίσης, τα δεδομένα από τον δορυφόρο SPOT χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση και την βαθμονόμηση των δεδομένων από τους δορυφόρους NOAA-14 και NOAA-16 όσον αφορά τα χρονικά διαστήματα που υπήρχαν αλληλεπικαλυπτόμενες μετρήσεις μεταξύ των δύο NOAA με τον SPOT. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα του SPOT λειτούργησαν ως αναφορά ώστε να «δεθούν» οι δύο NOAA (14 και 16) μεταξύ τους.

Η σύνθεση MVC για τον NDVI αντικατέστησε τις μεθόδους ατμοσφαιρικής διόρθωσης με εξαίρεση τις περιόδους που η στρατόσφαιρα ήταν επιβαρημένη από τα ηφαιστειακά αεροζόλ των El Chichon και Mt. Pinatubo. Έχει εφαρμοστεί η διόρθωση στρατοσφαιρικών αεροζόλ των Vermote et al. (1997a) από τον Απρίλιο του 1982 μέχρι τον Δεκέμβρη του 1984 και από τον Ιούνιο του 1991 μέχρι τον Δεκέμβρη του 1994. Έχουν αναπτυχθεί συνθέσεις πεδίων οπτικών βαθμών των στρατοσφαιρικών αεροζόλ συνδυάζοντας τις μεθόδους των Sato et al. (1993), και Vermote et al. (1997a). Επίσης, μετρήσεις των Rosen et al. (1994), Russel et al. (1993) και Dutton (1994) έχουν συγκριθεί με τις αναπτυγμένες συνθέσεις πεδίων οπτικών βαθμών. Η αναγνώριση και απομόνωση των νεφών έχει γίνει με χρήση του πέμπτου καναλιού AVHRR στο θερμικό υπέρυθρο, ενώ η δεκαπενθήμερη σύνθεση μείωσε σημαντικά την επίδραση των νεφών. Οι διαδικασίες που έχουν εφαρμοστεί για την παραγωγή των χρονοσειρών GIMMS περιγράφονται λεπτομερειακά από τους Pinzon et al. (2005) και Tucker et al. (2005) και στον οδηγό του προϊόντος (GIMMS Product Guide, http://glcf.umd.edu/library/guide/GIMMSdocumentation_NDVIg_GLCF.pdf).

Επεξεργασία της χρονοσειράς NDVI του αρχείου AVHRR (GIMMS)

Λόγω της περιορισμένης χωρικής ανάλυσης (8 km) του προϊόντος GIMMS είναι δυνατή η παρακολούθηση μόνο μεγάλων ομοιογενών οικοσυστημάτων. Το δάσος δρυών (*Quercus* sp.) προσφέρεται για τέτοιου τύπου μελέτη μιας και καλύπτει αρκετά μεγάλη έκταση, είναι πυκνό και ομοιογενές. Το αρχείο GIMMS NDVI είναι διαθέσιμο από τις αρχές Απριλίου του 1981 μέχρι και το τέλος του 2006. Χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο εικονοστοιχείο για την εξαγωγή των 25ετών χρονοσειρών NDVI για το δάσος δρυών (*Quercus* sp.). Οι αναλύσεις και διορθώσεις που εφαρμόστηκαν πριν την χρήση των δεδομένων GIMMS στην παρούσα μελέτη και περιγράφηκαν παραπάνω ενισχύουν την ακρίβεια των δεδομένων ακόμα και όταν χρησιμοποιείται ένα μόνο εικονοστοιχείο. Ο NDVI ακολουθεί το αναπτυξιακό πρότυπο των οικοσυστημάτων και με



Σχήμα 22. Επεξεργασία της χρονοσειράς NDVI των δορυφόρων NOAA AVHRR για την εξαγωγή ιδιοτήτων της ετήσιας αναπτυξιακής περιόδου του οικοσυστήματος *Quercus* sp.. Στο γράφημα παρουσιάζεται ενδεικτικά η μέση καμπύλη NDVI από τα 25 διαθέσιμα έτη του αρχείου GIMMS για την περιοχή *Quercus* sp. και υποδεικνύονται τα βασικά χαρακτηριστικά που εξήχθησαν από την χρονοσειρά ανά έτος. Με σκίαση παρουσιάζεται το ετήσιο ολοκλήρωμα της καμπύλης NDVI για την αναπτυξιακή περίοδο όπου λαμβάνεται υπ' όψιν το διάστημα 1/4 – 30/11 κάθε έτους. Το όριο 0.6 στην τιμή του NDVI υπολογίστηκε βάσει της διακύμανσης των τιμών του χειμερινού NDVI και χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των ημερομηνιών έναρξης και λήξης της αναπτυξιακής περιόδου κάθε έτους. Οι ημέρες που φτάνουν την τιμή αυτή στην εαρινή αύξηση και την φθινοπωρινή πτώση των τιμών NDVI θεωρήθηκαν ως ημερομηνία έναρξης και λήξης της αναπτυξιακής περιόδου αντίστοιχα.

κατάλληλη επεξεργασία της μακριάς χρονοσειράς είναι δυνατόν να εξαχθούν πολύτιμα δεδομένα για την συμπεριφορά του οικοσυστήματος στο χρόνο σε σχέση με τις κλιματικές διακυμάνσεις.

Αρχικά, κάθε έτος χωρίστηκε σε δύο περιόδους. Η πρώτη τέθηκε από αρχές Απριλίου μέχρι τέλος Νοεμβρίου (1/4 – 30/11) και ορίστηκε ως η περίοδος μέσα στην οποία συμβαίνει η αναπτυξιακή δραστηριότητα του οικοσυστήματος *Quercus* sp. Το υπόλοιπο διάστημα του έτους (1/12 – 31/3) ορίστηκε ως η χειμερινή περίοδος, μέσα στην οποία δεν υπάρχει καμία αναπτυξιακή δραστηριότητα στο συγκεκριμένο οικοσύστημα. Από την περίοδο αναπτυξιακής δραστηριότητας υπολογίστηκε το ολοκλήρωμα των καμπυλών NDVI για κάθε έτος (Σχήμα 22). Το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της ετήσιας παραγωγικότητας του οικοσυστήματος *Quercus* sp. Επίσης, υπολογίστηκε η μέγιστη τιμή NDVI κάθε αναπτυξιακής περιόδου καθώς και η ημέρα που επετεύχθη η μέγιστη τιμή. Όσον αφορά την χειμερινή περίοδο, μέσω στατιστικής ανάλυσης των τιμών του NDVI σε αυτό το διάστημα κάθε έτους, που περιελάμβανε την εξαγωγή της μέσης τιμής NDVI της χειμερινής περιόδου, των ετήσιων μέγιστων τιμών χειμερινού NDVI κάθε έτους, καθώς και το μέσο όρο των τελευταίων, υπολογίστηκε μια οριακή τιμή NDVI. Η οριακή τιμή τέθηκε στο 0.6 και χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό των ημερομηνιών έναρξης και λήξης της αναπτυξιακής περιόδου κάθε έτους. Βάσει της ανάλυσης των χειμερινών τιμών συμπεραίνεται ότι πάνω από το όριο αυτό υπάρχει μετά βεβαιότητας αναπτυξιακή λειτουργία του οικοσυστήματος και η αύξηση του NDVI δεν οφείλεται σε εξωτερικές επιδράσεις. Οι σχετικές ημερομηνίες έναρξης και λήξης κάθε αναπτυξιακής περιόδου προήλθαν από και μετατροπή των καμπυλών NDVI από δεκαπενθήμερο σε ημερήσιο βήμα (interpolation). Ως ημερομηνίες έναρξης

και λήξης της αναπτυξιακής περιόδου ορίστηκαν οι ημέρες που η τιμή του NDVI φθάνει την οριακή τιμή 0.6 κατά την αύξηση την άνοιξη και κατά την πτώση το φθινόπωρο αντίστοιχα (Σχήμα 22). Η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ορίζεται από το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο αυτών ημερομηνιών.

SPOT VGT

Οι δορυφόροι SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) προέρχονται από το πρόγραμμα τηλεπισκόπησης που ξεκίνησε το 1978 με κύριους συνέταιρους την Γαλλία, το Βέλγιο και τη Σουηδία. Οι τρεις πρώτοι δορυφόροι SPOT (1, 2 και 3) ήταν όμοιοι και μετέφεραν δύο ίδια όργανα μέτρησης (Visible High-Resolution - HRV), προσφέροντας πολύ μεγάλη χωρική διακριτικότητα (20 m) σε 3 κανάλια (πράσινο, κόκκινο, εγγύς υπέρυθρο). Στον SPOT-4 οι αισθητήρες αναβαθμίστηκαν (Visible & Infrared High-Resolution - HRVIR) με ένα επιπλέον κανάλι στο μέσο υπέρυθρο καθώς και με έναν επιπλέον αισθητήρα, το όργανο VEGETATION ή VGT. Ο SPOT-4 τέθηκε σε τροχιά στις 24 Μαρτίου 1998 και είναι ακόμη λειτουργικός. Η εισαγωγή του VGT στον SPOT-4 σήμανε την αρχή ενός προγράμματος παρακολούθησης της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα που συγχρηματοδοτήθηκε από το Βέλγιο, την Γαλλία, την Ιταλία, την Σουηδία και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, ενώ διεξάγεται υπό την εποπτεία του CNES (National Centre for Space Studies, Γαλλία). Ο αισθητήρας VGT διαθέτει παρόμοια κανάλια με τους HRVIR (Πίνακας 5), λειτουργεί όμως σε πολύ μεγαλύτερο εύρος πεδίου (FOV = 101°) σαρώνοντας ζώνη πλάτους (swath width) 2250 km στην επιφάνεια της γης. Μέσω αυτών των δυνατοτήτων σάρωσης, το όργανο VGT μπορεί να καλύψει σχεδόν όλη την γη σε μία μέρα. Η μέγιστη χωρική διακριτικότητα που επιτυγχάνει είναι 1.165 km. Στις 4 Μαΐου 2002 τέθηκε σε τροχιά ο SPOT-5 διαθέτοντας επιπλέον αισθητήρες αλλά διατηρώντας τα ίδια χαρακτηριστικά στον VGT, διασφαλίζοντας την συνέχεια και τη συνεκτικότητα των δεδομένων παγκόσμιας κάλυψης.

Από τον VGT προκύπτουν διάφορα προϊόντα καθημερινής ή δεκαήμερης σύνθεσης σε πλήρη ή μειωμένη διακριτικότητα. Τα προϊόντα αυτά παρέχονται προς χρήση μετά από την εφαρμογή μιας σειράς επεξεργασιών από την επιστημονική ομάδα του κέντρου επεξεργασίας και αρχειοθέτησης του προγράμματος SPOT-VGT (Mol, Belgium). Οι διαδικασίες στις οποίες υποβάλλονται τα δεδομένα περιλαμβάνουν κατά σειρά: την γεωαναφορά των πρωτογενών εικόνων, την μετατροπή τους σε μία κοινή χαρτογραφική προβολή, τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top-of-Atmosphere, TOA reflectance), τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις για την εκτίμηση της ανακλαστικότητας στην επιφάνεια της γης (surface reflectance) και τέλος τη σύνθεση τους με την μέθοδο επιλογής εικονοστοιχείου «καλύτερης απεικόνισης» MVC (Maximum Value Composite). Η κάθε επεξεργασία περιγράφεται συνοπτικά στις ακόλουθες παραγράφους.

Πίνακας 5. Το εύρος, η χωρική διακριτικότητα και οι προτεινόμενες εφαρμογές των καναλιών που διαθέτει ο αισθητήρας VGT.

Κανάλι	Εύρος (μm)	Διακριτικότητα (m)	Εφαρμογή
B0	0.43 – 0.47 (μπλε)	1165	Ωκεανογραφικές εφαρμογές, Ατμοσφαιρικές διορθώσεις
B2	0.61 – 0.68 (κόκκινο)	1165	Φωτοσυνθετική
B3	0.79 – 0.89 (εγγύς υπέρυθρο)	1165	δραστηριότητα βλάστησης
MIR	1.58 – 1.75 (μέσο υπέρυθρο)	1165	Υγρασία εδάφους/βλάστησης

Η γεωμετρική επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων VGT περιλαμβάνει μοντελοποίηση της τροχιάς του δορυφόρου και της περιοχής σάρωσης σε δύο υψομετρικά επίπεδα μέσω των δεδομένων που προέρχονται από τους αισθητήρες του δορυφόρου (Passot 2001). Η παραπάνω διαδικασία αποδίδει ικανοποιητική ακρίβεια της θέσης της εικόνας (500-800 m απόκλιση), αλλά δεν επαρκεί για την γεωαναφορά πολλαπλών εικόνων διαφορετικής χρονικής κάλυψης. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται επιπλέον ένα σύστημα εδαφικών σημείων αναφοράς (Ground Control Points – GCPs). Μία βάση δεδομένων από 3650 GCPs έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας εικόνες από τον αισθητήρα HRV, τον VGT και λεπτομερείς χάρτες. Έπειτα από την γεωαναφορά των εικόνων μεταφέρονται όλες στην ίδια χαρτογραφική προβολή έτσι ώστε να ξεκινήσει η επεξεργασία και σύνθεση τους. Η προβολή που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία των VGT είναι η Plate-Carrée με $1/112^\circ$ ανά εικονοστοιχείο σε γραμμή και στήλη, το οποίο είναι περίπου $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ στον Ισημερινό και $0.5 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ σε 60° γεωγραφικό πλάτος. Το πλέγμα αυτό συνδυάζεται με ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου (Digital Elevation Model – DEM) για τον υπολογισμό της θέσης των εικονοστοιχείων.

Η ψηφιακή τιμή κάθε εικονοστοιχείου κανονικοποιείται μέσω κάποιων παραμέτρων βαθμονόμησης που υπολογίζονται στο κέντρο ποιότητας εικόνας VGT (VEGETATION Image Quality Centre - QIV) και εν συνεχεία υπολογίζεται η ανακλαστικότητα TOA λαμβάνοντας υπ' όψιν το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας, τις γωνίες του ηλίου και την απόσταση ηλίου-γης. Κατόπιν, υπολογίζεται ο δείκτης NDVI από τις τιμές ανακλαστικότητας TOA κάθε εικονοστοιχείου για την προσωρινή χρήση του στην διαδικασία σύνθεσης. Για την εκτίμηση της ανακλαστικότητας στην επιφάνεια της γης εφαρμόζονται ατμοσφαιρικές διορθώσεις μέσω μίας απλοποιημένης εφαρμογής της μεθόδου 6S (Tanre et al. 1990) χρησιμοποιώντας το λογισμικό SMAC (CESBIO, Rahman et Dedieu).

Για την κατασκευή των παγκοσμίων συνθέσεων από τις συλλογές των τμηματικών εικόνων από τις τροχιές του δορυφόρου, εφαρμόζεται μια διαδικασία ψηφιοποίησης ανά εικονοστοιχείο επιλέγοντας την «καλύτερη απεικόνιση» που ελήφθη για κάθε εικονοστοιχείο ανάμεσα σε μια σειρά από διαθέσιμες εικόνες. Ο αλγόριθμος που έχει επιλεγεί για την διαδικασία αυτή είναι ο MVC, μέσω του οποίου επιλέγεται το φάσμα ανακλαστικότητας που δίνει τη μεγαλύτερη τιμή NDVI για κάθε χερσαίο εικονοστοιχείο. Στα προϊόντα δεκαήμερης σύνθεσης (VGT-S10) κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να διαθέτει από 5 έως 30 απεικονίσεις, γεγονός που εξασφαλίζει μια απαλλαγμένη από νέφη, ή άλλους θορύβους, όψη του πλανήτη.

EOS MODIS

Ο αισθητήρας MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) είναι ένα από τα βασικά όργανα που διαθέτουν στις πλατφόρμες τους οι δορυφόροι Terra (ή EOS AM) και Aqua (ή EOS PM). Και οι δύο πλατφόρμες που μεταφέρουν τους αισθητήρες MODIS αποτελούν μέρος του προγράμματος EOS (Earth Observing System) της NASA (National Aeronautics and Space Administration) για την μελέτη της επιφάνειας της γης, της βιόσφαιρας, της ατμόσφαιρας και των ωκεανών. Το πρόγραμμα EOS ξεκίνησε τον σχεδιασμό του την δεκαετία του 1980 και πήρε μορφή την δεκαετία του 1990. Περιλαμβάνει μία σειρά από δορυφόρους πολιτικής τροχιάς σχεδιασμένους για την παρακολούθηση σημαντικών παραμέτρων του κλιματικού συστήματος και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους, μέσω παγκόσμιων, μακρών και συνεχών παρατηρήσεων. Η πλατφόρμα Terra ήταν η πρώτη που εγκαίνιασε την δεύτερη φάση του προγράμματος EOS με την εκτόξευση της τον Δεκέμβριο του 1999. Ακολουθεί σχεδόν πολική ηλιοσύγχρονη τροχιά που διασχίζει τον ισημερινό κινούμενη προς τα νότια το πρωί, στις 10:30 π.μ. Η πλατφόρμα Aqua

εκτοξεύθηκε τον Μάιο του 2002 και ακολουθεί ανοδική τροχιά (προς τα βόρεια), διασχίζοντας τον ισημερινό στις 1:30 μ.μ. Ο συνδυασμός των παρατηρήσεων του αισθητήρα MODIS από τις δύο πλατφόρμες επιτρέπει την μελέτη ημερήσιων μεταβολών.

Το όργανο MODIS ενσωματώνει το γενικό σχέδιο ενός συμβατικού φασματοραδιόμετρου απεικόνισης προσφέροντας εικόνες σε 36 διακριτά κανάλια σε επιλεγμένα μήκη κύματος ανάμεσα στα 0.4 και 14.5 μm (Πίνακας 6). Τα φασματικά κανάλια προσφέρουν διαφορετικές χωρικές διακριτικότητες· στα 250 (κανάλια 1 και 2), 500 (κανάλια 3-7) και 1000 m (κανάλια 8-36) σε κατακόρυφη απεικόνιση, ενώ το εύρος πεδίου του αισθητήρα ($\pm 55^\circ$) σαρώνει έκταση πλάτους (swath width) 2330 km σε κάθε τροχιά. Καλύπτει έτσι το σύνολο του πλανήτη σε 1 ή 2 ημέρες. Μέσω διαφόρων επεξεργασιών των πρωτογενών δεδομένων MODIS που επιτελούνται από τις επιστημονικές ομάδες της NASA και λόγω των ποικίλων διαθέσιμων καναλιών και του

Πίνακας 6. Το εύρος, η χωρική διακριτικότητα και οι προτεινόμενες εφαρμογές του συνόλου των καναλιών που διαθέτει ο αισθητήρας MODIS.

	Εύρος (nm)	Διακριτικότητα (m)	Εφαρμογή
1	620 - 670	250	Όρια
2	841 - 876	250	γης/νεφών/αεροζόλ
3	459 - 479	500	Ιδιότητες γης/νεφών/αεροζόλ
4	545 - 565	500	
5	1230 - 1250	500	
6	1628 - 1652	500	
7	2105 - 2155	500	
8	405 - 420	1000	Χρώμα ωκεανών, Φυτοπλαγκτόν, Βιογεωχημεία
9	438 - 448	1000	
10	483 - 493	1000	
11	526 - 536	1000	
12	546 - 556	1000	
13	662 - 672	1000	
14	673 - 683	1000	
15	743 - 753	1000	
16	862 - 877	1000	
17	890 - 920	1000	Υδρατμοί ατμόσφαιρας
18	931 - 941	1000	
19	915 - 965	1000	
	Εύρος (μm)	Διακριτικότητα (m)	Εφαρμογή
20	3.660 - 3.840	1000	Θερμοκρασία επιφάνειας/νεφών
21	3.929 - 3.989	1000	
22	3.929 - 3.989	1000	
23	4.020 - 4.080	1000	Θερμοκρασία ατμόσφαιρας
24	4.433 - 4.498	1000	
25	4.482 - 4.549	1000	Νεφελώματα, Νέφη, Υδρατμοί
26	1.360 - 1.390	1000	
27	6.535 - 6.895	1000	
28	7.175 - 7.475	1000	Ιδιότητες νεφών
29	8.400 - 8.700	1000	
30	9.580 - 9.880	1000	Οζόν
31	10.780 - 11.280	1000	Θερμοκρασία επιφάνειας/νεφών
32	11.770 - 12.270	1000	
33	13.185 - 13.485	1000	Υψόμετρο κορυφής νεφών
34	13.485 - 13.785	1000	
35	13.785 - 14.085	1000	
36	14.085 - 14.385	1000	

Πίνακας 7. Οι δείκτες βλάστησης που εξήχθησαν από τα πέντε πρώτα κανάλια του MODIS στην παρούσα έρευνα. Οι δείκτες κατανεμήθηκαν βάσει του αρχικού τους σχεδιασμού και αναμενόμενης λειτουργίας. Ο αρχικός σχεδιασμός και η πρωτότυπη φόρμουλα των δεικτών με αστερίσκο είναι πάνω σε στενότερα κανάλια αλλά αναπροσαρμόστηκαν πειραματικά στα πέντε πρώτα κανάλια του MODIS.

Δείκτης	Τύπος	Αναφορά
πράσινης βλάστησης		
EVI (<i>Enhanced Vegetation Index</i>)	$2.5 \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + 6R_{red} - 7.5R_{blue} + 1}$	Huete et al. (1996)
Green NDVI (<i>green Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{nir} - R_{green}) / (R_{nir} + R_{green})$	Gitelson et al. (1996)
MCARI (<i>Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)*	$1.2[2.5(R_{nir} - R_{red}) - 1.3(R_{nir} - R_{green})]$	Haboudane et al. (2004)
mNDVI (<i>Modified Normalized Difference Vegetation Index</i>)*	$(R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red} - 2R_{blue})$	Sims & Gamon (2002)
MTVI (<i>Modified Triangular Vegetation Index</i>)*	$0.5[120(R_{nir} - R_{green}) - 200(R_{red} - R_{green})]$	Βασισμένος σε Broge & Leblanc (2001) και Haboudane et al. (2004)
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})$	Tucker (1979)
OSAVI (<i>Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)	$1.16(R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red} + 0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
RDVI (<i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{nir} - R_{red}) / \sqrt{(R_{nir} + R_{red})}$	Roujean & Breon (1995)
SR (<i>Simple Ratio</i>)	R_{nir} / R_{red}	Jordan (1969)
χρωστικών φύλλων (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)		
BGI (<i>Blue Green Pigment Index</i>)*	R_{blue} / R_{green}	Zarco-Tejada et al. (2005)
BRI (<i>Blue Red Pigment Index</i>)*	R_{blue} / R_{red}	Zarco-Tejada et al. (2005)
NBGI (<i>Normalized Blue Green Pigment Index</i>)*	$(R_{blue} - R_{green}) / (R_{blue} + R_{green})$	Βασισμένος σε Zarco-Tejada et al. (2005)
NPCI (<i>Normalized Pigment Chlorophyll index</i>)*	$(R_{red} - R_{blue}) / (R_{red} + R_{blue})$	Peñuelas et al. (1994)
PSRI (<i>Plant Senescence Reflectance Index</i>)*	$(R_{red} - R_{green}) / R_{nir}$	Merzlyak et al. (1999)
Red/Green	R_{red} / R_{green}	Gamon & Surfus (1999)
SIPI (<i>Structure Insensitive Pigment Index</i>)*	$(R_{nir} - R_{blue}) / (R_{nir} - R_{red})$	Peñuelas et al. (1995)
υδατικής κατάστασης		
NDWI (<i>Normalised Difference Water Index</i>)	$(R_{nir} - R_{swir}) / (R_{nir} + R_{swir})$	Gao (1996)

*Όπου R_{red} , R_{nir} , R_{blue} , R_{green} , R_{swir} οι ανακλαστικότητες των 5 πρώτων καναλιών του MODIS (Πίνακας 6)

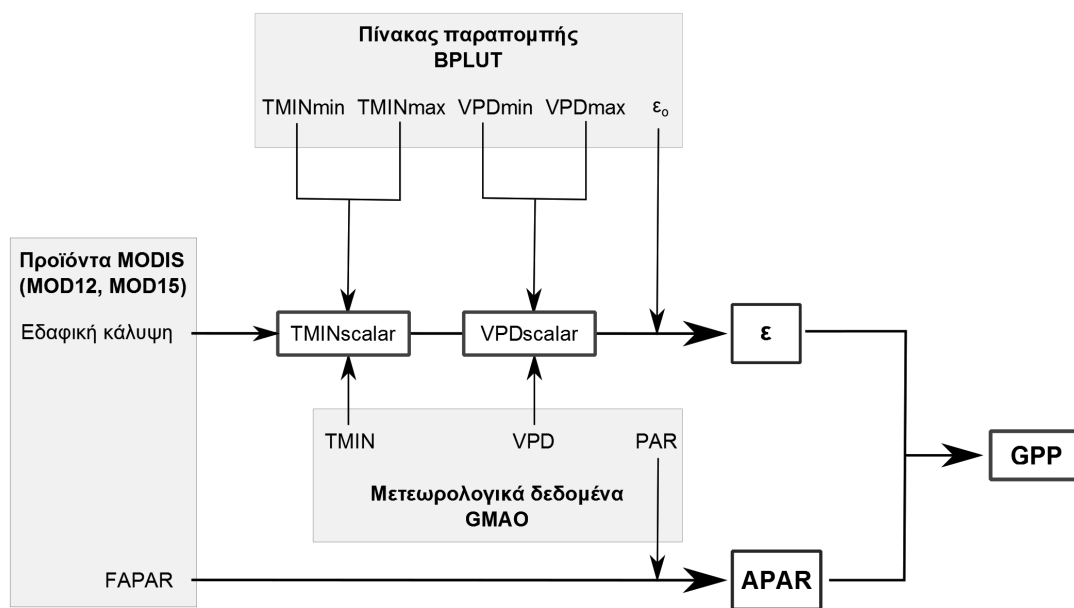
φασματικού εύρους που αυτά καλύπτουν, προκύπτουν μία σειρά από προϊόντα που αφορούν παραμέτρους της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των χερσαίων εκτάσεων. Στα προϊόντα αυτά συμπεριλαμβάνονται χάρτες δεικτών βλάστησης (NDVI, EVI), καθώς επίσης και φάσματα ανακλαστικότητας των πρώτων 7 καναλιών MODIS (Πίνακας 6). Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, οι επιστημονικές ομάδες της NASA εφαρμόζουν στα δεδομένα MODIS ειδικούς αλγόριθμους για την παραγωγή παγκόσμιων χαρτών δυναμικών παραμέτρων της βλάστησης (LAI, FAPAR) καθώς και αναλυτικών χαρτών εκτίμησης της παγκόσμιας πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP). Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφονται συνοπτικά οι επεξεργασίες που έχουν υποβληθεί τα δεδομένα MODIS από τις επιστημονικές ομάδες της NASA για να παραχθούν τα προϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Τα πρωτογενή δεδομένα MODIS βαθμονομούνται πρώτα ραδιομετρικά (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod28_v3.pdf) και γεωμετρικά (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod01.pdf) μέσω αλγορίθμων που χρησιμοποιούν δεδομένα από ειδικά

όργανα που διαθέτει η πλατφόρμα και ο αισθητήρας MODIS (On-Board Calibrators – OBVs), από την αρχική διαδικασία βαθμονόμησης πριν την εκτόξευση, από βοηθητικά δεδομένα, καθώς και από εξωτερικές πηγές βαθμονόμησης όπως η ακτινοβολία που ανακλάται από το φεγγάρι και το σκοτάδι του διαστήματος. Για την εισαγωγή των γεωγραφικών δεδομένων στις εικόνες MODIS εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί πληροφορίες για την επιφάνεια και το ελλειψοειδές της Γης σε συνδυασμό με δεδομένα για την τροχιά, την συμπεριφορά και την γεωμετρία του δορυφόρου. Τα βοηθητικά δεδομένα που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος περιλαμβάνουν και μια σειρά από γνωστά σημεία αναφοράς (GCPs) τα οποία βοηθούν επίσης στα στάδια αξιολόγησης της γεωαναφοράς. Ακολουθεί η ατμοσφαιρική διόρθωση που θα εκτιμήσει την ανακλαστικότητα στην επιφάνεια της γης (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf). Εφαρμόζεται αλγόριθμος που διορθώνει τις επιδράσεις αερίων και αεροζόλ που απορροφούν ή προκαλούν σκεδασμό της ακτινοβολίας, καθώς επίσης για επιδράσεις BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), παράπλευρες επιδράσεις της πολυπλοκότητας του εδάφους και της ατμόσφαιρας και τέλος για συγκεντρώσεις από λεπτά νέφη. Ο κώδικας που χρησιμοποιείται για την διαδικασία ατμοσφαιρικής διόρθωσης βασίζεται στον 6S (Vermote et al. 1997b) που λειτουργεί σαν αναφορά για την ανάπτυξη ενός επιτυχούς αλγορίθμου ατμοσφαιρικής διόρθωσης. Στην διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται επίσης προϊόντα του MODIS που αφορούν ατμοσφαιρικές παραμέτρους όπως τα αεροζόλ, τους υδρατμούς, το όζον και τα νέφη.

Τα τελικά προϊόντα ανακλαστικότητας (MOD09A1) προκύπτουν μετά από μεταφορά των διορθωμένων εικόνων σε μία κοινή χαρτογραφική προβολή (Sinusoidal projection), την σύνθεση των εικόνων ανά ημέρα και ακολούθως ανά οκταήμερο. Για τα κομμάτια των εικόνων της ίδιας ημέρας που αλληλεπικαλύπτονται στις άκρες τους, επιλέγονται οι καλύτερες παρατηρήσεις ανά εικονοστοιχείο. Αυτές καθορίζονται από τους δείκτες ποιότητας που έχουν κατανεμηθεί στα εικονοστοιχεία μέσω των αλγορίθμων διόρθωσης που προηγήθηκαν. Βάσει των ημερήσιων συνθέσεων κατασκευάζονται οι χάρτες οκταήμερου ακολουθώντας την ίδια λογική επιλογής των καλύτερων εικονοστοιχείων. Στην επιλογή αυτή παίζουν ρόλο το μέγεθος κάλυψης κάθε απεικόνισης, οι γωνίες παρατήρησης, η παρουσία νεφών ή σκιών από νέφη και η επιβάρυνση από αεροζόλ. Οι τιμές ανακλαστικότητας των καναλιών του MODIS (MOD09A1) χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη για τον υπολογισμό μια σειράς εφαρμοσμένων και πειραματικών δεικτών βλάστησης (Πίνακας 7).

Από τα διορθωμένα δεδομένα ανακλαστικότητας του MODIS παράγονται οι παγκόσμιοι χάρτες του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και του ποσοστού της απορροφούμενης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (FAPAR). Το προϊόν αυτό (MOD15A2) διατίθεται με διακριτικότητα 1 km σε οκταήμερη βάση. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται για την παραγωγή των χαρτών LAI/FAPAR (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf) αποτελείται από μία κύρια διαδικασία που εκμεταλλεύεται την φασματική πληροφορία των 7 πρώτων καναλιών του MODIS. Σε περίπτωση που αυτή η διαδικασία αποτύχει να εξάγει αποδεκτά αποτελέσματα, ένας εναλλακτικός αλγόριθμος ενεργοποιείται για την εκτίμηση των LAI και FAPAR μέσω δεικτών βλάστησης. Ο αλγόριθμος χρειάζεται επίσης δεδομένα ταξινόμησης της βλάστησης, τα οποία αντλούνται από το προϊόν κάλυψης του εδάφους (MOD12) και διακρίνουν 6 διαφορετικούς τύπους οικοσυστημάτων (λιβαδικά/σιτηρά, θαμνώδη, καλλιέργειες πλατύφυλλων, σαβάνες, δάση πλατύφυλλων, δάση κωνοφόρων). Επιγραμματικά, η κύρια διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων LAI και FAPAR βασίζεται στην μοντελοποίηση της συμπεριφοράς και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και θόλου, ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε οικοσυστήματος και της γεωμετρίας ηλίου και αισθητήρα. Μέσω συγκρίσεων των πραγματικών παρατηρήσεων του δορυφόρου και των μοντελοποιημένων φασμάτων, εξάγονται οι επιθυμητές ιδιότητες της



Σχήμα 23. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας εκτίμησης της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) από τον αλγόριθμο του MODIS (MOD17).

βλάστησης. Η διαδικασία αυτή, σε αντίθεση με τον εναλλακτικό αλγόριθμο, χρησιμοποιεί ολόκληρη την φασματική πληροφορία που προσφέρεται από τον MODIS. Είναι όμως πιο περίπλοκη και απαιτητική σε δεδομένα εισόδου και συχνά αποτυγχάνει να εξάγει ακριβή αποτελέσματα. Στην περίπτωση αυτή ο εναλλακτικός αλγόριθμος ενεργοποιείται και εκτιμά τις τιμές των LAI/FAPAR μέσω καμπυλών συσχέτισης με τον δείκτη NDVI για τους 6 τύπους εδαφικής κάλυψης. Οι παραπάνω διαδικασίες γίνονται αρχικά σε ημερήσια βάση και ακολούθως εκτελείται η σύνθεση τους σε οκταήμερα βάσει της απλής επιλογής των εικονοστοιχείων που παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή FAPAR. Η ίδια ημέρα που επιλέχθηκε να εκπροσωπεί την τιμή FAPAR, επιλέγεται επίσης για την τιμή LAI.

Το προϊόν ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) του MODIS (MOD17A2) είναι μία συσσωρευτική σύνθεση τιμών GPP, βασισμένη στην γενική ιδέα της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (Light Use Efficiency Concept – LUE Concept) (Kumar & Monteith 1981) και προσφέρεται σε δήμερη σύνθεση χωρικής διακριτικότητας 1 km (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod16.pdf) (Σχήμα 23). Σαν δεδομένα εισόδου για την εκτίμηση των τιμών παραγωγικότητας χρησιμοποιούνται οι δορυφορικές εκτιμήσεις του FAPAR (όπως περιγράφηκε παραπάνω, MOD15) και ανεξάρτητες εκτιμήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων (PAR, ελάχιστη θερμοκρασία, VPD). Οι τελευταίες προέρχονται από τον τομέα της NASA για την ανάλυση και μοντελοποίηση κλιματικών παραμέτρων (Global Modeling and Assimilation Office - GMAO). Επιπροσθέτως, χρησιμοποιείται το προϊόν κάλυψης του εδάφους (MOD12Q1) για τον διαχωρισμό 11 τύπων βλάστησης και την δημιουργία ενός πίνακα παραπομπής ιδιοτήτων ανά τύπο κάλυψης (Biome Properties Look-up Table – BPLUT). Οι σταθερές τιμές που περιέχονται στον BPLUT χρησιμεύουν στον υπολογισμό της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ), η οποία προκύπτει λαμβάνοντας υπ' όψιν τρεις παράγοντες: την μέγιστη αποδοτικότητα (ϵ_0), έναν συντελεστή απόσβεσης που μειώνει την ϵ_0 όταν χαμηλές θερμοκρασίες περιορίζουν τις λειτουργίες των φυτών (TMINscalar) και έναν δεύτερο συντελεστή απόσβεσης που μειώνει την ϵ_0 όταν το έλλειμμα ατμοσφαιρικής υγρασίας (Vapor Pressure Deficit - VPD) είναι αρκετά υψηλό για την αναστολή

της φωτοσύνθεσης (VPDscalar). Οι δύο συντελεστές απόσβεσης προκύπτουν μέσω μιας απλής γραμμικής βαθμονόμησης των καθημερινών τιμών TMIN και VPD ανάμεσα στα όρια (TMINmin - TMINmax, VPDmin - VPDmax) που περιέχονται στον BPLUT για κάθε τύπο κάλυψης. Η εξίσωση LUE που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο του MODIS για την εκτίμηση της GPP μπορεί να αποδοθεί συνοπτικά ως εξής:

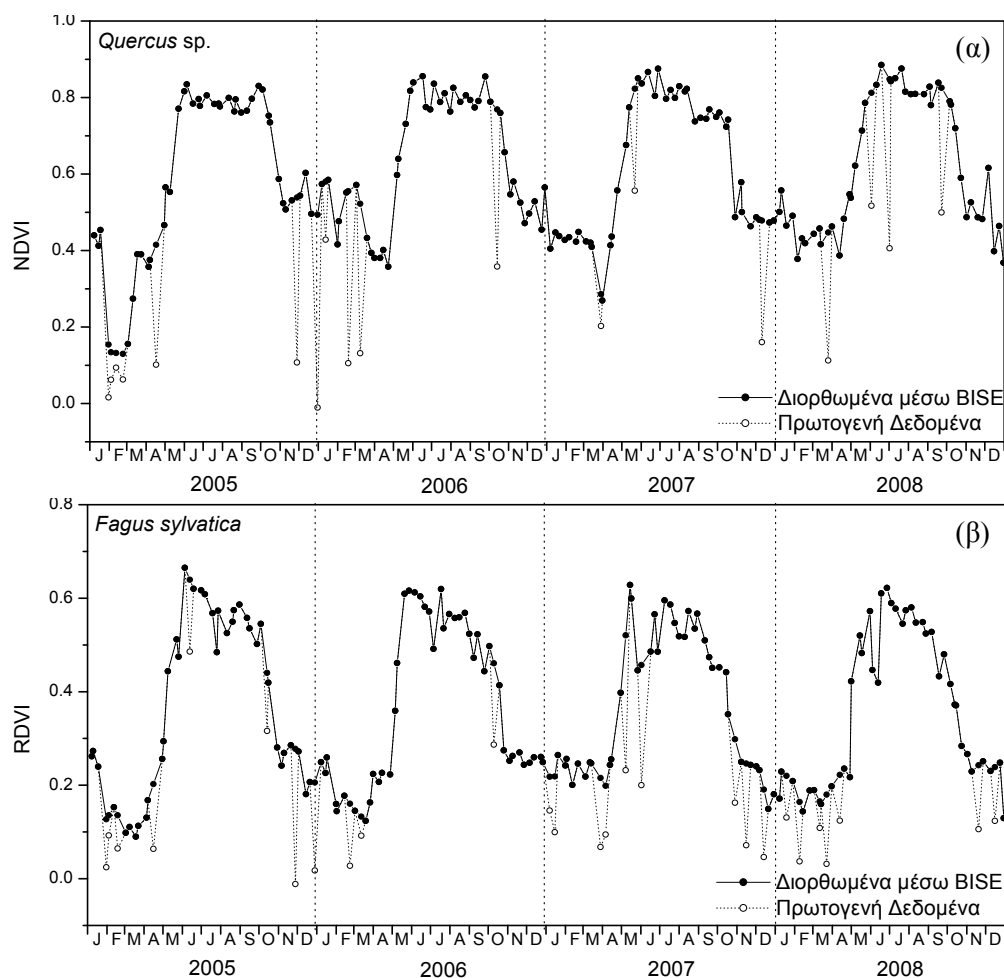
$$GPP = \varepsilon_o * TMINscalar * VPDscalar * FAPAR * PAR \quad (19)$$

Οι υπολογισμοί για την εκτίμηση του GPP γίνονται σε ημερήσια βάση και ακολούθως το ημερο προκύπτει από την πρόσθεση των ημερήσιων τιμών. Το προϊόν MOD17A2 παρέχει επίσης δεδομένα καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας (Net Primary Productivity – NPP) σε ετήσια βάση και δήμερες εκτιμήσεις καθαρής φωτοσύνθεσης (PSNnet) αφαιρώντας την αναπνοή από την GPP.

Διόρθωση των χρονοσειρών δεικτών βλάστησης πολυφασματικών δεδομένων μέσω της ανάλυσης BISE (Best Index Slope Extraction)

Όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, όλα τα πολυφασματικά δεδομένα πριν εξαχθούν και χρησιμοποιηθούν για τις αναλύσεις της παρούσας έρευνας έχουν υποστεί μια σειρά διορθώσεων από τις επιστημονικές ομάδες των εκάστοτε οργανισμών διαστήματος. Ωστόσο, διατηρούν ακόμη ένα ποσοστό επιδράσεων που κατά μεγάλο μέρος οφείλεται στην ατμοσφαιρική μεταβλητότητα, τις μεταβολές της γεωμετρίας ηλίου-στόχου-αισθητήρα και τυχαία σφάλματα στην λειτουργία των τηλεπισκοπικών συστημάτων. Είναι γεγονός ότι οι διαταραχές που προέρχονται κυρίως από παρατεταμένη συννεφιά και γενικά κακές ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και της χιονόπτωσης είναι δύσκολο να αποφευχθούν και επηρεάζουν έντονα τους δείκτες βλάστησης. Ανάλογα με τον σχεδιασμό κάθε δείκτη, τα κανάλια που χρησιμοποιεί και τις ιδιότητες της βλάστησης που εντοπίζει, μπορούν να αναπτυχθούν οι ιδιαίτερες μέθοδοι για την διόρθωσή του. Κατά συντριπτική πλειοψηφία, οι δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, αλλά και γενικά στην σχετική βιβλιογραφία, ακολουθούν τους βασικούς κανόνες συμπεριφοράς που έχουν διατυπωθεί αρχικά για τον NDVI και επιτρέπουν την ανάπτυξη μεθόδων διόρθωσης τύπου BISE (Viovy et al. 1992). Οι δύο κανόνες στους οποίους βασίζονται αυτές οι διορθώσεις είναι α) οι χρονικές ακολουθίες δεικτών που συνδέονται με αναπτυξιακές παραμέτρους της βλάστησης ακολουθούν έναν ετήσιο κύκλο ανάπτυξης και πτώσης, β) σύννεφα, χιονόπτωση και φτωχές ατμοσφαιρικές συνθήκες προκαλούν απότομη πτώση των δεικτών βλάστησης που δεν συμφωνεί με τον ακολουθούμενο ετήσιο κύκλο. Ως προέκταση των παραπάνω κανόνων, οι οποίοι είναι βασισμένοι κυρίως σε δείκτες τύπου NDVI, μπορεί να διατυπωθεί το παρακάτω γενικό αξίωμα: δείκτες που ακολουθούν φυσιολογικές ιδιότητες της βλάστησης με ομαλή διακύμανση στο χρόνο και όχι φυσιολογικές διαδικασίες γρήγορης απόκρισης σε εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. κύκλος των ξανθοφυλλών, φωτοσύνθεση) είναι αδύνατον να παρουσιάζουν μεγάλης κλίμακας πτώση και επανάκαμψη των τιμών τους σε ορισμένο μικρό χρονικό διάστημα.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος διόρθωσης χρονοσειρών δεικτών βλάστησης τύπου BISE που βασίζεται στις παραπάνω αρχές. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε στις χρονοσειρές των πολυφασματικών δεικτών της παρούσας μελέτης (Πίνακας 7) και υιοθετεί ένα επιτρεπτό όριο 20% (White et al. 1997b) τόσο στην μείωση όσο και στην επανάκαμψη των τιμών του δείκτη, καθώς και ένα χρονικό όριο, που βασίζεται στην χρονική ανάλυση κάθε δορυφορικού προϊόντος, για την αναγνώριση των προβληματικών τιμών. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκε το ελάχιστο χρονικό όριο που επιτρέπεται από κάθε χρονοσειρά,

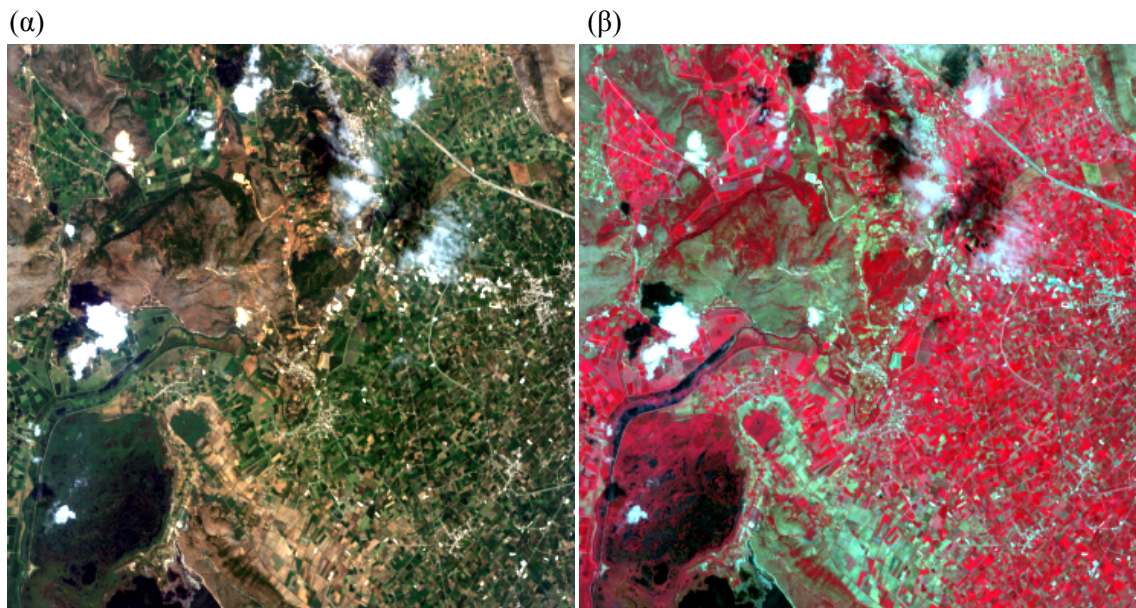


Σχήμα 24. Παραδείγματα διόρθωσης των χρονοσειρών δεικτών βλάστησης πολυφασματικών δεδομένων μέσω του αλγόριθμου BISE. Παρουσιάζονται οι χρονοσειρές (α) NDVI και (β) RDVI για τα οικοσυστήματα *Quercus sp.* και *Fagus sylvatica* αντίστοιχα, από τον αισθητήρα MODIS.

βασισμένο στις τιμές τριών συνεχόμενων παρατηρήσεων. Αυτό σημαίνει ότι το χρονικό διάστημα πτώσης-επανάκαμψης για τις χρονοσειρές NDVI του AVHRR και VGT είναι 45 και 30 ημέρες αντίστοιχα, ενώ του MODIS 24 ημέρες. Κάθε τιμή στην χρονοσειρά που αναγνωρίζεται ως λανθασμένη βάσει των προαναφερθέντων κανόνων αναπροσαρμόζεται πάνω στην γραμμική ένωση των δύο εκατέρωθεν τιμών (Σχήμα 24). Εξαιρέσεις στο προαναφερθέν όριο πτώσης και επανάκαμψης αποτέλεσαν οι δείκτες NDWI και PSRI (Πίνακας 7) που λόγω του ιδιαίτερου σχεδιασμού και των πολύ στενών διακυμάνσεων τους εφαρμόστηκε όριο 10% στην διόρθωση τους.

CHRIS/PROBA

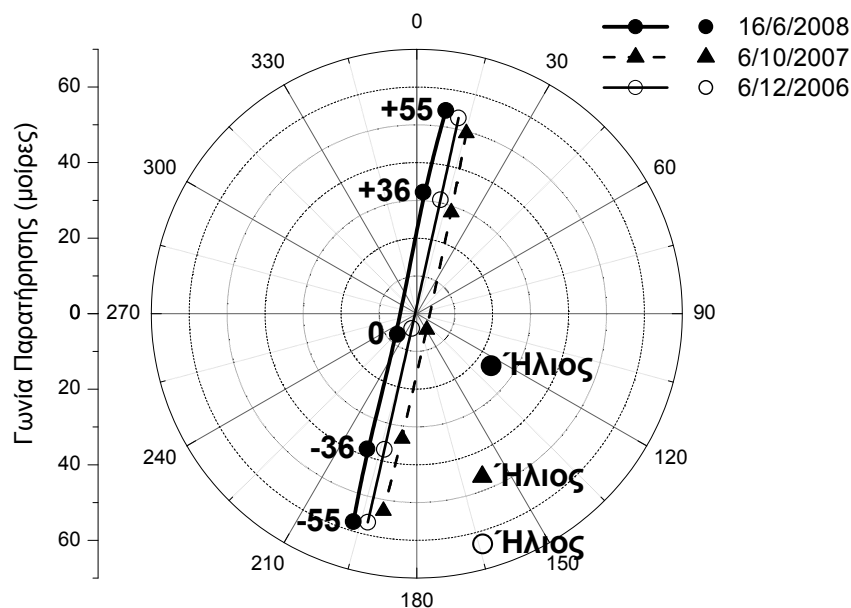
Ο αισθητήρας CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) είναι ένα φασματόμετρο απεικόνισης, ενσωματωμένο στην διαστημική πλατφόρμα PROBA (Project for On Board Autonomy). Η πλατφόρμα ακολουθεί ηλιοσύγχρονη ελλειπτική πολική τροχιά σε μέσο υψόμετρο περίπου 600 km. Ο δορυφόρος εκτοξεύθηκε επιτυχώς τον Οκτώβριο του 2001 από τον



Εικόνα 4. Απεικόνιση της περιοχής του Λούρου Πρεβέζης (Lat 39° 10.13', Lon 20° 51.00') μέσω του αισθητήρα CHRIS τον Ιούλιο του 2006. Η εικόνα αναπαριστάται (α) σε φυσικά χρώματα και (β) σε ψευδοχρωματική σύνθεση CIR.

Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ΕΟΔ – European Space Agency, ESA). Ο CHRIS/PROBA ξεχωρίζει από άλλα δορυφορικά φασματόμετρα απεικόνισης επειδή παρέχει υψηλής φασματικής και χωρικής ανάλυσης δεδομένα (Εικόνα 4). Επίσης, έχει την δυνατότητα λήψης πέντε συνεχόμενων εικόνων από πέντε διαφορετικές γωνίες κατά την διάρκεια της ίδια τροχιάς μέσα σε διάστημα 2.5 λεπτών. Οι γωνίες παρατήρησης είναι διαδοχικά οι εξής +55°, +36°, 0°, -36° και -55°. Το αρνητικό πρόσημο αντιστοιχεί σε λήψεις όπου ο δορυφόρος έχει περάσει το σημείο του στόχου (Σχήμα 25). Στην παρούσα μελέτη οι αρνητικές γωνίες παρατήρησης μπορούν να χαρακτηριστούν επίσης ως κατευθύνσεις οπίσθιας σκέδασης (backward scattering directions), ενώ οι θετικές ως κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης (forward scattering directions) λόγω της τροχιάς του δορυφόρου και της γεωμετρίας ηλίου-στόχου-αισθητήρα των λήψεων πάνω από το σημείο μελέτης. Οι λήψεις οπίσθιας σκέδασης ορίζονται ως αυτές που η σχετική γωνία αζιμούθιου (διαφορά μεταξύ αζιμούθιου αισθητήρα και ηλίου) είναι μικρότερη ή ίση με 60° (Drolet et al. 2005), δηλαδή όταν ο ήλιος και ο αισθητήρας «βλέπουν» τον στόχο από την ίδια κατεύθυνση. Ο αισθητήρας CHRIS παρέχει την δυνατότητα λειτουργίας σε πέντε επίσημες φόρμες χαρακτηριστικών. Η πρώτη φόρμα (Mode 1) παρέχει τις πλήρεις φασματικές δυνατότητες του αισθητήρα με 62 κανάλια στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο (λ: 410–1005 nm) και το φασματικό τους εύρος να κυμαίνεται μεταξύ 6 και 20 nm (Πίνακας 8). Η χωρική διακριτικότητα είναι στα 34 m σε κατακόρυφη γωνία παρατήρησης και σε 556 km ύψος αισθητήρα.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προγραμματίστηκαν μια σειρά δορυφορικών απεικονίσεων από τον CHRIS/PROBA σε Mode 1 πάνω από το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* (Lat 39° 10.13', Lon 20° 51.00') διάρκειας 2 χρόνων· από τον Ιούνιο του 2006 έως τον Αύγουστο του 2008 (Πίνακας 9). Οι ημερομηνίες δορυφορικών απεικονίσεων για την περιοχή μελέτης προγραμματίζονταν με προσοχή για την αποφυγή κακών καιρικών συνθηκών αλλά και για την επιλογή των τροχιών του δορυφόρου όπου η ελάχιστη γωνία παρατήρησης του αισθητήρα (0°) θα συμπίπτει με την πραγματική κατακόρυφη οπτική της περιοχής μελέτης (Πίνακας 9). Δυστυχώς, πολλές απεικονίσεις απέτυχαν στην στόχευση του πεδίου μελέτης, ιδιαίτερα αυτές της γωνίας -55°. Επίσης, μικρές αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στα μήκη κύματος των καναλιών του CHRIS από



Σχήμα 25. Πολικό διάγραμμα της γεωμετρίας των δορυφορικών απεικονίσεων σε συνδυασμό με τη θέση του ηλίου για τρεις αντιπροσωπευτικές τροχιές του CHRIS/PROBA πάνω από την περιοχή μελέτης του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa*. Οι αρνητικές γωνίες παρατήρησης (-36, -55) αντιστοιχούν σε κατευθύνσεις οπίσθιας σκέδασης ενώ οι θετικές (+36, +55) αντιστοιχούν στις κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης.

ημερομηνία σε ημερομηνία που απ' ότι εξακριβώθηκε είναι ευθέως ανάλογες της θερμοκρασίας του αισθητήρα (Σχήμα 26). Αυτές οι αποκλίσεις αλλάζουν το ελάχιστο και το μέγιστο μήκος κύματος καθώς και το εύρος κάθε καναλιού. Σε σχέση με τα πρωτότυπα κανάλια του CHRIS, όπως αναφέρονται στην επίσημη έκδοση των χαρακτηριστικών του (http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/PROBA/CHRIS_Data_Format_document_2008-07-071.pdf), οι διαφορές μεταξύ των καναλιών αυξάνουν με το μήκος κύματος οπότε και τον αριθμό του καναλιού (Πίνακας 8). Για περισσότερη ακρίβεια στους υπολογισμούς κατά την επεξεργασία των δεδομένων, τα πραγματικά κανάλια όπως αναφέρονται στον Πίνακα 8 χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων της παρούσας μελέτης.

Σε αντίθεση με τα προϊόντα των πολυφασματικών δεδομένων τα οποία έχουν υποστεί σειρά διορθώσεων και επεξεργασιών από τις υπεύθυνες επιστημονικές ομάδες, τα δεδομένα του CHRIS προσφέρονται σε πρωτογενή μορφή. Η επεξεργασία των δεδομένων του αισθητήρα CHRIS έγινε με το λογισμικό CHRIS-Box, το οποίο αναπτύχθηκε ως επέκταση για το λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων τηλεπισκόπησης BEAM (Brockmann Consult, <http://www.brockmann-consult.de/beam>). Το πρώτο βήμα στην επεξεργασία ήταν η διόρθωση του θορύβου από τις εικόνες με την χρήση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε από τους Gomez-Chova et al. (2008). Δύο συνήθη είδη θορύβου εμφανίζονται σε υπερφασματικές εικόνες από αισθητήρες ίδιου τύπου με τον CHRIS, γνωστά ως αποβολές (drop-outs) και κάθετες γραμμώσεις (vertical striping), τα οποία διορθώθηκαν επιτυχώς ή μειώθηκαν δραστικά πριν την περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων. Το επόμενο βήμα ήταν η αναγνώριση και απομόνωση των νεφών από τις εικόνες, για το οποίο ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Πρώτον, η ανακλαστικότητα στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top-of-Atmosphere - TOA reflectance) υπολογίστηκε από τα πρωτογενή δεδομένα ακτινοβολίας (TOA radiance) ούτως ώστε να απαλειφθεί η εξάρτηση από τις συνθήκες φωτισμού. Δεύτερον, ατμοσφαιρικά χαρακτηριστικά (υδρατμίς, ατμοσφαιρικό οξυγόνο), συνδυασμένα με την φωτεινότητα-λευκότητα

Πίνακας 8. Τα κεντρικά μήκη κύματος (λ) και τα εύρη των 62 καναλιών του CHRIS (Mode 1) όπως αναφέρονται στην επίσημη έκδοση των χαρακτηριστικών του αισθητήρα σε σύγκριση με τα πραγματικά μήκη κύματος και εύρη όπως προκύπτουν από τον μέσο όρο των παρατηρήσεων της περιοχής μελέτης *Phlomis fruticosa*.

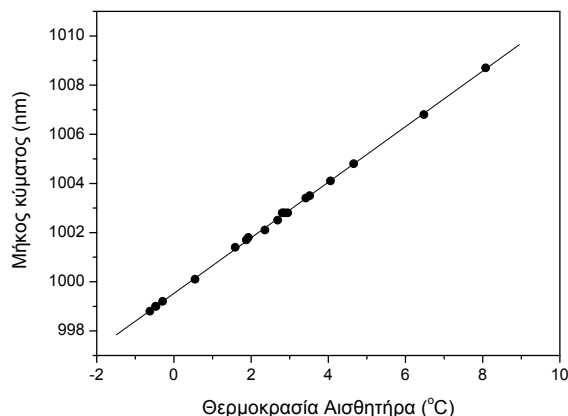
	Πρωτότυπα Κανάλια CHRIS		Πραγματικά Κανάλια CHRIS			
	Κεντρικό λ (nm)	Εύρος (nm)	Μέσο Κεντρικό λ (nm)	Τυπική Απόκλιση (nm)	Μέσο Εύρος (nm)	Τυπική Απόκλιση (nm)
1	411	10	411	0.22	10.9	0.00
2	442	9	442	0.32	10.5	0.03
3	452	9	452	0.35	9.5	0.05
4	461	10	462	0.37	10.0	0.05
5	471	11	473	0.40	10.6	0.03
6	481	9	482	0.42	8.9	0.03
7	490	9	491	0.43	9.3	0.04
8	500	10	501	0.45	9.8	0.03
9	510	10	511	0.50	10.3	0.05
10	520	11	522	0.53	11.0	0.05
11	530	9	532	0.53	8.7	0.03
12	540	12	542	0.57	12.3	0.05
13	551	10	553	0.61	9.8	0.06
14	561	10	563	0.65	10.3	0.04
15	572	11	574	0.68	10.9	0.05
16	581	8	583	0.71	7.6	0.03
17	590	12	593	0.74	11.9	0.04
18	603	12	605	0.79	12.6	0.06
19	613	9	616	0.82	8.8	0.04
20	622	9	625	0.87	9.1	0.04
21	631	9	634	0.90	9.5	0.06
22	641	10	644	0.93	9.8	0.04
23	651	10	654	0.98	10.2	0.04
24	661	11	664	0.98	10.6	0.04
25	672	11	675	1.04	11.0	0.05
26	680	6	683	1.07	5.6	0.05
27	686	6	689	1.07	5.8	0.05
28	691	6	695	1.09	5.9	0.05
29	697	6	701	1.13	6.0	0.03
30	703	6	707	1.16	6.1	0.04
31	709	6	713	1.18	6.2	0.04
32	716	6	719	1.21	6.3	0.05
33	722	6	726	1.22	6.4	0.06
34	728	7	732	1.26	6.6	0.05
35	735	7	739	1.27	6.7	0.05
36	742	7	745	1.30	6.8	0.05
37	748	7	752	1.32	6.9	0.05
38	755	7	759	1.35	7.1	0.05
39	762	7	767	1.39	7.2	0.05
40	770	7	774	1.40	7.4	0.05
41	777	7	781	1.41	7.5	0.04
42	785	8	789	1.44	7.7	0.05
43	792	8	797	1.48	7.8	0.07
44	800	8	804	1.50	7.9	0.05
45	808	8	812	1.52	8.1	0.05
46	833	9	833	1.59	16.9	0.07
47	841	9	846	1.65	8.7	0.05
48	850	9	855	1.68	8.8	0.06
49	859	9	864	1.72	9.0	0.07
50	868	9	873	1.73	9.1	0.04
51	877	9	882	1.75	9.3	0.05
52	886	9	891	1.78	9.4	0.06
53	895	10	901	1.81	9.5	0.06
54	905	10	910	1.83	9.7	0.06
55	915	10	920	1.88	9.9	0.08
56	925	20	930	1.89	10.0	0.07
57	940	20	945	1.91	20.4	0.08
58	955	10	961	1.97	10.4	0.06
59	965	11	971	1.96	10.5	0.06
60	976	11	982	2.01	10.6	0.05
61	987	11	992	2.05	10.7	0.06
62	997	11	1003	2.06	10.8	0.07

στο υπέρυθρο, εξήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν για την αύξηση των ικανοτήτων διάκρισης μεταξύ των νεφών και του εδάφους. Τρίτον, ένας αλγόριθμος μη-επιβλεπόμενης ομαδοποίησης EM (Expectation-Maximization clustering) εφαρμόστηκε στα χαρακτηριστικά που έχουν εξαχθεί ταξινομώντας τα στοιχεία της εικόνας αυτόματα σε κλάσεις. Τέλος, οι υπολογισμένες κλάσεις επιθεωρήθηκαν οπτικά με χρήση των απεικονίσεων σε αληθινά χρώματα (true colour, RGB) και επισημάνθηκαν οι κλάσεις που αντιστοιχούσαν πραγματικά σε νέφη, οι οποίες και απομονώθηκαν από τις εικόνες εφαρμόζοντας μία δυαδική μάσκα (binary mask). Ακολούθως, οι διορθωμένες για θόρυβο και νέφη εικόνες διορθώθηκαν ατμοσφαιρικά βάσει της μεθόδου που αναπτύχθηκε από τους Guanter et al. (2006). Ο αλγόριθμος αυτός εκτελεί τις διορθώσεις σε τέσσερα βήματα (Smile correction, Surface reflectance calculation, Adjacency correction, Spectral polishing) ούτως ώστε να προκύψει η τελική μορφή της εικόνας που αποτελείται από δεδομένα ανακλαστικότητας στο επίπεδο της επιφάνειας της γης, την μάσκα νεφών και έναν χάρτη υδρατμών (columnar water vapor - CWV map).

Ο εντοπισμός της περιοχής μελέτης έγινε μετά από γεωαναφορά των εικόνων χρησιμοποιώντας σημεία αναφοράς (ground control points - GCPs) από δέκτη GPS (Global Positioning System). Τα φάσματα ανακλαστικότητας εξήχθησαν από το κομμάτι της περιοχής μελέτης όπου λάμβαναν χώρα οι μετρήσεις πεδίου, χρησιμοποιώντας 8 εικονοστοιχεία από τις γωνίες παρατήρησης +36°, 0°, -36°, τα οποία υπολογίζεται ότι αντιστοιχούν κατά μέσο όρο σε 34 m ανάλυση και επομένως καλύπτουν συνολική περιοχή 0.07 km². Από τις γωνίες παρατήρησης +55° και -55° χρησιμοποιήθηκε η φασματική πληροφορία από 6 εικονοστοιχεία λόγω της χαμηλότερης διακριτικότητας που παρουσιάζουν οι εν λόγω απεικονίσεις. Η φασματική πληροφορία εξήχθη από κάθε εικονοστοιχείο ξεχωριστά και ακολούθως υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση για κάθε κανάλι. Οι τελικές καμπύλες ανακλαστικότητας παρουσίαζαν ακόμα θόρυβο που γινόταν αντιληπτός σαν απότομες και τυχαίες μικρές αυξομειώσεις του

Πίνακας 9. Ύψος (Z) και αζιμούθιο (A) σε μοίρες, του ηλίου και του CHRIS/PROBA για όλες της απεικονίσεις πάνω από το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Οι σκιασμένες απεικονίσεις δεν χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των δεδομένων λόγω των ακόλουθων προβλημάτων. Με σκούρα σκίαση παρουσιάζονται οι απεικονίσεις στις οποίες η περιοχή μελέτης δεν περιλαμβάνεται στο οπτικό πεδίο του αισθητήρα ή καλύπτεται από σύννεφα. Στις 4/7/2006 και 11/11/2007 δεν εκτελέστηκαν μετρήσεις πεδίου, ενώ οι απεικονίσεις στις 4/7/2008 παρουσίασαν αδιευκρίνιστη ιδιομορφία στα πρωτογενή δεδομένα ακτινοβολίας όλων των καναλιών του CHRIS.

	Ημερομηνία απεικόνισης	Ήλιος		+55°		+36°		0°		-36°		-55°	
		Z	A	Z	A	Z	A	Z	A	Z	A	Z	A
1	4/7/2006	20°	139.42°	48.72°	7.37°	27.73°	1.29°	6.93°	224.19°	32.46°	201.76°	51.53°	197.97°
2	12/7/2006	22°	136.55°	48.41°	18.06°	27.66°	24.13°	7.98°	141.15°	32.61°	180.80°	51.57°	186.42°
3	2/9/2006	34°	154.09°	54.49°	12.59°	32.30°	13.03°	3.62°	186.39°	37.39°	192.16°	57.24°	192.51°
4	24/10/2006	52°	167.41°	48.47°	8.55°	27.39°	3.91°	5.66°	223.20°	32.19°	199.82°	51.37°	196.82°
5	6/12/2006	63°	166.87°	52.95°	12.00°	30.79°	11.73°	4.15°	198.53°	36.94°	193.33°	56.69°	193.15°
6	15/4/2007	33°	149.19°	54.38°	13.61°	32.18°	15.30°	4.10°	163.78°	37.10°	189.96°	56.86°	191.32°
7	29/5/2007	22°	140.21°	48.63°	3.84°	28.21°	353.78°	10.8°	224.87°	33.40°	206.53°	51.89°	201.02°
8	11/7/2007	23°	131.77°	53.01°	12.89°	30.99°	13.71°	3.85°	179.97°	36.62°	191.51°	56.47°	192.15°
9	24/8/2007	32°	146.80°	51.43°	5.62°	30.10°	357.55°	9.54°	224.67°	35.04°	204.15°	53.97°	199.43°
10	6/10/2007	47°	158.35°	49.56°	15.27°	28.34°	18.72°	5.00°	148.11°	33.33°	186.63°	52.92°	189.56°
11	15/10/2007	50°	161.20°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	11/11/2007	58°	166.45°	55.81°	356.09°	37.29°	340.73°	23.40°	315.09°	41.85°	214.65°	58.75°	207.23°
13	19/11/2007	60°	164.28°	54.35°	9.03°	32.27°	5.14°	6.08°	222.40°	37.31°	198.7°	56.92°	196.12°
14	14/2/2008	57°	152.08°	53.24°	14.93°	31.43°	18.10°	5.30°	149.26°	36.61°	187.09°	56.45°	189.77°
15	16/6/2008	24°	125.14°	54.32°	8.12°	32.20°	3.07°	7.47°	222.91°	38.12°	200.02°	57.56°	196.89°
16	4/7/2008	24°	126.01°	54.03°	0.34°	33.96°	347.51°	16.85°	315.02°	38.18°	210.79°	56.24°	203.96°
17	17/8/2008	32°	138.13°	49.84°	357.31°	31.47°	342.60°	18.25°	315.09°	35.57°	213.77°	52.86°	206.40°



Σχήμα 26. Η σχέση μεταξύ της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αισθητήρα CHRIS και των μεταβολών στο κεντρικό μήκος κύματος του τελευταίου καναλιού του.

σήματος από κανάλι σε κανάλι. Οι ελαφρές αυτές ανωμαλίες του σήματος εξαλείφθηκαν εφαρμόζοντας ανάλυση Fourier τριών σημείων (3-point fast Fourier transform - FFT) πάνω στις καμπύλες ανακλαστικότητας. Τέλος, παρατηρήθηκε συστηματικό σφάλμα στο πρώτο κανάλι του CHRIS (με κεντρικό μήκος κύματος στα 411 nm), το οποίο παρουσίαζε πολύ χαμηλές τιμές ανακλαστικότητας που κάποιες φορές έφταναν και κάτω του μηδενός, ειδικά στις γωνίες πρόσθιας σκέδασης (+36°, +55°).

Ανάλυση φασμάτων του αισθητήρα CHRIS και υπολογισμός δεικτών

Κάθε γωνία παρατήρησης του CHRIS/PROBA (+55°, +36°, 0°, -36°, -55°) αντιμετωπίστηκε ως αυτόνομο σετ μετρήσεων ανακλαστικότητας και η ανάλυση που ακολουθεί εφαρμόστηκε για κάθε γωνία ξεχωριστά (Πίνακας 9). Η γωνία -55° εξαιρέθηκε από την ανάλυση αφού δεν υπάρχει ικανοποιητικό δείγμα μετρήσεων για την εφαρμογή της. Ποικιλία δεικτών και τύπων αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν στα φάσματα ανακλαστικότητας του CHRIS. Οι δείκτες αυτοί εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν βάσει των γραμμικών σχέσεων τους με τις μετρημένες στο πεδίο οικοφυσιολογικές παραμέτρους, με σκοπό την διαπίστωση των καλύτερων δεικτών για τον προσδιορισμό κάθε παραμέτρου. Μιας και η παρούσα ανάλυση αφορά μόνο το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*, το οποίο δεν αναπτύσσει μεγάλη ποσότητα πράσινης βιομάζας στον θόλο του ούτως ώστε οι δείκτες βλάστησης να κορέννυνται (Begue 1993, Goel 1989), η εφαρμογή μη-γραμμικών σχέσεων δεν θα προσέφερε σημαντικά πλεονεκτήματα. Η σύγκριση των εκάστοτε δεικτών και τύπων βασίστηκε στον συντελεστή προσδιορισμού (coefficient of determination, r^2) κάθε συσχέτισης. Η ανάλυση χωρίστηκε σε πέντε βασικά σκέλη ανάλογα με τον τύπο του δείκτη:

1. Το πρώτο σκέλος αφορά την εξέταση των συσχετίσεων των μετρημένων φυσιολογικών παραμέτρων απευθείας με το φάσμα ανακλαστικότητας. Η τιμή της ανακλαστικότητας για κάθε κανάλι του CHRIS (R_x , όπου x το κεντρικό μήκος κύματος του κάθε καναλιού σε nm) χρησιμοποιείται ως δείκτης και εξετάζεται η σχέση του με τις μετρημένες οικοφυσιολογικές παραμέτρους.

2. Στο δεύτερο σκέλος, η πρώτη παράγωγος της καμπύλης του φάσματος ανακλαστικότητας υπολογίστηκε για το κεντρικό μήκος κύματος κάθε καναλιού (D_x) και χρησιμοποιήθηκε επίσης ως δείκτης για την εξαγωγή συσχετίσεων με τις μετρημένες οικοφυσιολογικές παραμέτρους.

3. Το τρίτο σκέλος της ανάλυσης αποτελείται από μια ποικιλία δεικτών βλάστησης που έχουν προταθεί στην σχετική βιβλιογραφία για εφαρμογή σε υπερφασματικά δεδομένα αλλά και δεδομένα χαμηλότερης χωρικής και φασματικής ανάλυσης (Πίνακας 10). Όλοι οι δείκτες προσαρμόστηκαν στα κανάλια του CHRIS συγκρίνοντας τα πρωτότυπα μήκη κύματος των εξισώσεων (Πίνακας 10) με τα πραγματικά κεντρικά μήκη κύματος των καναλιών του CHRIS (Πίνακας 8) και χρησιμοποιώντας τα κανάλια που ήταν κοντινότερα στις πρωτότυπες εξισώσεις.

4. Στο τέταρτο σκέλος εισάγεται ο πιο εφαρμοσμένος τύπος δείκτη βλάστησης (*NDSI*: *Normalized Difference Spectral Index*) και εξετάζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί ανάμεσα στα 62 κανάλια του CHRIS βάσει της παρακάτω φόρμουλας:

$$NDSI_{(x,y)} = \frac{R_x - R_y}{R_x + R_y} \quad (19)$$

Οι δείκτες κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Spectral Indices – NDSIs) συνδυάζουν την ανακλαστικότητα (R) δύο καναλιών (όπου x και y τα κεντρικά μήκη κύματος των καναλιών σε nm) και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διαχειριστικές και επιστημονικές εφαρμογές. Η ομαλοποίηση που προσφέρουν είναι χρήσιμη για την μείωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων ή άλλων πηγών σφάλματος, εξαλείφοντας τις αναλογικές μεταβολές του φάσματος ανακλαστικότητας και βελτιώνοντας την φασματική απόκριση των παρατηρούμενων στόχων (Huete et al. 1985, Qi et al. 1994). Να σημειωθεί ότι ο αντίστροφος συνδυασμός δύο καναλιών φέρει την ίδια απόλυτη τιμή αλλά με διαφορετικό πρόσημο ($NDSI_{(x,y)} = -NDSI_{(y,x)}$) και ότι το εύρος τιμών κάθε NDSI κυμαίνεται από -1 έως 1.

5. Το πέμπτο σκέλος της ανάλυσης ακολουθεί την λογική του τέταρτου αλλά με την εφαρμογή ενός διαφορετικού τύπου δείκτη που συνδυάζει δύο κανάλια ανακλαστικότητας αλλά στερείται ομαλοποίησης. Ο τύπος ενός τέτοιου δείκτη είναι μια απλή αφαίρεση μεταξύ της ανακλαστικότητας δύο καναλιών (Simple Subtracion Index – SSI):

$$SSI_{(x,y)} = R_x - R_y \quad (20)$$

Τέτοιου τύπου δείκτες σπανίως εφαρμόζονται σε δορυφορικά δεδομένα μιας και δεν προσφέρουν πολλά στην βαθμονόμηση της φασματικής απόκρισης όπως οι κανονικοποιημένοι δείκτες. Παρόλα αυτά, δεν επηρεάζονται από αναλογικές μεταβολές του φάσματος ανακλαστικότητας όπως για παράδειγμα οι δείκτες τύπου R_x . Είναι επίσης προφανές ότι $SSI_{(x,y)} = -SSI_{(y,x)}$.

Τέλος, να διευκρινιστεί ο συντομογραφικός τρόπος περιγραφής κάθε δείκτη των παραπάνω αναλύσεων. Κάθε δείκτης που υπολογίζεται από τον CHRIS χαρακτηρίζεται από τα κεντρικά μήκη κύματος κάθε καναλιού που χρησιμοποιείται (x, y nm), καθώς και από την γωνία παρατήρησης από την οποία υπολογίστηκε (Z°) ως $VI_{(x,y)}Z^\circ$ (όπου VI ο τύπος του δείκτη βλάστησης, από Vegetation Index).

Πίνακας 10. Οι δείκτες βλάστησης στενών και ευρέων καναλιών που προτείνονται στην βιβλιογραφία και εφαρμόστηκαν στα υπερφασματικά δεδομένα στην παρούσα έρευνα. Οι δείκτες κατανεμήθηκαν βάσει του αρχικού τους σχεδιασμού και αναμενόμενης λειτουργίας. Οι δείκτες που εφαρμόστηκαν στα στενά κανάλια του αερομεταφερόμενου αισθητήρα MCA-6 παρουσιάζονται σκιασμένοι, ενώ το σύνολο τους υπολογίστηκαν από τα κανάλια του CHRIS.

Δείκτης	Τύπος	Αναφορά
πράσινης βλάστησης, ευρέων καναλιών		
EV (<i>Enhanced Vegetation Index</i>)	$2.5 \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + 6R_{red} - 7.5R_{blue} + 1}$	Huete et al. (1996)
Green NDVI (<i>green Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{nir} - R_{green}) / (R_{nir} + R_{green})$	Gitelson et al. (1996)
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})$	Tucker (1979)
SR (<i>Simple Ratio</i>)	R_{nir} / R_{red}	Jordan (1969)
πράσινης βλάστησης, στενών καναλιών		
CARI (<i>Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)	$\frac{R_{700}[a670 + R_{670} + b]}{R_{670}(a^2 + 1)^{0.5}}$, $a = \frac{R_{700} - R_{550}}{150}$, $b = R_{550} - a550$	Kim et al. (1994)
GI (<i>Greenness Index</i>)	R_{554} / R_{677}	Zarco-Tejada et al. (2005)
GVI	$(R_{682} - R_{553}) / (R_{682} + R_{553})$	Gandia et al. (2004)
mCAI (<i>modified Chlorophyll Absorptions Integral</i>)	$A - \int_{R_{552}}^{R_{752}} f$, A=area of the trapeze between R_{752} and R_{552} , f =reflectance curve	Oppelt & Mauser (2001)
mCAI2 (<i>modified Chlorophyll Absorptions Integral</i>)	$A - \int_{R_{600}}^{R_{735}} f$, A=area of the trapeze between R_{735} and R_{600} , f =reflectance curve	Oppelt & Mauser (2001)
MCARI (<i>Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)	$[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})](R_{700} / R_{670})$	Daughtry et al. (2000)
MCARI2 (<i>Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)	$1.2[2.5(R_{800} - R_{670}) - 1.3(R_{800} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
mNDVI (<i>Modified Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680} - 2R_{445})$	Sims & Gamon (2002)
mNDVI2 (<i>Modified Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	Sims & Gamon (2002)
MSAVI (<i>Improved Soil Adjusted Vegetation Index</i>)	$0.5 \left[2R_{800} + 1 - \sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - 8(R_{800} - R_{670})} \right]$	Qi et al. (1994)
mSR (<i>Modified Simple Ratio</i>)	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{680} - R_{445})$	Sims & Gamon (2002)
mSR2 (<i>Modified Simple Ratio</i>)	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	Sims & Gamon (2002)
MTCI (<i>MERIS Terrestrial Chlorophyll Index</i>)	$(R_{754} - R_{709}) / (R_{709} - R_{681})$	Dash & Curran (2004)
MTVI (<i>Modified Triangular Vegetation Index</i>)*	$0.5[120(R_{800} - R_{570}) - 200(R_{670} - R_{570})]$	Βασισμένος σε Broge & Leblanc (2001) και Haboudane et al. (2004)
mTVI (<i>modified Triangular Vegetation Index</i>)	$1.2[1.2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	Rouse et al. (1974)
NDVI2 (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	Gitelson & Merzlyak (1994)
OSAVI (<i>Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)	$1.16(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
R₇₀₀/R₆₇₀ (<i>Chlorophyll-related Index</i>)*	R_{700} / R_{670}	Kim et al. (1994)
RDVI (<i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>)	$(R_{800} - R_{670}) / \sqrt{(R_{800} + R_{670})}$	Roujean & Breon (1995)
REP (<i>Red-Edge Position</i>)	$700 + 40 \frac{[(R_{670} + R_{780}) / 2] - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$	Guyot et al. (1988)
SIPI (<i>Structure Insensitive Pigment Index</i>)	$(R_{800} - R_{450}) / (R_{800} - R_{650})$	Penuelas et al. (1995b)
SIPI 2	$(R_{800} - R_{440}) / (R_{800} - R_{680})$	Penuelas et al. (1995b)

SPVI (<i>Spectral polygon vegetation index</i>)	$0.4[3.7(R_{800} - R_{670}) - 1.2[R_{530} - R_{670}]]$	Vincini et al. (2006)
SR (<i>Simple Ratio</i>)	R_{800} / R_{680}	Jordan (1969)
SR1, SR2, SR3	$R_{750} / R_{700} \quad R_{752} / R_{690} \quad R_{750} / R_{550}$	Gitelson & Merzlyak (1997)
SR4	R_{672} / R_{550}	Datt (1998)
TCARI (<i>Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index</i>)	$3[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})(R_{700} / R_{670})]$	Haboudane et al. (2002)
TSAVI (<i>Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)	$a(R_{875} - aR_{680} - b) / [R_{680} + a(R_{875} - b) + 0.08(1 + a^2)]$, $\alpha=1.062, \quad b=0.022$	Rondeaux et al. (1996)
TVI (<i>Triangular Vegetation Index</i>)	$0.5[120(R_{750} - R_{550}) - 200(R_{670} - R_{550})]$	Broge & Leblanc (2001)
VOG (<i>Vogelmann Indices</i>)	R_{740} / R_{720}	Vogelmann et al. (1993)
VOG2	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$	Zarco-Tejada et al. (2001)
χρωστικών φύλλων (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)		
ARI (<i>Anthocyanin Reflectance Index</i>)	$(1 / R_{550}) - (1 / R_{700})$	Gitelson et al. (2001)
BGI (<i>Blue Green Pigment Index</i>)	R_{450} / R_{550}	Zarco-Tejada et al. (2005)
BRI (<i>Blue Red Pigment Index</i>)	R_{450} / R_{690}	Zarco-Tejada et al. (2005)
CRI (<i>Carotenoid Reflectance Index</i>)	$(1 / R_{510}) - (1 / R_{550})$	Gitelson et al. (2002)
CRI2	$(1 / R_{510}) - (1 / R_{700})$	Gitelson et al. (2002)
Red/Green	R_{red} / R_{green}	Gamon & Surfus (1999)
RGI (<i>Red/Green</i>)	R_{690} / R_{550}	Zarco-Tejada et al. (2005)
στρες		
CI (<i>Curvature Index</i>)	$R_{675}R_{690} / R_{683}^2$	Zarco-Tejada et al. (2003a)
DI (<i>Derivative Index</i>)	D_{730} / D_{706}	Zarco-Tejada et al. (2003a)
DPR2	D_{REF} / D_{725}	Zarco-Tejada et al. (2003a)
DREP (<i>Derivative on the Red-Edge Position</i>)	D_{REP}	Horler et al. (1983)
LIC	R_{440} / R_{690}	Lichtenthaler et al. (1996)
NPCI (<i>Normalized Pigment Chlorophyll index</i>)	$(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	Penuelas et al. (1994)
NPQI (<i>Normalized Phaeophytinization Index</i>)	$(R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Barnes et al. (1992)
PRI (<i>Photochemical Reflectance Index</i>)	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	Gamon et al. (1997)
PRI₅₁₅ (<i>Modified Photochemical Reflectance Index</i>)*	$(R_{515} - R_{531}) / (R_{515} + R_{531})$	Hernandez-Clemente et al. (2011)
PRI2	$(R_{570} - R_{539}) / (R_{570} + R_{539})$	Filella et al. (1996)
PSRI (<i>Plant Senescence Reflectance Index</i>)	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$	Merzlyak et al. (1999)
SR5, SR6	$R_{690} / R_{655} \quad R_{685} / R_{655}$	Zarco-Tejada et al. (2003a)
SRPI (<i>Simple Ratio Pigment Index</i>)	R_{430} / R_{680}	Penuelas et al. (1995b)
υδατικής κατάστασης		
fWBI (<i>floating Water Band Index</i>)	$R_{900} / \min R_{920-980}$	Penuelas et al. (1993)
WI (<i>Water Index</i>)	R_{900} / R_{970}	Penuelas et al. (1993)

Όπου R_x η ανακλαστικότητα σε μήκος κύματος x nm

Όπου D_x η παράγωγος του φάσματος ανακλαστικότητας σε μήκος κύματος x nm

Όπου R_{red} , R_{nir} , R_{blue} , R_{green} οι ανακλαστικότητες των αντίστοιχων περιοχών του φάσματος αναπροσαρμοσμένες σύμφωνα με τα 4 πρώτα κανάλια του MODIS (Πίνακας 6)

*Οι δείκτες με αστερίσκο δεν εφαρμόστηκαν στο τρίτο σκέλος της ανάλυσης CHRIS

Δεδομένα εναέριας πλατφόρμας

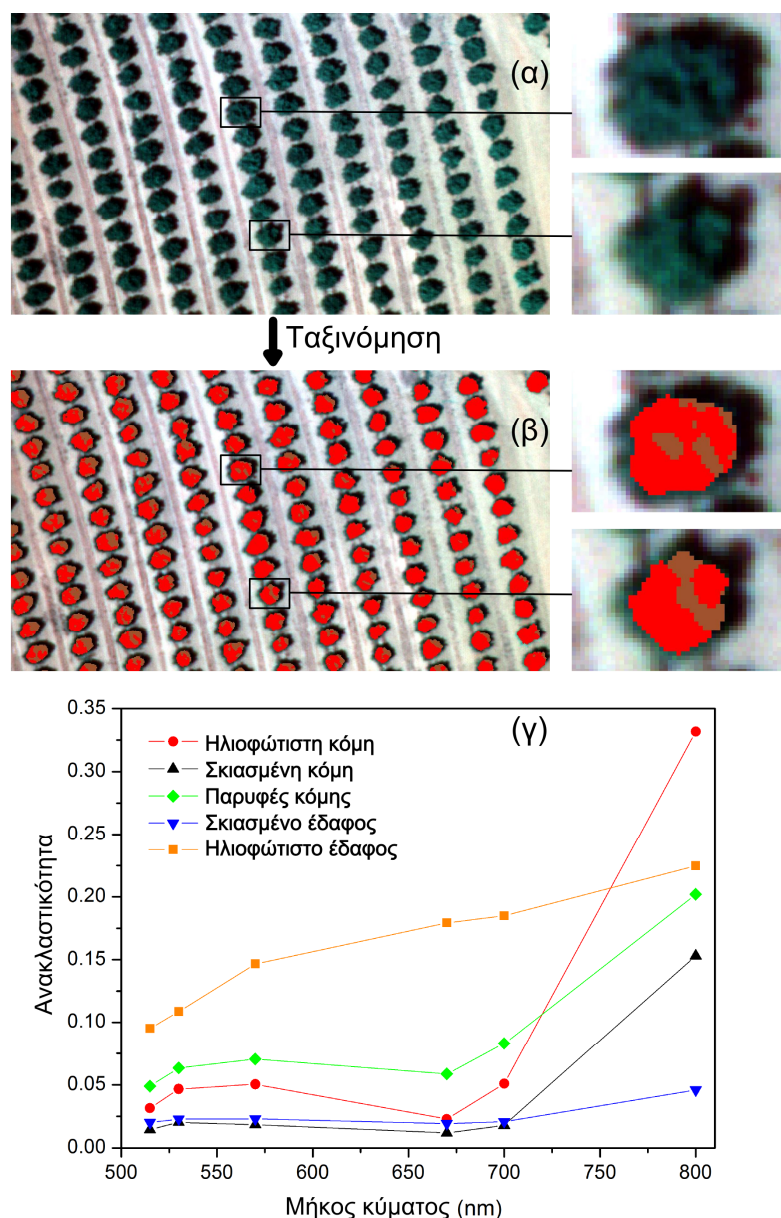
Ένα νέο πεδίο στην τηλεπισκόπηση αναδύεται με την τεχνολογία των μη-επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (unmanned aerial vehicles – UAVs) για επιστημονικές εφαρμογές. Η σμίκρυνση και η μείωση του κόστους αισθητήρων, συσκευών πλοήγησης και ενσωματωμένων υπολογιστών δίνουν την δυνατότητα χρήσης μιας νέας γενιάς αυτόματων πιλότων για μοντέλα αεροσκαφών προσιτού κόστους με την δυνατότητα ενσωμάτωσης και μεταφοράς αισθητήρων τηλεπισκόπησης.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ελικοπτέρου (Benzin Acrobatic, Vario, Germany) τροποποιημένο ούτως ώστε να μεταφέρει σύστημα καμερών, αυτόματου πιλότου και αισθητήρων. Οι τροποποιήσεις αφορούν κυρίως την εισαγωγή μεγαλύτερου κινητήρα (29 cc) και βάσης ολίσθησης, καθώς και κλωβού για την εγκατάσταση των αισθητήρων. Η εν λόγω πλατφόρμα τεχνολογίας UAV ελέγχεται από σύστημα αυτόματου πιλότου (model AP04H, UAV Navigation, Madrid, Spain) το οποίο παρέχει αυτόνομη πλοήγηση βάσει προγραμματισμένων σημείων πορείας που θέτονται κατά τον σχεδιασμό της πτήσης. Η εναέρια πλατφόρμα επικοινωνεί μέσω ασυρμάτου με το επίγειο σύστημα ελέγχου, το οποίο αποτελείται κυρίως από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή εξοπλισμένο με ειδική εφαρμογή ελέγχου από όπου δίνεται η δυνατότητα λεπτομερούς παρακολούθησης των παραμέτρων της πτήσης καθώς και της τροποποίησης του σχεδίου πτήσης. Λεπτομερής περιγραφή των συστημάτων της πλατφόρμας UAV μπορεί να βρεθεί στο άρθρο των Berni et al. (2009).

Ο αισθητήρας που ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα UAV στην παρούσα μελέτη (MCA-6, Tetracam, Inc., California, USA) αποτελείται από έξι απεικονιστές με 25 nm διάμετρο και φίλτρο διαπερατό σε εύρος 10 nm FWHM (Andover Corporation, NH, USA). Η ανάλυση εικόνας είναι 1280×1024 εικονοστοιχεία (pixels) με 10-bit ραδιομετρική ανάλυση και οπτικό εστιακό μήκος 8.5 mm, αποδίδοντας γωνιακό εύρος πεδίου (FOV) $42.8^\circ \times 34.7^\circ$. Οι πτήσεις της παρούσας μελέτης έγιναν σε υψόμετρο 250 m αποδίδοντας χωρική ανάλυση 30 cm στο επίπεδο της γης. Τα κανάλια του αισθητήρα προσαρμόστηκαν στις ανάγκες της μελέτης και ρυθμίστηκαν ώστε τα κεντρικά μήκη κύματος τους να είναι στα 515, 530, 570, 670, 700 και 800 nm. Κατ' εξαίρεση, στην πρώτη πτήση το κανάλι 515 nm αντικαταστάθηκε από το 550 nm.

Για την γεωμετρική βαθμονόμηση των εναέριων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Camera Calibration Toolbox for Matlab (Bouguet 2001) τοποθετώντας ένα πρότυπο βαθμονόμησης τύπου σκακίερας σε μία σταθερή θέση και εφαρμόζοντας πάνω του διάφορες εικόνες από διαφορετικές τοποθεσίες και προσανατολισμούς. Οι συντεταγμένες των γωνιών του πλέγματος εξήχθησαν ημι-αυτόματα από τις εικόνες, ενώ υπολογίστηκαν οι εγγενείς παράμετροι και ο εξωγενής προσανατολισμός (exterior orientation - EO). Στη συνέχεια το βαθμονομημένο κανάλι χρησιμοποιείται ως αναφορά για την εκτίμηση της σχετικής θέσης των υπολοίπων πέντε καναλιών. Η γεωμετρική βαθμονόμηση περιγράφεται λεπτομερέστερα στο άρθρο των Berni et al. (2009).

Η ραδιομετρική βαθμονόμηση του αισθητήρα διεξήχθη με χρήση συντελεστών που υπολογίστηκαν από μετρήσεις με ομοιόμορφο σώμα βαθμονόμησης (σφαίρα ολοκλήρωσης CSTM-USS-2000C Uniform Source System, LabSphere, NH, USA) σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα φωτισμού και έξι διαφορετικούς χρόνους ολοκλήρωσης. Για την ατμοσφαιρική διόρθωση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η ολική εισερχόμενη ακτινοβολία, προσομοιωμένη με το μοντέλο SMARTS (Gueymard 2005), χρησιμοποιώντας μετρήσεις οπτικού βάθους αεροζόλ (aerosol optical depth) στα 550 nm με αισθητήρα φωτός (Micro-Tops II sunphotometer, Solar LIGHT Co., Philadelphia, PA, USA) που διεξήχθησαν στο πεδίο την ώρα των πτήσεων.



Σχήμα 27. Παράδειγμα ταξινόμησης των εναέριων εικόνων MCA-6. Ένα κομμάτι από μία εικόνα του πορτοκαλεώνα και 2 δέντρα σε μεγέθυνση παρουσιάζονται σε αληθινά χρώματα (true colour) (α) πριν και (β) μετά την ταξινόμηση τους. Τα μέρη που ταξινομήθηκαν ως «ηλιοφώτιστη κόμη» εμφανίζονται σε κόκκινο χρώμα, ενώ τα μέρη που ταξινομήθηκαν ως «σκιασμένη κόμη» εμφανίζονται σε καφέ χρώμα. (γ) Οι φασματικές υπογραφές των επιμέρους συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση των πολυφασματικών εναέριων εικόνων παρουσιάζονται στο γράφημα.

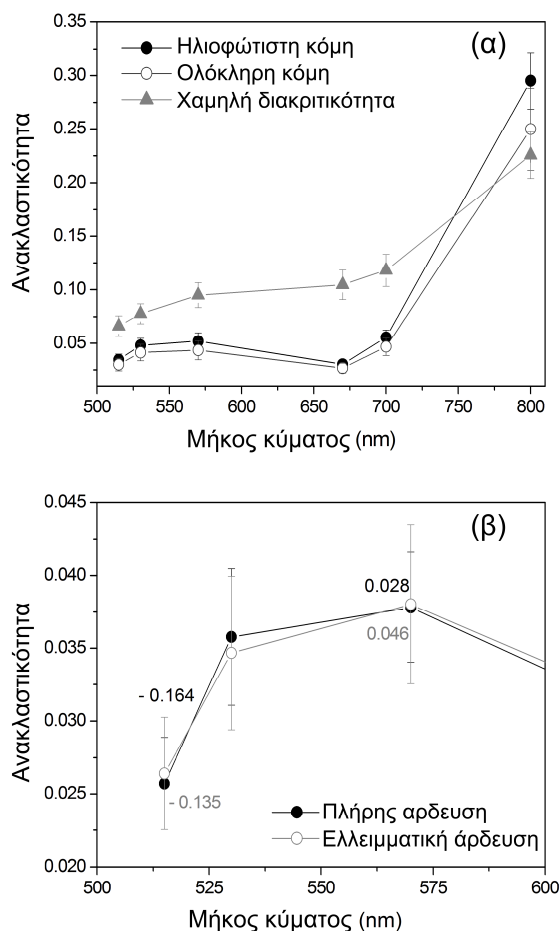
Περισσότερες λεπτομέρειες για τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις αναφέρονται από τους Berni et al. (2009), Suárez et al. (2010), Zarco-Tejada et al. (2012) και Guillen-Climent et al. (2012).

Το ζητούμενο στις πολυφασματικές εναέριες εικόνες ήταν να εξαχθεί η φασματική πληροφορία από τις κόμης των δέντρων αποφεύγοντας το έδαφος και τις σκιές των δέντρων. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος της επιβλεπόμενης ταξινόμησης (supervised classification). Η ιδιαίτερα υψηλή χωρική διακριτικότητα του αισθητήρα επιτρέπει την αναγνώριση και διαχωρισμό των παρακάτω κλάσεων: α) ηλιοφώτιστη κόμη, β) σκιασμένη κόμη,

γ) ηλιοφώτιστο έδαφος, δ) σκιασμένο έδαφος, και ε) παρυφές της κόμης (Σχήμα 27). Η τελευταία κλάση χρησιμοποιήθηκε ούτως ώστε να αποφευχθούν τα εικονοστοιχεία της κόμης που επηρεάζονται από την ανακλαστικότητα του παρακείμενου εδάφους. Από τις εικόνες κάθε πτήσης επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση για την κατασκευή των φασματικών υπογραφών που χρησιμοποιήθηκαν στην ταξινόμηση (Σχήμα 27γ). Λόγω των αλλαγών στις φασματικές ιδιότητες των περισσότερων κλάσεων μεταξύ των διαφορετικών ημερομηνιών, κατασκευάστηκαν διαφορετικές φασματικές υπογραφές για κάθε πτήση. Μετά την εφαρμογή της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν οι κλάσεις «ηλιοφώτιστη κόμη» και «σκιασμένη κόμη» για την εξαγωγή των φασματικών δεδομένων κάθε δέντρου. Αυτό έγινε πρώτα από την καθαρή κλάση «ηλιοφώτιστη κόμη» και ακολούθως οι κλάσεις «ηλιοφώτιστη κόμη» και «σκιασμένη κόμη» ενώθηκαν για την εξαγωγή των φασματικών δεδομένων ολόκληρης

της κόμης. Το δεύτερο έγινε με σκοπό την εξέταση των επιδράσεων των εσωτερικών σκιάσεων της κόμης στο φάσμα ανακλαστικότητας και εν συνεχεία στους δείκτες βλάστησης.

Για την εξέταση των επιδράσεων του εδάφους, κατασκευάστηκαν ορθογώνιες περιοχές ενδιαφέροντος (area of interest) ($9 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$) για κάθε δέντρο κάθε εικόνας, όπου κάθε μία περιελάμβανε στο κέντρο της την κόμη του δέντρου και στις άκρες της το παρακείμενο ηλιοφώτιστο και σκιασμένο έδαφος. Από τα ορθογώνια αυτά εξήχθησαν τα φασματικά δεδομένα κάθε καναλιού και συγκρίθηκαν με τις δύο προηγούμενες κλίμακες (ηλιοφώτιστη και ολόκληρη κόμη) από τις οποίες είχαν εξαχθεί τα αντίστοιχα δεδομένα για κάθε δέντρο. Προκύπτει έτσι η εξέταση τριών διαφορετικών τύπων φασμάτων ανακλαστικότητας για κάθε δέντρο, που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές χωρικές κλίμακες προσέγγισης. Αυτές ονομάστηκαν κατά σειρά φθίνουσας διακριτικότητας ως α) ηλιοφώτιστη κόμη, β) ολόκληρη κόμη και γ) χαμηλή διακριτικότητα. Το όνομα της τελευταίας προέρχεται από το γεγονός ότι επιχειρεί να προσομοιάσει τα φάσματα που θα εξαγόntonταν από εικόνες που η χωρική διακριτικότητά τους δεν θα ήταν επαρκής για τον διαχωρισμό των ορίων κάθε κόμης. Ένα παράδειγμα της ανακλαστικότητας κάθε καναλιού του πολυφασματικού αισθητήρα στις τρεις



Σχήμα 28. (α) Φάσματα ανακλαστικότητας από το UAV MCA-6 στις τρεις διαφορετικές χωρικές κλίμακες (ηλιοφώτιστη κόμη, ολόκληρη κόμη, χαμηλή διακριτικότητα) όπως εξήχθησαν από τα πλήρως ποτισμένα δέντρα στις 4/9/2009. (β) Σύγκριση της ανακλαστικότητας των τριών πρώτων καναλιών του MCA-6, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δύο τύπων PRI, για τα δέντρα που υπέστησαν πλήρη και ελλειμματική άρδευση σε κλίμακα ολόκληρης κόμης. Οι τιμές των δεικτών PRI₅₁₅ και PRI εμφανίζονται δίπλα στα αντίστοιχα κανάλια αναφοράς (515 και 570 nm) για κάθε φάσμα.

διαφορετικές χωρικές κλίμακες φαίνεται στο Σχήμα 28α. Έμφαση δίνεται στο ορατό φάσμα όπου και παρέχεται η δυνατότητα παρατήρησης των φασματικών διαφορών των τριών πρώτων καναλιών ως αποτέλεσμα του υδατικού στρες (Σχήμα 28β).

Τέλος, από τα φάσματα ανακλαστικότητας που εξήχθησαν για κάθε δέντρο και σε όλες τις κλίμακες προσέγγισης υπολογίσθηκαν δείκτες βλάστησης. Οι δείκτες που υπολογίσθηκαν από τα φάσματα του εναέριου αισθητήρα MCA-6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 10 και αφορούν τρεις δείκτες βλάστησης (NDVI, RDVI και MTVI) που σχετίζονται με την φυλλική βιομάζα και την δομή του θόλου, έναν δείκτη στις παρυφές του ερυθρού (red-edge index) R_{700}/R_{670} που είναι ευαίσθητος στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες και δύο φωτοχημικούς δείκτες (PRI_{570} , PRI_{515}) οι οποίοι προτείνονται για τον εντοπισμό της λειτουργικής κατάστασης των φυτών. Οι φασματικοί δείκτες εξήχθησαν αρχικά για κάθε δέντρο ξεχωριστά στις τρεις χωρικές κλίμακες υπολογισμού και στη συνέχεια μετατράπηκαν σε επίπεδο ομάδας χρησιμοποιώντας τα δύο κεντρικά δέντρα κάθε δωδεκάδας για την αποφυγή των επιδράσεων από τα ποτίσματα των γειτονικών ομάδων αλλά και την σύμπτωση με τις μετρήσεις στο πεδίο.

Το κομμάτι αυτό της διατριβής εξετάζει τις δυνατότητες που παρέχουν οι εικόνες πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης στον εντοπισμό της υδατικής κατάστασης και της ποιότητας φρούτων ενός πορτοκαλεώνα. Οι δύο φωτοχημικοί δείκτες (PRI_{570} , PRI_{515}) συγκρίνονται με τους δομικούς δείκτες (NDVI, RDVI και MTVI) και τον δείκτη χλωροφυλλών (R_{700}/R_{670}) και σε συνδυασμό με τις μετρήσεις πεδίου εξετάζονται οι επιδόσεις τους στον εντοπισμό και την παρακολούθηση των φυσιολογικών αλλαγών και της αυξανόμενης υδατικής καταπόνησης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Επιπροσθέτως, οι εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποτιμηθούν οι επιδράσεις του εδάφους και των εσωτερικών σκιάσεων του θόλου, που είναι αποτέλεσμα της δομής του θόλου σε σχέση με την γωνία του ηλίου, στις αποδόσεις των δεικτών βλάστησης που εφαρμόζονται.

Μοντέλο εκτίμησης της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (ModSat)

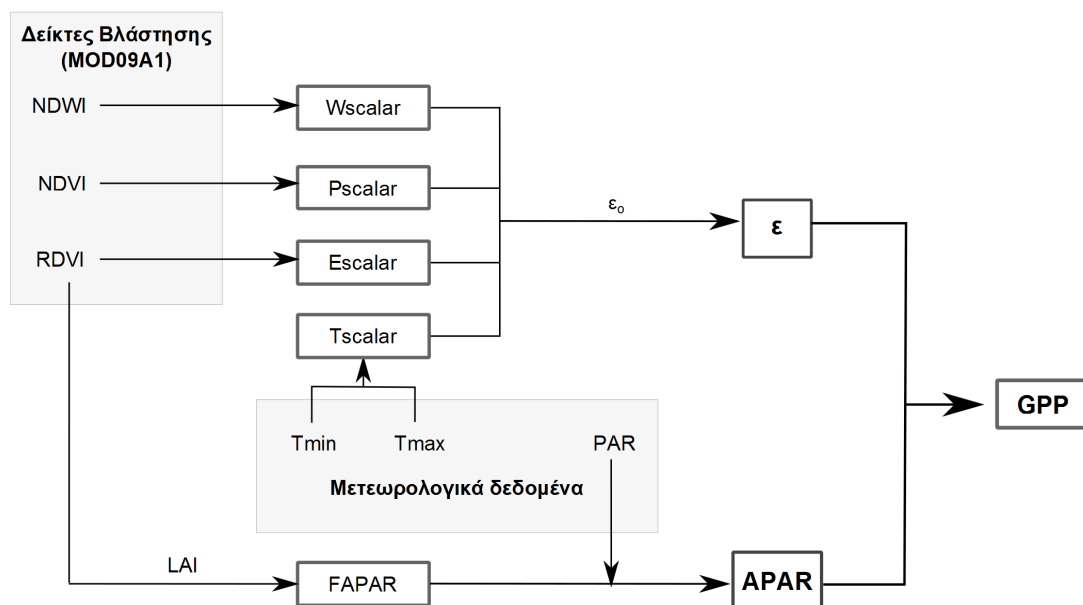
Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μοντέλο Αποδοτικότητας Χρήσης Φωτός (Light Use Efficiency model - LUE model) (Kumar & Monteith 1981) το οποίο βασίζεται κυρίως σε δορυφορικούς δείκτες πολυφασματικών αισθητήρων και μετεωρολογικά δεδομένα (Σχήμα 29). Μέσω των μετρήσεων πεδίου επετεύχθη η αρχική βαθμονόμηση του μοντέλου, ενώ η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή δεδομένων από δορυφόρους και μετεωρολογικούς σταθμούς κάνει δυνατή την αυτοματοποιημένη εκτίμηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας αλλά και άλλων ενδιαμέσων παραμέτρων όπως το FAPAR και ο LAI. Η βασική αρχή τέτοιου είδους μοντέλων είναι ότι η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα ισούται με το ποσό της απορροφημένης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (APAR) πολλαπλασιασμένο με έναν συντελεστή αποδοτικότητας (ε) βάσει του οποίου η βλάστηση μετατρέπει αυτή την ακτινοβολία σε βιομάζα.

$$GPP = \varepsilon * APAR \quad (21)$$

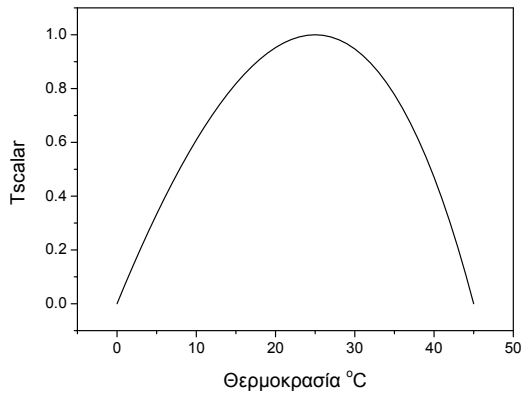
Αναλύοντας την παραπάνω απλή εξίσωση υπάρχει η δυνατότητα να μοντελοποιηθεί η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα μέσω δορυφορικών και μετεωρολογικών δεδομένων. Η απορροφημένη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (APAR) μπορεί να εκφραστεί και ως το συνολικό ποσό φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) που φτάνει στην επιφάνεια της γης επί το ποσοστό (τιμές από 0 έως 1) που απορροφάται από τον θόλο του οικοσυστήματος (FAPAR).

$$APAR = FAPAR * PAR \quad (22)$$

Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) που χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μετράται επίγεια στους μετεωρολογικούς σταθμούς πλησίον των



Σχήμα 29. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας εκτίμησης της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) από τον αλγόριθμο του ανεπτυγμένου μοντέλου ModSat.



Σχήμα 30. Πρότυπο διακύμανσης του ρυθμιστικού συντελεστή T_{scalar} στο μοντέλο ModSat για ελάχιστη, βέλτιστη και μέγιστη θερμοκρασία 0, 25 και 45 °C αντίστοιχα.

οικοσυστημάτων, ενώ το ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας που απορροφάται (FAPAR) μπορεί να υπολογιστεί από τον δείκτη LAI μέσω της εξίσωσης (Ruimy et al. 1999):

$$FAPAR = (1 - e^{-k \cdot LAI}) \cdot 0.95 \quad (23)$$

Όπου k ο συντελεστής απόσβεσης του φωτός στο θόλο (Campbell & Norman 1998). Οι συντελεστές k υπολογίστηκαν από την σύγκριση των άμεσων και έμμεσων μετρήσεων LAI στα οικοσυστήματα φυλλοβόλων, ενώ στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* υπολογίστηκε μέσω του συνδυασμού δύο έμμεσων μεθόδων, όπως περιγράφεται στην παράγραφο των

μεθόδων μέτρησης LAI. Ο LAI μπορεί να υπολογιστεί από κάποιον δορυφορικό δείκτη βλάστησης (π.χ. NDVI, EVI, RDVI, OSAVI) μέσω συσχετίσεων που αναπτύχθηκαν ανάμεσα σε επίγειες μετρήσεις LAI και δορυφορικούς δείκτες.

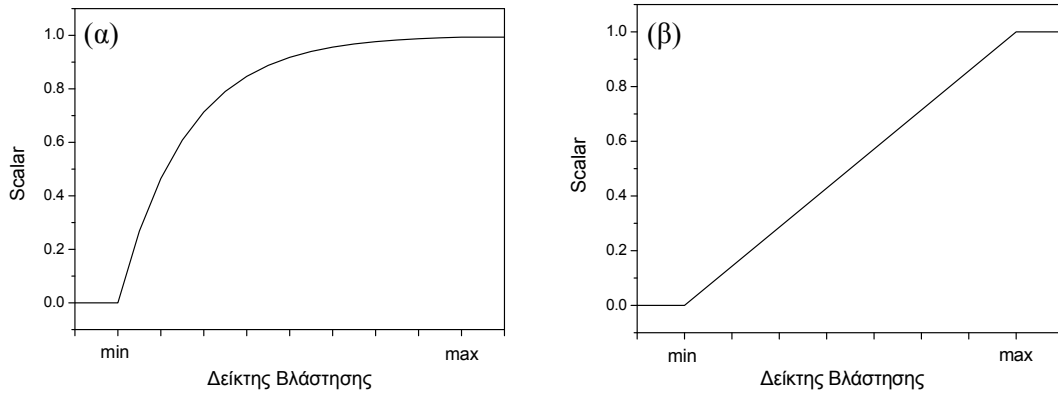
Ο συντελεστής αποδοτικότητας ε αντανακλά την κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής και διαφοροποιείται χρονικά ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης και γήρανσης των φύλλων αλλά και των αβιοτικών παραμέτρων (PAR, θερμοκρασία, διαθεσιμότητα νερού). Επίσης διαφοροποιείται και από είδος σε είδος. Εκφράζεται ως η μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα (ε_o) πολλαπλασιασμένη με μια σειρά ρυθμιστικών συντελεστών (τιμές από 0 έως 1) που εκπροσωπούν την μείωση της αποδοτικότητας κάτω από περιοριστικές κλιματικές συνθήκες και αναπτυξιακά φαινόμενα όπως η έκπτυξη και η γήρανση. Στο αναπτυσσόμενο μοντέλο εισήχθησαν τέσσερις ρυθμιστικοί συντελεστές οι οποίοι σκοπό έχουν να αυξήσουν την ευαισθησία του μοντέλου στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, της διαθεσιμότητας νερού, της έκπτυξης νεαρών φύλλων και της γήρανσης τους.

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot T_{scalar} \cdot W_{scalar} \cdot P_{scalar} \cdot E_{scalar} \quad (24)$$

Όπου ε_o η μέγιστη αποδοτικότητα χρήσης φωτός, T_{scalar} ο ρυθμιστικός συντελεστής για την θερμοκρασία, W_{scalar} ο ρυθμιστικός συντελεστής για την διαθεσιμότητα νερού, P_{scalar} και E_{scalar} οι δύο ρυθμιστικοί συντελεστές που αφορούν αναπτυξιακά φαινόμενα όπως την έκπτυξη, την γήρανση και την πτώση των φύλλων. Η μέγιστη αποδοτικότητα (ε_o) είναι σταθερή αλλά διαφορετική για κάθε είδος και υπολογίστηκε μέσω μοντέλου Φωτοσύνθεσης Θόλου (Canopy Photosynthesis Model, CPM) (Kyparissis et al. 2007, Markos & Kyparissis 2011). Το T_{scalar} υπολογίζεται μέσω μίας κωδωνοειδούς συνάρτησης που αναπτύχθηκε στο μοντέλο TEM (Terrestrial Ecosystem Model) (Raich et al. 1991).

$$T_{scalar} = \frac{(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max})}{[(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max})] - (T - T_{opt})^2} \quad (25)$$

Όπου T_{min} , T_{max} και T_{opt} είναι η ελάχιστη, η μέγιστη και η βέλτιστη θερμοκρασία αντίστοιχα όσον αφορά την φωτοσύνθεση. Για όλα τα είδη της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 0, 25 και



Σχήμα 31. Πρότυπα διακύμανσης των ρυθμιστικών συντελεστών (α) P_{scalar} , W_{scalar} και (β) E_{scalar} για τα φυλλοβόλα είδη στο μοντέλο ModSat.

45 °C ως ελάχιστη, βέλτιστη και μέγιστη θερμοκρασία αντίστοιχα (Σχήμα 30). Τ είναι η μέση θερμοκρασία ημέρας (Aber & Federer 1992) και υπολογίζεται ως:

$$T = \frac{T_{av} + T_{max}}{2} \quad (26)$$

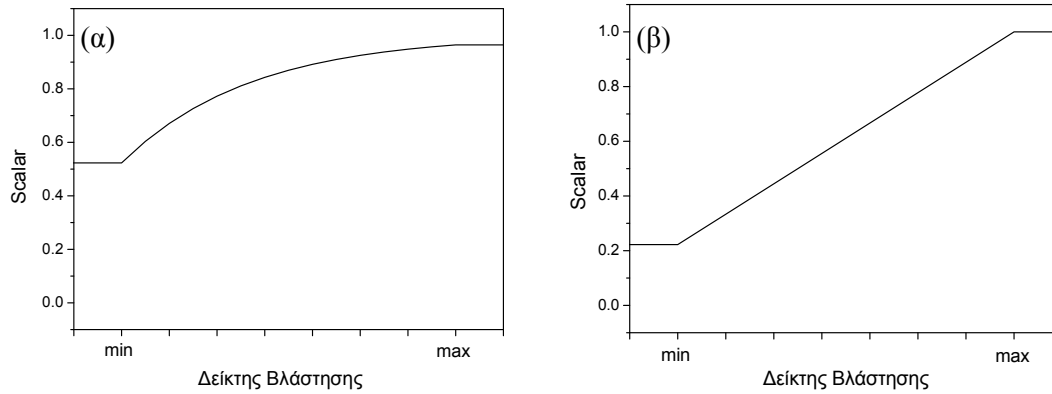
Όπου T_{av} και T_{max} είναι η μέση τιμή και η μέγιστη θερμοκρασία ολόκληρου του εικοσιτετραώρου. Ο ρυθμιστικός συντελεστής T_{scalar} υπολογίζεται μέσω επίγειων μετρήσεων θερμοκρασίας ενώ οι υπόλοιποι συντελεστές (W_{scalar} , P_{scalar} και E_{scalar}) υπολογίζονται μέσω πολυφασματικών δορυφορικών δεικτών. Συγκεκριμένα, με βάση τις ιδιότητες κάθε δείκτη:

- Ο NDWI χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του W_{scalar} , μιας και ο δείκτης αυτός συσχετίζεται με το υδατικό περιεχόμενο της βλάστησης (Gao 1996).
- Ο NDVI χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του P_{scalar} και περιγράφει τις αναπτυξιακές διακυμάνσεις που αφορούν την πράσινη βιομάζα του θόλου (Tucker 1979).
- Ο RDVI χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του E_{scalar} . Ο δείκτης RDVI είναι βελτιωμένος σε σύγκριση με τον NDVI και πιο ευαίσθητος στις αναπτυξιακές διακυμάνσεις του θόλου (Roujean & Breon 1995). Προσδίδει το βασικό πλεονέκτημα της γραμμικής συσχέτισης με την φυλλική βιομάζα (LAI) του θόλου αποτυπώνοντας τα ακριβή μεγέθη ακόμα και σε υψηλές τιμές LAI, όπου ο NDVI εμφανίζει κορεσμό.

Η εφαρμογή ενός υδατικού (W_{scalar}) και δύο αναπτυξιακών (P_{scalar} και E_{scalar}) συντελεστών, επιπλέον της εκτίμησης του FAPAR, στο ανεπτυγμένο μοντέλο προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια στις εκτιμήσεις του ModSat. Εγγυάται με αυτό τον τρόπο ότι τα πιθανά λάθη που μπορεί να προκύψουν από διάφορους παράγοντες στις τιμές κάποιου δορυφορικού δείκτη βλάστησης θα διορθωθούν ή επικαλυφθούν από τους υπόλοιπους.

Για τα φυλλοβόλα είδη οι ρυθμιστικοί συντελεστές W_{scalar} και P_{scalar} υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης:

$$Scalar = 1 - e^{-\frac{index_{min} - index}{a(index_{max} - index_{min})}} \quad (27)$$



Σχήμα 32. Πρότυπα διακύμανσης των ρυθμιστικών συντελεστών (α) P_{scalar} και (β) E_{scalar} για τα αείφυλλα και ημι-φυλλοβόλα είδη στο μοντέλο ModSat (για $index_{min}/index_{max}=0.22$).

και ο ρυθμιστικός συντελεστής E_{scalar} μέσω της γραμμικής εξίσωσης:

$$Scalar = \frac{index - index_{min}}{index_{max} - index_{min}} \quad (28)$$

Όπου $index_{min}$ και $index_{max}$ είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή κάθε δορυφορικού δείκτη κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, α είναι εμπειρικός συντελεστής και τίθεται 0.2 για τον W_{scalar} και 0.3 για τον P_{scalar} (Σχήμα 31).

Τα αείφυλλα και ημιφυλλοβόλα είδη είναι ενεργά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οπότε οι αναπτυξιακοί ρυθμιστικοί συντελεστές P_{scalar} και E_{scalar} δεν πρέπει να μηδενίζονται όταν οι δείκτες NDVI και RDVI φτάνουν στις ελάχιστες τιμές τους. Ο ρυθμιστικός συντελεστής P_{scalar} στα αείφυλλα και ημιφυλλοβόλα είδη προσαρμόζεται ως:

$$Scalar = 1 - e^{-\frac{index}{\alpha index_{max}}} \quad (29)$$

και ο ρυθμιστικός συντελεστής E_{scalar} αναλόγως:

$$Scalar = \frac{index}{index_{max}} \quad (30)$$

Όπου $index_{max}$ είναι η μέγιστη τιμή κάθε δορυφορικού δείκτη κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου και α είναι εμπειρικός συντελεστής και έχει τεθεί στην τιμή 0.3 (Σχήμα 32).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εκτελέστηκε σειρά επίγειων οικοφυσιολογικών μετρήσεων σε τέσσερα οικοσυστήματα (Πίνακας 1). Τα τρία από αυτά είναι φυσικά και βρίσκονται στην Ήπειρο, ενώ το τέταρτο αφορά μια καλλιέργεια πορτοκαλιών (*Citrus sinensis*) στην Ανδαλουσία. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις αυτές προορίζονται για αξιολόγηση και εφαρμογή δορυφορικών και εναέριων τηλεπισκοπικών δεδομένων, οι περιοχές μελέτης που επιλέχθηκαν είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιογενείς και πυκνές. Επιλέχθηκαν ένα δάσος οξιάς (*Fagus sylvatica*) κοντά στο Μέτσοβο, ένα δάσος δρυών (*Quercus* sp.) στο κεντρικό Ζαγόρι και ένα φρυγανικό οικοσύστημα που κυριαρχεί το είδος *Phlomis fruticosa* στην περιοχή του Λούρου Πρεβέζης (Εικόνα 2). Παράλληλα με τις οικοφυσιολογικές μετρήσεις, εγκαταστάθηκαν και μετεωρολογικοί σταθμοί στα φυσικά οικοσυστήματα που μελετήθηκαν για την καταγραφή των κυμαινόμενων κλιματικών παραμέτρων.

Τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν (Πίνακας 2) περιλαμβάνουν προϊόντα πολυφασματικών δορυφορικών αισθητήρων από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως δείκτες βλάστησης. Τα δεδομένα αυτά προσφέρονται σε σχετικά χαμηλή χωρική ανάλυση αλλά σχεδόν για ολόκληρο την πλανήτη. Ανάλογα με το μέγεθος της ομοιογενούς περιοχής μελέτης κάθε οικοσυστήματος και το μέγεθος των διαθέσιμων εικονοστοιχείων κάθε τύπου δεδομένων εξήχθησαν οι κατάλληλες παράμετροι προς ανάλυση (Πίνακας 11). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν υπερφασματικές εικόνες ενός πειραματικού δορυφόρου (CHRIS/PROBA) που κάλυπταν όμως μόνο την περιοχή του Λούρου και μέσω αυτών μελετήθηκε μόνο το φρυγανικό οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Τέλος, για την μελέτη του πορτοκαλεώνα στην Ανδαλουσία χρησιμοποιήθηκαν εναέριες εικόνες πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης που πρόσφεραν έξι στενά ρυθμιζόμενα φασματικά κανάλια.

Στο αρχικό στάδιο, τα προϊόντα των πολυφασματικών αισθητήρων υπέστησαν κυρίως αναλύσεις αξιολόγησης της ακρίβειας και των δυνατοτήτων τους μέσω εξαγωγής των προσφερόμενων παραμέτρων για κάθε οικοσύστημα, προβολής τους σε χρονοσειρές, οπτικής επισκόπησης των αναπτυξιακών κύκλων των παραμέτρων αυτών και σύγκρισης τους με τα μετρημένα στο πεδίο οικοφυσιολογικά χαρακτηριστικά. Σε δεύτερο στάδιο, και αφού εξήχθησαν τα πρώτα συμπεράσματα αξιολόγησης, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογές ανάλογα με τις δυνατότητες τους. Η απλούστερη εφαρμογή είναι η μελέτη των μεταβολών της αναπτυξιακής περιόδου από έτος σε έτος. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω του παλαιότερου αρχείου δορυφορικών δεδομένων (NOAA AVHRR) για το δάσος δρυών (*Quercus* sp.) και συγκρίθηκε με επίγειο μετεωρολογικό αρχείο της περιοχής. Η δεύτερη και πιο απαιτητική εφαρμογή των πολυφασματικών δεδομένων στην παρούσα μελέτη είναι η ανάπτυξη δορυφορικού μοντέλου εκτίμησης της πρωτογενούς παραγωγικότητας των οικοσυστημάτων (GPP). Το μοντέλο που αναπτύχθηκε (ModSat) αξιολογήθηκε βάσει ενός μοντέλου φωτοσύνθεσης θόλου (MANTIS) που βασίζεται σε μετρήσεις πεδίου.

Τα υπερφασματικά δεδομένα, λόγω της μεγάλης χωρικής και φασματική πληροφορίας που διαθέτουν, προσφέρονται για πιο λεπτομερείς και ειδικές αναλύσεις. Σε αυτά εφαρμόστηκαν εκτενείς φασματικές και στατιστικές επεξεργασίες για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις δυνατότητες που προσφέρουν στην παρακολούθηση βιοφυσικών και βιοχημικών χαρακτηριστικών του θόλου. Επίσης, εξετάστηκε και η καινοτόμα μέθοδος εκτίμησης της κατάστασης και της απόδοσης της φωτοσυνθετικής συσκευής μέσω δεικτών ανακλαστικότητας

Πίνακας 11. Σύνοψη των υλικών και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Στο αριστερό σκέλος του πίνακα εμφανίζονται τα δεδομένα τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιήθηκαν. Βάσει των τύπων των δεδομένων τηλεπισκόπησης και της χρήσης τους κατανεμήθηκε η ακολουθία των αναλύσεων. Στο δεξί σκέλος παρουσιάζονται τα επίγεια δεδομένα που σχετίζονται με την εκάστοτε ανάλυση και τα οικοσυστήματα στα οποία εφαρμόστηκε η κάθε μία από αυτές.

Δεδομένα Τηλεπισκόπησης			Επίγεια Δεδομένα	Οικοσύστημα
Πλατφόρμα - Αισθητήρας	Προϊόν	Εξαχθείσες Παράμετροι		
<i>Πολυφασματικά Δεδομένα Αξιολόγηση</i>				
SPOT VGT	VGT-S10	NDVI	LAI	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Quercus</i> sp.
EOS MODIS	MOD09A1	Δείκτες ανακλαστικότητας (Πίνακας 7)	LAI Χλωροφύλλες Καροτενοειδή Δυναμικό νερού	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Quercus</i> sp. <i>Phlomis fruticosa</i>
EOS MODIS	MOD15A2	LAI	LAI	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Quercus</i> sp. <i>Phlomis fruticosa</i>
EOS MODIS	MOD17A2	GPP	Μοντέλο Φωτοσύνθεσης Θόλου (MANTIS) - GPP	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Quercus</i> sp. <i>Phlomis fruticosa</i> <i>Arbutus unedo</i>
<i>Πολυφασματικά Δεδομένα Εφαρμογή</i>				
NOAA AVHRR	GIMMS	Χαρακτηριστικά αναπτυξιακής περιόδου	Μετεωρολογικά δεδομένα	<i>Quercus</i> sp.
EOS MODIS	MOD09A1	Μοντέλο Αποδοτικότητας Χρήσης Φωτός (ModSat) - GPP	Μετεωρολογικά δεδομένα Μοντέλο Φωτοσύνθεσης Θόλου (MANTIS) - GPP	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Quercus</i> sp. <i>Phlomis fruticosa</i> <i>Arbutus unedo</i>
<i>Υπερφασματικά Δεδομένα Αξιολόγηση</i>				
CHRIS/PROBA	Mode 1	Ανάλυση φασμάτων Δείκτες ανακλαστικότητας (Πίνακας 10)	LAI Χλωροφύλλες Καροτενοειδή Δυναμικό νερού Ανακλαστικότητα φύλλου Μοντέλο Φωτοσύνθεσης Θόλου (MANTIS) - ε	<i>Phlomis fruticosa</i>
UAV MCA-6		NDVI, RDVI, MTVI, R ₇₀₀ /R ₆₇₀ , PRI, PRI ₅₁₅	Δυναμικό νερού Ποιότητα φρούτων	<i>Citrus sinensis</i>

στενών καναλιών. Τέλος, η μελέτη που διεξήχθη στην Ανδαλουσία εξέτασε τις δυνατότητες των τηλεπισκοπικών δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης και στενών καναλιών στην εκτίμηση του υδατικού στρες των φυτών και της σχέσης του τελευταίου με την τελική ποιότητα των φρούτων.

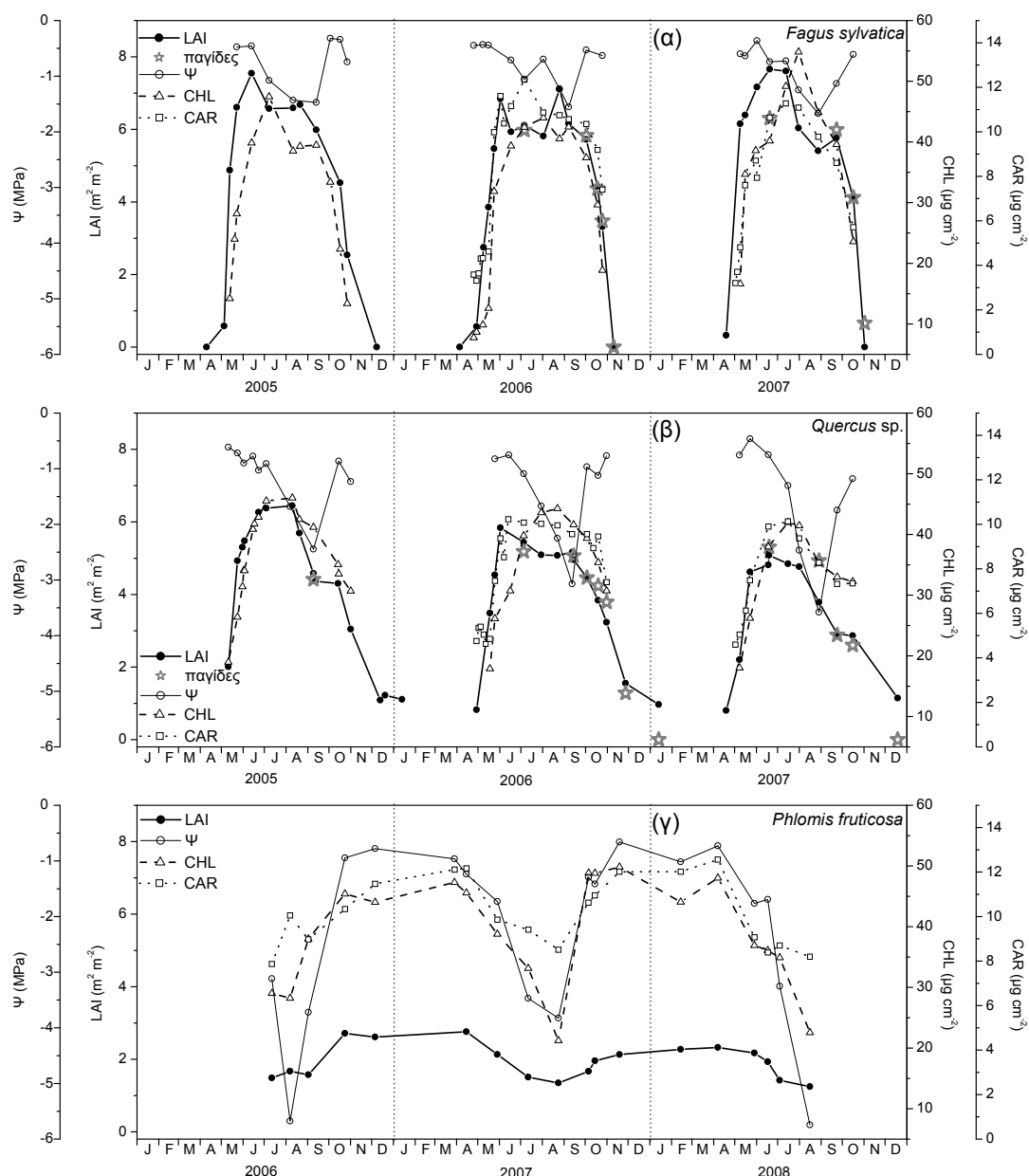
Αποτύπωση της δυναμικής των οικοσυστημάτων μέσω των επίγειων μετρήσεων

Διακυμάνσεις των μετρημένων οικοφυσιολογικών παραμέτρων

Οι διακυμάνσεις των μετρημένων φυσιολογικών παραμέτρων στα μελετώμενα οικοσυστήματα της Ηπείρου παρουσιάζονται στο Σχήμα 33. Η έκπτυξη φύλλων στο δάσος οξιάς (*Fagus sylvatica*) συμβαίνει στα τέλη Απριλίου προς αρχές Μαΐου κατά τα έτη που εκτελέστηκαν μετρήσεις πεδίου. Η ανάπτυξη των φύλλων παρουσιάζει πολύ γρήγορους ρυθμούς όταν οι κλιματικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, φτάνοντας μέγιστες τιμές LAI ήδη από τα τέλη Μαΐου – αρχές Ιουνίου. Αντιθέτως, ο ρυθμός αύξησης των χλωροφυλλών είναι χαμηλότερος από αυτόν του LAI, εμφανίζοντας μέγιστες συγκεντρώσεις τον Ιούλιο, ενώ τα καροτενοειδή ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη των χλωροφυλλών. Το δυναμικό νερού (Ψ) στο οικοσύστημα *Fagus sylvatica* δεν πέφτει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, εμφανίζοντας σταδιακή πτώση που ξεκινάει συνήθως τον Ιούλιο και παρουσιάζει ελάχιστο στα τέλη Αυγούστου προς αρχές Σεπτεμβρίου. Οι φθινοπωρινές βροχές οδηγούν σε πλήρη επανάκαμψη στις αρχές Οκτωβρίου, έχοντας όμως ήδη αρχίσει η σταδιακή πτώση των φύλλων και ελάττωση των χρωστικών τους που καταλήγει συνήθως στα τέλη του ίδιου μήνα.

Το οικοσύστημα δρυών (*Quercus* sp.) αποτελείται από δύο κυρίαρχα είδη (*Quercus cerris*, *Quercus frainetto*) με σχετικές διαφορές στην φυσιολογία τους. Για την εξέταση των σχέσεων τους με τα δορυφορικά δεδομένα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων στα δύο είδη. Η μέτρηση του LAI αναπόφευκτα περιγράφει την συμπεριφορά και των δύο ειδών. Παρατηρήθηκε μια απόκλιση στις ημερομηνίες έκπτυξης φύλλων για τα δύο είδη δρυός της τάξης των 2 εβδομάδων. Ενώ το είδος *Quercus frainetto* παρουσίαζε έκπτυξη φύλλων την ίδια περίοδο με την οξιά (τέλη Απριλίου - αρχές Μαΐου), το είδος *Quercus cerris* εμφανίζει φύλλα μετά τα μέσα Μαΐου. Έτσι, παρουσιάζεται μια πιο σταδιακή αύξηση του LAI στο οικοσύστημα των δρυών, σε σχέση πάντα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της έκπτυξης. Μέγιστο στον LAI παρουσιάζεται συνήθως τον Ιούνιο σε τιμές χαμηλότερες από αυτές της οξιάς, ενώ παρουσιάζεται πτώση ήδη από τον Αύγουστο ακολουθώντας τις εντονότερες επιδράσεις του υδατικού στρες που υφίσταται το οικοσύστημα δρυών. Οι διακυμάνσεις των χρωστικών ακολουθούν αυτές του LAI εμφανίζοντας όμως χαμηλότερους ρυθμούς αύξησης και μέγιστα τον Ιούλιο σε χαμηλότερα επίπεδα επίσης από αυτά της οξιάς. Τα καροτενοειδή ίσως προηγούνται σε ρυθμό αύξησης από τις χλωροφύλλες ειδικά το 2006, κάτι που παρατηρείται και στις οξιές την ίδια χρονιά.

Όσον αφορά το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*, παρατηρούνται έντονες εποχιακές διακυμάνσεις σε όλες τις μετρημένες βιοφυσικές και βιοχημικές παραμέτρους κατά τη διάρκεια του έτους. Τα επίπεδα των χρωστικών φύλλου φτάνουν και υπερβαίνουν τα αντίστοιχα της οξιάς, η ανάπτυξη του θόλου όμως παραμένει σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα. Στα φυτά της ασφάκας εντοπίζονται οι υψηλότερες τιμές υδατικού στρες από τα τρία οικοσυστήματα, με το δυναμικό νερού (Ψ) να φθάνει τα -6 MPa τον Αύγουστο. Παρατηρείται συνδιακύμανση μεταξύ όλων των μετρημένων παραμέτρων στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*, οι οποίοι εμφανίζουν χαμηλές τιμές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν οι υψηλές θερμοκρασίες και η περιορισμένη βροχόπτωση παρεμποδίζουν την ανάπτυξη, και υψηλές τιμές μετά τις φθινοπωρινές βροχές, κατά τη διάρκεια του χειμώνα και στις αρχές της άνοιξης. Η φθινοπωρινή αναζωογόνηση παρόλα αυτά εμφανίζει διαφορές στους ρυθμούς ανάπτυξης κάθε παραμέτρου. Όπως είναι φυσικό, η πιο γρήγορη ανταπόκριση στις φθινοπωρινές βροχές εμφανίζεται στο δυναμικό νερού (Ψ), αλλά εξίσου γρήγορη ανάπτυξη παρουσιάζει και η συγκέντρωση χλωροφυλλών. Τα καροτενοειδή και ο LAI εμφανίζουν πιο αργές αποκρίσεις και σχετικά μικρότερους ρυθμούς αύξησης. Παρατηρούνται επίσης πτώσεις στην συγκέντρωση των χλωροφυλλών το χειμώνα, ενώ τα καροτενοειδή

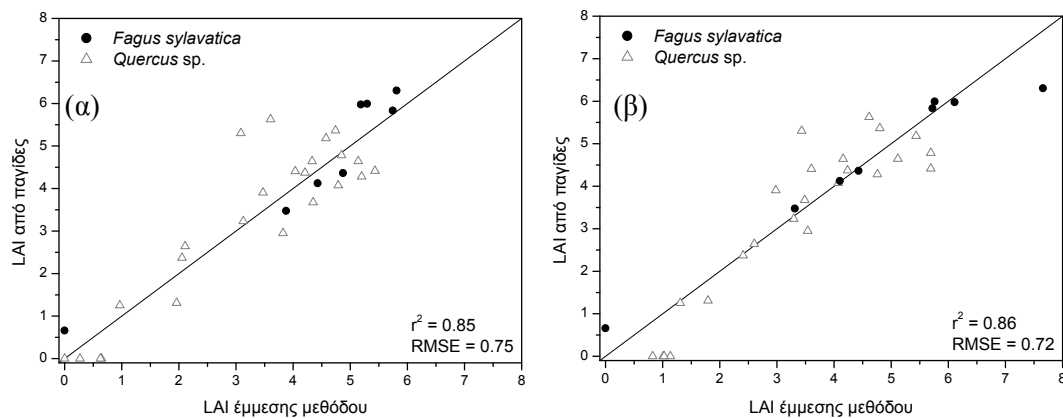


Σχήμα 33. Εποχιακές διακυμάνσεις των μετρημένων στο πεδίο παραμέτρων: δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI), συγκέντρωση χλωροφυλλών (CHL), συγκέντρωση καροτενοειδών (CAR) και δυναμικό νερού (Ψ), για τα τρία οικοσυστήματα (α) *Fagus sylvatica*, (β) *Quercus sp.* και (γ) *Phlomis fruticosa*.

συνεχίζουν να διαγράφουν ανοδική πορεία. Φαίνεται ότι το είδος *Phlomis fruticosa* αντιδρά με αυτό τον τρόπο στις χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα προφυλάσσοντας τις χλωροφύλλες από φωτοοξειδωτικό στρες.

Βαθμονόμηση των μετρήσεων της παραμέτρου LAI

Για τα φυλλοβόλα είδη η παράμετρος LAI υπολογίστηκε μέσω των δύο έμμεσων μεθόδων (Εξισώσεις 12 και 13) και η ακρίβεια τους αξιολογήθηκε μέσω της άμεσης μεθόδου. Μέσω των συγκρίσεων της πρώτης έμμεσης μεθόδου (Εξίσωση 12) και των άμεσων μετρήσεων



Σχήμα 34. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των εκτιμήσεων LAI πεδίο μέσω της έμμεσης μεθόδου και των μετρήσεων της παραμέτρου LAI μέσω της άμεσης μεθόδου (παγίδες LAI) για τα φυλλοβόλα οικοσυστήματα (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.). Μέσω των άμεσων μετρήσεων αξιολογούνται α) η έμμεση μέθοδος σταθερού k (Εξίσωση 12) και β) η έμμεση μέθοδος μεταβίβασης και σκεδασμού της ακτινοβολίας μέσα στον θόλο (Εξίσωση 13).

υπολογίστηκε ένα σταθερό k για κάθε είδος, 0.65 για το οικοσύστημα *Fagus sylvatica* και 0.45 για το οικοσύστημα *Quercus* sp. Αντίστοιχα, υπολογίστηκαν οι τιμές WAI για την πρώτη μέθοδο στις τιμές 1.5 και 1.8 για τα οικοσυστήματα *Fagus sylvatica* και *Quercus* sp. αντίστοιχα. Όσον αφορά την δεύτερη έμμεση μέθοδο (Εξίσωση 13), μέσω των συγκρίσεων με τις άμεσες μετρήσεις υπολογίστηκε η τιμή WAI για το οικοσύστημα *Fagus sylvatica* στην τιμή 1.4, ενώ για το οικοσύστημα *Quercus* sp. δεν χρειάστηκε βαθμονόμηση μέσω WAI για τις εκτιμώμενες τιμές αυτής της έμμεσης μεθόδου. Όπως αποτυπώνεται και από τα διαγράμματα σύγκρισης (Σχήμα 34), οι έμμεσες μετρήσεις του LAI και από τις δύο μεθόδους συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τις άμεσες μετρήσεις. Παρατηρούνται ελαφρώς καλύτεροι συντελεστές r^2 και RMSE για την πολύπλοκη έμμεση μέθοδο (Σχήμα 34β), οπότε και χρησιμοποιήθηκαν οι εκτιμήσεις αυτής της μεθόδου για την αποτύπωση των διακυμάνσεων του LAI στα δύο οικοσυστήματα φυλλοβόλων.

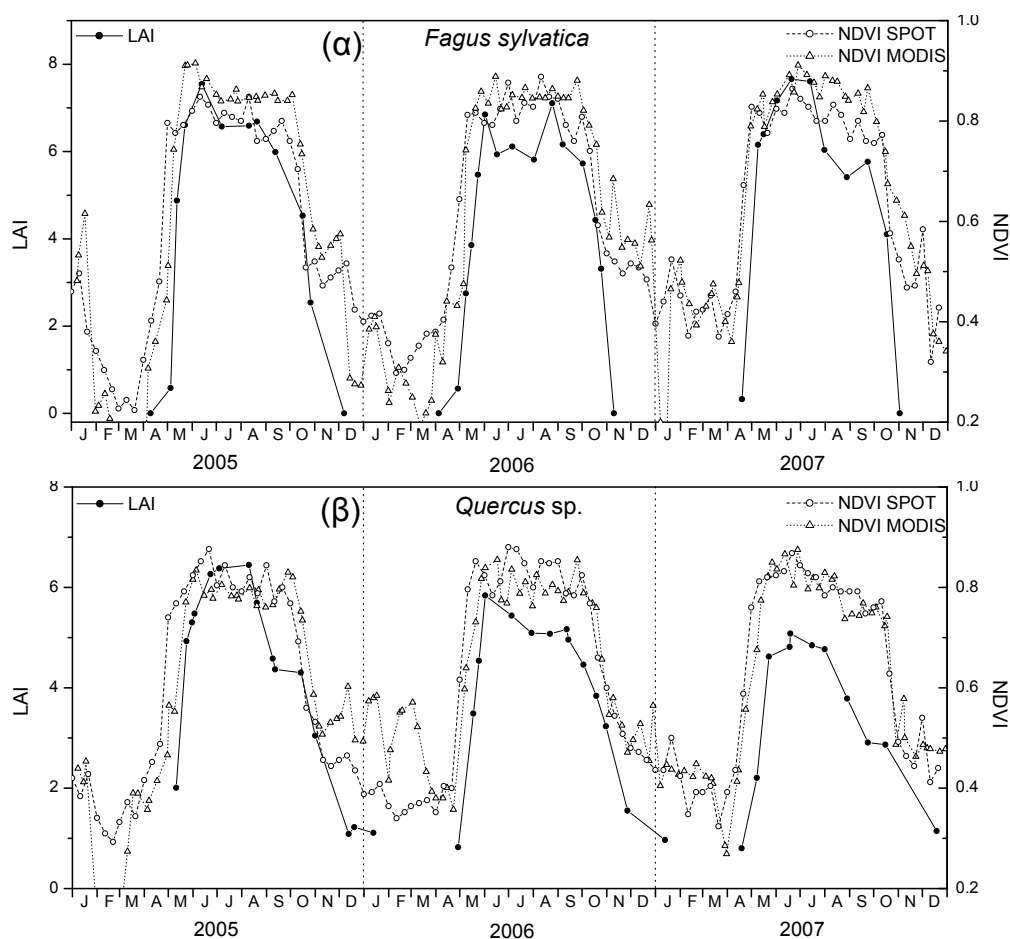
Στην περίπτωση του *Phlomis fruticosa* που η άμεση μέθοδος δεν είναι εφαρμόσιμη, οι δύο έμμεσες μέθοδοι υπολογισμού LAI (Εξισώσεις 12 και 13) συνδυάστηκαν μεταξύ τους για τον υπολογισμό ενός σταθερού k και της εφαρμογής της Εξίσωσης 12 για τον υπολογισμό του LAI, μιας και η πολύπλοκη μέθοδος (Εξίσωση 13) δεν κρίθηκε αποδοτική στις χειμερινές μετρήσεις λόγω έντονης υποτίμησης των τιμών LAI. Μέσω του συνδυασμού των μεθόδων υπολογίστηκε ένα σταθερό $k = 0.65$ για το οικοσύστημα της *Phlomis fruticosa*.

ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

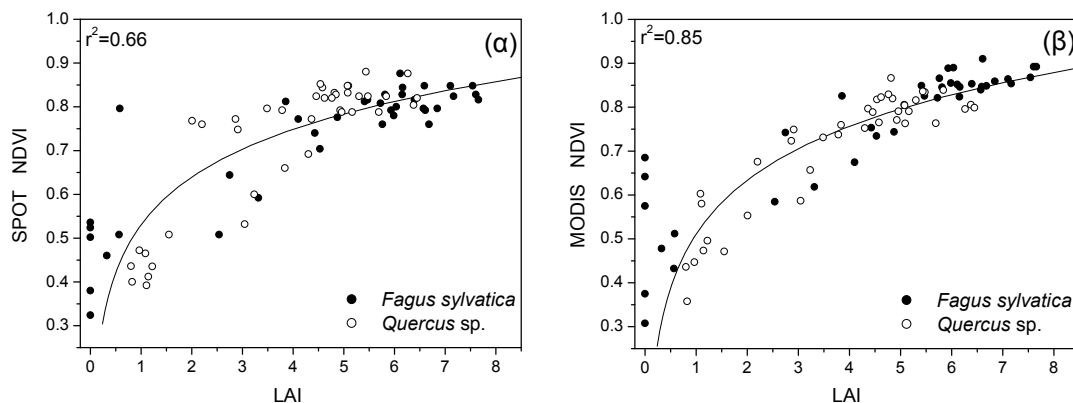
Εκτίμηση οικοφυσιολογικών παραμέτρων μέσω δορυφορικών πολυφασματικών δεδομένων

Αξιολόγηση του προϊόντος NDVI από τον SPOT (VGT-S10)

Λόγω της χαμηλής διακριτικότητας των δεδομένων SPOT VGT (1 km) και της περιορισμένης έκτασης ομοιογενούς οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa*, η περιοχή αυτή δεν συμπεριλήφθηκε στην εξαγωγή NDVI από τις εικόνες του VGT. Στην αξιολόγηση του NDVI από τον SPOT χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις LAI στο πεδίο, ενώ συμπεριλαμβάνεται και η σύγκριση του με τον αντίστοιχο δείκτη από τον πιο προηγμένο αισθητήρα MODIS. Όσον αφορά τα φυλλοβόλα δάση, στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μετρήσεων LAI στο πεδίο σε σχέση με τον δείκτη NDVI από τους δύο πολυφασματικούς αισθητήρες για τις περιοχές μελέτης των *Fagus sylvatica* και *Quercus* sp. Σε γενικά πλαίσια φαίνεται ότι ο δείκτης NDVI και από τους δύο αισθητήρες ακολουθεί το γενικό ετήσιο πρότυπο ανάπτυξης και πτώσης των φύλλων και στα δύο



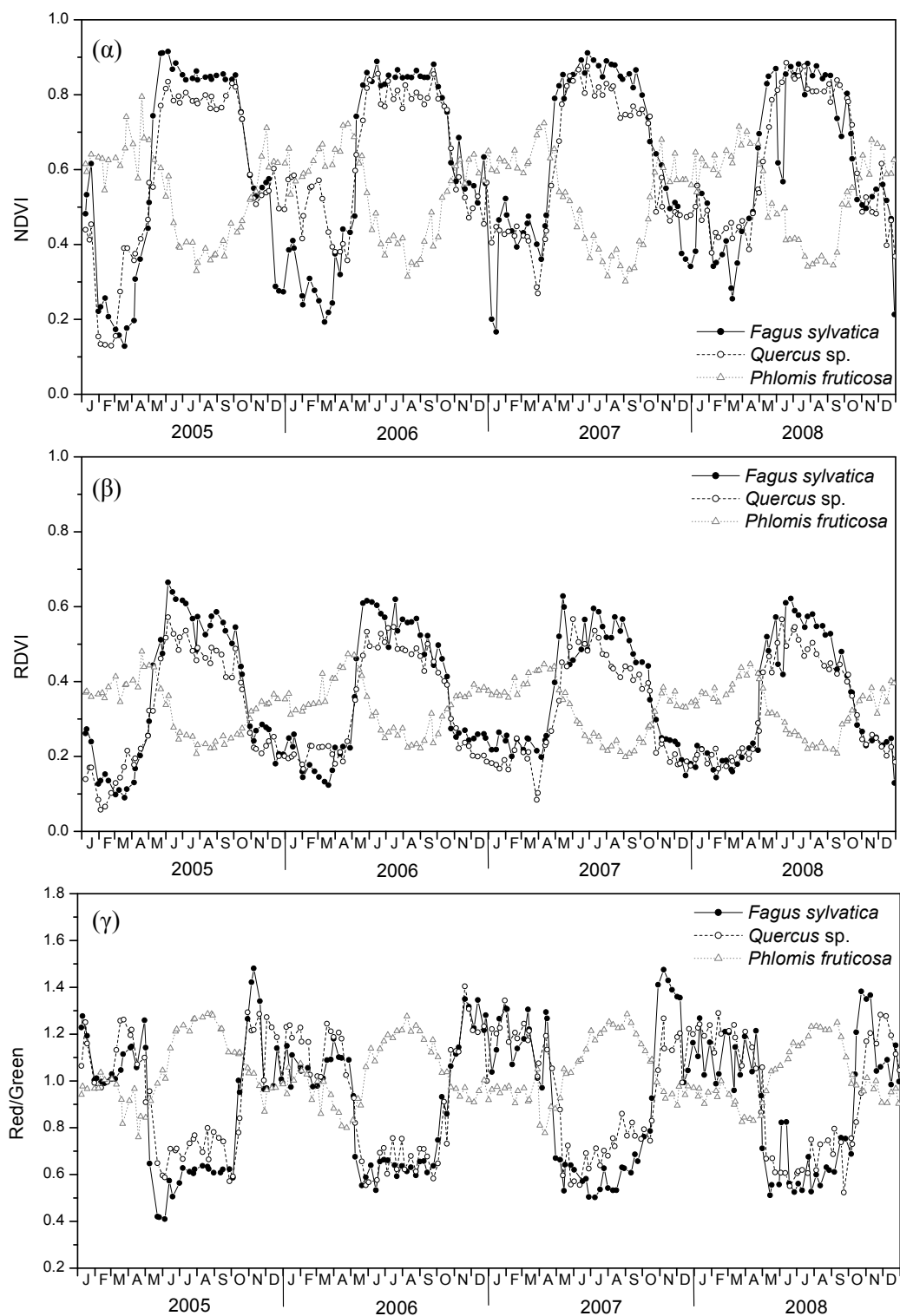
Σχήμα 35. Εποχιακές διακυμάνσεις του μετρημένου στο πεδίο δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) σε σχέση με τις αντίστοιχες διακυμάνσεις του δείκτη NDVI όπως υπολογίζεται από τους δορυφόρους SPOT VGT και EOS MODIS για τα οικοσυστήματα (α) *Fagus sylvatica* και (β) *Quercus* sp..



Σχήμα 36. Συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) στο πεδίο και του δείκτη NDVI για τα οικοσυστήματα *Fagus sylvatica* και *Quercus sp.*, όπως υπολογίστηκε από τους δορυφόρους (α) SPOT VGT και (β) EOS MODIS.

δάση. Εντούτοις, διακρίνονται κάποιες διαφορές στην συμπεριφορά των NDVI από τους δύο αισθητήρες. Παρατηρείται ότι ο δείκτης NDVI από τον SPOT προηγείται του MODIS στην αύξηση των τιμών την άνοιξη καθώς επίσης και στην πτώση το φθινόπωρο και για τα δύο είδη και στα τρία έτη που μελετήθηκαν. Επίσης, παρατηρείται ότι ο δείκτης NDVI από τον SPOT εμφανίζει ίδιες τιμές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και για τα δύο οικοσυστήματα, που κυμαίνονται γύρω από το 0.8. Αντιθέτως, οι τιμές του NDVI από τον MODIS φτάνουν σε διαφορετικά επίπεδα στα δύο οικοσυστήματα το καλοκαίρι. Στο δάσος οξιάς (*Fagus sylvatica*) παρατηρούνται σχετικά υψηλότερα επίπεδα MODIS NDVI (>0.8) σε σχέση τόσο με τον SPOT NDVI στο ίδιο οικοσύστημα (~ 0.8), όσο και με τα επίπεδα MODIS NDVI των δρυών την ίδια περίοδο (~ 0.8). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι τιμές του NDVI και των δύο αισθητήρων παρουσιάζουν ανώμαλες διακυμάνσεις, πιθανόν λόγω των έντονων καιρικών συνθηκών, με αυτές του SPOT να διακρίνονται από μεγαλύτερη σταθερότητα σε σχέση με του MODIS, οι οποίες εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις και κάποιες αιχμές υψηλών τιμών (Σχήμα 35).

Οι διαφορές στην συμπεριφορά μεταξύ των δεικτών NDVI από τους δύο αισθητήρες αποτυπώνονται πιο έντονα στα διαγράμματα συσχέτισεων των δεικτών με τις μετρημένες στο πεδίο τιμές LAI (Σχήμα 36). Είναι εμφανής στο Σχήμα 36 η λογαριθμική σχέση του NDVI με τον LAI. Υπάρχει όμως σημαντική διαφορά στις συσχετίσεις των υπολογιζόμενων από τους δύο αισθητήρες NDVI με τον LAI. Αν και στην συσχέτιση του NDVI από τον SPOT (Σχήμα 36α) παρουσιάζεται ο αναμενόμενος κορεσμός του δείκτη σε τιμές LAI άνω του 3 – 5 (Begue 1993, Goel 1989), στην αντίστοιχη συσχέτιση του NDVI από τον MODIS (Σχήμα 36β) ο κορεσμός αυτός δεν είναι τόσο έντονος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον MODIS NDVI παρουσιάζεται σαφέστερος διαχωρισμός ανάμεσα στα επίπεδα τιμών που εμφανίζουν τα δύο οικοσυστήματα σε αντιστοιχία με τις μετρήσεις του LAI στο πεδίο. Υπάρχει επίσης αισθητή διαφορά στον συντελεστή προσδιορισμού (r^2) ανάμεσα στις δύο συσχετίσεις, με αυτήν του MODIS NDVI να είναι πολύ ισχυρότερη της αντίστοιχης του SPOT. Είναι φανερό λοιπόν ότι ο δείκτης NDVI από τα δεδομένα του MODIS ακολουθεί πιστά τις διακυμάνσεις του LAI στα οικοσυστήματα και παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες από τον αντίστοιχο δείκτη υπολογισμένο από τα δεδομένα του SPOT VGT. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 35 και στο Σχήμα 36β (διασπορά τιμών NDVI όταν $LAI=0$), ο MODIS NDVI εμφανίζει μια τάση προς ασταθείς προβλέψεις, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα.



Σχήμα 37. Εποχιακές διακυμάνσεις των πολυφασματικών δεικτών (α) NDVI, (β) RDVI και (γ) Red/Green όπως υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MODIS για τα οικοσυστήματα *Fagus sylvatica*, *Quercus sp.* και *Phlomis fruticosa* για το διάστημα 2005 – 2008.

Οι δυνατότητες των πολυφασματικών δεικτών του MODIS (MOD09A1)

Τα δεδομένα του MODIS προσφέρονται για τον υπολογισμό μιας σειράς από προτεινόμενους αλλά και πειραματικούς δείκτες βλάστησης (Πίνακας 7). Στην ενότητα αυτή, οι δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν από τα πολυφασματικά δεδομένα του MODIS θα ελεγχθούν ως προς τις δυνατότητες τους να εκτιμήσουν τις μετρημένες οικοφυσιολογικές παραμέτρους για κάθε οικοσύστημα ξεχωριστά αλλά και σε όλα μαζί συνολικά. Ήδη από την προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν οι αυξημένες δυνατότητες του MODIS στον υπολογισμό του LAI μέσω του NDVI, σκοπός όμως είναι η πλήρης διερεύνηση των δυνατοτήτων του MODIS και η αξιολόγηση των βελτιωμένων δεικτών που προτείνονται στην βιβλιογραφία, καθώς και άλλων δυνητικών συνδυασμών μηκών κύματος που εφαρμόζονται κυρίως σε υπερφασματικά δεδομένα επιπέδου θόλου ή ακόμα και φύλλου (Σχήμα 37). Λόγω της συνηθισμένης ιδιότητας των πολυφασματικών δεικτών να εμφανίζουν μη-γραμμικές συσχετίσεις με τις οικοφυσιολογικές παραμέτρους, ειδικά σε οικοσυστήματα που εμφανίζουν μεγάλη φυλλική βιομάζα, εξετάστηκαν οι συντελεστές προσδιορισμού των γραμμικών, λογαριθμικών και εκθετικών συσχετίσεων των δεικτών με τις μετρημένες παραμέτρους.

Στους Πίνακες 12, 13 και 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συσχετίσεων για τα οικοσυστήματα *Fagus sylvatica*, *Quercus* sp. και *Phlomis fruticosa* αντίστοιχα, ενώ στον Πίνακα

Πίνακας 12. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των γραμμικών (lin), λογαριθμικών (log) και εκθετικών (exp) συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών που υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MODIS (Πίνακας 7) και των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του οικοσυστήματος *Fagus sylvatica*. Οι συσχετίσεις που δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα ($p > 0.01$) είναι σκιασμένες. Οι συσχετίσεις που παρουσιάζουν $r^2 > 0.5$ τονίζονται με έντονη γραφή.

<i>Fagus sylvatica</i>	LAI			CHL			CAR			CHL/CAR			Ψ		
	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp
<i>πράσινης βλάστησης</i>															
EVI	0.71	0.49	0.78	0.36	0.38	0.40	0.28	0.27	0.28	0.38	0.41	0.46	0.03	0.03	0.04
Green NDVI	0.67	0.76	0.62	0.55	0.68	0.52	0.57	0.60	0.53	0.23	0.16	0.23	0.12	0.14	0.11
MCARI	0.63	0.42	0.73	0.26	0.28	0.33	0.22	0.20	0.23	0.32	0.35	0.42	0.01	0.02	0.03
MCARI/OSAVI	0.45	0.24	0.50	0.14	0.14	0.17	0.03	0.02	0.04	0.15	0.20	0.21	0.00	0.00	0.00
mNDVI	0.67	0.55	0.66	0.34	0.32	0.34	0.14	0.12	0.15	0.44	0.47	0.47	0.10	0.11	0.10
MTVI	0.62	0.41	0.73	0.27	0.29	0.33	0.22	0.21	0.24	0.32	0.34	0.41	0.02	0.02	0.03
MTVI/OSAVI	0.41	0.22	0.46	0.14	0.13	0.16	0.03	0.02	0.04	0.13	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00
NDVI	0.81	0.85	0.74	0.52	0.62	0.49	0.47	0.49	0.45	0.43	0.38	0.40	0.09	0.08	0.08
OSAVI	0.81	0.68	0.80	0.45	0.51	0.45	0.43	0.44	0.41	0.47	0.46	0.47	0.07	0.07	0.07
RDVI	0.76	0.58	0.79	0.38	0.42	0.41	0.34	0.35	0.35	0.41	0.42	0.45	0.03	0.03	0.04
SR	0.78	0.55	0.88	0.40	0.43	0.52	0.51	0.51	0.49	0.43	0.38	0.46	0.06	0.06	0.09
<i>χρωστικών φύλλων (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)</i>															
BGI	0.58	0.47	0.44	0.08	0.16	0.01	0.14	0.16	0.04	0.12	0.09	0.08	0.00	0.00	0.02
BRI	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.05	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.04	0.06
NBGI	0.53	0.43	0.62	0.02	0.08	0.08	0.10	0.11	0.18	0.10	0.07	0.13	0.01	0.02	0.00
NPCI	0.00	0.00	0.00	0.20	0.11	0.24	0.14	0.13	0.18	0.24	0.26	0.24	0.11	0.12	0.09
PSRI	0.63	0.44	0.63	0.11	0.13	0.10	0.01	0.01	0.01	0.42	0.52	0.41	0.01	0.01	0.01
Red/Green	0.78	0.65	0.76	0.32	0.35	0.27	0.32	0.32	0.32	0.53	0.53	0.50	0.03	0.03	0.02
SIPi	0.69	0.59	0.70	0.34	0.32	0.34	0.15	0.13	0.15	0.49	0.56	0.48	0.10	0.10	0.10
<i>υδατικής κατάσταση</i>															
NDWI	0.44	0.34	0.42	0.24	0.22	0.23	0.10	0.07	0.09	0.44	0.57	0.46	0.02	0.01	0.02

Πίνακας 13. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των γραμμικών (lin), λογαριθμικών (log) και εκθετικών (exp) συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών που υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MODIS (Πίνακας 7) και των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του οικοσυστήματος *Quercus* sp. Οι συσχετίσεις που δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα ($p > 0.01$) είναι σκιασμένες. Οι συσχετίσεις που παρουσιάζουν $r^2 > 0.5$ τονίζονται με έντονη γραφή.

<i>Quercus</i> sp.	LAI			CHL			CAR			CHL/CAR			Ψ		
	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp
<i>πράσινης βλάστησης</i>															
EVI	0.75	0.74	0.74	0.13	0.11	0.13	0.27	0.25	0.23	0.43	0.45	0.44	0.02	0.02	0.02
Green NDVI	0.71	0.73	0.70	0.52	0.58	0.52	0.76	0.77	0.75	0.13	0.14	0.13	0.05	0.11	0.05
MCARI	0.75	0.73	0.74	0.10	0.09	0.10	0.26	0.25	0.25	0.38	0.39	0.38	0.00	0.00	0.01
MCARI/OSAVI	0.51	0.49	0.53	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00
mNDVI	0.76	0.79	0.75	0.19	0.21	0.20	0.47	0.49	0.47	0.38	0.40	0.38	0.01	0.01	0.01
MTVI	0.75	0.73	0.75	0.11	0.09	0.11	0.27	0.26	0.25	0.37	0.39	0.38	0.00	0.00	0.01
MTVI/OSAVI	0.48	0.46	0.50	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.14	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00
NDVI	0.81	0.88	0.77	0.24	0.26	0.25	0.56	0.57	0.47	0.34	0.36	0.29	0.01	0.01	0.01
OSAVI	0.83	0.85	0.82	0.22	0.21	0.22	0.53	0.53	0.50	0.34	0.36	0.32	0.02	0.03	0.02
RDVI	0.84	0.84	0.82	0.20	0.19	0.20	0.47	0.46	0.45	0.37	0.39	0.36	0.01	0.02	0.02
SR	0.78	0.75	0.84	0.18	0.20	0.26	0.66	0.66	0.68	0.33	0.35	0.34	0.00	0.00	0.00
<i>χρωστικών φύλλων (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)</i>															
BGI	0.64	0.73	0.44	0.02	0.03	0.00	0.30	0.33	0.18	0.06	0.06	0.00	0.04	0.04	0.05
BRI	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.08	0.09	0.11	0.02	0.03	0.02
NBGI	0.72	0.77	0.72	0.03	0.04	0.04	0.45	0.47	0.45	0.24	0.26	0.24	0.02	0.02	0.01
NPCI	0.07	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07	0.08	0.07	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
PSRI	0.64	0.69	0.64	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.34	0.38	0.34	0.00	0.00	0.00
Red/Green	0.70	0.71	0.70	0.06	0.06	0.06	0.31	0.30	0.32	0.33	0.36	0.31	0.00	0.00	0.00
SIPI	0.74	0.78	0.75	0.20	0.22	0.20	0.47	0.48	0.47	0.38	0.41	0.38	0.01	0.02	0.01
<i>υδατικής κατάστασης</i>															
NDWI	0.41	0.39	0.39	0.06	0.05	0.06	0.26	0.25	0.26	0.38	0.41	0.39	0.00	0.00	0.00

15 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις του συνόλου των μετρήσεων σε όλα τα οικοσυστήματα με τους δείκτες βλάστησης. Είναι φανερή η ιδιαίτερη συγγένεια που εμφανίζει η παράμετρος LAI με πολλούς από τους εξεταζόμενους δείκτες σε όλα τα οικοσυστήματα. Σχεδόν όλοι οι δείκτες παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις με τον LAI για όλα τα οικοσυστήματα. Εξαιρέση αποτελούν κατά κανόνα οι δείκτες που συνδυάζουν το μπλε και το κόκκινο κανάλι του MODIS (BRI, NPCI), οι οποίοι δεν δείχνουν καμία συσχέτιση με τις διακυμάνσεις του LAI (Πίνακες 12, 13, 14). Επίσης, διακρίνονται διαφορές στους βέλτιστους δείκτες ανάμεσα στα δασικά φυλλοβόλα οικοσυστήματα (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.) και το θαμνώδες ημιφυλλοβόλο *Phlomis fruticosa*. Οι δείκτες που δείχνουν τις ισχυρότερες συσχετίσεις με τον LAI στα δασικά είναι οι NDVI, RDVI, OSAVI, EVI και SR, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι για αυτόν ακριβώς το λόγο (Πίνακες 12, 13).

Από την άλλη, στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* οι παραπάνω δείκτες εμφανίζουν μεν πολύ ισχυρές συσχετίσεις με τον LAI, οι συντελεστές προσδιορισμού τους όμως είναι χαμηλότεροι από τους αντίστοιχους των δεικτών BGI και NBGI οι οποίοι συνδυάζουν το πράσινο και το μπλε κανάλι του MODIS (Πίνακας 14). Ισχυρούς συντελεστές προσδιορισμού του LAI στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* εμφανίζουν επίσης και άλλοι δύο δείκτες χρωστικών φύλλου που συνδυάζουν το κόκκινο με το πράσινο κανάλι του MODIS, οι PSRI και Red/Green. Παρατηρείται λοιπόν ότι για τα οικοσυστήματα που αναπτύσσουν αυξημένες τιμές LAI – όπως τα δασικά που μελετώνται στην παρούσα έρευνα – οι δείκτες που είναι σχεδιασμένοι για την εκτίμηση του LAI

Πίνακας 14. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των γραμμικών (lin), λογαριθμικών (log) και εκθετικών (exp) συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών που υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MODIS (Πίνακας 7) και των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa*. Οι συσχετίσεις που δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα ($p > 0.01$) είναι σκιασμένες. Οι συσχετίσεις που παρουσιάζουν $r^2 > 0.5$ τονίζονται με έντονη γραφή.

<i>Phlomis fruticosa</i>	LAI			CHL			CAR			CHL/CAR			Ψ		
	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp
<i>πράσινης βλάστησης</i>															
EVI	0.77	0.75	0.77	0.43	0.43	0.45	0.61	0.58	0.57	0.07	0.10	0.10	0.57	0.63	0.62
Green NDVI	0.73	0.71	0.74	0.43	0.43	0.45	0.60	0.57	0.58	0.08	0.11	0.10	0.58	0.65	0.62
MCARI	0.78	0.77	0.78	0.44	0.44	0.47	0.60	0.57	0.56	0.08	0.11	0.13	0.58	0.63	0.63
MCARI/OSAVI	0.55	0.57	0.55	0.27	0.31	0.28	0.33	0.33	0.34	0.08	0.11	0.08	0.38	0.39	0.39
mNDVI	0.76	0.75	0.74	0.54	0.53	0.55	0.60	0.58	0.56	0.15	0.19	0.19	0.72	0.77	0.76
MTVI	0.77	0.76	0.77	0.41	0.42	0.43	0.59	0.56	0.55	0.07	0.10	0.10	0.54	0.60	0.59
MTVI/OSAVI	0.21	0.22	0.22	0.04	0.06	0.04	0.12	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.06	0.07	0.06
NDVI	0.78	0.76	0.77	0.51	0.50	0.54	0.64	0.61	0.60	0.11	0.14	0.16	0.65	0.72	0.72
OSAVI	0.78	0.77	0.79	0.47	0.47	0.50	0.63	0.60	0.59	0.09	0.12	0.13	0.62	0.68	0.67
RDVI	0.78	0.77	0.79	0.44	0.44	0.47	0.62	0.59	0.59	0.08	0.11	0.11	0.58	0.65	0.63
SR	0.69	0.66	0.76	0.41	0.39	0.48	0.66	0.63	0.66	0.04	0.06	0.08	0.48	0.57	0.59
<i>χρωστικών φύλλου (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)</i>															
BGI	0.85	0.83	0.83	0.47	0.47	0.45	0.63	0.61	0.62	0.09	0.12	0.08	0.51	0.63	0.48
BRI	0.23	0.22	0.22	0.31	0.29	0.31	0.25	0.23	0.23	0.14	0.16	0.15	0.54	0.47	0.54
NBGI	0.84	0.82	0.86	0.45	0.45	0.49	0.62	0.60	0.63	0.08	0.11	0.11	0.49	0.61	0.53
NPCI	0.22	0.21	0.23	0.31	0.29	0.32	0.24	0.22	0.25	0.14	0.16	0.14	0.53	0.46	0.54
PSRI	0.80	0.80	0.80	0.60	0.60	0.59	0.56	0.55	0.57	0.23	0.27	0.22	0.79	0.82	0.77
Red/Green	0.80	0.78	0.79	0.55	0.53	0.51	0.62	0.60	0.62	0.15	0.17	0.12	0.67	0.74	0.62
SIPI	0.63	0.63	0.65	0.42	0.44	0.42	0.35	0.33	0.37	0.21	0.25	0.19	0.62	0.62	0.60
<i>υδατικής κατάστασης</i>															
NDWI	0.62	0.63	0.64	0.54	0.54	0.57	0.71	0.68	0.72	0.11	0.14	0.13	0.52	0.63	0.54

και χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο την απορρόφηση της ερυθρής ακτινοβολίας από την πράσινη βιομάζα και την έντονη ανάκλαση της εγγύς υπέρυθρης (NIR) από τα δομικά στοιχεία του θόλου, εμφανίζουν τις καλύτερες αποδόσεις στον προσδιορισμό του LAI. Ωστόσο, στο θαμνώδες οικοσύστημα που δεν αναπτύσσει μεγάλες ποσότητες φυλλικής βιομάζας, οι δείκτες που αποδείχθηκαν πιο ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις του LAI είναι αυτοί που σχεδιάστηκαν για την μελέτη των χρωστικών φύλλου και δεν χρησιμοποιούν την ανακλαστικότητα του θόλου στο NIR, αλλά την διαφορά απορρόφησης μεταξύ του πράσινου και του μπλε ή του κόκκινου φάσματος.

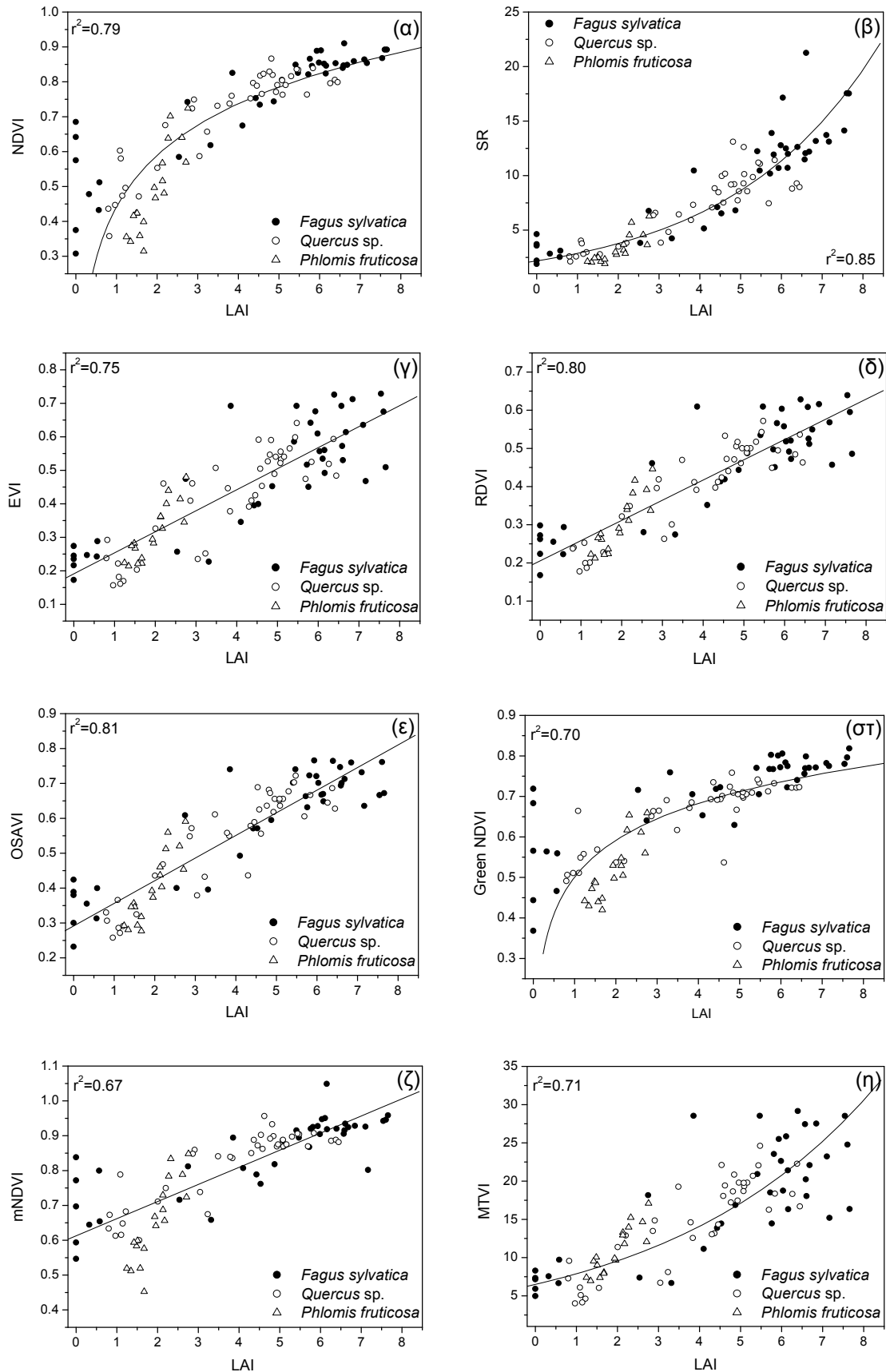
Συνδυάζοντας τις μετρήσεις σε όλα τα είδη παρουσιάζεται η πιο γενική αλλά και πιο ξεκάθαρη εικόνα της αποτελεσματικότητας κάθε δείκτη στην εκτίμηση του LAI (Πίνακας 15). Στον γενικό προσδιορισμό του LAI ξεχωρίζουν οι δείκτες OSAVI, RDVI και SR για τις αυξημένες επιδόσεις τους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 38, οι δείκτες RDVI και OSAVI εμφανίζουν τις ισχυρότερες γραμμικές συσχετίσεις με τον LAI, αποβάλλοντας την τάση άλλων δεικτών, όπως ο NDVI, αλλά και ο Green NDVI, προς κορεσμό σε μεγάλες τιμές LAI. Ο δείκτης SR εμφανίζει έντονη εκθετική τάση λόγω της έλλειψης κανονικοποίησης των διαφορών ανακλαστικότητας στο ερυθρό και NIR, ελαττώνοντας έτσι την ευαισθησία του στις διακυμάνσεις του LAI παρόλο που ο r^2 της εκθετικής συσχέτισης του με τον LAI είναι αρκετά υψηλός (Σχήμα 38β). Ο RDVI από την άλλη, εμφανίζει εξαιρετική ευαισθησία και σταθερότητα στις διακυμάνσεις του ακόμα και την χειμερινή περίοδο που παρατηρούνται έντονα καιρικά φαινόμενα τα οποία όπως παρατηρήθηκε νωρίτερα επηρεάζουν έντονα τον NDVI (Σχήμα 37). Παρόλο που οι δείκτες RDVI και OSAVI

Πίνακας 15. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των γραμμικών (lin), λογαριθμικών (log) και εκθετικών (exp) συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών που υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MODIS (Πίνακας 7) και των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων στα οικοσυστήματα *Fagus sylvatica*, *Quercus* sp. και *Phlomis fruticosa*. Οι συσχετίσεις που δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα ($p > 0.01$) είναι σκιασμένες. Οι συσχετίσεις που παρουσιάζουν $r^2 > 0.5$ τονίζονται με έντονη γραφή.

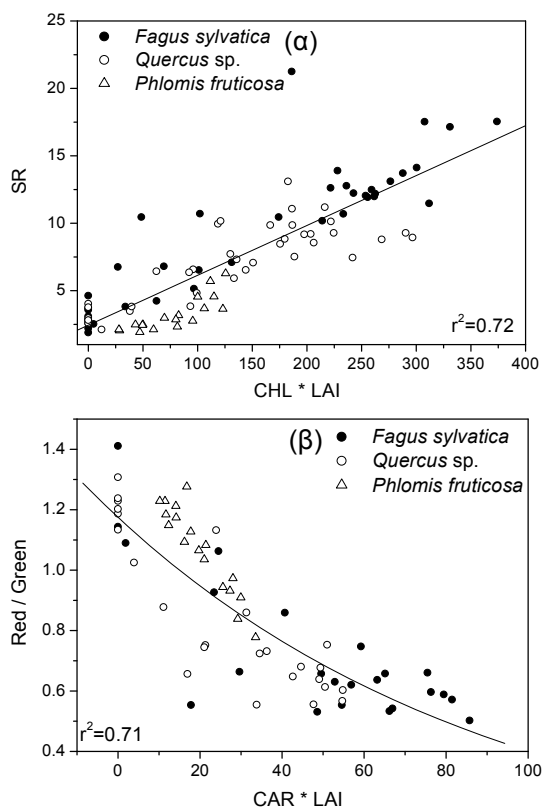
Όλα τα είδη	LAI			CHL			CAR			CHL/CAR			Ψ		
	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp	lin	log	exp
πράσινης βλάστησης															
EVI	0.75	0.68	0.74	0.09	0.09	0.10	0.05	0.04	0.04	0.19	0.20	0.21	0.18	0.13	0.21
Green NDVI	0.70	0.70	0.66	0.08	0.09	0.07	0.11	0.11	0.10	0.08	0.06	0.08	0.29	0.21	0.32
MCARI	0.70	0.63	0.71	0.07	0.07	0.11	0.05	0.04	0.05	0.18	0.19	0.22	0.17	0.13	0.20
MCARI/OSAVI	0.43	0.36	0.43	0.06	0.06	0.08	0.00	0.00	0.01	0.12	0.15	0.16	0.05	0.04	0.03
mNDVI	0.67	0.66	0.63	0.04	0.03	0.04	0.01	0.00	0.00	0.12	0.12	0.11	0.37	0.25	0.42
MTVI	0.70	0.62	0.71	0.08	0.08	0.11	0.05	0.04	0.05	0.18	0.19	0.22	0.16	0.12	0.17
MTVI/OSAVI	0.37	0.30	0.36	0.05	0.05	0.07	0.00	0.00	0.01	0.10	0.12	0.13	0.01	0.01	0.00
NDVI	0.77	0.79	0.71	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.14	0.13	0.13	0.33	0.25	0.40
OSAVI	0.81	0.78	0.78	0.09	0.10	0.10	0.08	0.07	0.07	0.18	0.18	0.18	0.25	0.18	0.30
RDVI	0.80	0.75	0.78	0.09	0.09	0.10	0.07	0.06	0.06	0.18	0.19	0.19	0.22	0.17	0.26
SR	0.81	0.68	0.85	0.06	0.07	0.07	0.10	0.10	0.08	0.17	0.15	0.16	0.17	0.15	0.27
χρωστικών φύλλων (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)															
BGI	0.66	0.67	0.52	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.03	0.02	0.23	0.23	0.21
BRI	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.02	0.04	0.03
NBGI	0.66	0.66	0.70	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.04	0.07	0.26	0.27	0.27
NPCI	0.01	0.02	0.01	0.17	0.14	0.19	0.09	0.10	0.10	0.12	0.16	0.12	0.04	0.10	0.03
PSRI	0.61	0.60	0.61	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.14	0.18	0.14	0.30	0.21	0.30
Red/Green	0.76	0.73	0.77	0.04	0.05	0.03	0.02	0.01	0.02	0.16	0.16	0.16	0.24	0.18	0.22
SIPI	0.62	0.59	0.65	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.40	0.27	0.38
υδατικής κατάστασης															
NDWI	0.57	0.55	0.56	0.07	0.06	0.08	0.03	0.02	0.03	0.20	0.23	0.21	0.22	0.19	0.22

παρουσιάζουν ιδιότητες που τους καθιστούν βελτιωμένους προσδιοριστές του LAI ανεξαρτήτως οικοσυστήματος, ο NDVI όπως υπολογίζεται από τα κανάλια του MODIS δεν παύει να είναι υπολογισμός δείκτη στις εκτιμήσεις του LAI. Η λογαριθμική σχέση του NDVI με τις μετρήσεις LAI (Σχήμα 38α) αποδεικνύεται πολύ σημαντική και μάλιστα επιδεικνύει υψηλότερη στατιστική σημαντικότητα και σταθερότητα από πολλούς άλλους προτεινόμενους δείκτες (π.χ. mNDVI, MTVI, Green NDVI, EVI). Να σημειωθεί εδώ ότι κάποιοι δείκτες πράσινης βλάστησης που εφαρμόστηκαν στα ευρέα κανάλια του MODIS ήταν αρχικά σχεδιασμένοι για στενότερα κανάλια, όπως οι MCARI, MTVI και mNDVI. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται λειτούργησαν και βάσει των ευρύτερων καναλιών του MODIS, αλλά δεν επέδειξαν ιδιαίτερα βελτιωμένες αποδόσεις σε σχέση με τον NDVI. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* όλες οι συσχετίσεις είναι σχεδόν γραμμικές λόγω της περιορισμένη ανάπτυξης του φυλλώματος του θόλου και αυτό φαίνεται στον Πίνακα 14 όπου οι συντελεστές προσδιορισμού (r^2) διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ των τριών τεστ (γραμμικό, λογαριθμικό, εκθετικό).

Πέρα από την εκτίμηση του LAI, εξετάστηκαν οι πιθανές σχέσεις των πολυφασματικών δεικτών με τις φωτοσυνθετικές χρωστικές φύλλου. Αν και εμφανίστηκαν κάποιες στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις με τις συγκεντρώσεις χλωροφυλλών (CHL), καροτενοειδών (CAR), καθώς και με τον λόγο CHL/CAR σε όλα τα οικοσυστήματα (Πίνακες 12, 13, 14), οι συντελεστές προσδιορισμού τους παραμένουν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τον προσδιορισμό του LAI. Και εδώ εμφανίζονται αισθητές διαφορές ανάμεσα στα δασικά είδη και την ασφάκα.



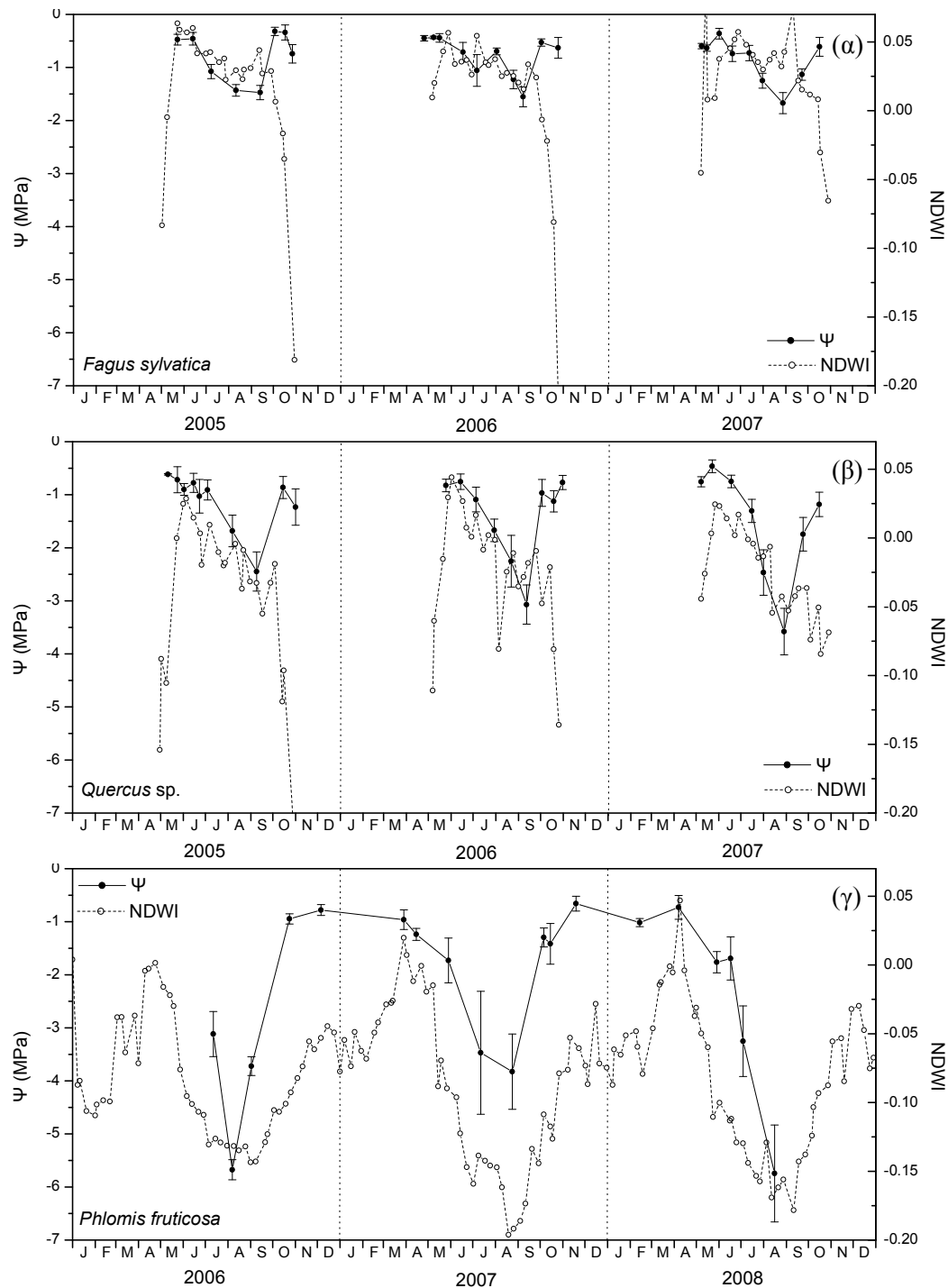
Σχήμα 38. Συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) των οικοσυστημάτων *Fagus sylvatica*, *Quercus sp.* και *Phlomis fruticosa* στο πεδίο και των δεικτών πράσινης βλάστησης του MODIS που εμφάνισαν τους υψηλότερους συντελεστές προσδιορισμού (Πίνακας 15).



Σχήμα 39. Συσχετίσεις μεταξύ (α) του γινομένου των μετρήσεων συγκέντρωσης χλωροφυλλών (CHL) και LAI για τα τρία οικοσυστήματα (*Fagus sylvatica*, *Quercus sp.*, *Phlomis fruticosa*) και του δείκτη SR όπως υπολογίστηκε από τα κανάλια του MODIS, (β) του γινομένου των μετρήσεων συγκέντρωσης καροτενοειδών (CAR) και LAI για τα τρία οικοσυστήματα (*Fagus sylvatica*, *Quercus sp.*, *Phlomis fruticosa*) και του δείκτη Red/Green όπως υπολογίστηκε από τα κανάλια του MODIS.

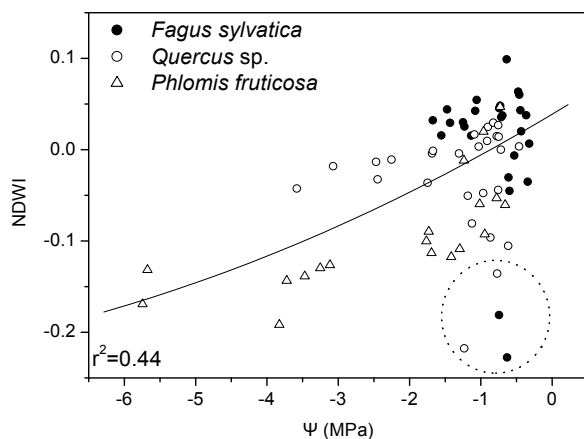
Στα δασικά είδη ξεχωρίζει ο Green NDVI ο οποίος εμφανίζει λογαριθμικές συσχετίσεις τόσο με τις χλωροφύλλες, όσο και με τα καροτενοειδή (Πίνακες 12, 13). Ο NDVI εμφανίζει επίσης μια έντονα λογαριθμική συσχέτιση με τις χλωροφύλλες της οξιάς (Πίνακας 12), ενώ κανείς δείκτης χρωστικών δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερα ισχυρή συσχέτιση με τις μετρημένες χρωστικές. Αντιθέτως, στο *Phlomis fruticosa* ξεχωρίζει ο PSRI για την γραμμική συσχέτιση του με τις χλωροφύλλες, ενώ όλοι οι δείκτες που εμφάνισαν ισχυρές συσχετίσεις με τον LAI εμφανίζουν επίσης καλές συσχετίσεις με την διακύμανση των καροτενοειδών (Πίνακας 14). Συνδυάζοντας τις μετρήσεις σε όλα τα οικοσυστήματα μαζί, δεν υπάρχει κανείς δείκτης που να δείχνει κάποια σχέση με τις συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών. Το παραπάνω είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι οι δορυφορικοί πολυφασματικοί δείκτες επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την δομή του θόλου και τον όγκο της φυλλικής βιομάζας που περιγράφονται από τον LAI και στην παρούσα ανάλυση έχουν συνδυαστεί τρία οικοσυστήματα με παρόμοιες συγκεντρώσεις χρωστικών αλλά πολύ διαφορετικά επίπεδα και διακυμάνσεις στον LAI. Για την διάκριση των χλωροφυλλών από τον LAI έχουν προταθεί οι λόγοι MCARI/OSAVI και MTVI/OSAVI (Broge & Leblanc 2001,

Haboudane et al. 2004, 2002, Zarco-Tejada et al. 2005), αλλά όπως φαίνεται δεν προσφέρουν καμία συσχέτιση με τις χλωροφύλλες όπως έχουν υπολογιστεί από τα κανάλια του MODIS. Για την εισαγωγή της πληροφορίας της διακύμανσης της φυλλικής μάζας και της δομής του θόλου στις μετρήσεις συγκεντρώσεων χρωστικών φύλλου, μία απλή μέθοδος είναι να πολλαπλασιαστούν οι μετρημένες συγκεντρώσεις χρωστικών με την αντίστοιχη τιμή του LAI. Το γινόμενο αυτό προσέφερε ισχυρές συσχετίσεις με τους δείκτες βλάστησης, από τις οποίες ξεχωρίζουν η γραμμική συσχέτιση του SR με το γινόμενο CHL*LAI και η λογαριθμική του Red/Green με το γινόμενο CAR*LAI (Σχήμα 39). Τέλος, μελετήθηκε ο προσδιορισμός του λόγου της συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς την συγκέντρωση καροτενοειδών (CHL/CAR), ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ένδειξη της φυσιολογικής κατάστασης του φυτού, μιας και οι εποχιακές τους διακυμάνσεις αντανακλούν τις μεταβολές της φωτοσυνθετικής συσκευής είτε προς φωτοσυνθετική είτε προς φωτοπροστασία (Balaguer et al. 2002, Kyparissis et al. 2000, 1995, Munne-Bosch & Alegre 2000). Κανείς από τους εξεταζόμενους πολυφασματικούς δείκτες δεν αποδείχθηκε ικανός για τον προσδιορισμό μιας τέτοιας παραμέτρου.



Σχήμα 40. Εποχιακές διακυμάνσεις του μετρημένου στο πεδίο δυναμικού νερού (Ψ) σε σχέση με τις αντίστοιχες διακυμάνσεις του δείκτη NDWI από τον MODIS για τα οικοσυστήματα (α) *Fagus sylvatica*, (β) *Quercus sp.*, (γ) *Phlomis fruticosa*.

Η μελέτη της υδατικής κατάστασης των φυτών μέσω τηλεπισκοπικών τεχνικών είναι αρκετά δύσκολο έργο. Ειδικά όταν τα δεδομένα προέρχονται από πολυφασματικούς δορυφορικούς αισθητήρες, τότε και οι τεχνικές είναι περιορισμένες και ως επί το πλείστον προβληματικές. Από τις 7 πρώτες μπάντες του MODIS που προσφέρονται στο προϊόν MOD09A1 είναι δυνατή η εξαγωγή ενός δείκτη που έχει προταθεί ως πιθανός προσδιοριστής της υδατικής κατάστασης της



Σχήμα 41. Συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων δυναμικού νερού (Ψ) για τα τρία οικοσυστήματα (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp., *Phlomis fruticosa*) και του δείκτη NDWI όπως υπολογίστηκε από τα κανάλια του MODIS. Τα σημεία που είναι σε κύκλο εξαιρέθηκαν της συσχέτισης λόγω της έντονης επίδρασης της δομής του θόλου στις συγκεκριμένες μετρήσεις (αρχές έκπτυξης – προχωρημένης πτώσης των φύλλων στα φυλλοβόλα).

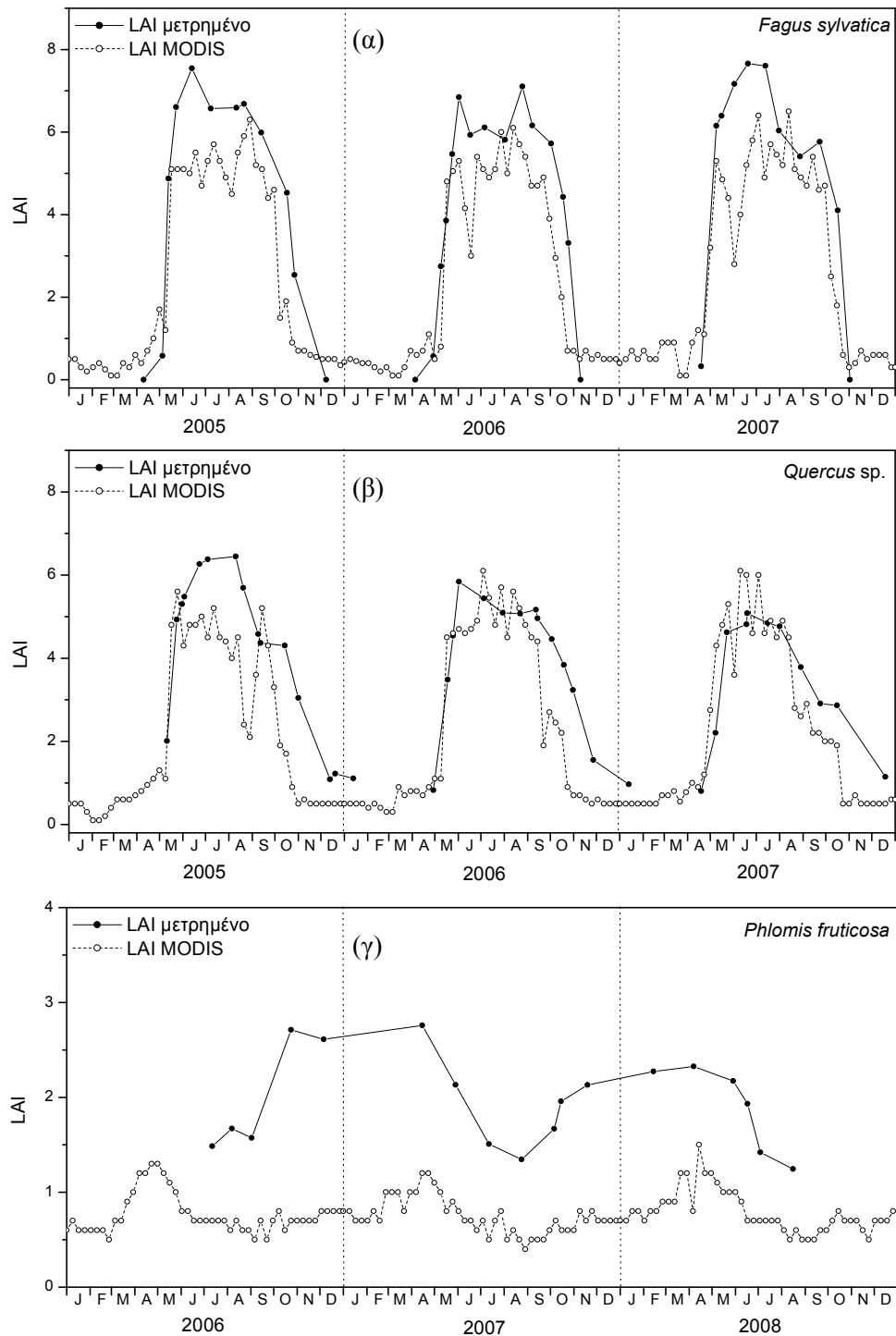
συνδιακύμανση που παρουσιάζουν το δυναμικό νερού με τον LAI και τις χρωστικές (Σχήμα 33γ). Σε αντιδιαστολή, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με τα φυλλοβόλα δασικά οικοσυστήματα (Σχήμα 33α,β).

Για λεπτομερέστερη μελέτη της συμπεριφοράς του πολυφασματικού δείκτη υδατικής κατάστασης NDWI και την διευκρίνιση των αιτιών της χαμηλής του απόδοσης, οι διακυμάνσεις των μετρήσεων δυναμικού νερού (Ψ) προβλήθηκαν γραφικά σε σχέση με τις διακυμάνσεις του NDWI για κάθε οικοσύστημα (Σχήμα 40). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 40, στα δασικά οικοσυστήματα ο NDWI παρουσιάζει τεράστια και απότομη αύξηση την άνοιξη και ανάλογη πτώση το φθινόπωρο. Αυτό το φαινόμενο είναι προφανές ότι οφείλεται στην έντονη επίδραση της δομής του θόλου στην ανακλαστικότητα του υπερύθρου φάσματος, το οποίο και χρησιμοποιεί ο δείκτης NDWI για την αναγνώριση της υδατικής κατάστασης. Παρόλη την έντονη επίδραση που υφίσταται ο δείκτης από τις αναπτυξιακές διακυμάνσεις του θόλου, τα επίπεδα των τιμών του Ψ και του NDWI, καθώς και οι σχετικές διακυμάνσεις των δύο, συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό και στα τρία οικοσυστήματα. Όσον αφορά την ανάκαμψη του δυναμικού νερού με τις φθινοπωρινές βροχές, στα φυλλοβόλα είδη δυστυχώς αυτό συμβαίνει όταν έχει ήδη αρχίσει η διαδικασία πτώσης των φύλλων και μεγάλο μέρος του θόλου έχει αποβληθεί, οπότε και η ανάκαμψη του NDWI δεν φτάνει στα αρχικά επίπεδα του Ιουνίου. Για την *Phlomis fruticosa* η ανάκαμψη του NDWI δεν ακολουθεί την απότομη αύξηση του Ψ το φθινόπωρο, αλλά μάλλον επηρεάζεται από την αργότερη ανάκαμψη που παρουσιάζει ο LAI (Σχήμα 33γ). Συνεπώς, ο δείκτης NDWI θα μπορούσε να αναγνωρίζει την υδατική κατάσταση των φυτών με την προϋπόθεση ότι διατηρείται σταθερή η δομή του θόλου. Όπως φαίνεται και από τη συσχέτιση των μετρήσεων δυναμικού νερού με τον NDWI (Σχήμα 41), η τάση αποκτάει σημαντικότητα ($r^2=0.44$) όταν εξαιρεθούν οι μετρήσεις των φυλλοβόλων κατά τις αρχές της έκπτυξης την άνοιξη και μετά από σημαντική πτώση των φύλλων το φθινόπωρο.

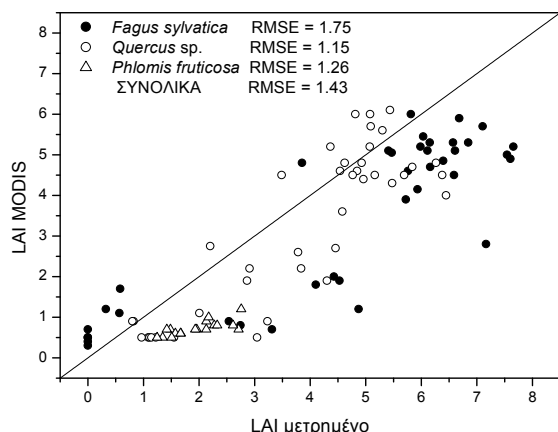
βλάστησης και αυτός είναι ο NDWI (Πίνακας 7). Όπως φαίνεται στους Πίνακες 12 και 13, ο NDWI δεν εμφανίζει καμία ισχυρή συσχέτιση με το μετρημένο δυναμικό νερού ή κάποιας άλλης παραμέτρου των δασικών οικοσυστημάτων. Επίσης, κανείς άλλος δείκτης δεν εμφανίζει στατιστικά σημαντική σχέση με το Ψ για τα δύο φυλλοβόλα είδη. Τουναντίον, οι συσχετίσεις των δεικτών με το Ψ στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*, παρουσιάζουν πολλές και ιδιαίτερα σημαντικές συσχετίσεις. Παρόλα αυτά ο NDWI δεν εμφανίζει τόσο καλή συσχέτιση με το Ψ ($r^2=0.63$, log) όσο ο PSRI ($r^2=0.82$, log). Η έντονη σύνδεση του Ψ με τους δείκτες πράσινης βλάστησης και χρωστικών φύλλου στο συγκεκριμένο οικοσύστημα είναι προφανές ότι οφείλεται στην έντονη

Η ακρίβεια του προϊόντος LAI από τον MODIS (MOD15A2)

Το προϊόν του MODIS που προσφέρει εκτιμήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) σε παγκόσμιους χάρτες δεν εξαιρέθηκε από την διόρθωση BISE, στην οποία υπεβλήθησαν οι



Σχήμα 42. Εποχιακές διακυμάνσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) που προσφέρεται από το αντίστοιχο προϊόν του MODIS (MOD15A2) μετά την διόρθωση BISE, σε σχέση με τις μετρημένες τιμές του δείκτη στο πεδίο για τα οικοσυστήματα (α) *Fagus sylvatica*, (β) *Quercus sp.*, (γ) *Phlomis fruticosa*.



Σχήμα 43. Διάγραμμα σύγκρισης μεταξύ των μετρημένων τιμών LAI στο πεδίο για τα τρία οικοσυστήματα (*Fagus sylvatica*, *Quercus sp.*, *Phlomis fruticosa*) και τις διορθωμένες μέσω BISE εκτιμήσεις LAI από τον αλγόριθμο του MODIS (MOD15A2).

πολυφασματικοί δείκτες, λόγω των απότομων και αφύσικων πτώσεων που εμφανίζουν οι χρονοσειρές των πρωτογενών δεδομένων του στις περιοχές μελέτης της παρούσας έρευνας. Η διορθωμένη εικόνα του προϊόντος παρουσιάζεται στο Σχήμα 42 σε σχέση με τις μετρημένες τιμές LAI στο πεδίο για κάθε οικοσύστημα. Στα φυλλοβόλα είδη (Σχήμα 42α,β), το προϊόν του MODIS αναγνωρίζει το ετήσιο πρότυπο ανάπτυξης και πτώσης των φύλλων και μάλιστα με μεγάλη χρονική ακρίβεια. Επίσης, κατά τη διάρκεια του χειμώνα στα δύο δασικά είδη ο MODIS LAI εμφανίζει πολύ σωστά σταθερές τιμές πολύ κοντά στο μηδέν. Τα επίπεδα τιμών LAI που εμφανίζει το καλοκαίρι το προϊόν του MODIS (Σχήμα 42α,β) κυμαίνονται στο διάστημα 4 – 6 και

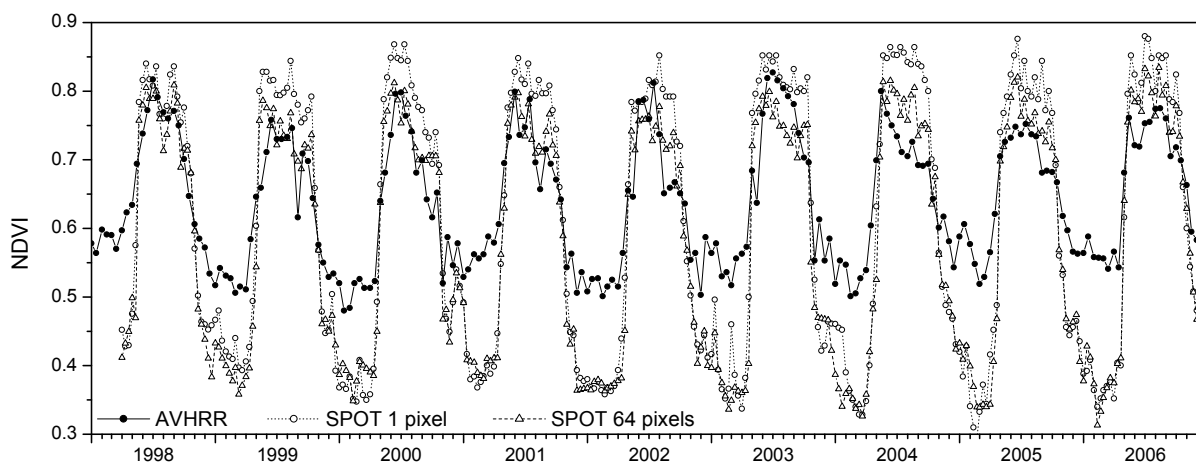
για τα δύο φυλλοβόλα είδη. Αν και αυτό είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα για το δάσος δρυών (Σχήμα 43, RMSE = 1.15), ο αλγόριθμος του MODIS αποτυγχάνει να διακρίνει τις υψηλότερες τιμές LAI που αναπτύσσονται στο δάσος οξιάς (Σχήμα 43, RMSE = 1.75). Επίσης, οι διακυμάνσεις των τιμών του MODIS LAI κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στα φυλλοβόλα δάση παρουσιάζουν κάποιες απότομες πτώσεις και περίεργες αυξομειώσεις που δεν διορθώθηκαν από τον αλγόριθμο BISE και είναι φυσικά αδύνατον να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Δεδομένου όμως ότι το προϊόν αυτό προσφέρει παγκόσμια κάλυψη των διακυμάνσεων του LAI, τέτοιες αποκλίσεις από την πραγματικότητα μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες και η ακρίβεια και η αξιοπιστία του προϊόντος για τα δύο φυλλοβόλα οικοσυστήματα μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Εντυπωσιακό σημείο για την ακρίβεια του προϊόντος αποτελεί επίσης η αναγνώριση της πρόωρης πτώσης του LAI στο δάσος δρυών τον Αύγουστο του 2007.

Στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* οι εκτιμήσεις του MODIS απέχουν πολύ από τις πραγματικές διακυμάνσεις του LAI (Σχήμα 42γ). Στο προϊόν του MODIS οι τιμές του LAI κυμαίνονται γύρω από το 0.6 κατά τη διάρκεια όλου του έτους, με εξαίρεση το διάστημα Μαρτίου – Μαΐου όπου παρουσιάζεται μία αύξηση των τιμών σε επίπεδα μόλις άνω της μονάδας. Οι πιθανότερη αιτία για την μεγάλη απόκλιση των διακυμάνσεων του MODIS LAI από τις μετρημένες τιμές της περιοχής *Phlomis fruticosa* είναι η χαμηλή χωρική ανάλυση που προσφέρεται το προϊόν LAI. Να υπενθυμίσουμε εδώ ότι το προϊόν LAI προσφέρεται σε ανάλυση 1 km σε αντίθεση με το MOD09A1 που προσφέρεται σε ανάλυση 500 m (Πίνακας 2). Η ομοιογενής και πυκνή περιοχή που καλύπτεται από το είδος *Phlomis fruticosa* στην περιοχή μελέτης είναι κατά πολύ μικρότερη του 1 km² και μετά βίας ένα εικονοστοιχείο των 500 m μπορεί να θεωρηθεί «καθαρό» και αντιπροσωπευτικό του είδους. Επομένως, το εικονοστοιχείο από το οποίο εξήχθησαν τα δεδομένα LAI περιλαμβάνει μόνο κατά το ¼ καθαρή περιοχή *Phlomis fruticosa* με την υπόλοιπη έκταση να συμπεριλαμβάνει μεγάλα κενά στον θόλο, μονοπάτια και ίσως κάποιες περιοχές με διαφορετικά είδη βλάστησης. Είναι λοιπόν επόμενο οι εκτιμήσεις του LAI σε τέτοια χωρική ανάλυση να είναι κατά πολύ υποτιμημένες σε σχέση με τις μετρήσεις στο πεδίο.

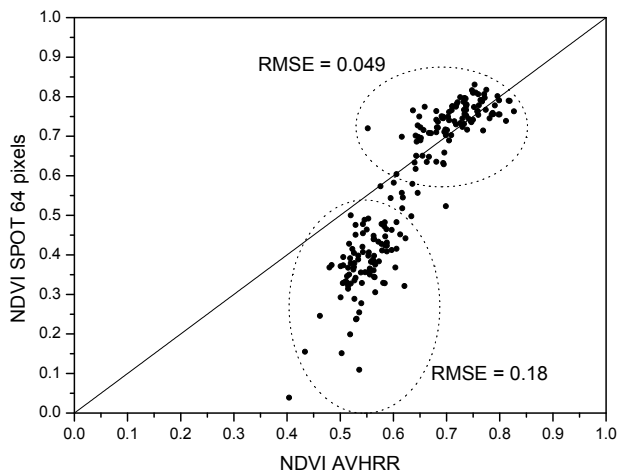
Η δυναμική του οικοσυστήματος *Quercus* sp. στον χρόνο μέσω του αρχείου AVHRR (GIMMS)

Αξιολόγηση των χρονοσειρών GIMMS μέσω του αρχείου SPOT

Δεδομένης της σημαντικής δυνατότητας που προσφέρει το αρχείο των δορυφόρων AVHRR για διεξαγωγή ανάλυσης τάσεων και συμπεριφοράς των οικοσυστημάτων που καλύπτει τρείς δεκαετίες, είναι εξαιρετικά σημαντικό να αξιολογηθεί η ακρίβεια των δεδομένων που προσφέρονται χρησιμοποιώντας άλλες πηγές δεδομένων. Όπως περιγράφηκε στις μεθόδους, οι χρονοσειρές NDVI του GIMMS προέρχονται από σειρά διαφορετικών δορυφόρων NOAA με διαφορετικά χαρακτηριστικά τροχιάς, βαθμονόμησης αισθητήρα και άλλων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τον δείκτη NDVI και συνεπώς τις μελετώμενες συμπεριφορές και τάσεις. Αν και τα δεδομένα GIMMS έχουν διορθωθεί ως προς αυτές της πηγές σφάλματος, είναι απαραίτητη η εξέταση της ακρίβειας των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Για το λόγο αυτό, τα δεδομένα AVHRR συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα του SPOT για τα 9 χρόνια που συμπίπτουν οι παρατηρήσεις των δορυφόρων. Τα δεδομένα του SPOT VGT, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για την παρακολούθηση της βλάστησης, έχουν υποστεί πιο ειδικές και σύγχρονες μεθόδους διόρθωσης στο κέντρο επεξεργασίας και αρχειοθέτησης του προγράμματος SPOT-VGT (Mol, Belgium) πριν προσφερθούν προς χρήση. Επίσης έχουν συγκριθεί με τις επίγειες μετρήσεις (Σχήματα 35, 36α) και με τα δεδομένα του πολυφασματικού αισθητήρα MODIS (Σχήματα 35, 36β). Η χαμηλή χωρική (8 km) και χρονική (15 ημέρες) ανάλυση της χρονοσειράς GIMMS συγκρίνεται με το εικονοστοιχείο του SPOT (1 km) που χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτικό του οικοσυστήματος *Quercus* sp. στις προηγούμενες αναλύσεις, καθώς και το μέσο NDVI των 64 εικονοστοιχείων SPOT που συμπίπτουν με το επιλεγμένο εικονοστοιχείο GIMMS (Σχήμα 44). Όπως φαίνεται, το μέσο NDVI των 64 εικονοστοιχείων SPOT ακολουθεί με εξαιρετική ακρίβεια τις ετήσιες διακυμάνσεις του ενός αντιπροσωπευτικού εικονοστοιχείου SPOT με μόνη διαφορά τα λίγο χαμηλότερα επίπεδα τιμών



Σχήμα 44. Εποχιακές διακυμάνσεις του δείκτη NDVI για το οικοσύστημα *Quercus* sp. από τους δορυφόρους NOAA AVHRR και SPOT VGT για το χρονικό διάστημα που συμπίπτουν οι παρατηρήσεις των δύο δορυφόρων. Συγκρίνεται το εικονοστοιχείο του SPOT (1 km), που περιέχει την περιοχή επίγειων μετρήσεων, με το μέσο NDVI των 64 εικονοστοιχείων SPOT που συμπίπτουν με το εικονοστοιχείο AVHRR (8 km).

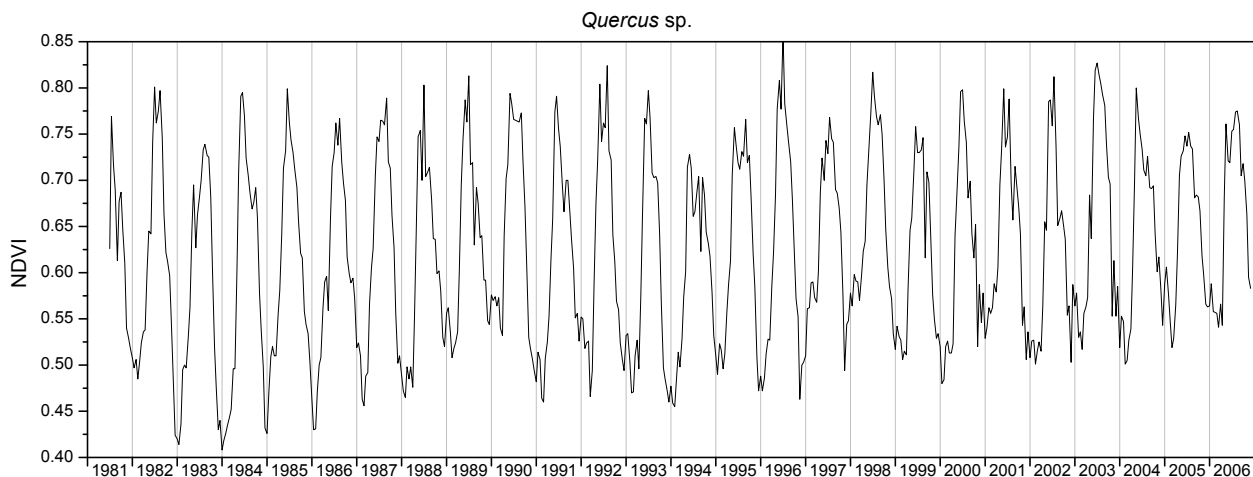


Σχήμα 45. Διάγραμμα σύγκρισης μεταξύ των τιμών NDVI του AVHRR και του μέσου NDVI των 64 εικονοστοιχείων του SPOT για το δάσος δρυών (*Quercus* sp.) στο χρονικό διάστημα που συμπίπτουν οι παρατηρήσεις των δύο δορυφόρων (1998 – 2006). Με δύο κύκλους στο διάγραμμα ξεχωρίζουν οι χειμερινές από τις καλοκαιρινές τιμές NDVI. Ως χειμερινές θεωρούνται οι τιμές πριν την έκτυψη και μετά την πτώση των φύλλων και ως καλοκαιρινές αυτές στο υπόλοιπο διάστημα του έτους που υπάρχει φύλλωμα στο θόλο

περίοδο 1998 – 2006 κυμαίνονται γύρω από το 0.55, ενώ του SPOT γύρω από το 0.4. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν να οφείλεται στις διαφορετικές επεξεργασίες και διορθώσεις που έχουν υποστεί τα δεδομένα των δύο δορυφόρων. Μια πολύ μεγάλη διαφορά των δύο τύπων δεδομένων είναι ότι οι ανακλαστικότητες του AVHRR δεν έχουν υποστεί ατμοσφαιρικές διορθώσεις. Επίσης, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα κανάλια των δύο δορυφόρων. Τα κανάλια του AVHRR είναι πιο ευρεία σε σχέση με του SPOT (Πίνακες 4, 5). Ειδικά το κανάλι του εγγύς υπερύθρου στον AVHRR καλύπτει πολύ πιο εκτενές φάσμα (725 - 1000 nm) με σχέση με το αντίστοιχο του SPOT (790 – 890 nm). Ωστόσο, υπάρχει επίσης και η πιθανότητα επιρροής των μεγάλων εικονοστοιχείων του GIMMS από γειτονικές περιοχές έξω από τα όρια του επιλεγμένου εικονοστοιχείου λόγω των έντονων γεωμετρικών επεξεργασιών που έχουν υποστεί τα δεδομένα AVHRR για την μορφοποίηση των παγκόσμιων χαρτών σταθερού πλέγματος. Ένα τέτοιο φαινόμενο θα αύξανε τις ελάχιστες τιμές NDVI το χειμώνα λόγω της παρουσίας αείφυλλων δασών μαύρης πεύκης (*Pinus nigra*) στην ευρύτερη περιοχή. Παρόλες τις διαφορές των NDVI από τους δύο αισθητήρες, το αναπτυξιακό πρότυπο και οι σχετικές διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του στο χρόνο μπορούν να υπολογισθούν με αξιοπιστία από την χρονοσειρά GIMMS.

Για την ποσοτική εκτίμηση της συνάφειας των χρονοσειρών NDVI SPOT και AVHRR, η χρονοσειρά του μέσου NDVI των 64 εικονοστοιχείων του SPOT αναπροσαρμόστηκε σε βήμα 15 ημερών και συσχετίστηκε με τις αντίστοιχες τιμές του GIMMS NDVI (Σχήμα 45). Με δύο κύκλους στο διάγραμμα ξεχωρίζουν οι χειμερινές από τις καλοκαιρινές τιμές NDVI, θεωρώντας χειμερινές τιμές αυτές πριν την έκτυξη και μετά την πτώση των φύλλων και καλοκαιρινές τιμές αυτές στο υπόλοιπο διάστημα του έτους που υπάρχει φύλλωμα στο θόλο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 45, οι καλοκαιρινές τιμές συγκεντρώνονται γύρω από την γραμμή 1:1 εμφανίζοντας πολύ καλή συνάφεια μεταξύ τους ($RMSE = 0.049$), ενώ οι χειμερινές τιμές αποκλίνουν από την γραμμή

κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τα παραπάνω μαρτυρούν πως η περιοχή που καλύπτει το εικονοστοιχείο GIMMS (8 km) ακολουθεί το ετήσιο πρότυπο του *Quercus* sp., είναι δηλαδή ομοιογενής και κατάλληλη για μελέτη των χαρακτηριστικών του οικοσυστήματος. Οι ελαφρώς χαμηλότερες μέγιστες τιμές φανερώνουν ότι στην τεράστια αυτή έκταση (64 km²) η παρουσία μικρών κενών στο θόλο καθώς και σκιάσεων λόγω του ανάγλυφου είναι αναπόφευκτες αλλά μικρής σημασίας. Ο NDVI του AVHRR ακολουθεί και αυτός το ίδιο ετήσιο αναπτυξιακό πρότυπο με τον SPOT, εμφανίζοντας μέγιστες τιμές το καλοκαίρι σε επίπεδα πολύ κοντά με το μέσο NDVI των 64 εικονοστοιχείων SPOT αλλά με χειμερινά ελάχιστα NDVI εμφανώς υψηλότερα του SPOT (Σχήμα 44). Τα χειμερινά NDVI του AVHRR για την



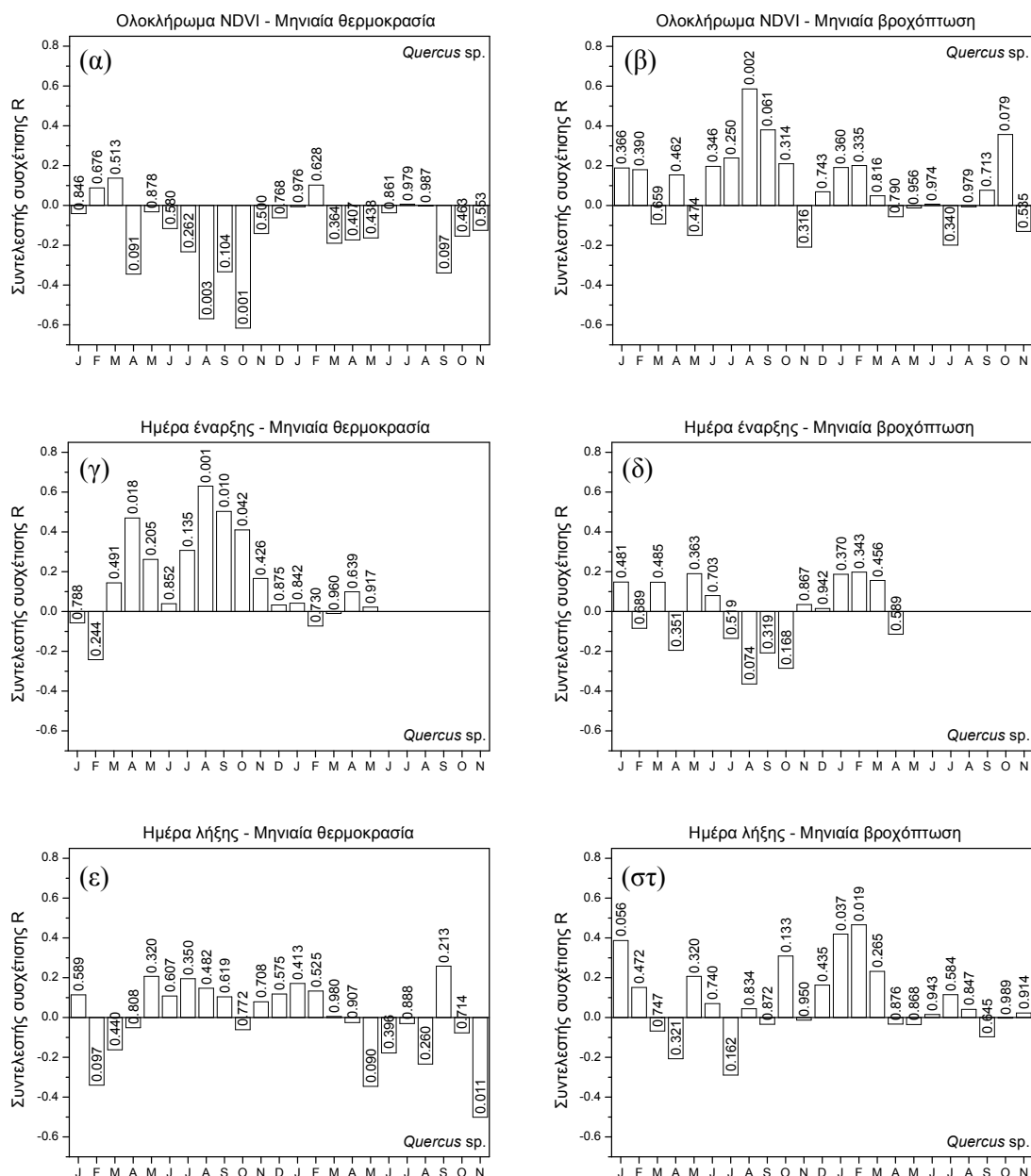
Σχήμα 46. Εποχιακή διακύμανση του δείκτη NDVI για το οικοσύστημα *Quercus sp.* από το συνολικό διαθέσιμο αρχείο των δορυφόρων NOAA AVHRR (GIMMS).

1:1 λόγω του αυξημένου επιπέδου χειμερινών τιμών του AVHRR, με αποτέλεσμα την χαμηλότερη συνάφεια τους (RMSE = 0.18).

Μελέτη της επίδρασης των κλιματικών παραμέτρων στην αναπτυξιακή δραστηριότητα του οικοσυστήματος Quercus sp.

Το αρχείο δορυφορικών δεδομένων GIMMS προσφέρεται για την μελέτη των επιδράσεων του κλίματος στην αναπτυξιακή δραστηριότητα των οικοσυστημάτων λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που καλύπτει. Σε αντίθεση με τα αρχεία των δορυφόρων SPOT και MODIS, που η περίοδος κάλυψής τους είναι σχεδόν η μισή του AVHRR, μια στατιστική ανάλυση ανάμεσα στο αρχείο GIMMS και ένα αρχείο επίγειων μετεωρολογικών καταγραφών είναι δυνατόν να προσφέρει αποτελέσματα υψηλής αξιοπιστίας. Ωστόσο, η χωρική ανάλυση του προϊόντος GIMMS (8 km) είναι περιοριστική όσον αφορά τις περιοχές που είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν σε μια τέτοιου είδους στατιστική ανάλυση. Είναι δυνατή η παρακολούθηση μόνο μεγάλης έκτασης πυκνών και ομοιογενών οικοσυστημάτων και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μόνο το δάσος δρυών (*Quercus sp.*) πληροί τις προϋποθέσεις αυτές.

Όπως αποκάλυψε η σύγκριση των χρονοσειρών NDVI από τους δορυφόρους SPOT και AVHRR, τα δεδομένα GIMMS είναι κατάλληλα για την μελέτη των ιδιοτήτων και μεταβολών του δάσους δρυών στο χρόνο. Η πλήρης χρονοσειρά των δεδομένων GIMMS που καλύπτει 25 πλήρη και συνεχή έτη (1982 – 2006) παρουσιάζεται στο Σχήμα 46. Είναι φανερό η επανάληψη του προτύπου ετήσιας ανάπτυξης και πτώσης των φυλλοβόλων σε όλα τα έτη του αρχείου. Είναι επίσης εμφανείς οι διαφορές κάποιων παραμέτρων από έτος σε έτος, όπως οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές του NDVI. Από το αρχείο εξήχθησαν παράμετροι που αφορούν την συμπεριφορά της αναπτυξιακής περιόδου στο χρόνο όπως οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης καθώς και το ολοκλήρωμα της καμπύλης NDVI για την αναπτυξιακή περίοδο κάθε έτους. Υπολογίσθηκε επίσης η μέγιστη τιμή NDVI της αναπτυξιακής περιόδου κάθε έτους και η ημερομηνία που αυτή επετεύχθη. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων αυτών και το μετεωρολογικό αρχείο για την πόλη των Ιωαννίνων εξετάστηκαν οι επιδράσεις των κλιματικών παραμέτρων στην συμπεριφορά της αναπτυξιακής περιόδου του οικοσυστήματος *Quercus sp.* Μελετήθηκαν οι



Σχήμα 47. Διαγράμματα των συντελεστών συσχέτισης (R) και των επιπέδων σημαντικότητας (p) των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων της αναπτυξιακής περιόδου που υπολογίστηκαν από το αρχείο AVHRR για το οικοσύστημα *Quercus sp.* και των παραμέτρων του μετεωρολογικού αρχείου για την πόλη των Ιωαννίνων. Παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από τον Ιανουάριο του προηγούμενου έτους έως τον Νοέμβριο του τρέχοντος με (α,β) το ολοκλήρωμα NDVI της αναπτυξιακής περιόδου, (γ, δ) την ημέρα έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου, (ε,στ) την ημέρα λήξης της αναπτυξιακής περιόδου.

συσχετίσεις μεταξύ των μηνιαίων μετρήσεων θερμοκρασίας και βροχόπτωσης και των παραμέτρων που εξήχθησαν από την χρονοσειρά NDVI του AVHRR. Ελέγχθηκαν οι επιδράσεις που μπορεί να έχουν οι κλιματικοί παράγοντες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, καθώς και αυτοί που επικρατούσαν έως και ένα χρόνο πριν την έκπτυξη των φύλλων (Σχήμα 47).

Στο ολοκλήρωμα του NDVI καθώς και στην ημερομηνία έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι κλιματικοί παράγοντες που επικρατούσαν στο τέλος της προηγούμενης αναπτυξιακής περιόδου (Σχήμα 47α-γ). Οι θερμοκρασίες του Αυγούστου και του Οκτωβρίου του προηγούμενου έτους επιδρούν αρνητικά στο ολοκλήρωμα του NDVI (Σχήμα 47α), ενώ η βροχόπτωση του προηγούμενου Αυγούστου έχει θετική επίδραση σε αυτό (Σχήμα 47β). Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες του προηγούμενου Αυγούστου επιδρούν στην αναπτυξιακή περίοδο μετατοπίζοντας αργότερα την ημερομηνία έναρξής της (Σχήμα 47γ). Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι το οικοσύστημα *Quercus* sp. είναι ευαίσθητο κατά την διάρκεια των μηνών όπου γίνεται αποθήκευση θρεπτικών ουσιών για την ανάπτυξη της επόμενης περιόδου και ειδικότερα τον Αύγουστο όπου συνήθως εμφανίζονται και οι πιο έντονες συνθήκες καταπόνησης. Η βροχόπτωση του μήνα αυτού είναι ουσιώδης για την ανάπτυξη της επόμενης περιόδου, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες τον ίδιο μήνα, αλλά και στη διάρκεια του φθινοπώρου, δεν ευνοούν την ανάπτυξη της επόμενης περιόδου.

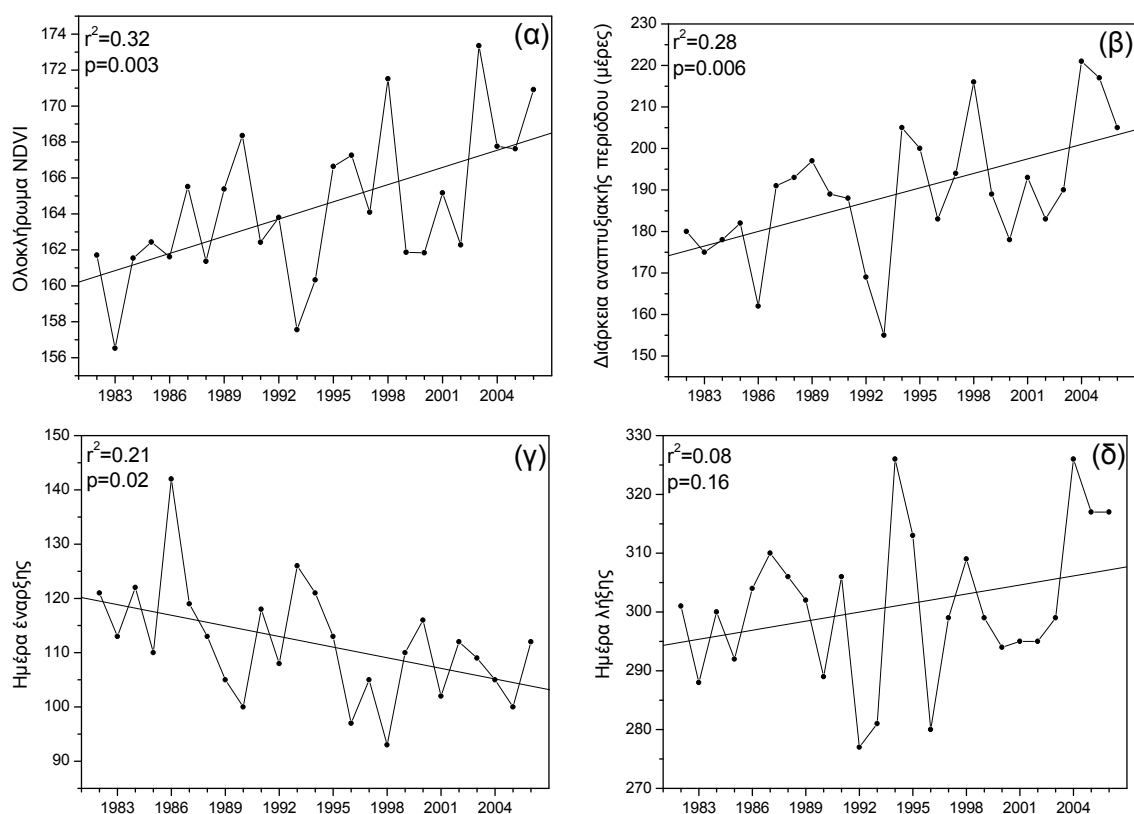
Όσον αφορά την ημερομηνία λήξης της αναπτυξιακής περιόδου στο οικοσύστημα *Quercus* sp., οι κλιματικοί παράγοντες του προηγούμενου έτους δεν εμφανίζουν κάποια σημαντική επίδραση σε αυτή (Σχήμα 47ε,στ). Παρουσιάζεται μία ασθενής αρνητική συσχέτιση με την θερμοκρασία του τελευταίου μήνα της αναπτυξιακής περιόδου, αλλά πιο σημαντική μοιάζει η επίδραση της βροχόπτωσης των χειμερινών μηνών (Ιανουάριος-Φεβρουάριος). Στο Σχήμα 47στ φαίνονται οι θετικές συσχετίσεις των βροχοπτώσεων των δύο χειμερινών μηνών στην ημερομηνία λήξης, εμφανίζοντας στατιστική σημαντικότητα στο επίπεδο 0.05. Όταν η ημέρα λήξης συσχετιστεί με την συνολική βροχόπτωση και των δύο μηνών (Ιανουάριος-Φεβρουάριος) μαζί, τότε η συσχέτιση γίνεται πολύ ισχυρότερη ($p < 0.01$). Συμπεραίνεται λοιπόν ότι όταν προηγούνται βροχεροί χειμώνες, παρατείνεται η λήξη της αναπτυξιακής περιόδου. Τέλος, η μέγιστη τιμή NDVI και η ημερομηνία εμφάνισης της κάθε έτος δεν εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις με τους κλιματικούς παράγοντες.

Η συμπεριφορά του οικοσυστήματος Quercus sp. στον χρόνο

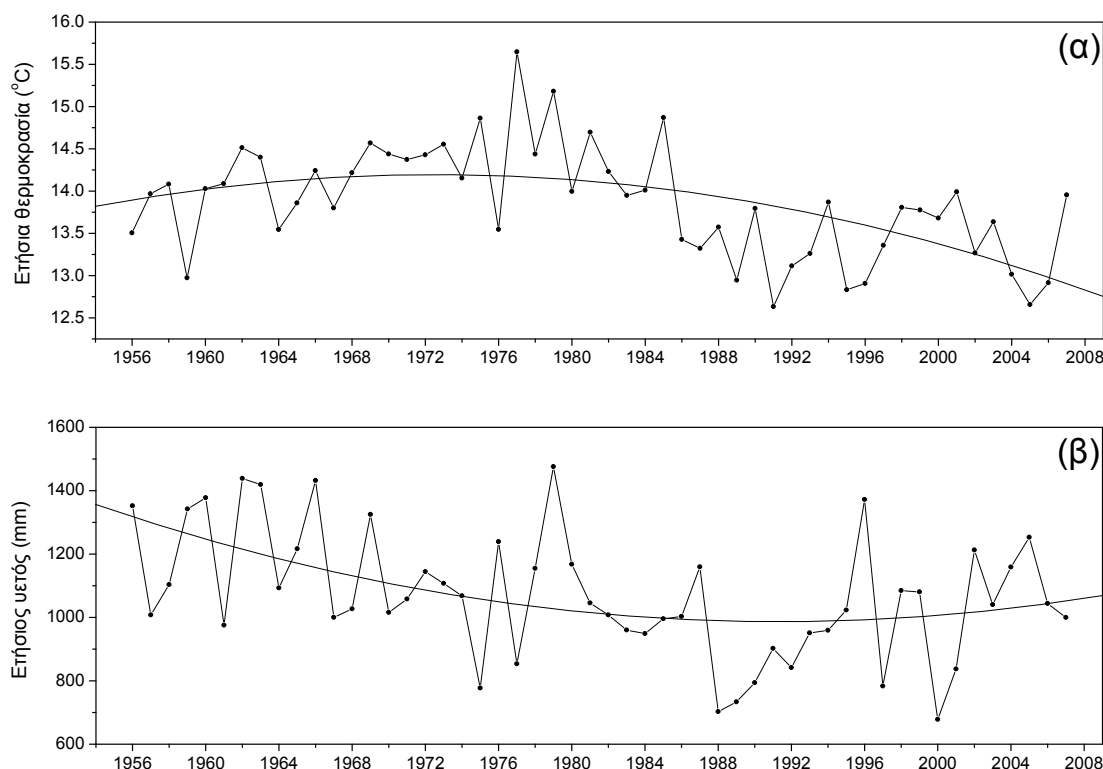
Οι διακυμάνσεις των παραμέτρων της αναπτυξιακής περιόδου που εξήχθησαν από την χρονοσειρά GIMMS για το οικοσύστημα δρυών στο χρόνο εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον μιας και μπορούν να διακριθούν κάποιες στατιστικά σημαντικές τάσεις μεταβολής τους (Σχήμα 48). Το ολοκλήρωμα του NDVI καθώς και η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου εμφανίζουν τάσεις αύξησης κατά την διάρκεια των 25 ετών (Σχήμα 48α,β), ενώ η ημερομηνία έναρξης φαίνεται να μετατοπίζεται νωρίτερα (Σχήμα 48γ). Η ημερομηνία λήξης δεν έχει κάποιο σαφές πρότυπο μεταβολής στο χρόνο αν και η γραμμή τάσης δείχνει να μετατοπίζεται αργότερα (Σχήμα 48δ). Άλλες παράμετροι όπως το μέγιστο NDVI κάθε έτους καθώς και η ημερομηνία που εμφανίστηκε αυτό δεν δείχνουν κάποιο πρότυπο μεταβολής στο χρόνο. Η βασική παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου όσο και το ολοκλήρωμα της καμπύλης NDVI για το διάστημα αυτό είναι η ημερομηνία έναρξής της. Η τάση μεταβολής της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου φαίνεται να μετατοπίζεται από τα τέλη Απριλίου προς τα μέσα Απριλίου (Σχήμα 48γ). Να σημειωθεί εδώ ότι η ημερομηνία αυτή προφανώς και δεν πρέπει να ταυτίζεται με την ακριβή ημερομηνία έκπτυξης φύλλων αλλά είναι μια σχετική ένδειξη της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου. Αν και οι διακυμάνσεις των παραμέτρων αυτών από έτος σε έτος μπορεί να οφείλονται στις κυμαινόμενες κλιματολογικές παραμέτρους (Σχήμα 47), σε φυσικές καταστροφές, σε ανθρώπινες επεμβάσεις ή σε προβληματικές εκτιμήσεις του NDVI, οι τάσεις που διαγράφονται κατά τη διάρκεια των 25

διαθέσιμων ετών είναι πιθανό να είναι αποτέλεσμα κάποιων μεταβολών μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας.

Η αρχική υπόθεση είναι ότι οι μακροχρόνιες σταδιακές μεταβολές στην συμπεριφορά της αναπτυξιακής περιόδου του οικοσυστήματος *Quercus* sp. οφείλονται στις κλιματικές αλλαγές. Για την εξέταση της υπόθεσης αυτής μελετήθηκε το διαθέσιμο αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων της πόλης των Ιωαννίνων. Από το αρχείο αυτό εξετάσθηκε η συμπεριφορά της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και αναζητήθηκαν πιθανές μακρόχρονες τάσεις μεταβολής τους. Επίσης, εξετάσθηκαν αναλυτικά οι μετεωρολογικές παράμετροι του διαστήματος Αυγούστου – Οκτωβρίου που όπως φαίνεται είναι κρίσιμο για την ανάπτυξη της επόμενης περιόδου κάθε έτους (Σχήμα 47). Ωστόσο, από την επεξεργασία του αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων δεν παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές τάσεις στις μεταβολές θερμοκρασίας ή βροχόπτωσης κατά την περίοδο των τριών δεκαετιών που συμπίπτει με το δορυφορικό αρχείο. Όπως φαίνεται στα ετήσια δεδομένα (Σχήμα 49), η ετήσια θερμοκρασία παρουσίαζε μια σχετική τάση αύξησης από την δεκαετία του '50 αλλά ανακόπηκε στα τέλη της δεκαετίας του '70. Η βροχόπτωση παρόλο που δεν εμφανίζει στατιστικά σημαντικές τάσεις φαίνεται ότι έχει μειωθεί σε σχέση με τις δεκαετίες '50 και '60. Στα τέλη του '80 παρατηρούνται ξηρά έτη, η συχνότητα των οποίων είναι μεγαλύτερη τις δεκαετίες '80, '90 και 2000. Ιστορικό χαμηλό στην ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζεται το έτος 2000 και ακολουθείται από το έτος 1988. Τα δεδομένα αυτά βέβαια αφορούν την περιοχή των Ιωαννίνων και δεν είναι απαραίτητο ότι αντιπροσωπεύουν απόλυτα την περιοχή του κεντρικού Ζαγορίου που μελετάται από το δορυφορικό αρχείο. Το



Σχήμα 48. Ετήσιες διακυμάνσεις των παραμέτρων της αναπτυξιακής περιόδου του οικοσυστήματος *Quercus* sp. που υπολογίσθηκαν από το αρχείο NDVI του AVHRR: (α) Ολοκλήρωση της καμπύλης NDVI για την διάρκεια κάθε αναπτυξιακής περιόδου, (β) διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, (γ) ημερομηνία έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου, (δ) ημερομηνία λήξης της αναπτυξιακής περιόδου.



Σχήμα 49. Ετήσιες διακυμάνσεις (α) της ετήσιας θερμοκρασίας και (β) της ετήσιας βροχόπτωσης για την πόλη των Ιωαννίνων (Lat 39° 40.2', Lon 20° 51.4', υψόμετρο 470 m). Τα δεδομένα προέρχονται από το αρχείο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY).

διαφορετικό υψόμετρο και η τοπογραφία καθώς και η παρεμβολή του όρους Μιτσικελίου ανάμεσα στις δύο περιοχές μπορεί να αλλάζουν σε κάποιο βαθμό το κλίμα του Ζαγορίου, όπου οι τάσεις και ειδικότερα τα φαινόμενα αυξανόμενης ξηρασίας μπορεί να είναι εντονότερα.

Οι τάσεις λοιπόν που αναγνωρίστηκαν στην συμπεριφορά της αναπτυξιακής περιόδου του οικοσυστήματος θα μπορούσαν να μην συνδέονται απευθείας με τις επιδράσεις των κλιματικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, αλλά να συνδέονται έμμεσα με τις κλιματικές αλλαγές λόγω των διεργασιών που αυτές δρομολογούν, όπως η αλλαγή της σύστασης ειδών της μελετώμενης περιοχής (Fyllas & Troumbis 2009, Penuelas & Boada 2003, Vannini et al. 1996). Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από τις παρατηρήσεις μας στο πεδίο κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Τα δύο κυρίαρχα είδη του δάσους δρυών στην περιοχή μελέτης είναι η *Quercus cerris* και η *Quercus frainetto*. Παρατηρήθηκε ότι η *Q. cerris* καθυστερούσε περίπου δύο εβδομάδες την έκπτυξη φύλλων σε σχέση με την *Q. frainetto*, ενώ παράλληλα ήταν αισθητή η παρουσία πληθώρας νεαρών ατόμων *Q. frainetto* στη περιοχή που εκτελέστηκαν οι μετρήσεις πεδίου. Τα παραπάνω οδηγούν στην υπόθεση της σταδιακής επέκτασης και επικράτησης του είδους *Quercus frainetto* στη μελετώμενη περιοχή του δάσους δρυών, αφού η νωρίτερη έκπτυξη των φύλλων της συμφωνεί με την παρατηρούμενη μετατόπιση της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου. Λόγω όμως της μεγάλης έκτασης που καλύπτει το εικονοστοιχείο GIMMS δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο της συνεισφοράς και άλλων ειδών και τύπων βλάστησης στο παρατηρούμενο φαινόμενο. Άλλα είδη δρυός που συναντώνται στην ευρύτερη ζώνη βλάστησης είναι η μακεδονική δρυς (*Quercus trojana*), η χνοώδης δρυς (*Quercus pubescens*), το πουρνάρι (*Quercus coccifera*) καθώς και άλλα είδη δέντρων, όπως η οστρυνιά (*Ostrya carpinifolia*), ο γάβρος (*Carpinus orientalis*, *Carpinus*

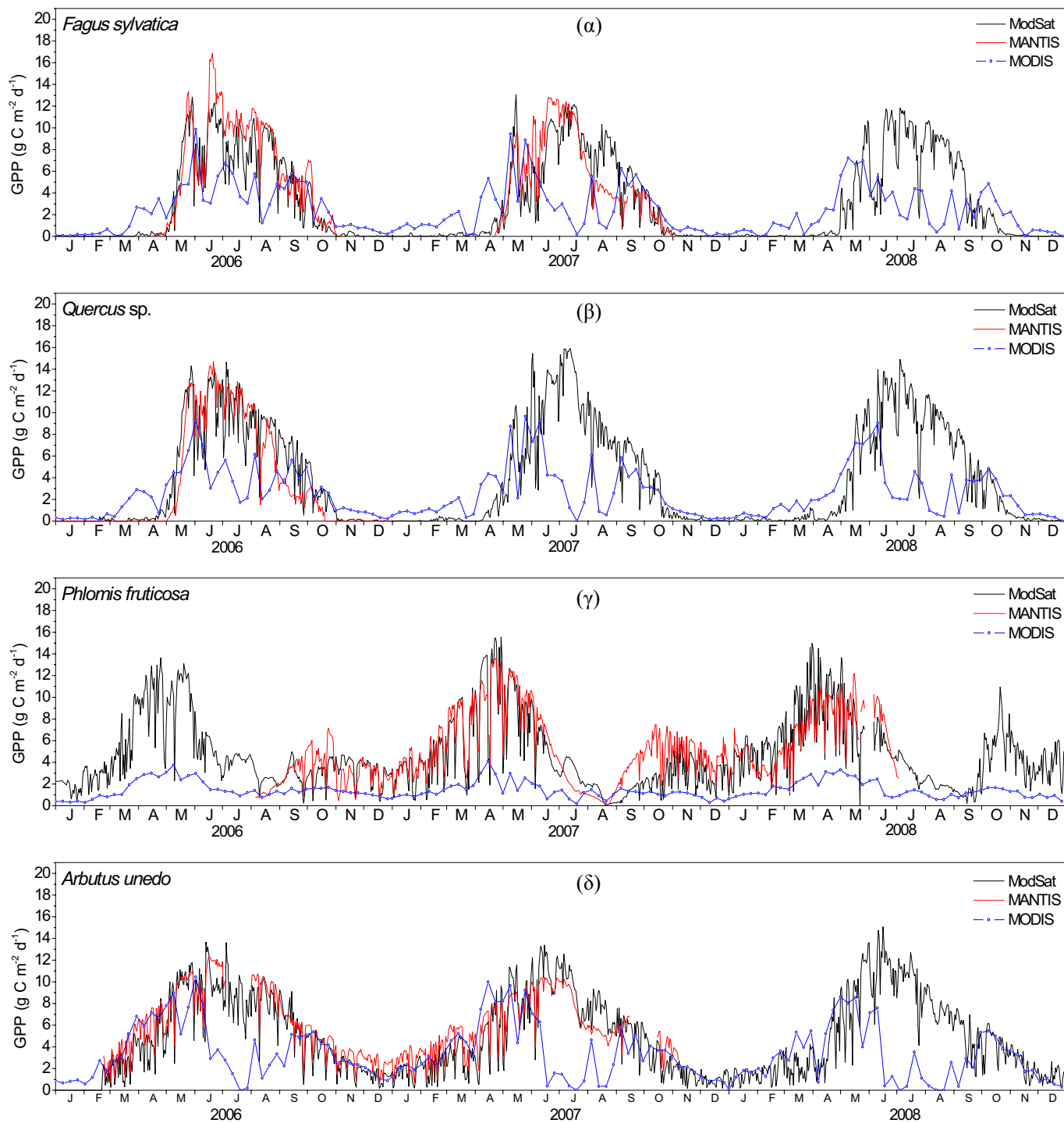
betulus), η κρανιά (*Cornus mass*) και ο φράξος (*Fraxinus ornus*). Παρόλο που οι ενδείξεις που λαμβάνονται υπ' όψιν ενισχύουν την υπόθεση της σταδιακής αλλαγής στην σύσταση των ειδών της μελετώμενης περιοχής, δεν μπορεί να αποκλειστεί και το ενδεχόμενο της σταδιακής μετατροπής του προτύπου έκπτυξης φύλλων από τα κυρίαρχα είδη λόγω κάποιων επιδράσεων των κλιματικών αλλαγών που τα διαθέσιμα δεδομένα δεν ήταν ικανά να εντοπίσουν.

Εκτίμηση της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) μέσω του ανεπτυγμένου δορυφορικού μοντέλου ModSat και του προϊόντος MODIS (MOD17A2)

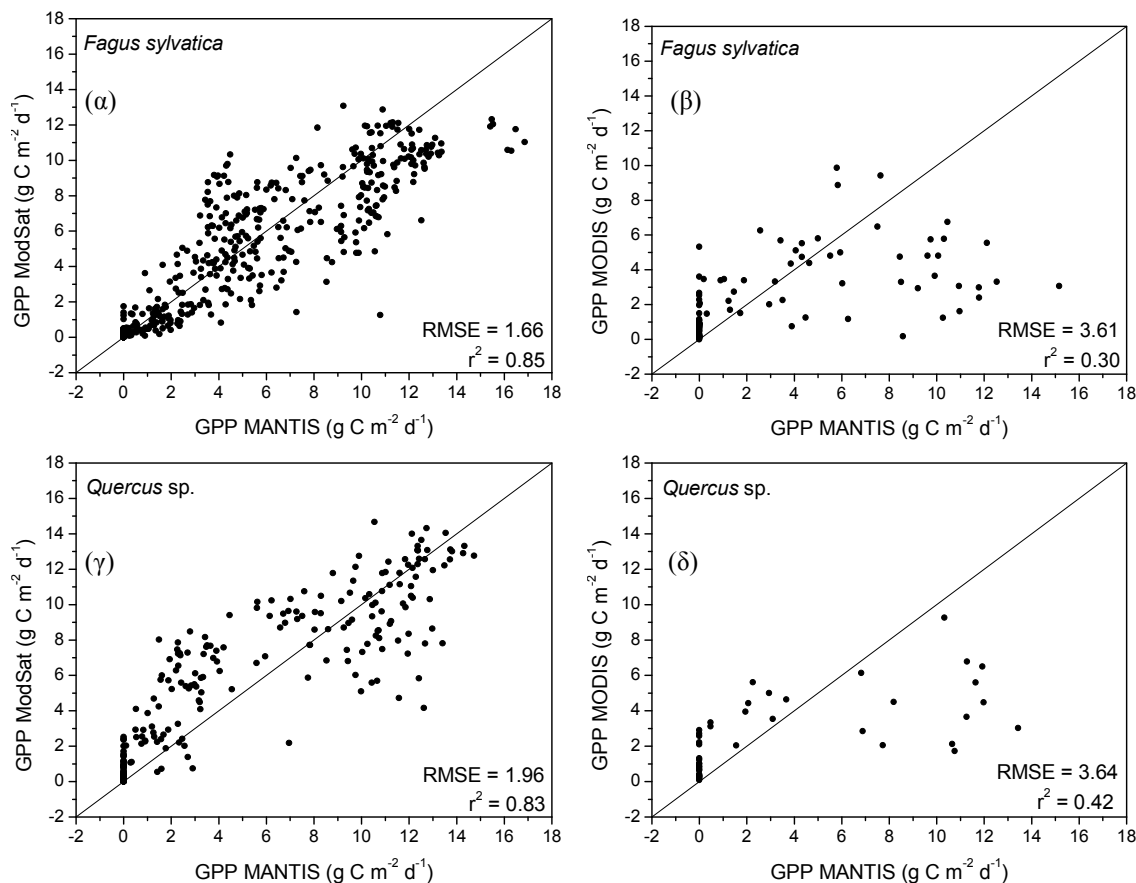
Το μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου MANTIS (Kyparissis et al. 2007, Markos & Kyparissis 2011), το οποίο βασίζεται σε επίγειες μετρήσεις επιπέδου φύλλου και LAI, χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την αξιολόγηση του μοντέλου ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε ModSat και όπως περιγράφηκε στις μεθόδους (Σχήμα 29), εκτιμά την GPP μέσω των πολυφασματικών εικόνων MODIS (MOD09A1) και επίγειων μετεωρολογικών καταγραφών. Είναι λοιπόν ένα μοντέλο που με ταυτοποίηση των οικοσυστημάτων μέσω χαρτογράφησης και κατάλληλης βαθμονόμησης μέσω των μέγιστων τιμών αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ_0) για κάθε οικοσύστημα, μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρεία κλίμακα για την εκτίμηση και την παρακολούθηση των μεταβολών της παραγωγικότητας. Για την εξέταση της ευρύτητας εφαρμογής του μοντέλου ModSat, εισήχθη ένα επιπλέον οικοσύστημα που δεν έχει μελετηθεί μέσω επίγειων μετρήσεων και συνεπώς δεν χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του μοντέλου, αλλά είναι διαθέσιμες οι εκτιμήσεις του MANTIS για αυτό. Η νέα περιοχή μελέτης αφορά ένα αείφυλλο οικοσύστημα κουμαριάς (*Arbutus unedo*) κοντά στην Ψήνα Ιωαννίνων (Lat 39° 34.43', Lon 20° 42.42') και σε υψόμετρο 612 m. Τα υπόλοιπα οικοσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη είναι τα δύο φυλλοβόλα δασικά (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.) και το θαμνώδες ημιφυλλοβόλο *Phlomis fruticosa*. Για τα τέσσερα οικοσυστήματα που έτρεξε το μοντέλο ModSat, χρησιμοποιήθηκαν σταθερές τιμές ϵ_0 που εκτιμήθηκαν από το μοντέλο MANTIS, στα 0.35 g C mol⁻¹ PAR για τα δύο φυλλοβόλα δασικά είδη (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.), στα 0.4 g C mol⁻¹ PAR για το ημιφυλλοβόλο *Phlomis fruticosa* και στα 0.3 g C mol⁻¹ PAR για το αείφυλλο *Arbutus unedo*.

Οι ημερήσιες εκτιμήσεις του μοντέλου MANTIS είναι διαθέσιμες για τα έτη 2006 – 2007 στο δάσος οξιάς και για το έτος 2006 στο δάσος δρυών. Για την ασφάλεια υπάρχουν εκτιμήσεις από το καλοκαίρι του 2006 έως το καλοκαίρι του 2008, ενώ για την κουμαριά για τα έτη 2006 – 2007. Το μοντέλο ModSat μπορεί να τρέξει οποιοδήποτε χρονικό διάστημα είναι διαθέσιμες μετεωρολογικές καταγραφές για κάθε οικοσύστημα. Χρησιμοποιώντας τα ημερήσια δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών που στήθηκαν πλησίον των οικοσυστημάτων, εκτιμήθηκε η πρωτογενής παραγωγικότητα όλων των οικοσυστημάτων για το διάστημα 2006 – 2008 μέσω του μοντέλου ModSat. Για το ίδιο διάστημα και τις ίδιες περιοχές εξήχθησαν οι εκτιμήσεις GPP του μοντέλου του MODIS (MOD17A2). Η διαφορά των δεδομένων MODIS είναι ότι προσφέρονται σε δήμερη κλίμακα και αφορούν μεγαλύτερη περιοχή (1 km²) σε σχέση με τις εκτιμήσεις του ModSat (0.25 km²). Τα τρία προϊόντα GPP προβάλλονται στο Σχήμα 50 για κάθε οικοσύστημα. Τα δύο δορυφορικά προϊόντα (ModSat και MODIS) αξιολογούνται με βάση τις επίγειες εκτιμήσεις του MANTIS.

Στις διακυμάνσεις του MANTIS GPP μπορεί να διακριθεί το ετήσιο αναπτυξιακό πρότυπο των φυλλοβόλων (Σχήμα 50α,β), με την απότομη αύξηση των τιμών το Μάιο και την σταδιακή πτώση το φθινόπωρο έως τις μηδενικές τιμές κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Στο ημιφυλλοβόλο *Phlomis fruticosa* παρατηρείται διαφορετικό πρότυπο ετήσιας διακύμανσης (Σχήμα 50γ), με χαμηλές τιμές GPP κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ελαφριά αύξηση το φθινόπωρο λόγω της φθινοπωρινής αναζωογόνησης από το καλοκαιρινό στρες, ενώ μεγάλη αύξηση τιμών παρουσιάζεται την άνοιξη όπου όλες οι συνθήκες είναι ευνοϊκές. Το αείφυλλο *Arbutus unedo* παρουσιάζει ομαλότερες μεταβολές στις ετήσιες διακυμάνσεις του GPP από τα υπόλοιπα οικοσυστήματα (Σχήμα 50δ), με αργή και σταθερή αύξηση τιμών από τις αρχές κάθε έτους, μέγιστο στα μέσα καλοκαιριού και μετά σταδιακή πτώση μέχρι τα τέλη κάθε έτους. Λόγω του



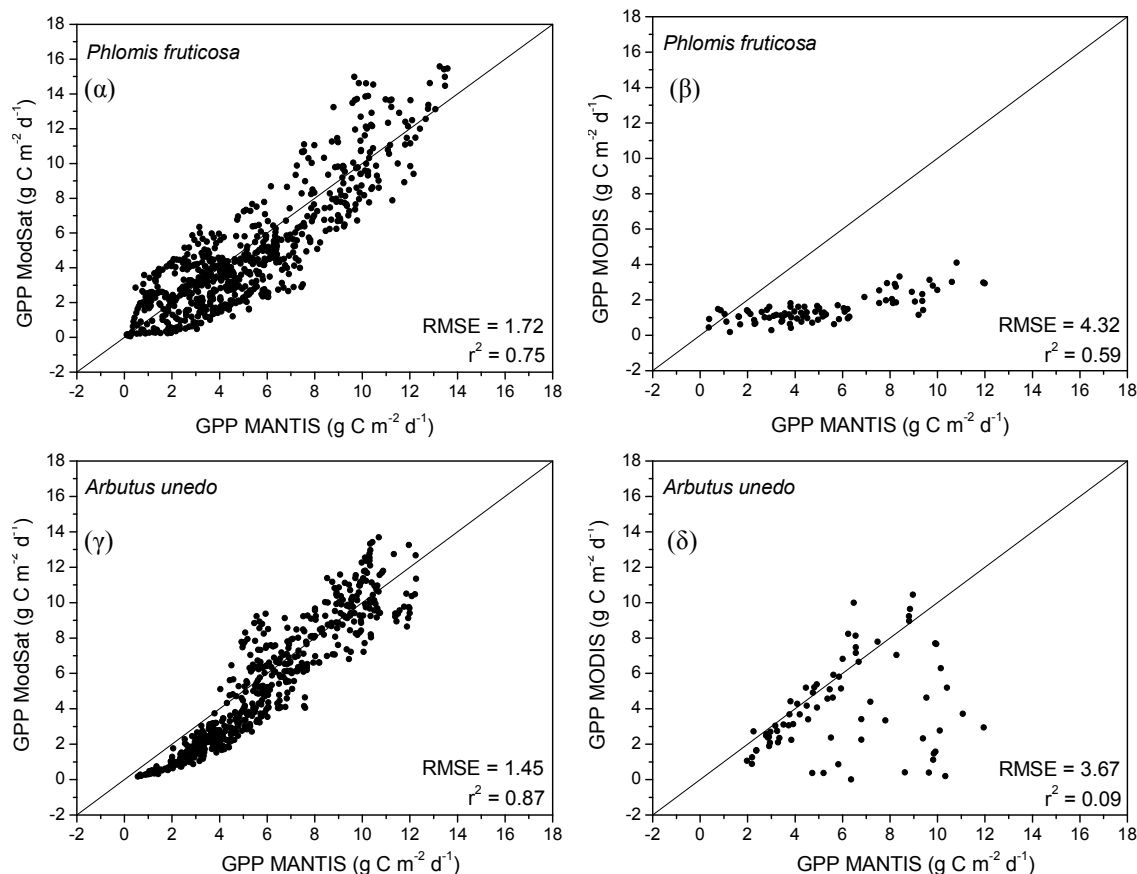
Σχήμα 50. Εποχιακή διακύμανση των εκτιμήσεων ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) από το μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου (MANTIS), το ανεπτυγμένο δορυφορικό μοντέλο της παρούσας διατριβής (ModSat) και το προϊόν του MODIS μέσω του αλγόριθμου MOD17 για τα οικοσυστήματα (α) *Fagus sylvatica*, (β) *Quercus sp.*, (γ) *Phlomis fruticosa* και (δ) *Arbutus unedo*. Οι εκτιμήσεις των μοντέλων MANTIS και ModSat παρουσιάζονται σε ημερήσιο βήμα, ενώ του MODIS σε οκταήμερο.



Σχήμα 51. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των εκτιμήσεων ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) από το μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου (MANTIS) και (α,γ) το δορυφορικό μοντέλο της παρούσας διατριβής (ModSat), (β,δ) το προϊόν του MODIS, για τα φυλλοβόλα οικοσυστήματα (α,β) *Fagus sylvatica* και (γ,δ) *Quercus sp.*

ημερήσιου βήματος που διαθέτουν τα μοντέλα MANTIS και ModSat, διακρίνονται με μεγάλη λεπτομέρεια οι απότομες ημερήσιες διακυμάνσεις του GPP. Αυτές οφείλονται στους εξωτερικούς κλιματικούς παράγοντες και κυρίως στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που παρουσιάζει τις εντονότερες μεταβολές λόγω της κυμαινόμενης νεφοκάλυψης. Η εξάρτηση της ημερήσιας GPP από την ακτινοβολία είναι πολύ μεγάλη καθώς ορίζει σε μεγάλο βαθμό τα επίπεδα της φωτοσύνθεσης.

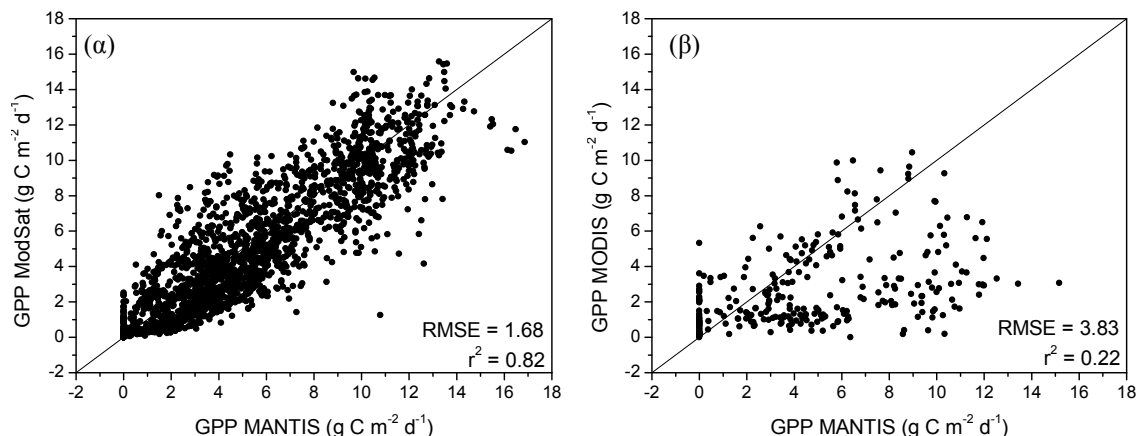
Οι εκτιμήσεις του ModSat ακολουθούν πιστά τα ετήσια πρότυπα διακύμανσης κάθε οικοσυστήματος, καθώς οι ημερήσιες τιμές GPP συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με αυτές του MANTIS. Ειδικότερα, στα φυλλοβόλα είδη (Σχήμα 50α,β) οι εκτιμήσεις του ModSat ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια τις ημερομηνίες έκπτυξης και πτώσης των φύλλων καθώς επίσης και τις ημερήσιες διακυμάνσεις των τιμών GPP. Υπάρχουν βεβαίως και ασυμφωνίες μεταξύ των εκτιμήσεων των δύο μοντέλων (MANTIS και ModSat) που εκφράζονται κυρίως μέσω της υποεκτίμησης των μέγιστων τιμών στην οξιά και της υπερεκτίμησης των τιμών τους μήνες Αύγουστο – Σεπτέμβριο από το ModSat. Το τελευταίο είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται στην ελλιπή αναγνώριση του υδατικού στρες από τον αλγόριθμο του ModSat, μιας και όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ο δείκτης NDWI που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό παρουσιάζει πολύ εντονότερες διακυμάνσεις λόγω των δομικών μεταβολών του θόλου παρά



Σχήμα 52. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των εκτιμήσεων ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) από το μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου (MANTIS) και (α,γ) το δορυφορικό μοντέλο της παρούσας διατριβής (ModSat), (β,δ) το προϊόν του MODIS, για τα οικοσυστήματα (α,β) *Phlomis fruticosa* και (γ,δ) *Arbutus unedo*.

της υδατικής του κατάστασης (Σχήμα 40). Η σύγκριση των ημερήσιων εκτιμήσεων από τα δύο μοντέλα για τα φυλλοβόλα εμφανίζει καλή συμφωνία γύρω από την γραμμή 1:1 (Σχήμα 51α,γ) με RMSE 1.66 και 1.96 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για *Fagus sylvatica* και *Quercus* sp. αντίστοιχα.

Αντιθέτως, οι δήμερες εκτιμήσεις του MODIS αποκλίνουν από το πρότυπο ετήσιας διακύμανσης καθώς και από τα επίπεδα τιμών GPP που παρουσιάζουν τα φυλλοβόλα οικοσυστήματα (Σχήμα 50α,β). Οι εκτιμήσεις του MODIS την άνοιξη συνηθίζουν να προηγούνται έναν ή δύο μήνες στην αύξηση των τιμών GPP από την πραγματική έκπτυξη των φύλλων. Επίσης, σε μερικές περιπτώσεις υπάρχουν αυξημένες τιμές GPP ακόμα και τον χειμώνα. Κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου τα επίπεδα GPP υποεκτιμώνται από το μοντέλο του MODIS και στα δύο φυλλοβόλα είδη, ενώ εντοπίζονται πολύ έντονες πτώσεις τιμών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που φτάνουν ακόμα και κοντά σε μηδενικές τιμές. Η σταδιακή πτώση των τιμών το φθινόπωρο ακολουθείται ικανοποιητικά σε γενικά πλαίσια από το μοντέλο του MODIS. Για την σύγκριση των εκτιμήσεων του MODIS με του MANTIS, οι ημερήσιες εκτιμήσεις του τελευταίου αναπροσαρμόστηκαν στα δήμερα του MODIS. Στα διαγράμματα σύγκρισης (Σχήμα 51β,δ) είναι επίσης εμφανής η υποεκτίμηση των τιμών GPP από το μοντέλο του MODIS, αποδίδοντας RMSE 3.61 και 3.64 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για *Fagus sylvatica* και *Quercus* sp. αντίστοιχα, καθώς και πολύ χαμηλούς συντελεστές προσδιορισμού (r^2).



Σχήμα 53. Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των εκτιμήσεων ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) από το μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου (MANTIS) και (α) το δορυφορικό μοντέλο της παρούσας διατρίβης (ModSat), (β) το προϊόν του MODIS, για τα τέσσερα οικοσυστήματα συνολικά (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp., *Phlomis fruticosa* και *Arbutus unedo*).

Όσον αφορά το ημιφυλλοβόλο και το αείφυλλο οικοσύστημα (Σχήμα 50γ,δ), οι εκτιμήσεις του ModSat συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με αυτές του MANTIS. Στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* (Σχήμα 50γ) εμφανίζεται μικρή υποεκτίμηση των τιμών GPP κατά την φθινοπωρινή αναζωογόνηση και περιπτώσεις υπερεκτίμησης των μέγιστων τιμών την άνοιξη από το ModSat. Στο *Arbutus unedo* (Σχήμα 50δ) εμφανίζεται ανάλογο πρότυπο απόκλισης των εκτιμήσεων των δύο μοντέλων, με υποεκτίμηση των τιμών το χειμώνα και κάποιες υπερεκτιμήσεις των μέγιστων τιμών το καλοκαίρι από το ModSat. Όπως φαίνεται όμως και στο Σχήμα 52(α,γ), οι εκτιμήσεις των δύο μοντέλων δείχνουν πολύ καλή συμεταβολή γύρω από την γραμμή 1:1, με έμφαση να δίνεται στην σταθερή μικρή υποεκτίμηση των χαμηλών τιμών GPP από το ModSat στο *Arbutus unedo* (Σχήμα 52γ). Παρόλα αυτά οι συντελεστές RMSE για τα δύο μοντέλα, όπως και για τα δύο φυλλοβόλα, δεν ξεπερνούν τις δύο μονάδες αποδίδοντας 1.72 και 1.45 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για *Phlomis fruticosa* και *Arbutus unedo* αντίστοιχα. Το ίδιο συμβαίνει και όταν οι συνολικές εκτιμήσεις των δύο μοντέλων (MANTIS, ModSat) και για τα τέσσερα οικοσυστήματα συγκριθούν (Σχήμα 53α). Οι εκτιμήσεις κυμαίνονται γύρω από την γραμμή 1:1 με RMSE 1.68 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ και r^2 0.82, μαρτυρώντας τις πολύ καλές αποδόσεις του αναπτυγμένου δορυφορικού μοντέλου στην εκτίμηση των επίγειων τιμών GPP ανεξαρτήτως του τύπου οικοσυστήματος.

Το ίδιο δεν συμβαίνει δυστυχώς και για το έτοιμο προϊόν του MODIS που, όπως και για τα δύο φυλλοβόλα δάση, οι εκτιμήσεις τόσο για το ημιφυλλοβόλο όσο και για το αείφυλλο οικοσύστημα αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από τις επίγειες εκτιμήσεις του MANTIS (Σχήμα 50γ,δ). Στην περίπτωση του *Phlomis fruticosa* (Σχήμα 50γ) ο αλγόριθμος MODIS παρουσιάζει μια σταθερή υποεκτίμηση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με τιμές GPP περίπου σταθερές στο 1 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ που παρουσιάζουν ελαφριά αύξηση την άνοιξη. Το αείφυλλο *Arbutus unedo* είναι η μόνη περίπτωση που οι εκτιμήσεις του MODIS συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό τόσο με το επίπεδο τιμών όσο και με τις διακυμάνσεις του επίγειου μοντέλου (Σχήμα 50δ). Ωστόσο, παρατηρείται και σε αυτή τη περίπτωση το φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στα φυλλοβόλα δάση, οι έντονες δηλαδή πτώσεις των τιμών GPP κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που φτάνουν έως και σε μηδενικές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έντονη υποεκτίμηση των τιμών GPP το καλοκαίρι από το MODIS. Από τα διαγράμματα σύγκρισης (Σχήμα 52β,δ) φαίνεται επίσης η απόκλιση και η έλλειψη συνδιακύμανσης των εκτιμήσεων των δύο μοντέλων (MANTIS, MODIS) με RMSE 4.32 και 3.67

$\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ για *Phlomis fruticosa* και *Arbutus unedo* αντίστοιχα. Αν και για την ασφάλκα υπάρχει η πιο έντονη και σταθερή υποεκτίμηση των τιμών GPP από το MODIS, την ίδια στιγμή εμφανίζεται και η ισχυρότερη συνδιακύμανση ($r^2 = 0.59$) των εκτιμήσεων του MODIS και του MANTIS. Αυτό συμβαίνει λόγω της απουσίας της επίδρασης του φαινομένου των καλοκαιρινών υποεκτιμήσεων του MODIS στο συγκεκριμένο οικοσύστημα. Η συνολική εικόνα αξιολόγησης του προϊόντος MODIS παρουσιάζεται στο Σχήμα 53β, όπου φαίνεται η γενική τάση υποεκτίμησης και έλλειψης συνδιακύμανσης των εκτιμήσεων GPP του MODIS αποδίδοντας RMSE 3.83 και r^2 0.22.

Συνοψίζοντας, εντοπίστηκαν τρία βασικά μειονεκτήματα στο προϊόν GPP του MODIS. Το πρώτο αφορά την αύξηση των τιμών GPP πριν την ημερομηνία έκπτυξης φύλλων στα φυλλοβόλα, το δεύτερο είναι η συνεχής υποεκτίμηση των τιμών GPP σε όλα τα οικοσυστήματα και το τρίτο και πιο σοβαρό είναι το φαινόμενο που παρατηρήθηκε στο δύο φυλλοβόλα και το αείφυλλο, των έντονων, απότομων και αδικαιολόγητων πτώσεων στις τιμές GPP κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Όσον αφορά το πρώτο μειονέκτημα, είναι κάπως παράδοξο να συμβαίνει μιας και όπως εξετάστηκε σε προηγούμενη ανάλυση, οι εκτιμήσεις του LAI από το MODIS ακολουθούν πολύ καλά το πρότυπο ανάπτυξης και πτώσης στα φυλλοβόλα (Σχήμα 42α,β). Παρόλα αυτά υπάρχει μια μικρή απόκλιση που μοιάζει ανεπαίσθητη στην εκτίμηση του LAI, αλλά μπορεί να παίζει μεγάλο ρόλο στο FAPAR και συνεπώς και στην εκτίμηση της GPP. Παρατηρείται λοιπόν στο Σχήμα 42(α,β) ότι υπάρχουν μικρές αυξήσεις στις τιμές του LAI ήδη έναν ή δύο μήνες πριν από την πραγματική έκπτυξη φύλλων. Αυτή η μικρή αύξηση σε συνδυασμό με τις ευνοϊκές συνθήκες της άνοιξης μπορεί λοιπόν να έχουν σαν αποτέλεσμα τις έντονες αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν στις εκτιμήσεις της GPP. Αν και ανάλογες μικρές αποκλίσεις στις εκτιμήσεις του LAI - και συνεπώς και του FAPAR - μπορεί να συμβαίνουν επίσης στον αλγόριθμο του ModSat, η χρήση δύο αναπτυξιακών ρυθμιστικών συντελεστών (Pscalar, Escalar) στο μοντέλο αυτό εξασφαλίζει την μεγάλη ακρίβεια που παρουσίασε στην αναγνώριση της ημερομηνίας έκπτυξης φύλλων στα δύο φυλλοβόλα δάση.

Το δεύτερο φαινόμενο είναι σίγουρα πολυδιάστατο. Μία αιτία που μπορεί να οδηγήσει σε συνεχείς υποτιμήσεις των τιμών GPP είναι η χωρική κλίμακα που αυτή εκτιμάται. Όπως παρατηρήθηκε και στην περίπτωση υποεκτίμησης του LAI στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* (Σχήμα 42γ) από το MODIS, η πυκνότητα και η ομοιογένεια των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των δορυφορικών δεδομένων παίζουν μεγάλο ρόλο στην σύγκριση με τις επίγειες τιμές ή εκτιμήσεις. Το μοντέλο φωτοσύνθεσης θόλου που χρησιμοποιείται ως αναφορά (MANTIS) παράγει εκτιμήσεις GPP καθαρού θόλου, σε αντιδιαστολή με τα δορυφορικά εικονοστοιχεία που, αναλόγως της χωρικής τους διακριτικότητας, μπορεί να περιέχουν γυμνό έδαφος, δρόμους κλπ με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της GPP σε σχέση με το MANTIS. Η περίπτωση της *Phlomis fruticosa* είναι χαρακτηριστική του φαινομένου αυτού, μιας και η χωρική διακριτικότητα του προϊόντος GPP από το MODIS είναι 1 km και η πυκνή και ομοιογενής περιοχή του είδους *Phlomis fruticosa* είναι περίπου 0.25 km^2 . Λόγω του γεγονότος αυτού όπως είδαμε υποεκτιμάται σε μεγάλο βαθμό ο LAI (Σχήμα 42γ) και συνεπώς και η GPP (Σχήμα 50γ). Ωστόσο, η σχετικά καλή συνδιακύμανση των τιμών GPP από τα μοντέλα MANTIS και MODIS στο οικοσύστημα αυτό (Σχήμα 52β) υποδεικνύει ότι μεγαλύτερη χωρική διακριτικότητα του προϊόντος MODIS θα μπορούσε να εκτιμά με μεγαλύτερη ακρίβεια τις καθαρές τιμές GPP του *Phlomis fruticosa*.

Όσον αφορά το τρίτο φαινόμενο, η ένταση και η συνεχής επανάληψη του σε όλα τα έτη και οικοσυστήματα αποκλείει την περίπτωση να οφείλεται σε εξωτερικά αίτια, όπως παρατεταμένη νεφοκάλυψη, προβληματικά μετεωρολογικά δεδομένα ή λάθος εκτιμήσεις του LAI/FAPAR. Το πρόβλημα είναι σίγουρα εσωτερικό, στην σχεδίαση δηλαδή του μοντέλου και ειδικότερα στους

ρυθμιστικούς συντελεστές που μειώνουν την ϵ_0 λόγω των περιοριστικών κλιματικών παραγόντων. Το μοντέλο του MODIS χρησιμοποιεί δύο τέτοιους συντελεστές (Σχήμα 23), έναν που μειώνει την ϵ_0 όταν χαμηλές θερμοκρασίες περιορίζουν τις λειτουργίες των φυτών (TMINscalar) και έναν δεύτερο συντελεστή που μειώνει την ϵ_0 όταν το έλλειμμα ατμοσφαιρικής υγρασίας (Vapor Pressure Deficit - VPD) είναι αρκετά υψηλό για την αναστολή της φωτοσύνθεσης (VPDscalar). Αφού το εν λόγω φαινόμενο εμφανίζεται το καλοκαίρι, είναι αδύνατον να οφείλεται στον πρώτο συντελεστή (TMINscalar), αφήνοντας ως μοναδικό υπαίτιο του προβλήματος τον συντελεστή απόσβεσης λόγω ελλείμματος ατμοσφαιρικής υγρασίας (VPDscalar).

ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

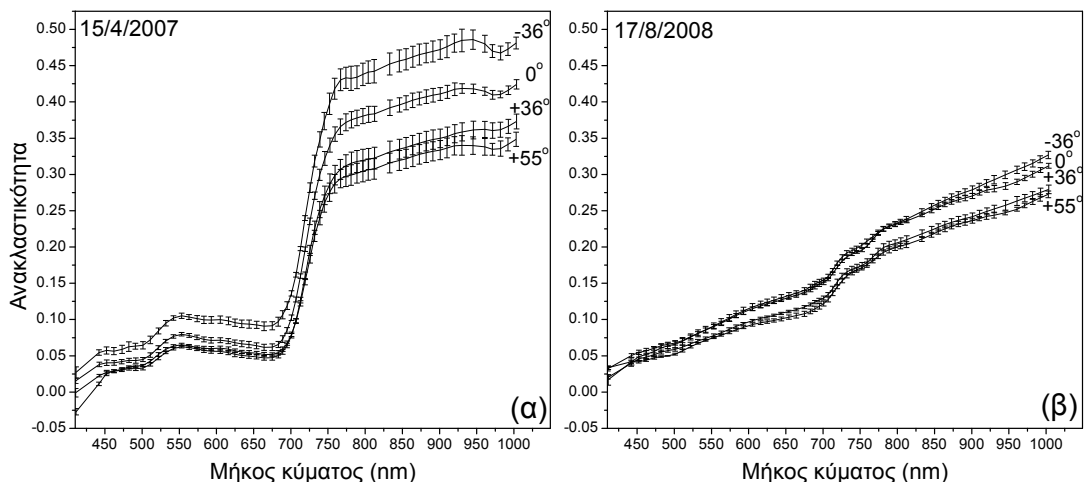
Παρακολούθηση βιοφυσικών και βιοχημικών ιδιοτήτων του θόλου στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* μέσω του υπερφασματικού δορυφόρου CHRIS/PROBA

Η υπερφασματική πληροφορία του CHRIS

Στο Σχήμα 54 φαίνονται τα φάσματα ανακλαστικότητας της περιοχής μελέτης του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa* στις δύο ακραίες αναπτυξιακές του φάσεις. Η μία είναι τον Απρίλιο όπου οι ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες της άνοιξης επιτρέπουν στο οικοσύστημα την πλήρη ανάπτυξη του. Η δεύτερη είναι τον Αύγουστο όπου επικρατεί ξηρασία και πολύ υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή, οπότε το οικοσύστημα υποφέρει από έντονη θερινή καταπόνηση και τα φυτά έχουν ρίξει το μεγαλύτερο ποσοστό από το φύλλωμα τους ενώ βρίσκονται σε μια σχεδόν ξηρή κατάσταση. Η διαφορά είναι εμφανής στα φάσματα ανακλαστικότητας αφού την άνοιξη το σχήμα του φάσματος είναι παρόμοιο με το τυπικό φάσμα ανακλαστικότητας του πράσινου φύλλου, ενώ τον Αύγουστο τείνει να πάρει το τυπικό σχήμα φάσματος ανακλαστικότητας ξερού εδάφους. Στο Σχήμα 54 μπορούν επίσης να παρατηρηθούν οι διαφορές στην ανακλαστικότητα σε σχέση με την γωνία παρατήρησης. Είναι φανερό πως η γωνία οπίσθιας σκέδασης -36° παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές ανακλαστικότητας. Ακολουθεί η κατακόρυφη γωνία παρατήρησης (0°), ενώ οι γωνίες πρόσθιας σκέδασης ($+36^\circ$, $+55^\circ$) εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας. Οι διαφορές στα φάσματα ανακλαστικότητας αναλόγως της γωνίας παρατήρησης οφείλονται κυρίως στην ποικιλομορφία της δομής του θόλου και ειδικότερα στις συνδυασμένες επιδράσεις των κενών και των σκιάσεων που παρουσιάζονται στο θόλο (Deering et al. 1999, Sandmeier et al. 1998).

Οι σχέσεις μεταξύ των οικοφυσιολογικών παραμέτρων και των φασμάτων ανακλαστικότητας

Οι συσχετίσεις μεταξύ της ανακλαστικότητας ανά κανάλι CHRIS και των μετρημένων ιδιοτήτων του οικοσυστήματος ανέδειξαν διάφορους καλούς συντελεστές προσδιορισμού (r^2)



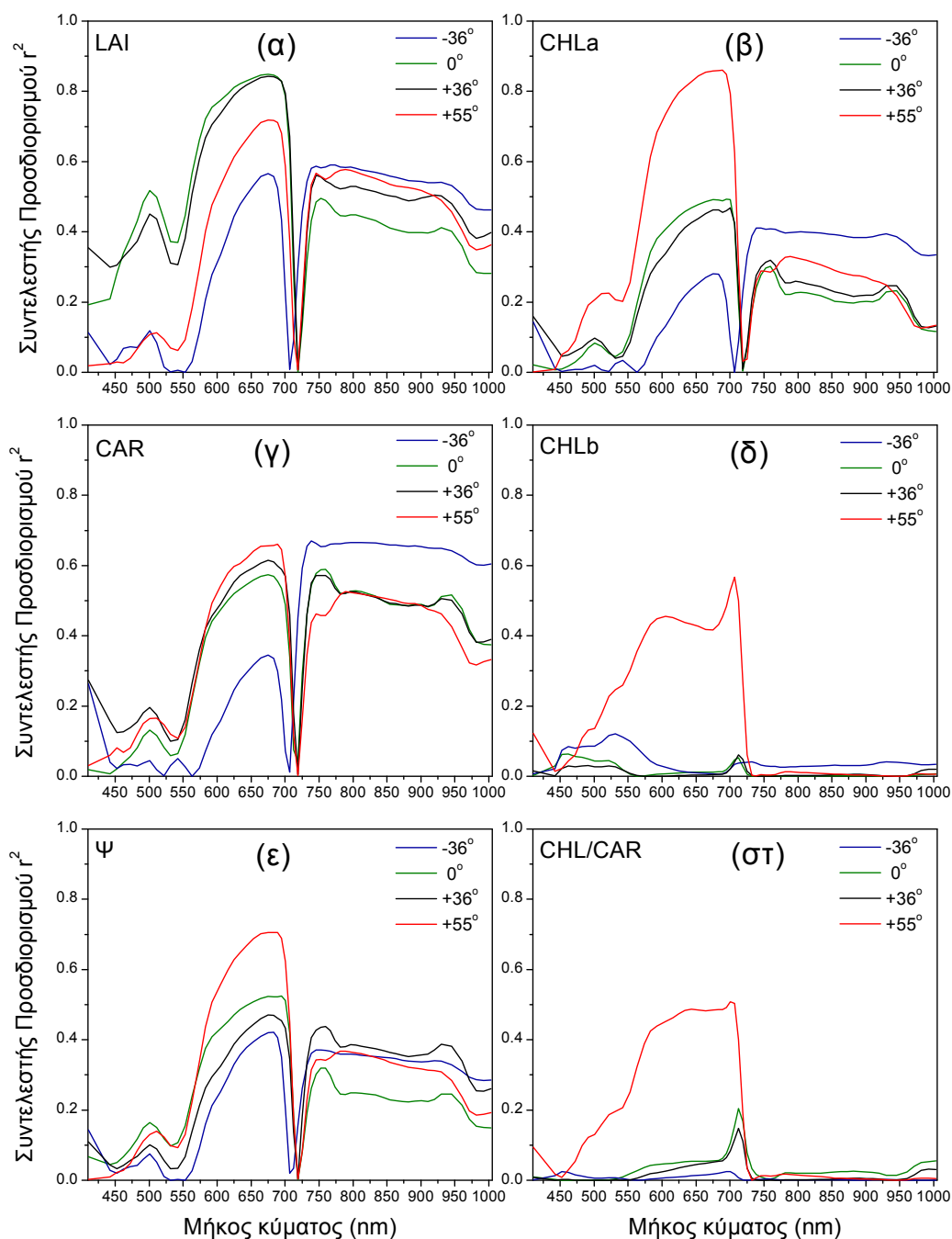
Σχήμα 54. Το μέσο φάσμα με τις τυπικές αποκλίσεις κάθε καναλιού για τις τέσσερις κατευθύνσεις παρατήρησης του CHRIS/PROBA στις ημερομηνίες (α) 15/4/2007 και (β) 17/8/2008.

Πίνακας 16. Μέγιστοι συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων οικοφυσιολογικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* μέσω: α) της ανακλαστικότητας του CHRIS ανά κανάλι (R_x), β) της παραγώγου της ανακλαστικότητας ανά κανάλι (D_x), γ) των προτεινόμενων δεικτών (Πίνακας 10) για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA. Όπου x το κεντρικό μήκος κύματος του καναλιού που εμφάνισε τον μέγιστο συντελεστή r^2 για τα R_x και D_x , ενώ για τους δείκτες εμφανίζεται η ονομασία τους.

<i>Ανακλαστικότητα R_x</i>	+55°		+36°		0°		-36°	
	r^2	x	r^2	x	r^2	x	r^2	x
LAI	0.718	675	0.843	675	0.849	675	0.591	767
CHLa	0.860	689	0.468	701	0.493	695	0.410	745
CHLb	0.567	707	0.061	713	0.063	462	0.121	532
CHL	0.856	689	0.410	701	0.436	701	0.369	739
CAR	0.661	689	0.615	675	0.589	759	0.671	739
CHL/CAR	0.508	701	0.147	713	0.205	713	0.025	701
Ψ	0.706	675	0.471	675	0.525	695	0.421	683
<i>Παράγωγος D_x</i>								
LAI	0.923	654	0.905	593	0.891	616	0.877	563
CHLa	0.889	605	0.828	961	0.800	961	0.647	945
CHLb	0.589	675	0.541	971	0.506	920	0.335	910
CHL	0.865	553	0.818	961	0.770	961	0.589	945
CAR	0.817	945	0.812	616	0.799	574	0.766	511
CHL/CAR	0.702	855	0.547	971	0.366	920	0.304	873
Ψ	0.850	574	0.766	961	0.674	634	0.672	945
<i>Δείκτες</i>								
LAI	0.909	GI	0.915	RGI	0.862	SR4	0.916	PRI2
CHLa	0.886	PSRI	0.679	TVI/OSAVI	0.733	PRI	0.673	PSRI
CHLb	0.609	CARI	0.558	MTCI	0.536	MTCI	0.473	DI
CHL	0.861	PSRI	0.616	PRI	0.684	PRI	0.636	DI
CAR	0.825	WI	0.821	PRI2	0.839	PRI2	0.780	GI
CHL/CAR	0.633	SIPI2	0.298	DPR2	0.268	DI	0.650	DPR2
Ψ	0.842	PSRI	0.802	TVI/OSAVI	0.779	REP	0.788	SIPI

αποκαλύπτοντας επίσης την διαφοροποίηση των καταλληλότερων καναλιών για τον προσδιορισμό κάθε παραμέτρου ανάλογα με την γωνία παρατήρησης. Γενικά, η κίτρινη προς κόκκινη περιοχή του φάσματος εμφανίζεται ως η πιο χρήσιμη για την εκτίμηση των βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa* (Σχήμα 55). Πολλές παράμετροι παρουσιάζουν βέλτιστες συσχετίσεις με τα κανάλια στο ερυθρό και τις παρυφές του (red-edge), μεταξύ των 675 και 713 nm (Πίνακας 16), ενώ κανάλια στο εγγύς υπέρυθρο (NIR) – κυρίως στις περιοχές 745-767 nm και 930-945 nm – εμφανίζουν επίσης σχετικά καλές συσχετίσεις με τις περισσότερες παραμέτρους.

Στην ανάλυση προσδιορισμού του LAI, οι καλύτεροι συντελεστές εμφανίζονται στα κόκκινα μήκη κύματος στην κατακόρυφη (0°) και +36° γωνία παρατήρησης (Σχήμα 55α), με μέγιστο στα 675 nm. Κοντά δηλαδή στο κανάλι μέγιστης απορρόφησης των χλωροφυλλών. Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους, είναι φανερό ότι η γωνία παρατήρησης +55° παρουσιάζει τους καλύτερους συντελεστές προσδιορισμού (Σχήμα 55β-στ). Αυτό τονίζεται περισσότερο στον προσδιορισμό των χλωροφυλλών όπου τα κανάλια μεταξύ τα 689 και 701 nm δείχνουν τους υψηλότερους συντελεστές προσδιορισμού της χλωροφύλλης α (CHLa) (Πίνακας 16), ενώ μια κορυφή στα 707 nm στην γωνία +55° διαφοροποιεί την ανάλυση προσδιορισμού της χλωροφύλλης β (CHLb) από αυτές των υπόλοιπων παραμέτρων (Σχήμα 55δ). Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση σε



Σχήμα 55. Διακυμάνσεις των συντελεστών προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* μέσω του φάσματος ανακλαστικότητας του CHRIS (R_x) για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA.

αυτό το σημείο είναι ότι μόνο η γωνία παρατήρησης $+55^\circ$ εμφανίζει υψηλούς συντελεστές στον προσδιορισμό της χλωροφύλλης β.

Στην ανάλυση προσδιορισμού των καροτενοειδών (CAR) εμφανίστηκαν υψηλοί συντελεστές στα κανάλια του ερυθρού και του υπερέρυθρου (Σχήμα 55γ), με το πιο σημαντικό r^2 να εμφανίζεται στα 739 nm (Πίνακας 16). Το δυναμικό νερού (Ψ) εμφανίζει επίσης τους υψηλότερους

συντελεστές προσδιορισμού στην γωνία $+55^\circ$ και στα 675 nm (Σχήμα 55ε), πιθανόν λόγω της συμβολής του με τις συγκεντρώσεις χρωστικών φύλλου.

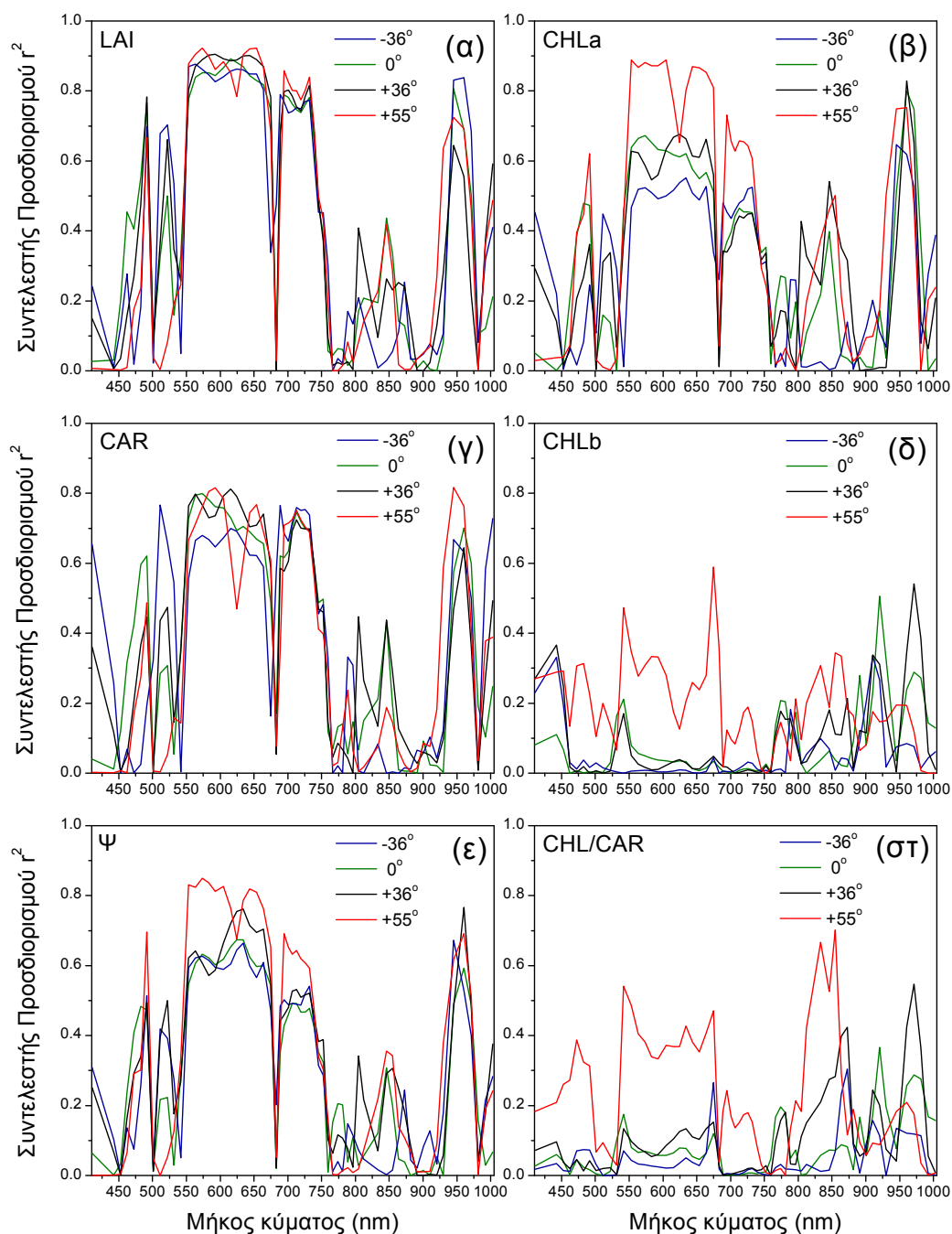
Τέλος, μελετήθηκε ο προσδιορισμός του λόγου της συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς την συγκέντρωση καροτενοειδών (CHL/CAR), ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ένδειξη της φυσιολογικής κατάστασης του φυτού (Balaguer et al. 2002, Kyparissis et al. 2000, 1995, Munne-Bosch & Alegre 2000). Όπως και για τις υπόλοιπες παραμέτρους, η γωνία παρατήρησης $+55^\circ$ εμφανίζεται ως η βέλτιστη για τον προσδιορισμό του λόγου CHL/CAR (Σχήμα 55στ), με υψηλούς συντελεστές μεταξύ των 583 και 707 nm και κορυφή στα 701 – 707 nm. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες φασματικές περιοχές συσχετίζονται επίσης με τις συγκεντρώσεις χλωροφυλλών α και β στην ίδια γωνία παρατήρησης.

Να αναφερθεί επίσης ότι η ανακλαστικότητα στα 719 nm, ακριβώς στην μέση της περιοχής που χαρακτηρίζεται ως παρυφές του ερυθρού (red-edge), δεν εμφανίζει καμία συσχέτιση με καμία παράμετρο στην κατακόρυφη και πρόσθια σκέδασης διευθύνσεις. Επιπλέον, η μόνη κατεύθυνση παρατήρησης οπίσθιας σκέδασης που είναι διαθέσιμη προς ανάλυση (-36°) παρουσιάζει διαφορετικά πρότυπα σημαντικότητας σε σχέση με την κατακόρυφη και πρόσθια σκέδασης διευθύνσεις, εμφανίζοντας χαμηλότερους συντελεστές στην ορατή περιοχή του φάσματος και υψηλότερους συντελεστές στο υπέρυθρο. Τέλος, οι καμπύλες σημαντικότητας της γωνίας -36° (Σχήμα 55) φθίνουν νωρίτερα από τις υπόλοιπες γωνίες παρατήρησης μετά την κοινή κορυφή στο ορατό (675-689 nm), αγγίζουν το μηδέν σε μικρότερα μήκη κύματος (707 nm) και έπειτα αυξάνουν νωρίτερα στο υπέρυθρο.

Οι σχέσεις μεταξύ των οικοφυσιολογικών παραμέτρων και των παραγώγων των φασμάτων ανακλαστικότητας

Η πρώτη παράγωγος του φάσματος ανακλαστικότητας φαίνεται να είναι πιο χρήσιμη από την πρωτογενή φασματική πληροφορία του CHRIS για την εκτίμηση οικοφυσιολογικών παραμέτρων. Στην ανάλυση προσδιορισμού των βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa*, η πρώτη παράγωγος του φάσματος ανακλαστικότητας παρουσίασε πολύ σημαντικότερους συντελεστές από την ανάλυση του πρωτογενούς φάσματος για όλες τις παραμέτρους (Πίνακας 16). Η πρώτη παράγωγος του κίτρινου προς κόκκινου φάσματος φαίνεται να συσχετίζεται πολύ καλά με τις περισσότερες παραμέτρους (Σχήμα 56), ενώ μεταξύ των γωνιών παρατήρησης, η $+55^\circ$ εμφανίζει και εδώ τα καλύτερα αποτελέσματα. Συγκρίνοντας τις καμπύλες σημαντικότητας των συντελεστών προσδιορισμού των παραμέτρων, δύο γενικά πρότυπα μπορούν να διακριθούν. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων LAI, CHLa, CAR και Ψ (Σχήμα 56α-γ,ε) εμφανίζει υψηλούς συντελεστές στις περιοχές 553 – 732 nm και 930 – 971 nm σε όλες τις γωνίες παρατήρησης, με διακριτή περιοχή χαμηλής σημαντικότητας στα 675 – 689 nm. Από τη άλλη μεριά, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων CHLb και CHL/CAR (Σχήμα 56δ,στ), η γωνία παρατήρησης $+55^\circ$ ξεχωρίζει ανάμεσα στις τέσσερις γωνίες υπό μελέτη, ενώ οι παράγωγοι της ανακλαστικότητας στα 473, 542, 675, 920 και 971 nm παρουσιάζουν υψηλή σημαντικότητα.

Για τον προσδιορισμό των χλωροφυλλών, οι πιο ενδιαφέροντες δείκτες που προέκυψαν από την ανάλυση της πρώτης παραγώγου του φάσματος ανακλαστικότητας εντοπίζονται στην πράσινη ($D_{553}+55^\circ$) και στην κόκκινη ($D_{675}+55^\circ$) περιοχή του φάσματος (Πίνακας 16). Στην ανάλυση προσδιορισμού των καροτενοειδών ξεχωρίζουν οι $D_{411}-36^\circ$ και $D_{511}-36^\circ$ λόγω της θέσης και των ιδιοτήτων τους. Οι δύο αυτοί δείκτες συμπίπτουν με το φάσμα απορρόφησης των καροτενοειδών (Lichtenthaler 1987), ενώ συγχρόνως δεν εμφανίζουν υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού στις αναλύσεις των υπόλοιπων οικοφυσιολογικών παραμέτρων.



Σχήμα 56. Διακυμάνσεις των συντελεστών προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* μέσω της πρώτης παραγώγου του φάσματος ανακλαστικότητας του CHRIS (D_x) για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA.

Σχετικά με την CHLb και τον λόγο CHL/CAR, παρόλο που σημαντικές συσχετίσεις εμφανίζονται μόνο στην κατεύθυνση +55°, αξίζει αν σημειωθούν δύο κορυφές που εμφανίστηκαν στον προσδιορισμό και των δύο παραμέτρων, στα 542 και 675 nm (Σχήμα 56δ,στ). Επιπλέον, μία περιοχή υψηλής σημαντικότητας εμφανίζεται μεταξύ των 833 και 855 nm για τον λόγο CHL/CAR, προβάλλοντας τους δείκτες D_{833} και D_{855} ως πιθανούς δείκτες εκτίμησης του στρες (Σχήμα 56στ).

Οι σχέσεις μεταξύ των οικοφυσιολογικών παραμέτρων και των δεικτών βλάστησης που προτείνονται στην βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων με την πληθώρα των προτεινόμενων δεικτών (Πίνακας 10) φαίνονται στον Πίνακα 17. Όπως προκύπτει από την ανάλυση αυτή, ο LAI συσχετίζεται ισχυρά με πολλούς από τους προτεινόμενους δείκτες ανεξαρτήτως της κατηγοριοποίησης τους και σε όλες τις γωνίες παρατήρησης. Από τους δείκτες πράσινης βλάστησης (ευρέων και στενών καναλιών) μόνο ο δείκτης MTCI δεν εμφανίζει συσχέτιση με τον LAI σε καμία από τις γωνίες παρατήρησης. Επιπλέον, οι βελτιωμένοι δείκτες πράσινης βλάστησης (π.χ. EVI, RDVI, mNDVI, mSR, MSAVI, OSAVI, TVI, SPVI) δεν φαίνεται να προσφέρουν κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα στον προσδιορισμό του LAI σε σχέση με τους απλούς και παραδοσιακούς δείκτες (SR και NDVI στενών και ευρέων καναλιών). Είναι σημαντικό να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η παρούσα ανάλυση αφορά μόνο το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* το οποίο δεν αναπτύσσει υψηλές τιμές LAI, οπότε οι παραδοσιακοί (και όχι μόνο) δείκτες εμφανίζουν κορεσμό, όπως φάνηκε και στην μελέτη με τους πολυφασματικούς δορυφορικούς αισθητήρες για τα δάση οξιάς (*Fagus sylvatica*) και δρυών (*Quercus* sp.) (Σχήμα 38). Είναι επίσης ενδιαφέρουσα παρατήρηση για το συγκεκριμένο οικοσύστημα ότι ο LAI συσχετίζεται καλύτερα με δείκτες που χρησιμοποιούν κανάλια στο κόκκινο και πράσινο φάσμα όπως οι δείκτες GI, RGI και SR4 οι οποίοι εμφανίζουν τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού στην κατακόρυφη και τις πρόσθιας σκέδασης κατευθύνσεις (Πίνακας 17). Άλλο ενδιαφέρον σημείο είναι ότι ο δείκτης PRI, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για την εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης του φυτού μέσω των φωτοπροστατευτικών μηχανισμών του (Gamon et al. 1997), εμφανίζει συνδιακύμανση με τον LAI. Μάλιστα, η εναλλακτική φόρμουλα του PRI που προτάθηκε από τους Filella et al. (1996) παρουσιάζει το μέγιστο r^2 στον προσδιορισμό του LAI από την κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης (-36°).

Σε αντίθεση με τον LAI, η συγκέντρωση χλωροφυλλών δεν συσχετίζεται σημαντικά με πολλούς από τους δείκτες που μελετήθηκαν (Πίνακας 17). Η χλωροφύλλη a δείχνει σημαντικές συσχετίσεις με κάποιους από τους δείκτες κυρίως στην κατεύθυνση $+55^\circ$ (π.χ. mNDVI, PSRI, SIPI). Δείκτες που χρησιμοποιούν κανάλια στο κόκκινο και πράσινο δείχνουν επίσης να σχετίζονται με την χλωροφύλλη a . Ο δείκτης PSRI απέδωσε τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού των συνολικών χλωροφυλλών και της χλωροφύλλης a στην κατεύθυνση $+55^\circ$ (Πίνακας 16). Θεωρείται έτσι ο καταλληλότερος δείκτης από τους προτεινόμενους για την εκτίμηση των χλωροφυλλών. Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο δείκτης PSRI απέδωσε υψηλές συσχετίσεις με τις χλωροφύλλες επίσης στην ανάλυση των πολυφασματικών δεικτών του MODIS, αλλά μόνο για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* (Πίνακας 14). Οι δείκτες που κατατάσσονται στην κατηγορία εκτίμησης του στρες στον Πίνακα 10, ανάμεσα τους και ο PSRI, έχουν στην ουσία σχεδιαστεί για τον εντοπισμό των ιδιοτήτων, των αναλογιών και των σχετικών διακυμάνσεων των χρωστικών φύλλου που σχετίζονται με την κατάσταση και φυσιολογία του φυτού. Συνεπώς, είναι λογικό και αναμενόμενο οι δείκτες αυτοί να συσχετίζονται με φωτοσυνθετικές χρωστικές όπως οι χλωροφύλλες. Από την άλλη, οι βελτιωμένοι σύνθετοι δείκτες πράσινης βλάστησης που προτείνονται στη σχετική βιβλιογραφία για την εκτίμηση των χλωροφυλλών (π.χ. CARI, mCAI, MCARI, MCARI/OSAVI, TCARI, TCARI/OSAVI) δεν παρουσιάζουν καμία υπεροχή έναντι των απλών δεικτών όπως του παραδοσιακού NDVI. Πολλοί από αυτούς μάλιστα δεν παρουσιάζουν

Πίνακας 17. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* μέσω των προτεινόμενων δεικτών (Πίνακας 10) για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA. Οι συσχετίσεις που δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα ($p > 0.01$) είναι σκιασμένες. Οι συσχετίσεις που παρουσιάζουν $r^2 > 0.7$ τονίζονται με έντονη γραφή.

	LAI				CHLa				CHLb				CAR				CHL/CAR				Ψ			
	+55°	+36°	0°	-36°	+55°	+36°	0°	-36°	+55°	+36°	0°	-36°	+55°	+36°	0°	-36°	+55°	+36°	0°	-36°	+55°	+36°	0°	-36°
Πράσινης βλάστησης, ευρέων καναλιών																								
EVI	0.83	0.80	0.77	0.78	0.67	0.42	0.46	0.50	0.15	0.00	0.01	0.02	0.75	0.70	0.73	0.75	0.16	0.01	0.00	0.01	0.65	0.53	0.48	0.52
Green NDVI	0.65	0.72	0.74	0.72	0.66	0.26	0.28	0.45	0.23	0.01	0.00	0.00	0.67	0.49	0.49	0.67	0.23	0.00	0.00	0.01	0.55	0.34	0.36	0.51
NDVI	0.85	0.86	0.85	0.81	0.82	0.43	0.46	0.53	0.26	0.00	0.01	0.01	0.78	0.66	0.66	0.72	0.30	0.02	0.01	0.02	0.75	0.52	0.52	0.60
SR	0.75	0.73	0.73	0.72	0.65	0.34	0.36	0.47	0.17	0.00	0.00	0.01	0.79	0.62	0.64	0.75	0.14	0.00	0.00	0.00	0.59	0.39	0.39	0.51
Πράσινης βλάστησης, στενών καναλιών																								
CARI	0.36	0.65	0.57	0.00	0.62	0.42	0.40	0.01	0.61	0.05	0.06	0.04	0.38	0.43	0.27	0.05	0.50	0.13	0.20	0.02	0.45	0.33	0.41	0.01
GI	0.91	0.87	0.81	0.83	0.76	0.53	0.54	0.57	0.20	0.01	0.02	0.02	0.79	0.77	0.79	0.78	0.22	0.04	0.01	0.02	0.75	0.59	0.54	0.61
GVI	0.91	0.90	0.84	0.85	0.78	0.58	0.59	0.60	0.22	0.01	0.03	0.03	0.78	0.78	0.80	0.77	0.25	0.06	0.03	0.04	0.79	0.65	0.59	0.65
mCAI	0.84	0.83	0.80	0.79	0.65	0.50	0.52	0.51	0.12	0.01	0.01	0.01	0.72	0.74	0.75	0.74	0.16	0.03	0.01	0.01	0.65	0.58	0.53	0.54
mCAI2	0.88	0.85	0.84	0.82	0.75	0.48	0.49	0.51	0.20	0.00	0.01	0.01	0.76	0.72	0.71	0.73	0.24	0.03	0.01	0.01	0.71	0.55	0.53	0.56
MCARI	0.83	0.81	0.77	0.78	0.68	0.41	0.41	0.46	0.09	0.00	0.00	0.00	0.69	0.68	0.69	0.73	0.21	0.01	0.00	0.00	0.65	0.49	0.43	0.50
MCARI/OSAVI	0.70	0.81	0.84	0.85	0.65	0.45	0.49	0.51	0.08	0.01	0.00	0.00	0.47	0.62	0.67	0.70	0.34	0.03	0.02	0.02	0.61	0.56	0.54	0.58
MCARI2	0.85	0.82	0.80	0.80	0.70	0.46	0.47	0.50	0.15	0.00	0.01	0.01	0.76	0.71	0.72	0.75	0.18	0.02	0.01	0.01	0.68	0.55	0.50	0.53
MCARI2/OSAVI	0.83	0.82	0.82	0.86	0.70	0.60	0.63	0.62	0.15	0.02	0.03	0.04	0.63	0.72	0.75	0.75	0.28	0.09	0.06	0.06	0.71	0.74	0.68	0.66
mNDVI	0.82	0.87	0.83	0.89	0.87	0.52	0.56	0.56	0.40	0.01	0.02	0.01	0.68	0.70	0.74	0.68	0.45	0.05	0.03	0.05	0.80	0.63	0.59	0.65
mNDVI2	0.86	0.88	0.83	0.89	0.84	0.62	0.66	0.62	0.40	0.04	0.06	0.03	0.70	0.78	0.80	0.72	0.40	0.08	0.06	0.07	0.81	0.71	0.67	0.71
MSAVI	0.81	0.78	0.76	0.77	0.65	0.40	0.41	0.50	0.13	0.00	0.00	0.01	0.76	0.67	0.68	0.76	0.15	0.01	0.00	0.01	0.63	0.49	0.44	0.52
mSR	0.72	0.77	0.63	0.75	0.68	0.41	0.41	0.41	0.38	0.00	0.01	0.00	0.67	0.71	0.74	0.69	0.24	0.01	0.00	0.00	0.67	0.47	0.40	0.43
mSR2	0.85	0.85	0.79	0.85	0.77	0.54	0.58	0.54	0.36	0.02	0.04	0.02	0.73	0.77	0.81	0.72	0.29	0.04	0.02	0.03	0.76	0.61	0.57	0.58
MTCI	0.23	0.01	0.03	0.12	0.11	0.22	0.09	0.00	0.08	0.56	0.54	0.25	0.24	0.13	0.03	0.01	0.00	0.25	0.17	0.07	0.21	0.16	0.04	0.00
mTVI	0.85	0.82	0.80	0.80	0.70	0.46	0.47	0.50	0.15	0.00	0.01	0.01	0.76	0.71	0.72	0.75	0.18	0.02	0.01	0.01	0.68	0.55	0.50	0.53
mTVI/OSAVI	0.83	0.82	0.82	0.86	0.70	0.60	0.63	0.62	0.15	0.02	0.03	0.04	0.63	0.72	0.75	0.75	0.28	0.09	0.06	0.06	0.71	0.74	0.68	0.66
NDVI	0.86	0.86	0.86	0.82	0.82	0.45	0.47	0.54	0.26	0.00	0.01	0.01	0.77	0.67	0.68	0.72	0.31	0.03	0.01	0.03	0.76	0.55	0.53	0.61
NDVI2	0.88	0.88	0.86	0.85	0.79	0.55	0.57	0.61	0.25	0.02	0.03	0.03	0.78	0.75	0.74	0.77	0.28	0.05	0.04	0.05	0.76	0.63	0.61	0.68
OSAVI	0.86	0.84	0.82	0.81	0.75	0.44	0.46	0.54	0.20	0.00	0.00	0.01	0.78	0.68	0.69	0.75	0.23	0.02	0.01	0.02	0.71	0.54	0.50	0.58
RDVI	0.85	0.82	0.80	0.80	0.72	0.43	0.44	0.52	0.17	0.00	0.00	0.01	0.77	0.68	0.69	0.75	0.20	0.01	0.00	0.01	0.69	0.53	0.48	0.55
REP	0.23	0.62	0.79	0.71	0.25	0.49	0.66	0.48	0.07	0.03	0.05	0.01	0.06	0.51	0.56	0.46	0.37	0.13	0.20	0.09	0.25	0.52	0.78	0.58
SIP1	0.78	0.87	0.86	0.88	0.87	0.60	0.66	0.65	0.34	0.01	0.04	0.03	0.57	0.67	0.70	0.62	0.57	0.11	0.11	0.14	0.77	0.72	0.71	0.79
SIP2	0.71	0.85	0.86	0.87	0.85	0.56	0.63	0.64	0.40	0.01	0.03	0.03	0.51	0.62	0.66	0.58	0.63	0.11	0.10	0.16	0.70	0.70	0.69	0.78
SPVI	0.82	0.79	0.76	0.77	0.65	0.43	0.43	0.49	0.13	0.00	0.00	0.01	0.74	0.69	0.70	0.74	0.15	0.01	0.00	0.01	0.64	0.53	0.46	0.50
SR	0.75	0.73	0.72	0.71	0.66	0.34	0.36	0.47	0.19	0.00	0.00	0.01	0.79	0.62	0.64	0.75	0.14	0.00	0.00	0.00	0.60	0.39	0.38	0.50
SR1	0.83	0.80	0.79	0.78	0.69	0.41	0.44	0.53	0.19	0.00	0.01	0.01	0.80	0.68	0.69	0.77	0.17	0.01	0.00	0.01	0.65	0.47	0.47	0.57
SR2	0.80	0.76	0.75	0.74	0.67	0.36	0.38	0.49	0.17	0.00	0.00	0.01	0.80	0.64	0.66	0.75	0.15	0.00	0.00	0.01	0.62	0.42	0.41	0.53
SR3	0.64	0.70	0.72	0.71	0.58	0.30	0.32	0.47	0.16	0.00	0.00	0.01	0.68	0.57	0.56	0.73	0.14	0.00	0.00	0.00	0.51	0.36	0.38	0.52
SR4	0.89	0.91	0.86	0.87	0.78	0.62	0.63	0.62	0.21	0.02	0.03	0.03	0.73	0.79	0.80	0.76	0.28	0.08	0.05	0.05	0.81	0.70	0.64	0.69
TCARI	0.86	0.86	0.84	0.84	0.73	0.48	0.49	0.49	0.12	0.00	0.00	0.00	0.67	0.70	0.72	0.73	0.27	0.02	0.01	0.01	0.71	0.58	0.52	0.54
TCARI/OSAVI	0.66	0.79	0.84	0.90	0.65	0.51	0.57	0.55	0.11	0.00	0.00	0.01	0.39	0.59	0.64	0.66	0.44	0.07	0.06	0.04	0.61	0.63	0.64	0.64
TSAVI	0.86	0.83	0.82	0.80	0.75	0.42	0.45	0.53	0.19	0.00	0.00	0.02	0.79	0.67	0.68	0.76	0.22	0.01	0.01	0.02	0.71	0.53	0.50	0.57
TVI	0.85	0.83	0.81	0.79	0.66	0.48	0.50	0.50	0.12	0.00	0.01	0.01	0.72	0.73	0.74	0.74	0.17	0.02	0.01	0.01	0.66	0.57	0.52	0.53
TVI/OSAVI	0.82	0.82	0.82	0.84	0.65	0.68	0.71	0.64	0.12	0.04	0.06	0.05	0.57	0.79	0.78	0.75	0.26	0.12	0.10	0.07	0.70	0.80	0.76	0.68
VOG	0.84	0.86	0.86	0.83	0.74	0.47	0.50	0.60	0.30	0.02	0.02	0.04	0.72	0.68	0.68	0.73	0.28	0.04	0.03	0.06	0.68	0.54	0.54	0.65
VOG2	0.77	0.73	0.69	0.67	0.56	0.41	0.42	0.49	0.12	0.01	0.01	0.02	0.61	0.60	0.58	0.61	0.15	0.03	0.02	0.04	0.57	0.48	0.47	0.55
Χρωστικών φύλλων (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)																								
ARI	0.32	0.33	0.19	0.38	0.14	0.47	0.46	0.41	0.01	0.12	0.19	0.19	0.20	0.43	0.51	0.48	0.01	0.15	0.06	0.07	0.25	0.54	0.33	0.30
BGI	0.00	0.19	0.05	0.12	0.02	0.02	0.03	0.10	0.11	0.04	0.14	0.00	0.01	0.10	0.01	0.30	0.11	0.02	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00	0.08
BRI	0.48	0.56	0.51	0.70	0.50	0.55	0.61	0.40	0.32	0.08	0.12	0.03	0.34	0.58	0.73	0.34	0.30	0.13	0.06	0.13	0.49	0.65	0.50	0.50
CRI	0.11	0.45	0.53	0.26	0.14	0.12	0.09	0.18	0.04	0.02	0.05	0.01	0.17	0.27	0.21	0.30	0.04	0.00	0.01	0.00	0.14	0.14	0.19	0.24
CRI2	0.00	0.17	0.21	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.15	0.07	0.01	0.06	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03
Red/Green	0.88	0.91	0.86	0.87	0.77	0.61	0.64	0.61	0.21	0.02	0.04	0.03	0.74	0.79	0.81	0.76	0.27	0.07	0.05	0.05	0.81	0.69	0.64	0.69
RCI	0.90	0.92	0.86	0.87	0.79																			

καν στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τις χλωροφύλλες στην κατακόρυφη και στις $\pm 36^\circ$ διευθύνσεις.

Τα καροτενοειδή (CAR) παρουσιάζουν σημαντικές συσχετίσεις με πολλούς από τους προτεινόμενους δείκτες από όλες της κατηγορίες και σε όλες τις διευθύνσεις παρατήρησης του CHRIS (Πίνακας 17). Οι περισσότεροι από αυτούς συμπίπτουν με τους δείκτες που σχετίζονται με τον LAI και τις χλωροφύλλες. Οι βέλτιστες συσχετίσεις βρέθηκαν με τους δείκτες WI, PRI και PRI2 (Πίνακας 16). Δεδομένου ότι αμφότεροι οι δείκτες PRI και WI είναι σχεδιασμένοι για τον εντοπισμό συνθηκών στρες και ότι η συγκέντρωση των καροτενοειδών σχετίζεται άμεσα με τους μηχανισμούς φωτοπροστασίας των φυτών, το παραπάνω αποτέλεσμα φαίνεται λογικό. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης CRI, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για την εκτίμηση των καροτενοειδών σε επίπεδο φύλλου, δεν εμφάνισε συσχέτιση με την συγκέντρωση των καροτενοειδών στην παρούσα δορυφορική μελέτη.

Οι WI και fWBI είναι οι μόνοι δείκτες σχεδιασμένοι για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών που μπορούν να υπολογιστούν από το φάσμα του CHRIS. Χρησιμοποιούν την μόνη περιοχή που διαθέτει ο CHRIS όπου υπάρχει απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα μόρια του νερού, ανάμεσα στα 920 και 980 nm. Παρόλα αυτά ο δείκτης WI παρουσίασε χαμηλά r^2 και ο fWBI δεν εμφάνισε καθόλου συσχέτιση με το δυναμικό νερού (Ψ) του *Phlomis fruticosa*, ενώ οι ισχυρότερες συσχετίσεις που εμφανίζονται στην ανάλυση του Ψ συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τους δείκτες βλάστησης που συσχετίζονται οι χλωροφύλλες (Πίνακας 17).

Η ανάλυση των πειραματικών συνδυασμών πάνω στην φόρμουλα $NDSI_{(x,y)}$

Τα 62 κανάλια του CHRIS χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό και εξέταση όλων των πιθανών δεικτών που μπορούν να προκύψουν μέσω της διαδεδομένης φόρμουλας $NDSI_{(x,y)}$. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι $NDSI_{(x,y)} = -NDSI_{(y,x)}$, είναι δυνατοί 1891 διαφορετικοί συνδυασμοί. Όλοι αυτοί οι δείκτες NDSI ελέγχθηκαν ως προς την γραμμική τους συσχέτιση με όλες της βιοφυσικές και βιοχημικές οικοφυσιολογικές παραμέτρους του *Phlomis fruticosa* που μετρήθηκαν στο πεδίο. Κατόπιν, οι συντελεστές προσδιορισμού ανάμεσα στα NDSI και κάθε μετρημένη παράμετρο απεικονίστηκαν γραφικά σε χάρτες ισοϋψών γραμμών διαβαθμισμένων αποχρώσεων με σκοπό την αποτύπωση και εποπτεία της στατιστικής σημαντικότητας κάθε συνδυασμού NDSI (Σχήμα 57). Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 57, οι βέλτιστοι δείκτες NDSI διαφοροποιούνται ανάλογα την παράμετρο προς προσδιορισμό και την γωνία παρατήρησης του δορυφόρου. Οι υψηλής σημαντικότητας NDSI είναι συνήθως συνδυασμοί κόκκινων (συμπεριλαμβάνοντας και την περιοχή των παρυφών του – red-edge) – υπέρυθρων μηκών κύματος, κόκκινων – πράσινων μηκών κύματος και υπέρυθρων μηκών κύματος (εστιάζοντας κυρίως στην περιοχή γύρω από τα κανάλια απορρόφησης του νερού, 920 – 970 nm).

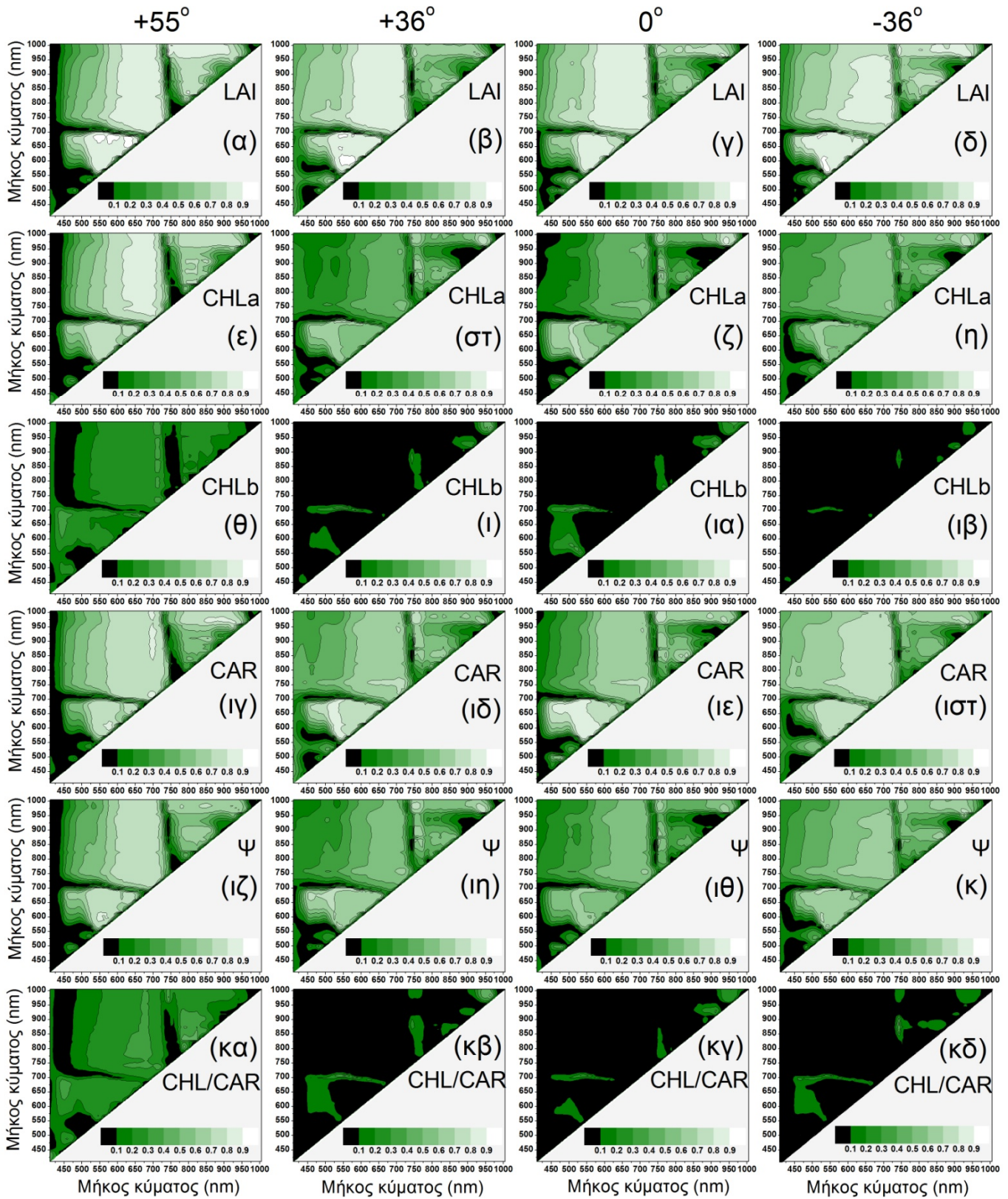
Είναι φανερό από τους χάρτες του Σχήματος 57(α-δ) ότι υπάρχουν πολλοί αποτελεσματικοί δείκτες NDSI για τον προσδιορισμό του LAI σε όλες τις γωνίες παρατήρησης. Υπάρχει μία πλατιά περιοχή υψηλών συντελεστών r^2 για τους δείκτες NDSI με x: $\sim 580 - 720$ nm και y: $\sim 710 - 1003$ nm, παρούσα σε όλες τις κατευθύνσεις παρατήρησης με την εξαίρεση ότι στην κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης -36° η παραπάνω περιοχή είναι κάπως μικρότερη. Μία δεύτερη πλατιά περιοχή υψηλής σημαντικότητας παρουσιάζεται σε όλες τις κατευθύνσεις για τους δείκτες NDSI κόκκινου-πράσινου με x: $\sim 510 - 650$ nm και y: $\sim 570 - 695$ nm. Στην κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης η περιοχή αυτή είναι κάπως πιο πλατιά συμπεριλαμβάνοντας το κομμάτι με x: $\sim 470 - 510$ nm και y: $\sim 640 - 690$ nm. Αυτές οι δύο μεγάλες περιοχές σημαντικότητας υποδεικνύουν αυτό που ήταν επίσης εμφανές στην ανάλυση των πολυφασματικών δεδομένων και στην προηγούμενη ανάλυση

Πίνακας 18. Οι δείκτες NDSI και SSI που εμφάνισαν τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA. Όπου x, y τα κεντρικά μήκη κύματος των καναλιών που χρησιμοποιούνται από κάθε δείκτη.

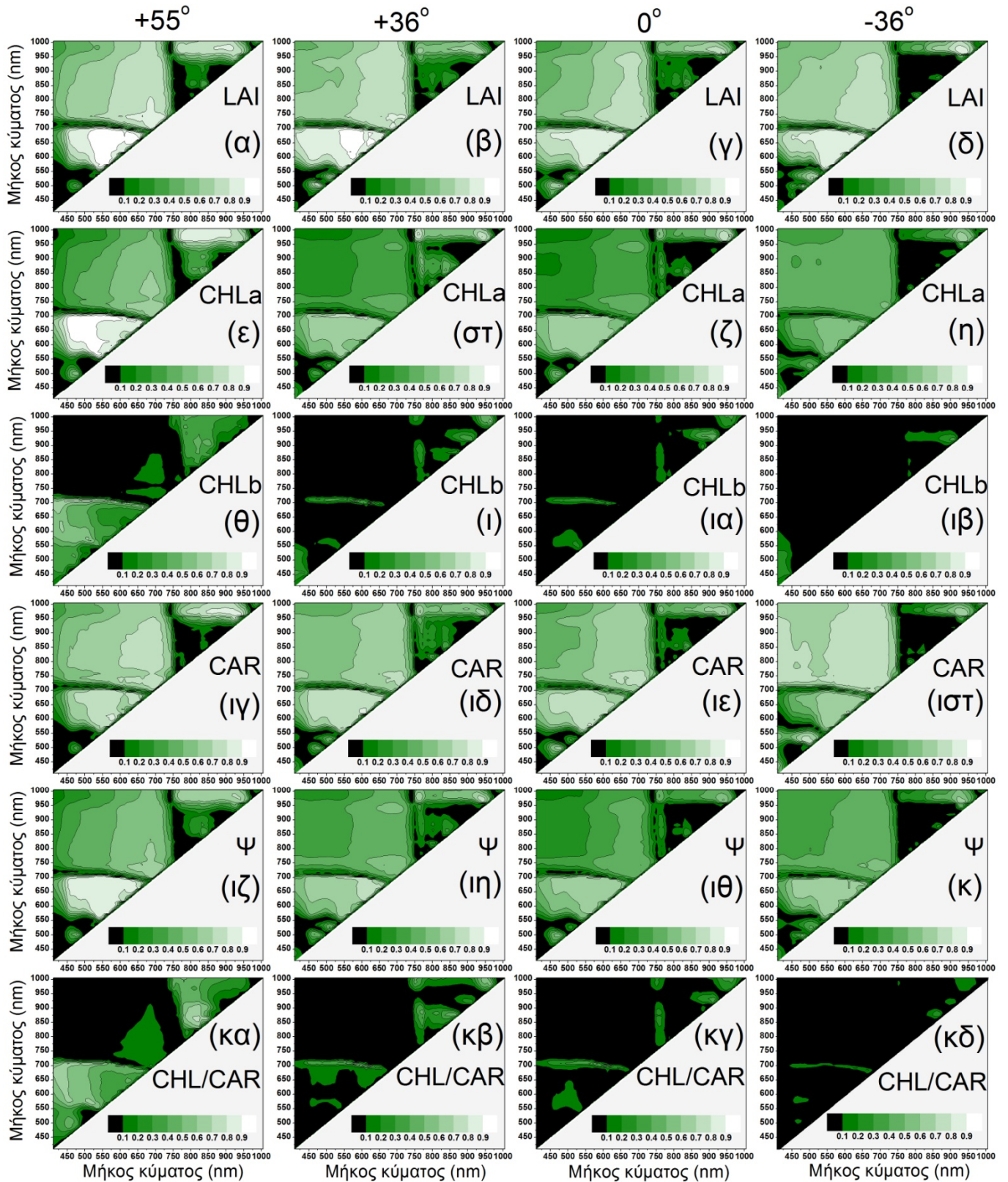
<i>NDSI</i> _(x,y)	+55°			+36°			0°			-36°		
	r²	x	y	r²	x	y	r²	x	y	r²	x	y
LAI	0.956	616	689	0.914	583	593	0.872	719	739	0.934	542	563
CHLa	0.831	689	930	0.804	945	971	0.842	945	971	0.751	930	971
CHLb	0.552	664	683	0.524	961	982	0.430	532	707	0.283	664	683
CHL	0.801	689	930	0.805	961	971	0.820	961	971	0.698	945	961
CAR	0.830	701	713	0.845	522	634	0.862	511	675	0.792	593	616
CHL/CAR	0.484	789	833	0.534	961	982	0.341	616	695	0.398	616	695
Ψ	0.803	553	593	0.813	563	701	0.712	553	701	0.760	553	701
<i>SSI</i> _(x,y)												
LAI	0.935	605	689	0.921	574	695	0.891	605	625	0.888	553	563
CHLa	0.961	522	701	0.912	593	701	0.807	961	971	0.658	930	971
CHLb	0.794	501	707	0.736	616	701	0.503	910	930	0.371	910	920
CHL	0.963	511	701	0.908	605	701	0.784	961	971	0.601	930	971
CAR	0.837	920	971	0.814	605	625	0.805	563	574	0.773	491	522
CHL/CAR	0.744	812	864	0.899	616	701	0.709	616	701	0.307	625	695
Ψ	0.881	542	701	0.798	593	701	0.744	574	701	0.675	625	634

του CHRIS, ότι δηλαδή ο LAI μπορεί να εκτιμηθεί αξιόπιστα από δείκτες ευρέων καναλιών όπως ο παραδοσιακός NDVI. Μάλιστα, η πρώτη και ευρύτερη περιοχή σημαντικότητας αντανακλά εξ' ορισμού ένα NDVI ευρέων καναλιών (Πίνακας 10) και με κανάλια πιο πλατιά από αυτά των MODIS και SPOT, σχεδόν όμοια σε αυτά των AVHRR. Παρόλα αυτά, μέσα στις περιοχές κόκκινου-πράσινου εμφανίζονται κάποιες μικρότερες περιοχές με εξαιρετικά υψηλούς συντελεστές ($r^2 > 0.9$) που διαφοροποιούνται αναλόγως της κατεύθυνσης παρατήρησης. Η μεγαλύτερη περιοχή εξαιρετικής σημαντικότητας ($r^2 > 0.9$) εμφανίζεται στην +55° γωνία παρατήρησης για NDSI με x: ~ 530–640 nm και y: ~ 670–690 nm. Τα ευρήματα αυτά δηλώνουν ότι παρόλο που ένα NDVI ευρέων καναλιών μπορεί να εκτιμήσει αξιόπιστα τον LAI, δείκτες στενών καναλιών και σε μεγάλες γωνίες παρατήρησης μπορούν να αποδειχτούν πιο αποτελεσματικοί. Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι δείκτες NDSI που εμφάνισαν τους υψηλότερους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) κάθε παραμέτρου που εξετάστηκε. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι δείκτες NDSI με κανάλια x, y κοντινά μεταξύ τους τείνουν να εμφανίζουν μέγιστη σημαντικότητα στον προσδιορισμό του LAI. Είναι επίσης εμφανές ότι στην κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης οι υψηλότεροι συντελεστές εστιάζονται γύρω από τα μήκη κύματος της φόρμουλας του PRI (Σχήμα 57δ). Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι σε κατακόρυφη παρατήρηση δεν υπάρχουν NDSI με εξαιρετικά υψηλούς συντελεστές ($r^2 > 0.9$), υποδεικνύοντας ότι παρατηρήσεις με κάποια κλίση από την κατακόρυφο είναι πιο αποδοτικές στον προσδιορισμό του LAI.

Οι χάρτες ισοϋψών γραμμών των συντελεστών προσδιορισμού των υπόλοιπων οικοφυσιολογικών παραμέτρων (Σχήμα 57ε-κδ) δεν εμφανίζουν τόσο πλατιές περιοχές υψηλής σημαντικότητας όσο αυτοί του LAI. Η σημαντικότητα εντοπίζεται κυρίως σε μικρές περιοχές μηκών κύματος ή ακόμα και σε μεμονωμένους συνδυασμούς καναλιών. Ξεκινώντας με τις χλωροφύλλες, φαντάζει περίεργη η τεράστια διαφορά στις διακυμάνσεις της σημαντικότητας στην



Σχήμα 57. Χάρτες ισοϋψών γραμμών των συντελεστών προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* μέσω των δεικτών τύπου $NDSI_{(x,y)}$ (όπου x, y τα μήκη κύματος στους αντίστοιχους άξονες) από τις τέσσερις κατευθύνσεις παρατήρησης του CHRIS.



Σχήμα 58. Χάρτες ισοϋψών γραμμών των συντελεστών προσδιορισμού (r^2) των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* μέσω των δεικτών τύπου SSI(x,y) (όπου x, y τα μήκη κύματος στους αντίστοιχους άξονες) από τις τέσσερις κατευθύνσεις παρατήρησης του CHRIS.

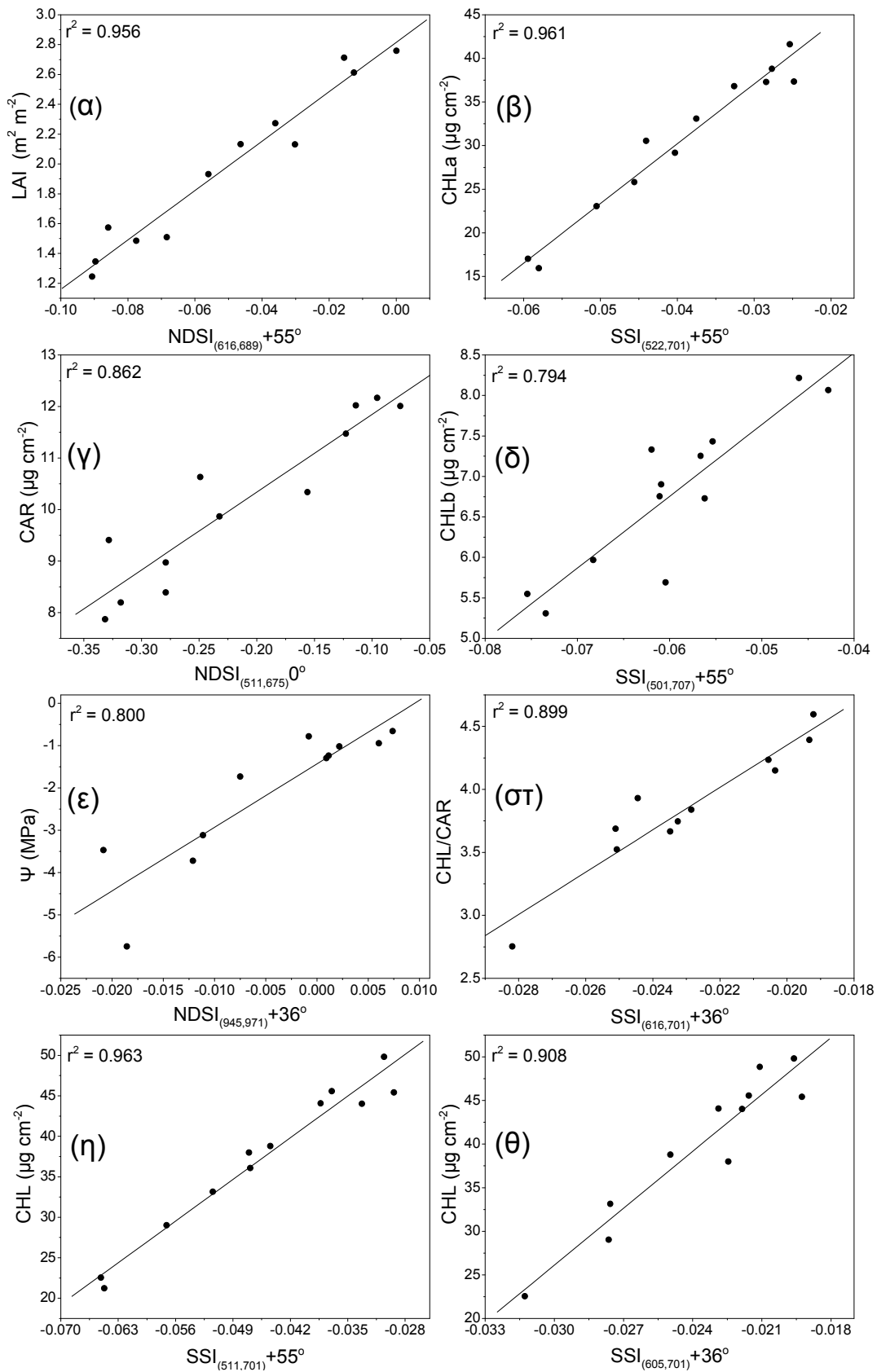
γωνία $+55^\circ$ (Σχήμα 57ε,θ) και όλες τις υπόλοιπες (Σχήμα 57στ-η,ι-ιβ). Στον προσδιορισμό της χλωροφύλλης α (CHLa) (Σχήμα 57ε-η), εμφανίζεται μια σχετικά πλατιά περιοχή σημαντικών συντελεστών για NDSI με x: $\sim 620-710$ nm και y: $\sim 720-1003$ nm στην κατεύθυνση $+55^\circ$, ενώ μόνο μικρότερες περιοχές σημαντικών συντελεστών εμφανίζονται στις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Αντίστοιχα, στον προσδιορισμό της χλωροφύλλης β (Σχήμα 57θ-ιβ), η κατεύθυνση $+55^\circ$ παρουσιάζει μεγαλύτερη σημαντικότητα από τις άλλες κατευθύνσεις. Παρόλο που δεν υπάρχει κανένας δείκτης NDSI που να συσχετίζεται ισχυρά ($r^2 > 0.70$) με την CHLb (Πίνακας 18), οι παρυφές του ερυθρού μεταξύ 701 και 713 nm και NDSI κοντά στο $NDSI_{(532,553)}$ δείχνουν να συνεισφέρουν στον προσδιορισμό της CHLb.

Οι χάρτες σημαντικότητας για τον προσδιορισμό των καροτενοειδών (Σχήμα 57ιγ-ιστ) ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τα πρότυπα που εμφανίστηκαν για τον LAI και την CHLa. Παρόλα αυτά, σε αντιδιαστολή με την CHLa, οι δείκτες NDSI με συνδυασμούς κόκκινων και υπέρυθρων καναλιών εμφανίζουν σχετικά πλατύτερες περιοχές σημαντικότητας για τα CAR σε όλες τις κατευθύνσεις παρατήρησης του CHRIS, με την υψηλότερη σημαντικότητα να εστιάζεται γύρω από τις παρυφές του ερυθρού (red-edge), στην περιοχή 695-707 nm. Οι πιο ενδιαφέροντες συνδυασμοί, από την σκοπιά της διάκρισης των καροτενοειδών από το σύμπλεγμα LAI-CHL, εντοπίζονται στην ορατή περιοχή του φάσματος. Στην κατακόρυφη και $+36^\circ$ κατεύθυνση (Σχήμα 57ιδ,ιε), υψηλοί συντελεστές εμφανίζονται για NDSI με x: $\sim 510 - 550$ nm και y: $\sim 570 - 700$ nm. Παρόλα αυτά, στην κατακόρυφη διεύθυνση εντοπίζεται μία επιπλέον μικρή περιοχή για NDSI με x: $\sim 450-510$ nm και y: $\sim 660-680$ nm που εμφανίζει υψηλή συσχέτιση με τα CAR. Δεδομένου ότι η περιοχή 450-510 nm αντιστοιχεί στο φάσμα απορρόφησης των καροτενοειδών (Lichtenthaler 1987), οι παραπάνω δείκτες φαίνονται κατάλληλοι για την διάκριση και εκτίμηση των καροτενοειδών.

Παρόλο που διάφορες μικρές περιοχές με υψηλά r^2 γύρω από τα κανάλια απορρόφησης του νερού είναι εμφανείς στους χάρτες προσδιορισμού του Ψ (Σχήμα 57ιζ-κ), το γενικό πρότυπο σημαντικότητας που παρουσιάζεται είναι παρόμοιο με αυτό των LAI και CHL. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο αν λάβει κανείς υπ' όψιν την συνδιακύμανση των παραπάνω παραμέτρων, ειδικά για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* (Σχήμα 33γ). Όσον αφορά τον προσδιορισμό του λόγου CHL/CAR μέσω των συνδυασμών NDSI, οι χάρτες ισοϋψών γραμμών (Σχήμα 57κα-κδ) μοιάζουν πολύ με τα πρότυπα της CHLb (Σχήμα 57θ-ιβ). Η κατεύθυνση $+55^\circ$ προσφέρει τις ευρύτερες περιοχές σημαντικότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες παρατήρησης, ενώ σε καμία γωνία δεν εμφανίζονται ισχυρές συσχετίσεις (Πίνακας 18).

Η ανάλυση των πειραματικών συνδυασμών πάνω στην φόρμουλα $SSI_{(x,y)}$

Οι συνδυασμοί SSI υπολογίστηκαν, αναλύθηκαν και εξετάστηκαν στην ίδια φιλοσοφία με τους δείκτες NDSI. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 58, η κατακόρυφη και η -36° κατεύθυνση παρατήρησης δείχνουν τους χαμηλότερους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) για όλες τις παραμέτρους σε σχέση με τις γωνίες πρόσθιας σκέδασης. Όσον αφορά τον προσδιορισμό του LAI μέσω των SSI (Σχήμα 58α-δ), οι συνδυασμοί κόκκινου-υπερύθρου δεν μοιάζουν τόσο αποτελεσματικοί όσο αποδείχθηκαν για τους NDSI. Παρόλα αυτά οι συνδυασμοί κόκκινου-πράσινου εμφανίζουν εντυπωσιακά υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού ($r^2 > 0.9$) μέσω των SSI για τις κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης (Σχήμα 58α,β). Στις κατευθύνσεις αυτές εντοπίζεται μια κοινή περιοχή για SSI με x: $\sim 540 - 620$ nm και y: $\sim 590 - 695$ nm με υψηλή σημαντικότητα. Μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) στις διευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης για τον LAI



Σχήμα 59. Οι βέλτιστες συσχετίσεις (Πίνακας 19) μεταξύ των δεικτών NDSI - SSI και των μετρημένων βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa*.

Πίνακας 19. Οι δείκτες και οι γωνίες παρακολούθησης (z) που παρουσίασαν τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) κάθε μετρημένης βιοφυσικής και βιοχημικής παραμέτρου του *Phlomis fruticosa*. Εξαιρέθηκαν τα αποτελέσματα που οφείλονται στην συμεταβολή των οικοφυσιολογικών παραμέτρων καθώς και αυτά που προέκυψαν τυχαία. Όπου x, y τα κεντρικά μήκη κύματος των καναλιών που χρησιμοποιούνται από κάθε δείκτη. Ο βέλτιστος δείκτης κάθε παραμέτρου παρουσιάζεται με έντονη γραφή.

	Ανακλαστικότητα R_x			Παράγωγος D_x			NDSI _(x,y)				SSI _(x,y)			
	r^2	x	z	r^2	x	z	r^2	x	y	z	r^2	x	y	z
LAI	0.849	675	0°	0.923	654	+55°	0.956	616	689	+55°	0.935	605	689	+55°
CHLa	0.860	689	+55°	0.889	605	+55°	0.831	689	930	+55°	0.961	522	701	+55°
CHLb	0.567	707	+55°	0.589	675	+55°	0.552	664	683	+55°	0.794	501	707	+55°
CHL	0.856	689	+55°	0.865	553	+55°	0.801	689	930	+55°	0.963	511	701	+55°
CAR	0.274	411	+36°	0.766	511	-36°	0.862	511	675	0°	0.805	563	574	0°
CHL/CAR	0.508	701	+55°	0.541	542	+55°	0.452	583	701	+36°	0.899	616	701	+36°
Ψ	0.388	930	+36°	0.766	961	+36°	0.800	945	971	+36°	0.776	945	971	+36°

εμφανίζουν οι διαφορές πράσινων και κίτρινων καναλιών από κανάλια στο ερυθρό, πλησίον του μεγίστου απορρόφησης των χλωροφυλλών (Πίνακας 18).

Σε αντιστοιχία με τα πρότυπα σημαντικότητας των NDSI στον προσδιορισμό των χλωροφυλλών (Σχήμα 57ε-ιβ), οι δείκτες SSI της κατεύθυνσης +55° (Σχήμα 58ε,θ) εμφανίζουν υψηλότερους συντελεστές από τις υπόλοιπες διαθέσιμες γωνίες παρατήρησης (Σχήμα 58στ-η,ι-ιβ). Για τον προσδιορισμό της CHLa, σημαντικοί συντελεστές εμφανίζονται στις περιοχές με συνδυασμούς κόκκινων-πράσινων, κόκκινων-μπλε και υπέρυθρων μηκών κύματος απορρόφησης του νερού. Επίσης, εξαιρετικά υψηλής σημαντικότητας ($r^2 > 0.9$) SSI εμφανίζονται στην κατεύθυνση +55° με x: ~ 450 – 640 nm και y: ~ 570 – 705 nm (Σχήμα 58ε). Αυτή η πλατιά περιοχή δεν εμφανίζεται στις υπόλοιπες γωνίες παρακολούθησης, στις οποίες μόνο κάποιες μικρές περιοχές φασματικών συνδυασμών αποδεικνύονται σημαντικές. Οι τελευταίες εντοπίζονται κυρίως κοντά στην άκρη του ερυθρού προς υπέρυθρο και στα μήκη κύματος που απορροφά το νερό (Σχήμα 58στ-η). Ενδιαφέρον παρουσιάζει μία κοινή και ιδιαίτερης σημασίας φασματική περιοχή, επικεντρωμένη κοντά στα 701 nm, η οποία επικρατεί στον προσδιορισμό και των δύο χλωροφυλλών (CHLa και CHLb), στις κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης (Πίνακας 18).

Οι δείκτες SSI εμφανίζουν μειωμένη αποτελεσματικότητα στον προσδιορισμό της CHLb σε σχέση με την CHLa, κάτι που συνέβη επίσης στην ανάλυση των συνδυασμών NDSI (Πίνακας 18). Ωστόσο, στην ανάλυση των SSI παρουσιάστηκαν κάποιοι ενδιαφέροντες συνδυασμοί στις γωνίες πρόσθιας σκέδασης που χρησιμοποιούν ένα κανάλι στις παρυφές του ερυθρού (701 – 713 nm) και το δεύτερο στο ευρύτερο φάσμα μπλε-πράσινων-κίτρινων μηκών κύματος (Σχήμα 58θ,ι). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 18, οι βέλτιστοι δείκτες για την εκτίμηση των συνολικών χλωροφυλλών (CHL), τουλάχιστον στην ανάλυση των SSI, είναι παρόμοιοι με τους δείκτες που προέκυψαν από την ανάλυση των CHLa και CHLb ξεχωριστά.

Οι χάρτες ισούψων γραμμών των συντελεστών προσδιορισμού των CAR και Ψ μέσω των δεικτών SSI (Σχήμα 58ιγ-κ) εμφανίζουν το ίδιο μοτίβο με την ανάλυση NDSI, ακολουθώντας ξανά τα πρότυπα των LAI και CHL. Το σημείο της ανάλυσης SSI για τον προσδιορισμό των CAR που αξίζει να σημειωθεί είναι οι υψηλής σημαντικότητας SSI από την -36° γωνία που βασίζονται στα μπλε μήκη κύματος (491 – 552 nm), τα οποία συμπίπτουν με τη φασματική περιοχή απορρόφησης των καροτενοειδών. Τέλος, όσον αφορά τον λόγο CHL/CAR, η διακύμανση των σημαντικών SSI μοιάζει με αυτή του προσδιορισμού της CHLb, όπως επίσης συνέβη και για τους NDSI. Στην

γωνία $+55^\circ$ μια σημαντική περιοχή φασματικών συνδυασμών εμφανίζεται γύρω από τον δείκτη $SSI_{(812,864)}+55^\circ$, παραπέμποντας στην εξέταση της πρώτης παραγώγου του φάσματος ανακλαστικότητας και στην αντίστοιχη κορυφή (Σχήμα 56στ). Επιπροσθέτως, σημαντικές περιοχές εμφανίζονται στις παρυφές του ερυθρού (701-713 nm), κυρίως γύρω από τον δείκτη $SSI_{(616,701)}+55^\circ$ (Σχήμα 58κβ-κγ).

Διάκριση βιοφυσικών και βιοχημικών δεικτών

Λόγω της έντονης συνδιακύμανσης των παραμέτρων LAI-χλωροφύλλες-καροτενοειδή στο οικοσύστημα που μελετήθηκε από τον υπερφασματικό CHRIS, καθίσταται πολύ δύσκολη η διάκριση των βιοφυσικών (εξαρτώμενοι κυρίως από τον LAI) από τους βιοχημικούς (εξαρτώμενοι κυρίως από τις χρωστικές φύλλου) δείκτες. Επιπροσθέτως, ο LAI και οι χλωροφύλλες έχουν παρόμοιες επιδράσεις στην ανακλαστικότητα θόλου (Jacquemoud et al. 1996, Zarco-Tejada et al. 2001), ειδικά στην φασματική περιοχή από το πράσινο (550 nm) έως τις παρυφές του ερυθρού (red-edge, 750 nm). Δεδομένου ότι η ανάλυση προσδιορισμού του LAI αποκάλυψε σημαντικό ποσοστό δεικτών που σχετίζονται με την παράμετρο αυτή, είναι σχετικά δύσκολο να εντοπιστούν δείκτες που να μένουν ανεπηρέαστοι από τις διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών του θόλου. Εντούτοις, με αναλυτικότερη εκτίμηση των αποτελεσμάτων, εντοπίζονται δείκτες στις παρυφές των περιοχών σημαντικότητας του LAI (κυρίως στις αναλύσεις παραγώγων, NDSI και SSI) που αποδεικνύονται πολύ σημαντικοί για τον προσδιορισμό βιοχημικών παραμέτρων.

Ο δείκτης $D_{675}+55^\circ$ αποδίδει $r^2=0.810$ στον προσδιορισμό του της χλωροφύλλης α, ενώ αποδίδει επίσης την αιχμή σημαντικότητας στον προσδιορισμό της χλωροφύλλης β ($r^2=0.589$) (Σχήμα 56δ). Επομένως, ο συντελεστής προσδιορισμού των συνολικών χλωροφυλλών στα 675 nm φτάνει τα 0.827, κοντά στο μέγιστο συντελεστή προσδιορισμού που εμφανίζεται στα 553 nm (Πίνακας 16). Ωστόσο, οι τιμές r^2 στον προσδιορισμό του LAI φτάνουν τα 0.878 και 0.683 για τις παραγώγους στα 553 και 675 nm αντίστοιχα, υποδεικνύοντας ότι η παράγωγος στα 675 nm επηρεάζεται λιγότερο από τις δομικές διακυμάνσεις του θόλου και επομένως αποτελεί δυνητικό δείκτη χλωροφυλλών μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας και ακρίβειας. Στην ίδια ανάλυση, οι δείκτες D_{411} και D_{511} στην κατεύθυνση -36° εμφανίστηκαν ως κατάλληλοι για την εκτίμηση των καροτενοειδών. Οι παραπάνω δείκτες εμφανίζουν συγχρόνως υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού για τα καροτενοειδή και χαμηλούς για τον LAI και τις χλωροφύλλες (Σχήμα 56). Συνεπώς, οι προϋποθέσεις που εκπληρώνουν οι δείκτες D_{411} και D_{511} μπορούν να θεωρηθούν ως δείγμα της επιθυμητής διάκρισης των καροτενοειδών από τις δομικές διακυμάνσεις του θόλου και την απορρόφηση των χλωροφυλλών (Πίνακας 19).

Μια σημαντική παρατήρηση στους χάρτες ισοϋψών γραμμών των αναλύσεων NDSI και SSI σχετικά με την διάκριση των συνδυασμένων επιδράσεων LAI-χλωροφυλλών στο σήμα ανακλαστικότητας, είναι ότι τα όρια της σημαντικότητας των δεικτών που συνδυάζουν πράσινα και κόκκινα κανάλια CHRIS φτάνουν τα 695 nm για τον προσδιορισμό του LAI (Σχήματα 57α-δ, 58α-δ), ενώ στον προσδιορισμό των χλωροφυλλών (Σχήματα 57ε-ιβ, 58ε-ιβ) η σημαντικότητα φτάνει στα 701 nm (CHLa) και επεκτείνεται έως τα 713 nm (CHLb). Επιπλέον, οι δείκτες NDSI και SSI που χρησιμοποιούν τα κανάλια στις παρυφές του ερυθρού (701 – 713 nm) φαίνεται να είναι ιδιαίτερης σημασίας για τον προσδιορισμό των χλωροφυλλών, μιας και αποδίδουν πολύ υψηλούς r^2 . Από την ανάλυση SSI συμπεραίνεται ότι οι δείκτες $SSI_{(511,701)}+55^\circ$ και $SSI_{(605,701)}+36^\circ$ είναι οι βέλτιστοι προσδιοριστές των συνολικών χλωροφυλλών (Πίνακας 18, Σχήμα 59). Ωστόσο, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι τα r^2 στον προσδιορισμό του LAI από τους παραπάνω δείκτες είναι 0.808 και 0.518 αντίστοιχα, συμπεραίνεται ότι ο δείκτης $SSI_{(605,701)}+36^\circ$ παρουσιάζει μεγαλύτερη

ανεξαρτησία από τις δομικές διακυμάνσεις του θόλου και επομένως μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των χλωροφυλλών.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στην υπόθεση ότι τα κανάλια στα άκρα του ερυθρού και στις αρχές του υπερύθρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό ενός δείκτη που θα είναι πρωτίστως ευαίσθητος στις διακυμάνσεις των χλωροφυλλών και θα επηρεάζεται λιγότερο από τα δομικά χαρακτηριστικά και διακυμάνσεις του θόλου. Δεδομένου ότι τα κανάλια τέτοιων δεικτών κυμαίνονται στα φασματικά όρια των επιδράσεων LAI και χλωροφυλλών, όπως αντικατοπτρίζονται από τις περιοχές σημαντικότητας των αναλύσεων μας, μπορεί επίσης να υποθεθεί ότι η διαθεσιμότητα στενότερων καναλιών ($\text{FWHM} < 10 \text{ nm}$) στην περιοχή των παρυφών του ερυθρού θα βοηθούσε στην διάκριση της βιοχημικής σύνθεσης από την δομή του θόλου.

Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική, ο δείκτης $\text{NDSI}_{(511,675)}^\circ$ μοιάζει αρκετά αποτελεσματικός για ακριβή εκτίμηση των καροτενοειδών ($r^2 = 0.862$), μιας και οι συντελεστές προσδιορισμού του LAI και των χλωροφυλλών από τον ίδιο δείκτη είναι 0.729 και 0.645 αντίστοιχα. Όσον αφορά τους προτεινόμενους από την βιβλιογραφία δείκτες βλάστησης, παρατηρείται ότι οι δείκτες που συνδυάζουν κόκκινα με μπλε κανάλια, όπως οι BRI και NPCI (Πίνακας 17), αποδίδουν καλές συσχετίσεις με τα καροτενοειδή και φτωχότερες σχέσεις με τον LAI και τις χλωροφύλλες. Συμπερασματικά, οι παραπάνω δείκτες πιθανόν να αποδίδουν καλύτερα από τον PRI2 (Πίνακας 16) στην εκτίμηση των καροτενοειδών.

Εκτίμηση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) μέσω υπερφασματικών δεδομένων στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*

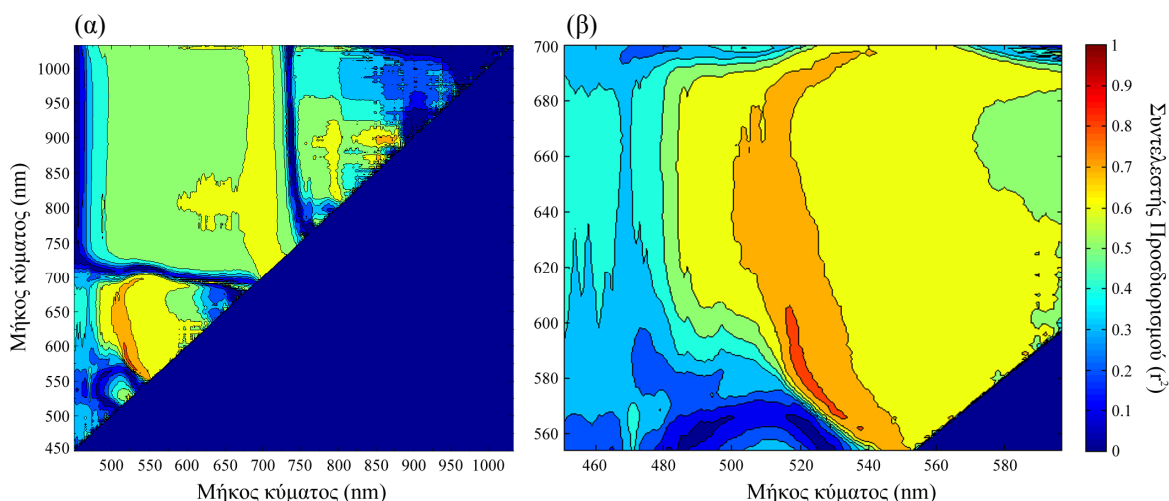
Εξέταση σε επίπεδο φύλλου

Πριν την εξέταση των δυνατοτήτων του φάσματος από τον δορυφόρο CHRIS/PROBA στην εκτίμηση της παραγωγικότητας σε επίπεδο θόλου, διεξήχθη ανάλυση των δεδομένων στο επίπεδο του φύλλου. Χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις ανακλαστικότητας φύλλου στο πεδίο και οι ταυτόχρονες μετρήσεις φωτοσύνθεσης σε επίπεδο φύλλου (Markos & Kyparissis 2011) που διεξήχθησαν για την βαθμονόμηση και λειτουργία του μοντέλου MANTIS για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Υπολογίσθηκαν όλοι οι συνδυασμοί NDSI από τα φάσματα ανακλαστικότητας φύλλου ακολουθώντας την ίδια μέθοδο που περιγράφηκε για τον υπολογισμό των NDSI από τα φάσματα του CHRIS, με τη μόνη διαφορά ότι η φασματική ανάλυση στο επίπεδο φύλλου είναι 1 nm. Στη συνέχεια όλοι οι συνδυασμοί NDSI εξετάστηκαν ως προς την συνάφεια τους με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ) σε επίπεδο φύλλου. Για τον υπολογισμό της παραπάνω παραμέτρου από τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης φύλλου χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

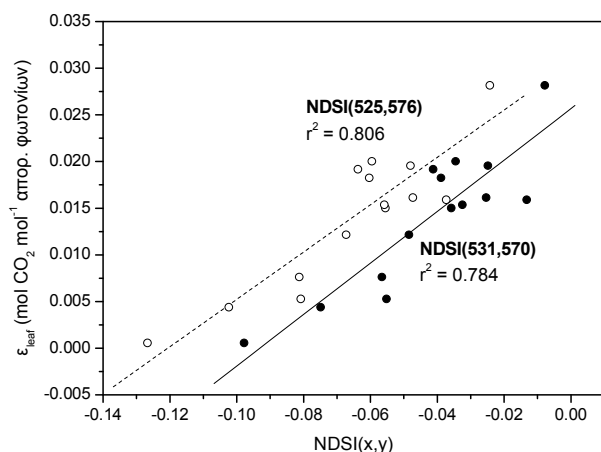
$$\epsilon_{leaf} = \frac{A_{leaf}}{\alpha * PAR} \quad (31)$$

Όπου A_{leaf} η φωτοσύνθεση ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$), α η απορροφητικότητα του φύλλου (σταθερά στα 0.85) και PAR η προσπίπτουσα φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία στην επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{mol φωτονίων m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$).

Οι συντελεστές προσδιορισμού (r^2) της ϵ από τα διάφορα NDSI αποτυπώθηκαν σε χάρτη ισοϋψών γραμμών χρωματικής διαβάθμισης για την εξέταση των αποτελεσματικών NDSI (Σχήμα 60). Είναι εμφανές ότι το πρότυπο σημαντικότητας εστιάζεται στο ορατό μέρος του φάσματος με τους υψηλότερους συντελεστές στα πράσινα μήκη κύματος. Οι δείκτες NDSI με x: $\sim 520 - 530 \text{ nm}$ και y: $\sim 560 - 600 \text{ nm}$ εμφανίζουν τους υψηλότερους συντελεστές προσδιορισμού όπως αποτυπώνονται στο Σχήμα 60β με κόκκινο χρώμα. Είναι βεβαίως ιδιαίτερα ενδιαφέρον ότι αυτή η



Σχήμα 60. (α) Χάρτης ισοϋψών γραμμών των συντελεστών προσδιορισμού (r^2) της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του *Phlomis fruticosa* σε επίπεδο φύλλου (ϵ_{leaf}) από τους δείκτες τύπου NDSI_(x,y) (όπου x, y τα μήκη κύματος στους αντίστοιχους άξονες) όπως υπολογίστηκαν από τα μετρημένα στο πεδίο φάσματα ανακλαστικότητας φύλλου με φασματική ανάλυση 1 nm. (β) Η εστίαση του χάρτη ισοϋψών γραμμών στο ορατό φάσμα.



Σχήμα 61. Συσχετίσεις μεταξύ της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του *Phlomis fruticosa* σε επίπεδο φύλλου (ϵ_{leaf}) και των δεικτών PRI ($\text{NDSI}_{(531,570)}$) και $\text{NDSI}_{(525,576)}$ όπως προκύπτουν από τα μετρημένα φάσματα ανακλαστικότητας φύλλου.

περιοχή περιέχει την πρωτότυπη φόρμουλα του δείκτη PRI, στον οποίο αποδίδονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που του δίνουν την ικανότητα να αποτυπώνει τις μεταβολές της λειτουργικότητας της φωτοσυνθετικής συσκευής σε ημερήσια και εποχιακή κλίμακα (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1992, Gamon and Qiu 1999, Penuelas et al. 1995a, Stylinski et al. 2002). Στην παρούσα ανάλυση εξετάζονται οι εποχιακές διακυμάνσεις του φάσματος φύλλου σε σχέση με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ_{leaf}), καταλήγοντας στις συσχετίσεις που φαίνονται στο Σχήμα 61. Συγκρίνονται ο δείκτης NDSI που εμφάνισε τον υψηλότερο συντελεστή

προσδιορισμού (r^2) με την πρωτότυπη φόρμουλα του PRI. Όπως αναμενόταν, η σχέση του $\text{NDSI}_{(525,576)}$ με την ϵ_{leaf} εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του PRI, αφού χρησιμοποιεί μήκη κύματος που διαφέρουν μόνο 6 nm τόσο από το μήκος κύματος απορρόφησης (531 nm) όσο και από το μήκος κύματος αναφοράς (570 nm) του PRI. Επιβεβαιώνεται η ιδιαιτερότητα του PRI ως δείκτης της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) σε επίπεδο φύλλου και εποχιακή κλίμακα, καθώς επίσης αποτυπώνεται και η συμπεριφορά του σε σχέση με τις αποκλίσεις από την πρωτότυπη φόρμουλα (531, 570 nm) για το είδος *Phlomis fruticosa* (Σχήμα 60).

Παρόλα αυτά, μέσω της παρούσας επεξεργασίας δεδομένων προκύπτουν και κάποια παράδοξα αλλά δυνητικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Μία περιοχή λιγότερο διακριτή στον χάρτη ισουψών γραμμών (Σχήμα 60α) εμφανίζει επίσης τάσεις προς συσχέτιση με την ϵ . Η περιοχή αυτή βρίσκεται στα NDSI που χρησιμοποιούν υπέρυθρα μήκη κύματος με x: ~ 850 – 855 nm και y: ~ 855 – 860 nm. Το $\text{NDSI}_{(855,857)}$ μάλιστα εμφανίζει αρκετά υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ($r^2 = 0.817$). Αυτό αποτελεί ιδιαίτερα περίεργο αποτέλεσμα αφού η περιοχή του φάσματος που χρησιμοποιείται από τον παραπάνω δείκτη δεν επηρεάζεται από κάποιο στοιχείο απορρόφησης παρά μόνο από την εσωτερική και εξωτερική δομή του φύλλου.

Εξέταση σε επίπεδο θόλου

Για την εξέταση της δυνατότητας εκτίμησης της παραγωγικότητας μέσω των δορυφορικών παρατηρήσεων του υπερφασματικού αισθητήρα CHRIS, χρησιμοποιήθηκαν οι εκτιμήσεις του μοντέλου φωτοσύνθεσης θόλου MANTIS (Kyparissis et al. 2007, Markos & Kyparissis 2011). Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν ιδιαίτερα λεπτομερείς εκτιμήσεις του μοντέλου, το οποίο έτρεξε με βήμα 30 λεπτών και δεδομένα εξόδου την φωτοσύνθεση θόλου (A_{can}) και την απορροφούμενη ακτινοβολία (APAR). Οι τιμές της αποδοτικότητας χρήσης φωτός για τον θόλο (ϵ_{can}) υπολογίστηκαν βάσει της εξίσωσης:

$$\epsilon_{\text{can}} = \frac{A_{\text{can}}}{\text{APAR}} \quad (32)$$

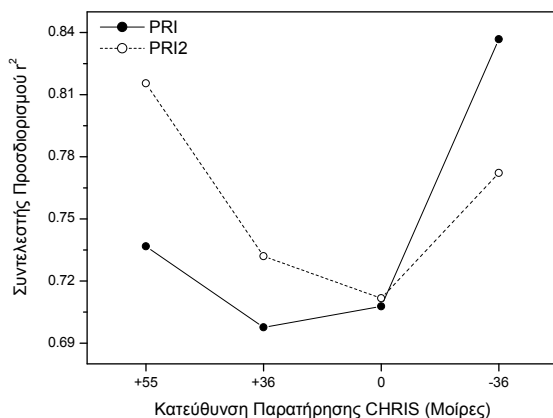
Πίνακας 20. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) μεταξύ των προτεινόμενων δεικτών (Πίνακας 10) και της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του θόλου (ϵ_{can}) του *Phlomis fruticosa* για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA. Οι συσχετίσεις που δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα ($p > 0.01$) είναι σκιασμένες. Οι συσχετίσεις που παρουσιάζουν $r^2 > 0.7$ τονίζονται με έντονη γραφή.

	+55°	+36°	0°	-36°
<i>Πράσινης βλάστησης, ευρέων καναλιών</i>				
EVI	0.69	0.58	0.55	0.57
Green NDVI	0.49	0.40	0.44	0.46
NDVI	0.71	0.57	0.58	0.58
SR	0.53	0.46	0.46	0.45
<i>Πράσινης βλάστησης, στενών καναλιών</i>				
CARI	0.27	0.39	0.43	0.00
GI	0.76	0.68	0.59	0.61
GVI	0.78	0.71	0.63	0.65
mCAI	0.72	0.66	0.64	0.62
mCAI2	0.75	0.61	0.60	0.57
MCARI	0.72	0.57	0.53	0.52
MCARI/OSAVI	0.73	0.60	0.57	0.57
MCARI2	0.69	0.61	0.63	0.62
MCARI2/OSAVI	0.77	0.69	0.68	0.68
mNDVI	0.73	0.65	0.61	0.66
mNDVI2	0.75	0.72	0.68	0.73
MSAVI	0.67	0.55	0.52	0.53
mSR	0.54	0.52	0.40	0.50
mSR2	0.70	0.67	0.62	0.67
MTCI	0.16	0.08	0.00	0.02
mTVI	0.73	0.60	0.57	0.57
mTVI/OSAVI	0.77	0.69	0.68	0.68
NDVI	0.73	0.59	0.59	0.59
NDVI2	0.74	0.67	0.66	0.67
OSAVI	0.72	0.58	0.57	0.58
RDVI	0.71	0.58	0.55	0.56
REP	0.32	0.51	0.72	0.61
SIP1	0.73	0.70	0.71	0.73
SIP12	0.68	0.66	0.69	0.71
SPVI	0.69	0.57	0.53	0.54
SR	0.55	0.46	0.45	0.45
SR1	0.66	0.57	0.56	0.57
SR2	0.61	0.51	0.50	0.50
SR3	0.46	0.43	0.46	0.47
SR4	0.78	0.73	0.67	0.68
TCARI	0.80	0.64	0.62	0.61
TCARI/OSAVI	0.69	0.65	0.71	0.71
TSAVI	0.72	0.57	0.56	0.57
TVI	0.74	0.64	0.61	0.59
TVI/OSAVI	0.78	0.77	0.76	0.73
VOG	0.68	0.59	0.60	0.62
VOG2	0.64	0.59	0.59	0.62
<i>Χρωστικών φύλλου (καροτενοειδή, ανθοκυανίνες)</i>				
ARI	0.33	0.41	0.30	0.43
BGI	0.00	0.06	0.00	0.03
BRI	0.36	0.48	0.49	0.71
CRI	0.07	0.19	0.23	0.09
CRI2	0.01	0.03	0.05	0.00
Red/Green	0.77	0.74	0.68	0.68
RGI	0.77	0.75	0.68	0.69
<i>Στρες</i>				
CI	0.51	0.42	0.35	0.41
DI	0.34	0.52	0.55	0.45
DPR2	0.03	0.44	0.46	0.43
DREP	0.71	0.56	0.52	0.51
LIC	0.15	0.21	0.36	0.42
NPCI	0.13	0.24	0.42	0.44
NPQI	0.19	0.01	0.27	0.04
PRI	0.74	0.70	0.71	0.84
PRI2	0.82	0.73	0.71	0.77
PRI515	0.16	0.36	0.37	0.32
PSRI	0.79	0.75	0.71	0.75
SR5	0.22	0.00	0.15	0.20
SR6	0.75	0.65	0.38	0.46
SRPI	0.17	0.25	0.38	0.46
<i>Υδατικής κατάστασης</i>				
fWBI	0.41	0.03	0.12	0.09
WI	0.72	0.46	0.54	0.62

Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της ϵ_{can} ακριβώς την ώρα της απεικόνισης από τον δορυφόρο, η οποία κυμαίνεται από 10:30 π.μ. έως 11:45 π.μ., τοπική χειμερινή ώρα. Στην παρούσα ανάλυση λοιπόν, οι εκτιμήσεις του μοντέλου MANTIS αναφέρονται στο επίπεδο του θόλου και συσχετίζονται με τις παρατηρήσεις του δορυφόρου CHRIS/PROBA, οι οποίες είναι κλίμακας οικοσυστήματος μιας και η διακριτικότητα (36 m) δεν επιτρέπει την διάκριση των θάμνων. Οπότε, χρησιμοποιείται η ολοκληρωμένη ανακλαστικότητα ολόκληρης της περιοχής μετρήσεων. Παρόλα αυτά, η περιοχή που έχει επιλεγεί είναι πυκνή και ομοιογενής οπότε με αυτό τον τρόπο εξισορροπείται η διαφορά κλίμακας.

Σε πρώτη φάση όλοι οι δείκτες βλάστησης που έχουν εξαχθεί από τις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA (Πίνακας 10) ελέγχονται ως προς την συνάφεια τους με την ϵ_{can} (Πίνακας 20). Παρατηρείται ότι είναι πολλοί δείκτες που εμφανίζουν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις με την ϵ_{can} σε όλες τις κατευθύνσεις παρατήρησης. Οι δείκτες πράσινης βλάστησης ευρέων καναλιών παρουσιάζουν χαμηλούς συντελεστές προσδιορισμού της ϵ_{can} , ενώ οι δείκτες στενών καναλιών εμφανίζουν υψηλότερους συντελεστές, ειδικά στην κατεύθυνση +55°, με μέγιστο στον δείκτη TCARI ($r^2 = 0.80$). Όπως και στην ανάλυση των βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* (Πίνακας 17), οι δείκτες χρωστικών φύλλου δεν αποδείχθηκαν χρήσιμοι για τον προσδιορισμό της ϵ_{can} , εκτός από αυτούς που συνδέουν κόκκινα και πράσινα κανάλια (Red/Green και RGI).

Όσον αφορά τους δείκτες στρες, ξεχωρίζουν, όπως ήταν αναμενόμενο, οι δείκτες PRI. Ο δείκτης PRI που χρησιμοποιεί το κανάλι στα 515 nm για αναφορά δεν εμφανίζει συσχέτιση με την ϵ_{can} σε καμία κατεύθυνση παρατήρησης. Ο δείκτης αυτός εισήχθη στην παρούσα ανάλυση μιας και αποδείχθηκε αποτελεσματικός στον εντοπισμό υδατικού



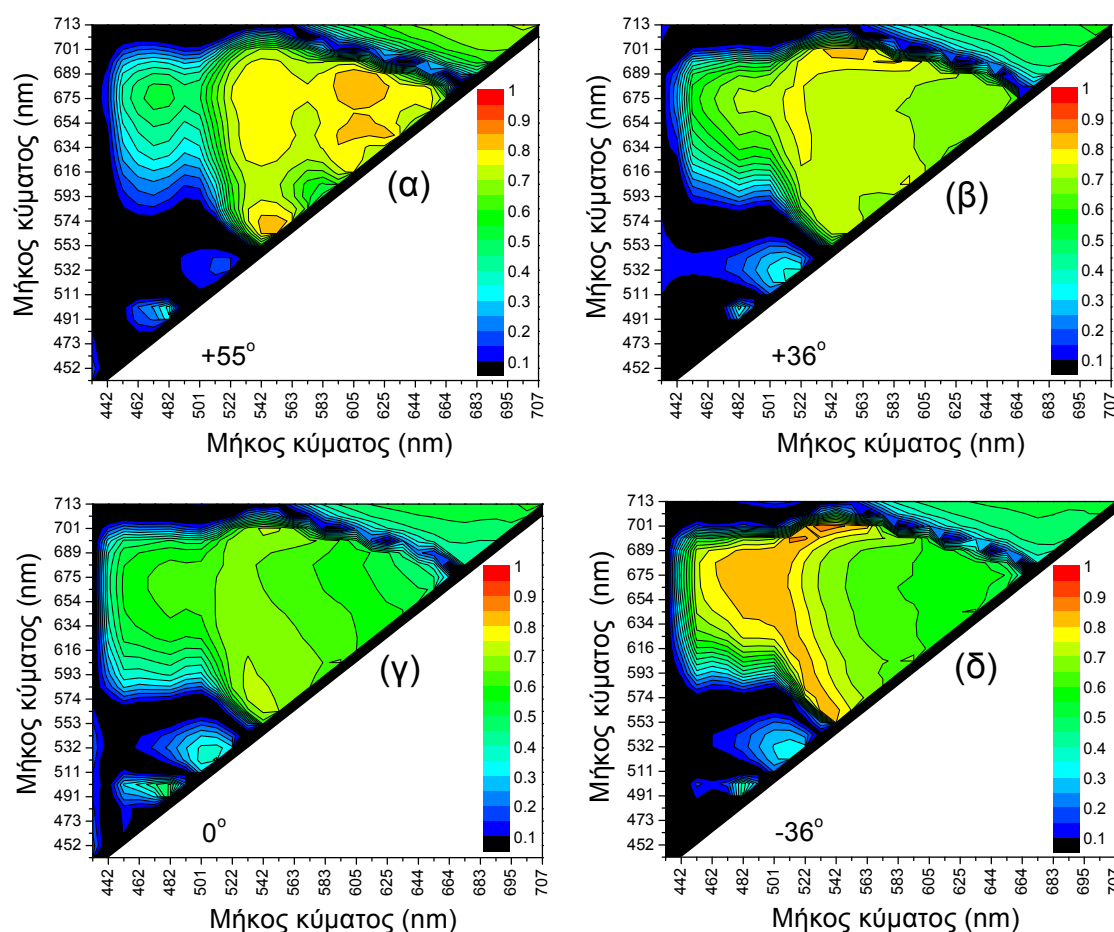
Σχήμα 62. Οι συντελεστές προσδιορισμού (r^2) της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του θόλου (ϵ_{can}) για το *Phlomis fruticosa* μέσω της διαδεδομένης και της εναλλακτικής (PRI2) φόρμουλας PRI για κάθε κατεύθυνση παρατήρησης του CHRIS/PROBA.

στρες και ποιότητας φρούτων μέσω δεδομένων υψηλής διακριτικότητας της εναέριας πλατφόρμας (βλέπε επόμενο κεφάλαιο). Παρόλα αυτά, δεν φαίνεται αποτελεσματικός στον εντοπισμό των εποχιακών διακυμάνσεων της αποδοτικότητας χρήσης φωτός στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Οι άλλες δύο προτεινόμενες φόρμουλες PRI (PRI και PRI2), που χρησιμοποιούν το πιο διαδεδομένο μήκος κύματος εντοπισμού της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών (531 nm) και ένα μετατοπισμένο κατά 8 nm (539 nm), με κοινή αναφορά τα 570 nm, παρουσιάζουν πολύ δυνατές συσχετίσεις με την ϵ_{can} . Εμφανίζουν μάλιστα τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) του

συνόλου των δεικτών που εξετάστηκαν για τις γωνίες $+55^\circ$ και -36° ($r^2 = 0.82$ και $r^2 = 0.84$ αντίστοιχα).

Απ' ό,τι φαίνεται, η κατεύθυνση παρατήρησης επηρεάζει σημαντικά τις αποδόσεις των δεικτών στον εντοπισμό της ϵ_{can} . Αυτό είναι εμφανές στους συντελεστές προσδιορισμού πολλών από τους εφαρμοσμένους δείκτες, οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντικές συσχετίσεις μόνο στις κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης (π.χ. TCARI, NDVI), είτε μόνο στην κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης (π.χ. BRI). Επίσης, είναι εμφανής η εκδήλωση μεγαλύτερων συντελεστών προσδιορισμού στις μεγάλες γωνίες παρατήρησης συγκριτικά με την κατακόρυφη. Το τελευταίο φαινόμενο παρουσιάζεται με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στους δύο δείκτες PRI. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 62, ο διαδεδομένος PRI εμφανίζει μέγιστο r^2 στην κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης (-36°), ενώ στην κατακόρυφη και πρόσθιας σκέδασης κατευθύνσεις οι συντελεστές είναι αρκετά χαμηλότεροι. Αντιθέτως, ο δείκτης PRI2, ο οποίος χρησιμοποιεί μεγαλύτερο μήκος κύματος για τον εντοπισμό της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών, εμφανίζει μέγιστο r^2 στην μεγαλύτερη γωνία πρόσθιας σκέδασης ($+55^\circ$). Και για τους δύο PRI πάντως, τα χαμηλότερα r^2 εμφανίζονται στις γωνίες $+36^\circ$ και 0° . Παρατηρείται λοιπόν μια μετατόπιση του βέλτιστου μήκους κύματος εκτίμησης της ϵ_{can} στην φόρμουλα του PRI ανάλογα με την κατεύθυνση παρατήρησης.

Για την λεπτομερή μελέτη της συμπεριφοράς των δεικτών τύπου NDSI σε σχέση με την ϵ_{can} εξετάστηκε το σύνολο των NDSI που προκύπτουν από τα κανάλια του ορατού φάσματος του CHRIS. Οι συντελεστές προσδιορισμού (r^2) προβάλλονται σε χάρτες ισοϋψών γραμμών για την σύγκριση των αποδόσεων των δεικτών ανά κατεύθυνση παρατήρησης (Σχήμα 63). Παρατηρούνται έντονες διαφορές του προτύπου σημαντικότητας για κάθε κατεύθυνση. Στην κατεύθυνση $+55^\circ$ (Σχήμα 63α) εντοπίζονται δύο έντονες περιοχές σημαντικότητας, η μία περιέχει τον δείκτη PRI2 (NDSI με x: $\sim 540 - 555$ nm και y: $\sim 565 - 575$ nm), ενώ η δεύτερη βρίσκεται σε NDSI που συνδυάζουν κανάλια στην ερυθρή περιοχή του φάσματος. Το μέγιστο r^2 παρουσιάστηκε στο NDSI_(605,689), με επίπεδο σημαντικότητας συγκρίσιμο με τον PRI2 (Πίνακας 21). Στην κατεύθυνση $+36^\circ$ (Σχήμα 63β), η περιοχή γύρω από τις φόρμουλες των PRI είναι εμφανώς μικρότερης σημασίας· εμφανίζεται όμως μία δεύτερη περιοχή NDSI που συμπίπτει στα x με την περιοχή της $+55^\circ$ που περιέχει το μετατοπισμένο κανάλι του PRI2 (x: $\sim 540 - 555$ nm), αλλά με y στις παρυφές



Σχήμα 63. Χάρτες ισοϋψών γραμμών των συντελεστών προσδιορισμού (r^2) της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του *Phlomis fruticosa* σε επίπεδο θόλου (ϵ_{can}) από τους δείκτες τύπου $NDSI_{(x,y)}$ (όπου x, y τα μήκη κύματος στους αντίστοιχους άξονες), όπως υπολογίστηκαν από τα κανάλια του CHRIS στη ορατή περιοχή του φάσματος και από τις τέσσερις κατευθύνσεις παρατήρησης.

του ερυθρού (red-edge) με κεντρικό $\lambda = 701$ nm. Στην κατακόρυφη κατεύθυνση παρατήρησης (Σχήμα 63γ), όλοι οι συνδυασμοί $NDSI$ είναι χαμηλότερης σημασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες. Παρατηρούνται ωστόσο πιο αχνά δύο περιοχές, η μία γύρω από τον PRI και η δεύτερη στον PRI2 σε συνδυασμό με το κανάλι στα 701 nm (θα αναφέρεται από δω και στο εξής ως $PRI2_{701}$).

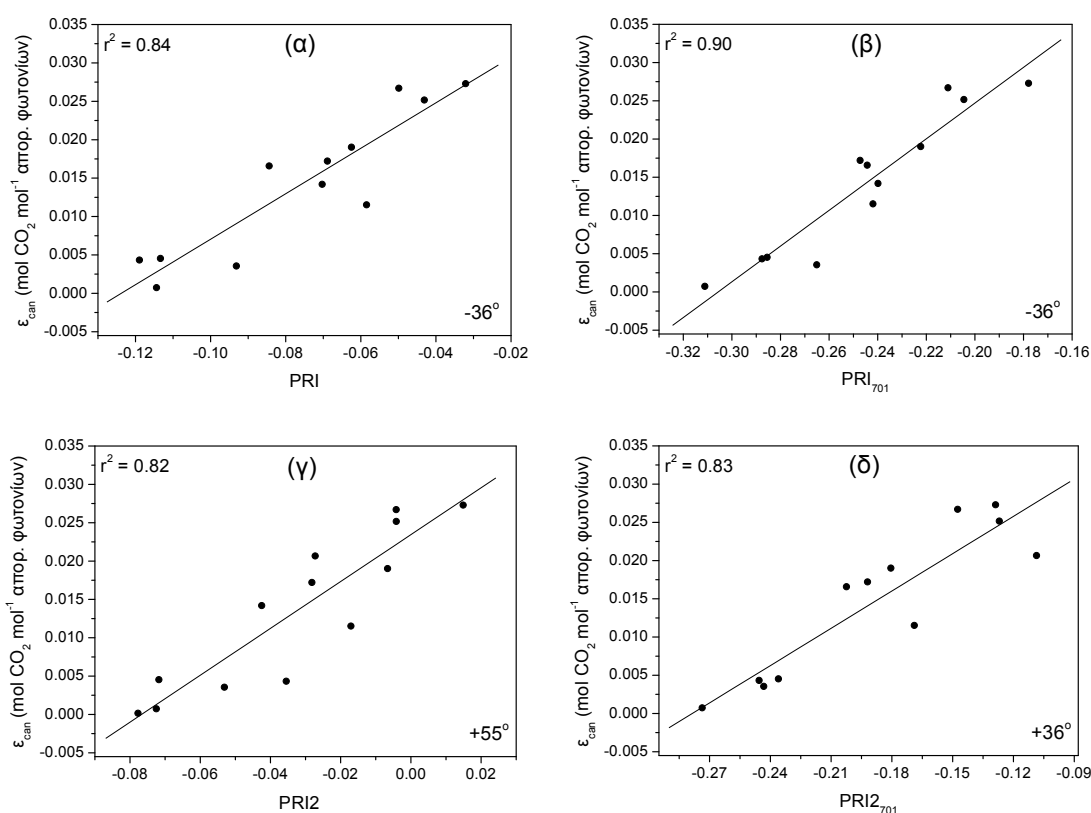
Τέλος, η μόνη διαθέσιμη κατεύθυνση οπίσθιας σκέδασης προς ανάλυση (-36°) εμφανίζει τα πιο ενδιαφέροντα και σημαντικά αποτελέσματα. Κατ' αρχήν, είναι αξιοσημείωτη η ομοιότητα του προτύπου σημαντικότητας της γωνίας -36° (Σχήμα 63δ) με αυτό που προέκυψε από την ανάλυση σε επίπεδο φύλλου (Σχήμα 60β). Με πορτοκαλί χρώμα στο Σχήμα 63δ παρατηρείται η περιοχή υψηλής σημαντικότητας που περιέχει την διαδεδομένη φόρμουλα του PRI και εκτείνεται σε $NDSI$ με όλο και χαμηλότερα x (έως 470 nm) και συγχρόνως σε όλο και υψηλότερα y (έως 701 nm). Παρόλη τη σημαντική απόδοση του PRI σε αυτή την κατεύθυνση παρατήρησης, οι επιδόσεις κορυφώνονται σε διαφορετική περιοχή και αυτή είναι πάλι σε συνδυασμό με το κανάλι στις παρυφές του ερυθρού (701 nm). Το $NDSI_{(532,701)-36^\circ}$ παρουσιάζει το μέγιστο συντελεστή προσδιορισμού ($r^2=0.90$) σε αυτή την κατεύθυνση (Πίνακας 21) και είναι βεβαίως ένας δείκτης που συνδυάζει το διαδεδομένο μήκος κύματος εντοπισμού της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών – που χρησιμοποιεί ο PRI – και το κανάλι στις παρυφές του ερυθρού που όπως

Πίνακας 21. Οι προτεινόμενοι δείκτες (Πίνακας 10) και οι δείκτες $NDSI_{(x,y)}$ που εμφάνισαν τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού (r^2) της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του *Phlomis fruticosa* σε επίπεδο θόλου (ϵ_{can}) για τις τέσσερις γωνίες παρατήρησης του CHRIS/PROBA. Όπου x, y τα κεντρικά μήκη κύματος των καναλιών που χρησιμοποιούνται από κάθε δείκτη.

	r^2	Δείκτης	NDSI		
			r^2	x	y
+55°	0.82	PRI2	0.84	605	689
+36°	0.77	TVI/OSAVI	0.84	553	701
0°	0.76	TVI/OSAVI	0.72	532	583
-36°	0.84	PRI	0.90	532	701

φάνηκε στις αναλύσεις των βιοχημικών παραμέτρων του *Phlomis fruticosa* παίζει ιδιαίτερο ρόλο στον εντοπισμό και διάκριση των φωτοσυνθετικών χρωστικών (Πίνακας 19). Ο δείκτης αυτός θα αναφέρεται ως PRI_{701} .

Συνολικά, η παρούσα ανάλυση ενισχύει την έρευνα που γίνεται πάνω στην εφαρμογή του PRI σε επίπεδο θόλου, ή ακόμα και οικοσυστήματος, για την απ' ευθείας εκτίμηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων και προσθέτει σημαντικά στοιχεία όσον αφορά τις επιδράσεις της γεωμετρίας των παρατηρήσεων στην συμπεριφορά του δείκτη. Αν και η πιο διαδεδομένη κατεύθυνση παρατήρησης των δορυφορικών αισθητήρων είναι η κατακόρυφη, είναι εμφανές ότι αυτή η κατεύθυνση έχει τις χαμηλότερες αποδόσεις. Αποδεικνύεται ότι οι



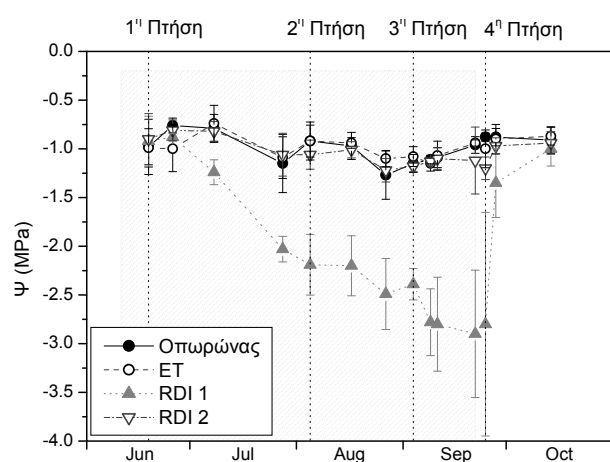
Σχήμα 64. Οι συσχετίσεις μεταξύ της αποδοτικότητας χρήσης φωτός του *Phlomis fruticosa* σε επίπεδο θόλου (ϵ_{can}) και των δεικτών (α,β) PRI και PRI_{701} στην κατεύθυνση -36°, (γ,δ) PRI2 και $PRI2_{701}$ στις κατευθύνσεις +55° και +36° αντίστοιχα.

κατευθύνσεις οπίσθιας σκέδασης είναι πολύ χρήσιμες στην εκτίμηση της ε_{can} , ενώ οι πρόσθιας σκέδασης παρατηρήσεις είναι επίσης αποτελεσματικές αλλά παρουσιάζονται μετατοπίσεις στα βέλτιστα μήκη κύματος των δεικτών. Εν προκειμένω, παρατηρήθηκε μετατόπιση του μήκους κύματος που χρησιμοποιεί τον PRI για τον εντοπισμό της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών από τα 531 nm για τις κατευθύνσεις οπίσθιας σκέδασης, στα 539 nm ή και μεγαλύτερα μήκη κύματος για τις κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης. Τέλος, εισάγεται το κανάλι στα 701 nm ως δυνητικός υποκατάστατος του καναλιού αναφοράς του PRI (570 nm) αφού οι συνδυασμοί των περιοχών στα 531 – 539 nm και 701 nm (PRI_{701} και PRI_{2701}) όπως φαίνεται αποδίδουν υψηλότερους συντελεστές προσδιορισμού (Σχήμα 64).

Μελέτη του υδατικού στρες και της ποιότητας φρούτων σε οπωρώνα ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευσης μέσω δεικτών βλάστησης στενών καναλιών του αερομεταφερόμενου αισθητήρα MCA-6

Ανίχνευση της υδατικής κατάστασης

Από τις διαφορετικές διαχειριστικές αρδευτικές πρακτικές που εφαρμόστηκαν στον πορτοκαλεώνα (*Citrus sinensis* cv. “Powell”), μόνο ο χειρισμός RDI-1 παρουσίασε ακραία επίπεδα υδατικού στρες (Σχήμα 65). Η δεύτερη διαχείριση ελλειμματικής άρδευσης (RDI-2) – πιθανώς λόγω μηχανικού προβλήματος – και η διαχείριση βάσει των εμπορικών πρακτικών (Οπωρώνας) ακολουθούν στενά τα επίπεδα δυναμικού νερού (Ψ) των ομάδων που υπέστησαν πλήρες πότισμα (ET) (Πίνακας 22). Στις ομάδες δέντρων υπό την διαχείριση RDI-1 παρατηρείται σταδιακή πτώση



Σχήμα 65. Οι χρονοσειρές των μετρήσεων δυναμικού νερού (μέσες τιμές και τυπική απόκλιση) για κάθε αρδευτικό χειρισμό (Οπωρώνας, ET, RDI-1, RDI-2). Οι τέσσερις πτήσεις του αεροσκάφους UAV που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου σημειώνονται με διακεκομμένες γραμμές. Η περίοδος ελλειμματικής άρδευσης παρουσιάζεται σε σκιασμένο φόντο.

τεράστια τυπική απόκλιση στις μετρήσεις του Ψ για τις πορτοκαλιές των ομάδων RDI-1 που βρέθηκε στην τελευταία πτήση (25-Σεπ) δεν οφείλεται μόνο στην μεταβατική φάση ανάκαμψης

του δυναμικού νερού από τις αρχές ακόμα της ελλειμματικής περιόδου, φθάνοντας το ελάχιστο μετρημένο Ψ στις 22 Σεπτεμβρίου ($\bar{\Psi} = -2.90$ MPa).

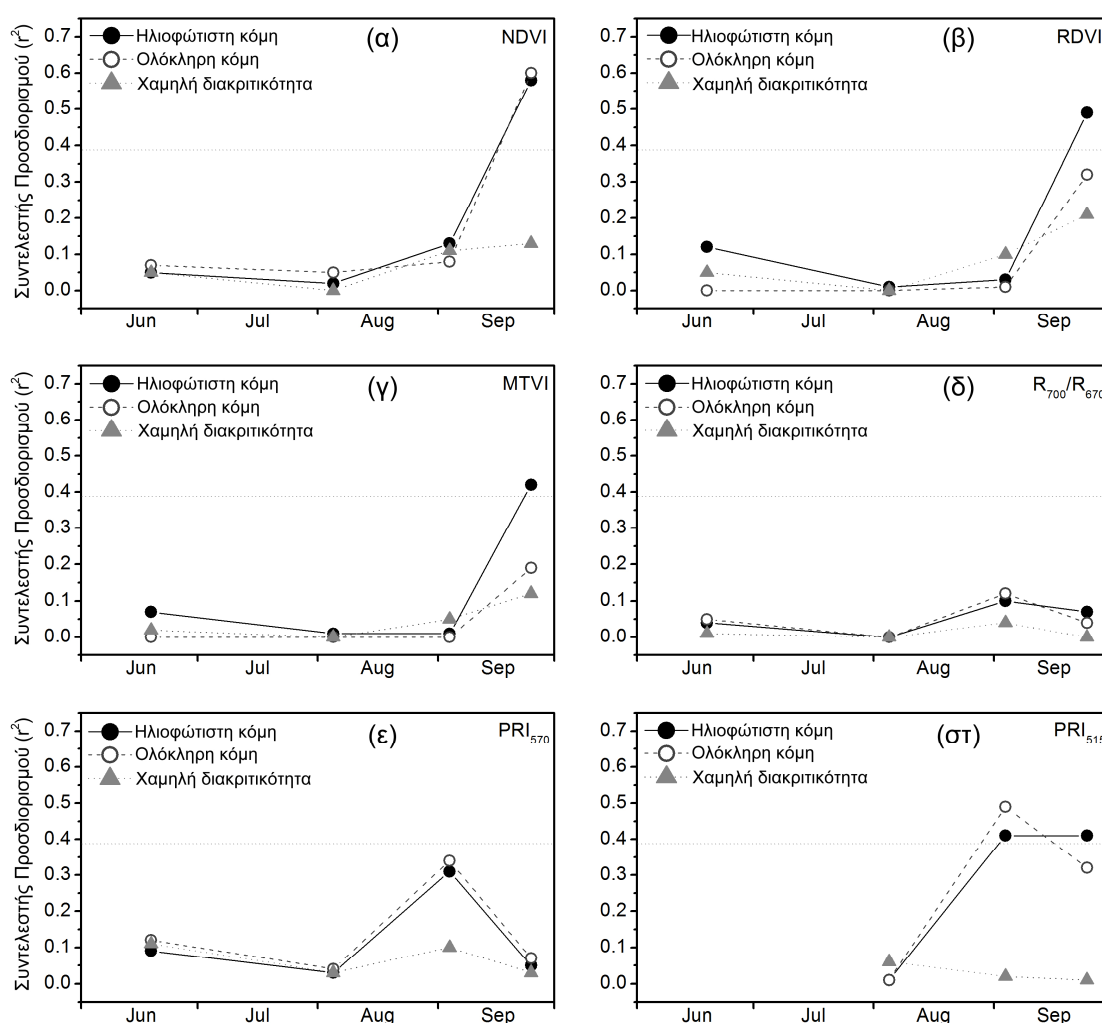
Η πρώτη πτήση με το αεροσκάφος UAV εκτελέστηκε στην αρχή της ελλειμματικής περιόδου, όταν σε όλες τις διαχειριστικές πρακτικές εμφανιζόταν η ίδια συμπεριφορά στο υδατικό δυναμικό ($\bar{\Psi} = -0.9$ MPa). Η δεύτερη και η τρίτη πτήση έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της ελλειμματικής περιόδου, ενώ οι ομάδες υπό της διαχείριση RDI-1 έδειχναν περίπου διπλάσιες τιμές υδατικού στρες σε σχέση με τις αντίστοιχες της ET ($\bar{\Psi} = -2.49$ MPa για τα RDI-1 και $\bar{\Psi} = -1.08$ MPa για τα ET). Η τελευταία πτήση εκτελέστηκε στις 25 Σεπτεμβρίου, τρεις μέρες μετά το τέλος της περιόδου ελλειμματικής άρδευσης. Η

Πίνακας 22. Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων δυναμικού νερού (MPa) κάθε χειρισμού άρδευσης για τις τέσσερις πτήσεις του αεροσκάφους UAV που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Παρατίθενται επίσης για σύγκριση οι μετρήσεις της 22-Σεπτεμβρίου.

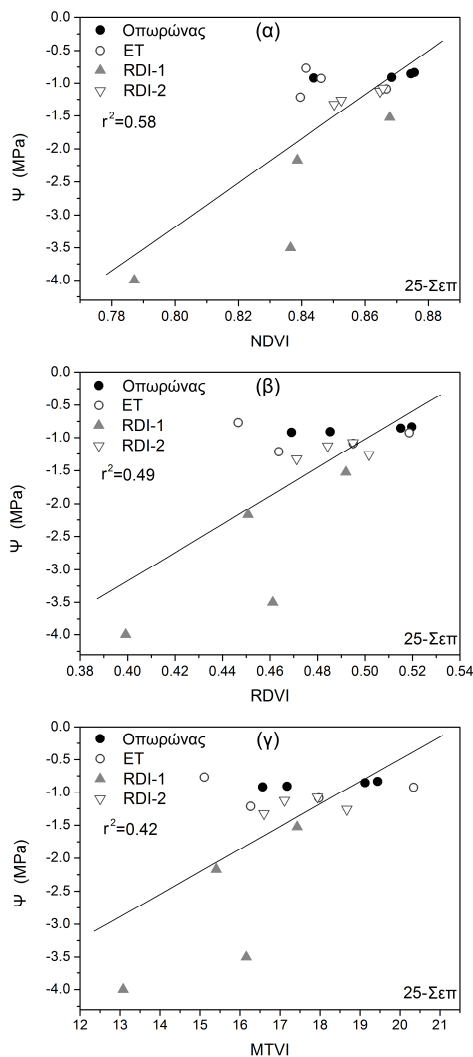
	Οπωρώνας	ET	RDI-1	RDI-2
19-Ιουν	-0.98 (± 0.28)	-0.99 (± 0.20)	-0.92 (± 0.25)	-0.90 (± 0.26)
5-Αυγ	-0.92 (± 0.19)	-0.92 (± 0.16)	-2.19 (± 0.31)	-1.06 (± 0.15)
4-Σεπ	-1.15 (± 0.09)	-1.08 (± 0.11)	-2.49 (± 0.25)	-1.18 (± 0.05)
22-Σεπ	-0.96 (± 0.09)	-0.94 (± 0.03)	-2.90 (± 0.65)	-1.12 (± 0.34)
25-Σεπ	-0.88 (± 0.04)	-1.00 (± 0.19)	-2.80 (± 1.15)	-1.20 (± 0.12)

από το υδατικό στρες, αλλά επίσης εξαιτίας ενός τεχνικού σφάλματος κατά την διάρκεια των τριών ημερών από το τέλος της περιόδου ελλειμματικής άρδευσης και την τελευταία πτήση (22 με 25 Σεπτεμβρίου), το οποίο εμπόδισε τις δύο από τις τέσσερις ομάδες RDI-1 να δεχθούν πότισμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι δυο ομάδες RDI-1 που δέχθηκαν πλήρες πότισμα να εμφανίζουν την αναμενόμενη βελτίωση της υδατικής τους κατάστασης ($\Psi = -1.8$ MPa), ενώ οι δύο ομάδες RDI-1 που δεν δέχθηκαν καθόλου πότισμα το τελευταίο τρίμηνο να καταλήγουν σε μία κατάσταση υπερβολικού υδατικού στρες, με το μετρημένο δυναμικό νερού να φτάνει κάτω από -3.5 MPa.

Οι υψηλής ανάλυσης εναέριες εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των προτεινόμενων δεικτών βλάστησης (Πίνακας 10), οι οποίοι εξετάστηκαν όσον αφορά τη σχέση τους με το μετρημένο στο πεδίο δυναμικό νερού (Ψ) για κάθε πτήση (Σχήμα 66). Στην παρούσα ανάλυση η διαδεδομένη φόρμουλα του PRI θα παρουσιάζεται ως PRI_{570} για να μην συγχέεται με την εναλλακτική φόρμουλα PRI_{515} . Επίσης, στα γραφήματα σύγκρισης και στον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων εφαρμόζεται ως $-PRI_{570}$, ώστε να μπορεί να συγκριθεί πιο εύκολα με τον PRI_{515} . Παρατηρείται ότι οι δείκτες που σχετίζονται περισσότερο με τη δομή του θόλου (NDVI, RDVI και



Σχήμα 66. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των συσχετίσεων μεταξύ των φασματικών δεικτών κάθε πτήσης και των ταυτόχρονων μετρήσεων του δυναμικού νερού (Ψ) στο πεδίο. Κάθε φασματικός δείκτης υπολογίστηκε σε τρεις χωρικές κλίμακες, 1/ Ηλιοφώτιστη κόμη, 2/ Ολόκληρη κόμη, 3/ Χαμηλής διακριτικότητα. Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ($p < 0.01$) σημειώνεται με μια γκρίζα διακεκομμένη γραμμή σε κάθε γραφική παράσταση.

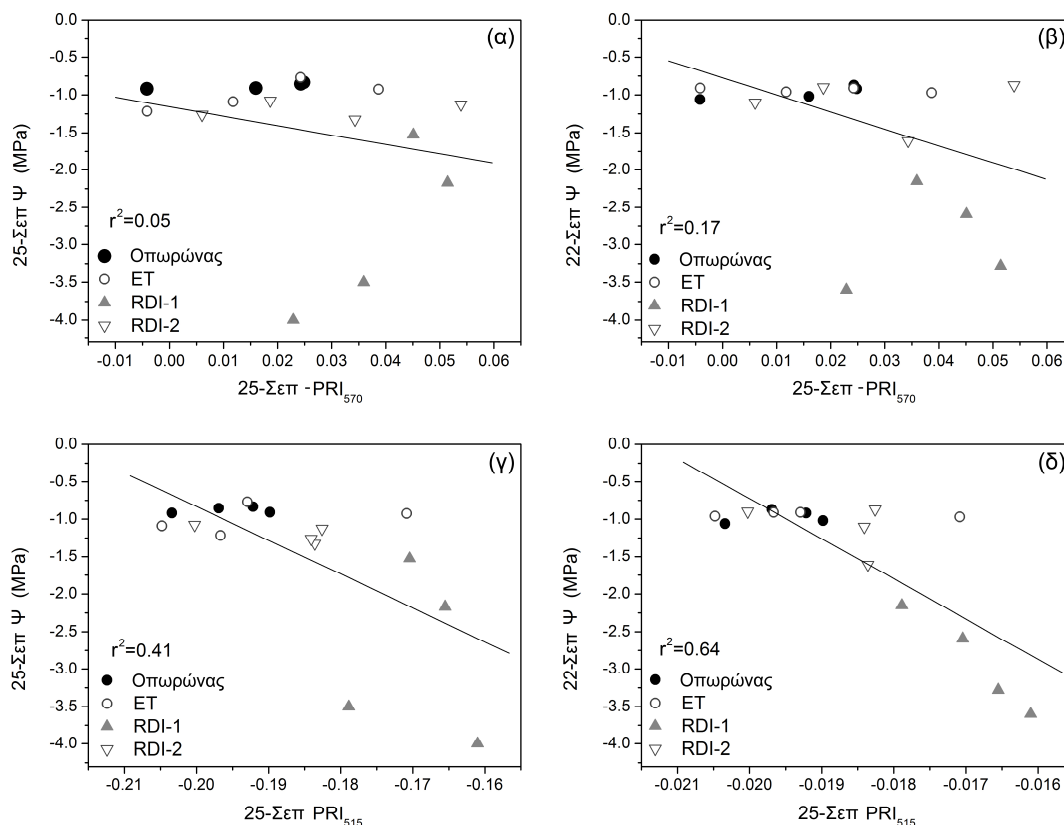


Σχήμα 67. Συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων δυναμικού νερού (Ψ) και (α) του NDVI, (β) του RDVI, (γ) του MTVI, υπολογισμένους στο επίπεδο ηλιοφώτισης κόμης. Οι συσχετίσεις αφορούν τις μετρήσεις της 25^{ης} Σεπτεμβρίου.

MTVI) εμφάνισαν σημαντικές συσχετίσεις με τις μετρήσεις Ψ μόνο στο τέλος του Σεπτεμβρίου, όταν η παρατεταμένη ελλειμματική αρδευτική διαχείριση έχει πια επιδράσει ορατά στην δομή του θόλου των δέντρων. Η συσχέτιση που εμφανίστηκε ανάμεσα στον NDVI και το Ψ με συντελεστή προσδιορισμού $r^2=0.60$ είναι ενδεικτική της επίδρασης αυτής (Σχήμα 66α). Ταυτόχρονα, οι δύο τύποι PRI που υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MCA-6 εμφάνισαν σημαντικές συσχετίσεις με την υδατική κατάσταση ήδη από τις αρχές του Σεπτεμβρίου. Η εναλλακτική φόρμουλα PRI_{515} εμφάνισε υψηλότερες αποδόσεις στην ανίχνευση της υδατικής κατάστασης από την κλασική, ειδικά στην τελευταία πτήση όπου ο PRI χάνει την συσχέτιση του με το Ψ (Σχήμα 66ε). Κανείς από τους υπό μελέτη δείκτες δεν επέδειξε κάποια σημαντική συσχέτιση με το Ψ στις πτήσεις του Ιουνίου και Αυγούστου, όταν τα επίπεδα του στρες δεν ήταν ακόμα τόσο υψηλά όσο στο τέλος της περιόδου ελλειμματικής άρδευσης. Αν και αυτό είναι λογικό για την πτήση του Ιουνίου που δεν εμφανίζεται υδατικό στρες σε καμία αρδευτική διαχείριση, στην πτήση του Αυγούστου θα έπρεπε να είναι εμφανής κάποια συσχέτιση μεταξύ των φωτοχημικών δεικτών και του Ψ μιας και η ελλειμματική διαχείριση RDI-1 είναι ήδη επηρεασμένη από την έλλειψη νερού (Σχήμα 65). Η συγκεκριμένη πτήση όμως παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες. Μία μικρή απόκλιση από την προγραμματισμένη διαδρομή πτήσης είχε σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση της περιοχής μελέτης στις άκρες των διαδοχικών εικόνων του UAV

MCA-6. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τις έντονες γωνιακές επιδράσεις που είναι συνήθως εμφανείς στις άκρες του οπτικού πεδίου των αισθητήρων με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση των τιμών PRI και συνεπώς τον περιορισμό της αποτελεσματικότητας του στην αναγνώριση του υδατικού στρες.

Μια πιο διεξοδική εξέταση των σχέσεων μεταξύ των δομικών δεικτών (NDVI, RDVI και MTVI) και του Ψ για την τελευταία πτήση (Σχήμα 67) αποκαλύπτει ότι τα δέντρα μιας συγκεκριμένης ομάδας RDI-1 εμφάνισαν εξαιρετικά χαμηλές τιμές και στους τρεις δείκτες. Οι τιμές λοιπόν αυτής της ομάδας είναι αποκλειστικά υπεύθυνες για την στατιστικά ισχυρή γραμμική συσχέτιση που προέκυψε μεταξύ των δομικών δεικτών βλάστησης και του Ψ . Επιπροσθέτως, η συγκεκριμένη ομάδα είναι η μόνη που οι ίδιοι δείκτες βλάστησης παρουσιάζουν πτώση στις τιμές τους σε σχέση με την προηγούμενη πτήση (4-Σεπ). Πρόκειται βεβαίως για τη μια από τις δύο ομάδες δέντρων που δεν ποτίστηκαν καθόλου για τρεις μέρες πριν την τελευταία πτήση και είναι μάλιστα η ομάδα που εμφάνισε το πιο έντονο υδατικό στρες στις μετρήσεις πεδίου ($\Psi=-4.0$ MPa).



Σχήμα 68. Συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων δυναμικού νερού (Ψ) της 25^{ης} Σεπτεμβρίου και (α) του $-PRI_{570}$, (γ) του PRI_{515} , υπολογισμένα από την πτήση της ίδιας ημέρας σε επίπεδο ηλιοφώτιστης κόμης. Συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων δυναμικού νερού (Ψ) της 22^{ης} Σεπτεμβρίου και (β) του $-PRI_{570}$, (δ) του PRI_{515} , υπολογισμένα από την πτήση 25^{ης} Σεπτεμβρίου σε επίπεδο ηλιοφώτιστης κόμης.

Δεδομένου των παραπάνω παρατηρήσεων, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η δομή του θόλου και πολύ πιθανόν και οι φωτοσυνθετικές χρωστικές των δέντρων της συγκεκριμένης ομάδας επηρεάστηκαν από την παρατεταμένη περίοδο ελλειμματικής άρδευσης, η οποία εντάθηκε υπερβολικά από τις τελευταίες μέρες ολικής ξηρασίας.

Στις 25 Σεπτεμβρίου οι χειρισμοί ελλειμματικής άρδευσης βρισκόντουσαν σε μεταβατική φάση ανάκαμψης λόγω της παροχής πλήρους άρδευσης από τις 22 του ίδιου μήνα. Οι τιμές των

Πίνακας 23. Οι συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων ποιότητας φρούτων που μετρήθηκαν κατά την συγκομιδή και των μετρήσεων δυναμικού νερού τις ημέρες των πτήσεων καθώς και του ολοκληρώματος των μετρήσεων δυναμικού νερού του Σεπτεμβρίου αλλά των συνολικών μετρήσεων. Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις ($p < 0.01$) παρουσιάζονται σε έντονη γραφή.

	TSS (°Brix)	TA (%)	TSS / TA
19-Ιουν	0.02	0.01	0.00
5-Αυγ	0.38	0.69	0.63
4-Σεπ	0.65	0.84	0.69
25-Σεπ	0.31	0.48	0.45
Σεπτέμβριος	0.49	0.79	0.70
Ιούνιος-Οκτώβριος	0.54	0.81	0.71

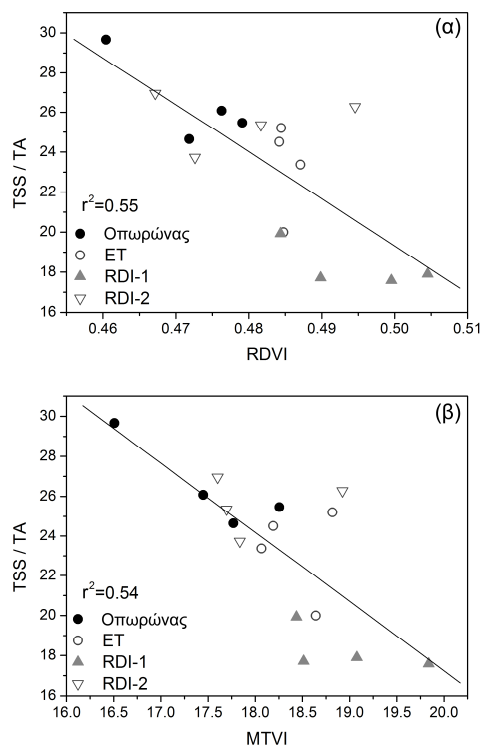
PRI από την τελευταία πτήση (25-Σεπ), απ' ότι αποδεικνύεται, σχετίζονται περισσότερο με τα Ψ που μετρήθηκαν στις 22 Σεπτεμβρίου (Σχήμα 68β,δ) απ' ότι τα τρέχοντα Ψ της μεταβατικής φάσης (Σχήμα 68α,γ). Συγκρίνοντας τις δύο φόρμουλες PRI στην φάση αυτή, όπου η έλλειψη νερού έχει ήδη προκαλέσει διαφοροποιήσεις στους θόλους των δέντρων, ο PRI₅₁₅ αποδίδει καλύτερες συσχετίσεις με την υδατική κατάσταση (Σχήμα 68γ,δ) σε σχέση με τον PRI₅₇₀ (Σχήμα 68α,β). Είναι εμφανές ότι η ομάδα RDI-1 που υπέστη υπερβολικό στρες και αλλαγή της δομής του θόλου εμφανίζεται εκτός της γενικότερης τάσης συσχέτισης μεταξύ των δύο παραμέτρων (Σχήμα 68β) που θέλει τα δέντρα που υπόκεινται σε υδατικό στρες να εμφανίζουν υψηλές τιμές PRI. Σε αντιδιαστολή, ο εναλλακτικός φωτοχημικός δείκτης PRI₅₁₅ δείχνει να μένει ανεπηρέαστος από τις διαφοροποιήσεις στον θόλο και αποδίδει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των μετρημένων Ψ και των τιμών PRI₅₁₅ όλων των ομάδων (Σχήμα 68δ).

Ανίχνευση της ποιότητας φρούτων

Για την μελέτη των επιδράσεων της θερινής υδατικής καταπόνησης στην τελική ποιότητα φρούτων που μετρήθηκε κατά την συγκομιδή (επόμενη άνοιξη), υπολογίστηκε το ολοκλήρωμα των συνολικών μετρήσεων Ψ ανά ομάδα δέντρων (Σχήμα 65) και το ολοκλήρωμα των μετρήσεων Ψ μόνο του Σεπτεμβρίου. Τα ολοκληρώματα αυτά περιγράφουν την συναθροιστική υδατική καταπόνηση που έχει υποστεί κάθε ομάδα δέντρων πριν την συγκομιδή των φρούτων. Δηλαδή,

Πίνακας 24. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων ποιότητας φρούτων και των τριών δεικτών βλάστησης που σχετίζονται με την δομή της κόμης. Εξετάστηκαν οι δείκτες σε τρεις χωρικές κλίμακες, 1/ ηλιοφώτιστης κόμης (Ηλιος), 2/ Ολόκληρης κόμης (Κόμη), 3/ Χαμηλής διακριτικότητας (Χαμ.). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε πτήση ξεχωριστά, καθώς και του ολοκληρώματος των δεικτών βλάστησης των πτήσεων του Σεπτεμβρίου και όλων πτήσεων. Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις ($p < 0.01$) παρουσιάζονται σε έντονη γραφή.

		NDVI			RDVI			MTVI		
		Ηλίου	Κόμη	Χαμ.	Ηλίου	Κόμη	Χαμ.	Ηλίου	Κόμη	Χαμ.
19-Ιουν	TSS	0.29	0.32	0.04	0.38	0.00	0.00	0.15	0.03	0.01
	TA	0.08	0.14	0.00	0.55	0.15	0.00	0.44	0.06	0.01
	TSS /TA	0.02	0.07	0.01	0.55	0.28	0.01	0.54	0.17	0.00
5-Αυγ	TSS	0.05	0.02	0.02	0.17	0.14	0.07	0.19	0.14	0.09
	TA	0.02	0.03	0.00	0.07	0.03	0.01	0.08	0.03	0.02
	TSS /TA	0.00	0.01	0.00	0.06	0.01	0.00	0.06	0.02	0.00
4-Σεπ	TSS	0.15	0.02	0.28	0.01	0.04	0.17	0.03	0.06	0.07
	TA	0.11	0.04	0.05	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01
	TSS /TA	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25-Σεπ	TSS	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.16	0.03	0.04	0.18
	TA	0.19	0.21	0.05	0.22	0.19	0.13	0.21	0.13	0.12
	TSS /TA	0.24	0.27	0.03	0.29	0.20	0.06	0.27	0.13	0.06
Ολοκλήρωμα Σεπτεμβρίου	TSS	0.13	0.05	0.15	0.01	0.00	0.20	0.00	0.01	0.17
	TA	0.26	0.20	0.06	0.12	0.05	0.09	0.07	0.02	0.07
	TSS /TA	0.30	0.25	0.02	0.17	0.07	0.03	0.11	0.03	0.02
Ολοκλήρωμα Ιουν-Σεπ	TSS	0.03	0.00	0.01	0.15	0.11	0.00	0.16	0.10	0.00
	TA	0.08	0.04	0.01	0.04	0.02	0.00	0.07	0.03	0.00
	TSS /TA	0.09	0.06	0.00	0.03	0.02	0.00	0.05	0.02	0.00



Σχήμα 69. Συσχετίσεις μεταξύ του ενδεικτικού για την ποιότητα φρούτων λόγου TSS/TA και (α) του RDVI, (β) του MTVI, υπολογισμένα σε επίπεδο ηλιοφάνειας κόμης. Οι συσχετίσεις αφορούν την πτήση της 19^{ης} Ιουνίου.

επιχειρούν να εκφράσουν με μία τιμή το συνολικό ιστορικό υδατικών καταπονήσεων που έχει υποστεί κάθε ομάδα δέντρων. Κατόπιν, εξετάστηκαν οι συσχετίσεις τόσο των ολοκληρωμάτων του υδατικού στρες, όσο και των μεμονωμένων μετρήσεων Ψ για τις ημερομηνίες πτήσεων, με τα αποτελέσματα στην ποιότητα φρούτων. Η ποιότητα φρούτων εμφάνισε ισχυρές συσχετίσεις με τα μετρημένα Ψ στο πεδίο, αποδίδοντας υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού για το ολοκλήρωμα των χρονοσειρών Ψ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Ιούνιο έως Οκτώβριο) (Πίνακας 23). Σε παρόμοιο επίπεδο σημαντικότητας εμφανίστηκαν οι συσχετίσεις με τις μετρήσεις μεμονωμένων ημερομηνιών, ειδικά του Αυγούστου και Σεπτεμβρίου (Πίνακας 23).

Οι δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν από τα κανάλια του MCA-6 από κάθε πτήση εξετάστηκαν επίσης για την σχέση τους με τις παραμέτρους ποιότητας φρούτων TSS, TA και TSS/TA που μετρήθηκαν κατά την συγκομιδή. Αντίστοιχα με τις μετρήσεις Ψ, υπολογίστηκε το ολοκλήρωμα των χρονοσειρών κάθε δείκτη βλάστησης (τέσσερις πτήσεις) καθώς και συγκεκριμένα των πτήσεων του Σεπτεμβρίου, για την εξέταση της σχέσης της συνολικής

παρακολούθησης μέσω δεικτών βλάστησης με το τελικό αποτέλεσμα στην ποιότητα φρούτων. Οι δομικοί δείκτες βλάστησης (NDVI, RDVI, MTVI) απέδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα (Πίνακας 24) σε σχέση με τους δείκτες που σχετίζονται περισσότερο με φυσιολογικές ιδιότητες της βλάστησης (R_{700}/R_{670} , PRI_{570} , PRI_{515}) (Πίνακας 25). Παρατηρήθηκε ότι ο δείκτης NDVI δεν εμφάνισε καμία στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τις παραμέτρους ποιότητας φρούτων σε καμία από τις τέσσερις πτήσεις αλλά ούτε και με τα ολοκληρώματά τους (Πίνακας 24). Αντιθέτως, οι δύο βελτιωμένοι δείκτες βλάστησης (RDVI και MTVI) εμφάνισαν σε ένα βαθμό συσχέτιση ($r^2=0.55$) με τις παραμέτρους TA και TSS/TA στην αρχή του πειράματος (πτήση Ιουνίου) (Πίνακας 24, Σχήμα 69). Εντούτοις, οι σχέσεις αυτές χαθήκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η εξέταση της ευαισθησίας των φυσιολογικών δεικτών στην ανίχνευση των παραμέτρων ποιότητας φρούτων απέδωσε σημαντικά και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα (Πίνακας 25). Εμφανίστηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων ποιότητας φρούτων και αμφοτέρων των δεικτών PRI το Σεπτέμβριο. Στις πτήσεις του Ιουνίου και Αυγούστου δεν εμφανίστηκαν σημαντικές συσχετίσεις και τα συνολικά ολοκληρώματα των χρονοσειρών των δεικτών δεν εμφάνισαν ισχυρά αποτελέσματα σε σχέση με τα ολοκληρώματα που επικεντρώνονται μόνο στις πτήσεις του Σεπτεμβρίου. Παρατηρείται επίσης ότι το ολοκλήρωμα του Σεπτεμβρίου, και για τις δύο εκδοχές του PRI που εξετάζονται, εμφάνισε ισχυρότερους συντελεστές προσδιορισμού από τις μεμονωμένες πτήσεις ξεχωριστά. Όσον αφορά τις παραμέτρους ποιότητας φρούτων, αμφοτέροι οι δείκτες PRI εμφανίζουν σημαντικότερες συσχετίσεις με το TSS, παρά με το TA (Σχήμα 70), ενώ με τον λόγο τους δεν εντοπίζονται συνεπή και ισχυρά αποτελέσματα.

Συγκρίνοντας την απόδοση των δύο δεικτών PRI, η φόρμουλα με το εναλλακτικό κανάλι αναφοράς (PRI₅₁₅) εμφανίζει περισσότερες και ισχυρότερες συσχετίσεις με τις παραμέτρους ποιότητας φρούτων σε σχέση με τον συμβατικό PRI₅₇₀ (Πίνακας 25, Σχήμα 70) υποδεικνύοντας ένα σταθερότερο και ισχυρότερο φυσιολογικό δείκτη.

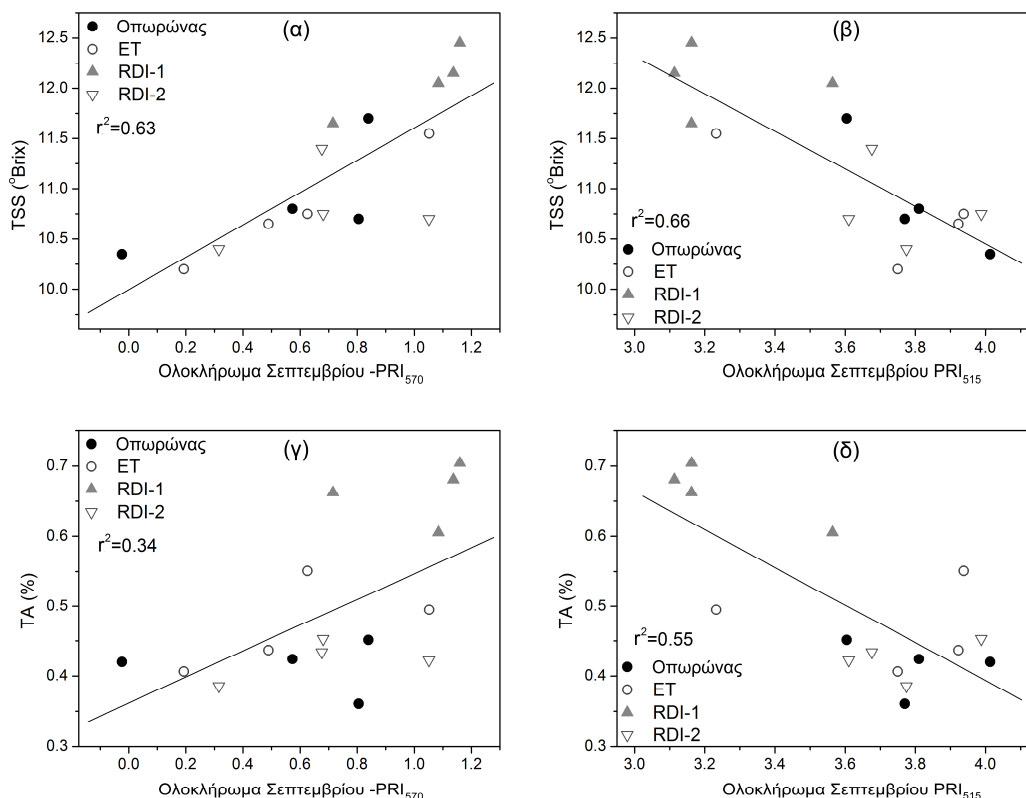
Τέλος, ο δείκτης R₇₀₀/R₆₇₀ εμφάνισε πολύ ασθενέστερες συσχετίσεις με την ποιότητα φρούτων σε σχέση με τους δείκτες PRI. Συσχετίσεις εμφανίστηκαν στις πτήσεις του Σεπτεμβρίου, με το ολοκλήρωμα του μήνα να αποδίδει την πιο ισχυρή με $r^2=0.44$ για τον προσδιορισμό του TSS.

Ανάλυση χωρικής κλίμακας

Συγκρίνοντας τις επιδόσεις τόσο των δομικών όσο και των φυσιολογικών δεικτών βλάστησης για τις δύο κλίμακες που μελετήθηκαν στο επίπεδο της κόμης (ηλιοφώτιστη κόμη και ολόκληρη κόμη) όσον αφορά τον προσδιορισμό του Ψ, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σε σχέση με την επίδραση των σκιασμένων σημείων της κόμης στη απόδοση του δείκτη. Για τον NDVI, η μόνη στατιστικά σημαντική σχέση που παρατηρήθηκε ήταν με το Ψ στις 25 Σεπτεμβρίου (Σχήμα 66α). Οι επιδόσεις του NDVI και στα δύο επίπεδα της κόμης είναι όμοιες, ενώ οι αντίστοιχες συσχετίσεις για τους δείκτες RDVI (Σχήμα 66β) και MTVI (Σχήμα 66γ) αποδίδουν χαμηλότερα r^2 στην κλίμακα ολόκληρης κόμης. Επίσης, οι δύο βελτιωμένοι δείκτες βλάστησης εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις με τις παραμέτρους ποιότητας φρούτων μόνο στην κλίμακα

Πίνακας 25. Συντελεστές προσδιορισμού (r^2) των συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων ποιότητας φρούτων και των τριών δεικτών βλάστησης που σχετίζονται με την δομή της κόμης. Εξετάστηκαν οι δείκτες σε τρεις χωρικές κλίμακες, 1/ ηλιοφώτιστης κόμης (Ηλιος), 2/ Ολόκληρης κόμης (Κόμη), 3/ Χαμηλής διακριτικότητας (Χαμ.). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε πτήση ξεχωριστά, καθώς και του ολοκληρώματος των δεικτών βλάστησης των πτήσεων του Σεπτεμβρίου και όλων πτήσεων. Οι στατιστικώς σημαντικές συσχετίσεις ($p<0.01$) παρουσιάζονται σε έντονη γραφή.

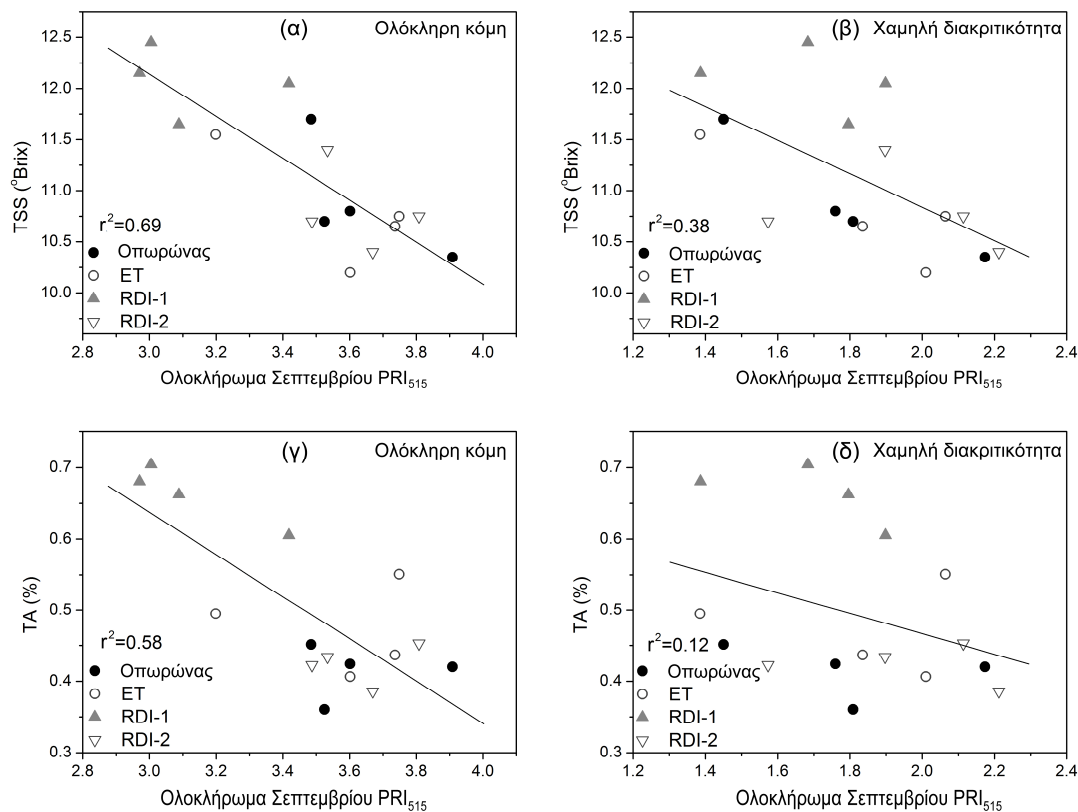
		R ₇₀₀ /R ₆₇₀			PRI ₅₇₀			PRI ₅₁₅		
		Ηλίου	Κόμη	Χαμ.	Ηλίου	Κόμη	Χαμ.	Ηλίου	Κόμη	Χαμ.
19-Ιουν	TSS	0.21	0.24	0.12	0.07	0.10	0.15			
	TA	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.04			
	TSS /TA	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01			
5-Αυγ	TSS	0.07	0.06	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01
	TA	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	TSS /TA	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04
4-Σεπ	TSS	0.35	0.35	0.21	0.57	0.58	0.34	0.63	0.64	0.31
	TA	0.06	0.07	0.01	0.33	0.36	0.10	0.51	0.57	0.07
	TSS /TA	0.01	0.01	0.00	0.20	0.22	0.04	0.35	0.39	0.02
25-Σεπ	TSS	0.36	0.33	0.31	0.51	0.45	0.31	0.52	0.59	0.36
	TA	0.22	0.18	0.11	0.24	0.25	0.17	0.45	0.45	0.17
	TSS /TA	0.13	0.10	0.04	0.12	0.15	0.09	0.31	0.28	0.08
Ολοκλήρωμα Σεπτεμβρίου	TSS	0.44	0.41	0.31	0.63	0.62	0.41	0.66	0.69	0.38
	TA	0.18	0.17	0.06	0.34	0.36	0.18	0.55	0.58	0.12
	TSS /TA	0.08	0.07	0.01	0.18	0.22	0.09	0.38	0.38	0.04
Ολοκλήρωμα Ιουν-Σεπ	TSS	0.34	0.32	0.21	0.26	0.27	0.24	0.42	0.40	0.11
	TA	0.07	0.08	0.04	0.08	0.08	0.05	0.22	0.21	0.00
	TSS /TA	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.10	0.09	0.01



Σχήμα 70. Συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων ποιότητας φρούτων TSS (α,β) και TA (γ,δ) και i) του ολοκληρώματος των -PRI₅₇₀ του Σεπτεμβρίου (α,γ), ii) του ολοκληρώματος των PRI₅₁₅ του Σεπτεμβρίου (β,δ). Οι φασματικοί δείκτες υπολογίστηκαν σε επίπεδο ηλιοφώτιστης κόμης.

ηλιοφώτιστης κόμης (Πίνακας 24). Φαίνεται λοιπόν ότι ο δείκτης NDVI παραμένει ανεπηρέαστος από της σκιάσεις μέσα στη κόμη, ενώ οι άλλοι δύο δομικοί δείκτες βλάστησης επηρεάζονται περισσότερο από την ετερογένεια της κόμης. Οι φυσιολογικοί δείκτες R₇₀₀/R₆₇₀, PRI₅₇₀ και PRI₅₁₅ εμφάνισαν όμοιες επιδόσεις στις δύο κλίμακες της κόμης τόσο στην ανίχνευση της υδατικής κατάστασης (Σχήμα 66δ-στ) όσο και της ποιότητας φρούτων (Πίνακας 25). Επιδεικνύεται έτσι ότι για την κόμη της πορτοκαλιάς ο διαχωρισμός ηλιοφώτιστων και σκιασμένων εικονοστοιχείων στο εσωτερικό της κόμης δεν είναι κρίσιμης σημασίας για την εκτίμηση της φυσιολογίας του δέντρου.

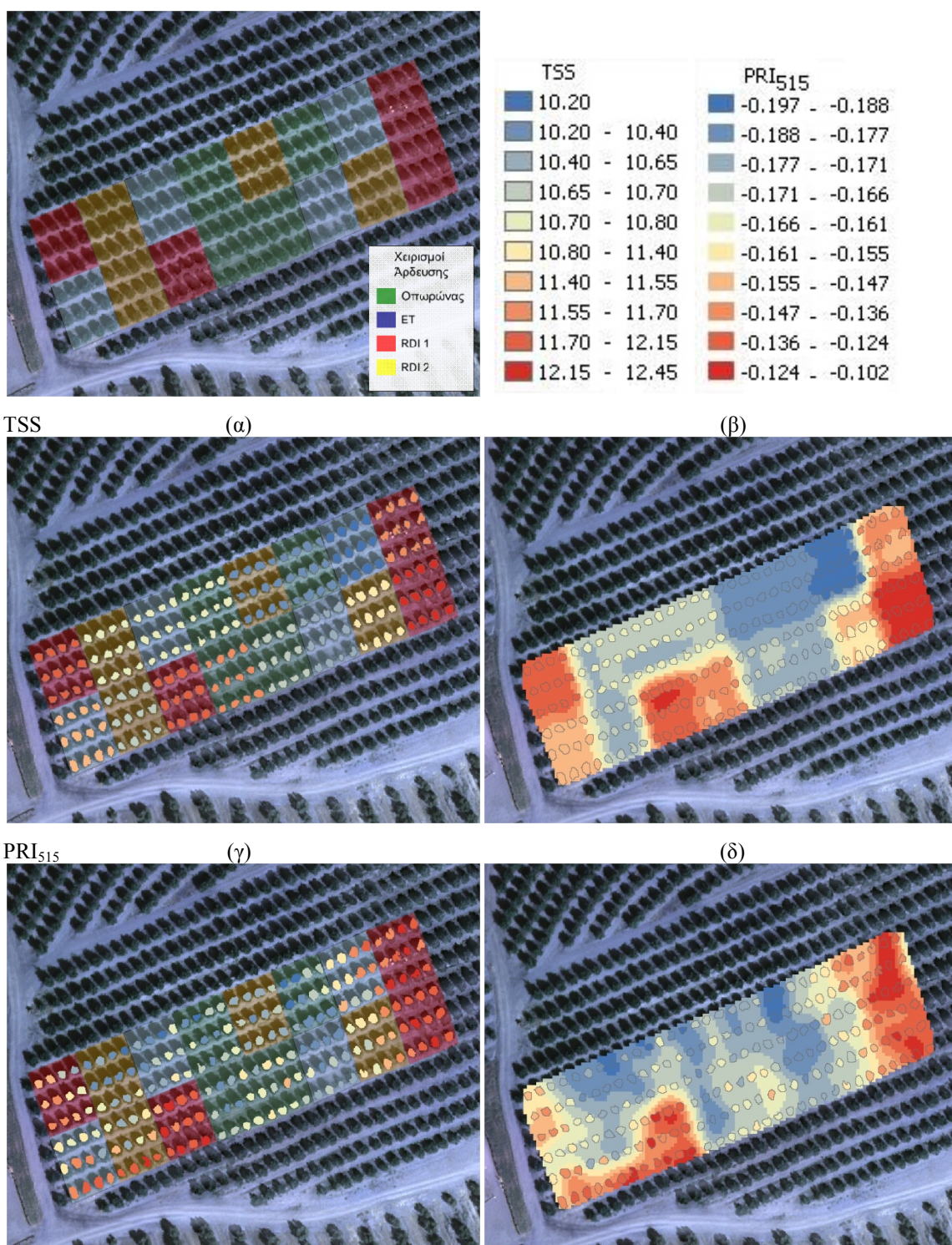
Εντούτοις, η προσομοίωση που επιχειρήθηκε για την εξέταση των επιδράσεων που υφίστανται οι φασματικές εικόνες χαμηλότερης χωρικής διακριτικότητας, έδειξε καθαρά την σημασία της διάκρισης της κόμης από το έδαφος για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης και της ποιότητας φρούτων. Τόσο οι φυσιολογικοί όσο και οι δομικοί δείκτες βλάστησης που εφαρμόστηκαν στα κανάλια του MCA-6 χάνουν την ικανότητα προσδιορισμού των επιθυμητών παραμέτρων όταν το μέγεθος του εικονοστοιχείου ξεπερνάει τις διαστάσεις της κόμης. (Σχήμα 66, Πίνακες 24, 25). Αυτό είναι εμφανές διότι στην κλίμακα χαμηλής διακριτικότητας όλες οι συσχετίσεις εξασθενούν σε μη στατιστικά σημαντικά επίπεδα. Είναι λοιπόν ξεκάθαρο ότι η επίδραση του φωτισμένου και σκιασμένου εδάφους είναι πολύ σημαντική για όλους τους δείκτες που μελετήθηκαν μέσω των δεδομένων του αερομεταφερόμενου αισθητήρα, αφού εμποδίζει την ικανότητα τους για εκτίμηση της υδατικής κατάστασης και ποιότητας φρούτων. Ένα παράδειγμα του πως το μέγεθος του εικονοστοιχείου επιδρά στον δείκτη PRI₅₁₅ λόγω της παρακείμενης του θόλου ανακλαστικότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 71. Η ευαισθησία του PRI₅₁₅ προς το TSS σε επίπεδο θόλου ($r^2=0.69$)



Σχήμα 71. Συσχετίσεις μεταξύ του ολοκληρώματος των PRI₅₁₅ του Σεπτεμβρίου και των παραμέτρων ποιότητας φρούτων (α,β) TSS και (γ,δ) TA σε επίπεδο (α,γ) κόμης και (β,δ) χαμηλής διακριτικότητας.

χάνεται όταν το εικονοστοιχείο υπερβαίνει το μέγεθος του θόλου ($r^2=0.38$). Αντίστοιχα για την TA η συσχέτιση χάνεται τελείως ($r^2=0.12$) όταν επιδρά στον δείκτη η ανακλαστικότητα του εδάφους.

Τέλος, δημιουργήθηκαν χάρτες με χρωματικές διαβαθμίσεις των τιμών του δείκτη PRI₅₁₅ και της παραμέτρου TSS για κάθε δέντρο της περιοχής μελέτης (Εικόνα 5α,γ) καθώς και αντίστοιχοι χάρτες παρεμβλλόμενης διαβάθμισης (Εικόνα 5β,δ) για την οπτική εποπτεία της συσχέτισης στο χώρο. Αποτυπώνεται μέσω των εικόνων της Εικόνα 5 ότι η χωρική διαβάθμιση του δείκτη PRI₅₁₅ μιμείται τις μετρήσεις της παραμέτρου ποιότητας φρούτων TSS για κάθε ομάδα δέντρων υπό διαφορετικούς χειρισμούς άρδευσης. Επομένως, όταν ο δείκτης PRI₅₁₅ υπολογίζεται από καθαρά εικονοστοιχεία κόμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την χαρτογράφηση της χωρικής διακύμανσης της ποιότητας φρούτων σε δέντρα του γένους *Citrus*.



Εικόνα 5. Χάρτες της χωρικής διακύμανσης (α,β) της παραμέτρου ποιότητας φρούτων TSS και (γ,δ) του προτεινόμενου δείκτη PRI₅₁₅. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις των προβαλλόμενων παραμέτρων παρουσιάζονται (α,γ) για κάθε δέντρο της περιοχής μελέτης ξεχωριστά καθώς και (β,δ) με την μορφή παρεμβαλλόμενης διαβάθμισης. Ο δείκτης PRI₅₁₅ υπολογίστηκε από τις εικόνες της πτήσης της 4^{ης} Σεπτεμβρίου 2009, ενώ οι τιμές TSS αντιστοιχούν στις μετρήσεις κατά την συγκομιδή (8 Απριλίου 2010).

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Παρακολούθηση των αναπτυξιακών αλλαγών της βλάστησης μέσω πολυφασματικών δεδομένων

Η σχέση του LAI με τον NDVI

Ο λόγος SR ήταν ο πρώτος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση της βλάστησης (Jordan 1969). Σε πολλές έρευνες ο δείκτης αυτός δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα με τον NDVI παρουσιάζοντας επίσης και τις ίδιες ιδιότητες (Elvidge & Chen 1995, Perry & Lautenschlager 1984). Όπως φαίνεται όμως και από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, ο SR παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στις πολύ χαμηλές διακυμάνσεις του LAI, ενώ εκτιμά σχετικά καλά τις διακυμάνσεις του LAI όταν ο τελευταίος διατηρείται σε μέσες τιμές (Broge & Leblanc 2001). Επίσης, σε περιοχές πυκνής βλάστησης η ποσότητα της ανακλώμενης ερυθρής ακτινοβολίας φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές με αποτέλεσμα ο λόγος SR να αυξάνεται ανεξέλεγκτα. Για την αύξηση της ευαισθησίας του δείκτη σε χαμηλές τιμές LAI και την αποφυγή των ανεξέλεγκτων υψηλών τιμών του λόγου SR, εισήχθη από τον Deering (1978) η κανονικοποίηση του λόγου, από την οποία προέκυψε ο διαδεδομένος δείκτης NDVI.

Ήδη από τις πρώτες μελέτες που εξέτασαν τη σχέση του NDVI με τον LAI έδειξαν ότι υπάρχει μία λογαριθμική σχέση μεταξύ τους (Birky 2001, Clevers 1989, Gamon et al. 1995, Turner et al. 1999). Έχουν μελετηθεί καλλιέργειες (Asrar et al. 1984, Wiegand et al. 1979), λιβαδικές εκτάσεις (Friedl et al. 1994, Goetz 1997), θαμνότοποι (Law & Waring 1994), δάση κωνοφόρων (Chen & Cihlar 1996, Running et al. 1986, Spanner et al. 1994), δάση πλατύφυλλων (Badhwar et al. 1986, Fassnacht et al. 1997) και περιοχές μικτής βλάστησης (White et al., 1997a). Εντούτοις, δεν έχει ακόμα εδραιωθεί κάποια γενικώς αποδεκτή σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων. Ένα γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τις διάφορες μελέτες που έχουν δημοσιευτεί είναι ότι υπάρχει υπολογίσιμη ευαισθησία του NDVI στις διακυμάνσεις του LAI, αλλά πολύ περισσότερη όταν ο LAI κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές. Τα προβλήματα κορεσμού του NDVI σχετίζονται με το κορεσμένο σήμα λόγω απορρόφησης των χλωροφυλλών σε πυκνές περιοχές βλάστησης. Στα κόκκινα μήκη κύματος, ο κορεσμός εμφανίζεται περίπου όταν ο LAI φτάνει στις τιμές 2-3, ενώ ο κορεσμός του εγγύς υπερύθρου δεν είναι εμφανής ώσπου οι τιμές του LAI να φτάσουν το 6-8 (Goel 1989). Τα παραπάνω ωθούν τον NDVI σε κορεσμό σε τιμές LAI 3-5 (Begue 1993, Goel 1989). Το μέγιστο όριο ευαισθησίας, και η σχετική συνεισφορά της κόκκινης και της υπέρυθρης ανακλαστικότητας στον καθορισμό του ορίου αυτού, μοιάζει να διαφέρει μεταξύ των τύπων βλάστησης αλλά και των συνθηκών υπολογισμού του δείκτη.

Ο κορεσμός του NDVI πηγάζει επίσης από την φύση της μαθηματικής σχέσης των δύο καναλιών. Ο NDVI είναι στην ουσία μια μη-γραμμική «επέκταση» του λειτουργικά ισοδύναμου SR (NIR/Red), σχεδιασμένη για τον περιορισμό των τιμών του δείκτη στο διάστημα -1 – 1 (Deering 1978). Η μη-γραμμική «επέκταση» επιδρά εκτείνοντας τις μικρές τιμές του λόγου SR και συμπιέζοντας τις υψηλότερες. Για παράδειγμα, όσο ο λόγος SR αυξάνεται ανά 5 μονάδες (5, 10, 15), η αντίστοιχη αύξηση του NDVI είναι από 0.67 σε 0.82 (20% αύξηση), για να καταλήξει στην τιμή 0.87 (6% αύξηση). Μια επιπλέον γραμμική αύξηση του SR στην τιμή 20 αποδίδει πολύ μικρή αύξηση του NDVI (0.90). Με αυτό τον τρόπο, ο NDVI παρουσιάζει βελτίωση της ευαισθησίας σε

περιοχές χαμηλής πυκνότητας βλάστησης, ενώ συμπίεζεται και ωθείται σε κορεσμό όσο η πυκνότητα της βλάστησης αυξάνεται (Huete et al. 1999).

Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων από τους οποίους υπολογίζεται ο NDVI αναμένεται να επηρεάζουν ισχυρά τις ιδιότητες του δείκτη. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των καναλιών που χρησιμοποιούνται αλλάζει το εύρος δυναμικής του NDVI λόγω των διαφορετικών αποκρίσεων στο κόκκινο και το υπέρυθρο (Fensholt et al. 2006b, Galvao et al. 2000, Teillet et al. 1997). Επίσης, οι διαφορές στην χωρική και χρονική κλίμακα υπολογισμού του NDVI δημιουργούν μεταβλητότητα στις τιμές του (Fensholt et al. 2006b, Tan et al. 2006, Tarnavsky et al. 2008), ενώ βασικό ρόλο διαδραματίζουν οι επεξεργασίες και διορθώσεις που έχουν υποστεί οι δορυφορικές παρατηρήσεις (Fensholt et al. 2006b, Huete et al. 1999) καθώς και οι ιδιότητες της τροχιάς και της γεωμετρίας παρατήρησης (Hapke et al. 1996, Holben 1986, Huete et al. 1992). Ειδικά οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις που έχουν υποστεί τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από τον δείκτη επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στις τιμές του (Fensholt et al. 2006b, Huete et al. 1999, Kaufman & Tanre 1992). Από τα δεδομένα της παρούσας έρευνας προκύπτει ότι οι δύο διαφορετικοί τύποι δορυφορικών πολυφασματικών δεδομένων (SPOT - MODIS) που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των διακυμάνσεων του LAI σε τρία διαφορετικά οικοσυστήματα παρέχουν διαφορετική ευαισθησία ως προς τον εντοπισμό των ακριβών τιμών του. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα συσχέτισης του LAI με το NDVI των δύο αισθητήρων φανερώνεται ότι η σχέση LAI-NDVI SPOT γίνεται ασυμπτωτική σε $LAI > 4$ (Σχήμα 36α), ενώ στη σχέση LAI-NDVI MODIS δεν διακρίνεται τόσο έντονα το φαινόμενο του κορεσμού του NDVI (Σχήμα 36β).

Η πρώτη αιτία που ερμηνεύει την χαμηλότερη απόδοση του NDVI VGT είναι το εύρος και η τοποθέτηση των καναλιών που χρησιμοποιούνται. Αν και το κόκκινο κανάλι του VGT είναι ευρύτερο κατά 20 nm από το αντίστοιχο του MODIS, η εντονότερη διαφορά έγκειται στο υπέρυθρο. Το κανάλι του VGT στο εγγύς υπέρυθρο είναι πολύ ευρύ (100 nm) και καλύπτει φασματική περιοχή που υπόκειται σε έντονες εξωτερικές επιδράσεις, χαρακτηριστικότερη των οποίων είναι η απορρόφηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας στην περιοχή 820 – 830 nm. Επιπλέον, είναι πολύ πιθανό να επηρεάζεται και από την μεγαλύτερη περιοχή απορρόφησης της ατμοσφαιρικής υγρασίας που εμφανίζει μέγιστο στα 930 nm, αφού το κανάλι του VGT εκτείνεται έως τα 890 nm. Το μικρότερο όριο του NIR VGT (790 nm) φτάνει έως την περιοχή που επηρεάζεται από την εναλλαγή ερυθρού-υπερύθρου (red-edge) στην ανακλαστικότητα της βλάστησης. Αντιθέτως, ο MODIS διαθέτει πολύ στενότερο κανάλι στο εγγύς υπέρυθρο (35 nm) που είναι κατάλληλα τοποθετημένο ούτως ώστε να αποφεύγει τις έντονες ατμοσφαιρικές επιδράσεις, καλύπτοντας ταυτόχρονα το κρίσιμο σημείο του πλατό της ανακλαστικότητας της βλάστησης στο υπέρυθρο (Σχήμα 76). Έρευνες σχετικά με την επίδραση του εύρους και της τοποθέτησης των καναλιών σε δείκτες κόκκινου-υπερύθρου, όπως του NDVI, κατέδειξαν ότι η ευαισθησία των δεικτών παραμένει σε υψηλά επίπεδα όσο τα κανάλια που χρησιμοποιούνται αποφεύγουν την περιοχή στις παρυφές του ερυθρού (red-edge) και τις περιοχές απορρόφησης της ατμοσφαιρικής υγρασίας στο υπέρυθρο (Galvao et al. 2000, Teillet et al. 1997).

Προς επιβεβαίωση των προαναφερθέντων, οι Fensholt et al. (2006b) συμπέραναν ότι υπάρχει έντονη διαφορά στο κανάλι του εγγύς υπέρυθρου (NIR) ανάμεσα στους αισθητήρες MODIS και VGT. Βρέθηκε σταθερή υποεκτίμηση της ανακλαστικότητας στο NIR από τον VGT σε σχέση με τον MODIS. Ως αποτέλεσμα, ο NDVI του SPOT VGT υποεκτιμάται σε σχέση με του MODIS, με το φαινόμενο να είναι πιο έντονο στις υψηλές τιμές NDVI. Στην μελέτη των Fensholt et al. (2006b) οι υψηλότερες τιμές NDVI του μελετώμενου οικοσυστήματος έφταναν λίγο πάνω από το 0.7 στον MODIS ενώ οι αντίστοιχες του SPOT έφταναν μετά βίας το 0.6. Επιπροσθέτως, στην ίδια μελέτη οι δορυφορικές μετρήσεις ανακλαστικότητας συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις στο πεδίο,

συμπεραίνοντας ότι οι διαφορές των δύο αισθητήρων δεν έγκεινται μόνο στις φασματικές διαφορές των καναλιών τους, αλλά και στις ατμοσφαιρικές διορθώσεις που έχουν υποστεί. Κατέληξαν λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η ατμοσφαιρική διόρθωση του VGT NIR δεν είναι τόσο ακριβής όσο του MODIS NIR.

Οι επιδράσεις της χωρικής διακριτικότητας των πολυφασματικών δεδομένων στα χαρακτηριστικά των εξαγόμενων φασματικών δεικτών είναι επίσης μεγάλης σημασίας. Εκτός από την αύξηση της πιθανότητας εισαγωγής θορύβου λόγω τοπογραφικών ανωμαλιών, κενών στο θόλο ή άλλων στοιχείων που επηρεάζουν την ανακλαστικότητα (Huete et al. 2005), η χωρική διακριτικότητα ορίζει μια σειρά εσωτερικών παραμέτρων του κάθε αισθητήρα που επηρεάζουν την ευαισθησία του. Επίσης, η χωρική διακριτικότητα επηρεάζει την μετέπειτα διαδικασία ανάλυσης των πρωτογενών παρατηρήσεων όπως την βαθμονόμηση, την διόρθωση και την παραγωγή των δορυφορικών απεικονίσεων (Tan et al. 2006, Tarnavsky et al. 2008). Ακόμα, το γεγονός ότι το προϊόν ανακλαστικότητας του MODIS (MOD09A1) προέρχεται από οχταήμερη σύνθεση ενώ το αντίστοιχο του SPOT (VGT-S10) από δεκαήμερη, προσφέρει περισσότερη ακρίβεια στην ανίχνευση των διακυμάνσεων του LAI, ειδικά κατά τις περιόδους έκπτυξης και πτώσης των φύλλων όπου και συμβαίνουν ταχείες μεταβολές της φυλλικής βιομάζας. Η μέθοδος επιλογής επίσης της βέλτιστης μέρας για την αντιπροσώπευση του κάθε διαστήματος σύνθεσης διαφέρει στα δύο προϊόντα (βλέπε Υλικά και Μέθοδοι) κάνοντας πολύ πιθανή την επιλογή διαφορετικών ημερών για κάθε διάστημα. Τέλος, στο προϊόν VGT-S10 δεν ξεκαθαρίζεται η ακριβής ημέρα που χρησιμοποιείται ως ενδεικτική του δεκαημέρου για κάθε εικονοστοιχείο με αποτέλεσμα στις χρονοσειρές SPOT NDVI να χρησιμοποιείται αυθαίρετα η πρώτη ημέρα κάθε δεκαημέρου. Αντιθέτως, το προϊόν ανακλαστικότητας του MODIS προσφέρει την πολύτιμη πληροφορία της ακριβούς ημέρας που επιλέχθηκε ως βέλτιστη ανά δήμερο για κάθε εικονοστοιχείο. Με αυτό τον τρόπο οι χρονοσειρές των δεικτών MODIS παρουσιάζουν μεγαλύτερη χρονική ακρίβεια, κάτι που είναι εμφανές κυρίως τις περιόδους αύξησης και πτώσης των φυλλοβόλων οικοσυστημάτων.

Δυνατότητες των πιο εξελιγμένων πολυφασματικών δεικτών

Παρόλο που ο NDVI παρέχει αυξημένη ευαισθησία στην εκτίμηση του LAI όταν υπολογίζεται από το προϊόν ανακλαστικότητας του MODIS (MOD09A1), το φαινόμενο του κορεσμού σε υψηλές τιμές LAI καθώς επίσης και οι επιδράσεις άλλων παραμέτρων που προκαλούν ανώμαλες διακυμάνσεις στις χρονοσειρές NDVI είναι εμφανείς στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Αν και οι ιδιότητες του ως κανονικοποιημένη αναλογία ελαττώνουν πολλές από διακυμάνσεις του σήματος που οφείλονται σε βαθμονόμηση (Holben et al. 1990), γεωμετρία φωτισμού και παρατήρησης (Hapke et al. 1996, Holben 1986, Huete et al. 1992), αρχιτεκτονική του θόλου (Campbell & Norman 1998, Ross 1981), έδαφος (Bannari et al. 1995, Goel 1989, Huete 1988), τοπογραφία (Burgess et al. 1995) και κλιματικές-ατμοσφαιρικές συνθήκες (Gutman 1991, Holben 1986, Kaufman 1984, Kaufman & Tanre 1992), οι επιδράσεις των παραπάνω παραγόντων, καθώς και ο συνδυασμός τους, έχουν συνήθως διαφορετικό αντίκτυπο στις δύο περιοχές του φάσματος που χρησιμοποιούνται από τον δείκτη με αποτέλεσμα να μην εξαλείφονται τελείως. Ο κορεσμός του NDVI, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, εξαρτάται μεν από τα μήκη κύματος και τα εύρη που καλύπτουν τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από τον NDVI, αλλά μοιάζει αναπόφευκτος λόγω της φύσης του δείκτη (Begue 1993, Goel 1989, Huete et al. 1999).

Προς την κατεύθυνση της βελτίωσης των ιδιοτήτων του NDVI έχουν προχωρήσει πολλές έρευνες των τελευταίων δεκαετιών προτείνοντας δείκτες που αυξάνουν την ευαισθησία και μειώνουν τις εξωτερικές επιδράσεις (Broge & Leblanc 2001, Gitelson et al. 1996, Haboudane et al.

2004, Huete 1988, Huete et al. 1994, Kaufman & Tanre 1992, Major et al. 1990, Roujean & Breon 1995). Τέτοιοι δείκτες εφαρμόστηκαν στα κανάλια του MODIS στην παρούσα έρευνα και κάποιοι από αυτούς επιβεβαίωσαν τις αναβαθμισμένες ιδιότητες τους. Οι OSAVI, RDVI και EVI παρουσίασαν αυξημένη ευαισθησία στις διακυμάνσεις του LAI, εμφανίζοντας γραμμικές συσχετίσεις και ομαλότερες διακυμάνσεις στις χρονοσειρές τους. Ο δείκτης SAVI είναι από τους πιο πρώιμους δείκτες που κατασκευάστηκαν με γνώμονα την βελτίωση των ιδιοτήτων του NDVI. Ο κυριότερος στόχος στον σχεδιασμό του δείκτη αυτού ήταν η ελαχιστοποίηση των επιδράσεων του υποορόφου και του εδάφους (Huete 1988). Μέσω μοντελοποίησης της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τον θόλο και το έδαφος (Huete 1987), υπολογίστηκαν κατάλληλοι συντελεστές που εφαρμόζονται στην φόρμουλα του δείκτη για να ρυθμίζουν τις επιρροές του εδάφους (L). Ο παράγοντας L εξαρτάται από την πυκνότητα της βλάστησης και προϋποθέτει a priori γνώση του μελετώμενου οικοσυστήματος. Παρόλα αυτά, η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου L είχε αρχικά προταθεί να κυμαίνεται γύρω από το 0.5 στην φόρμουλα του SAVI (Huete 1988), ενώ στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε πολύ μικρότερη τιμή (OSAVI, $L = 0.16$) όπως προτείνεται αργότερα από τους Rondeaux et al. (1996).

Προς την ίδια κατεύθυνση κινήθηκε και ο σχεδιασμός του RDVI. Η φιλοσοφία όμως της κατασκευής του ήταν η προσπάθεια του συνδυασμού των ιδιοτήτων του NDVI και του DVI ($DVI = R_{NIR} - R_{Red}$). Ο DVI θεωρήθηκε ότι επηρεάζεται λιγότερο από το σύμπλεγμα υποορόφου-εδάφους, αλλά μόνο όταν οι τιμές του LAI παραμένουν χαμηλές (Roujean & Breon 1995). Ωστόσο, η έλλειψη κανονικοποίησης περιορίζει τις δυνατότητες του δείκτη αυτού και αυξάνει τις επιδράσεις άλλων παραγόντων όπως η αρχιτεκτονική του θόλου και η γεωμετρία φωτισμού-παρατήρησης (Campbell & Norman 1998, Hapke et al. 1996, Holben 1986, Huete et al. 1992, Ross 1981, Roujean & Breon 1995). Ο NDVI λοιπόν παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον DVI και επιπλέον αποδείχθηκε ότι σε περιοχές πυκνότερης βλάστησης επηρεάζεται λιγότερο από το έδαφος (Roujean & Breon 1995). Προτάθηκε λοιπόν ο συνδυασμός των δύο δεικτών ($RDVI = (NDVI * DVI)^{1/2}$), ο οποίος αποδείχθηκε ότι βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του NDVI (Roujean & Breon 1995).

Όπως σημειώνουν οι Huete et al. (1999), εμφανίζεται συχνά η παρανόηση ότι οι βελτιώσεις των επιδράσεων του εδάφους στους δείκτες βλάστησης είναι σημαντικές μόνο για την παρακολούθηση οικοσυστημάτων με αραιή βλάστηση όπως άγονες και ημι-άγονες περιοχές, οι οποίες επηρεάζονται πολύ ισχυρά από την ανακλαστικότητα του εδάφους. Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες και εξομοιώσεις δείχνουν ότι η ευαισθησία του NDVI στις επιδράσεις του υποορόφου είναι μέγιστες σε περιοχές με μέση πυκνότητα βλάστησης, περιλαμβάνοντας επίσης και δάση με ανοίγματα στο θόλο. Οι υψηλότερες επιδράσεις εμφανίζονται όταν ο LAI κυμαίνεται κοντά στη μονάδα (Bausch 1993, Huete et al. 1985), ενώ είναι ακόμα εντονότερες όταν ο υποόροφος καλύπτεται από χιόνι, νερό ή βαλτώδεις περιοχές. Είναι γεγονός ότι στην παρούσα έρευνα και οι δύο δείκτες (OSAVI, RDVI) επέδειξαν πολύ καλή σταθερότητα στις χειμερινές, ανοιξιότικες και φθινοπωρινές διακυμάνσεις στα φυλλοβόλα, που είναι κρίσιμες λόγω των έντονων εδαφικών και κλιματικών επιδράσεων για την σωστή αναγνώριση της έκπτυξης και πτώσης των φύλλων. Επίσης, οι δείκτες αυτοί απέδωσαν ομαλές διακυμάνσεις κατά την συνολική διάρκεια μελέτης του ημι-φυλλοβόλου, όπου ο LAI κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα και η κάλυψη από πυκνή βλάστηση μετά βίας φτάνει την έκταση του εικονοστοιχείου MODIS (0.25 km^2).

Οι δείκτες OSAVI και RDVI, όπως φαίνεται στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Όπως σημειώνεται και από τους Roujean & Breon (1995), οι δύο δείκτες έχουν ουσιαστικά την ίδια βάση σχεδιασμού και η ομοιότητα τους εξαρτάται από την τιμή L που δίνεται στον SAVI, η οποία εξισώνεται με την τιμή $(R_{NIR} + R_{Red})^{1/2}$ στον RDVI και

φυσικά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος παρακολούθησης αλλά στην περίπτωση του RDVI υπολογίζεται αυτόματα. Πιο πρόσφατες μελέτες απέδειξαν επίσης ότι οι δείκτες SAVI και RDVI παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Οι Haboudane et al. (2004) απέδειξαν ότι είναι λιγότερο ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις των χλωροφυλλών από τον NDVI, έχουν σχετικά περιορισμένη δυναμική τιμών (από 0.05 έως 0.75), αλλά δεν εμφανίζουν έντονο κορεσμό. Στην ίδια μελέτη ο RDVI επέδειξε πολύ καλές ικανότητες εκτίμησης του LAI σε θόλους καλλιέργειών σιτηρών και καλαμποκιού, ανάλογες δύο πιο πολύπλοκων υπερφασματικών δεικτών. Σε ανάλογη μελέτη (Broge & Leblanc 2001) ο RDVI αποδείχθηκε ανθεκτικός στις διακυμάνσεις της αρχιτεκτονικής και βιοχημείας του θόλου, καθώς και των φασματικών επιδράσεων του υποορόφου-εδάφους.

Πιο εξελιγμένοι και πολύπλοκοι είναι οι δείκτες βλάστησης που εκτός από τις παραπάνω βελτιώσεις, επιχειρούν να εισάγουν και ατμοσφαιρικές διορθώσεις (Justice et al. 1998, Karnieli et al. 2001, Kaufman & Tanre 1992). Οι Liu & Huete (1995) κατέληξαν ότι οι επιδράσεις του εδάφους και της ατμόσφαιρας στους δείκτες βλάστησης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους στον σχεδιασμό του δείκτη και η μείωση του ενός παράγοντα μπορεί να αυξήσει τις επιδράσεις του άλλου. Συνεπώς, επιχειρήθηκε η ταυτόχρονη ρύθμιση και των δύο αυτών παραγόντων με αποτέλεσμα την δημιουργία του διαδομένου EVI (Huete et al. 1996). Ο EVI χρησιμοποιεί τον παράγοντα ρύθμισης των επιρροών του εδάφους (L) που κληρονόμησε από τον SAVI και εισάγει επιπλέον την πληροφορία του μπλε φάσματος για την ρύθμιση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων μέσω δύο συντελεστών (C1, C2). Ο EVI σχεδιάστηκε βάσει του αισθητήρα MODIS και οι παραπάνω συντελεστές προσδιορίστηκαν εμπειρικά στις τιμές 6, 7.5 και 1 για C1, C2 και L αντίστοιχα (Huete et al. 1999). Εκτός από τις διορθώσεις των ατμοσφαιρικών και εδαφικών επιδράσεων, ο EVI, όπως επίσης και οι OSAVI και RDVI, παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε περιοχές πυκνής βλάστησης αποδίδοντας γραμμική συσχέτιση με τον LAI (Fensholt 2004, Huete et al. 2002, 1999, 2005). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την ανάλυση της παρούσας μελέτης (Σχήμα 38γ), ωστόσο, τα αποτελέσματα μας δεν αποδίδουν κάποιο πλεονέκτημα στον EVI σε σχέση με τους απλούστερους OSAVI και RDVI παρόλο που εμπεριέχει πολυπλοκότερο σχεδιασμό και εφαρμόζεται ευρέως στα δεδομένα MODIS (Huete et al. 1999). Μάλιστα, οι διακυμάνσεις του δείκτη EVI στα μελετώμενα οικοσυστήματα παρουσίασαν μειωμένη σταθερότητα σε σχέση με τους RDVI και OSAVI, αλλά ακόμα και του NDVI κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Για αυτό ακριβώς το λόγο η συσχέτιση του με τον LAI παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά τιμών και συνεπώς χαμηλότερο συντελεστή προσδιορισμού από τους άλλους τρεις δείκτες (Σχήμα 38). Στην βιβλιογραφία μπορεί να εντοπιστεί μια ανάλογη μελέτη όπου το EVI δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τον NDVI στην εκτίμηση του LAI (Wang et al. 2005), ενώ όπως εξηγείται από τους Fensholt et al. (2006b) το μπλε φάσμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ατμοσφαιρικές ιδιότητες και τις διορθώσεις που εφαρμόζονται στα προϊόντα ανακλαστικότητας, εισάγοντας μεγάλη μεταβλητότητα στον δείκτη βλάστησης που το χρησιμοποιεί. Επομένως, σε μελέτες συμπεριφοράς οικοσυστημάτων στον χρόνο, και όχι στο χώρο όπου τα πλεονεκτήματα του EVI ίσως να είναι εμφανέστερα, ο EVI παρουσιάζει σχετικά αυξημένο θόρυβο που το πιθανότερο είναι να οφείλεται στην αβεβαιότητα που εισάγει το μπλε κανάλι σε σχέση με τις κυμαινόμενες ατμοσφαιρικές παραμέτρους.

Οι Gitelson et al. (1996) εισήγαγαν την μετατροπή του NDVI σε Green NDVI, αντικαθιστώντας το κόκκινο από το πράσινο κανάλι του MODIS στην φόρμουλα υπολογισμού. Με αυτό τον τρόπο υποστήριξαν ότι βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό η ευαισθησία του δείκτη στον εντοπισμό των χλωροφυλλών. Ο δείκτης Green NDVI αποδείχθηκε λειτουργικός στην παρούσα μελέτη, εμφανίζοντας καλή συσχέτιση με τον LAI αλλά επίσης και με τις χρωστικές φύλλου στα

δύο φυλλοβόλα δάση. Εντούτοις, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη βελτίωση σε σχέση με τον NDVI όσον αφορά την εκτίμηση του LAI, ενώ η συσχέτιση με τις χρωστικές δεν αποδείχθηκε επαρκής ώστε να καλύψει και τα τρία διαφορετικά οικοσυστήματα. Άλλωστε, ο προσδιορισμός χρωστικών φύλλου σπάνια επιχειρείται μέσω πολυφασματικών δεδομένων και μάλιστα σε επίπεδο οικοσυστήματος. Εξαιρεση αποτελεί ο σύγχρονος αισθητήρας MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) στην πλατφόρμα ENVISAT (Environmental Satellite) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ΕΟΔ), όπου ο κατάλληλος σχεδιασμός των καναλιών του επιτρέπει τον υπολογισμό του δείκτη MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index, Dash & Curran 2004) και παρέχει εκτιμήσεις χλωροφυλλών σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι δείκτες ανακλαστικότητας για τον εντοπισμό χρωστικών φύλλου που καταχραστικά εφαρμόστηκαν στα κανάλια του MODIS στην παρούσα έρευνα, έχουν σχεδιαστεί ως επί το πλείστον σε επίπεδο φύλλου (Gamon & Surfus 1999, Gitelson & Merzlyak 1994, Merzlyak et al. 1999, Penuelas et al. 1995b, 1994, Sims & Gamon 2002). Οι δείκτες MTVI και MCARI είχαν αρχικά σχεδιαστεί για υπερφασματικά δεδομένα επιπέδου θόλου (Broge & Leblanc 2001, Haboudane et al. 2004) και αναπροσαρμόστηκαν πειραματικά στην παρούσα μελέτη για την εξέταση των αποδόσεων τους σε μεγαλύτερη φασματική και χωρική κλίμακα. Ωστόσο, ο δείκτης Red/Green, αν και σχεδιάστηκε αρχικά για τον εντοπισμό των ανθοκυανινών στα φύλλα (Gamon & Surfus 1999), μέσω της εφαρμογής του στα κανάλια του MODIS στην παρούσα έρευνα αποδεικνύεται ικανός τόσο στον προσδιορισμό του LAI (κυρίως όταν κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα), όσο και στον προσδιορισμό των καροτενοειδών θόλου ($CAR \cdot LAI$) (Σχήμα 39β).

Μελέτη συμπεριφοράς οικοσυστημάτων στο χρόνο μέσω αρχείου δορυφορικών δεδομένων

Τα κανάλια των αισθητήρων AVHRR είναι πολύ ευρεία και δεν προορίζονταν αρχικά για την μελέτη της βλάστησης. Όπως περιγράφηκε στην σύγκριση των ιδιοτήτων μεταξύ SPOT και MODIS, η επίδραση του εύρους και της τοποθέτησης των καναλιών σε δείκτες κόκκινου-υπερύθρου, όπως του NDVI, είναι κρίσιμη και θα πρέπει να αποφεύγονται οι περιοχές που επηρεάζονται από τις παρυφές του ερυθρού (red-edge) και τις περιοχές απορρόφησης της ατμοσφαιρικής υγρασίας στο υπέρυθρο (Galvao et al. 2000, Teillet et al. 1997). Ειδικότερα, η περιοχή 900 – 980 nm, όπου συμβαίνει σημαντική απορρόφηση από την ατμοσφαιρική υγρασία, πρέπει να αποφεύγεται από τους αισθητήρες υπολογισμού δεικτών βλάστησης (Justice et al. 1991). Το κανάλι των AVHRR στο κοντινό υπέρυθρο επικαλύπτει την παραπάνω περιοχή μαζί με ένα σημαντικό ποσοστό των παρυφών του ερυθρού αποδίδοντας έτσι σημαντικές εξωτερικές επιδράσεις στο υπολογιζόμενο NDVI (Cihlar et al. 2001, Holben et al. 1986). Επίσης, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παραγωγή των χρονοσειρών GIMMS, και ειδικότερα στην μετατροπή της χωρικής διακριτικότητας των αρχικών δεδομένων (James & Kalluri 1994) και την ομαλοποίηση των χαρακτηριστικών μεταξύ των διαφορετικών αισθητήρων (Pinzon et al. 2005, Tucker et al. 2005), έχει αντίκτυπο στην ποιότητα των δεδομένων. Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί ερευνώντας την συμβατότητα των δεδομένων AVHRR με τους συγχρόνους αισθητήρες (SPOT VGT, MODIS, SeaWiFs) (Brown et al. 2006, Fensholt 2006a, 2004, Swinnen & Veroustraete 2008, Tucker et al. 2005) και επιχειρώντας την βαθμονόμηση των διαφορετικών δεδομένων. Στην παρούσα μελέτη συγκρίθηκε το αρχείο GIMMS με το αντίστοιχο του SPOT, αποδεικνύοντας ότι παρόλες τις διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών και των μεθόδων επεξεργασίας, το αρχείο GIMMS είναι αξιόπιστο για μελέτες δυναμικής της βλάστησης στον χρόνο. Άλλες έρευνες αξιολόγησαν επίσης την καταλληλότητα του αρχείου GIMMS για μελέτη της συμπεριφοράς των οικοσυστημάτων συγκρίνοντας το με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις πιο πρόσφατων και εξειδικευμένων αισθητήρων (SPOT VGT, MODIS, Landsat ETM+, SeaWiFs) και βρήκαν πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους (Brown et al. 2006, Fensholt et al. 2009).

Συμπεριφορά του δάσους δρυών (Quercus sp.) σε σχέση με το κλίμα

Στην εξέταση των ετήσιων αναπτυξιακών διακυμάνσεων του οικοσυστήματος *Quercus* sp. σε σχέση με τους κλιματικούς παράγοντες αναδείχθηκε η συμβολή των συνθηκών του προηγούμενου Αυγούστου και φθινοπώρου στην ανάπτυξη της τρέχουσας αναπτυξιακής περιόδου (Σχήμα 47α,β,γ). Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε συμφωνία με σειρά μελετών που παρατήρησαν το ίδιο φαινόμενο σε δάση δρυών (Corcuera et al. 2004, Corona et al. 1995, Di Filippo et al. 2010, Romagnoli & Codipietro 1996). Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τον ανεφοδιασμό του εδάφους με νερό, την αξιοποίηση των συσσωρευμένων αποθεμάτων και την δραστηριότητα του ριζικού συστήματος (Lebourgeois et al. 2004), καθώς επίσης και των εσωτερικών ισορροπιών και συσσώρευσης άνθρακα, την αποθήκευση θρεπτικών και την διαμόρφωση οφθαλμών, βλαστών και κόμης (Barbaroux & Breda 2002, Orwig & Abrams 1997, Zweifel et al. 2006). Σε δακτυλιόπορα είδη δρυός το πρώιμο (ή εαρινό) ξύλωμα διαμορφώνεται την άνοιξη, πριν την έκπτυξη των φύλλων, οπότε η ανάπτυξη προϋποθέτει υποστήριξη από εσωτερική αποθήκευση θρεπτικών από το προηγούμενο έτος (Corcuera et al. 2004, Zweifel et al. 2006). Η φθινοπωρινή υγρασία στο έδαφος επιδρά θετικά στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος (Weber et al. 2007), ούτως ώστε όταν ξεκινήσει η νέα αναπτυξιακή περίοδος το επόμενο έτος, τα νεαρά άτομα παρουσιάζουν αυξημένη δυναμική ανάπτυξης (Lebourgeois et al. 2004). Αντιθέτως, η ξηρασία επιφέρει βλάβες στην δομή και την λειτουργία του δέντρου και απαιτείται επιδιόρθωση των ιστών για την

επαναφορά των φυσιολογικών λειτουργιών (Breda et al. 2006). Επιπροσθέτως, η εξέταση της επίδρασης των κλιματικών παραμέτρων στην αναπτυξιακή δραστηριότητα του οικοσυστήματος *Quercus* sp. απέδωσε σημαντική συσχέτιση της συνολικής βροχόπτωσης των μηνών Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου με την ημερομηνία λήξης της επικείμενης αναπτυξιακής περιόδου. Η συμβολή της χειμερινής βροχόπτωσης – χιονόπτωσης στην παράταση της αναπτυξιακής περιόδου είναι δικαιολογημένη δεδομένου του βαθιού ριζικού συστήματος που διαθέτουν τα είδη *Quercus cerris* και *Quercus frainetto*. Ο εμπλουτισμός του υδροφόρου ορίζοντα που συμβαίνει κατά κύριο λόγο τους χειμερινούς μήνες επιτρέπει στα δέντρα να ξεπεράσουν τα καλοκαιρινά φαινόμενα ξηρασίας. Το φαινόμενο «υδραυλικής ανύψωσης» (David et al. 2007), όπου είδη με βαθύ ριζικό σύστημα μεταφέρουν νερό από τα βαθιά υλικά υποστρώματος στα ψηλότερα επίπεδα εδάφους για να χρησιμοποιηθεί ακολούθως από το ρηχό ριζικό σύστημα και τα μυκόρριζα, επιτρέπει την αντοχή και την επιβίωση κατά τη διάρκεια της ξηρασίας (Lilleskov et al. 2009, Mosca et al. 2007, Swaty et al. 2004). Η μελέτη των Phillips & Ehleringer (1995) έδειξε επίσης ότι τα είδη *Quercus gambelii* και *Acer grandidentatum* βασίζονται στη χειμερινή βροχόπτωση ή χιονόπτωση για τον εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα του εδάφους με όλο το απαραίτητο νερό που χρειάζονται για την καλοκαιρινή ανάπτυξη τους. Επίσης, κάθε μείωση αυτού του υδατικού αποθέματος έχει συνέπεια την μείωση της αναπτυξιακής περιόδου.

Από το δορυφορικό αρχείο τριών δεκαετιών εντοπίστηκαν επίσης ισχυρές τάσεις μεταβολής της αναπτυξιακής περιόδου του *Quercus* sp. που δεν είναι άμεσα συσχετιζόμενες με την επίδραση ενός κλιματικού παράγοντα. Ωστόσο, το αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων για την περιοχή των Ιωαννίνων φανερώνει ότι οι τρεις τελευταίες δεκαετίες είναι ξηρότερες από τις προηγούμενες. Τα φαινόμενα ξηρασίας μπορούν να οδηγήσουν άμεσα ή έμμεσα σε σειρά μεταβολών στην σύσταση του μελετώμενου οικοσυστήματος και να εξηγήσει τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Υπάρχουν ενδείξεις ότι πολλά φυσικά δασικά οικοσυστήματα ή συγκεκριμένα είδη μέσα σε αυτά εμφανίζουν εξασθένηση από την δεκαετία του 80 και ύστερα στην Μεσογειακή λεκάνη λόγω της πρόσφατης αύξησης των φαινομένων ξηρασίας (Amorini et al. 1996, Desprez-Loustau et al. 2006, Di Filippo et al. 2010, Jump et al. 2006, Kirschbaum 2000, Linares et al. 2009, Piovesan et al. 2008, Sarris et al. 2007). Τα δύο μελετώμενα είδη δρυός (*Q. cerris*, *Q. frainetto*) χαρακτηρίζονται ως λιγότερο ανθεκτικά στην ξηρασία σε σχέση με άλλα είδη που βρίσκονται επίσης στην περιοχή του κεντρικού Ζαγορίου (Athanasiadis 1986, Fotelli et al. 2000, Manes et al. 2006, Siam et al. 2008). Οι Manes et al. (2006) σύγκριναν τα δύο φυλλοβόλα είδη δρυός *Q. cerris* και *Q. frainetto* με την αείφυλλη δρυς *Q. ilex* ως προς την αντοχή σε αυξανόμενο υδατικό στρες και κατέληξαν ότι παρόλο που η *Q. cerris* παρουσιάζει τις βέλτιστες φυσιολογικές αποδόσεις, είναι η λιγότερο ανθεκτική στην ξηρασία. Όσον αφορά την *Q. frainetto*, πολλές μελέτες την κατατάσσουν ως λιγότερο ανθεκτική στην ξηρασία σε σχέση με άλλα είδη δρυός όπως *Q. ilex*, *Q. macrolepis*, *Q. pubescens*, *Q. ithaburensis* (Athanasiadis 1986, Fotelli et al. 2000, Siam et al. 2008). Μάλιστα, βασιζόμενος στην κατανομή των ειδών στον ελλαδικό χώρο, ο Athanasiadis (1986) προτείνει την εξής κατάταξη όσον αφορά την ανθεκτικότητα στην ξηρασία: *Q. frainetto* (λιγότερο ανθεκτική) < *Q. ilex* < *Q. macrolepis* < *Q. pubescens* (περισσότερο ανθεκτική). Η χνοώδης δρυς (*Q. pubescens*) είναι φυλλοβόλο είδος που επικρατεί σε φτωχά εδάφη και ξηρές περιοχές και συναντάται επίσης στην μελετώμενη περιοχή του κεντρικού Ζαγορίου. Η αριά (*Quercus ilex*) αποτελεί τυπικό αείφυλλο είδος σε πιο χαμηλές και ξηροθερμικές θέσεις (400 - 700 m υψόμετρο) αλλά δεν αποκλείεται η παρουσία ή εξάπλωση του στην μελετώμενη περιοχή.

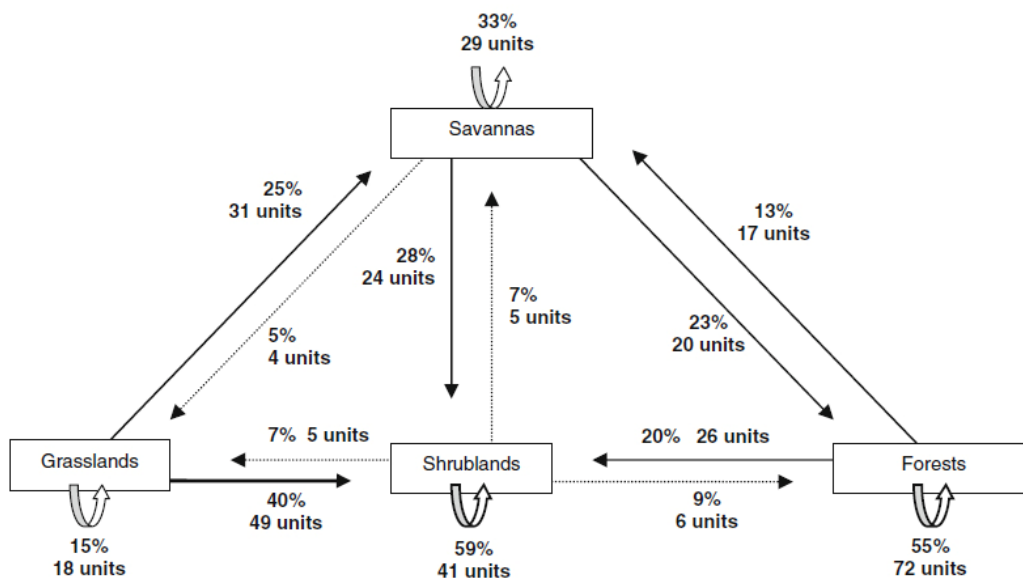
Τα νεαρά άτομα των λιγότερο ανθεκτικών ειδών πλήττονται σε μεγαλύτερο βαθμό από την αυξανόμενη ξηρασία επηρεάζοντας έτσι την ανάπτυξη και εξάπλωση των ειδών (Manes et al. 2006). Μια πιο άμεση επίδραση στην σύσταση των ειδών είναι η εξάπλωση παθογόνων που

σχετίζονται με την ξηρασία. Παρατηρήσεις σε δάση δρυών στην κεντρική και νότια Ιταλία την δεκαετία του '90 απέδειξαν ότι μία ή δύο περίοδοι έντονης ξηρασίας είχαν ως αποτέλεσμα την έντονη εξάπλωση του παθογόνου *Hypoxylon mediterraneum*, με αποτέλεσμα αξιοσημείωτη μεταβολή της σύστασης των ειδών (Vannini et al. 1996). Τα πιο ανθεκτικά στην ξηρασία είδη, όπως το *Q. pubescens*, ευνοήθηκαν, ενώ μειώθηκε ο αριθμός των ειδών *Q. cerris* και *Q. frainetto* (Vannini et al. 1996). Είναι χαρακτηριστικό ότι σε περιοχές που υπέστησαν βαριά επίθεση από το *Hypoxylon mediterraneum* μετά από έντονη ξηρασία, το 56.8% των δέντρων *Q. cerris* δεν επιβίωσαν, σε αντίθεση με τα δέντρα *Q. pubescens*, όπου η θνησιμότητα ήταν μόνο 1.9% (Vannini et al. 1996).

Συμπερασματικά, τα αυξημένα φαινόμενα ξηρασίας πλήττουν πρώτιστα το είδος *Q. cerris* και ακολούθως το *Q. frainetto* και ευνοούν είδη ανθεκτικά στο υδατικό στρες όπως το *Q. pubescens*. Η τάση αυτή σε συνδυασμό με τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, την πιθανή προσβολή από παθογόνα και τις φυσικές καταστροφές μπορούν να επιφέρουν σταδιακή μεταβολή της σύστασης των ειδών της μελετώμενης περιοχής. Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν την έναρξη και την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου του οικοσυστήματος αφού κάθε είδος παρουσιάζει διαφορετικό πρότυπο έκπτυξης και ανάπτυξης φύλλων. Αυτό που είναι ήδη γνωστό από τις παρατηρήσεις μας στο πεδίο τα τρία συνεχή έτη μετρήσεων, είναι ότι τα είδη *Q. cerris* και *Q. frainetto* παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικό πρότυπο ανάπτυξης φύλλων, με το *Q. frainetto* να προηγείται περίπου δύο εβδομάδες στην έκπτυξη. Η παρατηρούμενη λοιπόν τάση μεταβολής της συμπεριφοράς της αναπτυξιακής περιόδου της περιοχής *Quercus* sp. από το δορυφορικό αρχείο GIMMS και συγκεκριμένα η σταδιακή επέκταση της αναπτυξιακής περιόδου κυρίως μέσω της μετατόπισης της έναρξης της νωρίτερα, μπορεί να είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της σύστασης των ειδών της περιοχής. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, το είδος *Q. cerris* είναι το πιο ευαίσθητο σε αυξανόμενα φαινόμενα ξηρασίας και μπορεί να υποτεθεί ότι ο πληθυσμός του μειώνεται τα τελευταία χρόνια προς όφελος του δεύτερου κυρίαρχου είδους *Q. frainetto* ή και άλλων ανθεκτικών στην ξηρασία ειδών (π.χ. *Q. pubescens*). Η υπόθεση αυτή συμφωνεί με τα πρότυπα νωρίτερης έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου που εμφάνισε το δορυφορικό αρχείο και τις παρατηρήσεις μας στο πεδίο για τα πρότυπα έκπτυξης φύλλων των δύο κυρίαρχων ειδών. Ωστόσο, δεν μπορεί να αποκλειστεί και το ενδεχόμενο οι παρατηρούμενες μεταβολές στην αναπτυξιακή περίοδο να οφείλονται και στην σταδιακή αλλαγή του προτύπου έκπτυξης φύλλων στα κυρίαρχα είδη της περιοχής, αποκρινόμενα στις επιδράσεις των κλιματικών αλλαγών.

Μετατόπιση ζωνών βλάστησης λόγω κλιματικών αλλαγών

Οι κλιματικές συνθήκες καθορίζουν την κατανομή των ειδών μέσω ειδο-ειδικών ορίων στην θερμοκρασία και την διαθεσιμότητα νερού (Woodward 1987). Μετατοπίσεις σε είδη και τύπους βλάστησης προς τους πόλους ή μεγαλύτερα υψόμετρα σε απόκριση της αύξησης της θερμοκρασίας και της ξηρασίας έχουν περιγραφεί σε περιόδους κλιματικών αλλαγών του παρελθόντος (Gates 1993). Ανάλογες μεταβολές διαφαίνονται σε ευρύ φάσμα ταξινομικών ομάδων και γεωγραφικών περιοχών κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα λόγω των τρεχουσών κλιματικών αλλαγών (IPCC 2001, Walther et al. 2002). Παραδείγματα τέτοιων αλλαγών στην Μεσογειακή λεκάνη έχουν επίσης περιγραφεί. Οι Penuelas & Boada (2003) παρατήρησαν σταδιακή αντικατάσταση εύκρατων οικοσυστημάτων από μεσογειακά στα βουνά Montseny της Καταλονίας συγκρίνοντας την τρέχουσα κατανομή με αυτή του 1945. Συγκεκριμένα, το δάσος οξιάς (*Fagus sylvatica*) μετατοπίστηκε περίπου 70 m ψηλότερα, αντικαθιστάμενο από δάσος αριάς (*Quercus ilex*). Στον ελλαδικό χώρο έχει περιγραφεί η μετατόπιση του είδους *Q. frainetto* σε περιοχές που κυριαρχούσε

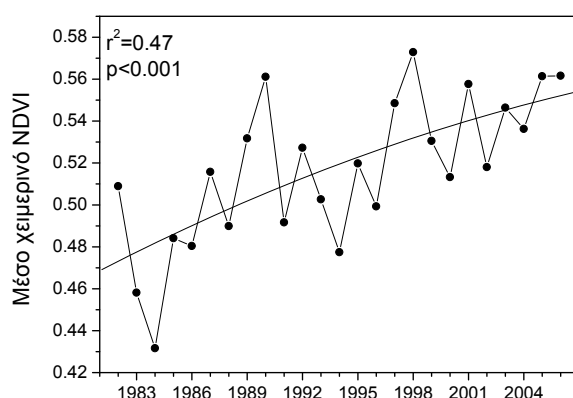


Σχήμα 72. Τύποι βλάστησης και τα ποσοστά μετατροπών ανάμεσα τους κατά το διάστημα 1958 – 2002 στην νότια Πορτογαλία. Οι μετατροπές (%) και σε αριθμό μονάδων) βασίζονται στον αριθμό των δειγματοληπτικών μονάδων του 1958 που μεταβλήθηκαν σε άλλο τύπο βλάστησης ή παρέμειναν στον ίδιο το 2002. Τα κουκιδωτά βέλη υποδεικνύουν συχνότητα μεταβολής < 10%. Στο σχήμα παραλείπεται η μετατροπή σε τύπους βλάστησης εκτός των τεσσάρων κύριων. Τα δεδομένα προέρχονται από την μελέτη των Acacio et al. (2009).

η μαύρη Πεύκη (*Pinus nigra*) στην Κρανιά Γρεβενών (Fyllas et al. 2007) και ανάλογη μετατόπιση του *Q. cerris* σε υψηλότερες περιοχές δασών οξιάς (*F. moesiaca*) στον Όλυμπο (Fyllas & Troumbis 2009). Σε χαμηλότερα υψόμετρα, έχει παρατηρηθεί εξασθένηση δασών αειφυλλων δρυών (Goncalves 1991, Ferreira 2000, Vicente & Ales 2006) παρουσιάζοντας αυξημένη θνησιμότητα νεαρών ατόμων (Acacio et al. 2009, Montero et al. 1994) και σταδιακή αντικατάσταση από ξηροφυτικούς θάμνους του γένους *Cistus* (Calvão & Palmeirim 2004). Οι Acacio et al. (2009) χρησιμοποίησαν αεροφωτογραφίες που καλύπτουν διάστημα 45 ετών (1958–2002) για να μελετήσουν την μετατροπή των τύπων βλάστησης στο χρόνο στην νότια Πορτογαλία. Κατέληξαν ότι οι θαμνώδεις τύποι βλάστησης είναι οι πιο επίμονοι (59%) ενώ ταυτόχρονα εξαπλώνονται (Σχήμα 72). Παρόλο που τα δάση είναι επίσης επίμονα (55%), παρουσιάζουν σταδιακή μείωση από το 1985 και ύστερα. Σημαντική συμβολή στην μετατροπή δασών σε θαμνότοπους παρέχουν τα αυξανόμενα κρούσματα πυρκαγιών που δρουν συνεργατικά (Clark 1990, Fyllas & Troumbis 2009) και είναι συγχρόνως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας και των περιόδων ξηρασίας (Acacio et al. 2009, Díaz-Delgado et al. 2002, Overpeck et al. 1990, Trabaud & Galtie 1996). Επίσης, οι ανθρώπινες επεμβάσεις κατά την διάρκεια του τελευταίου αιώνα είναι από του βασικότερους ρυθμιστές της παρούσας σύνθεσης πολλών δασών στην περιοχή της Μεσογείου (Urbietta et al. 2008), ενώ οι κλιματικές αλλαγές του αιώνα που πέρασε συνοδεύτηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις από αλλαγές στις χρήσεις και τη διαχείριση της γης (Penuelas & Boada 2003). Οι πυρκαγιές και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις ωστόσο, δεν είναι οι κύριοι παράγοντες των αλλαγών που συμβαίνουν σε μεγάλα υψόμετρα, στα οποία εκτιμάται ότι τον βασικότερο ρόλο παίζει η αύξηση της θερμοκρασίας και της ξηρασίας (Penuelas & Boada 2003, Fyllas & Troumbis 2009).

Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα που προκύπτει από την ανάλυση του δορυφορικού αρχείου της μελετώμενης περιοχής (*Quercus* sp.) είναι η τάση αύξησης του χειμερινού NDVI τις τρεις τελευταίες δεκαετίες (Σχήμα 73). Οι μήνες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του μέσου χειμερινού NDVI (Δεκέμβριος – Μάρτιος) καλύπτουν την περίοδο που τα φυλλοβόλα είδη της περιοχής δεν έχουν φύλλωμα και συνεπώς δεν επηρεάζουν τον δείκτη. Το φαινόμενο αύξησης του χειμερινού NDVI μπορεί να αποδοθεί είτε στην σταδιακή εμφάνιση ηπιότερων χειμώνων που έχουν ως συνέπεια λιγότερες επιδράσεις της χιονοκάλυψης η οποία ελαττώνει την τιμή του NDVI, είτε στην σταδιακή εξάπλωση αείφυλλων ειδών στην περιοχή του δάσους δρυών. Η μελετώμενη περιοχή από το δορυφορικό αρχείο αποτελεί τμήμα του κεντρικού Ζαγορίου και του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου με υψόμετρα από 600 έως 1000 m οπου συναντάται τυπικά η παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης. Στην συγκεκριμένη περιοχή τα κυρίαρχα είδη είναι οι δύο μελετώμενες φυλλοβόλες δρύες (*Q. cerris*, *Q. frainetto*), ενώ συναντώνται επίσης άλλα φυλλοβόλα είδη όπως οι χνοώδης (*Q. pubescens*) και η μακεδονική δρυς (*Q. trojana*), η οστρυνά (*Ostrya carpinifolia*), ο γάβρος (*Carpinus orientalis*, *Carpinus betulus*), η κρανιά (*Cornus mass*) και ο φράξος (*Fraxinus ornus*). Το αείφυλλο πουρνάρι (*Quercus coccifera*) μπορεί επίσης να βρεθεί στην παραμεσογειακή ζώνη, αν και αποτελεί χαρακτηριστικό είδος της ευμεσογειακής ζώνης βλάστησης. Αυτή συναντάται σε πιο χαμηλές και ξηροθερμικές θέσεις (400 - 700 m υψόμετρο) του Εθνικού Πάρκου και αποτελείται από αείφυλλα είδη όπως δάση αριάς (*Quercus ilex*), που συνοδεύονται από άλλα είδη δέντρων και θάμνων, όπως το φυλίκι (*Phillyrea latifolia*), ο φράξος (*Fraxinus ornus*), είδη αρκεύθων (*Juniperus communis* και *Juniperus oxycedrus*) και η αγριοκουμαριά (*Arbutus adracnhe*). Τα είδη αυτά είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στην ξηρασία και τις υψηλές θερμοκρασίες με το φυλίκι να ξεχωρίζει για τις αυξημένες ικανότητες επιβίωσης σε ξηρές συνθήκες (Lloret & Siscart 1995, Ogaya & Penuelas 2007, 2003, Ogaya et al. 2003, Penuelas et al. 2000, 1998, 2001). Σε υψηλότερα σημεία της περιοχής (900 έως 1600 m) εντοπίζονται δάση μαύρης Πεύκης (*Pinus nigra*), υβριδογενούς ελάτης (*Abies borisii-regis*) και οξιάς (*Fagus sylvatica*).

Στην ζώνη των δρυών οι ανθρωπογενείς επιδράσεις είναι έντονες λόγω της ύπαρξης πολλών κατοικημένων περιοχών στην περιοχή αυτή. Φαινόμενα όπως παράνομη δασοκομία, υπερβόσκηση και αποψίλωση ήταν έντονα στο πρόσφατο παρελθόν, αλλά έχουν μειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της μείωσης του τοπικού πληθυσμού, της οργανωμένης διαχείρισης του Πάρκου και της ένταξης του στο πρόγραμμα Natura 2000 (Πίνακας 26). Η έντονη βόσκηση αποτελεί περιοριστικό



Σχήμα 73. Ετήσια διακύμανση του μέσου χειμερινού NDVI (Δεκέμβριος – Μάρτιος) για την περιοχή του οικοσυστήματος *Quercus* sp.

παράγοντα στην ανάπτυξη θαμνώδους βλάστησης αλλά όχι στην βιοποικιλότητα της περιοχής (Lavorel et al. 1999, Papanikolaou et al. 2011). Ωστόσο, οι πυρκαγιές παραμένουν ως η μεγαλύτερη απειλή των δασικών περιοχών του Πάρκου. Μάλιστα, την τελευταία δεκαετία ξέσπασαν δύο μεγάλες πυρκαγιές στην περιοχή, με την πρώτη στα τέλη Αυγούστου 2000 να καίει περίπου 1000 στρέμματα δασικής έκτασης και την δεύτερη στα τέλη Αυγούστου 2007 να καταστρέφει 1500 στρέμματα δάσους. Βάσει των παραπάνω δεδομένων, μπορεί να υποτεθεί ότι η

Πίνακας 26. Οι ανθρωπογενείς και φυσικές επιδράσεις που υφίσταται η περιοχή του κεντρικού Ζαγορίου και το ποσοστό της έκτασης που επηρεάζεται από αυτές. Η ένταση της κάθε δραστηριότητας κατατάσσεται σε κλίμακα τριών σημείων ως Α: υψηλή επίδραση, Β: μέση επίδραση, C: χαμηλή επίδραση. Επίσης, η κάθε δραστηριότητα χαρακτηρίζεται ως θετικής επίδρασης (+), ουδέτερης επίδρασης (0) και αρνητικής επίδρασης (-) ως προς το περιβάλλον και τη βιοποικιλότητα. Τα δεδομένα προέρχονται από την έκθεση του προγράμματος Natura 2000 (<http://natura2000.eea.europa.eu/>) για την περιοχή κεντρικού Ζαγορίου.

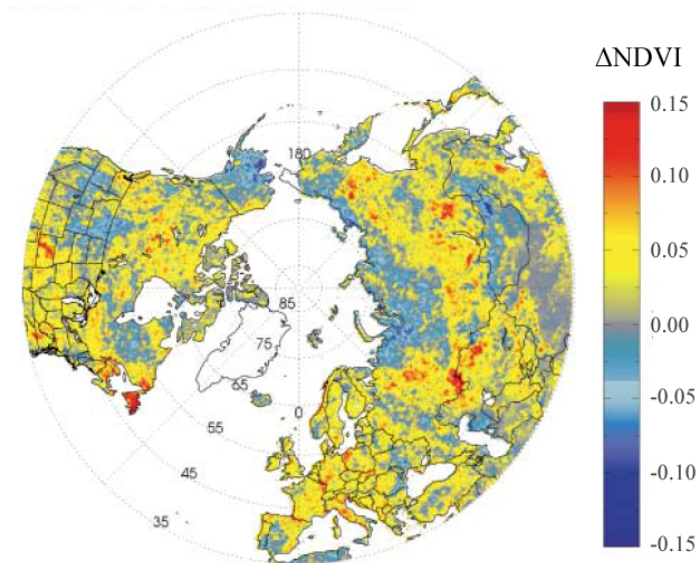
Δραστηριότητα	Ένταση	% της περιοχής	Επίδραση
Καλλιέργεια	C	10.00	0
Βόσκηση	C	10.00	-
Δασοκομία	C	10.00	-
Αναδάσωση	B	20.00	+
Εκτροφή ζώων	C	10.00	-
Κυνήγι	B	25.00	-
Κατοίκηση	C	10.00	0
Τουρισμός και αναψυχή	B	35.00	0
Φωτιά	B	35.00	-

συνεργατική δράση της αυξανόμενης ξηρασίας λόγω κλιματικών αλλαγών και των εξωτερικών πιέσεων με κύριο μοχλό τις πυρκαγιές αλλά ακόμα και την μειωμένη βόσκηση, ευνοεί την επέκταση της ευμεσογειακής ζώνης σε μεγαλύτερα υψόμετρα της περιοχής μελέτης του οικοσυστήματος *Quercus* sp. όπου παραδοσιακά κυριαρχούν φυλλοβόλα είδη δρυός.

Οι αλλαγές στην συμπεριφοράς της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο αλλαγών στα πρότυπα της βλάστησης όπως αποτυπώνονται από μελέτες τηλεπισκόπησης παγκόσμιας κλίμακας. Ξεκαθαρίζεται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής παρέμειναν σε τοπική κλίμακα και συνεπώς δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τέτοιου είδους μελέτες παρά μόνο να ενταχθούν ίσως στα πλαίσια τους. Η ενότητα αυτή λοιπόν παραμένει καθαρά βιβλιογραφική και επιχειρεί να εισάγει την γενική εικόνα των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών και των αλλαγών χρήσεων γης στην βλάστηση παγκοσμίως.

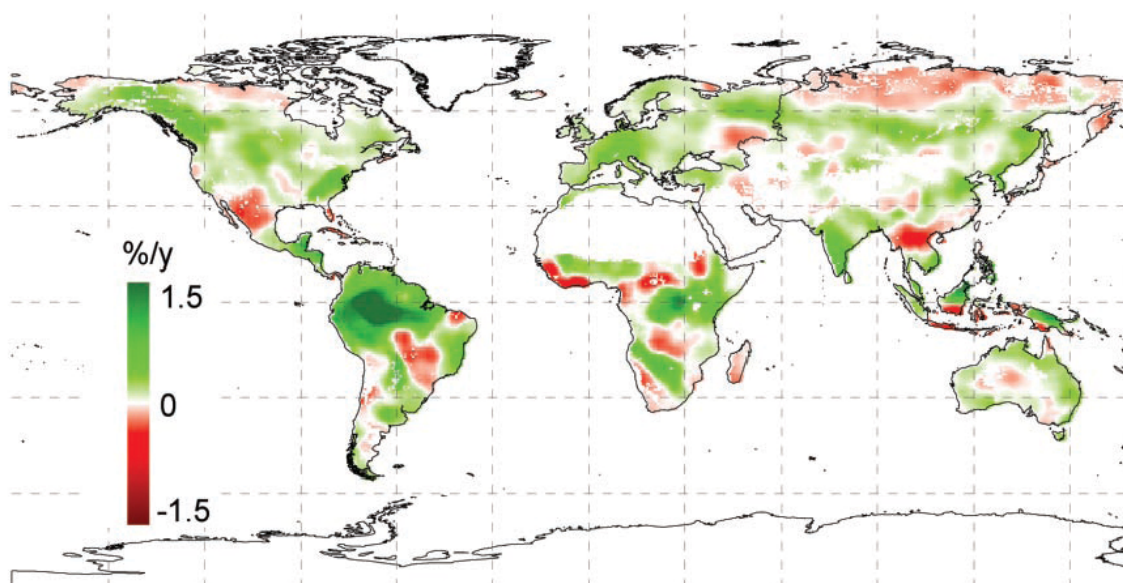
Οι δορυφορικές καταγραφές του παγκόσμιου NDVI των τελευταίων δεκαετιών (Bogaert et al. 2002, Myneni et al. 1997, Slayback et al. 2003, Tucker et al. 2001, Zhou et al. 2001) καθώς επίσης και προβλέψεις μοντέλων βασισμένων σε κλιματικά δεδομένα (Lucht et al. 2002), έχουν αναγνωρίσει μια τάση «πρασινίσματος» των υψηλών γεωγραφικών πλατών του βορείου ημισφαιρίου (Σχήμα 74). Η αυξημένη δυναμική της βλάστησης που παρατηρήθηκε από το δορυφορικό αρχείο συμφωνεί επίσης με επίγειες φαινολογικές παρατηρήσεις (Cayan et al. 2001, Colombo 1998, Fitter & Fitter 2002) καθώς και με αναφορές αύξησης της χερσαίας αποθήκευσης άνθρακα σε δασική βιομάζα σε βόρειες περιοχές (Fan et al. 1998, Goodale et al. 2002, Myneni et al. 2001, Schimel et al. 2001). Επιπροσθέτως, μετρήσεις της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO₂ υποδεικνύουν αυξημένη ανάπτυξη της βλάστησης σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη και πρόωμη έναρξη της αναπτυξιακής περιόδου (Keeling et al. 1996, Randerson et al. 1999). Η τάση αυτή θεωρείται ότι σχετίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης (Hansen et al. 1999, Oechel et al. 2000, Rigor et al. 2000) και την μειωμένη έκταση της



Σχήμα 74. Η μεταβολή του καλοκαιρινού NDVI (Μάιος – Σεπτέμβριος) από το 1982 έως το 1999 στο βόρειο ημισφαίριο. Τα δεδομένα προέρχονται από την μελέτη των Tucker et al. (2001).

χιονοκάλυψης στο βόρειο ημισφαίριο (Groisman et al. 1994). Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα νωρίτερη έναρξη και καθυστερημένη λήξη της αναπτυξιακής περιόδου, ιδιαίτερα σε βόρειες περιοχές, με αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερων μέσων τιμών NDVI (Bogaert et al. 2002, Keeling et al. 1996, 1995, Lucht et al. 2002, Randerson et al. 1999, Tucker et al. 2001, Zhou et al. 2001). Οι Tucker et al. (2001) υποστηρίζουν ότι η τάση της διεύρυνσης της αναπτυξιακής περιόδου διακόπηκε από την έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo το 1991, αλλά επανήλθε στα τέλη της δεκαετίας '90. Οι Kawabata et al. (2001) και Ichii et al. (2002) εντόπισαν ισχυρή σχέση μεταξύ του «πρασινίσματος» των υψηλών και μέσων γεωγραφικών πλατών του βορείου ημισφαιρίου με τις αυξήσεις της θερμοκρασίας την περίοδο 1982 – 1990. Από την άλλη, η διακύμανση της βροχόπτωσης θεωρείται ότι παίζει μικρότερο ρόλο στην αυξημένη δραστηριότητα της βλάστησης (Lucht et al. 2002, Xiao & Moody 2005), ειδικά στις βόρειες περιοχές του βορείου ημισφαιρίου, ενώ έχει αναγνωριστεί ως ρυθμιστικός παράγοντας σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές (Ichii et al. 2002, Kawabata et al. 2001).

Ωστόσο, η συμβολή των κλιματικών αλλαγών στις παρατηρούμενες τάσεις, και ειδικότερα η γεωγραφική κατανομή τους και οι πολλαπλές επιδράσεις μέσω διαφορετικών μηχανισμών που επηρεάζονται, δεν έχει ακόμα ξεκαθαριστεί. Οι Caspersen et al. (2000) τόνισαν τον βασικό ρόλο που διαδραματίζει η αλλαγή χρήσης της γης στον ρυθμό απορρόφησης άνθρακα των δασών των Ηνωμένων Πολιτειών, αντικρούοντας τον ισχυρισμό των Nemani et al. (2002) ότι βασικός ρυθμιστής είναι το κλίμα. Επίσης, οι μελέτες των Xiao & Moody (2004, 2005) δεν εντοπίζουν κάποια άμεση σχέση των τάσεων μεταβολής του NDVI με τις αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων στο μεγαλύτερο ποσοστό του πλανήτη για το διάστημα 1982-1998, υποθέτοντας ότι άλλοι παράγοντες όπως οι αναδασώσεις, η φυσική αναγέννηση, η εξάπλωση της βλάστησης και οι αλλαγές στις αγροτικές πρακτικές συνεισφέρουν στις παρατηρούμενες τάσεις «πρασινίσματος». Στην χαρακτηριστική μελέτη των Nemani et al. (2003), αναλύθηκαν δύο δεκαετίες παγκόσμιων κλιματικών και δορυφορικών δεδομένων για να βγει το συμπέρασμα ότι οι κλιματικές αλλαγές έχουν περιορίσει πολλαπλούς κλιματικούς αναστολείς της ανάπτυξης της βλάστησης με αποτέλεσμα την αυξανόμενη παραγωγικότητα σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Άλλες μελέτες τοπικής κλίμακας έχουν επίσης αναφέρει αυξήσεις στην πρωτογενή παραγωγικότητα



Σχήμα 75. Γεωγραφική κατανομή των γραμμικών τάσεων ετήσιας μεταβολής (%) της εκτιμώμενης καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας (NPP) για το διάστημα 1982 – 1999. Οι τιμές NPP υπολογίστηκαν από το μέσο FAPAR και LAI που εξήχθη από τα αρχεία GIMMS και PAL (Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer Land) (James & Kalluri 1994) και ενός μοντέλου αποδοτικότητας χρήσης φωτός παρόμοιο του αλγορίθμου MODIS (MOD17) (Running et al. 2000). Τα δεδομένα προέρχονται από την μελέτη των Nemani et al. (2003).

(Friedlingstein et al. 1995, Hicke et al. 2002, Houghton et al. 1999, Myneni, et al. 1997, Nemani et al. 2002, Phillips et al. 1998, Townsend et al. 1996). Για τα μέσα και υψηλά γεωγραφικά πλάτη οι μελέτες αυτές προτείνουν πολλαπλούς μηχανισμούς που προωθούν τέτοιες αυξήσεις όπως η εναπόθεση αζώτου, η αύξηση των επιπέδων CO_2 , η αναγέννηση των δασών και οι κλιματικές αλλαγές. Στις τροπικές περιοχές οι παρατηρούμενες αυξήσεις παραγωγικότητας αποδίδονται κυρίως στις αυξημένες ποσότητες CO_2 , ενώ οι Nemani et al. (2003) τις αποδίδουν στον περιορισμό της ετήσιας νεφοκάλυψης. Τα αποτελέσματα των Nemani et al. (2003) αποδίδουν σημαντικές αυξήσεις της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας (NPP) σε πάνω από 25% της παγκόσμιας καλυμμένης από βλάστηση έκτασης, με μέσο ρυθμό $6.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, ενώ σημαντικές μειώσεις παρατηρήθηκαν σε περίπου 7% των περιοχών βλάστησης με ρυθμό $4.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ για το διάστημα 1982 – 1999. Συνολικά, για το διάστημα αυτό η NPP αυξήθηκε 6.17% παγκοσμίως (Σχήμα 75). Το 80% της αύξησης αποδίδεται στα τροπικά οικοσυστήματα και αυτά των υψηλών γεωγραφικών πλατών του βορείου ημισφαιρίου, ενώ οι αλλαγές στο κλίμα συνεισέφεραν σχεδόν στο 40% της παρατηρούμενης αύξησης NPP. Οι αλλαγές στην βλάστηση την ίδια περίοδο συνεισέφερε στο υπόλοιπο 60% της συνολικής αύξησης πιθανόν ως αποτέλεσμα της ανάδρασης κλίματος-βλάστησης, των αλλαγών των χρήσεων γης και άλλων μηχανισμών αναζωογόνησης.

Παρακολούθηση αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων της βλάστησης μέσω υπερφασματικών δεδομένων

Δυνατότητες των υπερφασματικών-πολυγωνιακών αισθητήρων

Με την τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων αναπτύχθηκαν σε μεγάλο βαθμό οι δυνατότητες και η λεπτομέρεια ανάλυσης που μπορεί να προσφερθεί στις μελέτες χερσαίων οικοσυστημάτων. Μέσω μοντελοποιημένων εφαρμογών αλλά και επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δεδομένων έχουν σχεδιαστεί πολλοί δείκτες που προτείνονται για εκτίμηση βιοφυσικών, βιοχημικών και λειτουργικών ιδιοτήτων της βλάστησης από υπερφασματικά δεδομένα. Πολλές έρευνες εστίασαν στην εξέλιξη και βελτίωση των ήδη υπαρχόντων δεικτών βλάστησης και κυρίως του NDVI, με στόχο την ανάπτυξη της ακρίβειας στην εκτίμηση του LAI και των συνολικών χλωροφυλλών (Broge & Leblanc 2001, Haboudane et al. 2004, Zarco-Tejada et al. 2005). Άλλες έρευνες βασίστηκαν στην μελέτη της συμπεριφοράς της ανακλαστικότητας επιπέδου φύλλου ή κόμης για τον σχεδιασμό δεικτών χλωροφυλλών (Carter 1994, Gitelson & Merzlyak 1997, Vogelmann et al. 1993) και καροτενοειδών (Gitelson et al. 2002, Sims & Gamon 2002). Λόγω των περιορισμένων μελετών χερσαίων οικοσυστημάτων μέσω δορυφορικών υπερφασματικών δεδομένων και της πληθώρας παραγόντων που επιδρούν σε παρατηρήσεις τέτοιας κλίμακας, οι προτεινόμενοι υπερφασματικοί δείκτες εφαρμόζονται ακόμα πειραματικά.

Η ανακλαστικότητα της βλάστησης στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο εξαρτάται ισχυρά από δομικούς (πυκνότητα φυλλώματος, προσανατολισμός φύλλων, αρχιτεκτονική θόλου) και βιοχημικούς (χλωροφύλλες, καροτενοειδή) παράγοντες (Jacquemoud et al. 1996, Zarco-Tejada et al. 2001). Οπότε, είναι πολύ δύσκολο, έως αδύνατο, να σχεδιαστεί ένας δείκτης βλάστησης που να σχετίζεται αποκλειστικά με μία παράμετρο της βλάστησης (Govaerts et al. 1999). Επιπλέον, το σήμα της ανακλαστικότητας που λαμβάνουν οι αερομεταφερόμενοι και οι δορυφορικοί αισθητήρες επηρεάζεται από τον υποόροφο, το έδαφος, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τις συνθήκες φωτισμού και την γεωμετρία παρατήρησης του αισθητήρα.

Ο δορυφόρος CHRIS/PROBA προσφέρει την μοναδική ιδιότητα παρατήρησης της ίδιας περιοχής από 5 διαφορετικές γωνίες. Οι πληροφορίες που προσφέρουν τα δεδομένα αυτά κρίνονται απαραίτητες για τον χαρακτηρισμό της ανισοτροπίας που παρουσιάζεται στην ανακλαστικότητα της βλάστησης αλλά και άλλων επιφανειών (Chen et al. 2003). Οι πολυγωνιακές παρατηρήσεις περιέχουν πολύ περισσότερη πληροφορία από τις συμβατικές που είναι συνήθως μόνο κατακόρυφες. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα της εξέτασης των υπερφασματικών δεικτών ως προς τις γωνιακές αποκρίσεις τους. Οι δείκτες βλάστησης αναμένεται να υποφέρουν από γωνιακές επιδράσεις λόγω της ανισοτροπίας στην ανακλαστικότητα διαφορετικών τύπων βλάστησης, δομής θόλου, μη-φωτοσυνθετικής ύλης, επιρροών υποορόφου και σκίασης (Kimes et al. 1985, Qi et al. 1995). Η έλλειψη της εξέτασης των δεικτών βλάστησης ως προς τις γωνιακές αποκρίσεις τους αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της δυνητικής χρήσης τους για συνεχή, συνεπή και ακριβή παρακολούθηση της βλάστησης σε κλίμακα οικοσυστήματος. Οι πολυγωνιακές παρατηρήσεις της βλάστησης προσφέρουν επίσης πληροφορίες για την δομή των καλυμμένων με βλάστηση επιφανειών και των σκιασμένων τμημάτων του θόλου (Chen et al. 2003, Gao et al. 2003).

Η γεωμετρία φωτισμού και παρατήρησης επηρεάζει σημαντικά το φάσμα ανακλαστικότητας. Οι παρατηρήσεις οπίσθιας σκέδασης προέρχονται κατά σημαντικό ποσοστό από ηλιοφώτιστα φύλλα και κλαδιά (υψηλότερες τιμές ανακλαστικότητας), ενώ το σήμα των παρατηρήσεων πρόσθιας σκέδασης περιλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό σκιασμένων φύλλων και κλαδιών (χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας). Το ποσοστό των φωτισμένων φύλλων στις παρατηρήσεις

πρόσθιας σκέδασης εξαρτάται επίσης και από το ύψος του ηλίου. Εκτός από τις σκιάσεις, το ποσοστό των κενών στο θόλο είναι επίσης βασικό στοιχείο που επηρεάζει την ανακλαστικότητα και εξαρτάται από την γεωμετρία παρατήρησης. Οι κατακόρυφες παρατηρήσεις επηρεάζονται σε μεγάλο ποσοστό από τα κενά του θόλου, αναλόγως βεβαίως της αναπτυξιακής φάσης και του τύπου του οικοσυστήματος. Βάσει του γενικού κανόνα, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία παρατήρησης τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό κενών του θόλου που περιέχονται στο σήμα της ανακλαστικότητας. Τα κενά στο θόλο μειώνουν την ποιότητα και συνήθως τις τιμές ανακλαστικότητας του σήματος. Οι παραπάνω μηχανισμοί περιγράφονται αναλυτικά από τους Deering et al. (1999) και Sandmeier et al. (1998).

Μελέτες που εστιάζουν στις επιδράσεις της γωνίας παρατήρησης στην ανακλαστικότητα της βλάστησης συχνά καταλήγουν ότι μη-κατακόρυφες παρατηρήσεις είναι πιο χρήσιμες στην παρακολούθηση της φυσιολογίας των οικοσυστημάτων, αφού είναι μικρότερο το ποσοστό των επιδράσεων του υποορόφου (Roujean & Breon 1995, Takebe et al. 1990). Επιπλέον, συχνά αναφέρεται ότι οι γωνίες οπίσθιας σκέδασης εξυπηρετούν καλύτερα από τις ανάλογες της πρόσθιας σκέδασης την εκτίμηση οικοφυσιολογικών παραμέτρων (Galvão et al. 2009, Walter-Shea et al. 1997). Ωστόσο, στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας η γωνία πρόσθιας σκέδασης $+55^\circ$ ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες για τους υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού (r^2) που εμφανίζει σε όλα τα σκέλη της υπερφασματικής ανάλυσης. Παρόλο που η κατεύθυνση αυτή θεωρητικά επηρεάζεται από σκιάσεις στο εσωτερικό του θόλου, αποτελεί την υψηλότερη γωνία παρατήρησης που είναι διαθέσιμη προς ανάλυση. Επομένως, από την συγκεκριμένη γωνία παρατηρείται το μικρότερο ποσοστό κενών στο θόλο, ελαχιστοποιώντας έτσι τις επιδράσεις του εδάφους-υποορόφου και μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την πληροφορία που αφορά το θόλο. Καταδεικνύεται με αυτό τον τρόπο ότι στο συγκεκριμένο οικοσύστημα μελέτης (*Phlomis fruticosa*) οι επιδράσεις του εδάφους στην ανακλαστικότητα είναι πολύ σημαντικότερες από τις επιδράσεις των σκιάσεων. Οι Huber et al. (2007) παρατήρησαν επίσης ότι η κατεύθυνση $+55^\circ$ του CHRIS είχε όμοιες αποδόσεις με την -55° στην εκτίμηση του περιεχόμενου αζώτου στο θόλο. Οι Verrelst et al. (2008) περιέγραψαν την έντονη ανισοτροπία της ανακλαστικότητας που εμφανίζει η βλάστηση και την επίδραση της στους δείκτες βλάστησης, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η σκίαση δεν είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ανακλαστικότητα αλλά τα ποσοστά της περιεχόμενης φωτοσυνθετικής ύλης σε σχέση με την μη-φωτοσυνθετική ύλη και το έδαφος. Σε ανάλογο αποτέλεσμα κατέληξε και το πείραμα της παρούσας μελέτης στον πορτοκαλεώνα μέσω των εναέριων πολυφασματικών εικόνων υψηλής χωρικής διακριτικότητας. Σε αυτή φάνηκε ότι οι επιδράσεις των σκιασμένων μερών του θόλου στους περισσότερους δείκτες ανακλαστικότητας ήταν αμελητέες σε σχέση με την επίδραση του εδάφους.

Τα πέντε σκέλη της ανάλυσης των φασμάτων του CHRIS εφαρμόστηκαν με σκοπό να αποκαλυφθούν οι ιδιότητες των υπερφασματικών πολυγωνιακών δεδομένων και των δυνατοτήτων τους στην εκτίμηση βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων της βλάστησης. Ιδανικά, διαφορετικά μέρη του φάσματος θα ήταν ευαίσθητα σε διαφορετικές παραμέτρους βλάστησης ανάλογα των φασματικών ιδιοτήτων κάθε μίας. Ωστόσο, η χρήση των 62 καναλιών του CHRIS και όλων των NDSI-SSI συνδυασμών τους σε στατιστικά τεστ (1891 για κάθε μαθηματικό τύπο) μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Εκτός των επιθυμητών αληθινών συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών και των φυτικών παραμέτρων, στις αναλύσεις που εξετάστηκαν υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν περιπτώσεις συσχετίσεων λόγω συμεταβολής των φυτικών παραμέτρων ή ακόμα και τυχαίες στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις. Επιπροσθέτως, έμμεσες φασματικές αποκρίσεις σε βιοχημικά συστατικά της βλάστησης μπορεί να συμβαίνουν και να παίζουν επίσης ρόλο στις προκύπτουσες συσχετίσεις. Παραδείγματα τέτοιων αποκρίσεων έχουν

αναφερθεί από τους Haboudane et al. (2004), οι οποίοι παρατήρησαν ότι η συγκέντρωση χλωροφυλλών επηρεάζει έμμεσα το φάσμα ανακλαστικότητας ακόμα και σε υπέρυθρα μήκη κύματος. Έμμεσες επιδράσεις του φάσματος στην περιοχή των παρυφών του ερυθρού (red-edge) (Filella & Penuelas 1994) και σε δείκτες πράσινης βλάστησης όπως του NDVI (Roberts et al. 1997) από το υδατικό περιεχόμενο της βλάστησης έχουν επίσης αναφερθεί. Οι δευτερεύουσες επιδράσεις του υδατικού περιεχομένου της βλάστησης σε ευρεία περιοχή του φάσματος ανακλαστικότητας φύλλου έχουν εξεταστεί από τον Carter (1991).

Εντοπισμός του LAI

Ο εντοπισμός των διακυμάνσεων του LAI αποδείχθηκε ότι είναι δυνατός με μεγάλη ακρίβεια από τα υπερφασματικά δεδομένα CHRIS στην παρούσα μελέτη μέσω πολλών και διαφορετικών δεικτών βλάστησης. Επίσης, η παραγωγή του φάσματος ανακλαστικότητας στην πράσινη-κόκκινη περιοχή αποδείχθηκε αποτελεσματική για την εκτίμηση του LAI στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Οι παραδοσιακοί δείκτες κόκκινου-υπερύθρου, οι δείκτες που συνδυάζουν κόκκινο και πράσινο, ακόμα και οι δείκτες στα μήκη κύματος της απορρόφησης του νερού κοντά στα 970 nm απέδωσαν υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού του LAI. Οι τελευταίοι αποδίδονται είτε σε έμμεσες φασματικές επιδράσεις, είτε στη συνδιακύμανση υδατικής κατάστασης και LAI που παρατηρείται στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Όπως φάνηκε και στην ανάλυση των πολυφασματικών δεικτών, στο συγκεκριμένο οικοσύστημα οι παραδοσιακοί δείκτες κόκκινου-υπερύθρου δεν παρουσιάζουν τόσο υψηλές επιδόσεις όσο δείκτες που συνδυάζουν κόκκινα και πράσινα κανάλια. Αυτό αποδίδεται κυρίως στις διακυμάνσεις του LAI στο συγκεκριμένο οικοσύστημα, όπου δεν ξεπερνάει σε καμιά περίπτωση την τιμή 3. Όπως επισημαίνεται από τον Goel (1989), τα κόκκινα μήκη κύματος δεν κορεννούνται μέχρι η τιμή του LAI να φτάσει την τιμή 3, σε αντίθεση με το εγγύς υπέρυθρο όπου ο κορεσμός δεν είναι εμφανής ώπου οι τιμές του LAI να φτάσουν στο 6-8. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι η υπεροχή των δεικτών που χρησιμοποιούν το NIR δεν είναι εμφανής στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Από την άλλη, τα πράσινα κανάλια δείχνουν να βελτιώνουν τις αποδόσεις των δεικτών εντοπισμού του LAI και των χλωροφυλλών όταν συνδυάζονται με κόκκινα και NIR κανάλια (Broge & Leblanc 2001, Gitelson et al. 1996). Πολλοί από τους δείκτες πράσινης βλάστησης στενών καναλιών που εφαρμόστηκαν στα φάσματα του CHRIS (Πίνακας 10) έχουν σχεδιαστεί για την βελτίωση της ευαισθησίας και ακρίβειας εντοπισμού βιοφυσικών και βιοχημικών παραμέτρων της βλάστησης λόγω του κοινού φαινομένου κορεσμού που επιδεικνύουν οι παλιότεροι δείκτες βλάστησης τύπου NDVI σε περιοχές υψηλής πυκνότητας βλάστησης (Birky 2001, Broge & Leblanc 2001, Clevers 1989, Gamon et al. 1995, Turner et al. 1999, Haboudane et al. 2004). Λόγω των ιδιοτήτων του μελετώμενου οικοσυστήματος, οι βελτιωμένοι δείκτες δεν επέδειξαν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς στην μελέτη του CHRIS. Ωστόσο, το οικοσύστημα που μελετάται παρουσιάζει έντονες εδαφικές επιδράσεις στο σήμα του CHRIS λόγω των ισχυρών διακυμάνσεων του LAI κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου. Δείκτες όπως οι TCARI, MCARI, OSAVI και συνδυασμοί τους (TCARI/OSAVI και MCARI/OSAVI) έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των εδαφικών επιδράσεων (Haboudane et al. 2002, Zarco-Tejada et al. 2005). Με εξαίρεση τον OSAVI (Rondeaux et al. 1996), οι δείκτες αυτοί έχουν σχεδιαστεί μάλιστα για εφαρμογή ειδικά σε υπερφασματικά δεδομένα (Broge & Leblanc 2001, Haboudane et al. 2002, Zarco-Tejada et al. 2005). Παρόλα αυτά, οι παραπάνω δείκτες εμφάνισαν μεν ισχυρές συσχετίσεις με τον LAI και τις χλωροφύλλες, αλλά δεν επέδειξαν βελτιωμένες αποδόσεις σε σχέση με

απλούστερους δείκτες, ειδικά στις κατακόρυφες παρατηρήσεις όπου τα κενά του θόλου είναι πιο εμφανή.

Εντοπισμός των φωτοσυνθετικών χρωστικών

Ο εντοπισμός των διακυμάνσεων των χρωστικών φύλλου αποδείχθηκε δύσκολη υπόθεση ακόμα και με την χρήση των ιδιαίτερων υπερφασματικών και πολυγωνιακών χαρακτηριστικών του CHRIS. Για τον σχεδιασμό ενός δείκτη ευαίσθητου σε μία βιοχημική παράμετρο της βλάστησης προτείνεται να αποφεύγεται η χρήση των μηκών κύματος που η παράμετρος δείχνει την μέγιστη απορρόφηση και να χρησιμοποιούνται παρακείμενες περιοχές (Datt 1998, Gitelson & Merzlyak 1994, Sims & Gamon 2002). Και αυτό διότι τα μήκη κύματος μέγιστης απορρόφησης κορέννυνται νωρίτερα στην σταδιακή αύξηση της φυτικής παραμέτρου.

Όσον αφορά τις χλωροφύλλες, αρκετές μελέτες έδειξαν ότι η μέγιστη ευαισθησία του φάσματος ανακλαστικότητας φύλλου στις μεταβολές της συγκέντρωσης χλωροφυλλών εμφανίζεται στην πράσινη περιοχή (540 – 560 nm) και στην περιοχή των παρυφών του ερυθρού (700–730 nm) (Gitelson et al. 1996, 2005, Houborg et al. 2007, Yoder & Pettigrew-Crosby 1995). Οι Gitelson & Merzlyak (1994, 1996, 1997) και Gitelson et al. (1999) τόνισαν επανειλημμένως την σχέση της ανακλαστικότητας κοντά στα 700 nm και του χλωροφυλλικού περιεχομένου. Επίσης, οι Sims & Gamon (2002) παρουσίασαν την συσχέτιση της συγκέντρωσης χλωροφυλλών με την ανακλαστικότητα φύλλου στα 705 nm και στην μελέτη των le Maire et al. (2008) προέκυψαν βέλτιστες συσχετίσεις μεταξύ των χλωροφυλλών και της ανακλαστικότητας στα 705 nm σε επίπεδο φύλλου και στα 710 nm σε επίπεδο θόλου. Οι αναλύσεις των φασμάτων του CHRIS στην παρούσα έρευνα ανέδειξαν επίσης την σημαντικότητα των μηκών κύματος στις παρυφές του ερυθρού στην εκτίμηση των χλωροφυλλών, ήτοι 701 nm για την χλωροφύλλη α και 707 nm για την χλωροφύλλη β. Επίσης, η ανάλυση των δεικτών NDSI και SSI καταλήγει στους δείκτες $SSI(511,701)+55^\circ$ και $SSI(605,701)+36^\circ$ ως βέλτιστους εκτιμητές της συγκέντρωσης χλωροφυλλών (Σχήμα 59ζ,η). Προγενέστερες έρευνες έχουν επίσης προτείνει δείκτες που χρησιμοποιούν την περιοχή 700-710 nm για την εκτίμηση των χλωροφυλλών, συνδυάζοντας την όμως με κάποιο κανάλι στο εγγύς υπέρυθρο (Gamon & Surfus 1999, Gitelson & Merzlyak 1994, Zarco-Tejada et al. 2001). Ωστόσο, οι μεταβολές της συνολικής φυλλικής βιομάζας επιδρούν ισχυρά στην εγγύς υπέρυθρη ανακλαστικότητα, με αποτέλεσμα οι δείκτες που την συνδυάζουν με μήκη κύματος ευαίσθητα στις χλωροφύλλες να παρουσιάζουν εντονότερη μεταβλητότητα λόγω των δομικών διακυμάνσεων του θόλου σε σχέση με την συγκέντρωση χλωροφυλλών (Boegh et al., 2002). Στην παρούσα μελέτη, όπως και στην μελέτη των le Maire et al. (2008), ο συνδυασμός πράσινων έως πορτοκαλί μηκών κύματος με τις παρυφές του ερυθρού εμφανίζει την μεγαλύτερη ευαισθησία στην εκτίμηση της συγκέντρωσης χλωροφυλλών σε επίπεδο θόλου. Ωστόσο, στις αναλύσεις προσδιορισμού των χλωροφυλλών της *Phlomis fruticosa* εμφανίστηκαν επίσης και δείκτες που κάνουν χρήση των καναλιών στην περιοχή απορρόφησης του νερού στο υπέρυθρο (920 – 980 nm). Εκτός από τις υποθέσεις έμμεσης φασματικής επίδρασης των χλωροφυλλών στο υπέρυθρο φάσμα, η εστίαση της σημαντικότητας στα συγκεκριμένα κανάλια απορρόφησης του νερού υποδηλώνει ότι τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στην συνδιακύμανση των χλωροφυλλών με την υδατική κατάσταση του φυτού που εμφανίζεται τυπικά στο συγκεκριμένο οικοσύστημα (Kyparissis & Manetas 1993, Kyparissis et al. 1995).

Η εκτίμηση της συγκέντρωσης καροτενοειδών από το φάσμα ανακλαστικότητας είναι δυσκολότερο έργο από την εκτίμηση των χλωροφυλλών εξαιτίας της αλληλοεπικάλυψης των περιοχών απορρόφησης των δύο ομάδων χρωστικών στην μπλε περιοχή του φάσματος και του

γεγονότος ότι η συγκέντρωση χλωροφυλλών είναι υψηλότερη των καροτενοειδών στα περισσότερα υγιή φύλλα. Έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες διαχωρισμού των χρωστικών μέσω της ανακλαστικότητας φύλλου και την δημιουργία δεικτών καροτενοειδών (Datt 1998, Gitelson et al. 2002), αλλά αποδείχθηκε ότι δεν ήταν αποτελεσματικοί σε διαφορετικά είδη και σε διαφορετικές συνθήκες παρατήρησης (Blackburn 1998). Στην παρούσα έρευνα εμφανίστηκαν δύο δείκτες καροτενοειδών από την παραγωγή του φάσματος ανακλαστικότητας στην μπλε (D_{411-36°) και στην πράσινη (D_{511-36°) περιοχή, καθώς και ο δείκτης $NDSI(511,675)0^\circ$, ο οποίος απέδωσε τον βέλτιστο συντελεστή προσδιορισμού. Οι Gitelson et al. (2002) ανέφεραν ότι η μέγιστη ευαισθησία της ανακλαστικότητας στα καροτενοειδή συμβαίνει γύρω από τα 510 nm, όπου η απορρόφηση των χλωροφυλλών δεν είναι πια έντονη, ενώ των καροτενοειδών μόλις που ξεκινά να εξασθενεί. Ο δείκτης όμως που είχε προταθεί (CRI) σχεδιάστηκε βάσει μελετών επιπέδου φύλλου και δεν φάνηκε να αποδίδει στην παρούσα μελέτη μεγαλύτερης κλίμακας. Για την σχεδίαση του CRI, η ανακλαστικότητα στα 510 nm που είναι ευαίσθητη στα καροτενοειδή ομαλοποιείται αφαιρώντας τις επιδράσεις των χλωροφυλλών, χρησιμοποιώντας την ανακλαστικότητα στα 550 ή 700-710 nm, η οποία θεωρείται ενδεικτική των χλωροφυλλών. Τον ρόλο αυτό φαίνεται να παίζει στα φάσματα του CHRIS το κανάλι στα 675 nm. Σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα των αναλύσεων των πολυφασματικών δεδομένων, ιδιαίτερα καλή συσχέτιση με τα καροτενοειδή εμφάνισε επίσης και ο δείκτης Red/Green ο οποίος σχεδιάστηκε μεν για τον υπολογισμό των ανθοκυανινών στα φύλλα, αποδεικνύεται όμως ικανός στον προσδιορισμό των καροτενοειδών χρησιμοποιώντας ευρεία κανάλια (Gamon & Surfus 1999), αλλά και στην υπερφασματική μορφή του (Zarco-Tejada et al. 2005). Είναι γεγονός ότι ο δείκτης Red/Green διαθέτει παρόμοιες ιδιότητες με τον CRI και τον $NDSI(511,675)$, δικαιολογώντας έτσι την απόδοση του στην εκτίμηση των καροτενοειδών τόσο στην πολυφασματική όσο και την υπερφασματική μελέτη. Ωστόσο, όπως και στα αποτελέσματα της πολυφασματικής ανάλυσης για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*, δείκτες πράσινης βλάστησης και υδατικής κατάστασης που δεν χρησιμοποιούν κανάλια που να σχετίζονται με την περιοχή απορρόφησης των καροτενοειδών, εμφάνισαν συσχετίσεις με τις διακυμάνσεις των τελευταίων. Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα αυτά πηγάζουν από την σύνδεση των διακυμάνσεων των διαφορετικών τύπων χρωστικών στα φύλλα καθώς και την στενή σχέση των τελευταίων με την υδατική κατάσταση, ειδικά στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa* (Kyparissis & Manetas 1993, Kyparissis et al. 1995).

Ο λόγος CHL/CAR είναι ενδεικτικός της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών (Balaguer et al. 2002, Kyparissis et al. 2000, 1995, Munne-Bosch & Alegre 2000), επομένως ένας δείκτης που μπορεί να εκτιμήσει μια τέτοια παράμετρο μπορεί να θεωρηθεί και δείκτης στρες. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες παραμέτρους του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa* που παρουσιάζουν παρόμοιες διακυμάνσεις και πρότυπα σημαντικότητας, ο λόγος CHL/CAR παρουσιάζει διαφορετική διακύμανση και διαφορετικά πρότυπα σημαντικότητας σε όλες τις αναλύσεις. Το γεγονός ότι τα πρότυπα σημαντικότητας που προέκυψαν από τις αναλύσεις προσδιορισμού του CHL/CAR ομοιάζουν σε πολλά σημεία με τα πρότυπα σημαντικότητας προσδιορισμού της χλωροφύλλης β, σχετίζεται με το γεγονός ότι και τα δύο συνδέονται με τις συνολικές χλωροφύλλες και την κατάσταση των φυτών. Επίσης, οι δείκτες προσδιορισμού του CHL/CAR μοιάζουν σε μεγάλο βαθμό με αυτούς των συνολικών χλωροφυλλών. Η συγκέντρωση χλωροφυλλών από μόνη της χρησιμοποιείται ως δείκτης στρες, ζωτικότητας και ανάπτυξης του φυτού (Carter 1994, Lichtenthaler 1998). Συνεπώς, είναι λογικό να υπάρχουν ομοιότητες στις αναλύσεις των δεικτών προσδιορισμού των χλωροφυλλών και του λόγου CHL/CAR . Ο δείκτης $SSI(616,701)+36^\circ$ αποδείχθηκε κατάλληλος δείκτης στρες και ανεξάρτητος από δομικές επιδράσεις του θόλου, μιας και δεν εμφανίζει καμία συσχέτιση με τον LAI ($r^2=0.169$). Σε αντίθεση

με την ανάλυση του πολυφασματικού MODIS, τα υπερφασματικά δεδομένα αποδεικνύονται ικανά για τον εντοπισμό της φυσιολογικής κατάστασης των οικοσυστημάτων όπως περιγράφεται από τον λόγο CHL/CAR. Αναδεικνύεται λοιπόν ξανά η σημαντικότητα της ύπαρξης στενών καναλιών στα όρια ερυθρού-υπερύθρου για την αποτελεσματική παρακολούθηση των οικοσυστημάτων. Επιπλέον, υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού του CHL/CAR εμφάνισαν οι δείκτες στο υπέρυθρο $SSI_{(812,864)}+55^\circ$ (Πίνακας 18) και $D_{855}+55^\circ$ (Πίνακας 16). Η σχέση της ανακλαστικότητας στην περιοχή αυτή του υπέρυθρου με τον λόγο CHL/CAR δεν μπορεί να εξηγηθεί βάσει κάποιων γνωστών απορροφήσεων. Η περιοχή αυτή στο υπέρυθρο (850 nm) μπορεί να επηρεάζεται από την απορρόφηση του νερού, αλλά θεωρείται πολύ μικρή για να μπορεί να εντοπιστεί σε σχέση με την ανάλογη στα 970 nm. Ο Datt (1998) παρατήρησε σημαντικές συσχετίσεις ανάμεσα στην συγκέντρωση χλωροφυλλών των φύλλων και την υπέρυθρη ακτινοβολία στην περιοχή 750–1000 nm, με μέγιστη συσχέτιση μεταξύ της χλωροφύλλης α και της ανακλαστικότητας στα 850 nm. Επίσης, οι Haboudane et al. (2004) παρατήρησαν ότι η συγκέντρωση χλωροφυλλών επηρεάζει έμμεσα το φάσμα ανακλαστικότητας ακόμα και σε υπέρυθρα μήκη κύματος. Η ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο, και ειδικότερα κοντά στα 850 nm, είναι γνωστό ότι επηρεάζεται από την εσωτερική δομή και ίσως από ειδικούς εξωτερικούς μορφολογικούς μηχανισμούς προστασίας του φύλλου. Η δομή και οι χαρακτήρες αυτοί αλλάζουν ανάλογα με την φυσιολογική κατάσταση του φυτού, ειδικά στο *Phlomis fruticosa*, όπου παρατηρείται έντονη αναδίπλωση των φύλλων και ανάπτυξη τριχών εξωτερικά (Kyparissis & Manetas 1993). Τέτοιες μορφολογικές διακυμάνσεις θα μπορούσαν να επηρεάζουν το εγγύς υπέρυθρο φάσμα και να έχουν σαν αποτέλεσμα τις παρατηρούμενες συσχετίσεις.

Εντοπισμός της υδατικής κατάστασης της βλάστησης μέσω τηλεπισκόπησης

Η ικανότητα ακριβούς εκτίμησης της υδατικής κατάστασης της βλάστησης μέσω τηλεπισκόπησης είναι ένας πολύ σημαντικός στόχος της σύγχρονης έρευνας (Jackson 1986). Το υδατικό στρες είναι ένας από τους πιο κοινούς περιοριστικούς παράγοντες της πρωτογενούς παραγωγικότητας τόσο σε φυσικά οικοσυστήματα, όσο και σε καλλιέργειες (Boyer 1982, Howell et al. 1984). Οι εφαρμογές τηλεπισκοπικών μεθόδων εκτίμησης της υδατικής κατάστασης είναι σημαντικές για τον εκσυγχρονισμό των πρακτικών άρδευσης σε καλλιέργειες, την αποτίμηση των επιδράσεων της ξηρασίας σε φυσικά οικοσυστήματα (Penuelas et al. 1993), καθώς και στην μελέτη του κινδύνου πυρκαγιάς (Chandler et al. 1983, Pyne et al. 1996). Μια εφαρμόσιμη μέθοδος εκτίμησης της υδατικής κατάστασης χρησιμοποιεί την θερμική υπέρυθη ακτινοβολία (8–14 μm) που εκπέμπει η κόμη (Cohen et al. 2005, Idso et al. 1981, 1978, Jackson et al. 1977, 1981, Jackson & Pinter Jr. 1981, Leinonen & Jones 2004, Möller et al. 2007, Sepulcre-Canto et al. 2006, 2007, Wanjura et al. 2004). Όσο το διαθέσιμο νερό περιορίζεται, η διαπνοή μειώνεται και η θερμοκρασία της κόμης αυξάνεται, συνήθως πάνω από την θερμοκρασία του αέρα λόγω την απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας (Berliner et al. 1984, Nobel 1983, Raschke 1960). Ωστόσο, δίνεται επίσης και η δυνατότητα υπολογισμού πιο άμεσων δεικτών υδατικής κατάστασης μέσω του κοντινού (NIR, 700–1300 nm) και του μέσου υπέρυθρου φάσματος (SWIR, 1300–2500 nm). Οι περιοχές αυτές περιέχουν μήκη κύματος απορρόφησης του νερού, τα οποία είναι εμφανή στα φάσματα ανακλαστικότητας υγιούς κόμης ή φύλλου (Carter 1991, Danson et al. 1992).

Πολυφασματικά δεδομένα

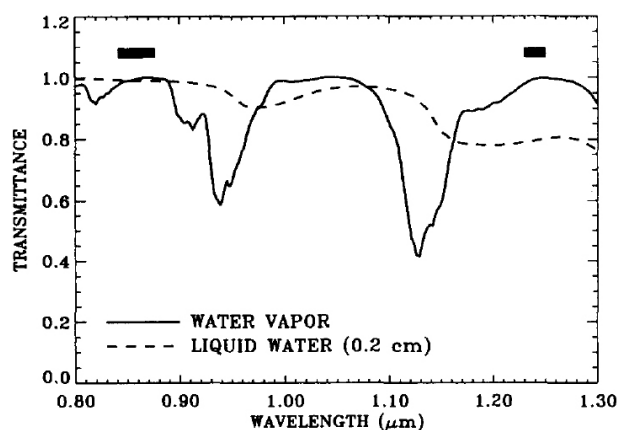
Ο δείκτης NDWI δημιουργήθηκε με την προοπτική της μελέτης της υδατικής κατάστασης της βλάστησης μέσω δορυφορικών δεδομένων. Μάλιστα ο πρωτότυπος σχεδιασμός του δείκτη αυτού από τον Gao (1996) έγινε με γνώμονα τα φασματικά χαρακτηριστικά του επικείμενου δορυφορικού αισθητήρα MODIS, τα κανάλια του οποίου (με κεντρικά μήκη κύματος 0.86 και 1.24 μm) θεωρούνται ιδανικά για τον υπολογισμό του NDWI. Οι αρχές στις οποίες βασίζεται ο NDWI του δίνουν ένα εξαιρετικό θεωρητικό υπόβαθρο μιας και τα κανάλια που χρησιμοποιεί βρίσκονται αμφότερα στο πλατό υψηλής ανακλαστικότητας του υπέρυθρου, ενώ μόνο το ένα από αυτά επηρεάζεται από την απορρόφηση του νερού. Αν και το μέγιστο απορρόφησης του νερού είναι στα 1.2 μm , στην ίδια περιοχή παρατηρείται και ασθενής απορρόφηση της κυτταρίνης, οπότε το κανάλι του MODIS στα 1.24 μm επηρεάζεται από την απορρόφηση νερού και ταυτόχρονα αποφεύγει τις επιδράσεις της κυτταρίνης. Επιπλέον, τα δύο κανάλια του MODIS που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του NDWI είναι έτσι τοποθετημένα ώστε να επηρεάζονται από της απορρόφησης του νερού αλλά όχι από την ατμοσφαιρική υγρασία (Σχήμα 76). Τα κεντρικά μήκη κύματος της απορρόφησης της ατμοσφαιρικής υγρασίας και του νερού στην περιοχή 0.9–2.5 μm απέχουν 30 - 50 nm μεταξύ τους. Οι μετατοπίσεις αυτές συμβαίνουν λόγω των διαφορών στην ισχύ των δεσμών O-H μεταξύ τις αέριας και της υγρής φάσης του νερού. Συνεπώς, το ποσοστό του θορύβου που εισάγεται στον δείκτη λόγω ατμοσφαιρικής υγρασίας θεωρείται πολύ μικρό (έως 1.5%), καθώς επίσης και οι επιδράσεις λόγω ατμοσφαιρικής σκέδασης (αεροζόλ) είναι πολύ ηπιότερες στον NDWI σε σχέση με τον NDVI (Gao 1996). Επιπλέον, οι επιδράσεις των σκεδάσεων του θόλου αναμένεται να επηρεάζουν ισότιμα τις δύο μπάντες του NDWI με αποτέλεσμα να εξισορροπούνται μέσω της κανονικοποίησης στην φόρμουλα του δείκτη.

Ωστόσο, ο δείκτης αυτός από την πρώτη κιόλας εφαρμογή του απέδειξε ότι εμφανίζει πολύ σημαντικά μειονεκτήματα. Έτσι, αν και ο NDWI θεωρητικά δεν επηρεάζεται από το επίπεδο υγρασίας του εδάφους, παρόλα αυτά εμφανίζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα τον τύπο του

εδάφους (τιμές από -0.4 έως 0) (Gao 1996, Stoner & Baumgardner 1980). Και εκτός αυτού, η αύξηση των τιμών του NDWI είναι ευθέως ανάλογη του ποσοστού κάλυψης της βλάστησης και ξεκινάει από την τιμή του γυμνού εδάφους (~ -0.2 για τα περισσότερα εδάφη) για να φτάσει την τιμή της πλήρους κάλυψης (~ 0.05 για φυσιολογική βλάστηση). Επομένως, μιας και το ποσοστό κάλυψης είναι άμεσα συνδεδεμένη έννοια με τον LAI (η σχέση των δύο εξηγείται λεπτομερέστερα στα Υλικά και Μέθοδοι) όταν αυτό αφορά μελέτη μεγάλης χωρικής κλίμακας (Carlson & Ripley 1997), ανάλογη σχέση αναμένεται ανάμεσα στον NDWI και τον LAI. Στα αποτελέσματα της μελέτης μας εμφανίζεται ακριβώς το παραπάνω πρότυπο διακύμανσης των τιμών NDWI ($-0.2 - 0.05$) κατά τη διάρκεια των αναπτυξιακών μεταβολών των τριών οικοσυστημάτων (Σχήμα 40). Άλλωστε, από τα πρώτα πειραματικά στοιχεία (Gao 1996) αποδείχθηκε ότι ο NDWI αυξάνεται με την αύξηση των στρωμάτων φύλλων. Αν και το συγκεκριμένο εύρημα εξηγήθηκε αρχικά ως προσόν του NDWI, ότι δηλαδή είναι δείκτης της συνολικής ποσότητας νερού στα στρώματα φύλλων, είναι εμφανές ότι είναι μεγάλο μειονέκτημα του δείκτη αφού οι διακυμάνσεις του εξαρτώνται ουσιαστικά από τον παράγοντα LAI, κάνοντας πολύ δυσδιάκριτες τις διακυμάνσεις της υδατικής κατάστασης. Αυτήν ακριβώς την συμπεριφορά του δείκτη καταδεικνύουν και τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης. Παρόλο που ο NDWI εντοπίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα επίπεδα υδατικού περιεχομένου των τριών μελετώμενων οικοσυστημάτων, οι αναπτυξιακές διακυμάνσεις του θόλου κατά την διάρκεια του έτους επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στις τιμές του δείκτη με αποτέλεσμα η υδατική πληροφορία να συγχέεται με την αναπτυξιακή. Οι περισσότερες μελέτες επιβεβαιώνουν το γεγονός αυτό, ποσοτικοποιώντας τις επιδράσεις που δέχεται ο NDWI από τις παραμέτρους της βλάστησης. Οι κύριοι παράγοντες θορύβου εντοπίστηκαν από τους Zarco-Tejada & Ustin (2001) στην δομή των φύλλων, την ξηρή μάζα των φύλλων και κυρίως στον LAI, ενώ οι Zarco-Tejada et al. (2003b) πρόσθεσαν τις επιδράσεις του εδάφους και της γεωμετρίας παρατήρησης. Οι μοντελοποιημένη ανάλυση των Zarco-Tejada et al. (2003b) καταδεικνύει την αυξημένη ευαισθησία του NDWI στον LAI, ειδικά όταν ο τελευταίος κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές. Οι μελέτες αυτές προτείνουν ως μόνη λύση για τον ακριβή εντοπισμό της υδατικής κατάστασης της βλάστησης την χρήση των μοντέλων αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τον θόλο (Radiative Transfer Models), τα οποία μπορούν να βασιστούν ακόμα και σε πολυφασματικά δεδομένα, όπως

τα 7 πρώτα κανάλια του MODIS (Zarco-Tejada et al. 2003b).

Τα άλλα δύο κανάλια του MODIS στο μέσο υπέρυθρο (1.64 και 2.13 μm) βρίσκονται επίσης σε περιοχές απορρόφησης του νερού και μάλιστα πολύ ισχυρότερης από τις περιοχές στα μήκη κύματος του εγγύς υπέρυθρου (0.98 και 1.2 μm). Παρόλο που, όπως αναφέρουν οι Gao (1996) και Penuelas et al. (1993), το κανάλι του MODIS στα 1.24 μm είναι το ιδανικότερο για την κατασκευή ενός δείκτη υδατικής κατάστασης, τα δύο κανάλια του MODIS στο μέσο υπέρυθρο έχουν εφαρμοστεί επίσης στην κατασκευή δεικτών υδατικής κατάστασης, ιδιαίτερα αυτό στα 1.64 μm (Fensholt & Sandholt 2003,



Σχήμα 76. Φάσματα διαπερατότητας της ατμοσφαιρικής υγρασίας και του νερού σε υγρή φάση σε μια περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι θέσεις και τα εύρη των δύο καναλιών του MODIS στην περιοχή αυτή εμφανίζονται ως οριζόντιες μπάρες πάνω από τα φάσματα. Τα δεδομένα προέρχονται από τον Gao (1996).

Hardisky et al. 1983, Xiao et al. 2002). Οι ιδιότητες των δεικτών αυτών ομοιάζουν πολύ με αυτές του NDWI (Cheng et al. 2006, Xiao et al. 2004), μιας και δεν αποφεύγουν τις έντονες επιδράσεις των διακυμάνσεων της αρχιτεκτονικής του θόλου και του LAI (Serrano et al. 2000). Επιπλέον, από την μελέτη της συμπεριφοράς του υπερύθρου φάσματος όσον αφορά την διακύμανση του LAI, έχει φανεί ότι η ανακλαστικότητα στην περιοχή 1.5 – 2.5 μm κορέννεται σε LAI υψηλότερα του 4 (Lillesaeter 1982). Επίσης, σε εφαρμογή δείκτη ανάλογου του NDWI στον SPOT (λ: 0.84 και 1.62 μm), παρατηρήθηκε κορεσμός σε μεγάλα επίπεδα περιεχόμενου νερού στο θόλο (Ceccato et al. 2002), μιας ποσότητας που είναι ευθέως ανάλογη του LAI, ενώ οι Serrano et al. (2000) απέδωσαν πολύ μικρή ευαισθησία του ίδιου δείκτη στο υδατικό περιεχόμενο του θόλου. Από την άλλη, λόγω της ασθενέστερης απορρόφησης του νερού σε μικρότερα μήκη κύματος του υπερύθρου (0.9 – 1.3 μm), το φάσμα ανακλαστικότητας της βλάστησης στις περιοχές αυτές είναι ευαίσθητο στις μεταβολές του περιεχόμενου νερού έως ο LAI φτάσει στην τιμή 8 (Lillesaeter 1982).

Υπερφασματικά δεδομένα

Από τα υπερφασματικά δεδομένα του CHRIS υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης της φασματικής περιοχής 950-970 nm όπου παρατηρείται απορρόφηση από το νερό σε υγρή μορφή. Θεωρείται ότι για την μελέτη της υδατικής κατάστασης των φυτών είναι καταλληλότερη η χρήση μικρότερων μηκών κύματος από το μέσο υπέρυθρο, τα οποία απορροφούνται ασθενέστερα και εισχωρούν βαθύτερα στο αντικείμενο μελέτης. Έτσι, για την μελέτη της υγρασίας του θόλου των οικοσυστημάτων, η περιοχή 950-970 nm είναι η πλέον κατάλληλη (Bull 1991). Επιπλέον, όταν το μελετώμενο δείγμα δεν παρουσιάζει ομοιομορφία στις φασματικές αποκρίσεις του, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των θόλων στα περισσότερα οικοσυστήματα, είναι αναγκαία η χρήση ενός μήκους κύματος αναφοράς κοντά στο μήκος κύματος απορρόφησης (Bull 1991). Οι Penuelas et al. (1993) πρότειναν τον WI (R_{900}/R_{970}) ως δυνητικό δείκτη υδατικής κατάστασης, ο οποίος αποδείχθηκε εφαρμόσιμος σε επίπεδο φύλλου, θόλου και οικοσυστήματος (Dawson et al. 1997, 1999, Gamon et al. 1998, Gamon & Qiu 1999, Penuelas et al. 1993, 1996, Penuelas & Inoue 1999, Penuelas et al. 1997c, Serrano et al. 2000). Ωστόσο, όπως και ο NDWI, ο WI επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις δομικές διακυμάνσεις του θόλου και τις επιδράσεις του εδάφους (Penuelas et al. 1993, 1996). Αυτό φανερώνεται επίσης στην παρούσα έρευνα από την εφαρμογή του στα δεδομένα CHRIS, όπου ο WI εμφάνισε υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού του LAI στις γωνίες παρατήρησης +55° και -36°, ενώ η σχέση του με το Ψ στις ίδιες γωνίες ήταν ασθενέστερη. Οι Serrano et al. (2000) αναγνώρισαν στους δύο δείκτες (NDWI και WI) ευαισθησία στην υδατική κατάσταση του θόλου από την εφαρμογή τους σε υπερφασματικά δεδομένα αερομεταφερόμενου αισθητήρα. Ωστόσο, διέκριναν την έντονη επίδραση της δομής του θόλου καθώς και του ποσοστού κάλυψης του εδάφους, επισημαίνοντας ότι οι δύο δείκτες παρουσιάζουν ισχυρές συσχετίσεις με το υδατικό περιεχόμενο του θόλου σε ποσοστά κάλυψης μεγαλύτερα του 70%. Επιπροσθέτως, η φυσιολογία κάθε είδους παίζει σημαντικό ρόλο στην ανακλαστικότητα του υπερύθρου φάσματος. Όπως σημειώνουν οι Penuelas et al. (1993), η εσωτερική δομή του φύλλου και κυρίως οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κυτταρικών τοιχωμάτων, αέρα, πρωτοπλάσματος και χλωροπλαστών επηρεάζονται από την κυτταρική σπαργή επιδρώντας έτσι στην υπέρυθρη ανακλαστικότητα (Grant 1987). Ο δείκτης WI αποδεικνύεται πολύ αποτελεσματικός σε είδη που χάνουν την ελαστικότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων τους σε συνθήκες ξηρασίας. Αντιθέτως, το μελετώμενο είδος *Phlomis fruticosa* επιδεικνύει αξιοσημείωτη ελαστικότητα κυτταρικών ιστών κατά την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου (Grammatikopoulos 1999). Επιδράσεις στην ανακλαστικότητα του υπερύθρου συμβαίνουν επίσης λόγω των μεταβολών της γεωμετρίας του θόλου από την έλλειψη

νερού. Η πτώση της σπαργής των κυττάρων λόγω έντονης διαπνοής έχει επιδράσεις στη δομή του θόλου σε πολλά είδη λόγω των κινήσεων που συμβαίνουν σε βλαστούς και φύλλα. Οι επιπτώσεις λόγω των δομικών μεταβολών στην ανακλαστικότητα είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες του σήματος απορρόφησης του νερού (Holben et al. 1983, Kimes et al. 1984). Το είδος *Phlomis fruticosa* παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές στον θόλο σε απόκριση της διαθεσιμότητας νερού. Εκτός από την αποβολή μεγάλου μέρους του φυλλώματος του, τα φύλλα του παρουσιάζουν έντονες αναδιπλώσεις σε συνθήκες ξηρασίας (Kyparissis & Manetas 1993).

Παρόλο που οι δείκτες WI και fWBI δεν παρουσίασαν ισχυρούς συντελεστές προσδιορισμού του Ψ στην παρούσα υπερφασματική έρευνα, από την ανάλυση των καναλιών του CHRIS προέκυψαν διάφοροι άλλοι δείκτες που χρησιμοποιούν το κανάλι στα 970 nm και παρουσιάζουν ισχυρότερες συσχετίσεις με το Ψ. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούν συνδυασμούς πολύ κοντινών καναλιών, κυρίως στα 930, 945 και 961 nm με τα 971 nm, από τους οποίους ο $NDSI(945,971)+36^\circ$ αποδίδει την ισχυρότερη συσχέτιση με το Ψ. Η πληροφορία που κατέχουν οι δείκτες NDSI και SSI που χρησιμοποιούν κοντινά κανάλια ισοδυναμεί με τα χαρακτηριστικά της παραγωγής του φάσματος ανακλαστικότητας λόγω των στενών και συνεχόμενων καναλιών του CHRIS. Η παράγωγος του φάσματος παρέχει δύο ουσιώδη πλεονεκτήματα: ελαχιστοποιεί τις αναλογικές μεταβολές του φάσματος (π.χ. λόγω μεταβαλλόμενου φωτισμού) και μειώνει τις γραμμικές επιδράσεις εξωτερικών παραγόντων (π.χ. γραμμική αύξηση της ανακλαστικότητας του εδάφους ανά μήκος κύματος) (Cufran et al. 1990). Επιπλέον, σε μελέτη των επιδράσεων της εσωτερικής δομής του φύλλου στην ανακλαστικότητα, αποδείχθηκε ότι η παράγωγος του φάσματος στις περιοχές απορρόφησης του νερού ελαχιστοποιεί τις δομικές επιδράσεις και μεγιστοποιεί την ευαισθησία στο υδατικό περιεχόμενο (Danson et al. 1992). Συνεπώς, τα συνεχόμενα και στενά κανάλια των υπερφασματικών δεδομένων αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμα για την αναγνώριση χαρακτηριστικών της βλάστησης που παρουσιάζουν δυσδιάκριτες απορροφήσεις και ιδιομορφίες, όπως το υδατικό περιεχόμενο. Είναι ιδιαίτερης σημασίας η ύπαρξη καναλιών αναφοράς πολύ κοντά στο μήκος κύματος απορρόφησης για το σχεδιασμό ευαίσθητων δεικτών στην περίπτωση πολλαπλών εξωτερικών επιδράσεων στην ίδια φασματική περιοχή (Bull 1991). Οι Inoue et al. (2008) παρατήρησαν επίσης την σημασία των NDSI που χρησιμοποιούν πολύ κοντινά κανάλια στον προσδιορισμό της φωτοσυνθετικής απόδοσης από την ανακλαστικότητα του θόλου υψηλής φασματικής διακριτικότητας.

Τέλος, στις αναλύσεις του φάσματος CHRIS εμφανίστηκαν πολύ συχνά δείκτες χλωροφυλλών ως σημαντικοί εκτιμητές της υδατικής κατάστασης, κάτι που φάνηκε επίσης στην πολυφασματική ανάλυση του MODIS για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Στις υπερφασματικές αναλύσεις οι περισσότεροι δείκτες που αποδίδουν τις βέλτιστες συσχετίσεις με το Ψ είναι δείκτες χλωροφυλλών (π.χ. $PSRI$, $SSI(542,701)+55^\circ$). Παρόμοια όμως αποτελέσματα εμφανίστηκαν και στις αναλύσεις για τον προσδιορισμό των χλωροφυλλών. Δηλαδή, ως βέλτιστοι προσδιοριστές των χλωροφυλλών εμφανίστηκαν δείκτες που συνδυάζουν κανάλια στην περιοχή 950-970 nm (π.χ. $NDSI(961,971)0^\circ$, $NDSI(945,971)0^\circ$). Η αμοιβαία σχέση ανάμεσα στην συγκέντρωση χλωροφυλλών και στο δυναμικό νερού στο είδος *Phlomis fruticosa* φαίνεται να είναι τόσο έντονη που επιτρέπει την «ανταλλαγή δεικτών» ανάμεσα στις δύο παραμέτρους. Επίσης, οι Filella & Penuelas (1994) αναγνώρισαν ότι το υδατικό περιεχόμενο της βλάστησης επιδρά έμμεσα σε μήκη κύματος στις παρυφές του ερυθρού (red-edge), ενώ οι Roberts et al. (1997) αναφέρουν ότι δείκτες πράσινης βλάστησης, όπως ο NDVI, επηρεάζονται επίσης από την υδατική κατάσταση. Οι δευτερεύουσες επιδράσεις του υδατικού περιεχομένου σε ευρεία περιοχή του φάσματος ανακλαστικότητας φύλλου έχουν εξεταστεί από τον Carter (1991).

Ο PRI ως δείκτης υδατικής κατάστασης

Εκτός από τους δείκτες που χρησιμοποιούν τις περιοχές του φάσματος που απορροφά το νερό για την άμεση εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών, έχει προταθεί επίσης η χρήση του δείκτη PRI για την αναγνώριση του υδατικού στρες (Peguero-Pina et al. 2008, Suarez et al. 2009, 2010, 2008, Thenot et al. 2002). Το κανάλι στα 531 nm έχει αναγνωριστεί ότι συνδέεται με την κατάσταση εποξειδωσης των ξανθοφυλλών (Gamon et al. 1990, 1992, Penuelas et al. 1995a) και βάσει αυτού, ο αρχικός σχεδιασμός του δείκτη PRI αποσκοπούσε στην εκτίμηση της φωτοσυνθετικής απόδοσης του θόλου μέσω τηλεπισκόπησης στενών φασματικών καναλιών (Gamon et al. 1992, Penuelas et al. 1995a). Η επίδραση που έχει η έλλειψη νερού στον φωτοπροστατευτικό μηχανισμό του κύκλου των ξανθοφυλλών αναγνωρίζεται επίσης από τον PRI και επομένως μπορεί να λειτουργήσει ως έμμεσος δείκτης της υδατικής κατάστασης (Thenot et al. 2002). Είναι χαρακτηριστική η αυξημένη απορρόφηση στα 531 nm σε κατάσταση υδατικού στρες, όπως παρατηρείται από το πείραμα της παρούσας μελέτης στον οπωρώνα πορτοκαλιών (Σχήμα 28β). Ωστόσο, η σύνδεση της υδατικής με την φωτοσυνθετική κατάσταση του φυτού που επιχειρείται όταν γίνεται η χρήση του PRI ως δείκτη νερού, παρουσιάζει πολλές αναντιστοιχίες που έχουν να κάνουν με τις ιδιαίτερες συνθήκες, τους φωτοπροστατευτικούς μηχανισμούς και το είδος που μελετάται.

Στην παρούσα μελέτη εξετάσθηκε λεπτομερειακά η σχέση του PRI με τα μετρημένα Ψ στο πείραμα ελλειμματικής άρδευσης του πορτοκαλεώνα. Δηλαδή, η κάθε πτήση του αερομεταφερόμενου αισθητήρα μελετήθηκε ξεχωριστά και με αυτόν τον τρόπο αποκαλύφθηκαν κάποιες ιδιαίτερες σχέσεις μεταξύ του PRI και της υδατικής κατάστασης των δέντρων. Αντιθέτως, εάν υιοθετούταν μια συνολικότερη εξέταση της σχέσης PRI-Ψ καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, πολλές ιδιαιτερότητες της σχέσης αυτής θα αποκρύπτονταν. Εν προκειμένω, παρουσιάστηκε αναντιστοιχία της υδατικής κατάστασης και του PRI κατά την περίοδο της υδατικής επανάκαμψης του πορτοκαλεώνα στα τέλη Σεπτεμβρίου. Η επανάκαμψη του Ψ μετά από πότισμα φυτών που έχουν εκτεθεί σε ξηρές συνθήκες μπορεί να διαρκέσει μερικές μόνο ημέρες, αρκεί να μην έχουν υποστεί βλάβη ή εμβολή (Brodribb et al. 2010, Galle et al. 2007). Απεναντίας, η φωτοσυνθετική δραστηριότητα δεν παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε συνθήκες υδατικής επανάκαμψης. Οι φωτοχημικοί μηχανισμοί των φυτών που υπέστησαν έντονο υδατικό στρες τείνουν να επανακάμπτουν πιο αργά και σταδιακά μετά την κάλυψη των υδατικών αναγκών τους. Οι ρυθμοί επανάκαμψης είναι διαφορετικοί για κάθε είδος (Galmes et al. 2007), ενώ η ένταση και η διάρκεια της ξηρασίας παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο (Flexas et al. 2006). Σε γενικές γραμμές, μετά από έντονο υδατικό στρες τα φυτά επανακάμπτουν μόνο το 40-60% του μέγιστου ρυθμού φωτοσύνθεσης την πρώτη μέρα ποτίσματος, ενώ η επανάκαμψη συνεχίζεται με αργότερους ρυθμούς το επόμενο διάστημα, αλλά οι μέγιστοι ρυθμοί δεν επανακτούνται πάντοτε (Flexas et al. 2004, Galle et al. 2007, Kirschbaum 1987, Souza et al. 2004). Όσον αφορά την συμπεριφορά του κύκλου των ξανθοφυλλών που συνδέεται άμεσα με τις τιμές του PRI, η ημερήσια σύνθεση και αποσύνθεση μεγάλων ποσοτήτων ζεαξανθίνης γίνεται με γρήγορους ρυθμούς σε φυτά που έχουν καλυμμένες τις υδατικές τους ανάγκες (Demmig-Adams 1990). Αντιθέτως, ο κύκλος των ξανθοφυλλών λειτουργεί πολύ βραδύτερα σε καταστάσεις όπου οι φωτοσυνθετικοί ρυθμοί έχουν κατασταλεί λόγω μακροχρόνιου υδατικού στρες (Demmig-Adams 1990).

Ο PRI παρουσιάζει επίσης επιπλέον χαρακτηριστικά λόγω της θέσης των καναλιών του στην πράσινη περιοχή του ορατού φάσματος. Αν και σε μελέτες ημερήσιας συμπεριφοράς, ο PRI ακολουθεί τον ημερήσιο κύκλο εποξειδωσης των ξανθοφυλλών, σε μελέτες μεγάλης χρονικής κλίμακας (εβδομάδες-μήνες), οι αλλαγές των αναλογιών των φωτοσυνθετικών χρωστικών

(χλωροφύλλες/καροτενοειδή) λόγω της ανάπτυξης, της γήρανσης ή του χρόνιου στρες, επιδρούν σημαντικά στις διακυμάνσεις του PRI (Gamon et al. 2001, Penuelas et al. 1997b, Sims & Gamon 2002, Stylinski et al. 2002). Η παραπάνω σύνθεση χαρακτηριστικών που διαθέτει ο PRI, τον καθιστά αποτελεσματικό δείκτη των σχετικών φωτοσυνθετικών ρυθμών σε ευρύ φάσμα συνθηκών, ειδών και λειτουργικών τύπων (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1992, Gamon & Qiu 1999, Penuelas et al. 1995a, Stylinski et al. 2002), αλλά την ίδια στιγμή τον απομακρύνει από έναν ιδανικό δείκτη υδατικής κατάστασης.

Υδατική κατάσταση και ποιότητα φρούτων σε καλλιέργειες

Σε πολλές περιοχές του κόσμου, ανάμεσα τους και οι μεσογειακές χώρες, η βροχόπτωση είναι σπάνια και ακανόνιστα κατανομημένη κατά τη διάρκεια του χρόνου. Τα μοντέλα κλιματικής αλλαγής μάλιστα προβλέπουν ακόμα πιο ξηρές συνθήκες τις επόμενες δεκαετίες (Bates et al. 2008). Οι υδατικοί πόροι στις περιοχές αυτές γίνονται όλο και πιο πολύτιμοι και επομένως αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για πολλές καλλιέργειες. Για τον λόγο αυτό, η ανάγκη ακρίβειας στους σχεδιασμούς άρδευσης γίνεται επιτακτική, ούτως ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγικότητα με την ελάχιστη δαπάνη νερού. Μία τεχνική που χρησιμοποιείται σήμερα είναι η ρυθμιζόμενη ελλειμματική άρδευση (Regulated Deficit Irrigation - RDI), μέσω της οποίας εφαρμόζεται περιορισμένη άρδευση στις αναπτυξιακές φάσεις της καλλιέργειας κατά τις οποίες είναι λιγότερο ευαίσθητη σε υδατικό στρες (Chalmers et al. 1981). Η πρακτική αυτή προτάθηκε αρχικά με γνώμονα τον έλεγχο της δυναμικής των καλλιεργειών υψηλής πυκνότητας, την μείωση του κόστους παραγωγής και της βελτίωσης της ποιότητας φρούτων. Ωστόσο, εξοικονομεί επίσης μεγάλη ποσότητα νερού που θα χανόταν μέσω αποστράγγισης (Feres & Soriano 2007).

Η ποιότητα φρούτων επηρεάζεται από τον περιορισμό της παροχής νερού σε πολλές καλλιέργειες (Baeza et al. 2007, Chartzoulakis et al. 1999, Ginestar & Castel 1996, Gonzalez-Altozano & Castel 1999, Mougheith et al. 1977, Myers 1988). Στα εσπεριδοειδή παρατηρούνται μεταβολές στις ιδιότητες του χυμού τους, όπως αυξήσεις στην συγκέντρωση σακχάρων και την οξύτητα (Chartzoulakis et al. 1999), οι οποίες σε μερικές περιπτώσεις ελαττώνουν την ποιότητα των φρούτων (Mougheith et al. 1977). Όταν η έλλειψη νερού εφαρμόζεται με την μέθοδο RDI, η απόδοση και το μέγεθος των φρούτων συνήθως δεν επηρεάζονται (Girona 2002), ενώ κάποια χαρακτηριστικά ποιότητας φρούτων αυξάνονται (Crisosto et al. 1994, Girona et al. 2003, Mills et al. 1994). Οι αποκρίσεις σε μεθόδους RDI εξαρτώνται από τον σωστό χρονισμό και την ένταση της έλλειψης νερού (Girona et al. 2003, Marsal & Girona 1997), τα οποία με την σειρά τους εξαρτώνται από την σωστή διαχείριση της καλλιέργειας. Παρόλο που η γνώση σχετικά με την εφαρμογή των RDI και της σχέσης τους με την ποιότητα φρούτων αυξάνεται (Baeza et al. 2007, Ginestar & Castel 1996, Gonzalez-Altozano & Castel 1999, Myers 1988), η ευρεία χρήση των μεθόδων αυτών εμποδίζεται από την έλλειψη κατάλληλων τεχνικών παρακολούθησης της πορείας του υδατικού στρες και των επιπτώσεων του στην ποιότητα φρούτων για την αποφυγή απωλειών στην παραγωγή (Feres & Soriano 2007).

Μέθοδοι τηλεπισκόπησης έχουν εφαρμοστεί για την εκτίμηση της ποιότητας φρούτων μέσω του LAI σε αμπελώνες (Johnson et al. 2001, 2003, Lamb et al. 2004) ή των φασματικών μεταβολών στην πράσινη και την κόκκινη περιοχή σε μανταρινιές (Kriston-Vizi et al. 2008). Στην παρούσα μελέτη οι δείκτες PRI απέδωσαν σημαντικές και επαναλαμβανόμενες συσχετίσεις τον Σεπτέμβριο με τις μετρημένες παραμέτρους ποιότητας φρούτων. Η περίοδος που εμφανίζονται οι συσχετίσεις αυτές δεν είναι τυχαία, μιας και ο Σεπτέμβριος εκτός ότι αποτελεί την περίοδο που εμφανίστηκαν τα πιο ισχυρά υδατικά στρες στο πείραμα μας, συμπίπτει επίσης με μια κρίσιμη χρονικά αναπτυξιακή φάση των φρούτων στα εσπεριδοειδή. Σχετικά πειράματα στις ποικιλίες

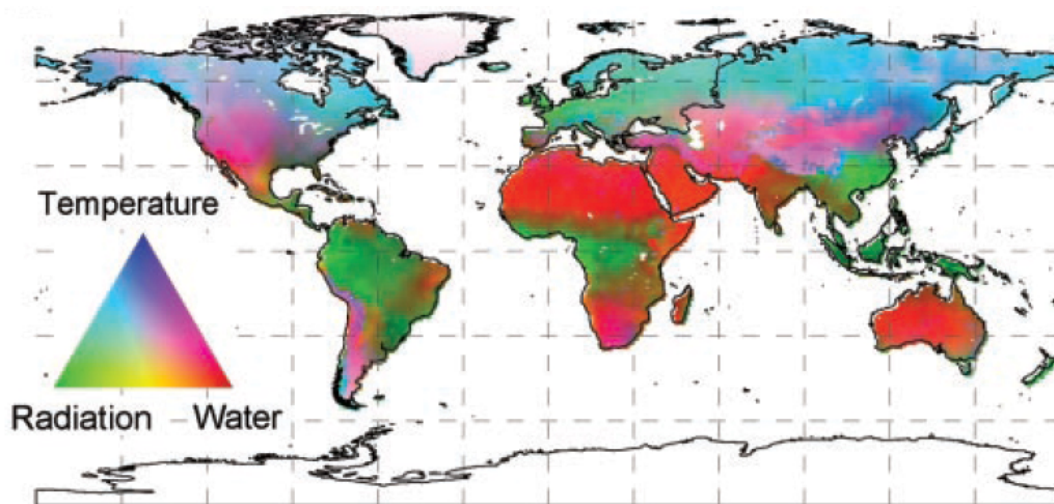
εσπεριδοειδών '*Clementina de Nules*' και '*Navelina*' έδειξαν ότι οι επιδράσεις των χειρισμών RDI εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την φαινολογική περίοδο στην οποία εφαρμόζεται η ελλειμματική άρδευση (Gasque et al. 2010, Gonzalez-Altozano & Castel 1999, 2000). Για τα εσπεριδοειδή, το καλοκαίρι αποτελεί την περίοδο της αρχικής μεγέθυνσης των καρπών. Η εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής δεν επιδρά στην απόδοση ή την ποιότητα φρούτων. Στα τέλη καλοκαιριού τα εσπεριδοειδή μπαίνουν στην επόμενη αναπτυξιακή φάση των καρπών κατά την οποία παρουσιάζεται έντονη αύξηση μεγέθους και σχηματισμού της σύστασης των χυμών του. Στην περίοδο αυτή έχει παρατηρηθεί έντονη επίδραση της ελλειμματικής άρδευσης στην απόδοση, το μέγεθος των φρούτων και τις παραμέτρους ποιότητας τους, λόγω των μειωμένων ρυθμών ανάπτυξης (Gasque et al. 2010, Gonzalez-Altozano & Castel 1999, 2000).

Ο PRI αποδεικνύεται στην παρούσα έρευνα καταλληλότερος δείκτης ποιότητας φρούτων παρά υδατικής κατάστασης. Σε ανάλογη πειραματική μελέτη εκτίμησης ποιότητας φρούτων σε πορτοκαλιές, ροδακινιές και νεκταρίνια από εναέριες πολυφασματικές εικόνες υψηλής ανάλυσης (Suarez et al. 2010), ο PRI απέδωσε πολύ καλύτερα από δείκτες υδατικού στρες που σχετίζονται απ' ευθείας με την διαπνοή (μέσω θερμικού υπερύθρου). Το φαινόμενο αυτό ήταν εντονότερο όταν είχε μεσολαβήσει μακρά περίοδος ελλειμματικής άρδευσης. Στις περιπτώσεις αυτές τα επίπεδα διαπνοής επανακάμπουν αλλά οι επιδράσεις του υδατικού στρες στην φωτοσυνθετική συσκευή παραμένουν. Τα χαρακτηριστικά του PRI, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τον καθιστούν ικανό δείκτη περιγραφής της φυσιολογικής κατάστασης και της φωτοσυνθετικής λειτουργίας, και επομένως αποδοτικότερο στην εκτίμηση της ποιότητας φρούτων σε εφαρμογές RDI σε σχέση με κοινούς δείκτες υδατικής κατάστασης.

Εκτός από τον PRI, ο λόγος R_{700}/R_{670} παρουσίασε κάποιες ασθενείς συσχετίσεις με την TSS το Σεπτέμβριο, υποδεικνύοντας ότι οι χλωροφύλλες υπέστησαν μεταβολή λόγω της μακράς περιόδου υδατικούς στρες, οι οποίες επηρέασαν με την σειρά τους τα σάκχαρα των φρούτων (TSS). Οι δείκτες RDVI και MTVI εμφάνισαν κάποιες στατιστικά ισχυρές συσχετίσεις με την ποιότητα των φρούτων, αλλά μόνο στην πρώτη πτήση του Ιουνίου, πριν η έλλειψη νερού επιδράσει στον οπωρώνα. Οι δύο αυτοί δείκτες έχουν σχεδιαστεί για την εκτίμηση δομικών και φυσιολογικών παραμέτρων του θόλου όπως την πυκνότητα και την ακμαιότητα της φυλλικής βιομάζας (Broge & Leblanc 2001, Haboudane et al. 2004, Roujean & Breon 1995, Zarco-Tejada et al. 2005). Οι παράμετροι αυτοί είναι πολύ σημαντικοί προσδιοριστές της φωτοσυνθετικής δυναμικής του θόλου και επηρεάζουν την σύνθεση και συσσώρευση σακχάρων και οξέων στα φρούτα (Pirie & Mullins 1980, Smart & Robinson 1991). Στην σχετική μελέτη των Suarez et al. (2010), συσχετίσεις μεταξύ δομικών δεικτών και της ποιότητας φρούτων εμφανίστηκαν επίσης στις πορτοκαλιές και στις ροδακινιές. Είναι πολύ ενδιαφέρον ότι αμφότερες οι συσχετίσεις των RDVI και MTVI με την ποιότητα φρούτων είναι αρνητικής κλίσης, δηλαδή τα δέντρα με μικρότερη πυκνότητα ή ακμαιότητα κόμης (μικρότερες τιμές RDVI και MTVI) απέδωσαν υψηλή ποιότητα φρούτων (μεγαλύτερες τιμές TSS/TA). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συνδέεται με τις επιδράσεις του κλαδέματος στην απόδοση του δέντρου ή την επίδραση του υδατικού στρες της προηγούμενης αναπτυξιακής περιόδου στην κόμη και την απόδοση.

Δορυφορική εκτίμηση της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση για την μοντελοποίηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας σε μεγάλη χωρική κλίμακα μέσω δορυφορικών δεδομένων βασίζεται στην αρχή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (LUE) (Monteith 1972, 1977). Αυτή εκφράζει την GPP ως το προϊόν της απορροφημένης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (APAR) και του συντελεστή αποδοτικότητας (ϵ), βάσει του οποίου η βλάστηση μετατρέπει την απορροφημένη ακτινοβολία σε βιομάζα. Το κρίσιμότερο σημείο σχεδιασμού των μοντέλων LUE, που αποτελεί ταυτόχρονα και τον βασικό περιοριστικό παράγοντα στην ευρεία εφαρμογή τους, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα μοντελοποιηθεί η ϵ (Turner et al. 2003a, Zhao et al. 2005). Η ϵ έχει μεγάλη επίδραση στην ακρίβεια του μοντέλου (Yuan et al. 2007), ενώ παρουσιάζει πολύ έντονη ετερογένεια χωρικά και χρονικά (Huete et al. 2006, Sims et al. 2006). Η ϵ καθορίζεται εξ' ορισμού από την κβαντική απόδοση της φωτοσύνθεσης, η οποία είναι γνωστό ότι περιορίζεται από στρεσογόνους παράγοντες, όπως ακραίες θερμοκρασίες, υψηλά επίπεδα φωτός ή έλλειψη νερού και θρεπτικών (Σχήμα 77). Μπορούν να διακριθούν δύο βασικές προσεγγίσεις υπολογισμού της ϵ μέσω τηλεπισκόπησης. Η πρώτη είναι έμμεση, προσδιορίζοντας την ϵ μέσω περιβαλλοντικών στρες. Μια έμμεση προσέγγιση προϋποθέτει έγκυρη και λεπτομερή χαρτογράφηση, καθώς και ειδική βαθμονόμηση κατάλληλων ρυθμιστικών παραμέτρων. Η δεύτερη προσέγγιση επιχειρεί την άμεση εκτίμηση της ϵ ανιχνεύοντας μικρές αλλαγές στην φασματική ανακλαστικότητα που σχετίζονται με μηχανισμούς φωτοπροστασίας των φυτών.



Σχήμα 77. Γεωγραφική κατανομή των κύριων κλιματικών αναστολέων της αναπτυξιακής και λειτουργικής δραστηριότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων όπως προκύπτει από στατιστική ανάλυση μακροχρόνιων κλιματικών δεδομένων (Nemani et al. 2003). Εκτιμάται ότι η διαθεσιμότητα νερού περιορίζει ισχυρά την ανάπτυξη της βλάστησης σε πάνω από 40% της καλυμμένης από βλάστηση γης, ενώ η θερμοκρασία και η ακτινοβολία το 33% και 27% αντίστοιχα. Συνήθως όμως δεν είναι μόνο ένας κλιματικός παράγοντας υπεύθυνος για κάθε περιοχή, με την θερμοκρασία, την ακτινοβολία και το νερό να αλληλεπιδρούν επιφέροντας περίπλοκους και κυμαινόμενους περιορισμούς στην δραστηριότητα της βλάστησης στα διαφορετικά μέρη του πλανήτη (Churkina & Running 1998).

Μοντέλα LUE πολυφασματικών δεδομένων

Τα μοντέλα LUE που βασίζονται σε πολυφασματικά δεδομένα (Prince & Goward 1995, Running et al. 2000) εφαρμόζουν την έμμεση μέθοδο υπολογισμού της ϵ . Ωστόσο, έχουν παρουσιαστεί επίσης μελέτες που χρησιμοποιούν τα στενά κανάλια του MODIS, που προορίζονται για μελέτες ωκεανών, για την εφαρμογή άμεσων μεθόδων εκτίμησης της ϵ (Drolet et al. 2005, 2008, Garbulsky et al. 2008, Goerner et al. 2009, Rahman et al. 2004). Τα μοντέλα MODIS (MOD17) και ModSat, που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη, επιχειρούν μέσω πολυφασματικών δεικτών και μετεωρολογικών δεδομένων να εκτιμήσουν την φωτοσυνθετική απόδοση των οικοσυστημάτων, ρυθμίζοντας την μέσω διαφόρων συντελεστών. Το μοντέλο MODIS GPP (Σχήμα 23) είναι ουσιαστικά ένας υπεραπλουστευμένος αλγόριθμος LUE, σχεδιασμένος με σκοπό την παραγωγή παγκόσμιων χαρτών GPP κάθε οκτώ ημέρες (Heinsch et al. 2006). Οι απλοποιημένες παραδοχές του αλγορίθμου MODIS είναι αναγκαίες λόγω των πρακτικών δυσκολιών λεπτομερούς ρύθμισης ενός τέτοιου αλγορίθμου σε παγκόσμια κλίμακα. Τα μεγαλύτερα σφάλματα στις εκτιμήσεις του MODIS θεωρείται ότι σχετίζονται με την χαρτογράφηση της εδαφικής κάλυψης και την παραδοχή ότι κάθε εικονοστοιχείο (1 km^2) περιέχει έναν μόνο τύπο κάλυψης (Heinsch et al. 2006). Η παραδοχή αυτή αποτυγχάνει να αποτυπώσει την χωρική ετερογένεια στην εδαφική κάλυψη, την ηλικία, τον τύπο εδάφους και τη δομή του θόλου στους περισσότερους τύπους οικοσυστημάτων (Goulden et al. 1996), ενώ η εσφαλμένη ταξινόμηση (20 - 30 %) εισάγει επίσης αναξιοπιστία στα αποτελέσματα (Strahler et al. 2002). Επίσης, η χρήση ενός απλού πίνακα παραπομπής (BPLUT) για τον καθορισμό των ρυθμιστικών παραμέτρων της ϵ , που δεν μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά (Running et al. 2000, Turner et al. 2003a) και διακρίνονται μόνο σε 11 τύπους εδαφικής κάλυψης (Heinsch et al. 2006, Turner et al. 2003a), είναι περιοριστική ως προς την έντονη μεταβλητότητα της ϵ . Η τελευταία έχει τόσο έντονες διακυμάνσεις ώστε οι μεταβολές εντός ενός τύπου οικοσυστήματος μπορεί να φθάσουν να είναι μεγαλύτερες από ότι μεταξύ διαφορετικών οικοσυστημάτων (Goetz et al. 1999, Landsberg et al. 1996).

Μία άλλη πηγή έντονων σφαλμάτων στις εκτιμήσεις GPP του MODIS είναι η χρήση μοντελοποιημένων κλιματικών παραμέτρων (GMAO) και μάλιστα σε πολύ χαμηλή χωρική ανάλυση ($\sim 100 \text{ km}$) (Heinsch et al. 2006, Sims et al. 2006, Turner et al. 2003a, 2003b). Η παραγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων από το GMAO βασίζεται σε συνεχή μοντελοποίηση μέσω δορυφορικών παρατηρήσεων και επίγειων μετεωρολογικών σταθμών (Atlas & Lucchesi 2000). Αναντιστοιχίες ανάμεσα στις μοντελοποιημένες και τις πραγματικές μετεωρολογικές παραμέτρους μπορούν να επιφέρουν μεγάλο σφάλμα στις εκτιμήσεις της GPP, κάτι που είναι πολύ έντονο στις τροπικές περιοχές (Zhao et al. 2005). Ωστόσο, σφάλματα εισάγει και το τελευταίο κομμάτι δεδομένων εισόδου στον αλγόριθμο LUE· οι εκτιμήσεις του FAPAR (MOD15A2) (Zhao et al. 2005, Turner et al. 2006). Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι οι επί μέρους αποκλίσεις του μοντέλου MODIS εξομαλύνονται όταν η παραγωγικότητα υπολογίζεται σε μεγάλη χρονική και χωρική κλίμακα (Turner et al. 2006). Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί η τάση του μοντέλου MODIS να υποεκτιμά την GPP σε οικοσυστήματα υψηλής παραγωγικότητας και να την υπερεκτιμά σε οικοσυστήματα χαμηλής παραγωγικότητας (Heinsch et al. 2006, Turner et al. 2006, Zhao et al. 2005). Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου υπερεκτιμήσεις του FAPAR αντισταθμίζονται με υποεκτίμηση της ϵ (Turner et al. 2003a). Έτσι, η εκτίμηση της παγκόσμιας απορρόφησης C από τα χερσαία οικοσυστήματα υπολογίζεται από το μοντέλο του MODIS ότι κυμαίνεται γύρω από τους 55 Gt το χρόνο (Running et al. 2004, Zhao et al. 2005), πολύ κοντά στην πάγια τιμή των 60 Gt C yr^{-1} που έχει εκτιμηθεί δειγματοληπτικά (Saugier et al. 2001).

Το προϊόν GPP του MODIS έχει υποστεί σειρά βελτιώσεων την τελευταία δεκαετία. Η τελευταία έκδοση (Collection 5) που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη θεωρείται σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με την αρχική (Zhao et al. 2005). Τα μετεωρολογικά δεδομένα GMAO προσφέρονται σε ανάλυση 1 km, όπως και η GPP, αλλά μέσω μιας μεθόδου εξομάλυνσης της πραγματικής ανάλυσης τους ($1.00^\circ \times 1.25^\circ$), που φαίνεται να βελτιώνει την ακρίβεια τους αλλά και την όψη του παγκόσμιου προϊόντος GPP (Zhao et al. 2005). Ιδιαίτερες βελτιώσεις παρατηρήθηκαν σε περιοχές με σημαντικές μεταβολές υψομέτρου καθώς και σε παράκτιες ζώνες. Επίσης, εφαρμόζεται μια μέθοδος αναγνώρισης και διόρθωσης των προβληματικών τιμών FAPAR πριν χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο LUE. Αυτό είναι αναγκαίο διότι παρά την χρήση της δήμερης σύνθεσης του προϊόντος FPAR/LAI (MOD15A2), όπως παρατηρήθηκε και στην παρούσα μελέτη, υπάρχουν ακόμα προβληματικές τιμές για πολλά εικονοστοιχεία, κυρίως λόγω παρατεταμένης νεφοκάλυψης (Myneni et al. 2002). Η επίδραση των νεφών έχει ως αποτέλεσμα την υποεκτίμηση των FPAR και LAI με ανάλογο αντίκτυπο και στην εκτίμηση της GPP. Η μέθοδος αντικατάστασης των προβληματικών FAPAR βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις προβληματικές παρατηρήσεις λόγω νεφοκάλυψης (Zhao et al. 2005), αλλά παραμένουν προβλήματα κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε περιοχές με χιόνι ή πάγο (Heinsch et al. 2006). Τέλος, ο πίνακας BPLUT έχει επίσης βελτιωθεί βάσει των μελετών αξιολόγησης που χρησιμοποιούν ως αναφορά εκτιμήσεις από πύργους Eddy (Eddy flux towers) από διάφορα οικοσυστήματα ανά τον πλανήτη (Zhao et al. 2005). Οι βελτιώσεις του μοντέλου MODIS και των δεδομένων εισόδου του πρόκειται βεβαίως να συνεχιστούν για πολλά χρόνια ακόμη αξιολογώντας την λειτουργία του, εντοπίζοντας τις ελλείψεις και αυξάνοντας την γνώση της συμπεριφοράς των οικοσυστημάτων. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι Zhao et al. (2005), η παρούσα φάση του προϊόντος MODIS GPP θεωρείται αρκετά ώριμη για να εφαρμοστεί σε ποικιλία εφαρμογών.

Όπως είναι φανερό όμως από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης και της σχετικής βιβλιογραφίας, το μοντέλο του MODIS διατηρεί ακόμη σημαντικά ελλείμματα ακρίβειας, που όπως φαίνεται από την σύγκριση του με το ModSat, είναι δυνατόν να βελτιωθούν χωρίς ιδιαίτερα περίπλοκη ή υπολογιστικά βαριά επεξεργασία. Το φαινόμενο της πρόωρης ανάπτυξης του MODIS GPP την άνοιξη στα φυλλοβόλα (Σχήμα 50α,β), έχει επισημανθεί από τις πρώτες κιόλας μελέτες αξιολόγησης του προϊόντος (Turner et al. 2003a, Xiao et al. 2004) και όπως φαίνεται είναι γενικό φαινόμενο σφάλματος του μοντέλου MODIS σε πολλά οικοσυστήματα σε όλο τον κόσμο που δεν έχει ακόμα διορθωθεί (Heinsch et al. 2006, Turner et al. 2006, 2005). Βασικό ρόλο στην εμφάνιση πρώιμων τιμών GPP διαδραματίζει η εκτίμηση του FAPAR. Πολλές έρευνες σημείωσαν την πρώιμη αύξηση του MODIS FAPAR και LAI σε διάφορα φυλλοβόλα οικοσυστήματα (Heinsch et al. 2006, Turner et al. 2006, Wang et al. 2005). Παρόλο που το προϊόν LAI/FAPAR είναι οκταήμερες συνθέσεις με αποτέλεσμα την φαινομενική μετατόπιση της έκπτυξης νωρίτερα, η έκταση του φαινομένου πρώιμης ανάπτυξης είναι πολύ μεγαλύτερη. Στην παρούσα μελέτη οι τιμές του MODIS LAI για τα φυλλοβόλα κυμαίνονται στο 0 – 0.5 το χειμώνα και παρουσιάζουν μικρή σταδιακή αύξηση την άνοιξη, πριν την έκπτυξη φύλλων των κυρίαρχων ειδών. Ωστόσο, η αύξηση αυτή δεν ξεπερνάει την μονάδα μέχρι την απότομη αύξηση λόγω της έκπτυξης φύλλων στα κυρίαρχα δέντρα (Σχήμα 42α,β). Αυτή η σταδιακή αύξηση LAI πριν την έκπτυξη, ενδέχεται να οφείλεται και στην ανοιξιάτικη ανάπτυξη φυτών στον υποόροφο. Άλλες μελέτες παρατήρησαν επίσης μικρές τιμές MODIS FAPAR εκτός αναπτυξιακής περιόδου αποδίδοντας τις στις επιδράσεις του εδάφους στον αλγόριθμο του MODIS (Fensholt et al. 2004, Turner et al. 2006). Η μέθοδος που υπολογίζεται το FAPAR στο μοντέλο ModSat μπορεί να επιφέρει ανάλογα λάθη, μιας και στηρίζεται στην ακρίβεια ενός δείκτη βλάστησης (RDVI). Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα μας

δείχνουν ότι το ModSat εκτιμά με μεγάλη ακρίβεια την ανάπτυξη και πτώση της GPP στα φυλλοβόλα είδη (Σχήμα 50α,β).

Στην μελέτη των Wu et al. (2010), αξιολογήθηκαν διαφορετικά μοντέλα LUE και το προϊόν GPP του MODIS βάσει παρατηρήσεων GPP από πύργο EC (Eddy Covariance) για ένα φυλλοβόλο δάσος. Αποδείχθηκε ότι το μοντέλο LUE που χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς ρυθμιστικούς συντελεστές της ϵ (Xiao et al. 2004) αποδίδει τις καλύτερες εκτιμήσεις GPP και ϵ σε σχέση με τα άλλα δυο απλούστερα μοντέλα LUE και το προϊόν του MODIS. Το μοντέλο αυτό (Xiao et al. 2004) χρησιμοποιεί έναν αναπτυξιακό συντελεστή, έναν συντελεστή νερού βάσει δείκτη ανάλογου του NDWI και σχεδόν ίδιο συντελεστή θερμοκρασίας με το ModSat (Raich et al. 1991). Στον αναπτυξιακό ρυθμιστικό συντελεστή αποδίδεται η αυξημένη ακρίβεια του μοντέλου στην αναγνώριση των εποχιακών μεταβολών GPP και ϵ , αναδεικνύοντας την αναγκαιότητα της χρήσης τέτοιων συντελεστών στα μοντέλα LUE (Wu et al. 2010). Στο ModSat εφαρμόζονται δύο αναπτυξιακοί ρυθμιστικοί συντελεστές (Pscalar, Escalar) με διαφορετική μαθηματική εφαρμογή για τον κάθε ένα, ανάλογα με τον δείκτη βλάστησης. Ο Pscalar μέσω της λογαριθμικής εφαρμογής του (Σχήμα 31α) στοχεύει στην ρύθμιση της ακρίβειας όταν συμβαίνουν απότομες αλλαγές του NDVI (έκπτυξη-πτώση φύλλων στα φυλλοβόλα), ενώ η γραμμική εφαρμογή του Escalar (Σχήμα 31β) στοχεύει στην ρύθμιση ολόκληρης την αναπτυξιακής περιόδου μέσω της αυξημένης ευαισθησίας του RDVI.

Εκτός από την ακρίβεια που εισάγουν οι αναπτυξιακοί ρυθμιστικοί συντελεστές, η μελέτη των Wu et al. (2010) υπογραμμίζει επίσης την υπεροχή του μοντέλου LUE των Xiao et al. (2004) στην μοντελοποίηση των κλιματικών επιδράσεων. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζει την κωδωνοειδή συνάρτηση της επίδρασης της θερμοκρασίας, όπως και το ModSat (Σχήμα 30), που εκφράζει την πραγματική εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από την θερμοκρασία (June et al. 2004, Markos & Kyparissis 2011). Η βέλτιστη θερμοκρασία για την φωτοσύνθεση ποικίλει ανάλογα με τα είδη και μεταβάλλεται στο χρόνο ανάλογα με τον εγκλιματισμό κάθε είδους. Στο είδος *Phlomis fruticosa* για παράδειγμα, εμφανίζεται πολύ μεγάλη διαφορά στην βέλτιστη θερμοκρασία τον χειμώνα από το καλοκαίρι (Markos & Kyparissis 2011). Παρόλα αυτά, στο ModSat τέθηκαν σταθερές οι τιμές 0, 25 και 45 °C ως ελάχιστη, βέλτιστη και μέγιστη θερμοκρασία αντίστοιχα για όλα τα είδη που μελετήθηκαν. Οι τιμές αυτές όπως είναι λογικό πρέπει να διαφοροποιούνται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Για εύκρατα φυλλοβόλα δάση προτείνονται γενικά οι τιμές 0, 20 και 40 °C ως ελάχιστη, ιδανική και μέγιστη θερμοκρασία αντίστοιχα (Aber & Federer 1992). Ο αλγόριθμος MODIS χρησιμοποιεί έναν απλό γραμμικό ρυθμιστικό συντελεστή της ϵ μόνο ως προς την ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία (Running et al. 2000). Η απλοποίηση αυτή των επιδράσεων της θερμοκρασίας σκοπεύει απλά και μόνο στην καταστολή της GPP σε περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους όπου παρουσιάζεται πολύ έντονο το φαινόμενο αναστολής της φωτοσύνθεσης λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Θεωρείται ότι για το 33% της χερσαίας βλάστησης στον πλανήτη ο κύριος παράγοντας στρες είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες και ο παγετός (Nemani et al. 2003). Ο συντελεστής TMIN του αλγορίθμου MODIS GPP φαίνεται λειτουργικός σε βόρεια οικοσυστήματα (Turner et al. 2006), ενώ έχει επίσης αναφερθεί υπερευαισθησία της ρύθμισης που επιφέρει στις ελάχιστες θερμοκρασίες (Martel et al. 2005).

Κύριος περιοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης και της φωτοσύνθεσης για περίπου 40% της χερσαίας βλάστησης στον πλανήτη θεωρείται η διαθεσιμότητα νερού (Nemani et al. 2003). Είναι κρίσιμο θέμα λοιπόν στην μοντελοποίηση του GPP η ρύθμιση που αφορά το υδατικό στρες. Ο αλγόριθμος του MODIS χρησιμοποιεί την μοντελοποιημένη μετεωρολογική παράμετρο VPD ως τον μόνο ρυθμιστή των υδατικών περιορισμών. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται με την ατμοσφαιρική υγρασία, κάτι που είναι φανερά μειονεκτικό μιας και δεν συνδέεται πάντα με την

υγρασία του εδάφους, πόσο μάλλον με τα αποθέματα νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο του MODIS εφαρμόζει τον ρυθμιστή VPD με αυξημένη ευαισθησία, ώστε να μπορέσει να καλύψει τις επιδράσεις της ξηρασίας (Heinsch et al. 2006). Ο ρυθμιστής VPD έχει αποδειχθεί αποτελεσματικός σε λιβαδικά οικοσυστήματα (Turner et al. 2006), όμως είναι γενικά αποδεκτό ότι παρουσιάζει τεράστια προβλήματα σε πολλά οικοσυστήματα που υπόκεινται σε υδατικό στρες (Baldocchi et al. 2001, Heinsch et al. 2006, Mu et al. 2007, Turner et al. 2003a, Zhao et al. 2006). Ένα γενικό φαινόμενο είναι η υπερεκτίμηση της ϵ και συνεπώς και της GPP σε περιόδους υδατικού στρες λόγω της αποτυχίας σωστής ρύθμισης μέσω της παραμέτρου VPD (Baldocchi et al. 2001, Heinsch et al. 2006, Mu et al. 2007, Zhao et al. 2006), η οποία φαίνεται επίσης να υποεκτιμάται από το GMAO για πολλές περιοχές (Heinsch et al. 2006, Zhao et al. 2006).

Έχει όμως επίσης παρατηρηθεί και το ακριβώς αντίθετο φαινόμενο, όπως στην περίπτωση των φυλλοβόλων και του αείφυλλου οικοσυστήματος της παρούσας μελέτης. Ο ρυθμιστής VPD του MODIS παρουσιάζει υπερβολική ευαισθησία σε διάφορες περιοχές μειώνοντας την ϵ κατά την διάρκεια συνήθως των καλοκαιρινών μηνών και υποεκτιμώντας έτσι τις πραγματικές τιμές GPP (Turner et al. 2003a, Xiao et al. 2004). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται πολύ έντονα στα φυλλοβόλα (Σχήμα 50α,β) και το αείφυλλο (Σχήμα 50δ) οικοσύστημα της παρούσας μελέτης, όπου τις καλοκαιρινές περιόδους οι τιμές MODIS GPP υποεκτιμώνται υπερβολικά λαμβάνοντας ακόμα και μηδενικές τιμές. Ο ρυθμιστής VPD για τα φυλλοβόλα δάση μειώνει την ϵ όταν η μέση ημερήσια VPD ξεπεράσει τα 650 Pa (BPLUT). Ωστόσο, μετρήσεις φωτοσύνθεσης σε ένα εύκρατο φυλλοβόλο δάσος (Bassow & Bazzaz 1998, Turner et al. 2003b) έχουν δείξει ότι η φωτοσυνθετική απόδοση σε επίπεδο φύλλου και θόλου δεν επηρεάζεται έως ότου η VPD ξεπεράσει τα 1500 Pa. Το φαινόμενο της υπερευαισθησίας του ρυθμιστή VPD φαίνεται να είναι εντονότερο σε είδη που έχουν προσαρμοστεί σε ξηρά κλίματα. Όπως παρατηρούν οι Heinsch et al. (2006), οι συνθήκες ξηρασίας κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών σε ένα οικοσύστημα δρυών μπορούν να επιφέρουν τιμές VPD 5500 Pa σε μικρή κλίμακα και 3400 Pa σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η καλή προσαρμογή όμως της τοπικής βλάστησης σε τέτοιες συνθήκες αποτρέπει την αναστολή της φωτοσύνθεσης σε τέτοια οικοσυστήματα σε αντίθεση με τις προβλέψεις του αλγορίθμου MODIS. Σε τέτοιες περιπτώσεις η υποεκτίμηση της VPD από το GMAO έχει θετικά αποτελέσματα στις εκτιμήσεις της GPP (Heinsch et al. 2006). Μολαταύτα, η εσφαλμένη μοντελοποίηση των υδατικών περιορισμών στα οικοσυστήματα μέσω του ρυθμιστή VPD στο μοντέλο MODIS εξακολουθεί να αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες σφαλμάτων στις παγκόσμιες εκτιμήσεις του προϊόντος GPP.

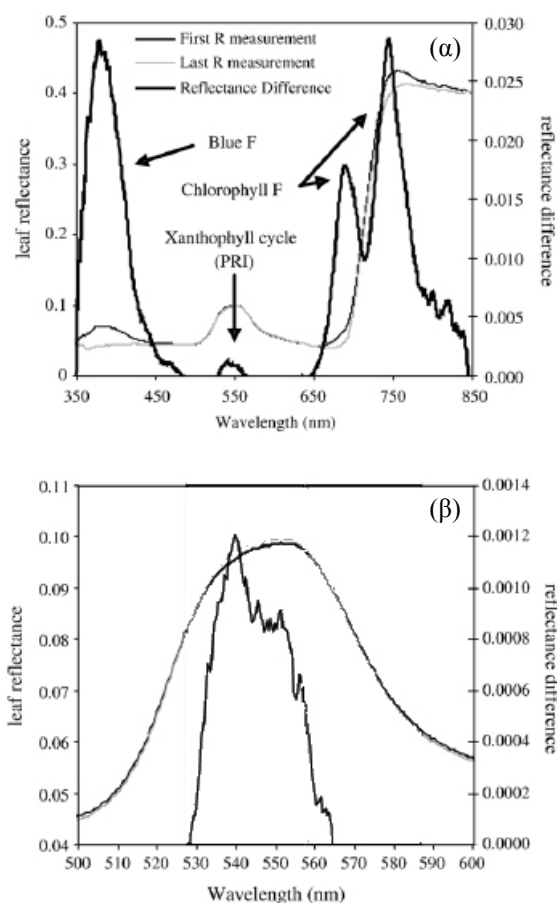
Η βελτίωση της ρύθμισης του αλγορίθμου MODIS GPP όσον αφορά το υδατικό στρες είναι αναγκαία και πολλές μελέτες έχουν προτείνει εισαγωγή πρόσθετων τεχνικών ή δεδομένων στον αλγόριθμο MODIS (Leuning et al. 2005, Mu et al. 2007, Turner et al. 2006). Οι αποδόσεις του ModSat σε τέσσερα διαφορετικά οικοσυστήματα που δέχονται όλα έντονες επιδράσεις καλοκαιρινής ξηρασίας, υποδεικνύουν ότι ο έλεγχος της υδατικής καταπόνησης μπορεί να γίνει με πολύ απλούς τρόπους και χωρίς ιδιαίτερες επεξεργασίες ή βάσεις δεδομένων. Αν και οι εκτιμήσεις του ModSat δεν ήταν απόλυτα ακριβείς σε κάποιες περιόδους υδατικού στρες στα φυλλοβόλα, αποτυπώνονται πολύ καλύτερα οι εποχικές διακυμάνσεις σε σχέση με το προϊόν του MODIS. Βασικό ρόλο σε αυτό παίζει ο ρυθμιστικός συντελεστής Wscalar που μέσω του NDWI ακολουθεί πολύ σωστά την καλοκαιρινή σταδιακή επιδείνωση της υδατικής κατάστασης στα οικοσυστήματα. Το βασικό όμως μειονέκτημα του NDWI είναι η έντονη επιρροή του από τις διακυμάνσεις του LAI, απομακρύνοντας τον από τον ιδανικό δείκτη της υδατικής κατάστασης και καθιστώντας τον έναν αναπτυξιακό δείκτη με έντονη όμως ευαισθησία στο υδατικό περιεχόμενο του θόλου. Ωστόσο, η χρήση του δεύτερου αναπτυξιακού συντελεστή Escalar δεν είναι ανεξάρτητη από την

βελτίωση των διακυμάνσεων του ϵ ως προς το υδατικό στρες. Όπως αποδεικνύεται από την ισχυρή και γραμμική συσχέτιση του RDVI με τον LAI (Σχήμα 38δ), ο δείκτης RDVI παραμένει ευαίσθητος στις διακυμάνσεις της πράσινης βιομάζας του θόλου κατά τη διάρκεια ολόκληρης της αναπτυξιακής περιόδου, ανιχνεύοντας έτσι τα αποτελέσματα των υδατικών περιορισμών στην πυκνότητα και ακμαιότητα του θόλου.

Εκτίμηση της ϵ μέσω υπερφασματικών δεδομένων

Την τελευταία δεκαετία η έρευνα έχει εστιάσει στην απ' ευθείας εκτίμηση της ϵ μέσω κυρίως του δείκτη PRI (Garbulsky et al. 2011). Μια τέτοια δυνατότητα θα βοηθούσε σε μεγάλο βαθμό τα παγκόσμια μοντέλα εκτίμησης της GPP, που όπως είδαμε παραπάνω, η ακρίβεια τους περιορίζεται πρωτίστως λόγω των μεθόδων μοντελοποίησης της ϵ . Ο δείκτης PRI έχει την ιδιαιτερότητα ότι σχετίζεται με φωτοπροστατευτικούς μηχανισμούς των φύλλων (Gamon et al. 1990, 1992, Penuelas et al. 1995a). Όταν το προσπίπτον φως υπερβαίνει την ποσότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης ή όταν ένας στρεσογόνος παράγοντας περιορίζει τον ρυθμό φωτοσύνθεσης, η ενέργεια διοχετεύεται προς φωτοπροστατευτικούς μηχανισμούς για την αποφυγή βλάβης των φωτοσυνθετικών κέντρων (Adams & Demmig-Adams 1994, Demmig-Adams & Adams 1992, Demmig-Adams et al. 1996, Niyogi 1999, Osmond et al. 1999, Pfundel & Bilger 1994). Οι μηχανισμοί αυτοί ενεργοποιούνται από μια πτώση στο pH στις μεμβράνες των θυλακοειδών και οδηγούν σε δύο τύπους μεταβολών που επιδρούν στην ανακλαστικότητα του φύλλου στα 531 nm (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1992, 1997, Gamon & Surfus, 1999, Penuelas et al. 1995a, 1994). Η πρώτη σχετίζεται με την δομική διαμόρφωση των μεμβρανών που συνδέεται με την αλλαγή του pH και η δεύτερη με την μετατροπή της βιολαξανθίνης σε ζεαξανθίνη μέσω της ενδιάμεσης ανθεραξανθίνης. Οι δύο τελευταίες ενώσεις δέχονται την επιπλέον φωτεινή ενέργεια από τις χρωστικές της αντένας του φωτοσυστήματος II και την εκπέμπουν ασφαλώς ως θερμότητα (Demmig-Adams & Adams 1996). Η παραπάνω διαδικασία αντιστρέφεται όταν οι εξωτερικοί παράγοντες επανέλθουν σε φυσιολογικά για την φωτοσύνθεση επίπεδα (κύκλος των ξανθοφυλλών). Θεωρείται ότι οι ξανθοφύλλες ζεαξανθίνη και ανθεραξανθίνη προκαλούν μεγαλύτερη απορρόφηση στην περιοχή 500 – 550 nm (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1993b, Zarco-Tejada et al. 2000), με κοινή περιοχή περίπου στα 531 nm για όλα τα είδη. Ωστόσο, οι μεταβολές στο φάσμα ανακλαστικότητας λόγω των παραπάνω μηχανισμών είναι πολύ μικρές (Σχήμα 78), της τάξης περίπου του 2 – 7 %. Ένα ενθαρρυντικό πλεονέκτημα του εντοπισμού του σήματος στα 531 nm μέσω δορυφορικών δεδομένων είναι ότι τοποθετείται σε μια περιοχή του φάσματος όπου η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας είναι πολύ υψηλή (Kaufman 1989), οπότε ο PRI επηρεάζεται λιγότερο από την ατμόσφαιρα σε σχέση με δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούν κανάλια στο κόκκινο και το υπέρυθρο όπως ο NDVI. Εντούτοις, είναι πολύ δύσκολο έργο η ανίχνευση του σήματος στα 531 nm, ειδικά σε μετρήσεις μεγάλης κλίμακας και μη-ελεγχόμενων συνθηκών. Συνεπώς, είναι επιβεβλημένη η χρήση στενών καναλιών για την ελαχιστοποίηση παράπλευρων επιδράσεων. Είναι γενικά αποδεκτό ότι ένα ιδανικό όργανο μέτρησης του PRI θα πρέπει να διαθέτει τουλάχιστον ένα κανάλι εύρους 3-10 nm με κέντρο περίπου τα 531 nm (Grace et al. 2007). Ωστόσο, οι αποκρίσεις του κύκλου των ξανθοφυλλών στην ανακλαστικότητα μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος και την κλίμακα παρατήρησης (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1993b), αναδεικνύοντας την ανάγκη συνεχόμενων στενών καναλιών για την επαρκή παρακολούθηση του φαινομένου. Στο Σχήμα 78 φαίνεται η περιοχή ευαισθησίας της εποξείδωσης των ξανθοφυλλών σε φύλλα του είδους *Acer saccharum* (Zarco-Tejada et al. 2000), με εύρος 26 nm και μέγιστο κοντά στα 540 nm.

Ο PRI έχει αναφερθεί ότι επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η γεωμετρία ηλίου και παρατήρησης, οι επιδράσεις της ανακλαστικότητας του εδάφους, η κατανομή και ο προσανατολισμός των φύλλων, η δομή του θόλου και οι ποσότητες των φωτοσυνθετικών χρωστικών (Asner 1998, Barton & North 2001, Chen et al. 2003, Drolet et al. 2005, Hall et al. 2008, Hilker et al. 2008, Strahler & Jupp 1990). Επίσης, είναι πολύ πιθανό η διαμόρφωση των φωτοπροστατευτικών μηχανισμών να ποικίλει ανάλογα με το είδος ή τον λειτουργικό τύπο με αποτέλεσμα την διαφορετική συμπεριφορά του PRI (Gamon et al. 2005, Rascher et al. 2007). Για παράδειγμα, σε τροπικά είδη έχει εντοπισθεί η ύπαρξη ενός κύκλου εποξείδωσης λουτεϊνών (Esteban et al. 2009, Martin et al. 2007, Matsubara et al. 2008, Rascher et al. 2007). Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές έρευνες που έχουν αποδείξει ότι ο PRI συνδέεται ισχυρά με την ε από το επίπεδο φύλλου (Gamon et al. 1997, Penuelas et al. 1995a, 1997b) και μικρής κλίμακας θόλου (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1992, Nichol et al. 2006, Stylinski et al. 2002, Trotter et al. 2002), έως και οικοσυστήματος (Drolet et al. 2005, 2008, Garbulsky et al. 2008, Nichol et al. 2000, 2002, Rahman et al. 2004) για διάφορα είδη και περιβάλλοντα. Όπως επισημαίνεται από τους Garbulsky et al. (2011), παρόλες τις έντονες επιδράσεις που μπορεί να υφίσταται ο PRI, παρουσιάζεται μια εντυπωσιακή συνάφεια στις σχέσεις του PRI με την ε στις διαφορετικές δημοσιευμένες μελέτες.



Σχήμα 78. (α) Ανακλαστικότητα φύλλων προσαρμοσμένων στο σκοτάδι (διάστικτη γραμμή) και κάτω από φως (συνεχής γραμμή) και η διαφορά τους (σκούρα συνεχής γραμμή). (β) Εστίαση στην διαφορά των δύο καταστάσεων στην περιοχή του PRI. Τα δεδομένα προέρχονται από την μελέτη των Zarco-Tejada et al. (2000).

Αυτό υποδεικνύει μια εκπληκτική «λειτουργική σύγκλιση» των βιοχημικών, φυσιολογικών και δομικών συνιστωσών που επιδρούν στην απορρόφηση άνθρακα από το επίπεδο του φύλλου έως του οικοσυστήματος (Field 1991, Stylinski et al. 2002). Υποδεικνύει επίσης ότι οι ιδιότητες του δείκτη PRI δεν περιορίζονται στον εντοπισμό της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών. Αφού ο PRI μετρά την σχετική ανακλαστικότητα στις δύο πλευρές της πράσινης κύρτωσης (μέγιστο ~ 550 nm) της ανακλαστικότητας της βλάστησης, συγκρίνει επίσης την απορρόφηση του μπλε και του κόκκινου φάσματος. Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το γεγονός αυτό τον καθιστά επίσης δείκτη των αναλογιών μεταξύ καροτενοειδών και χλωροφυλλών. Οι PRI και PRI2 εμφάνισαν πολύ υψηλούς δείκτες προσδιορισμού των καροτενοειδών στη μελέτη της περιοχής *Phlomis fruticosa* μέσω του CHRIS (Πίνακας 17). Μάλιστα, ο PRI2 απέδωσε τους μέγιστους συντελεστές προσδιορισμού των καροτενοειδών στις γωνίες 0 και +36, ενώ στις ίδιες γωνίες ο PRI επέδειξε τους μεγαλύτερους συντελεστές προσδιορισμού των χλωροφυλλών. Επομένως, οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο

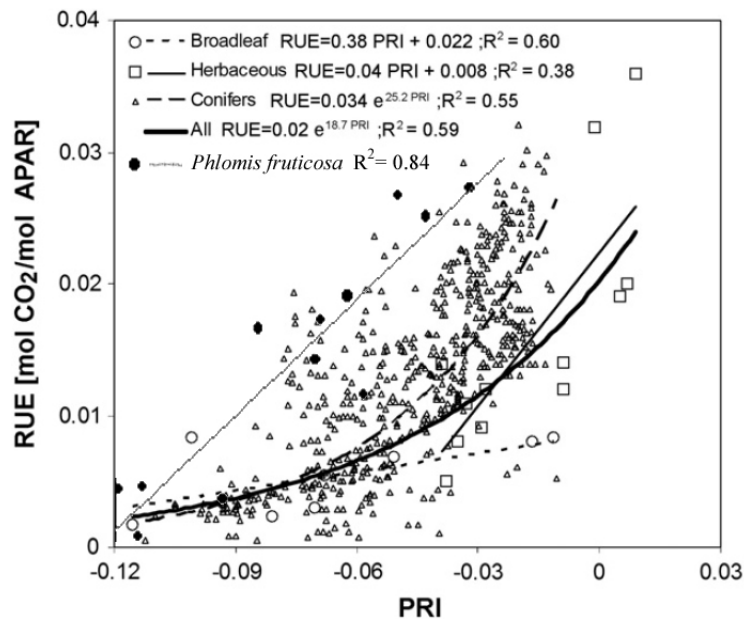
μαζί με την κατάσταση εποξείδωσης των ξανθοφυλλών στην διαμόρφωση του δείκτη PRI (Gamon et al. 2001, Penuelas et al. 1997a, Sims & Gamon 2002, Stylinski et al. 2002). Ο συνδυασμός των παραπάνω χαρακτηριστικών του PRI φαίνεται να δρα ευεργετικά στην εποχιακή και δια-ειδική εκτίμηση της ε (Filella et al. 1996, Gamon et al. 1992, Gamon & Qiu 1999, Penuelas et al. 1995a, Stylinski et al. 2002), μιας και οι συγκεντρώσεις καθώς και οι αναλογίες των φωτοσυνθετικών χρωστικών είναι επίσης αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φυτών (Balaguer et al. 2002, Evans 1989, Field & Mooney 1986, Kyparissis et al. 2000, Kyparissis et al. 1995, Niinemets & Tenhunen 1997, Munne-Bosch & Alegre 2000, Yoder & Pettigrew-Crosby 1995).

Η σχέση της ε με την κατάσταση των χρωστικών αναδεικνύεται έντονα και από το φαινόμενο της σημαντικής συμβολής του καναλιού CHRIS στα 701 nm στον προσδιορισμό της ε και τον ευεργετικό συνδυασμό του με τα κανάλια στα 531 – 539 nm (Σχήμα 64). Το κανάλι στα 701 nm, όπως περιγράφηκε νωρίτερα, αποδείχθηκε πολύ σημαντικό για τον προσδιορισμό των χλωροφυλλών στο οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Επίσης, η συνδιακύμανση της ε με πολλούς από τους δείκτες φωτοσυνθετικών χρωστικών (π.χ. TCARI, TVI/OSAVI) που υπολογίσθηκαν από τον CHRIS αναδεικνύουν αυτή ακριβώς την σύνδεση της φωτοσυνθετικής απόδοσης με την εποχιακή διακύμανση φωτοσυνθετικών χρωστικών και ιδιαίτερα των χλωροφυλλών. Άλλωστε, η ποσότητα των χλωροφυλλών είναι ενδεικτική της ανάπτυξης, την ζωντάνιας και του στρες στα φυτά (Carter 1994, Lichtenthaler 1998), ενώ έχει αποδειχθεί ότι είναι ανάλογη της φωτοσύνθεσης (Evans 1989, Field & Mooney 1986, Niinemets & Tenhunen 1997, Yoder & Pettigrew-Crosby 1995). Για τον λόγο αυτό, σε κάποιες μελέτες τηλεπισκόπησης έχει προταθεί η χρήση δεικτών πράσινης βλάστησης για την εκτίμηση της παραγωγικότητας ή για τον απ' ευθείας υπολογισμό της ε (Wu et al. 2009). Η ανάδειξη του καναλιού στις παρυφές του ερυθρού (701 nm) αφενός ως σημαντικό συστατικό δεικτών χλωροφύλλης και αφετέρου ως δυναμικό επίκουρο του σήματος στα 531 nm για τον προσδιορισμό της φωτοσυνθετικής απόδοσης δεν φαίνεται να είναι ένα τυχαίο και ειδοειδικό γεγονός της παρούσας μελέτης. Το πρώτο σκέλος έχει προταθεί σε μεγάλο ποσοστό της σύγχρονης βιβλιογραφίας (Gamon & Surfus 1999, Gitelson et al. 1999, 1996, Gitelson & Merzlyak 1994, 1996, 1997, Hansen & Schjoerring 2003, le Maire et al. 2008, Zarco-Tejada et al. 2004, 2001), ενώ το δεύτερο αναδεικνύεται σε όλο και περισσότερες μελέτες των τελευταίων χρόνων. Οι Inoue et al. (2008) εξετάζοντας την ευαισθησία του σήματος ανακλαστικότητας (350 – 2500 nm) του θόλου ενός ορυζώνα στην φωτοσυνθετική του δραστηριότητα και εφαρμόζοντας ανάλογη της παρούσας μελέτης μέθοδο ανάλυσης, κατέληξαν ότι ο δείκτης NDSI(710,530) ήταν ο βέλτιστος μαζί με τους NDSI(710,410) και NDSI(530,550) στην εκτίμηση της ε . Επιπλέον, οι Hall et al. (2008) εξέτασαν πληθώρα δεικτών NDSI_(x,y) (400 - 900 nm) με σταθερή αναφορά αρχικά στα 570 nm (σταθερό y), και αφετέρου στα 531 nm (σταθερό x) ως προς την σχέση τους με την ε ενός δάσους πεύκων. Από την μελέτη τους αναδείχθηκαν δύο περιοχές συνάφειας της ανακλαστικότητας με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός. Η πρώτη έχει να κάνει με τον PRI και το σήμα του κύκλου των ξανθοφυλλών στα 531 nm και η δεύτερη εντοπίστηκε στις παρυφές του ερυθρού, γύρω από τα 705 nm.

Αναζητώντας την φυσιολογική λειτουργία που συνδέει την περιοχή των παρυφών του ερυθρού με την αποδοτικότητα της χρήσης φωτός, οι Hall et al. (2008) προτείνουν ότι σχετίζεται με τον φθορισμό της χλωροφύλλης. Ο μηχανισμός αυτός είναι συμπληρωματικός του κύκλου των ξανθοφυλλών στην αποβολή της πλεονάζουσας φωτεινής ενέργειας (Demmig-Adams & Adams 1996) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης στον προσδιορισμό της κατάστασης της φωτοσυνθετικής συσκευής μέσω τηλεπισκόπησης (Meroni et al. 2009). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 78α, η χλωροφύλλη παρουσιάζει εκπομπή φθορισμού στο ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο

φάσμα που τυπικά χαρακτηρίζεται από δύο κορυφές στα 690 και 740 nm (Meroni et al. 2009, Zarco-Tejada et al. 2000). Σε σχετικές έρευνες έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες βλάστησης για εφαρμογή σε υπερφασματικά δεδομένα ανακλαστικότητας, με την προοπτική της εκτίμησης του φθορισμού της χλωροφύλλης, που εκμεταλλεύονται την περιοχή 680 – 760 nm κυρίως μέσω της παραγωγού του φάσματος ανακλαστικότητας (Dobrowski et al. 2005, Perez-Priego et al. 2005, Zarco-Tejada et al. 2000, 2003a). Παρόλο που ο εντοπισμός του σήματος του φθορισμού της χλωροφύλλης μέσω της ανακλαστικότητας σε κανάλια εύρους ~ 10 nm είναι πολύ δύσκολη διαδικασία (Meroni et al. 2009), το σήμα αυτό θα εξακολουθούσε να είναι ανάλογο της ποσότητας των χλωροφυλλών ακόμα και σε επίπεδο φύλλου, κυρίως λόγω του φαινομένου της επαναπορρόφησης του φθορισμού από τις χλωροφύλλες (Gitelson et al. 1998), εξισώνοντας έτσι την πληροφορία ενός δείκτη φθορισμού με ένα δείκτη χλωροφυλλών (Gitelson et al. 1999). Καταλήγοντας, όπως φαίνεται από σύγχρονες μελέτες ανακλαστικότητας και ε , είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός συνδυασμού παραγόντων ενδεικτικών της κατάστασης και της δυναμικής της βλάστησης (αναλογίες – ποσότητα φωτοσυνθετικών χρωστικών, μηχανισμοί φωτοπροστασίας: κύκλος ξανθοφυλλών – φθορισμός χλωροφύλλης) μέσω των περιοχών στα 531 και τα 700 nm, που καθιστά δυνατή την εκτίμηση της ε σε μεγάλη χωρική και χρονική κλίμακα.

Η επιλογή των βέλτιστων μηκών κύματος για τον σχηματισμό του PRI έχει εξετασθεί πλήρως μόνο σε επίπεδο φύλλου (Gamon et al. 1993b). Σε επίπεδο θόλου έχουν κατά καιρούς εμφανιστεί εναλλακτικές διαμορφώσεις του PRI βασιζόμενες κυρίως σε στατιστικές συσχετίσεις (Gamon et al. 1992, Inoue et al. 2008) ή λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας καναλιών (Garbulsky et al. 2008). Δεν είναι ακόμα ξεκαθαρισμένο αν τα βέλτιστα μήκη κύματος σε επίπεδο φύλλου (531 και 570 nm) είναι απαραίτητα και τα βέλτιστα μήκη κύματος σε μεγαλύτερες κλίμακες, όπου πολλαπλά φαινόμενα σκέδασης ή άλλοι παράγοντες (δομή θόλου, γεωμετρία ηλίου-παρατήρησης) μπορεί να μεταβάλουν την φασματική απόκριση του κύκλου των ξανθοφυλλών, όπως τα μέγιστα απορρόφησης των χρωστικών τα οποία αλλάζουν ανάλογα με το χημικό περιβάλλον και το μέσο σκέδασης (Garbulsky et al. 2011). Τα φαινόμενα μεταβαλλόμενης σκέδασης λόγω των σχετικών κατευθύνσεων παρατήρησης και φωτισμού έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον PRI (Barton & North 2001, Hilker et al. 2008). Ωστόσο, η μεταβολή της ευαισθησίας του σήματος που εμπεριέχει ένας δείκτης PRI ανάλογα την κατεύθυνση παρατήρησης δεν έχει ακόμα μελετηθεί πλήρως. Οι Drolet et al. (2005, 2008) κατέληξαν σε ισχυρή συσχέτιση της ε με τον PRI από τον MODIS, αλλά με την προϋπόθεση ότι οι παρατηρήσεις του MODIS γίνονται από θέση οπίσθιας σκέδασης, προτείνοντας ότι οι γωνιακές επιδράσεις και τα φαινόμενα σκίασης επικαλύπτουν ή συγχέουν το σήμα του PRI. Στα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης παρατηρήθηκε επίσης ανάλογο φαινόμενο πτώσης της απόδοσης του PRI στην κατακόρυφη και τις πρόσθιας σκέδασης γωνίες, αλλά η διαθεσιμότητα πολλών και συνεχόμενων καναλιών έδωσε την δυνατότητα ανίχνευσης της μετατόπισης της ευαισθησίας του PRI σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στις κατευθύνσεις αυτές. Στα αποτελέσματα της μελέτης των Hall et al. (2008) μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σήμα του κύκλου των ξανθοφυλλών στην ανακλαστικότητα του θόλου παρουσιάζει μικρές μετατοπίσεις ανάλογα με τα διαφορετικά μέσα σκεδασμού. Εν προκειμένου, ο γεωμετρικός σκεδασμός ωθεί το σήμα των ξανθοφυλλών σε ελαφρώς μεγαλύτερα μήκη κύματος σε σχέση με τον ισοτροπικό σκεδασμό. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει το εύρημα της παρούσας μελέτης για μετατόπιση της ευαισθησίας του σήματος ανάλογα την κατεύθυνση παρατήρησης λόγω των περίπλοκων φαινομένων του σκεδασμού που παρατηρούνται συνήθως στους θόλους της βλάστησης. Πάνω στο θέμα αυτό, οι Hilker et al. (2009) αναφέρουν ότι η διαφορετική συμπεριφορά του PRI στις κατευθύνσεις παρατήρησης μπορεί επίσης να οφείλεται σε επιδράσεις ατμοσφαιρικής σκέδασης. Η ίδια μελέτη απέδειξε ότι σε δορυφορικά δεδομένα οι ατμοσφαιρικές



Σχήμα 79. Σχέσεις μεταξύ της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) και του PRI ($\text{NDSI}_{(531,570)}$) που έχουν εμφανιστεί στην βιβλιογραφία σε επίπεδο θόλου. Περιλαμβάνονται πλατύφυλλα (Nichol et al. 2000), κωνοφόρα (Hall et al. 2008, Hilker et al. 2009, Nakaji et al. 2008, Nichol et al. 2000, 2002) και ποώδης βλάστηση (Strachan et al. 2002). Σε όλες τις μελέτες η ϵ ορίστηκε ως GPP/APAR εκτός τις μελέτες Nichol et al. (2000, 2002) που υπολογίστηκε ως GPP/PAR . Στο γράφημα παρατέθηκαν επίσης τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μεταξύ του PRI από τον CHRIS σε κατεύθυνση -36° και των εκτιμήσεων ϵ από το MANTIS για το οικοσύστημα *Phlomis fruticosa*. Είναι τα μόνα δεδομένα που προέρχονται από διαστημική πλατφόρμα μιας και δεν υπάρχει άλλη δημοσιευμένη μελέτη ως τώρα που να συσχετίζει εκτιμήσεις ϵ με την αυθεντική φόρμουλα του PRI από δορυφορικά δεδομένα. Η συνολική γραμμή τάσης βασίστηκε στα δεδομένα των πλατύφυλλων, της ποώδους βλάστησης και τυχαίου δείγματος των κωνοφόρων για την εξισορρόπηση των αριθμών των δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών τύπων βλάστησης ($p < 0.001$, $n = 37$). Τα δεδομένα προέρχονται από την μελέτη των Garbulsky et al. (2010).

διορθώσεις παίζουν μεγάλο ρόλο στο σήμα του PRI και επομένως η έλλειψη συσχέτισης μεταξύ PRI και LUE στις πρόσθιας σκέδασης παρατηρήσεις (Drolet et al. 2005, 2008) είναι πολύ πιθανόν να οφείλονται σε ελλιπή ατμοσφαιρική διόρθωση των μπαντών 11 και 12 του MODIS. Μέσω των δεδομένων πολλαπλών κατευθύνσεων παρατήρησης από τον CHRIS στην παρούσα έρευνα αναδείχθηκε επίσης και η σημασία των μη-κατακόρυφων γωνιών παρατήρησης, ανεξάρτητα της κατεύθυνσης σκέδασης, μιας και η κατακόρυφη κατεύθυνση είχε τις χαμηλότερες αποδόσεις στον προσδιορισμό της ϵ . Ανάλογες ενδείξεις ανέφεραν και οι Takebe et al. (1990) και Inoue et al. (2008), εξηγώντας ότι σε πλάγιες παρατηρήσεις περιέχεται περισσότερη φυσιολογική πληροφορία αφού ελαχιστοποιούνται τα κενά του θόλου.

Τέλος, η σχέση που προέκυψε από την παρούσα μελέτη ανάμεσα στην ϵ και τον PRI από τον CHRIS συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα της τρέχουσας βιβλιογραφίας στο θέμα αυτό. Πάρα τις διαφορετικές πηγές δεδομένων, συνθήκες μέτρησης και μελετώμενα οικοσυστήματα εμφανίζεται μια εντυπωσιακή και πολύ ενθαρρυντική σύγκλιση στις γραμμές τάσης (Σχήμα 79). Ακόμα και το γεγονός ότι τα δικά μας δεδομένα προέρχονται από δορυφορικές παρατηρήσεις και επομένως είναι χαμηλότερης διακριτικότητας και έχουν υποστεί σειρά διορθώσεων (γεωμετρικών, ατμοσφαιρικών κλπ) δεν τα εμποδίζει να είναι συγκρίσιμα με τα υπόλοιπα αποτελέσματα που προέρχονται από επίγεια και εναέρια δεδομένα. Το γεγονός αυτό δίνει ελπίδες για μελλοντική εφαρμογή του σήματος του PRI σε μεγάλης χωρικής κλίμακας εφαρμογές υπολογισμού της πρωτογενούς

παραγωγικότητας. Η γενική εικόνα του Σχήματος 79 παρόλα αυτά, δεν είναι ακόμα ιδανική για το σκοπό αυτό. Φαίνεται ότι παρόλο που οι χαμηλές τιμές PRI (< -0.09) είναι αντιπροσωπευτικές της χαμηλής ε σε όλα τα οικοσυστήματα και κάτω από το σύνολο των διαφορετικών συνθηκών παρατήρησης, σε μέσες και υψηλές τιμές PRI ($-0.09 - 0$) υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις μετρημένες ε . Η γραμμή τάσης ανάμεσα στον PRI και την ε θα ήταν λογικό να είναι ειδοειδική, μιας και η διαμόρφωση των φωτοπροστατευτικών μηχανισμών ποικίλει ανάλογα με το είδος ή τον λειτουργικό τύπο, με αποτέλεσμα την διαφορετική συμπεριφορά του PRI (Gamon et al. 2005, Rascher et al. 2007). Ωστόσο, όπως αναλύθηκε παραπάνω, τα χαρακτηριστικά του PRI είναι πολύ πιο σύνθετα και θα μπορούσαν να συγκλίνουν σε παρόμοιες γραμμές τάσης με την ε ακόμα και ανάμεσα σε διαφορετικά οικοσυστήματα. Είναι άλλωστε εμφανές στο Σχήμα 79 ότι ακόμα και για ένα μόνο λειτουργικό τύπο (πεύκα), η διασπορά τιμών είναι αρκετά μεγάλη. Επομένως, όπως τονίζεται και από πρόσφατες μελέτες (Asner 1998, Barton & North 2001, Drolet et al. 2005, Hall et al. 2008, Hilker et al. 2008), η παρατηρούμενη διασπορά στην σχέση $\varepsilon - \text{PRI}$ είναι πιθανότατα αποτέλεσμα της κυμαινόμενης γεωμετρίας ηλίου-στόχου-αισθητήρα σε συνδυασμό με την δομή του θόλου. Είναι χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα της μελέτης των Hilker et al. (2008), όπου τόσο οι φασματικές παρατηρήσεις όσο και οι εκτιμήσεις ε προέρχονται από πύργο Eddy-flux, εξοπλισμένο με πολυγωνιακό υπερφασματικό αισθητήρα και εγκατεστημένο σε ένα πευκοδάσος στον Καναδά. Οι καθημερινές ταυτόχρονες μετρήσεις ε και PRI από πολλαπλές κατευθύνσεις και κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτισμού απέδωσαν μια σχέση PRI – ε με παρόμοιο πρότυπο διασποράς τιμών όπως του Σχήματος 79. Τα αποτελέσματα αυτά και η σύγκλιση που παρουσιάζουν οι τελευταίες έρευνες υποδεικνύουν ότι η γεωμετρία ηλίου-στόχου-αισθητήρα προκαλεί τις πιο έντονες επιδράσεις στον υπολογισμό του PRI. Παρόλα αυτά, η όλο και αυξανόμενη έρευνα στο πεδίο αυτό σε συνδυασμό με τους αισθητήρες νέας τεχνολογίας, που προσφέρουν ακόμα και την δυνατότητα δορυφορικής πολυγωνιακής παρακολούθησης της συμπεριφοράς του PRI, εμπλουτίζουν συνεχώς την γνώση και τις μεθόδους υπολογισμού της ε σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Η τρέχουσα έρευνα στέλνει όλο και περισσότερα ενθαρρυντικά μηνύματα στην επίτευξη της παρακολούθησης της πρωτογενούς παραγωγικότητας μέσω δορυφόρου, της κατανόησης της συμπεριφοράς των οικοσυστημάτων σε σχέση με το κλίμα και της συνολικής αποτίμησης της απορρόφησης C από τα χερσαία οικοσυστήματα.

Προοπτικές επέκτασης της παρούσας έρευνας

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην εξέταση της συμπεριφοράς συγκεκριμένων περιοχών μελέτης που επιλέχθηκαν με γνώμονα την καταλληλότητα τους για την εφαρμογή μεθόδων τηλεπισκόπησης και την διεξαγωγή μετρήσεων πεδίου. Η προσέγγιση λοιπόν σε όλα τα στάδια της παρούσας μελέτης είναι τοπικής κλίμακας και η αξιολόγηση και εφαρμογή των μεθόδων τηλεπισκόπησης γίνεται βάσει των διακυμάνσεων στο χρόνο. Η προσέγγιση αυτή είναι αναπόφευκτη όταν η έρευνα βασίζεται σε χωρικά περιορισμένες μετρήσεις πεδίου. Με αυτό τον τρόπο όμως τα αποτελέσματα μας υποφέρουν από περιορισμούς γενίκευσης χωρικά, κάτι που είναι ουσιαστικό ζητούμενο σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης. Όπως συζητήθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, το ανιχνεύσιμο φάσμα ανακλαστικότητας και οι δείκτες βλάστησης επηρεάζονται από μια σειρά παραγόντων (γεωμετρία φωτισμού και παρατήρησης, αρχιτεκτονική-δομή του θόλου, έδαφος, τοπογραφία, κλιματικές-ατμοσφαιρικές συνθήκες, ιδιότητες αισθητήρα κ.α.) που μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά. Παρόλο που η χρονική διάσταση καλύπτεται από την προσέγγιση που ακολουθείται, είναι αναπόφευκτο ότι κάποιες επιδράσεις που είναι καθαρά τοπικά εξαρτώμενες (π.χ. αρχιτεκτονική του θόλου, τύπος εδάφους, τοπογραφία) επηρεάζουν ή εμπεριέχονται σε κάποιο βαθμό στα αποτελέσματα μας. Για τον λόγο αυτό δεν εξασφαλίζεται ότι η σχέση π.χ. RDVI-LAI θα έχει αυτή τη μορφή σε κάποιο άλλο μέρος του πλανήτη ακόμα και αν εφαρμοστεί σε ίδιου τύπου οικοσύστημα από το οποίο υπολογίστηκε.

Για αυτό τον λόγο, τέτοιου τύπου έρευνες πρέπει να συμπεριλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερες περιοχές μελέτης και μάλιστα με διαφορετικούς τύπους κάλυψης του εδάφους. Στο πολυφασματικό κομμάτι της παρούσας έρευνας συμπεριλαμβάνονται τρεις περιοχές μελέτης από τις οποίες τα δύο είναι φυλλοβόλα δάση και η τρίτη είναι φρυγανικό οικοσύστημα. Τα αποτελέσματα που συμφωνούν για τις τρεις περιοχές μελέτης μπορούν να θεωρηθούν γενικεύσιμα σε ικανοποιητικό βαθμό μιας και το τρίτο οικοσύστημα είναι πολύ διαφορετικού τύπου από τα δύο πρώτα και συνεπώς πολλοί παράγοντες που επιδρούν στο ανιχνεύσιμο φάσμα και τους δείκτες βλάστησης είναι σημαντικά διαφορετικοί (π.χ. αρχιτεκτονική-δομή του θόλου, τύπος εδάφους). Με αυτό το σκεπτικό εισήχθη και μια επιπλέον περιοχή μελέτης, διαφορετικού τύπου βλάστησης, στην αξιολόγηση του μοντέλου πρωτογενούς παραγωγικότητας ModSat, ώστε να ενισχυθούν οι προοπτικές γενίκευσής του σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να είναι υπό διερεύνηση η έκταση της γενίκευσης που δέχονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο πολυφασματικό κομμάτι της παρούσας έρευνας και επομένως είναι θεμιτή η εφαρμογή παρόμοιων μελετών σε άλλου τύπου οικοσυστήματα σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη και με νέους πιο εξελιγμένους πολυφασματικούς αισθητήρες.

Σε αντίθεση με το πολυφασματικό κομμάτι της παρούσας έρευνας, η μελέτη που αφορά τα υπερφασματικά δεδομένα δυστυχώς περιορίζεται στην εξέταση μιας μόνο περιοχής μελέτης. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα και χωρική κάλυψη των υπερφασματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν δεν επέτρεψαν την μελέτη περισσότερων οικοσυστημάτων. Για αυτό τον λόγο, στην μελέτη αυτή επιλέχθηκε το είδος *Phlomis fruticosa*, το οποίο λόγω της έντονης εποχιακότητας που παρουσιάζουν τα φυσιολογικά, βιοχημικά και φαινολογικά χαρακτηριστικά του, παρουσιάζει αντίστοιχα έντονη εποχιακότητα στην δομή, τη φυσιολογία και την αρχιτεκτονική του θόλου καθώς και στο ποσοστό κάλυψης του εδάφους. Με αυτό τον τρόπο, παρόλο που η μελέτη περιορίζεται χωρικά, εξετάζονται πολλές διαφορετικές φυσιολογικές καταστάσεις και εξωτερικές επιδράσεις που σπάνια παρουσιάζονται σε ένα μόνο οικοσύστημα. Ωστόσο, ένας φανερός περιοριστικός παράγοντας του οικοσυστήματος *Phlomis fruticosa* είναι ότι δεν αναπτύσσει υψηλά επίπεδα φυλλικής βιομάζας (υψηλές τιμές LAI). Το γεγονός αυτό θεωρείται κρίσιμο σε φασματικές μελέτες δεικτών βλάστησης επειδή οι τελευταίοι εμφανίζουν κορεσμό σε

υψηλά επίπεδα LAI και η αποτελεσματικότητα τους κρίνεται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητά τους να παραμένουν αποδοτικοί σε συνθήκες υψηλής φυλλικής βιομάζας.

Επομένως, η γενίκευση των δεικτών βλάστησης που προέκυψαν από την υπερφασματική μελέτη δεν μπορεί να γίνει αν δεν υπάρξει περαιτέρω ανάλογη έρευνα που θα εξετάσει την εφαρμογή των δεικτών αυτών σε περισσότερα οικοσυστήματα. Ωστόσο, από την μελέτη των υπερφασματικών δεδομένων προέκυψαν πολλά εξαιρετικά ενδιαφέροντα και καινοτόμα αποτελέσματα που ο ουσιαστικός τους ρόλος δεν είναι η άμεση γενίκευση τους σε μεγάλη χωρική κλίμακα αλλά η συμβολή τους στην κατανόηση της σχέσης πολλών οικοφυσιολογικών παραμέτρων με την φασματική συμπεριφορά του θόλου της βλάστησης. Η ανακλαστικότητα της βλάστησης στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο εξαρτάται ισχυρά από δομικούς (πυκνότητα φυλλώματος, προσανατολισμός φύλλων, αρχιτεκτονική θόλου) και βιοχημικούς (χλωροφύλλες, καροτενοειδή) παράγοντες και στην πράξη είναι πολύ δύσκολο, έως αδύνατο, να σχεδιαστεί ένας δείκτης βλάστησης που να σχετίζεται αποκλειστικά με μία παράμετρο της βλάστησης. Όπως φάνηκε από την ανάλυση των πολυφασματικών δεδομένων, είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί ένας δείκτης χλωροφυλλών που να εφαρμόζεται σε διαφορετικά οικοσυστήματα χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η δομή και η πυκνότητα του θόλου. Η παρούσα υπερφασματική ανάλυση στον τομέα αυτό ουσιαστικά συνεισφέρει στον εντοπισμό των περιοχών του φάσματος ανακλαστικότητας και των συνδυασμών τους που είναι αξιοποιήσιμοι για περαιτέρω έρευνα στον σχεδιασμό υπερφασματικών δεικτών βλάστησης, μοντέλων ανακλαστικότητας θόλου ή ακόμα και φασματικών χαρακτηριστικών μελλοντικών υπερφασματικών αισθητήρων που θα είναι σε θέση να διακρίνουν καλύτερα τις διακυμάνσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών στα χερσαία οικοσυστήματα. Με την λογική της συνεισφοράς στην κατανόηση των πολύπλοκων χαρακτηριστικών της ανακλαστικότητας του θόλου σε σχέση με την φυσιολογία της βλάστησης αντιμετωπίζονται επίσης και τα υπόλοιπα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη του πειραματικού υπερφασματικού αισθητήρα. Η εξελισσόμενη έρευνα στους τομείς των πολλαπλών κατευθύνσεων παρατήρησης της γης, του εντοπισμού της υδατικής κατάστασης της βλάστησης και της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ε) είναι δυνατόν να αξιοποιήσει τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης. Η υπερφασματική τηλεπισκόπηση αναδεικνύει πλήθος πλεονεκτημάτων σε σχέση με την πολυφασματική αλλά βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια. Περαιτέρω έρευνα στον υπερφασματικό τομέα και εμφάνιση νέων υπερφασματικών αισθητήρων με αυξημένες δυνατότητες κάλυψης της γης κρίνονται αναγκαίες προϋποθέσεις για την αξιολόγηση, αξιοποίηση και επέκταση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην παρακολούθηση των χερσαίων οικοσυστημάτων. Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα προσφέρουν την ανιχνεύσιμη πληροφορία σε πολλαπλές κλίμακες και με αυτό τον τρόπο συμβάλουν στην διεύρυνση της μελέτης και της κατανόησης της συμπεριφοράς της βλάστησης ακόμα και σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, οι δυνατότητες που προσφέρονται από την τηλεπισκόπηση, η ακρίβεια και η λεπτομέρεια με την οποία ανιχνεύονται τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της βλάστησης εξαρτώνται κυρίως από τις ιδιότητες των τηλεπισκοπικών οργάνων που χρησιμοποιούνται.

Όσον αφορά τους δορυφορικούς πολυφασματικούς αισθητήρες (AVHRR, SPOT, MODIS), αποδείχθηκε ότι είναι αποτελεσματικοί στην αποτύπωση των αναπτυξιακών μεταβολών των οικοσυστημάτων μέσω δεικτών βλάστησης. Ειδικότερα:

- Ο διαδεδωμένος δείκτης βλάστησης NDVI (κόκκινο – εγγύς υπέρυθρο) αποδεικνύεται ευαίσθητος στις διακυμάνσεις της φυλλικής επιφάνειας (LAI) των οικοσυστημάτων, ιδιαίτερα όταν η τελευταία κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα ($LAI < 4$). Σε υψηλότερες τιμές LAI (οικοσυστήματα υψηλής φυλλικής βιομάζας, π.χ. πυκνά δάση) ο NDVI τείνει να χάνει την ευαισθησία του (εμφανίζει κορεσμό) και η σχέση LAI-NDVI γίνεται ασυμπτωτική.
- Ο βαθμός ευαισθησίας του NDVI δεν είναι ανεξάρτητος από τις συνθήκες υπολογισμού του. Συγκεκριμένα, τα φασματικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα (εύρος, τοποθέτηση καναλιών στο κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο), οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις, η χωρική και η χρονική ανάλυση των δεδομένων παίζουν μεγάλο ρόλο στην απόδοση του δείκτη. Βάσει των παραπάνω, οι βελτιωμένες ιδιότητες του MODIS συγκριτικά με τον SPOT έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλότερη ευαισθησία του NDVI όταν υπολογίζεται από τα κανάλια του πρώτου.
- Οι δείκτες OSAVI και RDVI (κόκκινο – εγγύς υπέρυθρο), που ενσωματώνουν στην φόρμουλα υπολογισμού τους κατάλληλες ρυθμίσεις για την ελαχιστοποίηση των επιρροών υποορόφου-εδάφους και την βελτίωση της ευαισθησίας στις διακυμάνσεις της φυλλικής βιομάζας, εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά. Αποδείχθηκαν σταθεροί και αποτελεσματικοί εκτιμητές των διακυμάνσεων της φυλλικής επιφάνειας των οικοσυστημάτων ακόμα και σε υψηλά επίπεδα φυλλικής βιομάζας, αποδίδοντας ισχυρές και γραμμικές συσχετίσεις με τον LAI.
- Ο δείκτης EVI (μπλε – κόκκινο – εγγύς υπέρυθρο), που ενσωματώνει συντελεστές ρύθμισης υποορόφου, εδάφους και ατμοσφαιρικών επιδράσεων, αν και είναι σήμερα πολύ διαδεδωμένος δείκτης βλάστησης, δεν εμφάνισε ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους δύο παραπάνω δείκτες (OSAVI, RDVI). Παρουσίασε μεν ισχυρή και γραμμική συσχέτιση με τον LAI, αλλά με μεγαλύτερη διασπορά τιμών σε σχέση με τους OSAVI και RDVI. Η μειωμένη σταθερότητα στις τιμές του EVI αποδίδεται στην αβεβαιότητα που εισάγει το μπλε κανάλι σε σχέση με τις κυμαινόμενες ατμοσφαιρικές παραμέτρους.
- Ο NDWI είναι δείκτης της συνολικής ποσότητας νερού στα στρώματα φύλλων, κάτι που συνεπάγεται ότι ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό τις αναπτυξιακές διακυμάνσεις του θόλου και το ποσοστό κάλυψης του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σύγχυση της υδατικής με την αναπτυξιακή πληροφορία και την μειωμένη αποδοτικότητά του ως δείκτη υδατικής κατάστασης.

Μέσω του μακρού αρχείου δορυφορικών πολυφασματικών δεδομένων (AVHRR) και του ανάλογου αρχείου επίγειων μετεωρολογικών καταγραφών είναι δυνατή η μελέτη των αναπτυξιακών μεταβολών των οικοσυστημάτων στο χρόνο σε σχέση με τις με τις κλιματικές διακυμάνσεις. Τέτοια μελέτη εκπονήθηκε για το δάσος δρυών (*Quercus* sp.) στο κεντρικό Ζαγόρι:

- Οι εσωτερικές διεργασίες των δέντρων που λαμβάνουν χώρα στα τέλη κάθε αναπτυξιακής περιόδου (π.χ. αποθήκευση θρεπτικών συστατικών, διαμόρφωση οφθαλμών, ανάπτυξη ριζικού συστήματος) επηρεάζονται από τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες και αυτό έχει αντίκτυπο στην ανάπτυξη της επόμενης αναπτυξιακής περιόδου.
- Η βροχόπτωση του μήνα Αυγούστου επιδρά θετικά στην ανάπτυξη της επόμενης περιόδου, ενώ η θερμοκρασία του Αυγούστου και των ακόλουθων μηνών επιδρά αρνητικά σε αυτή.
- Η βροχόπτωση-χιονόπτωση των χειμερινών μηνών (Ιανουάριος-Φεβρουάριος) εμπλουτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα με τα απαραίτητα αποθέματα νερού που επιτρέπουν στο οικοσύστημα την ανάπτυξη του κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων του καλοκαιριού και την επιμήκυνση της αναπτυξιακής περιόδου.
- Παρατηρήθηκε σταδιακή μεταβολή των χαρακτηριστικών της αναπτυξιακής περιόδου και αύξηση της συχνότητας των φαινομένων ξηρασίας κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών. Τα παραπάνω οδηγούν στην υπόθεση της μείωσης του πληθυσμού του είδους *Q. cerris*, το οποίο είναι πιο ευαίσθητο στην ξηρασία, προς όφελος του δεύτερου κυρίαρχου είδους *Q. frainetto* ή και άλλων ανθεκτικών στην ξηρασία ειδών (π.χ. *Q. pubescens*).
- Μια δεύτερη υπόθεση που αφορά την περιοχή του δάσους δρυών σχετίζεται με την παρατήρηση της σταδιακής αύξησης του χειμερινού NDVI κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών. Το παρατηρούμενο φαινόμενο ίσως σχετίζεται με την επέκταση των αείφυλλων ειδών της ευμεσογειακής ζώνης σε μεγαλύτερα υψόμετρα όπου παραδοσιακά κυριαρχούν φυλλοβόλα είδη δρυός.

Συνδυάζοντας δορυφορικά πολυφασματικά δεδομένα με επίγειες μετεωρολογικές καταγραφές καθίσταται δυνατή η μοντελοποίηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας της βλάστησης (GPP). Το μεγαλύτερο εγχείρημα εκτίμησης της παγκόσμιας GPP επιτελείται από την NASA και χρησιμοποιεί κυρίως δεδομένα των δορυφόρων MODIS. Το προϊόν αυτό όμως διατηρεί ακόμη σημαντικά ελλείμματα ακρίβειας τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Στα οικοσυστήματα φυλλοβόλων παρατηρείται το φαινόμενο της συστηματικής πρόωρης αύξησης των τιμών GPP την άνοιξη πριν την έκπτυξη των φύλλων. Βασικό ρόλο στην εμφάνιση πρώιμων τιμών GPP διαδραματίζει η εκτίμηση του FAPAR μέσω του αλγορίθμου που εφαρμόζεται, ο οποίος θεωρείται ότι επηρεάζεται από την ανάπτυξη φυτών στον υποόροφο και τις επιδράσεις της ανακλαστικότητας του εδάφους.
- Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται αποτυγχάνει να ρυθμίσει σωστά τις επιδράσεις της υδατικής καταπόνησης στην πρωτογενή παραγωγικότητα. Χρησιμοποιείται ένας ρυθμιστής μέσω της μετεωρολογικής παραμέτρου VPD, στον οποίο αποδίδεται αυξημένη ευαισθησία ώστε να μπορέσει να καλύψει τις επιδράσεις της ξηρασίας. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζεται έντονη υποεκτίμηση της GPP σε περιόδους ξηρασίας όπου η τοπική βλάστηση έχει προσαρμοστεί σε τέτοιες συνθήκες ή εκμεταλλεύεται τα αποθέματα νερού του υδροφόρου ορίζοντα.
- Ο αλγόριθμος εκτίμησης της GPP παρουσιάζει πλήθος επιπλέον ελλείψεων που πηγάζουν από τις απλοποιημένες παραδοχές που υιοθετεί με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού βάρους. Εν συντομία, η ακρίβεια του προϊόντος επηρεάζεται από την μειωμένη χωρική ανάλυση (1 km), την παραδοχή ότι κάθε εικονοστοιχείο περιέχει έναν μόνο τύπο κάλυψης,

την διάκριση μόνο 11 τύπων εδαφικής κάλυψης παγκοσμίως, την χρήση στατικών ρυθμιστικών παραμέτρων (πίνακας BPLUT), τα σφάλματα ταξινόμησης, την χαμηλή χωρική ανάλυση των μετεωρολογικών παραμέτρων (~ 100 km), τα σφάλματα στην μοντελοποίηση των μετεωρολογικών παραμέτρων, τις επιδράσεις της νεφοκάλυψης, του χιονιού και του πάγου στις εκτιμήσεις του FAPAR και την απλοποιημένη θεώρηση των επιδράσεων της θερμοκρασίας στην φωτοσυνθετική απόδοση.

Το μοντέλο ModSat, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας για την λεπτομερή εκτίμηση της GPP μέσω πολυφασματικών δεικτών βλάστησης και μετεωρολογικών καταγραφών, αποδείχθηκε ικανό για ακριβή περιγραφή των διακυμάνσεων της GPP σε όλους τους λειτουργικούς τύπους βλάστησης που εφαρμόστηκε. Η επιτυχία εφαρμογής του μοντέλου αυτού υποδεικνύει ότι δεν είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση περίπλοκων αλγορίθμων, μεγάλων βάσεων δεδομένων και βαριών υπολογιστικών επεξεργασιών για την παραγωγή προϊόντων GPP μεγάλης χωρικής κλίμακας. Τα κύρια σημεία που υπερέχει ο αλγόριθμος του ModSat σε σχέση με του MODIS θεωρείται ότι είναι τα παρακάτω:

- Η ύπαρξη δύο διαφορετικών αναπτυξιακών ρυθμιστικών συντελεστών αποδίδει αυξημένη ακρίβεια στην αναγνώριση των εποχιακών μεταβολών της δραστηριότητας του θόλου και ιδιαίτερα στην έναρξη και την λήξη της αναπτυξιακής περιόδου στα οικοσυστήματα φυλλοβόλων.
- Η ρύθμιση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός μέσω μιας κωδωνοειδούς συναρτήσεως ελάχιστης, βέλτιστης και μέγιστης θερμοκρασίας εισάγει την πραγματική διάσταση των επιδράσεων της θερμοκρασίας στην φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών.
- Παρόλο που ο NDWI δεν θεωρείται ιδανικός δείκτης της υδατικής κατάστασης, η εφαρμογή του ως ρυθμιστή νερού στον αλγόριθμο του ModSat σε συνδυασμό με τους αναπτυξιακούς ρυθμιστικούς συντελεστές θεωρείται ότι περιγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό τα αποτελέσματα της υδατικής καταπόνησης στην δραστηριότητα του θόλου και συνεπώς στην πρωτογενή παραγωγικότητα.

Τα υπερφασματικά δεδομένα αποδείχθηκε ότι προσφέρουν περισσότερες δυνατότητες σε σχέση με τα πολυφασματικά τόσο στην αναλυτική εκτίμηση παραμέτρων της βλάστησης, όσο και στην εφαρμογή πιο προηγμένων μεθόδων ανάλυσης της πληροφορίας που προσφέρεται. Επιπλέον, η ανίχνευση της ανακλαστικότητας του ίδιου σημείου της γης από πολλαπλές κατευθύνσεις παρατήρησης και με υψηλή χωρική διακριτικότητα προσφέρει ακόμα περισσότερη λεπτομέρεια και δυνατότητες ανάλυσης. Μέσω των αναλύσεων των πολυγωνιακών υπερφασματικών δεδομένων CHRIS και σε συνδυασμό με την ανάλυση χωρικής κλίμακας των εναέριων δεδομένων υψηλής διακριτικότητας MCA-6 βγήκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ανακλαστικότητα του εδάφους επιδρά αρνητικά στην εκτίμηση αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων της βλάστησης μέσω της παραγωγής του φάσματος και δεικτών βλάστησης.
- Οι σκιάσεις εσωτερικά του θόλου δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα των περισσότερων δεικτών βλάστησης.
- Οι υψηλές γωνίες παρατήρησης του αισθητήρα (ανεξαρτήτως κατεύθυνσης σκέδασης) εξυπηρετούν καλύτερα την διάκριση των αναπτυξιακών και φυσιολογικών παραμέτρων της βλάστησης σε σχέση με κατακόρυφες παρατηρήσεις, κυρίως λόγω της μείωσης του ποσοστού εδάφους (κενών στο θόλο) που επιδρά στο σήμα ανακλαστικότητας.
- Η παρακολούθηση των αναπτυξιακών διακυμάνσεων της φυλλικής βιομάζας μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια από υπερφασματικούς αισθητήρες μέσω πολλών διαφορετικών δεικτών βλάστησης (απλών και πολύπλοκων συνδυασμών καναλιών) και της παραγωγής

του φάσματος ανακλαστικότητας στην πράσινη-κόκκινη περιοχή, ανεξαρτήτως της γωνίας και της κατεύθυνσης παρατήρησης.

- Μέσω υπερφασματικών δεδομένων είναι δυνατή η ανίχνευση των συγκεντρώσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών φύλλου. Για την ακριβή εκτίμηση των χλωροφυλλών είναι απαραίτητη η ύπαρξη στενών καναλιών στις παρυφές του ερυθρού (κυρίως στο διάστημα 700 – 710 nm), ενώ για την διάκριση των καροτενοειδών χρησιμεύουν τα κανάλια κοντά στα 510 nm. Επίσης, μια απλή αναλογία κόκκινων και πράσινων καναλιών (στενών ή ευρέων) μπορεί να φανεί αποτελεσματική στην εκτίμηση των καροτενοειδών.
- Τα συνεχόμενα και στενά κανάλια των υπερφασματικών δεδομένων αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμα για την αναγνώριση χαρακτηριστικών της βλάστησης που παρουσιάζουν δυσδιάκριτες απορροφήσεις και πολλαπλές εξωτερικές επιδράσεις. Οι συνδυασμοί της περιοχής 930 – 960 nm με το κανάλι στα 970 nm όπου παρουσιάζεται και η εντονότερη απορρόφηση του νερού αποτελούν δυνητικούς δείκτες υδατικής κατάστασης.

Ο δείκτης PRI είναι δυνατόν να υπολογισθεί μόνο από στενά φασματικά κανάλια και αποδεικνύεται αποτελεσματικός στην εκτίμηση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) από τον θόλο της βλάστησης καθώς και των επιδράσεων της υδατικής καταπόνησης στην φυσιολογική λειτουργία πριν ακόμα γίνουν εμφανείς αλλαγές στην βιοχημική σύνθεση και την δομή του θόλου. Οι ιδιότητες του συγκεκριμένου δείκτη συμπεραίνεται ότι είναι αρκετά πολύπλοκες και σίγουρα δεν περιορίζονται στον εντοπισμό της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών που αποτελούσε τον αρχικό του σχεδιασμό. Συγκεκριμένα:

- Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο μαζί με την κατάσταση εποξείδωσης των ξανθοφυλλών στην διαμόρφωση του δείκτη PRI.
- Η ανακλαστικότητα στις παρυφές του ερυθρού (~ 700 nm) συμβάλει ευεργετικά στον προσδιορισμό της ϵ και ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με την περιοχή 531 – 540 nm (PRI_{700}).
- Η φωτοσυνθετική απόδοση συνδέεται με την εποχιακή διακύμανση των φωτοσυνθετικών χρωστικών (ιδιαίτερα των χλωροφυλλών) και συνεπώς τα χαρακτηριστικά του PRI (και PRI_{700}) συμβάλουν θετικά στην εποχιακή και δια-ειδική εκτίμηση της ϵ .
- Ο PRI μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό σύγχρονων καλλιεργητικών πρακτικών ως εκτιμητής της φυσιολογικής κατάστασης και της τελικής απόδοσης των καλλιεργειών αρκεί να είναι διαθέσιμα προϊόντα υψηλής χωρικής διακριτικότητας.
- Η κατεύθυνση παρατήρησης επηρεάζει την απόδοση του PRI στην εκτίμηση της ϵ . Στις κατευθύνσεις οπίσθιας σκέδασης ο PRI παρουσιάζει την μέγιστη αποτελεσματικότητα, ενώ στις κατευθύνσεις πρόσθιας σκέδασης η ευαισθησία του δείκτη μετατοπίζεται προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (~ 540 nm). Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως στα περίπλοκα φαινόμενα σκεδασμού της ακτινοβολίας από τον θόλο της βλάστησης.
- Η γεωμετρία ηλίου-στόχου-αισθητήρα σε συνδυασμό με την δομή του θόλου και η ανακλαστικότητα του εδάφους προκαλούν έντονες επιδράσεις στην αποτελεσματικότητα του PRI ως δείκτη της ϵ και της φυσιολογικής κατάστασης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την μελέτη και κατανόηση του δυναμικού χαρακτήρα της βιόσφαιρας της γης και των αλληλεπιδράσεων της με τις αυξανόμενες ανθρωπογενείς πιέσεις και τις κλιματικές αλλαγές είναι αναγκαία η διεύρυνση των παραδοσιακών μεθόδων έρευνας. Η τηλεπισκόπηση προσφέρει δεδομένα μεγάλης χωρικής και χρονικής κλίμακας και έτσι αποτελεί σήμερα πολύτιμο εργαλείο στην οικολογική έρευνα. Στην παρούσα μελέτη αξιολογήθηκαν τρέχοντα προϊόντα δορυφορικών πολυφασματικών αισθητήρων (AVHRR, SPOT VGT, MODIS), επεξεργάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα πολυγωνικά δεδομένα του πειραματικού υπερφασματικού δορυφόρου CHRIS/PROBA, διεξήχθη μια ετήσια πειραματική μελέτη χειρισμών άρδευσης ενός πορτοκαλεώνα (*Citrus sinensis*) μέσω πολυφασματικών δεδομένων εναέριας πλατφόρμας, μελετήθηκε η δυναμική ενός δασικού οικοσυστήματος (*Quercus* sp.) στο χρόνο και αναπτύχθηκε μοντέλο εκτίμησης ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) μέσω δορυφορικών και μετεωρολογικών δεδομένων (ModSat). Για την αξιολόγηση των τηλεπισκοπικών δεδομένων καθώς και την βαθμονόμηση του μοντέλου εκτελέστηκαν επίγειες οικοφυσιολογικές μετρήσεις σε δυο δασικά (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.) και ένα θαμνώδες οικοσύστημα (*Phlomis fruticosa*) επί σειρά ετών. Επίσης, εγκαταστάθηκαν μετεωρολογικοί σταθμοί (θερμοκρασία, PAR, βροχόπτωση) πλησίον των περιοχών μελέτης.

Οι δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν από τα δορυφορικά πολυφασματικά προϊόντα αποδείχθηκαν ικανοί για την αποτύπωση των διακυμάνσεων του μετρημένου επίγεια δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI). Συγκεκριμένα, ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάστησης NDVI φανέρωσε ευαισθησία στις διακυμάνσεις του LAI, ιδιαίτερα όταν ο τελευταίος κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα ($LAI < 4$). Ο NDVI όμως εμφανίζει φαινόμενα κορεσμού σε περιπτώσεις που ο LAI κυμαίνεται σε υψηλές τιμές, όπως για παράδειγμα στο οικοσύστημα *Fagus sylvatica*. Απεναντίας, πιο εξελιγμένοι δείκτες βλάστησης (RDVI, OSAVI, EVI) παραμένουν ευαίσθητοι σε όλο το φάσμα των μετρημένων τιμών LAI. Μάλιστα, οι RDVI και OSAVI κρίνονται οι πιο αποδοτικοί στην εκτίμηση των διακυμάνσεων της φυλλικής βιομάζας των οικοσυστημάτων, αφού εμφάνισαν τις ισχυρότερες γραμμικές συσχετίσεις με τον LAI. Ο δείκτης NDWI, που βασίζεται στα κανάλια του MODIS και προορίζεται για την αποτύπωση της υδατικής κατάστασης της βλάστησης, αποδείχθηκε ότι επηρεάζεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τις αναπτυξιακές διακυμάνσεις του θόλου παρά από την υδατική κατάσταση των φυτών.

Με βάση την ιδιότητα του NDVI να αποτυπώνει επιτυχώς τις αυξομειώσεις της φυλλικής βιομάζας, υπολογίστηκαν οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης της αναπτυξιακής περιόδου κάθε έτους για το οικοσύστημα φυλλοβόλων δρυών (*Quercus* sp.), καθώς και τα ολοκληρώματα των καμπυλών NDVI για τις περιόδους αυτές, από το μεγάλο αρχείο δεδομένων των δορυφόρων NOAA AVHRR (1981 – 2006). Παρατηρήθηκε μια ισχυρή τάση μετατόπισης της ημερομηνίας έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου νωρίτερα με την πάροδο των ετών, καθώς και σταδιακή αύξηση των χειμερινών τιμών NDVI. Η μελέτη του αρχείου μετεωρολογικών καταγραφών για την αντίστοιχη περίοδο φανερώνει ότι υπάρχει αύξηση των περιόδων ξηρασίας τις τρεις τελευταίες δεκαετίες. Τα παραπάνω οδηγούν στις υποθέσεις της αλλαγής της σύστασης των φυλλοβόλων ειδών και της επέκτασης των αείφυλλων ειδών στην μελετώμενη περιοχή. Η σύγκριση του αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων (βροχόπτωση, θερμοκρασία) με τις διακυμάνσεις των εξαγόμενων ιδιοτήτων της αναπτυξιακής περιόδου του *Quercus* sp. φανέρωσε ότι η βροχόπτωση του Αυγούστου επιδρά θετικά στην ανάπτυξη της επόμενης περιόδου, ενώ η θερμοκρασία του

Αυγούστου και των ακόλουθων μηνών επιδρά αρνητικά σε αυτή. Επίσης, η βροχόπτωση και η χιονόπτωση των χειμερινών μηνών (Ιανουάριος-Φεβρουάριος) επιδρούν θετικά στην επιμήκυνση της ακόλουθης αναπτυξιακής περιόδου. Τα παραπάνω συνδέονται με τις εσωτερικές διεργασίες των δέντρων που λαμβάνουν χώρα στα τέλη κάθε αναπτυξιακής περιόδου και τον εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα κάθε χειμώνα.

Οι εκτιμήσεις της GPP από το ανεπτυγμένο μοντέλο ModSat αξιολογήθηκαν μέσω των εκτιμήσεων του μοντέλου φωτοσύνθεσης θόλου MANTIS, το οποίο βασίζεται σε επίγειες μετρήσεις. Βάσει του τελευταίου αξιολογήθηκε επίσης το προϊόν GPP της NASA (δορυφόροι MODIS). Το ModSat αποδείχθηκε ικανό για ακριβή περιγραφή των διακυμάνσεων της GPP σε όλους τους λειτουργικούς τύπους βλάστησης που εφαρμόστηκε. Αντιθέτως, το προϊόν της NASA εμφάνισε σοβαρές και επαναλαμβανόμενες ελλείψεις στην ακρίβεια των εκτιμήσεων GPP που πηγάζουν κυρίως από τον σχεδιασμό του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται και τις αναγκαίες απλοποιήσεις στο θεωρητικό του υπόβαθρο. Ωστόσο, η επιτυχία του μοντέλου ModSat υποδεικνύει ότι δεν είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση περίπλοκων αλγορίθμων, μεγάλων βάσεων δεδομένων και βαριών υπολογιστικών επεξεργασιών για την παραγωγή προϊόντων GPP υψηλής ακρίβειας και μεγάλης χωρικής κλίμακας. Μια πρωταρχική ανεπάρκεια που εντοπίστηκε τόσο στο προϊόν της NASA, όσο και στο ModSat, προέρχεται από την δυσκολία ρύθμισης των επιδράσεων της υδατικής καταπόνησης στην πρωτογενή παραγωγικότητα.

Τα δορυφορικά υπερφασματικά – πολυγωνικά δεδομένα και τα εναέρια πολυφασματικά δεδομένα στενών καναλιών υψηλής χωρικής διακριτικότητας αποδείχθηκε ότι προσφέρουν περισσότερες δυνατότητες σε σχέση με τα δορυφορικά πολυφασματικά προϊόντα τόσο στην αναλυτική εκτίμηση παραμέτρων της βλάστησης, όσο και στην εφαρμογή πιο προηγμένων μεθόδων ανάλυσης της πληροφορίας. Συγκεκριμένα, εκτός από την ακριβή αποτύπωση των διακυμάνσεων του μετρημένου επίγειας LAI, τα υπερφασματικά δεδομένα είναι ικανά να ανιχνεύσουν τις συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών φύλλου και την υδατική κατάσταση της βλάστησης. Για την ακριβή εκτίμηση των χλωροφυλλών αποδείχθηκε απαραίτητη η ύπαρξη όσο το δυνατόν στενότερων καναλιών στις παρυφές του ερυθρού (κυρίως στο διάστημα 700 – 710 nm), ενώ για την διάκριση των καροτενοειδών χρησιμεύουν τα κανάλια κοντά στα 510 nm. Για την διάκριση της υδατικής κατάστασης απαιτούνται συνεχόμενα και στενά κανάλια στην περιοχή 930 – 970 nm. Η ανακλαστικότητα του εδάφους επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των δεικτών βλάστησης και επομένως οι υψηλές γωνίες παρατήρησης του αισθητήρα κρίνονται αποδοτικότερες διότι ελαχιστοποιούν τα παρατηρούμενα κενά στον θόλο. Απεναντίας, οι σκιάσεις εσωτερικά του θόλου δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα των περισσότερων δεικτών βλάστησης.

Από στενά φασματικά κανάλια είναι δυνατόν να υπολογισθεί ο δείκτης PRI, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για τον εντοπισμό της κατάστασης εποξείδωσης των ξανθοφυλλών. Ο δείκτης αυτός αποδείχθηκε πολυσύνθετος όσον αφορά τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του, αποτελεί ωστόσο αποτελεσματικό εκτιμητή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ε) από τον θόλο της βλάστησης και γενικότερα δείκτη φυσιολογικής κατάστασης και λειτουργίας της βλάστησης. Εκτός από την κατάσταση εποξείδωσης των ξανθοφυλλών, οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών επηρεάζουν επίσης τον PRI συμβάλλοντας ευεργετικά στην εποχιακή και δια-ειδική εκτίμηση της ε. Για τον λόγο αυτό, η ανακλαστικότητα στις παρυφές του ερυθρού (~ 700 nm) μπορεί να συνδυαστεί με την περιοχή 531 – 540 nm (PRI₇₀₀) και να αποτελέσει μια εναλλακτική και ίσως αποδοτικότερη μορφή του δείκτη PRI. Παρόλα αυτά, η κατεύθυνση παρατήρησης, η γεωμετρία ηλίου-στόχου-αισθητήρα σε συνδυασμό με την δομή του θόλου και η ανακλαστικότητα του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του PRI.

ABSTRACT

In order to study and achieve complete understanding of biosphere dynamics in relation to ongoing human pressure and climate change, it is necessary to broaden the traditional investigation methods. Remote sensing offers data of high spatial and temporal scale, thus comprises a valuable tool in ecology research. In the present study, current multispectral satellite (AVHRR, SPOT VGT, MODIS) products were evaluated, multiangle hyperspectral data of the experimental satellite CHRIS/PROBA were processed and evaluated, an annual experimental study of irrigation strategies on an orange orchard (*Citrus sinensis*) was implemented through aerial multispectral data, dynamics of a forest ecosystem (*Quercus* sp.) in time were investigated and a gross primary productivity (GPP) model based on satellite and meteorological data was developed. In order to evaluate the remote sensing data and calibrate the GPP model, a series of ground ecophysiological measurements were carried out in two forests (*Fagus sylvatica*, *Quercus* sp.) and a shrubland (*Phlomis fruticosa*). Meteorological stations (temperature, PAR, precipitation) were also installed near the study sites.

The vegetation indices that were extracted from the satellite multispectral products proved to be efficient in detecting the fluctuations of ground measured leaf area index (LAI). More specifically, the widely used vegetation index NDVI showed sensitivity in LAI fluctuations, particularly for low LAI ecosystems ($LAI < 4$). In case of higher LAI values (e.g. *Fagus sylvatica* forest) NDVI saturates. In contrast, more developed vegetation indices (RDVI, OSAVI, EVI) remain sensitive in the whole range of the measured LAI values. In fact, RDVI and OSAVI are proved to be the most effective multispectral indices in detecting leaf biomass fluctuations, since they presented the strongest linear relationships with LAI. NDWI – an index based on MODIS bands that was designed to detect vegetation water status – is proved to be affected in greater degree by canopy variations than the actual plant water status.

Based on the ability of NDVI to follow canopy fluctuations, the long time-series archive of NOAA AVHRR (1981 – 2006) was used to estimate the start and end dates of annual growth periods of the deciduous oak ecosystem (*Quercus* sp.) and the integrals of the NDVI curves for that periods. Strong trends of growth start date shifting earlier and a gradual increase of winter NDVI values over the years were observed. The meteorological recordings archive for the respective time period shows that the drought periods are increased during the last three decades. The above observations lead to the hypotheses of deciduous species composition change and expansion of the evergreen species in the study site. The relationship analysis of the meteorological data (precipitation, temperature) archive and the extracted growth period characteristics showed that precipitation of August affect positively the growth of the next period, while temperature of August and the following months affects it negatively. Precipitation of winter months (January-February) has positive effect in the length of the following growth period. The above findings are connected to the tree internal processes that occur at the end of every growth period and the enrichment of the aquifer every winter.

GPP estimations by the developed model ModSat were evaluated using MANTIS, a canopy photosynthesis model that is based on ground measurements. MANTIS estimations were also used to evaluate the GPP product of NASA (MODIS satellites). ModSat was proved effective in capturing the fluctuations of GPP in all functional types that was implemented on. Contrarily, NASA product presented serious repetitive accuracy deficiencies that mainly originate from the

algorithm design and the necessary simplifications in its theoretical background. However, ModSat effectiveness indicates that the implication of oversized databases and heavy data processing routines are not crucial for the production of accurate GPP estimations in high spatial scale. A principal defect that was spotted in both NASA product and ModSat model originates from the difficulty in modelling the effects of water stress in primary productivity.

Satellite multiangular hyperspectral and aerial high resolution narrowband multispectral data offer enhanced possibilities in detailed detection and discrimination of vegetation parameters and in the application of more advanced data analysis methods compared to satellite multispectral products. Specifically, hyperspectral data, apart from estimating accurately LAI fluctuations, are capable of detecting leaf pigment concentrations and water status of the canopy. In order to detect chlorophyll content the use of very narrow bands in the red-edge part of the spectrum (mainly 700 – 710 nm) is proved to be crucial, while for the discrimination of carotenoid content bands near 510 nm seemed useful. The estimation of canopy water status can be achieved through continuous narrow spectral bands in the area 930 – 970 nm. Soil reflectance affects greatly the effectiveness of vegetation indices, therefore high observation angles of the sensor appear to be more suitable, eliminating canopy gap effects. Contrarily, internal canopy shadowing does not seriously affect the effectiveness of most vegetation indices.

PRI is an index designed for the detection of the xanthophyll epoxidation state and can be calculated from narrow bands. This index proved to retain complex attributes and characteristics and constitutes an effective index of light use efficiency (ϵ) by the vegetation canopy and more generally, an index of the physiological and functional state of the plants. Leaf pigment concentrations affect greatly PRI values and along with xanthophyll epoxidation state signal contribute to an effective measure of ϵ seasonally and across a wide range of species. Therefore, red-edge reflectance (~ 700 nm) can be combined with the region 531 – 540 nm (PRI_{700}) to comprise an alternative and possibly more effective form of PRI. Nevertheless, observation direction, sun-target-sensor geometry in relation to canopy structure and soil reflectance affect significantly PRI efficiency.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aber, J.D., & Federer, C.A. (1992). A Generalized, Lumped-Parameter Model of Photosynthesis, Evapotranspiration and Net Primary Production in Temperate and Boreal Forest Ecosystems. *Oecologia*, 92, 463-474
- Acacio, V., Holmgren, M., Rego, F., Moreira, F., & Mohren, G.M.J. (2009). Are drought and wildfires turning Mediterranean cork oak forests into persistent shrublands? *Agroforestry Systems*, 76, 389-400
- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., & Malingreau, J.P. (2002). Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science*, 297, 999-1002
- Adams, M.L., Philpot, W.D., & Norvell, W.A. (1999). Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 3663-3675
- Adams, W.W.I.I., & Demmig-Adams, B. (1994). Carotenoid composition and down regulation of Photosystem II in three conifer species during the winter. *Physiologia Plantarum*, 92, 451-458
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO)
- Amorini, E., Biocca, M., Manetti, M.C., & Motta, E. (1996). A dendroecological study in a declining oak coppice stand. *Annales Des Sciences Forestieres*, 53, 731-742
- Anderson, M.C. (1971). Radiation and crop structure. In Sestak, Z., Catsky, J., Jarvis, P.G. (Eds.), *Plant photosynthetic production: manual of methods*. Hague: Dr. W. Junk Publishers
- Anderson, M.C., Neale, C.M.U., Li, F., Norman, J.M., Kustas, W.P., Jayanthi, H., & Chavez, J. (2004). Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, 447-464
- Asner, G.P. (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64, 234-253
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., & Hatfield, J.L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf-Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. *Agronomy Journal*, 76, 300-306
- Atlas, R.M., & Lucchesi, R. (2000). File specific for GEOS-DAS gridded output. 20771 (pp. 1-40). Greenbelt: MD7 Goddard Space Flight Center
- Atzberger, C. (2004). Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 93, 53-67
- Αθανasiάδης, Ν. (1986). *Δασική Βοτανική, Μέρος Β (Δένδρα και Θάμνοι της Ελλάδος)*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη
- Bacour, C., Baret, F., Beal, D., Weiss, M., & Pavageau, K. (2006). Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 105, 313-325
- Badhwar, G.D., Macdonald, R.B., Hall, F.G., & Carnes, J.G. (1986). Spectral Characterization of Biophysical Characteristics in a Boreal Forest - Relationship between Thematic Mapper Band Reflectance and Leaf-Area Index for Aspen. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24, 322-326
- Baeza, P., Sanchez-de-Miguel, P., Centeno, A., Junquera, P., Linares, R., & Lissarrague, J.R. (2007). Water relations between leaf water potential, photosynthesis and agronomic vine response as a tool for establishing thresholds in irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae*, 114, 151-158
- Balaguer, L., Pugnaire, F.I., Martinez-Ferri, E., Armas, C., Valladares, F., & Manrique, E. (2002). Ecophysiological significance of chlorophyll loss and reduced photochemical efficiency under extreme aridity in *Stipa tenacissima* L. *Plant and Soil*, 240, 343-352
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, U.K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., & Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415-2434

- Baldocchi, D.D., Matt, D.R., Hutchison, B.A., & Mcmillen, R.T. (1984). Solar-Radiation within an Oak Hickory Forest - an Evaluation of the Extinction Coefficients for Several Radiation Components during Fully-Leafed and Leafless Periods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 32, 307-322
- Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D., & Zagolski, F. (1996). Effects of soil color and brightness on vegetation indexes. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1885-1906
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A.R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120
- Barbaroux, C., & Breda, N. (2002). Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22, 1201-1210
- Barrett, E.C. & Curtis, L.F. (1976). *Introduction to environmental remote sensing*. Michigan: Chapman and Hall
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and Limits of Vegetation Indexes for Lai and Apar Assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173
- Baret, F., Guyot, G., & Major, D.J. (1989). Crop Biomass Evaluation Using Radiometric Measurements. *Photogrammetria*, 43, 241-256
- Barford, C.C., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Goulden, M.L., Pyle, H.E., Urbanski, S.P., Hutya, L., Saleska, S.R., Fitzjarrald, D., & Moore, K. (2001). Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 294, 1688-1691
- Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., & Davison, A.W. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32, 85-100
- Barr, S. (1994). Hyperspectral Image Processing. *Proceedings of the International Symposium on Spectral Sensing Research* (pp. 447-490). Ft. Belvoir, VA: U.S. Army Corps of Engineers
- Barton, C.V.M., & North, P.R.J. (2001). Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index - Model and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 78, 264-273
- Bassow, S.L., & Bazzaz, F.A. (1998). How environmental conditions affect canopy leaf-level photosynthesis in four deciduous tree species. *Ecology*, 79, 2660-2675
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., & Palutikof, J.P. (2008). Climate Change and Water. *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 210). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Secretariat
- Bausch, W.C. (1993). Soil Background Effects on Reflectance-Based Crop Coefficients for Corn. *Remote Sensing of Environment*, 46, 213-222
- Begue, A. (1993). Leaf area index, intercepted photosynthetically active radiation, and spectral vegetation indices: A sensitivity analysis for regular-clumped canopies. *Remote Sensing of Environment*, 46, 45-59
- Berliner, P., Oosterhuis, D.M., & Green, G.C. (1984). Evaluation of the Infrared Thermometer as a Crop Stress Detector. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31, 219-230
- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suarez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 722-738
- Birky, A.K. (2001). NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics. *Ecological Modelling*, 143, 43-58
- Bjorkman, O., & Demming-Adams, B. (1994). Regulation of photosynthetic light energy capture, conversions, and dissipation in leaves of higher plants. In: Schulze, E.D., & Caldwell, M.M. (Eds.), *Ecophysiology of Photosynthesis* (pp. 17-47). Berlin: Springer-Verlag
- Blackburn, G.A. (1998). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 66, 273-285
- Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C.B., Jensen, N.O., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81, 179-193
- Bogaert, J., Zhou, L., Tucker, C.J., Myneni, R.B., & Ceulemans, R. (2002). Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 107, ACL 4-1 - ACL 4-14
- Bouguet, J. (2001). Camera Calibration Toolbox for Matlab. Available: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib doc/index.html>
- Boyer, J.S. (1982). Plant Productivity and Environment. *Science*, 218, 443-448

- Breda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63, 625-644
- Breda, N.J.J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2403-2417
- Briggs, J.M., Nellis, M.D., Turner, C.L., Henebry, G.M., & Su, H. (1998). A landscape perspective of patterns and processes in tallgrass prairie. *Grassland Dynamics: Long-term Ecological Research in Tallgrass Prairie*, 265-279
- Brodribb, T.J., Bowman, D.J.M.S., Nichols, S., Delzon, S., & Burlett, R. (2010). Xylem function and growth rate interact to determine recovery rates after exposure to extreme water deficit. *New Phytologist*, 188, 533-542
- Broge, N.H., & Leblanc, E. (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76, 156-172
- Brooks, T.M., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A.B., Rylands, A.B., Konstant, W.R., Flick, P., Pilgrim, J., Oldfield, S., Magin, G., & Hilton-Taylor, C. (2002). Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity. *Conservation Biology*, 16, 909-923
- Brown, L., Chen, J.M., Leblanc, S.G., & Cihlar, J. (2000). A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. *Remote Sensing of Environment*, 71, 16-25
- Brown, M.E., Pinzon, J.E., Didan, K., Morisette, J.T., & Tucker, C.J. (2006). Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-Vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1787-1793
- Bull, C.R. (1991). Wavelength Selection for near-Infrared Reflectance Moisture Meters. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 49, 113-125
- Burgess, D.W., Lewis, P., & Muller, J.P.A.L. (1995). Topographic effects in AVHRR NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 54, 223-232
- Calvao, T., & Palmeirim, J.M. (2004). Mapping Mediterranean scrub with satellite imagery: biomass estimation and spectral behaviour. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3113-3126
- Campbell, G.S. (1986). Extinction Coefficients for Radiation in Plant Canopies Calculated Using an Ellipsoidal Inclination Angle Distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36, 317-321
- Campbell, G.S., & Norman, J.M. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. (2nd ed.). New York: Springer-Verlag
- Campbell, J.B. (2002). *Introduction to remote sensing*. (3rd ed.). London: Taylor & Francis
- Carlson, T.N., & Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252
- Carter, G.A. (1991). Primary and secondary effects on water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany*, 78, 916-924
- Carter, G.A. (1994). Ratios of Leaf Reflectances in Narrow Wavebands as Indicators of Plant Stress. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 697-703
- Caspersen, J.P., Pacala, S.W., Jenkins, J.C., Hurtt, G.C., Moorcroft, P.R., & Birdsey, R.A. (2000). Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. Forests. *Science*, 290, 1148-1151
- Cayan, D.R., Kammerdiener, S.A., Dettinger, M.D., Caprio, J.M., & Peterson, D.H. (2001). Changes in the Onset of Spring in the Western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 399-415
- Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B., & Tarantola, S. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sensing of Environment*, 82, 198-207
- Chahine, M.T. (1983). Interaction Mechanisms within the Atmosphere. In Colwell, R.N. (Ed.), *Manual of Remote Sensing* (pp. 165-230). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., & Vanheek, L. (1981). Control of Peach-Tree Growth and Productivity by Regulated Water-Supply, Tree Density, and Summer Pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106, 307-312
- Chameides, W.L., & Davis, D.D. (1982). Chemistry in the Troposphere. *Chemical & Engineering News*, 60, 38-52
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Traubaud, L., & Williams, D. (1983). *Fire in Forestry, Vol. I. Forest Fire Behaviour Effects*. New York: Wiley

- Chappelle, E.W., Kim, M.S., & McMurtrey, J.E. (1992). Ratio Analysis of Reflectance Spectra (Rars) - an Algorithm for the Remote Estimation of the Concentrations of Chlorophyll-a, Chlorophyll-B, and Carotenoids in Soybean Leaves. *Remote Sensing of Environment*, 39, 239-247
- Chartzoulakis, K., Michelakis, N., & Stefanoudaki, E. (1999). Water use, growth, yield and fruit quality of 'Bonanza' oranges under different soil water regimes. *Advances in Horticultural Science*, 13, 6-11
- Chen, J.M. (1996). Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22, 229-242
- Chen, J.M., & Cihlar, J. (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 55, 153-162
- Chen, J.M., Liu, J., Leblanc, S.G., Lacaze, R., & Roujean, J.L. (2003). Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sensing of Environment*, 84, 516-525
- Chen, X.X., Vierling, L., & Deering, D. (2005). A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment*, 98, 63-79
- Cheng, Y.B., Zarco-Tejada, P.J., Riano, D., Rueda, C.A., & Ustin, S.L. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105, 354-366
- Cho, M.A., Skidmore, A.K., & Atzberger, C. (2008). Towards red-edge positions less sensitive to canopy biophysical parameters for leaf chlorophyll estimation using properties optique spectrales des feuilles (PROSPECT) and scattering by arbitrarily inclined leaves (SAILH) simulated data. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 2241-2255
- Churkina, G., & Running, S.W. (1998). Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems*, 1, 206-215
- Cihlar, J., Tcherednichenko, I., Latifovic, R., Li, Z., & Chen, J. (2001). Impact of variable atmospheric water vapor content on AVHRR data corrections over land. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 173-180
- Clark, J.S. (1990). Fire and Climate Change during the Last 750 Yr in Northwestern Minnesota. *Ecological Monographs*, 60, 135-159
- Clark, R.N., & Roush, T.L. (1984). Reflectance Spectroscopy - Quantitative-Analysis Techniques for Remote-Sensing Applications. *Journal of Geophysical Research*, 89, 6329-6340
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., & Sutley, S.J. (2007). USGS digital spectral library splib06a. *U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231*, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>
- Clevers, J.G.P.W. (1989). The Application of a Weighted Infrared-Red Vegetation Index for Estimating Leaf-Area Index by Correcting for Soil-Moisture. *Remote Sensing of Environment*, 29, 25-37
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, 1843-1852
- Colombo, S.J. (1998). Climatic warming and its effect on bud burst and risk of frost damage to white spruce in Canada. *Forestry Chronicle*, 74, 567-577
- Colwell, R.N. (1956). Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. *Hilgardia*, 26, 223-286
- Colwell, R.N. (1966). Uses and limitations of multispectral remote sensing. *Proceedings of the fourth symposium on remote sensing of environment* (pp. 71-100). Ann Arbor: University of Michigan Institute of Science and Technology
- Combal, B., Baret, F., Weiss, M., Trubuil, A., Mace, D., Pragnère, A., Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Wang, L. (2003). Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment*, 84, 1-15
- Corcuera, L., Camarero, J.J., & Gil-Pelegrin, E. (2004). Effects of a severe drought on growth and wood anatomical properties of *Quercus faginea*. *Iawa Journal*, 25, 185-204
- Corona, P., Romagnoli, M., & Torrini, L. (1995). Stem Annual Increments as Ecobiological Indicators in Turkey Oak (*Quercus-Cerris* L). *Trees-Structure and Function*, 10, 13-19
- Cracknell, A.P., & Hayes, L. (1991). *Introduction to remote sensing*. London ; New York: Taylor & Francis
- Crisosto, C.H., Johnson, R.S., Luza, J.G., & Crisosto, G.M. (1994). Irrigation Regimes Affect Fruit Soluble Solids Concentration and Rate of Water-Loss of O Henry Peaches. *Hortscience*, 29, 1169-1171
- Curran, P.J. (1980). Relative reflectance data from preprocessed multispectral photography. *International Journal of Remote Sensing*, 1, 77-84
- Curran, P.J. (1989). Remote-Sensing of Foliar Chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271-278
- Curran, P.J. (1994). Imaging Spectrometry. *Progress in Physical Geography*, 18, 247-266

- Curran, P.J., Dungan, J.L., & Gholz, H.L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7, 33-48
- Curran, P.J., & Kupiec, J.A. (1995). Imaging Spectrometry: A New Tool for Ecology. In Danson, F.M., & Plummer, S.E. (Eds.), *Advances in Environmental Remote Sensing* (pp. 71-78). New York: Wiley
- Danson, F.M., Steven, M.D., Malthus, T.J., & Clark, J.A. (1992). High-Spectral Resolution Data for Determining Leaf Water-Content. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 461-470
- Dash, J., & Curran, P.J. (2004). The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5403-5413
- Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, 66, 111-121
- Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., de Colstoun, E.B., & McMurtrey, J.E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229-239
- David, T.S., Henriques, M.O., Kurz-Besson, C., Nunes, J., Valente, F., Vaz, M., Pereira, J.S., Siegwolf, R., Chaves, M.M., Gazarini, L.C., & David, J.S. (2007). Water-use strategies in two co-occurring Mediterranean evergreen oaks: surviving the summer drought. *Tree Physiology*, 27, 793-803
- Dawson, T.P., Curran, P.J., North, P.R.J., & Plummer, S.E. (1997). The potential of understanding the biochemical signal in the spectra of forest canopies using a coupled leaf and canopy model. In Guyot, G., & Phulpin, T. (Eds.), *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing* (pp. 463-470). Rotterdam: Balkema
- Dawson, T.P., Curran, P.J., North, P.R.J., & Plummer, S.E. (1999). The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: A theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 67, 147-159
- Dawson, T.P., Curran, P.J., & Plummer, S.E. (1998). LIBERTY - Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 65, 50-60
- Deering, D.W. (1978). *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*. Ph.D. Dissertation, Texas A & M University: College Station
- Deering, D.W., Eck, T.F., & Banerjee, B. (1999). Characterization of the reflectance anisotropy of three boreal forest canopies in spring-summer. *Remote Sensing of Environment*, 67, 205-229
- Demetriades-Shah, T.H., Steven, M.D., & Clark, J.A. (1990). High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 33, 55-64
- Demmig-Adams, B. (1990). Carotenoids and Photoprotection in Plants - a Role for the Xanthophyll Zeaxanthin. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 1020, 1-24
- Demmig-Adams, B., & Adams Iii, W.W. (1992). Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 43, 599-626
- Demmig-Adams, B., & Adams, W.W. (1996). The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 1, 21-26
- Demmig-Adams, B., Gilmore, A.M., & Adams, W.W. (1996). In vivo functions of carotenoids in higher plants. *Faseb Journal*, 10, 403-412
- Desprez-Loustau, M.L., Marçais, B., Nageleisen, L.M., Piou, D., & Vannini, A. (2006). Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annals of Forest Science*, 63, 597-612
- Di Filippo, A., Alessandrini, A., Biondi, F., Blasi, S., Portoghesi, L., & Piovesan, G. (2010). Climate change and oak growth decline: Dendroecology and stand productivity of a Turkey oak (*Quercus cerris* L.) old stored coppice in Central Italy. *Annals of Forest Science*, 67
- Diallo, O., Diouf, A., Hanan, N.P., Ndiaye, A., & Prevost, Y. (1991). AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1259-1279
- Diaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X., & Terradas, J. (2002). Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology*, 83, 2293-2303
- Dobrowski, S.Z., Pushnik, J.C., Zarco-Tejada, P.J., & Ustin, S.L. (2005). Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*, 97, 403-414
- Drolet, G.G., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Middleton, E.M., Black, T.A., Barr, A.G., & Margolis, H.A. (2005). A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. *Remote Sensing of Environment*, 98, 212-224
- Drolet, G.G., Middleton, E.M., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Amiro, B.D., Barr, A.G., Black, T.A., McCaughey, J.H., & Margolis, H.A. (2008). Regional mapping of gross light-use efficiency using MODIS spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3064-3078

- Dutton, E. (1994). *Aerosol optical depth measurements from four NOAA/CMDL monitoring sites*. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center
- Elvidge, C.D., & Chen, Z.K. (1995). Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and near-Infrared Vegetation Indexes. *Remote Sensing of Environment*, 54, 38-48
- Esteban, R., Olano, J.M., Castresana, J., Fernandez-Marín, B., Hernandez, A., Becerril, J.M., & García-Plazaola, J.I. (2009). Distribution and evolutionary trends of photoprotective isoprenoids (xanthophylls and tocopherols) within the plant kingdom. *Physiologia Plantarum*, 135, 379-389
- Evain, S., Flexas, J., & Moya, I. (2004). A new instrument for passive remote sensing: 2. Measurement of leaf and canopy reflectance changes at 531 nm and their relationship with photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 91, 175-185
- Evans, J.R. (1989). Photosynthesis and Nitrogen Relationships in Leaves of C-3 Plants. *Oecologia*, 78, 9-19
- Falge, E., Baldocchi, D., Tenhunen, J., Aubinet, M., Bakwin, P., Berbigier, P., Bernhofer, C., Burba, G., Clement, R., Davis, K.J., Elbers, J.A., Goldstein, A.H., Grelle, A., Granier, A., Gumundsson, J., Hollinger, D., Kowalski, A.S., Katul, G., Law, B.E., Malhi, Y., Meyers, T., Monson, R.K., Munger, J.W., Oechel, W., Paw U, K.T., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Valentini, R., Wilson, K., & Wofsy, S. (2002). Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 53-74
- Fan, S., Gloor, M., Mahlman, J., Pacala, S., Sarmiento, J., Takahashi, T., & Tans, P. (1998). A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 282, 442-446
- Fang, H., & Liang, S. (2005). A hybrid inversion method for mapping leaf area index from MODIS data: Experiments and application to broadleaf and needleleaf canopies. *Remote Sensing of Environment*, 94, 405-424
- Fassnacht, K.S., Gower, S.T., MacKenzie, M.D., Nordheim, E.V., & Lillesand, T.M. (1997). Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin forests using the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 61, 229-245
- Fensholt, R. (2004). Earth observation of vegetation status in the Sahelian and Sudanian West Africa: comparison of terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 1641-1659
- Fensholt, R., Nielsen, T.T., & Stisen, S. (2006a). Evaluation of AVHRR PAL and GIMMS 10-day composite NDVI time series products using SPOT-4 vegetation data for the African continent. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 2719-2733
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T.T., & Mbow, C. (2009). Evaluation of earth observation based long term vegetation trends - Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1886-1898
- Fensholt, R., & Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87, 111-121
- Fensholt, R., Sandholt, I., & Rasmussen, M.S. (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
- Fensholt, R., Sandholt, I., & Stisen, S. (2006b). Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION - Vegetation indices using in situ measurements in a semiarid environment. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1774-1786
- Fereres, E., & Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58, 147-159
- Ferreira, F. (2000) The cork oak condition in Portugal. In Oszako, T., & Delatour, C. (Eds.), *Recent advances on oak health in Europe*. Warsaw: Forest Research Institute
- Field, C.B. (1991). Ecological scaling of carbon gain to stress and resource availability. In Mooney, H.A., Winner, S.E., & Pell, E.J. (Eds.), *Integrated Responses of Plants to Stress* (pp. 35-65). San Diego, CA: Academic Press
- Field, C.B., Gamon, J.A., & Penuelas, J. (1994). Remote sensing of photosynthesis. In Schulze, E.D., & Caldwell, M.M. (Eds.), *Ecophysiology of photosynthesis* (pp. 511-527). New York: Springer
- Field, C.B., & Mooney, H.A. (1986). The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. In: Givnish, T. (Ed.), *On the Economy of Plant Form and Function* (pp. 22-55). Cambridge: Cambridge Univ. Press
- Filella, I., Amaro, T., Araus, J.L., & Penuelas, J. (1996). Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index (PRI). *Physiologia Plantarum*, 96, 211-216
- Filella, I., & Penuelas, J. (1994). The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plant Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1459-1470

- Fischer, W.A., Hemphill, W.R., & Kover, A. (1976). Progress in remote sensing (1972-1976). *Photogrammetria*, 32, 33-72
- Fitter, A.H., & Fitter, R.S.R. (2002). Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 296, 1689-1691
- Flexas, J., Bota, J., Cifre, J., Escalona, J.M., Galmes, J., Gulías, J., Lefi, E.K., Martínez-Canellas, S.F., Moreno, M.T., Ribas-Carbo, M., Riera, D., Sampol, B., & Medrano, H. (2004). Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: Future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Annals of Applied Biology*, 144, 273-283
- Flexas, J., Bota, J., Galmes, J., Medrano, H., & Ribas-Carbo, M. (2006). Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. *Physiologia Plantarum*, 127, 343-352
- Fotelli, M.N., Radoglou, K.M., & Constantinidou, H.I.A. (2000). Water stress responses of seedlings of four Mediterranean oak species. *Tree Physiology*, 20, 1065-1075
- Franklin, S.E., & Wulder, M.A. (2002). Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas. *Progress in Physical Geography*, 26, 173-205
- Friedl, M.A., Michaelsen, J., Davis, F.W., Walker, H., & Schimel, D.S. (1994). Estimating Grassland Biomass and Leaf-Area Index Using Ground and Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1401-1420
- Friedlingstein, P., Fung, I., Holland, E., John, J., Brasseur, G., Erickson, D., & Schimel, D. (1995). On the Contribution of Co₂ Fertilization to the Missing Biospheric Sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 541-556
- Frouin, R., & Pinker, R.T. (1995). Estimating Photosynthetically Active Radiation (Par) at the Earth's Surface from Satellite-Observations. *Remote Sensing of Environment*, 51, 98-107
- Fuentes, D.A., Gamon, J.A., Qiu, H.L., Sims, D.A., & Roberts, D.A. (2001). Mapping Canadian boreal forest vegetation using pigment and water absorption features derived from the AVIRIS sensor. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106, 33565-33577
- Fyllas, N.M., Phillips, O.L., Kunin, W.E., Matsinos, Y.G., & Troumbis, A.I. (2007). Development and parameterization of a general forest gap dynamics simulator for the North-eastern Mediterranean Basin (GREEK FOREST SPECIES). *Ecological Modelling*, 204, 439-456
- Fyllas, N.M., & Troumbis, A.Y. (2009). Simulating vegetation shifts in north-eastern Mediterranean mountain forests under climatic change scenarios. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 64-77
- Galle, A., Haldimann, P., & Feller, U. (2007). Photosynthetic performance and water relations in young pubescent oak (*Quercus pubescens*) trees during drought stress and recovery. *New Phytologist*, 174, 799-810
- Galmes, J., Abadia, A., Cifre, J., Medrano, H., & Flexas, J. (2007). Photoprotection processes under water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms and leaf habits. *Physiologia Plantarum*, 130, 495-510
- Galvao, L.S., Roberts, D.A., Formaggio, A.R., Numata, I., & Breunig, F.M. (2009). View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 846-856
- Galvao, L.S., Vitorello, I., & Pizarro, M.A. (2000). An adequate band positioning to enhance NDVI contrasts among green vegetation, senescent biomass, and tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1953-1960
- Gamon, J.A., Field, C.B., Bilger, W., Bjorkman, O., Fredeen, A.L., & Penuelas, J. (1990). Remote-Sensing of the Xanthophyll Cycle and Chlorophyll Fluorescence in Sunflower Leaves and Canopies. *Oecologia*, 85, 1-7
- Gamon, J.A., Field, C.B., Fredeen, A.L., & Thayer, S. (2001). Assessing photosynthetic downregulation in sunflower stands with an optically-based model. *Photosynthesis Research*, 67, 113-125
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Penuelas, J., & Valentini, R. (1995). Relationships between N_{dvi}, Canopy Structure, and Photosynthesis in 3 Californian Vegetation Types. *Ecological Applications*, 5, 28-41
- Gamon, J.A., Field, C.B., Roberts, D.A., Ustin, S.L., & Valentini, R. (1993a). Functional Patterns in an Annual Grassland during an Aviris Overflight. *Remote Sensing of Environment*, 44, 239-253
- Gamon, J.A., Filella, I., & Penuelas, J. (1993b). The dynamic 531-nanometer Δ reflectance signal: A survey of twenty angiosperm species. *Photosynthetic Responses to the Environment*, 172-177
- Gamon, J.A., Kitajima, K., Mulkey, S.S., Serrano, L., & Wright, S.J. (2005). Diverse optical and photosynthetic properties in a neotropical dry forest during the dry season: Implications for remote estimation of photosynthesis. *Biotropica*, 37, 547-560

- Gamon, J.A., Lee, L.F., Qiu, H.L., Davis, S., Roberts, D.A., & Ustin, S.L. (1998). A multi-scale sampling strategy for detecting physiologically significant signals in AVIRIS imagery. *Summaries of the 7th Annual JPL Earth Science Workshop, 1*, 111-120
- Gamon, J.A., Penuelas, J., & Field, C.B. (1992). A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44
- Gamon, J.A., & Qiu, H.L. (1999). Ecological applications of remote sensing at multiple scales. In Pugnaire, F.I., & Valladares, F. (Eds.), *Handbook of Functional Plant Ecology* (pp. 805-846). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Gamon, J.A., Serrano, L., & Surfus, J.S. (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, 492-501
- Gamon, J.A., & Surfus, J.S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143, 105-117
- Gandia, S., Fernandez, G., Garcia, J.C., & Moreno, J. (2004). Retrieval of vegetation biophysical variables from CHRIS/PROBA data in the SPARC campaign. *ESA SP*, vol. 578, 40-48
- Gao, B.C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266
- Gao, F., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Jin, Y., & Li, X. (2003). Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 86, 198-205
- Garbulsky, M.F., Penuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., & Filella, I. (2011). The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115, 281-297
- Garbulsky, M.F., Penuelas, J., Papale, D., & Filella, I. (2008). Remote estimation of carbon dioxide uptake by a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 14, 2860-2867
- Garner, D., Crisosto, C.H., Wiley, P., & Crisosto, G.M. (2008). Measurement of pH and Titratable Acidity. *Central Valley Postharvest Newsletter*, 17, 2
- Gasque, M., Granero, B., Turegano, J.V., & Gonzaez-Altozano, P. (2010). Regulated deficit irrigation effects on yield, fruit quality and vegetative growth of 'Navelina' citrus trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8, S40-S51
- Gates, D.M. (1993). *Climate change and its biological consequences*. Sunderland, Mass.: Sinauer Associates
- Ginestar, C., & Castel, J.R. (1996). Responses of young clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *Journal of Horticultural Science*, 71, 551-559
- Girona, J. (2002). Regulated deficit irrigation in peach: a global analysis. *Acta Hort.*, 592, 335-342
- Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Alegre, S., Rufat, J., & Marsal, J. (2003). Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128, 432-440
- Gitelson, A.A., Buschmann, C., & Lichtenthaler, H.K. (1998). Leaf chlorophyll fluorescence corrected for re-absorption by means of absorption and reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology*, 152, 283-296
- Gitelson, A.A., Buschmann, C., & Lichtenthaler, H.K. (1999). The chlorophyll fluorescence ratio F-735/F-700 as an accurate measure of the chlorophyll content in plants. *Remote Sensing of Environment*, 69, 296-302
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., & Merzlyak, M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58, 289-298
- Gitelson, A.A., & Merzlyak, M.N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 22, 247-252
- Gitelson, A.A., & Merzlyak, M.N. (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148, 494-500
- Gitelson, A.A., & Merzlyak, M.N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2691-2697
- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., & Chivkunova, O.B. (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 74, 38-45
- Gitelson, A.A., Vina, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., & Arkebauer, T.J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32
- Gitelson, A.A., Zur, Y., Chivkunova, O.B., & Merzlyak, M.N. (2002). Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 75, 272-281

- Gobron, N., Pinty, B., & Verstraete, M.M. (1997). Theoretical limits to the estimation of the Leaf Area Index on the basis of visible and near-infrared remote sensing data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1438-1445
- Goel, N. S. (1989). Inversion of Canopy Reflectance Models for Estimation of Biophysical Parameters from Reflectance Data. In Asrar, G. (Ed.), *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (pp. 205–250). New York: Wiley
- Goel, N.S., & Grier, T. (1988). Estimation of Canopy Parameters for Inhomogeneous Vegetation Canopies from Reflectance Data .3. Trim - a Model for Radiative-Transfer in Heterogeneous 3-Dimensional Canopies. *Remote Sensing of Environment*, 25, 255-293
- Goerner, A., Reichstein, M., & Rambal, S. (2009). Tracking seasonal drought effects on ecosystem light use efficiency with satellite-based PRI in a Mediterranean forest. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1101-1111
- Goetz, S.J. (1997). Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 71-94
- Goetz, S.J., Prince, S.D., Goward, S.N., Thawley, M.M., Small, J., & Johnston, A. (1999). Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing: Application to the BOREAS region. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 104, 27719-27734
- Goldhamer, D.A., & Fereres, E. (2001). Simplified tree water status measurements can aid almond irrigation. *California Agriculture*, 55, 32–37
- Gomez-Chova, L., Alonso, L., Guanter, L., Camps-Valls, G., Calpe, J., & Moreno, J. (2008). Correction of systematic spatial noise in push-broom hyperspectral sensors: application to CHRIS/PROBA images. *Applied Optics*, 47, F46-F60
- Goncalves, J. (1991). Fitocenoses espontâneas dos sobreirais alentejanos: factores ambientais e dinâmica da vegetação associada a condições de mortalidade das árvores. Relatório Final do Curso de Eng. Silvicultor. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa
- Gonzalez-Altozano, P., & Castel, J.R. (1999). Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 74, 706-713
- Gonzalez-Altozano, P., & Castel, J.R. (2000). Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. II: Vegetative growth. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 75, 388-392
- Goodale, C.L., Apps, M.J., Birdsey, R.A., Field, C.B., Heath, L.S., Houghton, R.A., Jenkins, J.C., Kohlmaier, G.H., Kurz, W., Liu, S., Nabuurs, G.J., Nilsson, S., & Shvidenko, A.Z. (2002). Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*, 12, 891-899
- Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.M., Daube, B.C., & Wofsy, S.C. (1996). Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability. *Science*, 271, 1576-1578
- Govaerts, Y.M., Verstraete, M.M., Pinty, B., & Gobron, N. (1999). Designing optimal spectral indices: a feasibility and proof of concept study. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1853-1873
- Goward, S.N., & Huemmrich, K.F. (1992). Vegetation Canopy Par Absorptance and the Normalized Difference Vegetation Index - an Assessment Using the Sail Model. *Remote Sensing of Environment*, 39, 119-140
- Goward, S.N., Tucker, C.J., & Dye, D.G. (1985). North-American Vegetation Patterns Observed with the Noaa-7 Advanced Very High-Resolution Radiometer. *Vegetatio*, 64, 3-14
- Grace, J., Nichol, C., Disney, M., Lewis, P., Quaife, T., & Bowyer, P. (2007). Can we measure terrestrial photosynthesis from space directly, using spectral reflectance and fluorescence? *Global Change Biology*, 13, 1484-1497
- Grammatikopoulos, G. (1999). Mechanisms for drought tolerance in two Mediterranean seasonal dimorphic shrubs. *Functional Plant Biology*, 26, 587-593
- Grant, L. (1987). Diffuse and Specular Characteristics of Leaf Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22, 309-322
- Greuter, W., Burdet, H., & Long, G. (1986). *Med-Checklist, Conservatoire et Jardin Botaniques Vol. 3*. Ville de Geneve
- Groisman, P.Y., Karl, T.R., & Knight, R.W. (1994). Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures. *Science*, 263, 198-200
- Grossman, Y.L., Ustin, S.L., Jacquemoud, S., Sanderson, E.W., Schmuck, G., & Verdebout, J. (1996). Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 56, 182-193
- Guanter, L., Richter, R., & Moreno, J. (2006). Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features. *Applied Optics*, 45, 2360-2370
- Gueymard, C.A. (2005). SMARTS code, version 2.9.5 user's Manual solar consulting services. Online PDF document from <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/>

- Guillen-Climent, M.L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., North, P.R.J., & Villalobos, F.J. (2012). Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV. *Precision Agriculture*, 1-28
- Gutman, G.G. (1991). Vegetation Indexes from Avhrr - an Update and Future-Prospects. *Remote Sensing of Environment*, 35, 121-136
- Guyot, G., Baret, F., & Major, D.J. (1988). High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and near infrared. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 27, 750-760
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., & Strachan, I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81, 416-426
- Hall, F.G., Botkin, D.B., Strebel, D.E., Woods, K.D., & Goetz, S.J. (1991). Large-Scale Patterns of Forest Succession as Determined by Remote-Sensing. *Ecology*, 72, 628-640
- Hall, F.G., Hilker, T., Coops, N.C., Lyapustin, A., Huemmrich, K.F., Middleton, E., Margolis, H., Drolet, G., & Black, T.A. (2008). Multi-angle remote sensing of forest light use efficiency by observing PRI variation with canopy shadow fraction. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3201-3211
- Hall, F.G., Townshend, J.R., & Engman, E.T. (1995). Status of Remote-Sensing Algorithms for Estimation of Land-Surface State Parameters. *Remote Sensing of Environment*, 51, 138-156
- Hansen, J., Ruedy, R., Glascoe, J., & Sato, M. (1999). GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 104, 30997-31022
- Hansen, P.M., & Schjoerring, J.K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86, 542-553
- Hapke, B., DiMucci, D., Nelson, R., & Smythe, W. (1996). The cause of the hot spot in vegetation canopies and soils: Shadow-hiding versus coherent backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 58, 63-68
- Hardisky, M.A., Klemas, V., & Smart, R.M. (1983). The Influence of Soil-Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Radiance of Spartina-Alterniflora Canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77-83
- Heimann, M., & Keeling, C.D. (1989). A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 2. Model description and simulated tracer experiments. In Peterson, D.H. (Ed.), *Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas* (pp. 237-275). Washington, D.C.: American Geophysical Union
- Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., Kimball, J.S., Nemani, R.R., & Davis, K.J. (2005). Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using tower eddy flux network observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*
- Heinsch, F.A., Zhao, M.S., Running, S.W., Kimball, J.S., Nemani, R.R., Davis, K.J., Bolstad, P.V., Cook, B.D., Desai, A.R., Ricciuto, D.M., Law, B.E., Oechel, W.C., Kwon, H., Luo, H.Y., Wofsy, S.C., Dunn, A.L., Munger, J.W., Baldocchi, D.D., Xu, L.K., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Stoy, P.C., Siqueira, M.B.S., Monson, R.K., Burns, S.P., & Flanagan, L.B. (2006). Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1908-1925
- Hernandez-Clemente, R., Navarro-Cerrillo, R.M., Suarez, L., Morales, F., & Zarco-Tejada, P.J. (2011). Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2360-2375
- Hicke, J.A., Asner, G.P., Randerson, J.T., Tucker, C., Los, S., Birdsey, R., Jenkins, J.C., Field, C., & Holland, E. (2002). Satellite-derived increases in net primary productivity across North America, 1982-1998. *Geophysical Research Letters*, 29
- Hilker, T., Coops, N.C., Hall, F.G., Black, T.A., Wulder, M.A., Nesic, Z., & Krishnan, P. (2008). Separating physiologically and directionally induced changes in PRI using BRDF models. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2777-2788
- Hilker, T., Lyapustin, A., Hall, F.G., Wang, Y.J., Coops, N.C., Drolet, G., & Black, T.A. (2009). An assessment of photosynthetic light use efficiency from space: Modeling the atmospheric and directional impacts on PRI reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2463-2475
- Holben, B.N. (1986). Characteristics of Maximum-Value Composite Images from Temporal Avhrr Data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417-1434

- Holben, B.N., Kaufman, Y.J., & Kendall, J.D. (1990). Noaa-11 Avhrr Visible and near-Ir Inflight Calibration. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1511-1519
- Holben, B.N., Schutt, J.B., & McMurtrey, J. (1983). Leaf Water-Stress Detection Utilizing Thematic Mapper Band-3, Band-4 and Band-5 in Soybean Plants. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 289-297
- Horler, D.N.H., Dockray, M., & Barber, J. (1983). The Red Edge of Plant Leaf Reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 273-288
- Houborg, R., Soegaard, H., & Boegh, E. (2007). Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 106, 39-58
- Houghton, R.A., Hackler, J.L., & Lawrence, K.T. (1999). The US carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 285, 574-578
- Howell, T.A., Hatfield, J.L., Rhoades, J.D., & Meron, M. (1984). Response of Cotton Water-Stress Indicators to Soil-Salinity. *Irrigation Science*, 5, 25-36
- Huber, S., Kneubuehler, M., Koetz, B., Schopfer, J.T., Zimmermann, N.E., & Itten, K.I. (2007). The potential of spectrodirectional chris/proba data for biochemistry estimation. *ESA SP*, vol. 636, 6
- Huemmerich, K.F., & Goward, S.N. (1997). Vegetation canopy PAR absorptance and NDVI: An assessment for ten tree species with the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 61, 254-269
- Huete, A.R. (1987). Soil-Dependent Spectral Response in a Developing Plant Canopy. *Agronomy Journal*, 79, 61-68
- Huete, A.R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (Savi). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213
- Huete, A.R., Didan, K., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, S.R., Hutyrá, L.R., Yang, W.Z., Nemani, R.R., & Myneni, R. (2006). Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33
- Huete, A.R., Hua, G., Qi, J., Chehbouni, A., & Vanleeuwen, W.J.D. (1992). Normalization of Multidirectional Red and Nir Reflectances with the Savi. *Remote Sensing of Environment*, 41, 143-154
- Huete, A.R., & Jackson, R.D. (1988). Soil and Atmosphere Influences on the Spectra of Partial Canopies. *Remote Sensing of Environment*, 25, 89-105
- Huete, A.R., Jackson, R.D., & Post, D.F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 17, 37-53
- Huete, A.R., Justice, C., & Leeuwen, W.V. (1996). *MODIS Vegetation index (MOD 13), EOS MODIS Algorithm - Theoretical Basis Document*. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center
- Huete, A.R., Justice, C., & Leeuwen, W.V. (1999). *MODIS Vegetation Index, Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 3*. Tuscon: University of Arizona
- Huete, A.R., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of Vegetation and Soil Indexes for Modis-Eos. *Remote Sensing of Environment*, 49, 224-234
- Huete, A.R., Kim, H.J., Miura, T. (2005). Scaling dependencies and uncertainties in vegetation index - Biophysical retrievals in heterogeneous environments. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 5029-50327), art. no. 1526808
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., & vanLeeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440-451
- Hurt, G.C., Rosentrater, L., Frolking, S., & Moore III, B. (2001). Linking remote-sensing estimates of land cover and census statistics on land use to produce maps of land use of the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 673-685
- Ichii, K., Kawabata, A., & Yamaguchi, Y. (2002). Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3873-3878
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter Jr, P.J., Reginato, R.J., & Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55
- Idso, S.B., Jackson, R.D., & Reginato, R.J. (1978). Extending the 'degree-day' concept of plant phenological development to include water stress effects. *Ecology*, 59, 431-433
- Inoue, Y., Penuelas, J., Miyata, A., & Mano, M. (2008). Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO2 flux measurements in rice. *Remote Sensing of Environment*, 112, 156-172
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001) Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. In McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A. et al. (Eds.), *Contribution of working group II to the third assessment report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press

- Jackson, R.D. (1986). Remote-Sensing of Biotic and Abiotic Plant Stress. *Annual Review of Phytopathology*, 24, 265-287
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., & Ehrler, W.L. (1977). Crop temperature reveals stress. *Crop Soils*, 29, 10-13
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., & Pinter Jr, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, 1133-1138
- Jackson, R.D., & Pinter Jr, P.J. (1981). Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. *Signatures spectrales d'objets en teledetection. Colloque ISPRS, Avignon, 1981*, 399-406
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilve, H., & Frangi, J.P. (2000). Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and inverse mode. *Remote Sensing of Environment*, 74, 471-481
- Jacquemoud, S., Baret, F., Andrieu, B., Danson, F.M., & Jaggard, K. (1995). Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing of Environment*, 52, 163-172
- Jacquemoud, S., Ustin, S.L., Verdebout, J., Schmuck, G., Andreoli, G., & Hosgood, B. (1996). Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, 56, 194-202
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., Francois, C., & Ustin, S.L. (2009). PROSPECT plus SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, S56-S66
- James, M.E., & Kalluri, S.N.V. (1994). The Pathfinder Avhrr Land Data Set - an Improved Coarse Resolution Data Set for Terrestrial Monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3347-3363
- Janzen, H.H. (2004). Carbon cycling in earth systems - A soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 399-417
- Jensen, J.R. (1996). *Introductory digital image processing : a remote sensing perspective*. (2nd ed.). Upper Saddle River: Prentice-Hall
- Johnson, L.F., Bosch, D.F., Williams, D.C., & Lobitz, B.M. (2001). Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Applied Engineering in Agriculture*, 17, 557-560
- Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R., & Bosch, D.F. (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38, 33-44
- Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate : a quantitative approach to environmental plant physiology*. (2nd ed. ed.). Cambridge University Press
- Jordan, C.F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666
- Jump, A.S., Hunt, J.M., & Peñuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12, 2163-2174
- June, T., Evans, J.R., & Farquhar, G.D. (2004). A simple new equation for the reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport: a study on soybean leaf. *Functional Plant Biology*, 31, 275-283
- Justice, C.O., Eck, T.F., Tanre, D., & Holben, B.N. (1991). The Effect of Water-Vapor on the Normalized Difference Vegetation Index Derived for the Sahelian Region from NOAA AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1165-1187
- Justice, C.O., Vermote, E., Townshend, J.R.G., Defries, R., Roy, D.P., Hall, D.K., Salomonson, V.V., Privette, J.L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Running, S.W., Nemani, R.R., Wan, Z.M., Huete, A.R., van Leeuwen, W., Wolfe, R.E., Giglio, L., Muller, J.P., Lewis, P., & Barnsley, M.J. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1228-1249
- Karnieli, A., Kaufman, Y.J., Remer, L., & Wald, A. (2001). AFRI - aerosol free vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 77, 10-21
- Kaufman, Y.J. (1984). Atmospheric Effects on Remote-Sensing of Surface Reflectance. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 475, 20-33
- Kaufman, Y.J. (1989). The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In Asrar, G. (Ed.), *Theory and applications of optical remote sensing* (pp. 336-428). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Kaufman, Y.J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically Resistant Vegetation Index (Arvi) for Eos-Modis. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 261-270
- Kawabata, A., Ichii, K., & Yamaguchi, Y. (2001). Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 1377-1382

- Keeling, C.D., Chin, J.F.S., & Whorf, T.P. (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 382, 146-148
- Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen, M., & Van Der Plicht, J. (1995). Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666-670
- Kerle, N., Janssen, L.L.F., & Huurneman, G.C. (2004). *Principles of Remote Sensing*. (3rd ed.). Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation
- Kim, M.S., Daughtry, C.S.T., Chappelle, E.W., McMurtrey, J.E. III, & Walthall, C.L. (1994). The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR). *6th symposium on physical measurements and signatures in remote sensing*, Val D'Isere, France
- Kimes, D.S. (1983). Dynamics of Directional Reflectance Factor Distributions for Vegetation Canopies. *Applied Optics*, 22, 1364-1372
- Kimes, D.S., Newcomb, W.W., Schutt, J.B., Pinter, P.J., & Jackson, R.D. (1984). Directional Reflectance Factor Distributions of a Cotton Row Crop. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 263-277
- Kimes, D.S., Newcomb, W.W., Tucker, C.J., Zonneveld, I.S., Vanwijngaarden, W., Deleeuw, J., & Epema, G.F. (1985). Directional Reflectance Factor Distributions for Cover Types of Northern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 18, 1-19
- Kirschbaum, M.U.F. (1987). Water stress in Eucalyptus pauciflora: comparison of effects on stomatal conductance with effects on the mesophyll capacity for photosynthesis, and investigation of a possible involvement of photoinhibition. *Planta*, 171, 466-473
- Kirschbaum, M.U.F. (2000). Forest growth and species distribution in a changing climate. *Tree Physiology*, 20, 309-322
- Knipling, E.B. (1969). Leaf reflectance and image formation on color infrared film. In Johnson, P.L. (Ed.), *Remote Sensing in Ecology*. Athens, GA: University of Georgia Press
- Knipling, E.B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1, 155-159
- Knutson, T.R., Delworth, T.L., Dixon, K.W., & Stouffer, R.J. (1999). Model assessment of regional surface temperature trends (1949-1997). *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 104, 30981-30996
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J.V., Diner, D.J., Myneni, R.B., Verstraete, M., Pinty, B., & Gobron, N. (1998a). Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 103, 32239-32256
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J.V., Myneni, R.B., Diner, D.J., & Running, S.W. (1998b). Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 103, 32257-32275
- Kriston-Vizi, J., Umeda, M., & Miyamoto, K. (2008). Assessment of the water status of mandarin and peach canopies using visible multispectral imagery. *Biosystems Engineering*, 100, 338-345
- Kumar, M., & Monteith, J.L. (1981). Remote sensing of crop growth. In Smith, H. (Ed.), *Plants and the Daylight Spectrum* (pp. 133-144). London: Academic Press
- Kyparissis, A., Drilias, P., & Manetas, Y. (2000). Seasonal fluctuations in photoprotective (xanthophyll cycle) and photosynthetic (chlorophylls) capacity in eight Mediterranean plant species belonging to two different growth forms. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27, 265-272
- Kyparissis, A., & Manetas, Y. (1993). Seasonal Leaf Dimorphism in a Semi-Deciduous Mediterranean Shrub - Ecophysiological Comparisons between Winter and Summer Leaves. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 14, 23-32
- Kyparissis, A., Markos, N., Stagakis, S., Levizou, E., Sykioti, O. (2007). Ecosystem productivity and dynamics issued from multispectral and hyperspectral satellite imagery. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 6742, art. no. 67420I
- Kyparissis, A., Petropoulou, Y., & Manetas, Y. (1995). Summer survival of leaves in a soft-leaved shrub (*Phlomis fruticosa* L., Labiatae) under Mediterranean field conditions: Avoidance of photoinhibitory damage through decreased chlorophyll contents. *Journal of Experimental Botany*, 46, 1825-1831
- Lamb, D.W., Weedon, M.M., & Bramley, R.G.V. (2004). Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10, 46-54
- Landsberg, J.J., Prince, S.D., Jarvis, P.G., McMurtrie, R.E., Luxmoore, R., & Medlyn, B.E. (1996). Energy conversion and use in forests: an analysis of forest production in terms of radiation utilisation efficiency. In Gholz, H.L., Nakane, K., & Shimoda, H. (Eds.), *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity* (pp 273-298). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers

- Lavorel, S., Rochette, C., & Lebreton, J.D. (1999). Functional groups for response to disturbance in Mediterranean old fields. *Oikos*, 84, 480-498
- Law, B.E., & Waring, R.H. (1994). Remote-Sensing of Leaf-Area Index and Radiation Intercepted by Understory Vegetation. *Ecological Applications*, 4, 272-279
- le Maire, G., Francois, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailler, J.Y., Breda, N., Genet, H., Davi, H., & Dufrene, E. (2008). Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3846-3864
- Lebourgeois, F., Cousseau, G., & Ducos, Y. (2004). Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Berce ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of Forest Science*, 61, 361-372
- Leinonen, I., & Jones, H.G. (2004). Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1423-1431
- Leuning, R., Cleugh, H.A., Zegelin, S.J., & Hughes, D. (2005). Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 151-173
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and Carotenoids - Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382
- Lichtenthaler, H.K. (1998). The stress concept in plants: An introduction. *Stress of Life*, 851, 187-198
- Lichtenthaler, H.K., Lang, M., Sowinska, M., Heisel, F., & Mische, J.A. (1996). Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *Journal of Plant Physiology*, 148, 599-612
- Lichtenthaler, H.K., & Wellburn, A.R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591-592
- Lillesaeter, O. (1982). Spectral Reflectance of Partly Transmitting Leaves - Laboratory Measurements and Mathematical-Modeling. *Remote Sensing of Environment*, 12, 247-254
- Lillesand, T.M., & Kiefer, R.W. (1987). *Remote Sensing and Image Interpretation*. (2nd ed.). New York: Wiley
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman Jonathan, W. (2004). *Remote sensing and image interpretation*. (5th ed.). New York: John Wiley & Sons
- Lilleskov, E.A., Bruns, T.D., Dawson, T.E., & Camacho, F.J. (2009). Water sources and controls on water-loss rates of epigeous ectomycorrhizal fungal sporocarps during summer drought. *New Phytologist*, 182, 483-494
- Linares, J.C., Delgado-Huertas, A., Camarero, J.J., Merino, J., & Carreira, J.A. (2009). Competition and drought limit the response of water-use efficiency to rising atmospheric carbon dioxide in the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Oecologia*, 161, 611-624
- Lintz, J. & Simonett, D.S. (1976). *Remote sensing of environment*. Reading, MA: Addison-Wesley
- Liu, H.Q., & Huete, A. (1995). A Feedback Based Modification of the Ndvi to Minimize Canopy Background and Atmospheric Noise. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 457-465
- Lloret, F., & Siscart, D. (1995). Los efectos demograficos de la sequia en poblaciones de encina. *Cuadernos de la Sociedad Espanola de Ciencias Forestales*, 2, 77-81
- Los, S.O. (1998). Estimation of the ratio of sensor degradation between NOAA AVHRR channels 1 and 2 from monthly NDVI composites. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 206-213
- Lucht, W., Prentice, I.C., Myneni, R.B., Sitch, S., Friedlingstein, P., Cramer, W., Bousquet, P., Buermann, W., & Smith, B. (2002). Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 296, 1687-1689
- Lynch, D.K., & Livingston, W.C. (1995). *Color and light in nature*. New York: Cambridge University Press
- Major, D.J., Baret, F., & Guyot, G. (1990). A Ratio Vegetation Index Adjusted for Soil Brightness. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 727-740
- Malingreau, J.P., Tucker, C.J., & Laporte, N. (1989). Avhrr for Monitoring Global Tropical Deforestation. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 855-867
- Manes, F., Vitale, M., Donato, E., Giannini, M., & Puppi, G. (2006). Different ability of three Mediterranean oak species to tolerate progressive water stress. *Photosynthetica*, 44, 387-393
- Markos, N., & Kyparissis, A. (2011). Ecophysiological modelling of leaf level photosynthetic performance for three Mediterranean species with different growth forms. *Functional Plant Biology*, 38, 314-326
- Marsal, J., & Girona, J. (1997). Relationship between leaf water potential and gas exchange activity at different phenological stages and fruit loads in peach trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122, 415-421

- Martel, M.C., Margolis, H.A., Coursolle, C., Bigras, F.J., Heinsch, F.A., & Running, S.W. (2005). Decreasing photosynthesis at different spatial scales during the late growing season on a boreal cutover. *Tree Physiology*, 25, 689-699
- Martin, R.E., Asner, G.P., & Sack, L. (2007). Genetic variation in leaf pigment, optical and photosynthetic function among diverse phenotypes of *Metrosideros polymorpha* grown in a common garden. *Oecologia*, 151, 387-400
- Matsubara, S., Krause, G.H., Seltsmann, M., Virgo, A., Kursar, T.A., Jahns, P., & Winter, K. (2008). Lutein epoxide cycle, light harvesting and photoprotection in species of the tropical tree genus *Inga*. *Plant, Cell and Environment*, 31, 548-561
- McCloy, K.R. (1995). *Resource management information systems : process and practice*. London: Taylor & Francis
- Meroni, M., Rossini, M., Guanter, L., Alonso, L., Rascher, U., Colombo, R., & Moreno, J. (2009). Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2037-2051
- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., & Rakitin, V.Y. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106, 135-141
- Mills, T.M., Behboudian, M.H., Tan, P.Y., & Clothier, B.E. (1994). Plant Water Status and Fruit-Quality in Braeburn Apples. *Hortscience*, 29, 1274-1278
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., & Cohen, S. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 58, 827-838
- Monsi, M., & Saeki, T. (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14, 22-52
- Monteith, J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 9, 747-766
- Monteith, J.L. (1977). Climate and Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 281, 277-294
- Montero, G., Torres, E., & Canellas, I. (1994). Regeneración de alcornoques. Síntesis bibliográfica. *Ecologia*, 8, 271-283
- Mosca, E., Montecchio, L., Sella, L., & Garbaye, J. (2007). Short-term effect of removing tree competition on the ectomycorrhizal status of a declining pedunculate oak forest (*Quercus robur* L.). *Forest Ecology and Management*, 244, 129-140
- Mougheith, M.J., El-Ashram, M., Amerhom, G., & Madbouly, W. (1977). Effect of different rates of irrigation on Navel orange trees. II. Yield and fruit quality. *Annual of Agricultural Science of Moshtohor*, 8, 119-127
- Mu, Q.Z., Zhao, M.S., Heinsch, F.A., Liu, M.L., Tian, H.Q., & Running, S.W. (2007). Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 112
- Munden, R., Curran, P.J., & Catt, J.A. (1994). The relationship between red edge and chlorophyll concentration the Broadbalk winter wheat experiment at Rothamsted. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 705-709
- Munne-Bosch, S., & Alegre, L. (2000). Changes in carotenoids, tocopherols and diterpenes during drought and recovery, and the biological significance of chlorophyll loss in *Rosmarinus officinalis* plants. *Planta*, 210, 925-931
- Myers, B.J. (1988). Water-Stress Integral - a Link between Short-Term Stress and Long-Term Growth. *Tree Physiology*, 4, 315-323
- Myers, N., Mittermeyer, R.A., Mittermeyer, C.G., Da Fonseca, G.A.B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858
- Myneni, R.B., Dong, J., Tucker, C.J., Kaufmann, R.K., Kauppi, P.E., Liski, J., Zhou, L., Alexeyev, V., & Hughes, M.K. (2001). A large carbon sink in the woody biomass of northern forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 14784-14789
- Myneni, R.B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G.R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J.T., Votava, P., Nemani, R.R., & Running, S.W. (2002). Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 214-231
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., & Nemani, R.R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386, 698-702
- Myneni, R.B., Los, S.O., & Asrar, G. (1995). Potential Gross Primary Productivity of Terrestrial Vegetation from 1982-1990. *Geophysical Research Letters*, 22, 2617-2620

- Μποζαμπαλίδης, Α.Μ. (1993). *Βοτανική: Μορφολογία & Ανατομία Φυτών*. Θεσσαλονίκη: ART of TEXT
- Nakaji, T., Ide, R., Takagi, K., Kosugi, Y., Ohkubo, S., Nasahara, K.N., Saigusa, N., & Oguma, H. (2008). Utility of spectral vegetation indices for estimation of light conversion efficiency in coniferous forests in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 776-787
- Nemani, R., White, M., Thornton, P., Nishida, K., Reddy, S., Jenkins, J., & Running, S. (2002). Recent trends in hydrologic balance have enhanced the terrestrial carbon sink in the United States. *Geophysical Research Letters*, 29, 106-101 - 106-104
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., & Running, S.W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560-1563
- Neumann, H.H., & Denhartog, G. (1989). Leaf-Area Measurements Based on Hemispheric Photographs and Leaf-Litter Collection in a Deciduous Forest during Autumn Leaf-Fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45, 325-345
- Ni, W.G., Li, X.W., Woodcock, C.E., Caetano, M.R., & Strahler, A.H. (1999). An analytical hybrid GORT model for bidirectional reflectance over discontinuous plant canopies. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 987-999
- Nichol, C.J., Huemmrich, K.F., Black, T.A., Jarvis, P.G., Walthall, C.L., Grace, J., & Hall, F.G. (2000). Remote sensing of photosynthetic-light-use efficiency of boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101, 131-142
- Nichol, C.J., Lloyd, J., Shibistova, O., Arneeth, A., Roser, C., Knohl, A., Matsubara, S., & Grace, J. (2002). Remote sensing of photosynthetic-light-use efficiency of a Siberian boreal forest. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 54, 677-687
- Nichol, C.J., Rascher, U., Matsubara, S., & Osmond, C.B. (2006). Detecting quantum yield ($\Delta F/F'$ m) and non-photochemical quenching (NPQ) in an experimental mangrove canopy using optical remote sensing, chlorophyll fluorescence and leaf biochemistry. *Trees*, 20, 9-15
- Nichols, D. (1983). Digital Hardware. In Colwell, R.N. (Ed.), *Manual of Remote Sensing* (pp. 841-871). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W., & Limperis, T. (1977). *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. Washington, DC: National Bureau of Standards
- Niinemets, U., & Tenhunen, J.D. (1997). A model separating leaf structural and physiological effects on carbon gain along light gradients for the shade-tolerant species *Acer saccharum*. *Plant Cell and Environment*, 20, 845-866
- Niyogi, K.K. (1999). Photoprotection revisited: Genetic and molecular approaches. *Annual Review of Plant Biology*, 50, 333-359
- Nobel, P.S. (1983). *Biophysical Plant Physiology and Ecology*. San Francisco: W.H. Freeman
- Norman, J.M., & Jarvis, P.G. (1974). Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea-Sitchensis* (Bong) Carr) .3. Measurements of Canopy Structure and Interception of Radiation. *Journal of Applied Ecology*, 11, 375-398
- Norman, J.M., & Jarvis, P.G. (1975). Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea-Sitchensis* (Bong) Carr) .5. Radiation Penetration Theory and a Test Case. *Journal of Applied Ecology*, 12, 839-878
- Nunnally, N.R. (1973). Introduction to Remote Sensing: The Physics of Electromagnetic Radiation. In Holz, R.K. (Ed.), *The Surveillant Science: Remote Sensing of Environment* (pp. 18-27). Boston: Houghton Mifflin
- Oechel, W.C., Vourlitis, G.L., Hastings, S.J., Zuluete, R.C., Maxman, L., & Kane, D. (2000). Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, 406, 978-981
- Ogaya, R., & Penuelas, J. (2007). Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought. *Plant Ecology*, 189, 291-299
- Ogaya, R., & Penuelas, J. (2003). Comparative seasonal gas exchange and chlorophyll fluorescence of two dominant woody species in a Holm Oak Forest. *Flora*, 198, 132-141
- Ogaya, R., Penuelas, J., Martínez-Vilalta, J., & Mangiron, M. (2003). Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a holm oak forest of NE Spain. *Forest Ecology and Management*, 180, 175-184
- Oppelt, N., & Mauser, W. (2001). The chlorophyll content of maize (*Zea mays*) derived with the Airborne Imaging Spectrometer AVIS. *8th International Symposium "Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing"* (pp. 407-412). Aussois, France
- Orwig, D.A., & Abrams, M.D. (1997). Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. *Trees-Structure and Function*, 11, 474-484

- Osmond, B., Ananyev, G., Berry, J., Langdon, C., Kolber, Z., Lin, G., Monson, R., Nichol, C., Rascher, U., Schurr, U., Smith, S., & Yakir, D. (2004). Changing the way we think about global change research: Scaling up in experimental ecosystem science. *Global Change Biology*, 10, 393-407
- Osmond, C.B., Anderson, J.M., Ball, M.C., & Egerton, J.J.G. (1999). Compromising efficiency: the molecular ecology of light resource utilization in plants. In Press, M.C., Scholes, J.D., & Barker, M.G. (Eds.), *Physiological plant ecology* (pp. 1-25). Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Overpeck, J.T., Rind, D., & Goldberg, R. (1990). Climate-Induced Changes in Forest Disturbance and Vegetation. *Nature*, 343, 51-53
- Papanikolaou, A.D., Fyllas, N.M., Mazaris, A.D., Dimitrakopoulos, P.G., Kallimanis, A.S., & Pantis, J.D. (2011). Grazing effects on plant functional group diversity in Mediterranean shrublands. *Biodiversity and Conservation*, 20, 2831-2843
- Passot, X. (2001). VEGETATION image processing methods in the CTIV. *Proceedings of the VEGETATION 2000 conference* (pp. 15-22). Toulouse & Ispra: Centre National d'Études Spatiales (CNES) & Joint Research Centre (JRC)
- Peguero-Pina, J.J., Morales, F., Flexas, J., Gil-Pelegrín, E., & Moya, I. (2008). Photochemistry, remotely sensed physiological reflectance index and de-epoxidation state of the xanthophyll cycle in *Quercus coccifera* under intense drought. *Oecologia*, 156, 1-11
- Penuelas, J., & Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 9, 131-140
- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Save, R. (1993). The Reflectance at the 950-970 nm Region as an Indicator of Plant Water Status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887-1905
- Penuelas, J., Filella, I., & Gamon, J.A. (1995a). Assessment of Photosynthetic Radiation-Use Efficiency with Spectral Reflectance. *New Phytologist*, 131, 291-296
- Penuelas, J., Filella, I., Gamon, J.A., & Field, C. (1997a). Assessing photosynthetic radiation-use efficiency of emergent aquatic vegetation from spectral reflectance. *Aquatic Botany*, 58, 307-315
- Penuelas, J., Filella, I., Lloret, F., Pinol, J., & Siscart, D. (2000). Effects of a severe drought on water and nitrogen use by *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *Biologia Plantarum*, 43, 47-53
- Penuelas, J., Filella, I., Lloret, P., Munoz, F., & Vilajeliu, M. (1995b). Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2727-2733
- Penuelas, J., Filella, I., Llusia, J., Siscart, D., & Pinol, J. (1998). Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *Journal of Experimental Botany*, 49, 229-238
- Penuelas, J., Filella, I., Serrano, L., & Save, R. (1996). Cell wall elasticity and water index (R970 nm R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 373-382
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., & Field, C.B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135-146
- Penuelas, J., & Inoue, Y. (1999). Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. *Photosynthetica*, 36, 355-360
- Penuelas, J., Lloret, F., & Montoya, R. (2001). Severe drought effects on mediterranean woody flora in Spain. *Forest Science*, 47, 214-218
- Penuelas, J., Llusia, J., Pinol, J., & Filella, I. (1997b). Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use-efficiency assessment in Mediterranean trees. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2863-2868
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997c). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2869-2875
- Perez-Priego, O., Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Sepulcre-Canto, G., & Fereres, E. (2005). Detection of water stress in orchard trees with a high-resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence infilling of the O-2-A band. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 2860-2869
- Perry, C.R., & Lautenschlager, L.F. (1984). Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indexes. *Remote Sensing of Environment*, 14, 169-182
- Pfundel, E., & Bilger, W. (1994). Regulation and possible function of the violaxanthin cycle. *Photosynthesis Research*, 42, 89-109
- Phillips, O.L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W.F., Nunez, P.V., Vasquez, R.M., Laurance, S.G., Ferreira, L.V., Stern, M., Brown, S., & Grace, J. (1998). Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 282, 439-442

- Phillips, S.L., & Ehleringer, J.R. (1995). Limited Uptake of Summer Precipitation by Bigtooth Maple (*Acer-Grandidentatum* Nutt) and Gambels Oak (*Quercus-Gambelii* Nutt). *Trees-Structure and Function*, 9, 214-219
- Pinzon, J. (2002). Using HHT to successfully uncouple seasonal and interannual components in remotely sensed data. *SCI 2002 Conference Proceedings*. Orlando: SCI International
- Pinzon, J., Brown, M.E. & Tucker, C.J. (2005). Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In Huang, N.E., & Shen, S.S.P. (Eds.), *Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications* (pp. 167-186). Singapore: World Scientific
- Piovesan, G., Biondi, F., Di Filippo, A., Alessandrini, A., & Maugeri, M. (2008). Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology*, 14, 1265-1281
- Pirie, A.J.G., & Mullins, M.G. (1980). Concentration of phenolics in the skin of grape berries during fruit development and ripening. *Am. J. Enol. Vitic.*, 31, 34-36
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., & Scrivani, J.A. (2004). Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA. *Forest Science*, 50, 551-565
- Post, D.F., Mack, C., Camp, P.D., & Suliman, A.S. (1988). Mapping and Characterization of the Soils on the University of Arizona Maricopa Agricultural Center. *Proc. Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*. Vol. 18. Tucson: Arizona-Nevada Academy of Science
- Potter, C.S., Randerson, J.T., Field, C.B., Matson, P.A., Vitousek, P.M., Mooney, H.A., & Klooster, S.A. (1993). Terrestrial Ecosystem Production - a Process Model-Based on Global Satellite and Surface Data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 811-841
- Prince, S.D., & Goward, S.N. (1995). Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22, 815-835
- Prince, S.D., & Goward, S.N. (1996). Evaluation of the NOAA/NASA Pathfinder AVHRR Land Data Set for global primary production modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 217-221
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., & Laven, R.D. (1996). *Introduction to wildland fire*. (2nd ed.). New York ; Chichester: Wiley
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., & Sorooshian, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119-126
- Qi, J., Kerr, Y.H., Moran, M.S., Weltz, M., Huete, A.R., Sorooshian, S., & Bryant, R. (2000). Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region. *Remote Sensing of Environment*, 73, 18-30
- Qi, J., Moran, M.S., Cabot, F., & Dedieu, G. (1995). Normalization of Sun/View Angle Effects Using Spectral Albedo-Based Vegetation Indexes. *Remote Sensing of Environment*, 52, 207-217
- Rahman, A.F., Cordova, V.D., Gamon, J.A., Schmid, H.P., & Sims, D.A. (2004). Potential of MODIS ocean bands for estimating CO2 flux from terrestrial vegetation: A novel approach. *Geophysical Research Letters*, 31
- Raich, J.W., Rastetter, E.B., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W., Steudler, P.A., Peterson, B.J., Grace, A.L., Moore, B., & Vorosmarty, C.J. (1991). Potential Net Primary Productivity in South-America - Application of a Global-Model. *Ecological Applications*, 1, 399-429
- Randerson, J.T., Field, C.B., Fung, I.Y., & Tans, P.P. (1999). Increases in early season ecosystem uptake explain recent changes in the seasonal cycle of atmospheric CO2 at high northern latitudes. *Geophysical Research Letters*, 26, 2765-2768
- Rascher, U., Nichol, C.J., Small, C., & Hendricks, L. (2007). Monitoring spatio-temporal dynamics of photosynthesis with a portable hyperspectral imaging system. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73, 45-56
- Raschke, K. (1960). Heat transfer between the plant and the environment. *Annual Review of Plant Physiology*, 11, 111-126
- Raven, P.H., Thomson, H.J., & Prigge, B.A. (1986). *Flora of the Santa Monica Mountains, California*. (2nd ed.). Los Angeles: University of California
- Reutebuch, S.E., Andersen, H.E., & McGaughey, R.J. (2005). Light detection and ranging (LIDAR): An emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry*, 103, 286-292
- Ridge, I. (2005). *Φυσιολογία Φυτών*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίων
- Rigor, I.G., Colony, R.L., & Martin, S. (2000). Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-97. *Journal of Climate*, 13, 896-914
- Roberts, D.A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., & Green, R.O. (1998). Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 65, 267-279

- Roberts, D.A., Green, R.O., & Adams, J.B. (1997). Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 62, 223-240
- Roberts, D.A., Smith, M.O., & Adams, J.B. (1993). Discriminating Green Vegetation, Nonphotosynthetic Vegetation, and Soils in Aviris Data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 255-269
- Romagnoli, M., & Codipietro, G. (1996). Pointer years and growth in Turkey oak (*Quercus cerris* L) in Latium (central Italy). A dendroclimatic approach. *Annales Des Sciences Forestieres*, 53, 671-684
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95-107
- Rosen, J.M., Kjome, N.T., Mckenzie, R.L., & Liley, J.B. (1994). Decay of Mount-Pinatubo Aerosol at Midlatitudes in the Northern and Southern Hemispheres. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 99, 25733-25739
- Ross, J. (1981). *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Hague: Dr. W. Junk Publishers
- Roujean, J.L., & Breon, F.M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 375-384
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., & Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report*, 371
- Ruimy, A., Dedieu, G., & Saugier, B. (1996). TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 269-285
- Ruimy, A., Kergoat, L., Bondeau, A., & Intercomparison, P.P.N.M. (1999). Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology*, 5, 56-64
- Ruimy, A., Saugier, B., & Dedieu, G. (1994). Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 99, 5263-5283
- Running, S.W., Baldocchi, D.D., Turner, D.P., Gower, S.T., Bakwin, P.S., & Hibbard, K.A. (1999). A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 70, 108-127
- Running, S.W., & Hunt, Jr. (1993). Generalization of forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: Ehleringer, J.R., & Field, C.B. (Eds.), *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe* (pp. 141-158). San Diego, CA: Academic Press
- Running, S.W., & Nemani, R.R. (1988). Relating Seasonal Patterns of the Avhrr Vegetation Index to Simulated Photosynthesis and Transpiration of Forests in Different Climates. *Remote Sensing of Environment*, 24, 347-367
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M.S., Reeves, M., & Hashimoto, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54, 547-560
- Running, S.W., Peterson, D.L., Spanner, M.A., & Teuber, K.B. (1986). Remote-Sensing of Coniferous Forest Leaf-Area. *Ecology*, 67, 273-276
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R.R., & Glassy, J.M. (2000). Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. In Sala, O., Jackson, R., & Mooney, H. (Eds.), *Methods in ecosystem science* (pp. 44-57). New York: Springer-Verlag
- Russell, G., Jarvis, P.G., & Monteith, J.L. (1989). Absorption of radiation by canopies and stand growth. In Russell, G., Marshall, B., & Jarvis, P.G. (Eds.), *Plant Canopies: Their Growth, Form, and Function* (pp. 21-39). Cambridge: Cambridge University Press
- Russell, P.B., Livingston, J.M., Dutton, E.G., Pueschel, R.F., Reagan, J.A., Defoor, T.E., Box, M.A., Allen, D., Pilewskie, P., Herman, B.M., Kinne, S.A., & Hofmann, D.J. (1993). Pinatubo and Pre-Pinatubo Optical-Depth Spectra - Mauna-Loa Measurements, Comparisons, Inferred Particle-Size Distributions, Radiative Effects, and Relationship to Lidar Data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 98, 22969-22985
- Sandmeier, S., Muller, C., Hosgood, B., & Andreoli, G. (1998). Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. *Remote Sensing of Environment*, 66, 222-233
- Sarris, D., Christodoulakis, D., & Körner, C. (2007). Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean. *Global Change Biology*, 13, 1187-1200
- Sato, M., Hansen, J.E., McCormick, M.P., & Pollack, J.B. (1993). Stratospheric Aerosol Optical Depths, 1850-1990. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 98, 22987-22994
- Saugier, B., Roy, J., & Mooney, H.A. (2001). Estimations of global terrestrial productivity: Converging toward a single number. In Roy, J., Saugier, B., & Mooney, H.A. (Eds.), *Terrestrial Global Productivity* (pp. 543-557). San Diego, CA: Academic Press
- Schimel, D., Melillo, J., Tian, H., McGuire, A.D., Kicklighter, D., Kittel, T., Rosenbloom, N., Running, S., Thornton, P., Ojima, D., Parton, W., Kelly, R., Sykes, M., Neilson, R., & Rizzo, B. (2000). Contribution

- of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 287, 2004-2006
- Schimel, D.S., House, J.I., Hibbard, K.A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B.H., Apps, M.J., Baker, D., Bondeau, A., Canadell, J., Churkina, G., Cramer, W., Denning, A.S., Field, C.B., Friedlingstein, P., Goodale, C., Heimann, M., Houghton, R.A., Melillo, J.M., Moore Iii, B., Murdiyarso, D., Noble, I., Pacala, S.W., Prentice, I.C., Raupach, M.R., Rayner, P.J., Scholes, R.J., Steffen, W.L., & Wirth, C. (2001). Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414, 169-172
- Schmid, H.P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 159-183
- Sellers, P.J. (1985). Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1335-1372
- Sellers, P.J., Bounoua, L., Collatz, G.J., Randall, D.A., Dazlich, D.A., Los, S.O., Berry, J.A., Fung, I., Tucker, C.J., Field, C.B., & Jensen, T.G. (1996). Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, 271, 1402-1406
- Sellers, P.J., Meeson, B.W., Hall, F.G., Asrar, G., Murphy, R.E., Schiffer, R.A., Bretherton, F.P., Dickinson, R.E., Ellingson, R.G., Field, C.B., Huemmrich, K.F., Justice, C.O., Melack, J.M., Roulet, N.T., Schimel, D.S., & Try, P.D. (1995). Remote-Sensing of the Land-Surface for Studies of Global Change - Models, Algorithms, Experiments. *Remote Sensing of Environment*, 51, 3-26
- Sepulcre-Canto, G., Zarco-Tejada, P.J., Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J.A., Miguel, E.D., & Villalobos, F.J. (2006). Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 31-44
- Sepulcre-Canto, G., Zarco-Tejada, P.J., Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J.A., Soriano, M.A., Fereres, E., Vega, V., & Pastor, M. (2007). Monitoring yield and fruit quality parameters in open-canopy tree crops under water stress. Implications for ASTER. *Remote Sensing of Environment*, 107, 455-470
- Serrano, L., Ustin, S.L., Roberts, D.A., Gamon, J.A., & Penuelas, J. (2000). Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 74, 570-581
- Siam, A.M.J., Radoglou, K.M., Noitsakis, B., & Smiris, P. (2008). Physiological and growth responses of three Mediterranean oak species to different water availability regimes. *Journal of Arid Environments*, 72, 583-592
- Siegert, F., Ruecker, G., Hinrichs, A., & Hoffmann, A.A. (2001). Increased damage from fires in logged forests during droughts caused by El Niño. *Nature*, 414, 437-440
- Silva, L.F. (1978). Radiation and Instrumentation in Remote Sensing. In Swain, P.H., & Davis, S.M. (Eds.), *Remote Sensing: The Quantitative Approach* (pp. 21-135). New York: McGraw-Hill
- Sims, D.A., & Gamon, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81, 337-354
- Sims, D.A., Rahman, A.F., Cordova, V.D., El-Masri, B.Z., Baldocchi, D.D., Flanagan, L.B., Goldstein, A.H., Hollinger, D.Y., Misson, L., Monson, R.K., Oechel, W.C., Schmid, H.P., Wofsy, S.C., & Xu, L.K. (2006). On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 111
- Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O., & Tucker, C.J. (2003). Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology*, 9, 1-15
- Smart, R.E. & Robinson, M. (1991). *Sunlight into Wine: A Handbook for Winegrape Canopy Management*. Adelaide: Winetitles
- Souza, R.P., Machado, E.C., Silva, J.A.B., Lagôa, A.M.M.A., & Silveira, J.A.G. (2004). Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 51, 45-56
- Spanner, M.A., Pierce, L.L., Peterson, D.L., & Running, S.W. (1990). Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 95-111
- Stoner, E.R., & Baumgardner, M.F. (1980). Physiochemical, site and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils. *NASA, CR-160571*, 1-50
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Mitchell, J.F.B., & Jenkins, G.J. (2000). External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290, 2133-2137
- Strachan, I.B., Pattey, E., & Boisvert, J.B. (2002). Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 80, 213-224

- Strahler, A.H., Friedl, M., Zhang, X., Hodges, J., Cooper, C.S.A., & Baccini, A. (2002). The MODIS Land Cover and Land Cover Dynamics Products. Presentation at "Remote Sensing of the Earth's Environment from TERRA" in L'Aquila, Italy
- Strahler, A.H., & Jupp, D.L.B. (1990). Modeling Bidirectional Reflectance of Forests and Woodlands Using Boolean Models and Geometric Optics. *Remote Sensing of Environment*, 34, 153-166
- Stylinski, C.D., Gamon, J.A., & Oechel, W.C. (2002). Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia*, 131, 366-374
- Suarez, L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., Gonzalez-Dugo, V., & Fereres, E. (2009). Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 113, 730-744
- Suarez, L., Zarco-Tejada, P.J., Gonzalez-Dugo, V., Berni, J.A.J., Sagardoy, R., Morales, F., & Fereres, E. (2010). Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114, 286-298
- Suarez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Canto, G., Perez-Priego, O., Miller, J.R., Jimenez-Munoz, J.C., & Sobrino, J. (2008). Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112, 560-575
- Sun, P., Grignetti, A., Liu, S., Casacchia, R., Salvatori, R., Pietrini, F., Loreto, F., & Centritto, M. (2008). Associated changes in physiological parameters and spectral reflectance indices in olive (*Olea europaea* L.) leaves in response to different levels of water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1725-1743
- Swaty, R.L., Deckert, R.J., Whitham, T.G., & Gehring, C.A. (2004). Ectomycorrhizal abundance and community composition shifts with drought: Predictions from tree rings. *Ecology*, 85, 1072-1084
- Swinnen, E., & Veroustraete, F. (2008). Extending the SPOT-VEGETATION NDVI time series (1998-2006) back in time with NOAA-AVHRR data (1985-1998) for southern Africa. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 558-572
- Takahashi, W., Nguyen-Cong, V., Kawaguchi, S., Minamiyama, M., & Ninomiya, S. (2000). Statistical models for prediction of dry weight and nitrogen accumulation based on visible and near-infrared hyper-spectral reflectance of rice canopies. *Plant Production Science*, 3, 377-386
- Takebe, M., Yoneyama, T., Inada, K., & Murakami, T. (1990). Spectral Reflectance Ratio of Rice Canopy for Estimating Crop Nitrogen Status. *Plant and Soil*, 122, 295-297
- Tan, B., Woodcock, C.E., Hu, J., Zhang, P., Ozdogan, M., Huang, D., Yang, W., Knyazikhin, Y., & Myneni, R.B. (2006). The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 105, 98-114
- Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Santer, R., & Vermote, E. (1990). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum - 6S code. *Digest - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 187
- Tansey, K., Gregoire, J.M., Binaghi, E., Boschetti, L., Brivio, P.A., Ershov, D., Flasse, S., Fraser, R., Graetz, D., Maggi, M., Peduzzi, P., Pereira, J., Silva, J., Sousa, A., & Stroppiana, D. (2004). A global inventory of burned areas at 1km resolution for the year 2000 derived from SPOT VEGETATION data. *Climatic Change*, 67, 345-377
- Tarnavsky, E., Garrigues, S., & Brown, M.E. (2008). Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. *Remote Sensing of Environment*, 112, 535-549
- Teillet, P.M., Staenz, K., & 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
- Thenot, F., Methy, M., & Winkel, T. (2002). The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 5135-5139
- Townsend, A.R., Braswell, B.H., Holland, E.A., & Penner, J.E. (1996). Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 6, 806-814
- Trabaud, L., & Galtie, J.F. (1996). Effects of fire frequency on plant communities and landscape pattern in the Massif des Aspres (southern France). *Landscape Ecology*, 11, 215-224
- Trotter, G.M., Whitehead, D., & Pinkney, E.J. (2002). The photochemical reflectance index as a measure of photosynthetic light use efficiency for plants with varying foliar nitrogen contents. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 1207-1212
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150
- Tucker, C.J., Fung, I.Y., Keeling, C.D., & Gammon, R.H. (1986). Relationship between Atmospheric CO₂ Variations and a Satellite-Derived Vegetation Index. *Nature*, 319, 195-199
- Tucker, C.J., Jones, W.H., Kley, W.A., & Sundstrom, G.J. (1981). A 3-Band Hand-Held Radiometer for Field Use. *Science*, 211, 281-283

- Tucker, C.J., Pinzon, J.E., Brown, M.E., Slayback, D.A., Pak, E.W., Mahoney, R., Vermote, E.F., & El Saleous, N. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4485-4498
- Tucker, C.J., & Sellers, P.J. (1986). Satellite Remote-Sensing of Primary Production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395-1416
- Tucker, C.J., Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O., Myneni, R.B., & Taylor, M.G. (2001). Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45, 184-190
- Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht, K.S., & Briggs, J.M. (1999). Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*, 70, 52-68
- Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Running, S.W., Zhao, M.S., Costa, M.H., Kirschbaum, A.A., Ham, J.M., Saleska, S.R., & Ahl, D.E. (2006). Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102, 282-292
- Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Zhao, M., Running, S.W., Wofsy, S.C., Urbanski, S., Dunn, A.L., & Munger, J.W. (2003a). Scaling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment*, 88, 256-270
- Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Maeirsperger, T.K., Gower, S.T., Kirschbaum, A.A., Running, S.W., Zhao, M., Wofsy, S.C., Dunn, A.L., Law, B.E., Campbell, J.L., Oechel, W.C., Kwon, H.J., Meyers, T.P., Small, E.E., Kurc, S.A., & Gamon, J.A. (2005). Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*, 11, 666-684
- Turner, D.P., Urbanski, S., Bremer, D., Wofsy, S.C., Meyers, T., Gower, S.T., & Gregory, M. (2003b). A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*, 9, 383-395
- Turner, M.G., & Gardner, R.H. (1991). *Quantitative methods in landscape ecology : the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*. New York ; London: Springer
- Urbieto, I.R., Zavala, M.A., & Maranon, T. (2008). Human and non-human determinants of forest composition in southern Spain: evidence of shifts towards cork oak dominance as a result of management over the past century. *Journal of Biogeography*, 35, 1688-1700
- Ustin, S.L., Smith, M.O., & Adams, J.B. (1993). Remote sensing of ecological processes: a strategy for developing and testing ecological models using spectral mixture analysis. In: Ehleringer, J.R., & Field, C.B. (Eds.), *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe* (pp. 339-357). San Diego, CA: Academic Press
- Vanden Heuvel, R.M. (1996). The promise of precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 38-40
- Vannini, A., Valentini, R., & Luisi, N. (1996). Impact of drought and Hypoxylon mediterraneum on oak decline in the Mediterranean region. *Annales Des Sciences Forestieres*, 53, 753-760
- Vermote, E., & Kaufman, Y.J. (1995). Absolute Calibration of Avhrr Visible and near-Infrared Channels Using Ocean and Cloud Views. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2317-2340
- Vermote, E., Saleous, N.E., Kaufman, Y.J., & Dutton, E. (1997a). Data pre-processing: Stratospheric aerosol perturbing effect on the remote sensing of vegetation: Correction method for the composite NDVI after the Pinatubo eruption. *Remote Sensing Reviews*, 15, 7-21
- Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., & Morcrette, J.J. (1997b). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 675-686
- Verrelst, J., Schaepman, M.E., Koetz, B., & Kneubuhler, M. (2008). Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2341-2353
- Vicente, A.M., & Ales, R.F. (2006). Long term persistence of dehesas. Evidences from history. *Agroforestry Systems*, 67, 19-28
- Vincini, M., Frazzi, E., & D'Alessio, P. (2006). Angular dependence of maize and sugar beet Vis from directional CHRIS/PROBA data. *4th ESA CHRIS PROBA Workshop* (pp. 19-21). Frascati: European Space Research Institute (ESRIN)
- Viovy, N., Arino, O., & Belward, A.S. (1992). The Best Index Slope Extraction (Bise) - a Method for Reducing Noise in Ndvi Time-Series. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 1585-1590
- Vogelmann, J.E., Rock, B.N., & Moss, D.M. (1993). Red Edge Spectral Measurements from Sugar Maple Leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1563-1575
- Walker, B.H., & Steffen, W.L. (1996). *Global change and terrestrial ecosystems*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press

- Walter-Shea, E.A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M.A., & Hays, C.J. (1997). Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 61, 162-177
- Walthall, C., Dulaney, W., Anderson, M., Norman, J., Fang, H., & Liang, S. (2004). A comparison of empirical and neural network approaches for estimating corn and soybean leaf area index from Landsat ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, 465-474
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395
- Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. (2005). On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94, 244-255
- Wanjura, D.F., Maas, S.J., Winslow, J.C., & Upchurch, D.R. (2004). Scanned and spot measured canopy temperatures of cotton and corn. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 33-48
- Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76
- Weber, P., Bugmann, H., & Rigling, A. (2007). Radial growth responses to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley. *Journal of Vegetation Science*, 18, 777-792
- Weiss, M., & Baret, F. (1999). Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 70, 293-306
- Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnère, A., & Knyazikhin, Y. (2000). Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agronomie*, 20, 3-22
- White, J.D., Running, S.W., Nemani, R., Keane, R.E., & Ryan, K.C. (1997a). Measurement and remote sensing of LAI in rocky mountain montane ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 1714-1727
- White, L.P. (1977). *Aerial photography and remote sensing for soil survey*. Oxford: Clarendon Press
- White, M.A., Thornton, P.E., & Running, S.W. (1997b). A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11, 217-234
- Wiegand, C.L., Richardson, A.J., & Kanemasu, E.T. (1979). Leaf Area Index Estimates for Wheat from Landsat and Their Implications for Evapotranspiration and Crop Modeling. *Agronomy Journal*, 71, 336-342
- Winkel, T., Methy, M., & Thenot, F. (2002). Radiation use efficiency, chlorophyll fluorescence, and reflectance indices associated with ontogenic changes in water-limited *Chenopodium quinoa* leaves. *Photosynthetica*, 40, 227-232
- Wofsy, S.C., Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.M., Bakwin, P.S., Daube, B.C., Bassow, S.L., & Bazzaz, F.A. (1993). Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 260, 1314-1317
- Woodward, F.I. (1987). *Climate and plant distribution*. Cambridge Cambridgeshire ; New York: Cambridge University Press
- Wu, C.Y., Munger, J.W., Niu, Z., & Kuang, D. (2010). Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2925-2939
- Wu, C.Y., Niu, Z., Tang, Q., Huang, W.J., Rivard, B., & Feng, J.L. (2009). Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1015-1021
- Wylie, B.K., Harrington Jr, J.A., Prince, S.D., & Denda, I. (1991). Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger: 1986-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1281-1300
- Xiao, J., & Moody, A. (2004). Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5669-5689
- Xiao, J., & Moody, A. (2005). Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982-1998. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 2371-2390
- Xiao, X.M., Boles, S., Liu, J.Y., Zhuang, D.F., & Liu, M.L. (2002). Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 335-348
- Xiao, X.M., Zhang, Q.Y., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., Berrien, M., & Ojima, D. (2004). Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91, 256-270
- Yoder, B.J., & Pettigrew-Crosby, R.E. (1995). Predicting Nitrogen and Chlorophyll Content and Concentrations from Reflectance Spectra (400-2500 Nm) at Leaf and Canopy Scales. *Remote Sensing of Environment*, 53, 199-211

- Young, D.H. (1994). *Πανεπιστημιακή Φυσική, Έκδοση Διευρυμένη με Σύγχρονη Φυσική*. (8η Έκδοση). Αθήνα: Εκδόσεις Παπαζήση
- Yuan, W.P., Liu, S., Zhou, G.S., Zhou, G.Y., Tieszen, L.L., Baldocchi, D., Bernhofer, C., Gholz, H., Goldstein, A.H., Goulden, M.L., Hollinger, D.Y., Hu, Y., Law, B.E., Stoy, P.C., Vesala, T., & Wofsy, S.C. (2007). Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 189-207
- Zarco-Tejada, P.J., Berjon, A., Lopez-Lozano, R., Miller, J.R., Martin, P., Cachorro, V., Gonzalez, M.R., & de Frutos, A. (2005). Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 99, 271-287
- Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., & Berni, J.A.J. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Mohammed, G.H., & Noland, T.L. (2000). Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf-level measurements and model simulation. *Remote Sensing of Environment*, 74, 582-595
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Morales, A., Berjon, A., & Aguera, J. (2004). Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment*, 90, 463-476
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Noland, T.L., Mohammed, G.H., & Sampson, P.H. (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1491-1507
- Zarco-Tejada, P.J., Pushnik, J.C., Dobrowski, S., & Ustin, S.L. (2003a). Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment*, 84, 283-294
- Zarco-Tejada, P.J., Rueda, C.A., & Ustin, S.L. (2003b). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85, 109-124
- Zarco-Tejada, P.J., & Ustin, S.L. (2001). Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1, 342-344
- Zhao, M., Running, S.W., & Nemani, R.R. (2006). Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 111
- Zhao, M.S., Heinsch, F.A., Nemani, R.R., & Running, S.W. (2005). Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95, 164-176
- Zhou, L., Tucker, C.J., Kaufmann, R.K., Slayback, D., Shabanov, N.V., & Myneni, R.B. (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 106, 20069-20083
- Zhou, X.B., Chang, N.B., & Li, S.S. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors*, 9, 1876-1912
- Zhu, Y., Zhou, D., Yao, X., Tian, Y., & Cao, W. (2007). Quantitative relationships of leaf nitrogen status to canopy spectral reflectance in rice. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58, 1077-1085
- Zweifel, R., Zimmermann, L., Zeugin, F., & Newbery, D.M. (2006). Intra-annual radial growth and water relations of trees: implications towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany*, 57, 1445-1459

