



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΟΤΑΝΙΚΗΣ

**Αξιοποίηση προηγμένων τεχνικών τηλεπισκόπησης
για τη μελέτη δυναμικών παραμέτρων της βλάστησης**

Βανικιώτης Θεόφιλος
Βιολόγος, M.Sc.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2024

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών της Σχολής Επιστημών Υγείας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

- 1) Άρης Κυπαρίσσης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Επιβλέπων).
- 2) Ήρα Καραγιάννη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- 3) Όλγα Συκιώτη, Κύρια Ερευνήτρια του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) Άρης Κυπαρίσσης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Επιβλέπων).
- 2) Ήρα Καραγιάννη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- 3) Όλγα Συκιώτη, Κύρια Ερευνήτρια του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.
- 4) Τζων – Μάξγουελ Χάλλεϋ, Καθηγητής του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- 5) Κωνσταντίνος Σωτηρόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- 6) Χαρίλαος Γιώτης, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- 7) Ιωάννης Γήτας, Καθηγητής του Τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 15 Δεκεμβρίου 2023

Στη Φωτεινή
Και στον πατέρα μου

Όταν κοιτάς από ψηλά, μοιάζει η γη με ζωγραφιά
Και συ την πήρες σοβαρά, και συ την πήρες σοβαρά
Μοιάζουν τα σπίτια με σπιτόκουτα, μοιάζουν μυρμήγκια οι άνθρωποι
Το μεγαλύτερο ανάκτορο, μοιάζει μ' ένα μικρούλι τόπι

(στίχοι Σώτια Τσώτου/ μουσική, τραγούδι Κώστας Χατζής)

Πρόλογος

Είναι πραγματικά πολύ δύσκολο να γραφτούν λίγα λόγια για μια τόσο σημαντική αλλά και μεγάλη σε διάρκεια περίοδο, όπως ήταν αυτή που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία. Δεν μπορώ να πω πως το ταξίδι αυτό ξεκίνησε από έρωτα για την επιστήμη, αντιθέτως, μάλλον ήταν το προϊόν ενός συνοικεσίου με κοινωνικοοικονομικά οφέλη. Ένα συνοικέσιο που κατέληξε όμως σε μια βαθιά αγάπη για την επιστήμη και τον επιστημονικό τρόπο σκέψης, που με άλλαξε ριζικά. Όλα αυτά οφείλονται στον επιβλέποντά μου αναπληρωτή (τόρα πια) καθηγητή Άρη Κυπαρίσση, ο οποίος μου πρόσφερε μια θέση στο εργαστήριό του και την ομάδα του, κάτι που πραγματικά εύχομαι να μην έχει μετανιώσει μέσα στα χρόνια. Η ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ δίπλα του είναι ένα δώρο που δεν είμαι σίγουρος ότι άξιζα, μα το δέχτηκα με χαρά και έκανα ό,τι μπορούσα ώστε να μην πάει χαμένο. Χωρίς την καθοδήγηση του και την ανεξάντλητη υπομονή του η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί. Ο σεβασμός του, η επιστημονική και προσωπική του ακεραιότητα, η ελευθερία κινήσεων που μου παρείχε, αποτελούν για μένα έναν «οδικό χάρτη» για την αλληλεπίδραση μου με συνεργάτες και συνανθρώπους. Όλα αυτά τα χρόνια με βοήθησε με τρόπους που ξεπερνούν τις συμβατικές υποχρεώσεις ενός επιβλέποντα και γι' αυτό θα του είμαι πάντα υπόχρεος.

Εκτός του κ. Κυπαρίσση, καθοριστική για την εργασία αυτή ήταν επίσης η συμβολή του Δρ. Σταύρου Σταγάκη. Από την πρώτη μου μέρα στο εργαστήριο με βοήθησε με κάθε δυνατό τρόπο, από τον καθορισμό του θέματος, το σχεδιασμό των μεθόδων, τις κοινές μετρήσεις πεδίου, ως την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ήταν πάντα δίπλα μου. Μέρος αυτής της εργασίας αποτελεί συνέχεια της δικής του δουλειάς στο εργαστήριο Βοτανικής του Τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών. Ο απλόχερος τρόπος που μοιράζεται τη γνώση του και την δουλειά του τον καθιστούν ένα παράδειγμα προς μίμηση. Αλλά και εκτός εργαστηρίου, ήταν πάντα εκεί για μένα, και είναι τιμή μου να τον αποκαλώ φίλο. Τον ευχαριστώ για όλα.

Το καρέ του εργαστηρίου Βοτανικής (της δικής μου περιόδου) συμπληρώνει ο Δρ. Νίκος Μάρκος. Πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει με τη θεωρία και τις τεχνικές, αλλά και να μου παρέχει δεδομένα για τις δικές μου αναλύσεις. Συνεργάτης στο πεδίο και τον εργαστηριακό πάγκο, φίλος στο εργαστήριο και έξω από αυτό. Κλείνοντας με το εργαστήριο Βοτανικής θα ήθελα να ευχαριστήσω την αναπληρώτρια καθηγήτρια Έφη (Ευθυμία) Λεβίζου, που ήταν πάντα πρόθυμη να βοηθήσει.

Απεριόριστη ευγνωμοσύνη αισθάνομαι για την επίκουρη καθηγήτρια Ήρα Καραγιάννη, μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής μου, για την βοήθεια της όλα αυτά τα χρόνια. Αναλαμβάνοντας τα ηνία του εργαστηρίου μετά την μετακίνηση του κ. Κυπαρίσση, μετατρέποντας το στο εργαστήριο Μικροβιακής Οικολογίας, μου επέτρεψε να συνεχίσω να κινούμαι στο χώρο όπως πριν. Από την πρώτη στιγμή με αντιμετώπισε με σεβασμό και κατανόηση, βοηθώντας με όποτε το είχα ανάγκη. Ιδιαίτερα την ευχαριστώ για τη βοήθεια και φιλοξενία που παρείχε σε εξωτερικούς συνεργάτες μου για χρόνια. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και το τρίτο μέλος της συμβουλευτικής μου επιτροπής, την Κύρια Ερευνήτρια του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών Όλγα Συκιώτη, για τη βοήθεια της όλα αυτά τα χρόνια στο κομμάτι της τηλεπισκόπησης.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή Τζων – Μάξγουελ Χάλλεϋ, Αναπληρωτή Καθηγητή Κωνσταντίνο Σωτηρόπουλο,

Επίκουρο Καθηγητή Χαρίλαο Γιώτη και Καθηγητή Ιωάννη Γήτα, για τη συμβολή τους στη βελτίωση του γραπτού μου και την ενδιαφέρουσα (ελπίζω για όλους) συζήτηση κατά την παρουσίαση μου.

Όλα αυτά τα χρόνια, το εργαστήριο αποτέλεσε σημαντικό κομμάτι της ζωής μου και παρότι υπήρξαν δυσκολίες και άγχη, στο τέλος μένουν μόνο ευχάριστες αναμνήσεις. Γι' αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνάντησα αυτά τα χρόνια μέσα και γύρω από το εργαστήριο Βοτανικής/Μικροβιακής Οικολογίας. Ειδικότερα, να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες, Σοφία Ματσίνγκο, Οδυσσέα Πιπεράγκα και Στέφανο Μόσχο, με τους οποίους μοιράστηκα ανησυχίες, προβληματισμούς αλλά και στιγμές χαράς. Ευχαριστώ επίσης τη Δρ. Αλεξάνδρα Μεζίτη για την ευχάριστη παρέα στο εργαστήριο και τον Γεώργιο Χιουρέα για την βοήθεια του με τα πειράματα πεδίου στους χώρους του ιδρύματος. Κλείνοντας, οφείλω ένα ευχαριστώ στο προσωπικό της γραμματείας του τμήματος ΒΕΤ, για την εξυπηρέτηση τους όποτε χρειάστηκε.

Μακριά από το εργαστήριο ένα πλήθος ανθρώπων με βοήθησε με διάφορους τρόπους, ώστε να καταφέρω να φτάσω εδώ. Ξεκινώντας από τους γονείς μου, στους οποίους οφείλω χίλια ευχαριστώ για τον σεβασμό τους στις επιλογές μου και τη βοήθεια τους με κάθε δυνατό μέσο. Στον πατέρα μου οφείλω και μια συγγνώμη, καθώς ο αργός ρυθμός μου δεν του επέτρεψε να είναι μαζί μας για να χαρεί αυτή τη στιγμή (ξέρω πως θα χαιρόταν περισσότερο και από εμένα). Πολλά ευχαριστώ οφείλω και στις τρεις αδερφές μου, οι οποίες με στήριζαν περισσότερο απ' ό,τι έπρεπε. Κλείνοντας, να ευχαριστήσω τη σύντροφο μου Φωτεινή, η οποία είναι η κινητήριος δύναμη για ό,τι κάνω, και τους γονείς της, οι οποίοι με φιλοξένησαν επί μακρόν απ' όταν έπαψα να είμαι μόνιμος κάτοικος Ιωαννίνων.

Βανικιώτης Θεόφιλος
Πάτρα, Γενάρης 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
Από τα αερόστατα στους δορυφόρους	2
Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων και ψηφιακών εικόνων	8
Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και βλάστηση	10
Τηλεπισκόπηση της βλάστησης	14
Ολική πρωτογενής παραγωγικότητα	16
Μοντέλα αποδοτικότητας χρήσης φωτός.....	21
Ο δείκτης βλάστησης PRI	26
Γιατί τηλεπισκόπηση;.....	31
ΣΚΟΠΟΣ	33
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	35
Περιοχές μελέτης	35
Μετεωρολογικά δεδομένα	38
Δορυφορικά δεδομένα	39
MODIS.....	39
MSI (Sentinel-2).....	43
OLCI (Sentinel-3).....	44
Δεδομένα eddy covariance	46
Μοντέλο παραγωγικότητας sCASE	48
Αξιολόγηση sCASE	50
Υδατικά scalar.....	51
Επίδραση διάχυτης ακτινοβολίας.....	54
sCASE και χωρική ανάλυση	58
Ταξινόμηση βλάστησης.....	60
PRI.....	61
MODIS PRI	61
Αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ).....	63
Επίγειες μετρήσεις	66
Επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας	66
Μέτρηση υδατικού δυναμικού	66

Μέτρηση συγκέντρωσης φωτοσυνθετικών χρωστικών	67
Στατιστική ανάλυση	67
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	69
Αξιολόγηση μοντέλου sCASE	72
Υδατικά scalar και sCASE.....	80
Η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στο sCASE	84
Χωρική ανάλυση του sCASE.....	90
Ο δείκτης Photochemical Reflectance Index (PRI).....	99
MODIS PRI	105
Ο PRI χωρίς κριτήρια γωνιών λήψης.....	106
Ο PRI και οι γωνίες λήψης.....	110
Το εύρος τιμών της ϵ	115
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	119
Το μοντέλο παραγωγικότητας sCASE.....	119
Αξιολόγηση διαφορετικών υδατικών scalars	123
Αξιολόγηση scalars για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στη GPP	125
Η επίδραση της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων του sCASE	130
Ο δείκτης PRI.....	133
MODIS PRI	135
Τηλεπισκόπηση, δυνατότητες και μειονεκτήματα	139
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	141
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	145
ABSTRACT	147
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	149

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

APAR	Absorbed Photosynthetically Active Radiation. Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που έχει απορροφηθεί από τη βλάστηση (μmol φωτονίων $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).
Chl/Car	Ο λόγος χλωροφυλλών προς καροτενοειδή.
CI	Cloudiness Index. Δείκτης νεφοκάλυψης.
AVHRR	Advanced Very-High-Resolution Radiometer. Πολυφασματικός δορυφορικός αισθητήρας
CPM	Canopy Photosynthesis Models. Μοντέλα φωτοσύνθεσης θόλου.
C_{scalar}	Cloud scalar. Εξίσωση για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην παραγωγικότητα.
D_{scalar}	Developmental scalar. Εξίσωση για την επίδραση του αναπτυξιακού σταδίου στην παραγωγικότητα.
DBF	Deciduous Broadleaf Forest. Δάσος φυλλοβόλων πλατύφυλλων.
EBF	Evergreen Broadleaf Forest. Δάσος αειθαλών πλατύφυλλων.
eddy-GPP	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα όπως μετρήθηκε με την τεχνική eddy covariance.
ENF	Evergreen Needleleaf Forest. Δάσος αειθαλών κωνοφόρων.
ET_0	Reference evapotranspiration. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς θεωρείται η απώλεια νερού από πρότυπη επιφάνεια (πυκνό γρασιδί σε ύψος 1m).
fAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation. Το ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας που απορροφάται από τη βλάστηση.
FLUXNET2015	Πακέτο δεδομένων από τους πύργους eddy covariance που συμμετέχουν στο δίκτυο fluxnet.
GPP	Gross Primary Productivity. Ολική πρωτογενής παραγωγικότητα ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$).
LAI	Leaf Area Index. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας ενός θόλου ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).
LSWI	Land Surface Water Index. Δορυφορικός δείκτης νερού.
LUE ή ϵ	Light Use Efficiency. Ο ρυθμός μετατροπής του φωτός σε βιομάζα ή αλλιώς η αποδοτικότητα χρήσης φωτός ($\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ απορροφημένων φωτονίων).
MF	Mixed Forest. Μεικτό δάσος.
MOD17-GPP	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα από το μοντέλο LUE του MODIS. Διατίθεται στο προϊόν MOD17A2 με χωρική ανάλυση 500 μέτρων.
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Πολυφασματικός δορυφορικός αισθητήρας.
MODIS-LUE	Μοντέλο παραγωγικότητας LUE που βασίζεται σε δεδομένα MODIS και υπολογίζει την GPP σε παγκόσμιο επίπεδο.
MSI	Multi-Spectral Instrument. Πολυφασματικός δορυφορικός αισθητήρας.
ND27	Normalized Difference of bands 2 and 7. Φασματικός δείκτης νερού.
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index. Φασματικός δείκτης.
NDWI	Normalized Difference Water Index. Φασματικός δείκτης νερού.

NEE	Net Ecosystem Exchange. Καθαρή ροή CO ₂ μεταξύ ατμόσφαιρας και οικοσυστήματος (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹).
NMDI	Normalized Multi-band Drought Index. Φασματικός δείκτης νερού.
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument. Πολυφασματικός δορυφορικός αισθητήρας
PAR	Photosynthetically Active Radiation. Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (μmol φωτονίων m ⁻² s ⁻¹).
PAR _{potential}	Η δυναμική PAR ή αλλιώς η PAR στην κορυφή της ατμόσφαιρας.
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density. Ροή φωτονίων στη περιοχή της PAR (μmol φωτονίων m ⁻² s ⁻¹).
PRI	Photochemical Reflectance Index. Φασματικός δείκτης.
RAA	Relative Azimuth Angle. Η διαφορά μεταξύ των γωνιών azimuth αισθητήρα και ηλίου.
RDVI	Renormalized Difference Vegetation Index. Φασματικός δείκτης.
RZA	Relative Zenith Angle. Η διαφορά μεταξύ των γωνιών zenith αισθητήρα και ηλίου.
sCASE	Μοντέλο υπολογισμού της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας βασισμένο στην αρχή αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ε).
sCASE _{full_MSI-GPP}	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα υπολογισμένη από το sCASE με δεδομένα του αισθητήρα MSI και την ταξινόμηση ανά pixel 10 μέτρων.
sCASE _{MODIS-GPP}	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα υπολογισμένη από το sCASE με δεδομένα του αισθητήρα MODIS.
sCASE _{MSI-GPP}	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα υπολογισμένη από το sCASE με δεδομένα του αισθητήρα MSI.
sCASE _{OLCI-GPP}	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα υπολογισμένη από το sCASE με δεδομένα του αισθητήρα OLCI.
SiF	Solar induced Fluorescence. Φθορισμός χλωροφύλλης.
SNAP	Sentinel Application Platform. Λογισμικό επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων.
SW radiation	Shortwave radiation. Η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.
SWC	Soil Water Content. Περιεχόμενο νερό στο έδαφος.
T _{scalar}	Temperature scalar. Εξίσωση για την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγικότητα.
TOA	Top Of Atmosphere. Η κορυφή της ατμόσφαιρας.
VPD	Vapor Pressure Deficit. Έλλειμα κορεσμού υδρατμών στην ατμόσφαιρα (%)
VZA	View Zenith Angle. Η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου και της ευθείας αισθητήρα στόχου.
W _{scalar}	Water scalar. Εξίσωση για την επίδραση της υδατικής κατάστασης στην παραγωγικότητα.
WB	Water Balance. Υδατικό ισοζύγιο για δεδομένο χρονικό διάστημα.
ε ₀	Μέγιστη τιμή αποδοτικότητας (ειδοειδική παράμετρος).
ε ₀ -GPP	Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα υπολογισμένη ως το γινόμενο της ε ₀ και της APAR.
ε _d	Η αποδοτικότητα για το σύνολο της ημέρας.

ϵ_{ih}	Η αποδοτικότητα για ένα συγκεκριμένο ημίωρο.
ϵ_{ov}	Η αποδοτικότητα κατά την στιγμή της διέλευσης του αισθητήρα.
Ψ	Δυναμικό νερού (MPa)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τηλεπισκόπηση (remote sensing) είναι η επιστήμη ή και τέχνη απόκτησης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή ένα φαινόμενο με την ανάλυση δεδομένων που αποκτήθηκαν από απόσταση (Lillesand et al., 2004). Αυτός ο γενικός ορισμός δεν προσδιορίζει ούτε τον στόχο, ούτε την μορφή με την οποία μεταφέρεται η πληροφορία στο όργανο μέτρησης (αισθητήρα). Ωστόσο, η τηλεπισκόπηση είναι εν πολλοίς συνδεδεμένη με την παρατήρηση της γήινης επιφάνειας με την χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και έτσι συχνά απαντώνται πολύ πιο ειδικοί ορισμοί όπως αυτός των Campbell και Wynne (2011): «Τηλεπισκόπηση είναι η πρακτική 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». Αν από τον ορισμό αυτό υπονοείται η σύνδεση της τηλεπισκόπησης με την δημιουργία εικόνων, αυτό γίνεται ξεκάθαρο στον ορισμό των Buiten και Clevers (1993) «η τηλεπισκόπηση αναφέρεται στον εξοπλισμό, τις τεχνικές και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της επιφάνειας της γης, συνήθως με την δημιουργία μιας εικόνας σε ένα σημείο που βρίσκεται σε απόσταση από την επιφάνεια».

Οι διαφορετικοί ορισμοί μπορούν να προκαλέσουν σύγχυση (Fussell et al., 1986), καθώς στη περίπτωση του γενικού ορισμού, τηλεπισκόπηση ορίζεται η μελέτη οποιουδήποτε στόχου όπως παραδείγματος χάριν άλλα ουράνια σώματα ή ένα κύτταρο στο μικροσκόπιο. Επιπλέον ο ορισμός αυτός συμπεριλαμβάνει και τη χρήση μη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως είναι τα ηχητικά κύματα που χρησιμοποιούνται στα σόναρ. Στην πράξη όμως, ο όρος τηλεπισκόπηση ταυτίζεται με την παρακολούθηση της γης (earth observation) μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και χωρίζεται σε δυο βασικές κατηγορίες, ενεργητική και παθητική, βάσει της πηγής της υπό ανίχνευση ακτινοβολίας (Campbell and Wynne, 2011; Kerle et al., 2004). Η παθητική τηλεπισκόπηση, που είναι και η πιο διαδεδομένη, ανιχνεύει την φυσική ακτινοβολία του περιβάλλοντος (κυρίως ηλιακή ακτινοβολία), ενώ στην περίπτωση της ενεργητικής ακτινοβολίας ο δέκτης ανιχνεύει ακτινοβολία που εκπέμπεται από το ίδιο το όργανο.

Από τα αερόστατα στους δορυφόρους

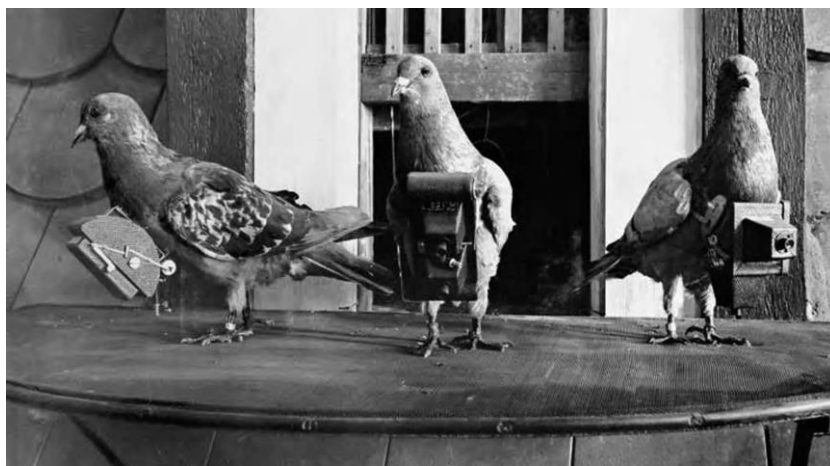
Ο όρος τηλεπισκόπηση εμφανίζεται την δεκαετία του 1950 και αποδίδεται στην Αμερικανίδα γεωγράφο Evelyn Pruitt (Fussell et al., 1986), αλλά οι ρίζες της εντοπίζονται στον 19^ο αιώνα και τις πρώτες αεροφωτογραφίες. Μετά την εφεύρεση της φωτογραφίας το 1827 από τον Γάλλο εφευρέτη Nicéphore Niépce και της εξέλιξης της σε φορητή συσκευή (γνωστή ως δαγκεροτυπία) από τον Louis Daguerre το 1839 (Cohen, 2000), υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον για τη λήψη φωτογραφιών της γήινης επιφάνειας από ψηλά. Η πρώτη αεροφωτογραφία χρονολογείται από το 1858 όταν ο Γάλλος Gaspard-Felix Tournachon φωτογράφησε ένα γαλλικό χωριό μέσα από ένα αερόστατο, αν και η παλαιότερη σωζόμενη αεροφωτογραφία είναι του 1860 από τον James Wallace Black (Madry, 2013), που επίσης μέσα από αερόστατο φωτογράφησε την Βοστώνη από ύψος 365 μέτρων (Εικόνα 1). Το 1888 ο George Eastman παρουσίασε το πρώτο φωτογραφικό φιλμ (Moore, 1979) που θα αντικαθιστούσε τις ογκώδεις φωτογραφικές πλάκες και θα αποδειχθεί καθοριστικό για την εξέλιξη της αεροφωτογραφίας.



Εικόνα 1. Η παλαιότερη σωζόμενη αεροφωτογραφία. Το 1860 ο James Wallace Black φωτογράφησε την Βοστώνη μέσα από ένα αερόστατο σε ύψος 365 μέτρων (www.metmuseum.org).

Παράλληλα, προσπάθειες γίνονται για την λήψη αεροφωτογραφιών με την χρήση πυραύλων και χαρταετών. Ο Σουηδός εφευρέτης Alfred Nobel πιστώνεται την ιδέα της ενσωμάτωσης φωτογραφικής μηχανής σε πύραυλο. Το 1897, έναν χρόνο μετά τον θάνατο του, συνεργάτες του χρησιμοποιώντας δικά του σχέδια τράβηξαν την πρώτη αεροφωτογραφία από πύραυλο (Skoog, 2010). Όσον αφορά την αεροφωτογραφία με τη χρήση χαρταετών, η πρώτη επιτυχημένη λήψη τοποθετείται στην δεκαετία του 1880 και αποδίδεται είτε στον Γάλλο Arthur Batut είτε τον Άγγλο Douglas Archibald. Ωστόσο, η σημαντικότερη στιγμή της αεροφωτογραφίας με τη χρήση χαρταετού

θα έρθει στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και στην Αμερική, όπου ο George Lawrence το 1906 θα φωτογραφήσει από ύψος 600 μέτρων το San Francisco μετά τον καταστροφικό σεισμό των 7,9 ρίχτερ, καταγράφοντας για πρώτη φορά μια φυσική καταστροφή σε μεγάλη κλίμακα (Madry and Pelton, 2010). Η έλευση του νέου αιώνα συνοδεύτηκε από πολλές εξελίξεις στον τομέα της αεροφωτογραφίας. Το 1903 στη Γερμανία ο Julius Neubronner ανέπτυξε μια μικρή φωτογραφική μηχανή την οποία προσάρμοσε στο στήθος περιστεριών (Εικόνα 2) και κατάφερα να ανακτήσει φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά την διάρκεια της πτήσης τους (Laffly, 2020; Madry, 2013). Παρ' ότι παράδοξη αυτή η εφεύρεση κέντρισε το ενδιαφέρον ακόμη και κρατικών στρατών κατά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο. Την ίδια χρονιά ο Γερμανός μηχανικός Alfred Maul ανέπτυξε έναν πύραυλο με ενσωματωμένη φωτογραφική συσκευή που παρείχε μεγαλύτερη σταθερότητα και συνεπώς ευκρινέστερη φωτογραφία από αυτήν του Nobel, με την πρώτη φωτογραφία από το σύστημα αυτό να χρονολογείται από το 1906 (Cohen, 2000). Όμως όλες αυτές οι τεχνικές αεροφωτογραφίας θα επισκιαστούν από την λήψη αεροφωτογραφιών από αεροπλάνο που εγκαινιάστηκε το 1908 από τον L.P. Bonvillain (με πιλότο τον Wilbur Wright) στην Γαλλία (Cohen, 2000), αν και θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται για κάποιες δεκαετίες ακόμα.

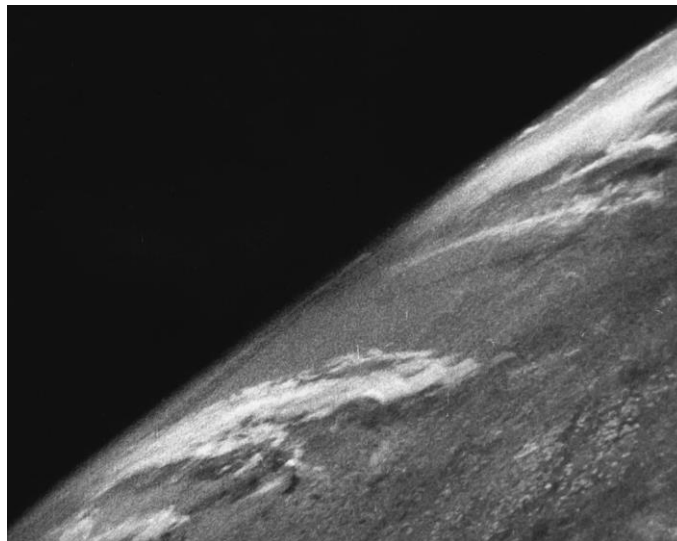


Εικόνα 2. Το 1903 περιστέρια χρησιμοποιήθηκαν από τον Julius Neubronner ως ιπτάμενοι παπαράτσι (commons.wikimedia.org).

Η πρώτη συστηματική λήψη και ανάλυση αεροφωτογραφιών πραγματοποιείται κατά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο για την καταγραφή των θέσεων των αντιμαχόμενων πλευρών και πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τυπικών φωτογραφικών μηχανών προσαρμοσμένων σε αεροπλάνο (Cracknell, 2018). Αυτή ήταν και η αυγή της φωτοερμηνείας, της αναγνώρισης και καταγραφής δηλαδή αντικειμένων με τη χρήση αεροφωτογραφιών. Κατά τη διάρκεια του πολέμου εξελίχθηκε από τους Αμερικανούς η φωτογραφία στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος που είχε παρουσιαστεί το 1910 από τον Robert Wood (Wood, 1913) και πρόσφερε νέες δυνατότητες διάκρισης της βλάστησης από τεχνητά αντικείμενα. Μετά τον πόλεμο οι αεροφωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα για μη στρατιωτικούς σκοπούς και αποδείχτηκαν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την κατασκευή χαρτών. Ο προσδιορισμός των διαστάσεων των αντικειμένων και της γεωμετρίας τους στο χώρο με τη χρήση αεροφωτογραφιών που αναπτύχθηκε αυτήν την περίοδο είναι γνωστός ως φωτογραμμετρία. Πρωτοπόρος στην αέρια φωτογραφία και στην κατασκευή σχετικών χαρτών ήταν ο Sherman Fairchild, Αμερικανός εφευρέτης, που είχε κατασκευάσει την δική του φωτογραφική μηχανή ειδικά για χρήση σε αεροπλάνο. Το 1921 συνδύασε περίπου εκατό

αεροφωτογραφίες για να δημιουργήσει έναν χάρτη του Manhattan που γνώρισε σημαντική εμπορική επιτυχία και λίγο αργότερα ανέλαβε (και έφερε σε πέρας) να φωτογραφήσει δυσπρόσιτες δασικές περιοχές του Καναδά (Doyle, 1980). Τις δεκαετίες του 1920 και 1930 στις Η.Π.Α. υπήρξε μια εκτεταμένη λήψη αεροφωτογραφιών καλύπτοντας περίπου τα δυο τρίτα της επιφάνειας της χώρας με έμφαση στην καταγραφή των γεωργικών εκτάσεων. Επιπλέον, το 1936 θα καταγραφεί για πρώτη φορά η καμπυλότητα της γης σε φωτογραφία του Albert Stevens από ένα αερόστατο σε ύψος 22 χιλιομέτρων (Cohen, 2000).

Κατά την διάρκεια του μεσοπολέμου και κυρίως στη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου θα αναπτυχθούν όργανα τηλεπισκόπησης (αισθητήρες) ικανά να ανιχνεύουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκτός του ορατού και των κοντινών υπέρυθρων και υπεριωδών τμημάτων του φάσματος. Τα πρώτα ραντάρ που λειτουργούσαν με μικροκύματα αλλά και τα πρώτα συστήματα λήψης της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας αναπτύχθηκαν αυτή την περίοδο (Cohen, 2000). Ειδικά τα ραντάρ, εκτός του ότι ως ενεργητικοί αισθητήρες μπορούσαν να χρησιμοποιούνται και το βράδυ, χαρακτηρίζονται από την ικανότητα των μικροκυμάτων να διαπερνούν τα νέφη και την υγρασία, παρέχοντας τη δυνατότητα μέτρησης ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών (Richards, 2009). Η δυνατότητα αποτύπωσης εκτός του ορατού τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος θεωρείται πως οδήγησε την Evelyn Pruitt στον όρο τηλεπισκόπηση, θέλοντας έτσι να διαχωρίσει τον νέο-αναδυόμενο κλάδο από την κλασική φωτογραφία (Fischer et al., 1975). Με το τέλος του πολέμου η εξέλιξη της τηλεπισκόπησης παίρνει φρενήρεις ρυθμούς. Το 1946 τραβήχτηκε η πρώτη φωτογραφία της γης από το διάστημα (περίπου 123 χιλιόμετρα από την επιφάνεια) όταν Αμερικανοί ερευνητές τοποθέτησαν μια φωτογραφική μηχανή σε έναν πύραυλο V-2 πριν τον εκτοξεύσουν (Εικόνα 3). Αυτήν την αρχική δοκιμή ακολούθησαν πολλές εκτοξεύσεις πυραύλων V-2 με φωτογραφικές μηχανές με μέγιστο ύψος λήψης τα 160 χιλιόμετρα (King and Herring, 2003).



Εικόνα 3. Η πρώτη φωτογραφία της γης από το διάστημα, μέσα από έναν πύραυλο V-2 (spcaecenter.org).

Δυο σημαντικά γεγονότα της δεκαετίας του 1950 θα καθορίσουν το μέλλον της τηλεπισκόπησης και θα θέσουν τις βάσεις γι' αυτό που γνωρίζουμε σήμερα ως τηλεπισκόπηση. Η δημιουργία ψηφιακών εικόνων και η εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου. Ήταν το 1957 που ο Αμερικανός Russell Kirsch δημιούργησε την πρώτη ψηφιακή εικόνα σε υπολογιστή, αν και θα χρειαστούν αρκετά χρόνια για την εξέλιξη τους. Μια ψηφιακή εικόνα αποτελείται από ένα πλήθος

εικονοστοιχείων (pixels) διατεταγμένων σε δυο διαστάσεις, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από έναν ψηφιακό αριθμό (digital number, DN) που αντιπροσωπεύει την ένταση της ακτινοβολίας σε αυτό (Gonzalez and Woods, 2017). Τα αριθμητικά δεδομένα των ψηφιακών εικόνων αυξάνουν τις δυνατότητες ανάλυσης και εξαγωγής συμπερασμάτων από αυτές και σε συνδυασμό με την εξέλιξη των υπολογιστών απογειώσαν τις δυνατότητες της τηλεπισκόπησης (Jensen, 1996). Το όργανο που μετρά την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται ραδιόμετρο και αν μπορεί να διακρίνει και να μετρήσει την ένταση της ακτινοβολίας σε διάφορα τμήματα (κανάλια) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ονομάζεται φασματοραδιόμετρο. Για να παραχθεί μια εικόνα μιας περιοχής ένας αισθητήρας που φέρει φασματοραδιόμετρο σαρώνει την περιοχή, γι' αυτό αποκαλούνται και σαρωτές, είτε μηχανικά (οπτικοί-μηχανικοί σαρωτές) είτε ηλεκτρονικά (ηλεκτρονικοί σαρωτές) (Campbell and Wynne, 2011). Βάση του αριθμού και του εύρους των καναλιών που χρησιμοποιεί ένας αισθητήρας διακρίνονται τρεις κατηγορίες, οι πανχρωματικοί (panchromatic), οι πολυφασματικοί (multispectral) και οι υπερφασματικοί (hyperspectral). Οι πανχρωματικοί αισθητήρες καταγράφουν σε μια μόνο περιοχή που καλύπτει μεγάλο κομμάτι του φάσματος, οι πολυφασματικοί (που είναι οι πιο διαδεδομένοι) χρησιμοποιούν περιορισμένο αριθμό καναλιών μεσαίου εύρους και τέλος οι πιο εξελιγμένοι υπερφασματικοί αισθητήρες καταγράφουν σε δεκάδες κανάλια πολύ μικρού εύρους.

Το άλλο σημαντικό γεγονός της δεκαετίας του 1950 θα έρθει από την Σοβιετική Ένωση, επίσης το 1957, με την εκτόξευση του Sputnik, του πρώτου τεχνητού δορυφόρου. Ο Sputnik παρέμεινε σε τροχιά γύρω από τη γη για τρεις μήνες και παρότι δεν διέθετε κάποιο σύστημα απεικόνισης εγκαινίασε μια νέα εποχή. Η πρώτη εικόνα της γης από δορυφόρο τροχιάς ανήκει πάντως σε αυτήν την δεκαετία και τραβήχτηκε στις 14 Αυγούστου του 1959 πάνω από το Μεξικό από τον Explorer 6 της NASA (National Aeronautics and Space Administration). Τον επόμενο χρόνο η NASA θέτει σε τροχιά τον πρώτο μετεωρολογικό δορυφόρο που ονομάστηκε Television and Infrared Observation Satellite (TIROS-1), που παρέμεινε λειτουργικός για 78 ημέρες παρέχοντας πλήθος φωτογραφιών που κατέγραψαν συστήματα νεφών αλλά και τον σχηματισμό καταιγίδων (Madry, 2013). Τα επόμενα χρόνια ο ψυχρός πόλεμος θα τροφοδοτήσει μια σειρά από κατασκοπευτικούς δορυφόρους υψηλής ανάλυσης τόσο από τις Η.Π.Α. όσο και από τη Σοβιετική Ένωση (πρόγραμμα CORONA και δορυφόροι Zenit αντίστοιχα) αλλά και επανδρωμένες διαστημικές αποστολές. Η πρώτη φωτογραφία της γης από το διάστημα τραβηγμένη από άνθρωπο ανήκει στον Ρώσο κοσμοναύτη Gherman Titov και τραβήχτηκε στις 6 Αυγούστου του 1961. Ενώ το 1968 κατά την διάρκεια της αποστολής Apollo 8 τραβήχτηκε μια φωτογραφία της γης από το φεγγάρι (Εικόνα 4) που γέννησε την ιδέα της συστηματικής δορυφορικής παρακολούθησης της γήινης επιφάνειας και οδήγησε στον Landsat 1 το 1972 (Madry, 2013).



Εικόνα 4. Η φωτογραφία της γης τραβηγμένη από το φεγγάρι το 1968 κατά την διάρκεια της αποστολής Apollo 8 (www.nasa.gov).

Ο Landsat 1 που αρχικά είχε ονομαστεί Earth Resources Technology Satellite (ERTS) ήταν ο πρώτος δορυφόρος που είχε αποκλειστικό σκοπό τη μελέτη του φυσικού περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων της γης και ουσιαστικά εγκαινίασε την δορυφορική μελέτη της βλάστησης. Το βασικό του όργανο, ένας πολυφασματικός αισθητήρας (Multi-Spectral Scanner, MSS) σχεδιάστηκε ακριβώς για αυτό τον σκοπό από την Virginia Norwood, που συνεργάστηκε επί χρόνια με επιστήμονες από διάφορα πεδία μελέτης της γης με τη χρήση επίγειων φασματοραδιόμετρων. Το πρόγραμμα Landsat αποτελεί το μακροβιότερο δορυφορικό πρόγραμμα παρακολούθησης της γης, με τον Landsat 9 να τίθεται σε τροχιά το 2021. Από το 1972 και την εκτόξευση του Landsat-1 η εξέλιξη της τηλεπισκόπησης της βλάστησης ήταν συνεχής και αλματώδης. Τις δεκαετίες που ακολούθησαν πλήθος δορυφόρων που διέθεταν μια ποικιλία αισθητήρων διαφορετικών χαρακτηριστικών βρέθηκαν σε τροχιά γύρω από την γη. Παράλληλα εξελίχθηκαν και τα επίγεια όργανα τηλεπισκόπησης και χρησιμοποιήθηκε και ένας νέος φορέας αισθητήρων, τα μη επανδρωμένα αεροναυτικά οχήματα (Unmanned Aerial Vehicle, UAV). Το 1975 παρουσιάζεται το πρώτο φορητό φασματοραδιόμετρο που κάλυπτε το ορατό και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (Portable Field Reflectance Spectrometer, PFRS, Goetz, 1975), που θεωρείται το πρώτο υπερφασματικό όργανο και καθόρισε σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη των αισθητήρων (Milton et al., 2009). Το 1978 θα εγκαινiasτεί ο αισθητήρας Advanced Very-High-Resolution Radiometer (AVHRR) με την εκτόξευση του δορυφόρου TIROS-N. Ο AVHRR αρχικά σχεδιάστηκε για μετεωρολογική χρήση όμως χρησιμοποιήθηκε εκτενέστατα για την μελέτη της βλάστησης και αποτελεί το δεύτερο μακροβιότερο πρόγραμμα παρακολούθησης της βλάστησης μετά τον Landsat συνεχίζοντας έως σήμερα. Το 1979 πραγματοποιείται η πρώτη πτήση μη επανδρωμένου αεροπλάνου εξοπλισμένου με φωτογραφική μηχανή για ερευνητικούς σκοπούς, πάνω από έναν αρχαιολογικό χώρο (Przybilla and Wester-Ebbinghaus, 1979). Την επόμενη χρονιά ο Wester-Ebbinghaus θα χρησιμοποιήσει για πρώτη φορά ελικόπτερο για να αποφύγει τους κραδασμούς του αεροπλάνου.

Το 1986 η πρεμιέρα της Γαλλίας στη δορυφορική τηλεπισκόπηση της βλάστησης με την εκτόξευση του Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) σηματοδοτεί την αγωγή των εμπορικών δορυφόρων, δηλαδή δορυφόρων που δεν αναπτύσσονται ούτε διαχειρίζονται από κρατικές υπηρεσίες (Madry, 2013). Ο πολυφασματικός αισθητήρας Moderate Resolution Imaging

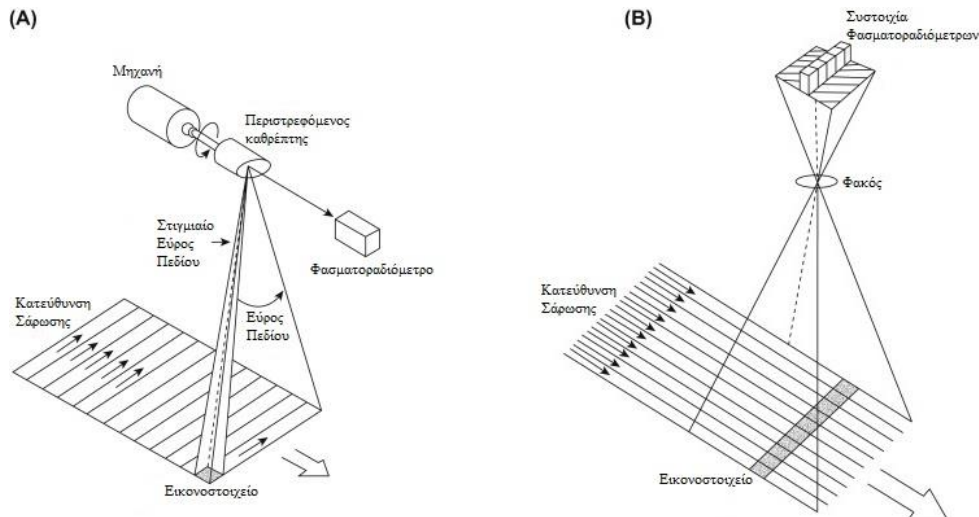
Spectroradiometer (MODIS) αποτελεί ένα σημαντικό βήμα της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Δυο πανομοιότυποι αισθητήρες τέθηκαν σε τροχιά με δυο διαφορετικούς δορυφόρους τη νέα χιλιετία (ο Terra τον Δεκέμβρη του 1999 και ο Aqua το 2002) στα πλαίσια του προγράμματος EOS (Earth Observing System) της NASA. Ο MODIS παρέχει ένα μεγάλο αριθμό καναλιών που καλύπτουν διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η μεγάλη καινοτομία του προγράμματος αυτού είναι η δωρεάν διάθεση των δεδομένων, που έπαιξε τεράστιο ρόλο στην εξάπλωση της τηλεπισκόπησης. Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι επίσης η καθημερινή λήψη για ολόκληρη την επιφάνεια της γης. Επιπλέον, στην αυγή της νέας χιλιετίας, το 2000, τέθηκε σε τροχιά ο πρώτος δορυφόρος (ο EO-1 της NASA) που έφερε υπερφασματικό αισθητήρα (Hyperion). Σχεδόν είκοσι χρόνια αργότερα, ένας σημαντικός αριθμός υπερφασματικών αισθητήρων έχουν τεθεί σε τροχιά, αν και οι περιορισμοί στις λήψεις και τη διάθεση των δεδομένων τους, δεν επιτρέπουν τη γενικευμένη χρήση τους.

Τέλος, ίσως το πιο φιλόδοξο δορυφορικό πρόγραμμα παρακολούθησης της γης έως σήμερα, το Copernicus του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency, ESA) ξεκίνησε το 2014 και αφορά έξι τύπους δορυφόρων (Sentinel) διαφορετικών χαρακτηριστικών. Το πρόγραμμα Copernicus με το σύνολο των δορυφόρων που περιλαμβάνει έχει ως στόχο τη μελέτη της ατμόσφαιρας, της ξηράς και των ωκεανών. Ακολουθώντας το παράδειγμα της NASA, η ESA διαθέτει τα προϊόντα των Sentinel δωρεάν. Η χρήση δορυφόρων αυξάνεται συνεχώς και αυτή τη στιγμή σχεδόν 12000 δορυφόροι (διαφόρων χρήσεων) βρίσκονται σε τροχιά γύρω από την γη (https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf_id=), με ένα σημαντικό ποσοστό αυτών να μην είναι ωστόσο εν λειτουργία. Αξίζει να σημειωθεί πως το 2022 εκτοξεύθηκαν σχεδόν 2500 νέοι δορυφόροι, ένας αριθμός ρεκόρ, που αναμένεται ωστόσο να ξεπεραστεί φέτος.

Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων και ψηφιακών εικόνων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το φασματοραδιόμετρο είναι το όργανο που μετράει την ένταση της ακτινοβολίας σε διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που εφεξής θα ονομάζονται κανάλια. Συνοπτικά, η ακτινοβολία που φτάνει στο όργανο διαχωρίζεται στα επιμέρους κανάλια (με φίλτρα, πρίσματα ή μέσα περίθλασης), μεταφέρεται σε ξεχωριστούς φωτοδέκτες για κάθε κανάλι, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα η ένταση του οποίου καταγράφεται ως αριθμός. Η ακτινοβολία που φτάνει στο όργανο σε μια δεδομένη στιγμή προέρχεται από μια περιοχή της γης που καθορίζεται από την γωνία λήψης του οργάνου, γνωστή και ως στιγμιαίο εύρος πεδίου (Instantaneous Field of View, IFOV), και την απόσταση του από τον στόχο (Mather and Koch, 2010). Τα φασματοραδιόμετρα χρησιμοποιούνται στην επίγεια τηλεπισκόπηση, ενώ στην εναέρια και δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιούνται αισθητήρες (ή αλλιώς σαρωτές) που είναι απεικονιστικά όργανα, δηλαδή δημιουργούν ψηφιακές εικόνες για περιοχές που ξεπερνούν το στιγμιαίο εύρος πεδίου τους. Οι πρώτοι πολυφασματικοί αισθητήρες κατασκευάστηκαν την δεκαετία του 1960 από αμερικάνικα πανεπιστήμια και εταιρίες για λογαριασμό της NASA, και αρχικά δοκιμάστηκαν πάνω σε αεροπλάνα. Υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι σάρωσης της περιοχής για την δημιουργία της δυσδιάστατης ψηφιακής εικόνας, βάση των οποίων οι αισθητήρες διακρίνονται σε οπτικούς-μηχανικούς και ηλεκτρονικούς (Campbell and Wynne, 2011; Kerle et al., 2004).

Οι οπτικοί-μηχανικοί αισθητήρες διαθέτουν ένα φασματοραδιόμετρο και με την χρήση καθρεπτών ρυθμίζεται η περιοχή από την οποία προέρχεται η ακτινοβολία κάθε στιγμής. Οι καθρέφτες κινούνται κάθετα στην κίνηση του αισθητήρα μετακινώντας συνεχώς το στιγμιαίο εύρος πεδίου ώστε να καλύψουν το συνολικό εύρος πεδίου (Field of View, FOV), τη μέγιστη δηλαδή γωνία σάρωσης. Έτσι η κίνηση του αισθητήρα καθορίζει την μια διάσταση της εικόνας ενώ η κίνηση των καθρεπτών την άλλη (Εικόνα 5A). Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως σάρωση διαγραμμιζόμενης τροχιάς (across-track scan). Οι ηλεκτρονικοί σαρωτές από την άλλη, διαθέτουν μια συστοιχία από φασματοραδιόμετρα κάθετα στη κίνηση του αισθητήρα, που το καθένα μετρά ένα τμήμα του εύρους πεδίου δημιουργώντας τη δεύτερη διάσταση της εικόνας (Εικόνα 5B). Η διάταξη αυτή είναι γνωστή ως συσκευή συζευγμένου φορτίου (charge-coupled device, CCD) και το είδος της σάρωσης ονομάζεται διαμήκους τροχιάς (along-track scan). Η πλειοψηφία των σύγχρονων αισθητήρων ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία, η οποία υπερτερεί καθώς αυξάνει το χρόνο έκθεσης (dwell time) κάθε περιοχής, αυξάνοντας έτσι και τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο (signal to noise ratio) (Billingsley, 1984). Ο θόρυβος αφορά λανθασμένη καταγραφή φωτεινότητας από τον αισθητήρα, είναι εγγενές πρόβλημα των αισθητήρων που καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. απόσταση από τον στόχο), και είναι ιδιαίτερα αισθητός σε χαμηλές εντάσεις σήματος. Και στους δύο τύπους το στιγμιαίο εύρος πεδίου σε συνάρτηση με το ύψος καθορίζουν τη χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα και κατ' επέκταση το ελάχιστο μέγεθος εικονοστοιχείου της εικόνας, ενώ το εύρος πεδίου σε συνδυασμό με το ύψος του αισθητήρα καθορίζουν το πλάτος σάρωσης του αισθητήρα (swath).

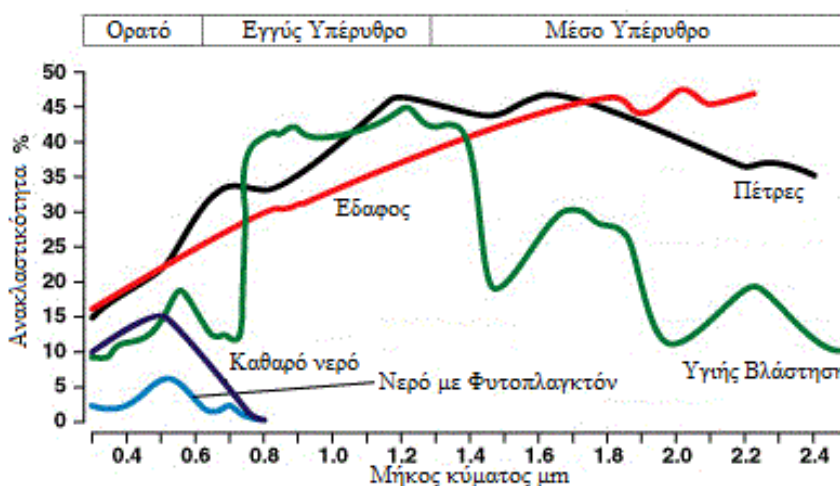


Εικόνα 5. (Α) Αισθητήρας σάρωσης διαγραμμιζόμενης τροχιάς (across-track scan). (Β) Αισθητήρας σάρωσης διαμήκουσ τροχιάς (along-track scan). (προσαρμογή από το *Introduction to satellite remote sensing*, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04517-8>).

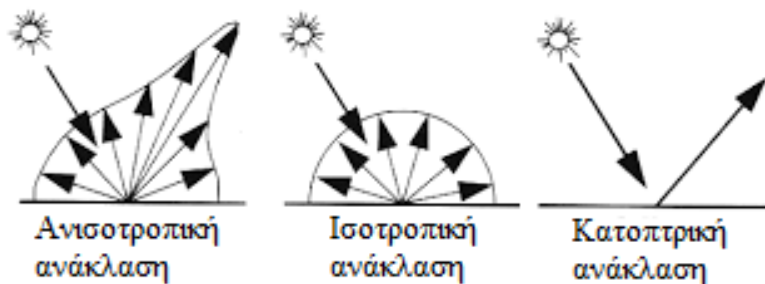
Το ελάχιστο μέγεθος του εικόναστοιχείου μιας εικόνας είναι γνωστό ως χωρική ανάλυση (spatial resolution) και είναι μια από τις τέσσερις μορφές ανάλυσης των ψηφιακών εικόνων, που συνολικά καθορίζουν την διακριτική της ικανότητα. Οι άλλες τρεις είναι η φασματική (spectral), η ραδιομετρική (radiometric) και η χρονική (temporal) (Campbell and Wynne, 2011; Kerle et al., 2004). Τα χαρακτηριστικά του κάθε αισθητήρα καθορίζουν τη μέγιστη δυνατή ανάλυση (κάθε τύπου) της παραγόμενης από αυτόν εικόνας, η οποία δύναται όμως να διαφοροποιείται μετά την επεξεργασία. Ο αριθμός των καναλιών, το εύρος τους καθώς και τα μήκη κύματος που περιλαμβάνουν αποτελούν τη φασματική ανάλυση της εικόνας και εν πολλοίς καθορίζουν τις χρήσεις της. Παρότι τα πολλά κανάλια μικρού εύρους των υπερφασματικών αισθητήρων είναι ιδανικά για την τηλεπισκόπηση, εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στον θόρυβο σε σχέση με κανάλια μεγαλύτερου εύρους, ειδικά σε όργανα με μικρό χρόνο έκθεσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε μια ψηφιακή εικόνα η ένταση της ακτινοβολίας καταγράφεται ως ψηφιακός αριθμός, δηλαδή ως σειρά δυαδικών τιμών (bit). Το εύρος των πιθανών τιμών που μπορεί να περιέχει η εικόνα, δηλαδή η διακριτική ικανότητα της έντασης της ακτινοβολίας (ελάχιστη διαφορά ενέργειας), είναι η ραδιομετρική ανάλυση. Τέλος, η χρονική ανάλυση αφορά την συχνότητα με την οποία καταγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος, με άλλα λόγια τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών καταγραφών του ίδιου στόχου. Ειδικά στην περίπτωση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης η χρονική ανάλυση μπορεί να διακριθεί στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δυο καταγραφών όπως προαναφέρθηκε και στον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών καταγραφών υπό την ίδια γωνία λήψης (απόλυτη χρονική ανάλυση). Ο συνδυασμός υψηλής ανάλυσης όλων των τύπων είναι ουσιαστικά ανέφικτος, λόγω του όγκου δεδομένων που αυτό θα παρήγαγε, έτσι τα τελικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα είναι το αποτέλεσμα συμβιβασμών μεταξύ των τεσσάρων τύπων ανάλυσης (Lechner et al., 2020).

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και βλάστηση

Η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην τηλεπισκόπηση στην ουσία δεν αποτελεί επιλογή, αλλά επιβάλλεται από την ίδια τη φύση του κόσμου στον οποίο ζούμε. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι παντού γύρω μας, είτε πρόκειται για το φως του ήλιου, είτε φυσικά εκλυόμενη ακτινοβολία από υλικά στη γη ή τεχνητά παραγόμενη από την ανθρωπότητα. Η χρήση της στην τηλεπισκόπηση βασίζεται στην αλληλεπίδραση της με την ύλη, η οποία ποικίλει ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τα χαρακτηριστικά της ύλης (επιφάνεια, σύσταση κ.τ.λ.). Όταν η ακτινοβολία έρχεται σε επαφή με ένα αντικείμενο είτε απορροφάται από αυτό, είτε το διαπερνά είτε τέλος ανακλάται σε αυτό (Avery and Berlin, 1992; Campbell and Wynne, 2011). Η ποσόστωση των τριών αυτών τύπων αλληλεπίδρασης ανά μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καθορίζει την φασματική του υπογραφή (ή φασματική απόκριση) και το καθιστά διακριτό από τα άλλα υλικά (Huete, 2004). Στην τηλεπισκόπηση (τόσο στην παθητική όσο και την ενεργητική) υπολογίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται από ένα υλικό, γνωστό ως ανακλαστικότητα (reflectance), ο λόγος δηλαδή της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία, και η φασματική υπογραφή δίνεται ως γραφική αναπαράσταση της ανακλαστικότητας ανά μήκος κύματος. Παραδείγματα φασματικών υπογραφών κάποιων τυπικών υλικών που βρίσκονται στην γήινη επιφάνεια δίνονται στην Εικόνα 6. Εξαιρέσεις αποτελούν η τηλεπισκόπηση στο θερμικό υπέρυθρο και ο φθορισμός, όπου ανιχνεύεται η εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Η μέτρηση της ανακλαστικότητας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς η ανακλώμενη ακτινοβολία σπανίως αποτελείται από μια δέσμη φωτός (κατοπτρική ανάκλαση), αντιθέτως, οι περισσότερες επιφάνειες σκεδάζουν την ακτινοβολία προς διάφορες κατευθύνσεις (διάχυτη ανάκλαση). Παρ' ότι είναι δυνατή η ανάκλαση προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ένταση (ισοτροπική ανάκλαση), συνήθως η ακτινοβολία ανακλάται ανισοτροπικά, δηλαδή, η ανακλώμενη ακτινοβολία διαφέρει σε ένταση ανάλογα με τη γωνία φωτισμού και παρατήρησης. Η ανισοτροπική ανάκλαση περιγράφεται μαθηματικά από την συνάρτηση κατανομής αμφικατευθυνόμενης ανακλαστικότητας (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF, Εικόνα 7) (Nicodemus et al., 1977).



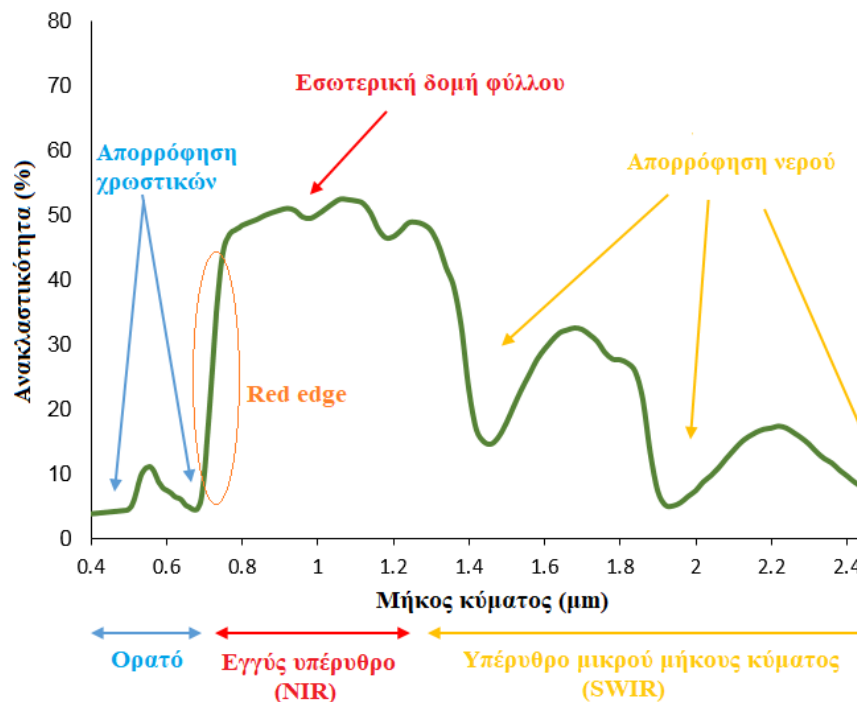
Εικόνα 6. Φασματικές υπογραφές κάποιων τυπικών επιφανειών (προσαρμογή από το www.usna.edu).



Εικόνα 7. Η ανάκλαση του φωτός σε μια επιφάνεια καθορίζεται από τις ιδιότητες της. Οι ιδανικές συνθήκες ανάκλασης όπως η κατοπτρική και η ισοτροπική σπάνια απαντώνται στη φύση. Αντιθέτως, η ανάκλαση είναι συνήθως ανιστροπική.

Το πιο απλό παράδειγμα της αναγνώρισης χαρακτηριστικών της ύλης βάσει της αλληλεπίδρασης της με την ακτινοβολία, είναι η αντίληψη των χρωμάτων, με το χρώμα ενός αντικειμένου να καθορίζεται από τα μήκη κύματος του ορατού φωτός που ανακλά. Παραδείγματος χάριν, η βασική χρωστική των φύλλων, η χλωροφύλλη, απορροφά την μπλε (450-495 νανόμετρα, nm) και την κόκκινη (620-700 nm), ενώ ανακλά την πράσινη (495-570 nm) ακτινοβολία προσδίδοντας τους το χαρακτηριστικό τους χρώμα (Myneni and Ross, 1991). Μάλιστα, η μπλε και η κόκκινη ακτινοβολία απορροφούνται σε ποσοστό που φτάνει και το 90%, πολύ υψηλότερο από το ποσοστό απορρόφησης της πράσινης, και είναι τα δυο τμήματα του φάσματος που τροφοδοτούν με ενέργεια την φωτοσύνθεση. Οι χρωστικές του φύλλου κυριαρχούν στην αλληλεπίδραση του με το ορατό τμήμα (400-700 nm) της ακτινοβολίας, με τις αλλαγές στην αναλογία τους να είναι σε κάποιες περιπτώσεις ορατές ακόμη και δια γυμνού οφθαλμού, όπως συμβαίνει με το κιτρίνισμα των φύλλων πριν τη νέκρωση τους (Junker and Ensminger, 2016). Ωστόσο, η αλληλεπίδραση της βλάστησης με την ακτινοβολία δεν περιορίζεται στο ορατό τμήμα του φάσματος. Το 1933 ο F.C. Bawden παρατήρησε ότι κάποια συμπτώματα ιογενών φυτικών ασθενειών ήταν ορατά σε υπέρυθρο φιλμ χωρίς να μπορούν να διακριθούν στο ορατό, ενώ το 1956 ο Colwell, σε μια έρευνα ορόσημο για την τηλεπισκόπηση, χρησιμοποίησε την φασματική απόκριση υγείων και νεκρών φυτών στο ορατό και στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος για να καταγράψει τα απαραίτητα φιλμ και φίλτρα για τον εντοπισμό ασθενειών σε φυτά (Steddom et al., 2005).

Η υπέρυθρη περιοχή του φάσματος (0,7-15 μικρόμετρα, μm), όπου η βλάστηση ανακλά εντονότερα σε σχέση με το ορατό, έχει αποδειχθεί πολύτιμη για την μελέτη της βλάστησης (Myneni and Ross, 1991). Τα εσωτερικά δομικά στοιχεία του φύλλου (μεσόφυλλο) ανακλούν στην εγγύς υπέρυθρη (Near Infrared, NIR) ακτινοβολία (0,7-1,3 μm), όπου η ανάκλαση είναι εντονότερη ακόμη και από αυτήν στην πράσινη περιοχή, ενώ τα μόρια του νερού που βρίσκονται στους φυτικούς ιστούς απορροφούν κυρίως σε περιοχές της υπέρυθρης μικρού μήκους κύματος (Short-wavelength Infrared, SWIR) ακτινοβολίας (1,3-3 μm) (Curran, 1989; Knipling, 1970). Η μετάβαση από την υψηλή απορρόφηση της κόκκινης ακτινοβολίας στην υψηλή ανάκλαση της εγγύς υπέρυθρης είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της βλάστησης, και η περιοχή του φάσματος στην οποία πραγματοποιείται αυτή η μετάβαση είναι γνωστή ως red edge (Mather and Koch, 2010). Στην Εικόνα 8 δίνεται ένα τυπικό φάσμα ανακλαστικότητας ενός υγιούς φύλλου όπου φαίνονται οι περιοχές ενδιαφέροντος που περιγράφηκαν παραπάνω.



Εικόνα 8. Ένα τυπικό φάσμα ανακλαστικότητας στο ορατό και υπέρυθρο, ενός υγιούς φύλλου. Στο ορατό κυριαρχεί η απορρόφηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών, στο εγγύς υπέρυθρο η έντονη ανακλαστικότητα των δομικών συστατικών της βλάστησης, ενώ χαρακτηριστική είναι η έντονη μετάβαση μεταξύ των δυο στη περιοχή γνωστή ως red edge. Στη περιοχή του SWIR είναι ορατές οι περιοχές απορρόφησης του νερού (προσαρμογή από gsp.humboldt.edu).

Οι μεταβάσεις από το φύλλο στο θόλο και από τις επίγειες στις εναέριες και πολύ περισσότερο στις δορυφορικές λήψεις, ενέχουν αρκετές δυσκολίες καθώς η πολυπλοκότητα αυξάνεται κατακόρυφα. Η σύνθετη γεωμετρία του θόλου που δημιουργούν τα πολλά επίπεδα φύλλων (διαφορετικού μάλιστα προσανατολισμού το καθένα), αλλά και τα υπόλοιπα συστατικά της βλάστησης, η σκίαση που δημιουργούν τα εξωτερικά στρώματα στο εσωτερικό του θόλου, καθώς και οι διαφορετικές ιδιότητες των φύλλων σκιάς, σε σχέση με τα φύλλα φωτός, καθιστούν την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με έναν θόλο πολύπλοκη. Επιπλέον, η διαφορετική διαπερατότητα της βλάστησης ανά μήκος κύματος και η εξάρτηση όλων των παραπάνω από την γωνία του ηλίου περιπλέκουν ακόμη περισσότερο την κατάσταση (Campbell and Wynne, 2011; Jackson, 1983). Για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τον θόλο έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που βασίζονται στην θεωρία μετάδοσης της ακτινοβολίας (Radiative Transfer Theory) και αναπαριστούν μαθηματικά την ανάκλαση, την απορρόφηση και την διάδοση της ακτινοβολίας ανά μήκος κύματος (Radiative Transfer Models) (Anderson, 1971; Jacquemoud and Baret, 1990; Myneni et al., 1989; Ross, 1981). Γενικά, η ανακλαστικότητα του θόλου είναι μικρότερη από αυτή ενός μεμονωμένου φύλλου, κυρίως λόγω της σκίασης, με την μείωση να είναι μεγαλύτερη στο ορατό απ' ό,τι στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Συγκεκριμένα, στο ορατό η ανάκλαση ενός τυπικού θόλου είναι περίπου 3-5% έναντι του 10% που είναι σε ένα τυπικό φύλλο, ενώ και στο υπέρυθρο η ανάκλαση του θόλου πέφτει στο 35% από το 50% ενός φύλλου (Knippling, 1970). Για τον υπολογισμό της φασματικής συμπεριφοράς ενός οικοσυστήματος έχουν προταθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα ανακλαστικότητας θόλου (canopy reflectance models), που λαμβάνουν υπόψη την φασματική συμπεριφορά του φύλλου, την δομή του θόλου, το ανάγλυφο, την ανακλαστικότητα

υποορόφου/εδάφους και τις γωνίες ηλίου/παρατήρησης (Goel, 1988; Hall et al., 1995; Verheof, 1984).

Στην περίπτωση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης εκτός από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τον στόχο (εν προκειμένω τη βλάστηση) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ανακλώμενη ακτινοβολία καθώς αυτή επιστρέφει στον αισθητήρα. Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ακτινοβολία διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες, την σκέδαση, την απορρόφηση και την διάθλαση (Campbell and Wynne, 2011; Kaufman, 1984), με τα διάφορα μήκη κύματος να επηρεάζονται διαφορετικά. Εκτός από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας η ένταση της επίδρασης της ατμόσφαιρας εξαρτάται από την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία σε αυτήν και από τη σύσταση της ατμόσφαιρας (μέγεθος και αφθονία σωματιδίων και αερίων). Όπως είναι λογικό, αυτές οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατμόσφαιρας και ακτινοβολίας υφίστανται και κατά την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα από το διάστημα και καθορίζουν την ένταση και τα τμήματα της ακτινοβολίας που φτάνουν στην επιφάνεια της γης.

Δείκτες βλάστησης

Η ανακλαστικότητα φύλλων και θόλου χρησιμοποιείται για τη μελέτη της βλάστησης κυρίως με τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης, δηλαδή μαθηματικών τύπων που συνδυάζουν διάφορα κανάλια και μπορούν να σχετιστούν με κάποια ιδιότητα της βλάστησης (Bannari et al., 1995; Campbell and Wynne, 2011). Συνήθως οι δείκτες βλάστησης κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε δυο κανάλια που εμφανίζουν διαφορετική απόκριση σε ένα χαρακτηριστικό της βλάστησης, είτε χρησιμοποιώντας δύο κανάλια από τα οποία μόνο το ένα επηρεάζεται από το επιθυμητό χαρακτηριστικό πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο καλύτερη σχέση από επιμέρους φασματικές περιοχές (Asrar et al., 1984). Οι δείκτες βλάστησης από δορυφορικά δεδομένα ωστόσο, κληρονομούν την ευαισθησία στους εξωτερικούς παράγοντες που επιδρούν στις επιμέρους ανακλαστικότητες (που περιγράφηκαν παραπάνω) και καθώς τα διάφορα τμήματα του φάσματος επηρεάζονται διαφορετικά από αυτούς μπορούν να προκύψουν σφάλματα στις σχέσεις των δεικτών με τα χαρακτηριστικά της βλάστησης. Παρότι ο μαθηματικός συνδυασμός (ειδικά ο λόγος) διαφορετικών καναλιών μειώνει την επίδραση της σκίασης, του ανάγλυφου και της ατμοσφαιρας (Huete et al., 2014; Zhang and Ni-meister, 2014), ακόμη και αυτοί οι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται δείκτες βλάστησης από διαφορετικές περιοχές ή χρονικές στιγμές (Bannari et al., 1995). Σύμφωνα με τον Jackson (1983) ο ιδανικός δείκτης βλάστησης πρέπει να είναι ευαίσθητος σε κάποιο χαρακτηριστικό της βλάστησης, να μην επηρεάζεται από την ανακλαστικότητα του εδάφους, και να μην είναι ευαίσθητος σε εξωγενείς επιδράσεις (ατμοσφαιρικές, περιβαλλοντικές, γεωμετρίας λήψης και φωτισμού).

Ο πρώτος δείκτης βλάστησης που κατασκευάστηκε ήταν ένας απλός λόγος (SR, simple ratio) της ανακλαστικότητας στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή (R_{NIR}) προς την ανακλαστικότητα στη κόκκινη περιοχή (R_{red}) (Jordan, 1969), που εκμεταλλευόταν τη διαφορετική φασματική απόκριση της βλάστησης σε αυτά τα δυο τμήματα της ακτινοβολίας, ένα χαρακτηριστικό που δεν απαντάται σε άλλα υλικά. Η αντίθεση της ανακλαστικότητας σε αυτές τις δυο περιοχές του φάσματος είναι ένα μέτρο της φυσιολογίας και της δομής του φύλλου, με την μεγαλύτερη αντίθεση να παρατηρείται σε υγιή πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα και την μικρότερη σε καταπονημένα φύλλα. Σε επίπεδο θόλου η μέγιστη αντίθεση παρατηρείται σε πυκνούς θόλους με ακμαία φύλλα, μειούμενη όσο αραιώνει η βλάστηση και αυξάνεται η καταπόνηση, ενώ ελαχιστοποιείται όταν δεν υπάρχει βλάστηση (Huete et al., 2014). Τη δεκαετία που ακολούθησε ο δείκτης SR μελετήθηκε εκτενέστατα (Colwell, 1974, 1973; Pearson and Miller, 1972) και εφαρμόστηκε μάλιστα στα πρώτα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα από τον LANDSAT (Carnegie et al., 1974; Rouse et al., 1973). Στη συνέχεια ο δείκτης αυτός κανονικοποιήθηκε στο όριο -1, 1 και ονομάστηκε VI (Deering, 1978; Rouse et al., 1974, 1973) αλλά κατέληξε να γίνει γνωστός ως NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Tucker, 1979). Ο NDVI είναι ο λόγος της διαφορά της ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο και το κόκκινο προς το άθροισμα τους:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad [1]$$

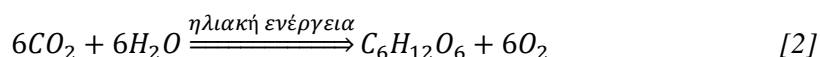
Ο NDVI είναι ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάστησης και έχει συνδεθεί κατά καιρούς με διάφορα χαρακτηριστικά της βλάστησης όπως τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI, Asrar et al., 1985, 1984; Myneni et al., 2002), το ποσοστό της απορροφούμενης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, fAPAR, Goward and Huemmrich, 1992; Myneni and Williams, 1994), το ποσοστό φυτοκάλυψης (fractional vegetation cover, fc, Carlson and Ripley, 1997; Xiao and Moody, 2005) καθώς και με την καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα (NPP, Net Primary Productivity, Goward et al., 1985; Tucker et al.,

1986; Tucker and Sellers, 1986). Η ποικιλία εφαρμογών του NDVI κατέδειξε από πολύ νωρίς τη σημασία του για την μελέτη των χερσαίων οικοσυστημάτων και ήδη από το 1985 (πρώτος παγκόσμιος χάρτης NDVI από τον AVHRR, Justice et al., 1985) παράγονται παγκόσμιοι χάρτες NDVI σε διάφορες χωρικές και χρονικές αναλύσεις. Ωστόσο, ο NDVI εμφανίζει κάποια εγγενή μειονεκτήματα με τα σοβαρότερα να αφορούν τον κορεσμό του σε μέτρια πυκνότητα θόλου (τιμές LAI 3 με 5) (Goel, 1989; Gu et al., 2013; Huete et al., 1997), την ευαισθησία του στις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την ευαισθησία του στην ανακλαστικότητα του εδάφους (Huete, 1988; Huete and Liu, 1994). Διάφοροι δείκτες έχουν προταθεί ως αντικαταστάτες του NDVI για να αντιμετωπίσουν αυτά τα μειονεκτήματα, όπως ο EVI (Enhanced Vegetation Index, Huete et al., 2002), ο ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index, Kaufman and Tanré, 1992) και ο SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, Huete, 1988), με καθέναν τους βέβαιο να έχει τα δικά του μειονεκτήματα. Ένα σημαντικό κοινό μειονέκτημα αυτών των δεικτών είναι η χρήση σταθερών παραμετροποίησης της επίδρασης αυτών των παραγόντων (Huete et al., 2014).

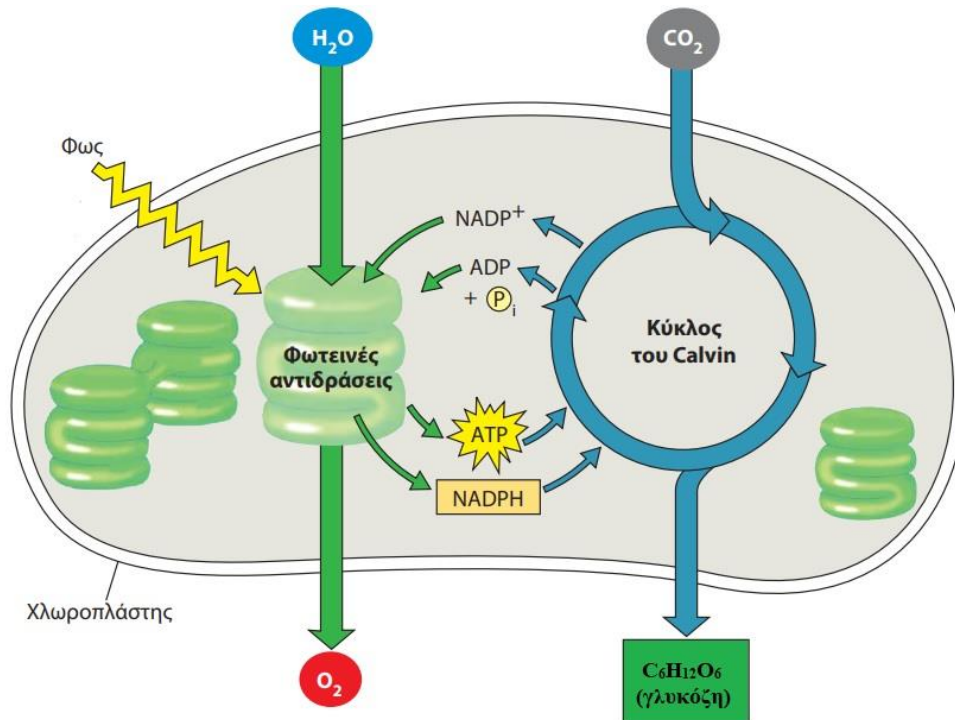
Οι δείκτες βλάστησης τύπου NDVI, δείκτες δηλαδή που βασίζονται στην διαφορά της ανακλαστικότητας στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο, έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της φαινολογίας (περιοδικές βιολογικές διεργασίες) και της δυναμικής (κατάσταση, λειτουργία, αλληλεπίδραση με άλλους παράγοντες) της βλάστησης (Huete et al., 2014). Κάποιες βασικές εφαρμογές αυτών των δεικτών περιλαμβάνουν την διάκριση των περιοχών που καλύπτονται από βλάστηση από άλλους τύπους κάλυψης, την παρακολούθηση της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου, την διάκριση υγιούς και μη βλάστησης και την αποτύπωση των επιπτώσεων επιβαρυντικών παραγόντων (καταπόνηση) μεταξύ άλλων (Jackson, 1983; Philipson and Teng, 1988; Teng, 1990; Tucker, 1979). Δείκτες που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας και κανάλια σε άλλα τμήματα του φάσματος επέτρεψαν την παρακολούθηση και οικοφυσιολογικών διεργασιών μέσω της ανίχνευσης συγκεκριμένων βιοχημικών συστατικών, όπως οι φωτοσυνθετικές χρωστικές (Gitelson et al., 2005, 2002, 2001) και το νερό (Ceccato et al., 2001; Hunt and Rock, 1989). Σημαντικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η εξέλιξη της φασματικής ανάλυσης των αισθητήρων που έδωσε την δυνατότητα της ανίχνευσης σε διάφορα στενά κανάλια του φάσματος, επιτρέποντας τον ακριβέστερο εντοπισμό συγκεκριμένων συστατικών (Carter and Knapp, 2001; Goetz et al., 1985; Qian, 2021) και επέκτεινε τις δυνατότητες των δεικτών βλάστησης. Ωστόσο, στο σύνολο τους οι σχέσεις των δεικτών βλάστησης με τις παραμέτρους της βλάστησης είναι εμπειρικές και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες (π.χ. τύπος βλάστησης, τοπογραφία), γεγονός που συχνά καθιστά την γενίκευσή τους (χωρικά και χρονικά) προβληματική (Goward and Huemmrich, 1992; Sellers, 1985). Επιπλέον, η βάση αυτών των εμπειρικών σχέσεων απαιτεί περεταίρω διερεύνηση καθώς διάφορες παράμετροι της βλάστησης δύναται να επιδρούν ταυτόχρονα σε έναν δείκτη, καθιστώντας τη σχέση του με μια συγκεκριμένη παράμετρο επισφαλής (Huete et al., 2014; Verstraete and Pinty, 1996). Στον αντίποδα, παρότι πολλοί δείκτες βλάστησης έχουν βρεθεί να σχετίζονται καλά με πάνω από μια παραμέτρους της βλάστησης, κανένας δείκτης δεν μπορεί να αποτυπώσει πλήρως τη δομική και λειτουργική πολυπλοκότητα της βλάστησης. Για να επιτευχθεί μια όσο το δυνατόν πληρέστερη εικόνα της βλάστησης απαιτείται ο συνδυασμός δεικτών ή η χρήση ενός δείκτη σε συνδυασμό με μετεωρολογικά και άλλα βοηθητικά δεδομένα (π.χ. τοπογραφία, ταξινόμηση) (Disney, 2016; Huete et al., 2014).

Ολική πρωτογενής παραγωγικότητα

Η φωτοσύνθεση είναι μια πολύπλοκη διεργασία που περιλαμβάνει πολλά στάδια και από την οποία παράγονται οργανικά μόρια με ενέργεια που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και άνθρακα που προέρχεται από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας (Ridge, 2002). Παρ' ότι υπάρχουν οργανισμοί (βακτήρια) που πραγματοποιούν αναερόβια φωτοσύνθεση, η πλειοψηφία της φωτοσύνθεσης είναι αερόβια, δηλαδή εκτός από γλυκόζη παράγει και οξυγόνο. Συνοπτικά, η (αερόβια) φωτοσύνθεση είναι η διαδικασία σύνθεσης γλυκόζης (C₆H₁₂O₆) με τη χρήση CO₂, νερού (H₂O) και ηλιακής ακτινοβολίας με την ταυτόχρονη απελευθέρωση οξυγόνου, όπως δίνεται στην παρακάτω χημική εξίσωση:



Η φωτοσύνθεση πραγματοποιείται στους χλωροπλάστες και χωρίζεται σε δυο φάσεις (Εικόνα 9), τις φωτεινές αντιδράσεις, που αφορούν την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε χημική ενέργεια, και τις σκοτεινές αντιδράσεις, που χρησιμοποιούν την ενέργεια που παρήχθη από τις φωτεινές αντιδράσεις για την αναγωγή του CO₂ προς γλυκόζη (Campbell et al., 2008; Ridge, 2002). Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές, που είναι υπεύθυνες για την δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας, βρίσκονται συνδεδεμένες με πρωτεΐνες στις μεμβράνες των θυλακοειδών των χλωροπλαστών, σχηματίζοντας δυο διαφορετικές λειτουργικές μονάδες τα φωτοσυστήματα I και II (PSI και PSII). Συνοπτικά, η απορρόφηση φωτονίων από τις χρωστικές οδηγεί στην διέγερση δυο μορίων χλωροφύλλης (στο κέντρο αντίδρασης των φωτοσυστημάτων) από τα οποία αποσπώνται δύο ηλεκτρόνια (ένα ηλεκτρόνιο από κάθε μόριο χλωροφύλλης). Το ζεύγος ηλεκτρονίων μεταφέρεται μέσω μιας πολύπλοκης αλυσίδας μεταφοράς από το εσωτερικό των θυλακοειδών στο εξωτερικό μέρος της μεμβράνης (προς το στρώμα των χλωροπλαστών) όπου μαζί με ένα ιόν υδρογόνου αναγάγουν το NADP⁺ σε NADPH. Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων έχει ως αποτέλεσμα την είσοδο στο εσωτερικό των θυλακοειδών, ιόντων υδρογόνου που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ATP. Το NADPH και το ATP είναι τα τελικά προϊόντα των φωτεινών αντιδράσεων και περιέχουν την ενέργεια σε χημική μορφή. Για την αναπλήρωση των δυο ηλεκτρονίων που χάνονται, ενέργεια από την απορρόφηση ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για την διάσπαση (φωτόλυση) του νερού σε δυο ηλεκτρόνια (που αντικαθιστούν αυτά που χάθηκαν), σε δυο ιόντα υδρογόνου και οξυγόνο (που απελευθερώνεται) (Campbell et al., 2008). Οι σκοτεινές αντιδράσεις πραγματοποιούνται αποκλειστικά στο στρώμα των χλωροπλαστών, δεν απαιτούν την άμεση παρουσία φωτός (εξού και το όνομα) και είναι γνωστές και ως κύκλος του Calvin. Οι σκοτεινές αντιδράσεις εκκινούν με την πρόσδεση μορίων CO₂ στη διφωσφοριβουλόζη (RuBP) μέσω της δράσης του ενζύμου καρβοξυλάση της διφωσφοριβουλόζης (RuBisCO), διαδικασία που είναι γνωστή ως δέσμευση του άνθρακα (carbon fixation). Συνολικά ο κύκλος περιλαμβάνει ένα πλήθος αντιδράσεων που οδηγούν στην παραγωγή γλυκόζης (για την παραγωγή ενός μορίου γλυκόζης απαιτούνται έξι επαναλήψεις του κύκλου) με την κατανάλωση της ενέργειας των φωτεινών αντιδράσεων, ενώ η RuBP αναγεννάται και είναι εκ νέου διαθέσιμη (Campbell et al., 2008).



Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση της φωτοσύνθεσης σε έναν χλωροπλάστη. Κατά τις φωτεινές αντιδράσεις η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε χημική ενέργεια, η οποία τροφοδοτεί τις σκοτεινές αντιδράσεις. Κατά τις σκοτεινές αντιδράσεις, γνωστές και ως κύκλος του Calvin, το CO₂ ανάγεται προς γλυκόζη (Βιολογία, Campbell & Reece 2011).

Όπως γίνεται εμφανές από τα παραπάνω, η φωτοσύνθεση αποτελεί την απόλυτη αποτύπωση της δυναμικής της βλάστησης, καθώς επηρεάζεται τόσο από την κατάσταση της όσο και από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Έτσι, η παρακολούθηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας παρέχει την πληρέστερη εικόνα ενός φυτού. Η μέτρηση της φωτοσύνθεσης σε επίπεδο φύλλου είναι καλά τεκμηριωμένη εδώ και δεκαετίες, όμως η μέτρηση της σε επίπεδο οικοσυστήματος αποτελεί ακόμη ζητούμενο (Ryu et al., 2019; Xiao, 2014). Η συνολική φωτοσυνθετική δραστηριότητα ενός οικοσυστήματος, εκφρασμένη ως αφομοίωση CO₂ ανά επιφάνεια και χρόνο, ονομάζεται ολική πρωτογενής παραγωγικότητα (Gross Primary Productivity, GPP). Η GPP των χερσαίων οικοσυστημάτων αποτελεί τη μεγαλύτερη ροή άνθρακα μεταξύ ατμόσφαιρας και βιόσφαιρας, γεγονός που την καθιστά βασικό στοιχείο του κύκλου του άνθρακα και της λειτουργίας του πλανήτη (Beer et al., 2010; Le Quéré et al., 2018; Ruimy et al., 1999). Επιπλέον, η GPP θεωρείται ιδιαίτερα καθοριστικής σημασίας στην εξέλιξη της κλιματικής αλλαγής, και πιστεύεται ότι έχει συγκρατήσει την αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα (Battin et al., 2009; Bruhwiler et al., 2018), εμφανίζοντας σταθερή αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες (Anav et al., 2015) δρώντας αντίρροπα στις αυξημένες ανθρωπογενείς εκπομπές (Beer et al., 2010; Le Quéré et al., 2018). Μάλιστα, σύμφωνα με τους Zeng et al. (2020) η GPP μεταξύ 1999 και 2019 αυξανόταν με έναν ρυθμό της τάξης του 0,5 Pg C year⁻¹ για να καταλήξει το 2019 στα 142 Pg C year⁻¹. Η σταδιακή αύξηση της χερσαίας παραγωγικότητας που παρατηρείται, έχει αποδοθεί στην αύξηση της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου (Piao et al., 2007; Zhao and Running, 2010). Ο κρίσιμος ρόλος της GPP σε έναν ραγδαία μεταβαλλόμενο κύκλο του άνθρακα καθιστά επιτακτικό τον ακριβή υπολογισμό της, ωστόσο, η ποσοτικοποίηση της έχει αποδειχθεί μεγάλη πρόκληση καθώς εμπλέκονται πολλές βιοχημικές διεργασίες που ποικίλουν στο χώρο και τον χρόνο (Jarvis, 1995; Osmond et al., 1980), με μεγάλη

εξάρτηση από τις μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία, βροχόπτωση, ηλιοφάνεια). Μια μελέτη σύγκρισης διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της GPP σε παγκόσμιο επίπεδο για την περίοδο 1990-2010, βρήκε πως οι μέσες ετήσιες τιμές μεταξύ των μεθόδων κυμαίνονταν από 112 έως 169 Pg C year⁻¹ (Anav et al., 2015).

Το πρόβλημα του ακριβούς υπολογισμού της GPP πηγάζει από το ότι δεν υπάρχει καμία μέθοδος απευθείας μέτρησης της φωτοσύνθεσης σε μεγάλη κλίμακα (Anav et al., 2015; Xiao, 2014). Ότι πιο κοντά σε μέτρηση της GPP διαθέσιμο σήμερα είναι η μέθοδος eddy covariance, που επιτρέπει την έμμεση καταγραφή της GPP, μέσω της ανάλυσης της ροής του CO₂ μεταξύ ενός οικοσυστήματος και της ατμόσφαιρας (Baldocchi, 2003; Burba, 2013). Εν συντομία, η κίνηση των αέριων μαζών μπορεί να διακριθεί σε επιμέρους στροβιλιζόμενα «πακέτα», γνωστά ως eddies, καθένα από τα οποία περιέχει διαφορετικές συγκεντρώσεις αερίων και κινείται στο χώρο με δική του ταχύτητα. Η τεχνική eddy covariance αποτελεί την καταγραφή των eddies σε μια περιοχή μεταξύ οικοσυστήματος και ατμόσφαιρας, και τον υπολογισμό της καθαρής ροής του CO₂ από ή προς την ατμόσφαιρα. Ο υπολογισμός της καθαρής ροής αφορά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και γίνεται μέσω πολύπλοκων εξισώσεων που απαιτούν κάποιες παραδοχές, κυρίως όσον αφορά την τρισδιάστατη κίνηση των eddies. Η κατακόρυφη ροή που υπολογίζεται από αυτές τις εξισώσεις, γνωστή ως καθαρή ανταλλαγή του οικοσυστήματος (Net Ecosystem Exchange, NEE), είναι η διαφορά μεταξύ των καθοδικών ροών (GPP) και των ανοδικών (αναπνοή), για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο διαχωρισμός της NEE σε GPP και αναπνοή του οικοσυστήματος (ecosystem respiration), είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλές παραδοχές και πιθανόν εισάγει σφάλμα στην τιμή της GPP (Lasslop et al., 2012; Papale et al., 2006; Reichstein et al., 2005).

Η καταγραφή των eddies πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη μέτρηση της συγκέντρωσης του CO₂ από έναν υπέρυθρο αναλυτή αερίων, και της κίνησης (κατεύθυνσης και ταχύτητας) του ανέμου με ένα ανεμόμετρο υπερήχων. Τα όργανα αυτά τοποθετούνται πάνω από την επιφάνεια του θόλου σε δομές που ονομάζονται πύργοι (eddy towers), και παρέχουν δεδομένα για μια περιορισμένη περιοχή (ίχνος του πύργου) που εκτείνεται κάποιες εκατοντάδες μέτρα γύρω από τον πύργο. Το σχήμα και το μέγεθος της περιοχής αυτής καθορίζονται από το ύψος του πύργου, την τοπογραφία της περιοχής, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου (Baldocchi et al., 1996; Schmid, 2002; Turner et al., 2003). Εκτός από την περιορισμένη χωρική κάλυψη και τον επισφαλή διαχωρισμό της NEE, άλλα μειονεκτήματα της μεθόδου eddy covariance είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η ανάγκη επίπεδων επιφανειών για την εφαρμογή της (Baldocchi, 2003; Baldocchi and Vogel, 1996).

Παρότι το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνικής eddy covariance διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1895 από τον Osborne Reynolds, η εφαρμογή της άρχισε μόλις τη δεκαετία του εβδομήντα και χρειάστηκαν άλλες δυο δεκαετίες για να γίνει εφικτή η συνεχής εφαρμογή της για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Baldocchi, 2003; Wofsy et al., 1993). Σήμερα λειτουργούν εκατοντάδες πύργοι eddy covariance παγκοσμίως και οι μετρήσεις τους αποτελούν βασικά δεδομένα αναφοράς για την αξιολόγηση όλων των άλλων μεθόδων υπολογισμού της GPP (Turner et al., 2003; Xiao, 2014; Xiao et al., 2019). Αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος eddy covariance μπορεί να εφαρμοστεί για την καταγραφή των ροών διάφορων αερίων πέρα από το CO₂ (π.χ. υδρατμοί, μεθάνιο), καθώς και ροών ενέργειας.

Ως μέθοδοι υπολογισμού της GPP λογίζονται όλες οι μέθοδοι έμμεσης ποσοτικοποίησης της GPP, που περιλαμβάνουν τους δείκτες βλάστησης, τον φθορισμό της χλωροφύλλης (solar induced fluorescence, SiF), τις τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning) και τα μοντέλα παραγωγικότητας (Xiao et al., 2019). Η σχέση μεταξύ δεικτών βλάστησης και παραγωγικότητας έχει μελετηθεί σε διάφορα οικοσυστήματα και τα προβλήματα της έχουν καταγραφεί εκτενώς (Huang et al., 2019), ενώ είναι κοινώς αποδεκτό πως οι δείκτες βλάστησης αντιπροσωπεύουν την

φωτοσυνθετική δυνατότητα της βλάστησης παρά την φωτοσυνθετική δραστηριότητα αυτή καθ' αυτή (Xiao et al., 2019). Η απευθείας συσχέτιση του φθορισμού της χλωροφύλλης με την GPP σε μεγάλη κλίμακα είναι μια σχετικά σύγχρονη προσέγγιση, και παρά τα καλά πρώτα αποτελέσματα (Frankenberg et al., 2011; Guanter et al., 2014) παραμένει περιορισμένη από το πολύ μεγάλο μέγεθος εικονοστοιχείου (κάποια χιλιόμετρα) των σχετικών οργάνων (Xiao et al., 2019) και την ισχυρή εξάρτηση από τον τύπο της βλάστησης και το κλίμα (Guanter et al., 2012). Επιπλέον, το σήμα του φθορισμού αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού σήματος στα μήκη κύματος που πραγματοποιείται (650 – 850 nm με κορυφή περίπου στα 740 nm) καθιστώντας τη διάκριση του εξαιρετικά δύσκολη (Meroni et al., 2009), με τον φθορισμό να αντιστοιχεί μόλις στο 2% της συνολικής ανακλαστικότητας στη περιοχή των 750 nm (Zarco-Tejada et al., 2003). Λεπτομέρειες για την φυσιολογική βάση της σχέσης του φθορισμού με την φωτοσύνθεση δίνονται παρακάτω (παράγραφος «Ο δείκτης βλάστησης PRI»). Σύγχρονη μέθοδο αποτελούν επίσης και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, που χρησιμοποιούν μετεωρολογικά και δορυφορικά δεδομένα είτε για τον απευθείας υπολογισμό της GPP (Lee et al., 2020; Wolanin et al., 2019), είτε για να αναγάγουν τις μετρήσεις των πύργων eddy σε μεγάλη (έως παγκόσμια) κλίμακα (Jung et al., 2009; Tramontana et al., 2016). Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης είναι καθαρά μαθηματική προσέγγιση και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των δεδομένων που τους δίνονται (Xiao et al., 2019; Zhang et al., 2021). Επιπλέον, η χωρική κατανομή των πύργων στην περιοχή μελέτης αποτελεί ένα πολύ κρίσιμο παράγοντα που δύναται να προσθέσει μεγάλο σφάλμα (Papale et al., 2015).

Τέλος, τα μοντέλα παραγωγικότητας είναι αυτή τη στιγμή η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη και εκτενέστερα μελετημένη μέθοδος υπολογισμού της GPP, παρέχοντας μια οικονομική και καλά τεκμηριωμένη λύση (Ryu et al., 2019). Τα μοντέλα παραγωγικότητας βασίζονται σε κάποιο βαθμό σε απλοποιημένες υποθέσεις για τη δομή των οικοσυστημάτων, την λειτουργία της βλάστησης και την απόκριση της στις μετεωρολογικές συνθήκες (Anav et al., 2015), και μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικούς τύπους (Ruimy et al., 1999), τα μοντέλα αποδοτικότητας χρήσης φωτός (LUE, Light Use Efficiency models) και τα μοντέλα φωτοσύνθεσης θόλου (CPM, Canopy Photosynthesis Models). Τα μοντέλα φωτοσύνθεσης θόλου (γνωστά και ως process based) αποτελούνται από δυο σκέλη, το πρώτο που προσομοιάζει τη φυσιολογική λειτουργία του φύλλου και το δεύτερο που ανάγει αυτή τη προσομοίωση στο επίπεδο ολόκληρου του θόλου (Mäkelä et al., 2000). Το πρώτο σκέλος μπορεί να συμπεριλάβει πλήθος εξισώσεων για την μοντελοποίηση διάφορων διεργασιών, όπως η λειτουργία της RuBisCO (Farquhar et al., 1980), η αγωγιμότητα των στομάτων (Jarvis, 1976), η διαπνοή (Monteith, 1965), που καθιστούν τα μοντέλα αυτά πολύπλοκα. Η ακριβής μοντελοποίηση κάθε διεργασίας απαιτεί έντονη μελέτη και επαλήθευση στο πεδίο, και καθώς συχνά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των τύπων της βλάστησης, ή ακόμα και μεταξύ των ειδών, είναι απαραίτητη η παραμετροποίηση όλων των εξισώσεων ει δυνατόν για κάθε είδος. Για την αναγωγή από το φύλλο στον θόλο τα μοντέλα CPM μπορεί να χρησιμοποιήσουν δεδομένα τηλεπισκόπησης (Chen et al., 2012; Ryu et al., 2011), αν και δεν είναι απαραίτητο. Βάση της μεθόδου με την οποία γίνεται αυτή η αναγωγή διακρίνονται τρεις τύποι μοντέλων φωτοσύνθεσης θόλου, τα μοντέλα big-leaf που θεωρούν το θόλο ως ένα μεγάλο φύλλο, τα μοντέλα multi-layer που χωρίζουν το θόλο σε πολλά στρώματα με επιπλέον διάκριση μεταξύ των φύλλων σκιάς και φωτός για κάθε στρώμα, και τέλος τα μοντέλα two-leaf που χωρίζουν το θόλο σε δύο τμήματα, ένα που δέχεται απευθείας φως και ένα που σκιάζεται (Bonan et al., 2021; Chen and Coughenour, 2004). Τα μοντέλα CPM είναι αρκετά ακριβή στις εκτιμήσεις τους ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε είναι αρκετά πολύπλοκα γεγονός που τα καθιστά δύσχρηστα καθώς απαιτούν υψηλή παραμετροποίηση και συστήματα με μεγάλη υπολογιστική δύναμη (Anav et al., 2015). Επιπλέον, η προσθήκη πολλών διεργασιών αυξάνει το

περιθώριο σφάλματος και την εξάρτηση του μοντέλου από την περιοχή παραμετροποίησης (Prentice et al., 2014).

Μοντέλα αποδοτικότητας χρήσης φωτός

Σε αντίθεση με τα μοντέλα CPM, τα μοντέλα αποδοτικότητας χρήσης φωτός (Light Use Efficiency, LUE models) αποτελούν μια πιο μακροσκοπική προσέγγιση και δεν απαιτούν λεπτομερή μοντελοποίηση της λειτουργίας της βλάστησης. Τα μοντέλα LUE βασίζονται στην αρχή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (LUE ή ϵ), που θέλει την παραγόμενη βιομάζα να εξαρτάται γραμμικά από την διαθέσιμη ακτινοβολία (Monteith, 1977, 1972). Η αρχή της αποδοτικότητας προέκυψε από την εμπειρική σχέση μεταξύ των δυο αυτών παραμέτρων, ωστόσο, στη συνέχεια συνδέθηκε με την εξελικτική διαδικασία των φυτών για την βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων πόρων (Goetz et al., 1999; Goetz and Prince, 1999). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, οι φυτικοί οργανισμοί επενδύουν στην παραγωγή φωτοσυνθετικών ιστών (φύλλων) στο βαθμό που θα τους επιτρέψει να εκμεταλλευτούν το σύνολο της διαθέσιμης ακτινοβολίας αποφεύγοντας την παραγωγή πλεονάζοντος φωτοσυνθετικού ιστού. Αρχικά η έννοια της αποδοτικότητας συνδέθηκε με την καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα (Net Primary Productivity, NPP), που είναι η GPP μείον την αναπνοή της βλάστησης (αυτότροφη αναπνοή), ωστόσο, έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς και για τον υπολογισμό της GPP. Η χρήση της αρχής LUE στην GPP, ουσιαστικά διαφοροποιεί την έννοια της αποδοτικότητας, καθώς συνδέει την ακτινοβολία με την απορρόφηση CO₂ και όχι τη παραγόμενη βιομάζα (Goetz and Prince, 1999). Πέραν αυτού, προσοχή απαιτείται στο πως ορίζεται η ϵ και ως προς την παράμετρο του φωτός, καθώς τόσο η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Photosynthetically Active Radiation, PAR) όσο και η απορροφημένη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR) έχουν χρησιμοποιηθεί στην βιβλιογραφία (Goetz and Prince, 1999; Landsberg et al., 1997; Prince, 1991). Αυτές οι διαφορές έχουν αποδοθεί στις μετρήσεις που ήταν εφικτές να πραγματοποιηθούν σε κάποιες εργασίες (π.χ. δυσκολία υπολογισμού APAR) αλλά και στην διαφορετική αντίληψη της έννοιας της αποδοτικότητας μεταξύ των επιστημόνων (Gitelson and Gamon, 2015; Goetz and Prince, 1999; Grace et al., 2007).

Παρότι η αρχή της αποδοτικότητας και τα μοντέλα LUE αναπτύχθηκαν και αρχικά μελετήθηκαν χωρίς την χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης (Gallagher and Biscoe, 1978; Jarvis and Leverenz, 1983; Linder, 1985; Monteith, 1977) πλέον θεωρούνται κατεξοχήν (αν όχι αποκλειστικά) μοντέλα τηλεπισκόπησης, με έμφαση στη χρήση δορυφορικών δεδομένων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα μοντέλα LUE χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας που δίνεται ως προϊόν της APAR και της αποδοτικότητας (ϵ) με την οποία η απορροφημένη ακτινοβολία μετατρέπεται σε βιομάζα:

$$GPP = APAR * \epsilon \quad [3]$$

Και οι δύο παράμετροι της παραπάνω εξίσωσης επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς και φυσιολογικούς παράγοντες που ελαττώνουν τον φωτοσυνθετικό ρυθμό. Η APAR υπολογίζεται ως το γινόμενο της συνολικής φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) επί το ποσοστό της απορροφημένης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (fAPAR). Η PAR είναι μια μετεωρολογική παράμετρος που μετρείται με τα κατάλληλα όργανα, ενώ το fAPAR σχετίζεται με παραμέτρους της βλάστησης, όπως η δομή του θόλου και η κατάσταση της βλάστησης, και μπορεί να υπολογιστεί από δεδομένα τηλεπισκόπησης μέσω δεικτών βλάστησης (Goward and Huemmrich, 1992; Ruimy et al., 1995), ενώ υπάρχουν και έτοιμα δορυφορικά προϊόντα fAPAR (MODIS fAPAR, Myneni et al., 2002). Η ποιότητα των δεδομένων τηλεπισκόπησης είναι πολύ κρίσιμη για την ακρίβεια των τιμών GPP (Xiao et al., 2019), καθώς αποτελούν την βάση πάνω στην οποία οικοδομείται ένα μοντέλο LUE. Επιπλέον, οι τιμές του fAPAR ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού του που

επιλέγεται (McCallum et al., 2010) και κατά συνέπεια η μέθοδος υπολογισμού του *fAPAR* μπορεί να εισάγει σφάλμα στον υπολογισμό της *GPP* (Ruimy et al., 1999).

Η αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ), που αποτελεί και τη κρίσιμότερη παράμετρο του μοντέλου, είναι μια δυναμική παράμετρος που μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά λόγω του είδους της βλάστησης, της ηλικίας, της κατάστασης της βλάστησης (Field et al., 1995; Gower et al., 1999; Hilker et al., 2008) και των μετεωρολογικών συνθηκών (Landsberg and Waring, 1997; Turner et al., 2003). Συνήθως τα μοντέλα LUE χρησιμοποιούν μια μέγιστη τιμή για την ϵ (ϵ_0) για κάθε κατηγορία βλάστησης (Running et al., 1999), η οποία ελαττώνεται από τους παραπάνω περιοριστικούς παράγοντες (Ruimy et al., 1999; Xiao et al., 2004a). Για κάθε παράγοντα που συμπεριλαμβάνεται σε ένα μοντέλο LUE, δημιουργείται μια εξίσωση (scalar) που αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο ο παράγοντας αυτός επιδρά στην αποδοτικότητα. Όπως και η ϵ_0 έτσι και οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν παραμέτρους που διαφοροποιούνται ανά κατηγορία βλάστησης. Συνήθως τα scalars παίρνουν τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 σηματοδοτεί την πλήρη παύση της φωτοσύνθεσης και το 1 την έλλειψη οποιασδήποτε επίδρασης του συγκεκριμένου παράγοντα στην φωτοσύνθεση. Κάθε scalar πολλαπλασιάζεται με την μέγιστη τιμή αποδοτικότητας (ϵ_0) έτσι η τυπική μορφή ενός μοντέλου LUE είναι η εξής:

$$GPP = PAR * fAPAR * \epsilon_0 * scalars \quad [4]$$

Το σύνολο των μοντέλων LUE ακολουθούν αυτήν την προσέγγιση, καθώς ο απευθείας υπολογισμός της ϵ από δεδομένα τηλεπισκόπησης παραμένει ζητούμενο, όπως αναλύεται στη συνέχεια (παράγραφος «Ο δείκτης βλάστησης PRI»). Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου LUE με την χρήση δορυφορικών δεδομένων (AVHRR) πραγματοποιήθηκε το 1982 (Kumar and Monteith, 1981), ωστόσο χρειάστηκε μια δεκαετία μέχρι να παρουσιαστούν τα πρώτα μοντέλα LUE που να υπολογίζουν την παραγωγικότητα στο χώρο και τον χρόνο, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα τα CASA (Potter et al., 1993), GLO-PEM (Prince and Goward, 1995) και TURC (Ruimy et al., 1996). Από τότε πολλά μοντέλα LUE έχουν δημιουργηθεί και εξελιχθεί για να περιλαμβάνουν πολλούς παράγοντες που επιδρούν στην *GPP*, παρόλα αυτά, εξακολουθούν να υπάρχουν κρίσιμα ζητήματα που δεν έχουν διαλευκανθεί (Pei et al., 2022). Η επιλογή του κατάλληλου δορυφορικού προϊόντος με έμφαση στην χωρική ανάλυση (As-syakur et al., 2010; Gelybó et al., 2013), η επίδραση της υδατικής καταπόνησης (Raczka et al., 2013; Yuan et al., 2014a) και η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (Huang et al., 2014; Turner et al., 2006b; Wang et al., 2018) αποτελούν ίσως τα κρίσιμότερα από αυτά.

Το πιο διαδεδομένο και μελετημένο μοντέλο LUE είναι το MODIS-LUE της NASA (Running et al., 2000), το οποίο διατίθεται με οκταήμερο βήμα σε παγκόσμια κλίμακα και με χωρική ανάλυση 500 μέτρων (MOD17A2). Ο αλγόριθμος του MODIS-LUE έχει υποστεί βελτιώσεις μέσα στα χρόνια (Heinsch et al., 2006; Mu et al., 2007; Running et al., 2004), ωστόσο εξακολουθεί να αποκλίνει από επίγειες εκτιμήσεις (eddy covariance), γεγονός λογικό καθώς πρόκειται για ένα μοντέλο σε παγκόσμια κλίμακα. Τα προβλήματα του MODIS-LUE είναι γνωστά και τα σημαντικότερα εξ αυτών είναι η ποιότητα των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιεί, ο τρόπος που υπολογίζεται η επίδραση των διάφορων παραγόντων στην ϵ και η ταξινόμηση των ειδών στην οποία βασίζεται (Heinsch et al., 2006; Zhao et al., 2006). Αυτά τα τρία βασικά προβλήματα επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό όλα τα μοντέλα LUE.

Τα πρώτα μοντέλα LUE χρησιμοποιούσαν δεδομένα από τον αισθητήρα AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer) με χωρική ανάλυση 1,1 km. Τα μοντέλα Cfix (Veroustraete et al., 2002) και VPM (Xiao et al., 2004b) χρησιμοποιούν δεδομένα του αισθητήρα Vegetation του SPOT, με χωρική ανάλυση 1,5 km. Ωστόσο, από το 2000 που εκτοξεύτηκε ο πρώτος αισθητήρας MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), με χωρική ανάλυση 250 ή 500 μέτρα

(ανάλογα το προϊόν), η πλειοψηφία των μοντέλων LUE χρησιμοποιεί δεδομένα του. Μόλις τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από αισθητήρες υψηλής χωρικής ανάλυσης σε μοντέλα LUE, όπως ο LandSAT (Knox et al., 2017; Krofcheck et al., 2016) με χωρική ανάλυση 30 μέτρα, ενώ πολλά υποσχόμενη είναι η χρήση δεδομένων από τους δορυφόρους Sentinel-2 με χωρική ανάλυση μόλις 10 μέτρα.

Η χωρική ανάλυση των εικόνων που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα LUE είναι κρίσιμη για την ακρίβεια των υπολογισμών, ειδικά σε περιοχές με μεγάλη ετερογένεια ή χαμηλή κάλυψη (Gelybó et al., 2013; Xiao et al., 2019). Η χωρική ανάλυση των εικόνων δεν θα πρέπει να συγχέεται με την χωρική ανάλυση της ταξινόμησης που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο LUE για να διακρίνει τους διάφορους τύπους βλάστησης και κατά συνέπεια να καθορίσει την ϵ_0 και τις παραμέτρους των scalars που χρησιμοποιούνται (Wang et al., 2010; Zheng et al., 2018). Η ορθή ταξινόμηση είναι καθοριστική καθώς η ϵ_0 και οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια υπολογισμού της GPP (Wagle et al., 2016; Wang et al., 2013; Yuan et al., 2015), με την χαμηλή τιμή ϵ_0 να θεωρείται βασική αιτία της υποεκτίμησης της GPP από τον προϊόν GPP του MODIS (Wang et al., 2013). Στην πράξη, η χωρική ανάλυση των εικόνων αφορά την χωρική ανάλυση των δεικτών βλάστησης που προκύπτουν από αυτές. Η ακρίβεια των δεικτών βλάστησης καθορίζει την ακρίβεια του fAPAR που εισάγεται στο μοντέλο (Cai et al., 2014) και κατά συνέπεια της GPP που υπολογίζεται από αυτό. Επιπλέον, η χωρική ανάλυση παίζει καθοριστικό ρόλο και στην αξιολόγηση των μοντέλων με μετρήσεις πύργων eddy covariance, καθώς καθορίζει εν πολλοίς την χωρική ταύτιση των δυο εκτιμήσεων. Η περιοχή κάλυψης του πύργου eddy (tower footprint) σε σχέση με αυτή του μοντέλου και η ετερογένεια της περιοχής είναι από τους ισχυρότερους παράγοντες απόκλισης μεταξύ δορυφορικών και επίγειων εκτιμήσεων (Chasmer et al., 2011; Sjöström et al., 2013; Turner et al., 2005). Εκτός από την χωρική ανάλυση των εικόνων που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο LUE, κρίσιμη για την ακρίβεια του είναι και η χωρική «ανάλυση» των μετεωρολογικών δεδομένων που εισάγονται σε αυτό (Zhao et al., 2006; Zheng et al., 2018). Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (π.χ. ανάγλυφο) μπορούν να διαφοροποιήσουν έντονα τα μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ. ένταση PAR) ακόμη και κοντινών περιοχών καθιστώντας την χωρική γενίκευση τοπικών μετρήσεων επισφαλής (Cai et al., 2014).

Από τους διάφορους παράγοντες που επιδρούν στην ϵ οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι ως scalars σε μοντέλα LUE είναι η θερμοκρασία και η υδατική κατάσταση (Pei et al., 2022), ενώ κάποια μοντέλα έχουν συμπεριλάβει το αναπτυξιακό στάδιο (Stagakis et al., 2015), την αύξηση του CO₂ στη ατμόσφαιρα (Veroustraete et al., 2002) και την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (Turner et al., 2006b) μεταξύ άλλων. Η βαρύτητα του κάθε παράγοντα καθορίζεται εν πολλοίς από τα χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος, με την υδατική καταπόνηση να αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους (Nemani et al., 2003; Yuan et al., 2014a). Οικοσυστήματα με υψηλές θερμοκρασίες και περιορισμένη βροχόπτωση είναι μεταξύ των οικοσυστημάτων με τη χαμηλότερη GPP και σε αντίθεση με το παγκόσμιο πρότυπο, τείνουν να μειώνουν την GPP στο πέρασμα των χρόνων (Anav et al., 2015; Piao et al., 2014; Zhao and Running, 2010). Παρ' ότι το νερό συμμετέχει άμεσα στις φωτεινές αντιδράσεις (όπως αναλύθηκε παραπάνω), η έλλειψη του επιδρά στον ρυθμό φωτοσύνθεσης κυρίως έμμεσα, λόγω του κλεισίματος των στομάτων και της αναστολής μεταβολικών διεργασιών (Lawlor, 2002; Pinheiro and Chaves, 2011), με τις φωτεινές αντιδράσεις να παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες (Lu and Zhang, 1999; Signarbieux and Feller, 2011). Από τις δύο έμμεσες επιδράσεις της έλλειψης νερού στην φωτοσύνθεση, το κλείσιμο των στομάτων, ως μηχανισμός αποτροπής περεταίρω απώλειας νερού, είναι αυτό που θεωρείται ως το πιο ανασταλτικό (Ghannoum, 2009; Pinheiro and Chaves, 2011) καθώς μειώνει την πρόσληψη CO₂ (Chaves et al., 2003; Ridge, 2002). Φυσικά ο ρόλος του νερού στη βλάστηση είναι πολυσχιδής (μεταφορά

θρεπτικών, κυτταρική λειτουργία κ.α.) και η παρατεταμένη έλλειψή του μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμες βλάβες που αποτυπώνονται στην παραγωγικότητα (Landsberg et al., 1997). Η υδατική καταπόνηση έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα Μεσογειακά οικοσυστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια, που αναμένεται να οξύνονται συν τον χρόνο (Christensen et al., 2007; Giorgi, 2006).

Τα scalars υδατικής κατάστασης μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες βάση του επιπέδου στο οποίο ανιχνεύουν την καταπόνηση: i) ατμοσφαιρικά, ii) εδαφικά και iii) βλάστησης (Pei et al., 2022; Y. Zhang et al., 2015). Το έλλειμα κορεσμού υδρατμών (Vapor Pressure Deficit, VPD) στην ατμόσφαιρα (Running et al., 2004), που ανήκει στην πρώτη κατηγορία, είναι ίσως ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος παράγοντας στα μοντέλα LUE. Από την δεύτερη κατηγορία ο πιο χρησιμοποιούμενος παράγοντας είναι το περιεχόμενο νερό στο έδαφος (Soil Water Content, SWC) (Turner et al., 2006b). Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει μια πληθώρα παραγόντων που σχετίζονται με το περιεχόμενο νερό στην βλάστηση, με χαρακτηριστικά παραδείγματα να αποτελούν η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής (Potter et al., 1993) και οι δείκτες τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούν κανάλια στη μέση υπέρυθη ακτινοβολία (Xiao et al., 2004b). Όλοι οι παραπάνω παράγοντες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Pei et al., 2022) με τα έως τώρα στοιχεία να δείχνουν μια ελαφρώς καλύτερη απόδοση των scalars της τρίτης κατηγορίας έναντι των άλλων δυο (Y. Zhang et al., 2015). Ειδικά η δυνατότητα απευθείας ανίχνευσης της υδατικής καταπόνησης από δορυφορικά δεδομένα θα απάλλασσε τα μοντέλα LUE από την ανάγκη μετεωρολογικών δεδομένων και αποτελεί αντικείμενο έντονης έρευνας (Yuan et al., 2014a). Προς τη κατεύθυνση αυτή, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν σταθερά και αξιόπιστα αποτελέσματα, μεταξύ των οποίων είναι ο δείκτης NDWI (Normalized Difference Water Index, Gao, 1996), ο δείκτης LSWI (Land Surface Water Index, Xiao et al., 2004b), ο δείκτης NMDI (Normalized Multi-band Drought Index, Wang and Qu, 2007) και η θερμοκρασία του θόλου, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από το θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (Goetz, 1997; Jackson et al., 1977).

Ο δεύτερος πιο συχνά χρησιμοποιούμενος περιοριστικός παράγοντας στα μοντέλα LUE είναι η θερμοκρασία, και η επίδραση της στη φωτοσύνθεση αφορά τόσο τις υψηλές τιμές όσο και τις χαμηλές (Harley et al., 1992), με τις συνέπειες να είναι συνήθως βραχυπρόθεσμες, αν και παρατεταμένη έκθεση σε ακραίες τιμές μπορεί να προκαλέσει μόνιμη βλάβη. Και στις δυο περιπτώσεις (υψηλές και χαμηλές τιμές) η θερμοκρασία επιδρά στην δράση της RuBisCO και άλλων κρίσιμων ενζύμων, και σε πολύ ακραίες τιμές τα απενεργοποιεί πλήρως (Landsberg et al., 1997; Ridge, 2002). Παρότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των ειδών, που σχετίζονται με την προσαρμογή τους στο περιβάλλον που ενδιαίτουν, για τα περισσότερα φυτά θερμοκρασίες πάνω από 40° Κελσίου (C) μηδενίζουν το ρυθμό φωτοσύνθεσης (Larcher, 2003). Αντίστοιχα, οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν το ρυθμό φωτοσύνθεσης και σε συνθήκες παγετού απενεργοποιείται η φωτοσυνθετική συσκευή, κάτι που μπορεί να χρειαστεί μέρες για να αποκατασταθεί (Landsberg et al., 1997). Συνήθως η εξάρτηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης από την θερμοκρασία δίνεται από μια κωδωνοειδή καμπύλη (Bernacchi et al., 2003; Hall and Rao, 1994), με την κορυφή της να αντιπροσωπεύει την βέλτιστη θερμοκρασία για την φωτοσύνθεση (T_{opt}), και τις τιμές δεξιά και αριστερά στις οποίες μηδενίζεται η φωτοσύνθεση να αντιπροσωπεύουν τη μέγιστη (T_{max}) και ελάχιστη (T_{min}) θερμοκρασία αντίστοιχα. Τα scalars θερμοκρασίας των μοντέλων LUE που ακολουθούν αυτήν την εξάρτηση, μπορούν να χρησιμοποιούν μια από τις παραπάνω παραμέτρους (Potter et al., 1993) ή και τις τρεις (Stagakis et al., 2015; Xiao et al., 2004b). Ωστόσο, υπάρχουν μοντέλα LUE που χρησιμοποιούν scalars θερμοκρασίας που δεν ακολουθούν τη κωδωνοειδή εξάρτηση, μην υπολογίζοντας την αρνητική επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας (Mäkelä et al., 2008; Running et al., 2004). Στις περιπτώσεις αυτών των μοντέλων οι επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών

θεωρείται πως ενσωματώνονται από τα scalars του νερού, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες συνδέονται με υψηλές τιμές VPD και χαμηλή διαθεσιμότητα νερού (Fu et al., 2020; Sims and Bradford, 2001). Ωστόσο τα scalars νερού δεν φαίνεται να είναι ικανά να αποτυπώσουν απόλυτα τις επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών, καθιστώντας την κωδωνοειδή μορφή των scalars θερμοκρασίας καταλληλότερη (Bao et al., 2022).

Η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην παραγωγικότητα των χερσαίων οικοσυστημάτων είναι ένας παράγοντας που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και έχει αγνοηθεί στα περισσότερα μοντέλα LUE (Bao et al., 2022; Pei et al., 2022; Yuan et al., 2014b). Σε επίπεδο θόλου η διάχυτη ακτινοβολία έχει βρεθεί πως συνδέεται με μεγαλύτερη ϵ συγκριτικά με την απευθείας ακτινοβολία, διαφορά που εντείνεται όσο αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας (Gu et al., 2002). Η ιδιότητα αυτή της διάχυτης ακτινοβολίας έχει αποδοθεί στην ικανότητα της να εισέρχεται βαθύτερα στον θόλο με αποτέλεσμα να απορροφάται σε μεγαλύτερο ποσοστό από την βλάστηση (Knobl and Baldocchi, 2008; Mercado et al., 2009). Η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην GPP μπορεί να εισαχθεί σε μοντέλα LUE είτε με την μορφή scalar (Turner et al., 2006b; Wang et al., 2018), είτε χωρίζοντας τον θόλο σε φωτισμένο και σκιασμένο μέρος (two-leaf) με διαφορετικά ϵ_0 και τιμές APAR (He et al., 2013; Zhou et al., 2016).

Τέλος, η δομή των μοντέλων LUE, δηλαδή το σύνολο των εξισώσεων και παραμέτρων που το απαρτίζουν, είναι καθοριστικής σημασίας και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις στην τιμή της GPP (Cai et al., 2014; Pei et al., 2022; Yuan et al., 2014a). Η βελτίωση των scalars για την σωστή αποτύπωση της επίδρασης των διάφορων παραγόντων στην GPP αλλά και η συμπερίληψη όλων των πιθανών παραγόντων, εξακολουθούν να αποτελούν ζητούμενο για τα μοντέλα LUE (Xiao et al., 2019; Zheng et al., 2018). Ωστόσο, η αύξηση των περιοριστικών παραγόντων ενός μοντέλου LUE πρέπει να λαμβάνει υπόψη εκτός από τη βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού της GPP και την διατήρηση, όσο το δυνατόν, της απλότητας των μοντέλων αυτών. Επιπλέον, η προσθήκη νέων περιοριστικών παραγόντων πρέπει να λαμβάνει υπόψη πιθανές αλληλεπικαλύψεις των επιδράσεων των διάφορων παραγόντων, ενώ η χρήση πολλών περιοριστικών παραγόντων αυξάνει τα περιθώρια σφάλματος των μοντέλων (Pei et al., 2022).

Ο δείκτης βλάστησης PRI

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα μοντέλα LUE συνήθως βασίζονται σε μετεωρολογικά δεδομένα για τον υπολογισμό της ϵ από μια μέγιστη τιμή (ϵ_0), μια προσέγγιση που έχει αποδειχθεί αναποτελεσματική, κυρίως λόγω λανθασμένων τιμών ϵ_0 , προβληματικών μετεωρολογικών δεδομένων και αδυναμία των scalars να αποτυπώσουν τις επιδράσεις των περιοριστικών παραγόντων στην φωτοσύνθεση (Heinsch et al., 2006; Martel et al., 2005; Zheng et al., 2018). Συνεπώς, ο ακριβής υπολογισμός της ϵ με μεθόδους τηλεπισκόπησης θα αύξανε την ακρίβεια των μοντέλων LUE (Garbulsky et al., 2014), απλοποιώντας ταυτόχρονα τη δομή τους και κατά συνέπεια την εφαρμογή τους. Για τον σκοπό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ο δείκτης PRI (Photochemical Reflectance Index, Gamon et al., 1992), που χρησιμοποιεί την ανακλαστικότητα στα 531 nm, ένα μήκος κύματος που συνδέεται με τον κύκλο των ξανθοφυλλών (Gamon et al., 1990; Peñuelas et al., 1995), τον βασικό φωτοπροστατευτικό μηχανισμό των φυτών (Coops et al., 2010; Latowski et al., 2011). Έτσι, η σχέση του PRI με την ϵ πηγάζει από την σχέση του κύκλου των ξανθοφυλλών με την φωτοσύνθεση, η οποία βασίζεται στον ανταγωνισμό τους ως ενεργειακά μονοπάτια της απορροφημένης ενέργειας.

Όταν η χλωροφύλλη απορροφά ένα φωτόνιο και διεγείρεται, η ενέργεια που δεσμεύει θα ακολουθήσει ένα από τα ακόλουθα τρία ενεργειακά μονοπάτια (Maxwell and Johnson, 2000): i) θα μεταφερθεί στο κέντρο αντίδρασης των φωτοσυστημάτων για να πραγματοποιηθεί η φωτοσύνθεση, ii) θα επανεκπεμφθεί αμέσως μέσω του φθορισμού της χλωροφύλλης ή iii) θα αποβληθεί ως θερμότητα (κυρίως μέσω του κύκλου των ξανθοφυλλών). Καθώς λοιπόν η ακτινοβολία που προσλαμβάνεται από τα φυτά μοιράζεται μεταξύ της φωτοσύνθεσης, του κύκλου των ξανθοφυλλών και του φθορισμού, η ανίχνευση των δύο τελευταίων μπορεί να δώσει μια εικόνα για την φωτοσυνθετική δραστηριότητα (Coops et al., 2010; Hilker et al., 2008; Peñuelas et al., 1995).

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης, που είναι η επανεκπομπή (σε μεγαλύτερο μήκος κύματος) φωτονίων που έχουν απορροφηθεί από την χλωροφύλλη (Papageorgiou, 1975), αποτελεί μια φωτοχημική διαδικασία που δεν υπόκειται σε βιολογικό έλεγχο (Coops et al., 2010) και αφορά ένα πολύ μικρό ποσοστό της απορροφημένης ακτινοβολίας, λιγότερο από 3% (Maxwell and Johnson, 2000; Porcar-Castell et al., 2014). Παραδόξως, η σχέση του φθορισμού (SiF) με την φωτοσύνθεση σε επίπεδο θόλου (και μεγαλύτερο) δεν ακολουθεί το πρότυπο ανταγωνισμού μεταξύ των δυο ενεργειακών μονοπατιών, με τον φθορισμό να συµμεταβάλλεται με την GPP (Guanter et al., 2014; Meroni et al., 2009). Τα τελευταία χρόνια, ένας αυξανόμενος αριθμός εργασιών έχει παρατηρήσει μια γραμμική σχέση μεταξύ των δύο (Mohammed et al., 2019). Η ακριβής αιτία της σχέσης μεταξύ φθορισμού και GPP σε μεγάλη κλίμακα, εξακολουθεί να αποτελεί ερωτηματικό (Frankenberg and Berry, 2017; van Wittenberghe et al., 2021), και πιθανόν να πηγάζει από την ισχυρή εξάρτηση και των δυο από την APAR (Kim et al., 2021; Yang et al., 2021).

Σε αντίθεση με τον φθορισμό, η σχέση του κύκλου των ξανθοφυλλών με την φωτοσύνθεση βασίζεται στον ανταγωνισμό τους ως ενεργειακά μονοπάτια ανεξαρτήτως χωρικής κλίμακας, με τη σχέση των δυο να είναι αντιστρόφως ανάλογη. Όσο το ποσοστό της απορροφημένης ενέργειας που αποβάλλεται ως θερμότητα από τον κύκλο των ξανθοφυλλών αυξάνει, τόσο μειώνεται το ποσοστό που χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση, δηλαδή η αποδοτικότητα χρήσης φωτός. Αξίζει να σημειωθεί πως ο κύκλος των ξανθοφυλλών μπορεί να αποβάλει ως και το 70% της ενέργειας που απορροφάται (Schlau-Cohen and Berry, 2015). Ο κύκλος των ξανθοφυλλών αποτελείται από τρία καροτενοειδή και ενεργοποιείται όταν υπάρχει περίσσεια φωτός, δηλαδή η ενέργεια που απορροφάται υπερβαίνει τις δυνατότητες της φωτοσύνθεσης, για να αποφευχθεί η βλάβη της φωτοσυνθετικής συσκευής (Demmig-Adams, 1990). Περίσσεια φωτός μπορεί να δημιουργηθεί είτε

λόγω υψηλής έντασης φωτός που υπερβαίνει τις βιοχημικές δυνατότητες της βλάστησης, είτε λόγω της επίδρασης περιοριστικών παραγόντων που όπως αναφέρθηκε παραπάνω μειώνουν την φωτοσυνθετική δραστηριότητα.

Πρακτικά, περίσσεια φωτός σημαίνει είτε ότι τα κέντρα ενεργοποίησης δεν επαρκούν για να δεχθούν την ενέργεια που απορροφούν οι χρωστικές, είτε ότι δεν υπάρχουν αρκετά NADP^+ για να δεχθούν τα ηλεκτρόνια από τα κέντρα ενεργοποίησης, λόγω της μη κατανάλωσης από τις σκοτεινές αντιδράσεις του NADPH (Latowski et al., 2011; Ridge, 2002; Wise and Naylor, 1987). Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρείται μείωση του pH στο εσωτερικό των θυλακοειδών, λόγω αύξησης της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου, και παραγωγή ενεργών μορφών οξυγόνου (reactive oxygen species, ROS), οι οποίες προκαλούν οξειδωτικές βλάβες στη φωτοσυνθετική συσκευή (Ahmad et al., 2008; Niyogi, 2000). Το χαμηλό pH ωστόσο, λειτουργεί ως σήμα για την ενεργοποίηση του κύκλου των ξανθοφυλλών (Yamamoto, 1979; Young et al., 1997) ώστε να αποβάλλει την περίσσεια ενέργειας (ένα ποσοστό αυτής) και να μειώσει τον κίνδυνο βλαβών. Συγκεκριμένα, το όξινο pH ενεργοποιεί το ένζυμο αποεποξειδάση της βιολαξανθίνης που μετατρέπει τάχιστα την βιολαξανθίνη σε ανθεραξανθίνη (αφαιρώντας της ένα άτομο οξυγόνου) και αυτήν σε ζεαξανθίνη (αφαιρώντας της ένα άτομο οξυγόνου) (Demmig-Adams, 1990; Yamamoto, 1979). Οι δυο τελευταίες μπορούν να δεχθούν την πλεονάζουσα ενέργεια και στη συνέχεια να την αποβάλουν με την μορφή θερμότητας, επιστρέφοντας έτσι την χλωροφύλλη στη μη διεγερμένη κατάσταση της (Demmig-Adams and Adams, 1996; Hilker et al., 2008; Niyogi, 1999). Τέλος, ο κύκλος ακολουθεί την αντίθετη πορεία μέσω του ενζύμου εποξειδάση της ζεαξανθίνης (που προσθέτει άτομα οξυγόνου), το οποίο ενεργοποιείται σε ουδέτερο pH, δηλαδή, όταν η φωτοσύνθεση μπορεί να καταναλώσει την διαθέσιμη ενέργεια.

Οι δύο αποξειδωμένες χρωστικές του κύκλου (ανθεραξανθίνη και ζεαξανθίνη) απορροφούν εντονότερα στα 531 nm από την βιολαξανθίνη, μειώνοντας έτσι την ανακλαστικότητα σε αυτό το μήκος κύματος καθώς μετατοπίζεται ο κύκλος των ξανθοφυλλών προς την ζεαξανθίνη (Gamon et al., 1990). Με βάση αυτήν την φασματική ιδιότητα του κύκλου των ξανθοφυλλών κατασκευάστηκε ο δείκτης PRI, που χρησιμοποιεί την ανακλαστικότητα στα 531 nm και την ανακλαστικότητα σε ένα μήκος κύματος αναφοράς (R_{Ref}) το οποίο δεν επηρεάζεται από το κύκλο των ξανθοφυλλών, με πιο διαδεδομένο το τμήμα του φάσματος γύρω από τα 570 nm (Gamon et al., 1997; Garbulsky et al., 2011; Peñuelas et al., 1995):

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{Ref}}{R_{531} + R_{Ref}} \quad [5]$$

Για τον εντοπισμό του σήματος των ξανθοφυλλών απαιτούνται όργανα τηλεπισκόπησης με κανάλια μικρού εύρους, ιδανικά λίγων nm και σίγουρα μικρότερο από 10 nm, για να αποφεύγεται όσο το δυνατόν η επίδραση άλλων συστατικών στο σήμα (Grace et al., 2007). Η ικανότητα του PRI να ακολουθεί τις μεταβολές του κύκλου των ξανθοφυλλών επιβεβαιώθηκε από διάφορες εργασίες (Filella et al., 1996; Garbulsky et al., 2011; Porcar-Castell et al., 2012), ωστόσο, από νωρίς έγινε φανερό πως ο PRI επηρεάζεται από το σύνολο των καροτενοειδών και από τον λόγο καροτενοειδών προς χλωροφύλλες (Filella et al., 2009; Stagakis et al., 2010; Stylinski et al., 2002). Ο παράγοντας που καθορίζει το «περιεχόμενο» του σήματος του PRI είναι ο χρόνος (Gamon et al., 2005), με τις μεταβολές που παρατηρούνται μεταξύ ωρών να οφείλονται στις ξανθοφύλλες, ενώ το σύνολο των χρωστικών καθορίζει τις αλλαγές σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (π.χ. εποχιακές μεταβολές). Αυτή η χρονική διαφοροποίηση οφείλεται στο ότι οι αλλαγές μεταξύ των ξανθοφυλλών είναι ταχύτερες (Adams et al., 2004), καθορίζοντας έτσι τις αλλαγές στην ανακλαστικότητα που παρατηρούνται σε σύντομα χρονικά διαστήματα (λίγες ώρες), σε αντίθεση με τις χρονοβόρες

διεργασίες που απαιτούνται για την σύνθεση νέων μορίων (Kyparissis et al., 2000), οι οποίες γίνονται ορατές σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα.

Η ευαισθησία του PRI στις συγκεντρώσεις των χρωστικών αρχικά θεωρήθηκε μειονέκτημα του δείκτη (Hmimina et al., 2014; Merlier et al., 2015), ωστόσο, η σχέση του PRI με το σύνολο των καροτενοειδών πιθανόν να ευνοεί την σχέση του με την ϵ , καθώς και άλλα καροτενοειδή συμμετέχουν στην φωτοπροστασία (Frank and Brudvig, 2004; Telfer, 2005). Ειδικότερα, ένας δευτερεύον φωτοπροστατευτικός μηχανισμός έχει ανακαλυφθεί, ο κύκλος της λουτεΐνης (Bungard et al., 1999; García-Plazaola et al., 2007), που πιστεύεται ότι λειτουργεί παράλληλα με τον κύκλο των ξανθοφυλλών σε κάποια είδη, και πιθανολογείται ότι σχετίζεται κυρίως με είδη προσαρμοσμένα στη σκιά (Coops et al., 2010; García-Plazaola et al., 2007). Αν και ο ακριβής ρόλος του κύκλου της λουτεΐνης παραμένει υπό διερεύνηση (Esteban et al., 2009; Leonelli et al., 2017), η φωτοπροστατευτική του δράση μάλλον περιορίζεται στην επικούρηση του κύκλου των ξανθοφυλλών (Jahns and Holzwarth, 2012). Επίσης, το β -καροτένιο έχει συνδεθεί με την προστασία του φωτοσυστήματος II (Telfer, 2005).

Εν κατακλείδι, η σχέση του PRI με το κύκλο των ξανθοφυλλών, αλλά και τα καροτενοειδή εν γένη, τον καθιστά έναν πολλά υποσχόμενο δείκτη για την παρακολούθηση την αποδοτικότητας, τόσο σε ωριαία όσο και σε εποχική κλίμακα (Filella et al., 2009; Garbulsky et al., 2014). Πράγματι, ο PRI έχει συσχετιστεί με την ϵ σε πλήθος εργασιών, τόσο σε επίπεδο φύλλου (Gamon et al., 1997; Guo and Trotter, 2004; Møttus et al., 2018; Nakaji et al., 2006; Peñuelas et al., 1995), όσο και σε επίπεδο θόλου (Filella et al., 2004; Gamon et al., 1992; Jia et al., 2018; Nichol et al., 2000), για διάφορους τύπους βλάστησης και σε διάφορες χρονικές κλίμακες (ωριαίες, ημερήσιες, εποχιακές). Ωστόσο, σε επίπεδο θόλου ο PRI, όπως οι περισσότεροι δείκτες, επηρεάζεται από τις γωνίες λήψης (γωνίες αισθητήρα και ηλίου) και την δομή του θόλου (Barton and North, 2001; Grace et al., 2007). Η επίδραση των γωνιών αισθητήρα και ηλίου στον PRI έχει συνδεθεί με το ποσοστό σκίασης που είναι ορατό στον αισθητήρα (Hall et al., 2008; Hilker et al., 2010, 2009) και την επίδραση της ανακλαστικότητας του εδάφους (Goerner et al., 2011; Stagakis et al., 2014), με τις διάφορες περιοχές να εμφανίζουν διαφορετική ευαισθησία βάση του ανάγλυφου τους, της δομής και της πυκνότητας του θόλου (Barton and North, 2001; Goerner et al., 2011; Sims et al., 2011).

Η εφαρμογή του PRI σε μεγάλη χωρική κλίμακα (ολόκληρο οικοσύστημα) με χρήση δορυφορικών αισθητήρων έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο, κυρίως λόγω έλλειψης κατάλληλων αισθητήρων. Πέραν αυτού, το γεγονός ότι η ανακλαστικότητα στα 531 nm αλλάζει εξαιτίας του κύκλου των ξανθοφυλλών σε ποσοστό 2-7% (Gamon et al., 1992; Hall et al., 2008) ενώ ο θόρυβος σε αυτό το κανάλι (σε τέτοια κλίμακα) φτάνει ως και το 3% του συνολικού σήματος (Moreno et al., 2012; Xiong et al., 2003) καθιστούν την ανίχνευση του σήματος δύσκολη (Hall et al., 2008). Παρόλα αυτά, μια σειρά από εργασίες έχουν μελετήσει την σχέση του δορυφορικού PRI με την ϵ σε επίπεδο οικοσυστήματος, με την αρχή να γίνεται το 2004 (Middleton et al., 2004), χωρίς να έχει προκύψει μια γενικευμένη σχέση μεταξύ τους. Οι επιδράσεις των γωνιών λήψης και των χαρακτηριστικών του θόλου είναι έντονες στον δορυφορικό PRI (Drolet et al., 2008, 2005; Goerner et al., 2011), οδηγώντας σε σημαντικές διαφορές της σχέσης του με την ϵ , από περιοχή σε περιοχή (de Sousa et al., 2017; Goerner et al., 2011; Middleton et al., 2016). Οι επιδράσεις αυτές φαίνονται να μετριάζονται όταν χρησιμοποιούνται λήψεις με συγκεκριμένες γωνίες ηλίου και δορυφόρου (Goerner et al., 2011; Middleton et al., 2016; Stagakis et al., 2014), ενώ κάποιες παραλλαγές του PRI που χρησιμοποιούν πολύπλοκες εξισώσεις για να διορθώσουν αυτές τις επιδράσεις, βελτίωσαν μόνο ελαφρώς ή και καθόλου την απόδοση του (Hernandez-Clemente et al., 2016; Hilker et al., 2011; Moreno et al., 2012).

Επιπλέον, προσοχή χρειάζεται όταν εξετάζεται η σχέση του δορυφορικού PRI με την ϵ για το σύνολο της ημέρας, καθώς η λήψη αποτελεί μια αποτύπωση της στιγμής και μπορεί να μην είναι ενδεικτική για όλη την ημέρα (Drolet et al., 2005; Goerner et al., 2009). Για καθαρές ημέρες, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την λήψη δορυφορικών εικόνων, η ϵ κατά τη διάρκεια του μεσημεριού θεωρείται ενδεικτική για το σύνολο της ημέρας (Drolet et al., 2008; Sims et al., 2005), χωρίς να αποκλείονται αποκλίσεις λόγω παροδικών φαινομένων εκτός της ώρας λήψης (Ni et al., 1997).

Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό του PRI απαιτούνται αισθητήρες με στενά κανάλια, γεγονός που καθιστά τους υπερφασματικούς αισθητήρες ιδανικούς, ωστόσο, μόλις δυο τέτοιοι δορυφορικοί αισθητήρες ήταν διαθέσιμοι έως πρόσφατα, ο CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) και ο Hyperion. Παρότι και οι δυο προσφέρουν υψηλή χωρική και ραδιομετρική ανάλυση, το γεγονός πως οι λήψεις τους πραγματοποιούνταν κατόπιν συνεννόησης με τη διαχειριστική ομάδα, με χαμηλή χρονική κάλυψη, και τα δεδομένα δεν ήταν ευρέως διαθέσιμα έως πρόσφατα, δεν έχουν επιτρέψει εκτενή χρήση τους. Μόλις τέσσερις εργασίες έχουν χρησιμοποιήσει τέτοια δεδομένα για την μελέτη της σχέσης του PRI και τις ϵ σε επίπεδο οικοσυστήματος, τρεις με δεδομένα του CHRIS (Hall et al., 2011; Hilker et al., 2011; Stagakis et al., 2014) και μια με δεδομένα Hyperion (Hernandez-Clemente et al., 2016). Αντιθέτως, η σχετική έρευνα κυριαρχείται από τον πολυφασματικό αισθητήρα MODIS με 18 σχετικές εργασίες (de Sousa et al., 2017; Drolet et al., 2008, 2005; Filella et al., 2018; Garbulsky et al., 2013, 2008; Gilabert et al., 2012; Goerner et al., 2011, 2009, 2008; Guarini et al., 2014; Middleton et al., 2016, 2008, 2004; Moreno et al., 2012; Ulsig et al., 2017; Wu et al., 2016, 2010). Οι κύριες αιτίες που έκαναν τόσο διαδεδομένο τον MODIS είναι πρώτον το γεγονός πως διαθέτει ένα οριακά στενό κανάλι στα 531 nm (κανάλι 11, 526-536 nm), δεύτερον ο ημερήσιος κύκλος του που παρέχει καθημερινή κάλυψη του συνόλου της επιφάνειας της γης και τρίτον η ελεύθερη διάθεση των δεδομένων του. Λόγω της έλλειψης καναλιού του MODIS στα 570 nm, ως κανάλι αναφοράς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα κανάλια όπως τα 10 (483-493 nm), 12 (546-556 nm), 13 (662-672 nm) και 1 (620-670 nm) (Drolet et al., 2008; Goerner et al., 2009), με το βέλτιστο κανάλι αναφοράς να θεωρείται πως αλλάζει από περιοχή σε περιοχή (Goerner et al., 2011) και να επηρεάζεται από τις γωνίες λήψης (Stagakis et al., 2014).

Εκτός από την έλλειψη του καναλιού αναφοράς ο PRI του MODIS έχει τρία ακόμη βασικά μειονεκτήματα, τις μεγάλες διαφορές στη γεωμετρία λήψης (γωνίες ηλίου και αισθητήρα) ανά εικόνα, την χαμηλή χωρική ανάλυση (1 km²) και την προβληματική ατμοσφαιρική διόρθωση των συγκεκριμένων προϊόντων. Οι λήψεις του MODIS εμφανίζουν μεγάλη ετερογένεια ως προς την γεωμετρία της λήψης τους, λόγω του μεγάλου εύρους σάρωσης του αισθητήρα, με αποτέλεσμα ο PRI του MODIS να επηρεάζεται έντονα από το ποσοστό σκίασης και τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής (Drolet et al., 2008; Goerner et al., 2011; Moreno et al., 2012). Αντίστοιχα, το μέγεθος του pixel οξύνει αυτές τις επιδράσεις, ενώ παράλληλα δυσχεραίνει την αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των δεδομένων MODIS και αυτών από τους πύργους eddy, που συνήθως χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ϵ . Τέλος, το προϊόν του MODIS που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του PRI (MOD021), παρέχει δεδομένα που δεν έχουν υποστεί ατμοσφαιρική διόρθωση. Παρ' ότι η ατμοσφαιρική διόρθωση θεωρείται απαραίτητη για όλες τις δορυφορικές εικόνες (Grace et al., 2007), συνήθως ο PRI του MODIS χρησιμοποιείται χωρίς την διόρθωση των δεδομένων (Garbulsky et al., 2008; Moreno et al., 2012). Μάλιστα, έχει βρεθεί πως ο PRI χωρίς διόρθωση εμφανίζει καλύτερη συσχέτιση με την ϵ , σε σχέση με τον διορθωμένο (Drolet et al., 2005; Goerner et al., 2009).

Τα τελευταία χρόνια, έχουν τεθεί σε λειτουργία ή προγραμματιστεί μια σειρά από νέους υπερφασματικούς αισθητήρες που δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού του PRI με κανάλια υψηλής

ραδιομετρικής ανάλυσης και αναμένεται να εξελίξουν την έρευνα του PRI σε επίπεδο οικοσυστήματος. Οι αισθητήρες DESIS (2018), PRISMA (2019) και EnMAP (2022) καλύπτουν την φασματική περιοχή του PRI με εύρος καναλιών από 2,5 ως 12 nm και χωρική ανάλυση 30 μέτρα (και οι τρεις). Δυστυχώς, στις περισσότερες περιπτώσεις οι υπερφασματικοί αισθητήρες πραγματοποιούν προγραμματισμένες λήψεις σε συνεννόηση με τους χρήστες (user driven target mode) και δεν καλύπτουν το σύνολο της γήινης επιφάνειας. Επιπλέον, η χαμηλή συχνότητα λήψης πολλών υπερφασματικών αισθητήρων περιορίζει τις δυνατότητες μελέτης δυναμικών παραμέτρων από τα δεδομένα τους, όπως αναφέρθηκε ήδη και για τους CHRIS και Hyperion.

Γιατί τηλεπισκόπηση;

Αν ένα πράγμα ήταν ξεκάθαρο όσον αφορά την τηλεπισκόπηση, ήδη από τις πρώτες ημέρες της, περίπου μισό αιώνα πριν με τους πρώτους δορυφορικούς αισθητήρες, ήταν η χωρικά διευρυμένη δυνατότητα που παρείχε. Η δυνατότητα ταυτόχρονης παρατήρησης τεράστιων εκτάσεων της γήινης επιφάνειας, συμπεριλαμβανομένων δυσπρόσιτων περιοχών, θα άλλαζε για πάντα την αντίληψη της ανθρωπότητας για το περιβάλλον μέσα στο οποίο ζει αλλά και του ρόλου της σε αυτό. Σε αυτό φυσικά καθοριστική ήταν η συμβολή και της χρονικής διάστασης των δεδομένων τηλεπισκόπησης, που επέτρεψε τη συστηματική παρακολούθηση όλα αυτά τα χρόνια. Ο συνδυασμός αυτών των δυο χαρακτηριστικών της τηλεπισκόπησης ήταν που την κατέστησαν σημαντικό αν όχι απαραίτητο εργαλείο στον σύγχρονο κόσμο και ειδικά στην μελέτη του περιβάλλοντος (Disney, 2016; Lechner et al., 2020).

Όσον αφορά τα χερσαία οικοσυστήματα, η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών με αξιοσημείωτη ακρίβεια, ενώ η δορυφορική τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές ακόμη και σε παγκόσμια κλίμακα. Ήδη από την εποχή του Landsat-1 η δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμοποιήθηκε για την χαρτογράφηση της βλάστησης, καταγράφοντας όχι μόνο την ύπαρξη ή μη βλάστησης αλλά και διακρίνοντας διαφορετικούς τύπους βλάστησης (Bauer and Cirra, 1973; Williams and Carter, 1976). Η δημιουργία παγκόσμιων χαρτών ταξινόμησης (π.χ. LCM2000, Haines-Young et al., 2000) θα ήταν πρακτικά αδύνατη χωρίς τη χρήση της τηλεπισκόπησης. Η ακριβής ταξινόμηση των διάφορων τύπων βλάστησης είναι από τα σημαντικότερα ερευνητικά ζητούμενα έως σήμερα (Patro et al., 2021), καθώς αποτελεί εν πολλοίς τη βάση πάνω στην οποία οικοδομούνται πολλές εφαρμογές της τηλεπισκόπησης (όπως τα μοντέλα LUE που προαναφέρθηκαν). Τα δεδομένα υπερφασματικών αισθητήρων μπορούν να βελτιώσουν το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, παρέχοντας μια πιο πλήρη φασματική υπογραφή κάθε τύπου βλάστησης, χάρη στον μεγάλο αριθμό καναλιών που παρέχουν (Fassnacht et al., 2014; Große-Stoltenberg et al., 2016).

Επιπλέον, η παρακολούθηση των περιοχών στο πέρασμα του χρόνου κατέστησε δυνατή την καταγραφή αλλαγών στα χαρακτηριστικά της βλάστησης αλλά και στις χρήσεις της γης (Hall et al., 1991; Malingrèau et al., 1989). Αυτά τα δεδομένα παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις συνέπειες των φυσικών καταστροφών αλλά και των ανθρώπινων παρεμβάσεων στο περιβάλλον (Achard et al., 2002; Siegert et al., 2001), που αμφότερα σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή (το ένα ως συνέπεια και το άλλο ως αίτιο). Τα δεδομένα αυτά είναι πολύτιμα και για οικολογικές μελέτες που αφορούν την βιοποικιλότητα και την αλληλεπίδραση των ειδών (Seeley and Asner, 2021).

Η τηλεπισκόπηση που κάποτε αφορούσε ελάχιστα όργανα υψηλής τεχνολογίας προσβάσιμα από μικρό κομμάτι της επιστημονικής κοινότητας, μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί και με οικονομικά όργανα, διαθέσιμα στο ευρύ κοινό (UAV). Επιπλέον τα πολύπλοκα και δύσχρηστα δεδομένα τηλεπισκόπησης του παρελθόντος έχουν πλέον αντικατασταθεί από προ-επεξεργασμένα προϊόντα που εύκολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τα νέα εύχρηστα λογισμικά επεξεργασίας (Disney, 2016; Lechner et al., 2020; Ryu et al., 2019). Αυτές οι αλλαγές επέτρεψαν τη διάδοση της τηλεπισκόπησης καθιστώντας την βασικό εργαλείο μελέτης της γης και των διεργασιών της. Οι δείκτες βλάστησης, παρά τους περιορισμούς τους, εξακολουθούν να καταλαμβάνουν δεσπόζουσα θέση στην τηλεπισκόπηση της βλάστησης (Huete et al., 2014; Xue and Su, 2017), είτε με την απευθείας συσχέτιση τους με χαρακτηριστικά της βλάστησης είτε ως συστατικά μοντέλων. Ο NDVI υπολογίζεται αδιάληπτα από τη δεκαετία του 1970 έως σήμερα, παρέχοντας μια άνευ προηγουμένου καταγραφή της φαινολογίας της βλάστησης στο χρόνο και της αλληλεπίδρασης της με το μεταβαλλόμενο κλίμα (Hanes et al., 2014).

Ο υπολογισμός της πρωτογενούς παραγωγικότητας που αναλύθηκε παραπάνω, αποτελεί μια από τις συχνότερες εφαρμογές τηλεπισκοπικών δεδομένων σε χερσαία οικοσυστήματα, ενώ η χρήση ενεργητικών αισθητήρων (radar και laser) έχει επιτρέψει τον υπολογισμό της βιομάζας που περιέχεται στα δασικά οικοσυστήματα (Lefsky et al., 2002; Popescu and Wynne, 2004), μιας εκ των «αποθηκών» άνθρακα στον παγκόσμιο κύκλο του. Τα δεδομένα των ενεργητικών αισθητήρων έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη απεικόνιση της δομής του θόλου (Bergen et al., 2009; Dassot et al., 2011) βελτιώνοντας την μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με το θόλο (Cescatti, 1997; Cifuentes et al., 2017). Η κατανόηση της ανθρωπότητας για την λειτουργία του πλανήτη άλλαξε ριζικά χάρη στην τηλεπισκόπηση που παρείχε τα μέσα για την παγκόσμια παρακολούθηση των πλανητικών διεργασιών. Η παρακολούθηση του κύκλου του άνθρακα, παρά τις αβεβαιότητες που παραμένουν, έχει δώσει σημαντικές πληροφορίες για την αλλαγή του περιβάλλοντος και τους κινδύνους που αυτή επιφέρει (Jackson et al., 2018). Η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση των φυσικών πόρων, οι φυσικές καταστροφές έγινε δυνατό να αποτυπωθούν στο χώρο και το χρόνο, φέρνοντας την ανθρωπότητα αντιμέτωπη με τις συνέπειες της δράσης της (Hussain et al., 2021; Peñuelas et al., 2013).

Σε μια πιο θετική οπτική της χρήσης της τηλεπισκόπησης, σημαντική είναι η εφαρμογή της στην γεωργία (γεωργία ακριβείας) που στοχεύει στη λελογισμένη χρήση πόρων και τη μείωση του κόστους παραγωγής. Η παρακολούθηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων μπορεί να δώσει πληροφορίες για τις ανάγκες λίπανσης ή ποτίσματος μεταξύ άλλων (Khanal et al., 2020; Massari et al., 2021). Ειδικότερα με την ανάπτυξη των UAV τα τελευταία χρόνια, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση με υψηλή χωρική ανάλυση σε τακτά χρονικά διαστήματα ακόμη και μικρών καλλιεργούμενων εκτάσεων, παρέχοντας μια οικονομική λύση σε όλο και περισσότερους καλλιεργητές. Η μελέτη φυσικών οικοσυστημάτων και καλλιεργειών μέσω δεδομένων τηλεπισκόπησης, έχουν αναπτυχθεί ταυτόχρονα και μοιράζονται πληροφορίες και τεχνικές.

Εν κατακλείδι, η χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης για τη μελέτη χερσαίων οικοσυστημάτων είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο, με πλήθος εφαρμογών που έχουν ήδη εφαρμοστεί και άγνωστο αριθμό πιθανών μελλοντικών εφαρμογών. Ωστόσο, η τηλεπισκόπηση είναι μια δυναμική επιστήμη, που ακόμα εξελίσσεται και διαθέτει κάποιους εγγενείς περιορισμούς, τουλάχιστον με τα σημερινά δεδομένα. Ο περιορισμός των παθητικών αισθητήρων λόγω της εξάρτησης τους από την ηλιακή ακτινοβολία από τη μια και της αδυναμίας τους να λειτουργήσουν υπό συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες (συννεφιά, υγρασία) από την άλλη, θέτουν τα όρια των συγκεκριμένων οργάνων. Ενώ αντίστοιχα, ο περιορισμός των ενεργητικών αισθητήρων σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος, περιορίζουν τις εφαρμογές στις οποίες δύναται να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα τους. Η συνέχιση της μελέτης στο πεδίο, για την καλύτερη κατανόηση της φυσικής σημασίας των τηλεπισκοπικών δεδομένων και η συνεχείς βελτίωση των διαθέσιμων οργάνων είναι απαραίτητα για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που μας παρέχει η τηλεπισκόπηση.

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας των δορυφορικών δεδομένων να αποτυπώσουν δυναμικές παραμέτρους της βλάστησης, με έμφαση στην ολική πρωτογενή παραγωγικότητα (GPP). Η παραγωγικότητα των χερσαίων οικοσυστημάτων, ως βασικό μέρος του κύκλου του άνθρακα, είναι θεμελιώδους σημασίας για την λειτουργία του πλανήτη και την εξέλιξη της κλιματικής αλλαγής. Αρχικά, αξιολογείται η ακρίβεια ενός μοντέλου (sCASE) που χρησιμοποιεί δορυφορικά (MODIS) και μετεωρολογικά δεδομένα για να υπολογίσει ημερήσιες τιμές παραγωγικότητας, βασιζόμενο στην αρχή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ). Στη συνέχεια εξετάζονται επιμέρους στοιχεία του μοντέλου sCASE και συγκεκριμένα οι εξισώσεις (scalars) που χρησιμοποιεί για να αποτυπώσει την επίδραση διάφορων περιοριστικών παραγόντων στην αποδοτικότητα, με έμφαση στην ανίχνευση της υδατικής καταπόνησης (W_{scalar}). Παράλληλα, εξετάζεται η πιθανή επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην ακρίβεια του μοντέλου με την προσθήκη ενός επιπλέον scalar. Τέλος, εξετάζεται ο ρόλος της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων τηλεπισκόπησης αλλά και της ταξινόμησης που χρησιμοποιεί το sCASE, στην ακρίβεια της GPP που υπολογίζει. Όλα τα παραπάνω γίνονται με βάση μετρήσεις πύργων eddy covariance και τελικό στόχο τη δημιουργία μια βελτιωμένης εκδοχής του sCASE που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα οικοσυστήματα.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας επικεντρώνεται στον δείκτη Photochemical Reflectance Index (PRI) ο οποίος έχει βρεθεί πως συσχετίζεται με την ϵ σε πλήθος εργασιών. Αρχικά εξετάζεται η σχέση του PRI, από επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας, με δυο παραμέτρους της βλάστησης (λόγος χλωροφυλλών προς καροτενοειδή και δυναμικό νερού) σε μια προσπάθεια να αναλυθεί η πληροφορία που περιέχεται στον δείκτη. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια εκτενής ανάλυση της σχέσης του PRI με την ϵ σε επίπεδο οικοσυστήματος, με τη χρήση δεδομένων του δορυφορικού αισθητήρα MODIS. Εξετάζονται διάφοροι παράγοντες που είναι γνωστό πως επηρεάζουν αυτή τη σχέση, ενώ επιχειρείται να εξηγηθεί η ετερογένεια των έως τώρα ευρημάτων.

Ο ακριβής υπολογισμός της παραγωγικότητας των χερσαίων οικοσυστημάτων είναι απαραίτητος για την κατανόηση του ισοζυγίου εκπομπών και απορροφήσεων, που αποτελεί την βάση όλων των σχεδίων δράσης για την ανάσχεση της κλιματικής αλλαγής. Έως τώρα η χερσαία παραγωγικότητα έχει μετριάσει την αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ωστόσο, η δράση της αυτή απειλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας και τις έντονες ξηρασίες που απορρέουν από την κλιματική αλλαγή. Αμφότερες επιδρούν αρνητικά στην φωτοσύνθεση, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις οδηγούν σε ερημοποίηση των περιοχών και απώλεια δασικών οικοσυστημάτων. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή οδηγεί στην απώλεια δασικών εκτάσεων και μέσω της αύξησης της συχνότητας και της έντασης των πυρκαγιών και των πλημμυρών. Αν σε αυτά προστεθεί η συνεχιζόμενη αποψίλωση των δασών, το μέλλον του ισοζυγίου του άνθρακα είναι μάλλον δυσοίωνο.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Περιοχές μελέτης

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν διάφορα δασικά είδη από διάφορες περιοχές της Ευρώπης, συμπεριλαμβανομένης φυσικά της Ελλάδας (Εικόνα 10). Για πρακτικούς λόγους οι περιοχές μελέτης διακρίνονται σε δυο ομάδες, βάση του εάν διαθέτουν ή όχι πύργο eddy covariance. Στην πρώτη ομάδα περιλαμβάνονται δεκατρείς περιοχές εκτός Ελλάδας που διαθέτουν πύργο eddy covariance και στη δεύτερη, έξι περιοχές εντός Ελλάδας, που δεν διαθέτουν πύργο eddy.

Οι δεκατρείς περιοχές με πύργους eddy covariance βρίσκονται σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, καλύπτουν ένα εύρος δασικών οικοσυστημάτων (αείφυλλα, φυλλοβόλα, πλατύφυλλα, κωνοφόρα), καθώς και ένα εύρος κλιματικών συνθηκών (παραθαλάσσια μεσογειακά έως βόρεια οικοσυστήματα). Όλες οι περιοχές αφορούν σε πυκνά δάση, ειδικότερα γύρω από τον πύργο eddy, με τα κυρίαρχα είδη να αποτελούν πάνω από το 80% της συνολικής (δενδρώδους) βλάστησης. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι 13 περιοχές και δίνονται οι συντεταγμένες, τα βασικά είδη που περιέχονται σε καθεμία, καθώς και η περίοδος ανάλυσης. Τα δεδομένα (μετρήσεις GPP) από τους πύργους eddy των 13 αυτών περιοχών χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και την βελτίωση του μοντέλου sCASE, ενώ μια περιοχή από αυτές (San Rossore) χρησιμοποιείται για την μελέτη του δορυφορικού PRI.

Οι έξι περιοχές στην Ελλάδα βρίσκονται σκορπισμένες στην περιοχή της Πίνδου και μια στη Βουρβουρού της Χαλκιδικής. Οι έξι περιοχές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, όπου δίνονται οι συντεταγμένες, τα βασικά είδη που περιέχονται σε καθεμία, καθώς και η περίοδος ανάλυσης. Οι περιοχές αυτές χρησιμοποιούνται για την εξέταση της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων στην απόδοση του μοντέλου sCASE. Τρεις από αυτές τις περιοχές χρησιμοποιούνται επίσης για την ανάλυση του PRI μέσω επίγειων μετρήσεων ανακλαστικότητας.

Πίνακας 1. Οι δεκαετίες περιοχές μελέτης που διαθέτουν πύργο eddy covariance. Στην παρένθεση δίνεται η κατηγορία βλάστησης κάθε περιοχής βάσει του IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), όπου MF = Mixed Forest, ENF = Evergreen Needleleaf forest, DBF = Deciduous Broadleaf forest και EBF = Evergreen Broadleaf Forest.

Περιοχή Μελέτης	Υψόμετρο (m)	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Κυρίαρχο Είδος	Περίοδος Μελέτης	Χώρα
Vielsalm (MF)	493	50.3049°	5.9981°	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Fagus sylvatica</i>	2001-2014	Βέλγιο
Hyytiälä (ENF)	181	61.8474°	24.2947°	<i>Pinus sylvestris</i>	2001-2014	Φινλανδία
Lavarone (ENF)	1353	45.9562°	11.2813°	<i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i>	2003-2014	Ιταλία
Loobos (ENF)	25	52.1665°	5.74356°	<i>Pinus sylvestris</i>	2001-2014	Ολλανδία
Hainich (DBF)	430	51.0792°	10.4521°	<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>	2001-2012	Γερμανία
Leinefelde (DBF)	451	51.3282°	10.3678°	<i>Fagus sylvatica</i>	2002-2006 και 2010-2012	Γερμανία
Fontainebleau-Barbeau (DBF)	103	48.4763°	2.7801°	<i>Quercus petraea</i>	2005-2014	Γαλλία
Collelongo (DBF)	1560	41.8493°	13.5881°	<i>Fagus sylvatica</i>	2001-2014	Ιταλία
Roccarespampani 1 (DBF)	235	42.4081°	11.9300°	<i>Quercus cerris</i>	2001-2008	Ιταλία
Roccarespampani 2 (DBF)	160	42.3902°	11.9209°	<i>Quercus cerris</i>	2002-2008 και 2010-2012	Ιταλία
San Rossore (ENF)	6	43.7278°	10.2844°	<i>Pinus pinaster</i> , <i>Pinus pinea</i>	2001-2012	Ιταλία
Puéchabon (EBF)	270	43.7413°	3.5957°	<i>Quercus ilex</i>	2001-2014	Γαλλία
Castelporziano (EBF)	68	41.7052°	12.3761°	<i>Quercus ilex</i>	2001-2008	Ιταλία

Πίνακας 2. Οι έξι περιοχές μελέτης στην Ελλάδα. Η περιοχή *Pinus halepensis* βρίσκεται στην Βουρβουρού Χαλκιδικής, ενώ όλες οι υπόλοιπες στο Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου.

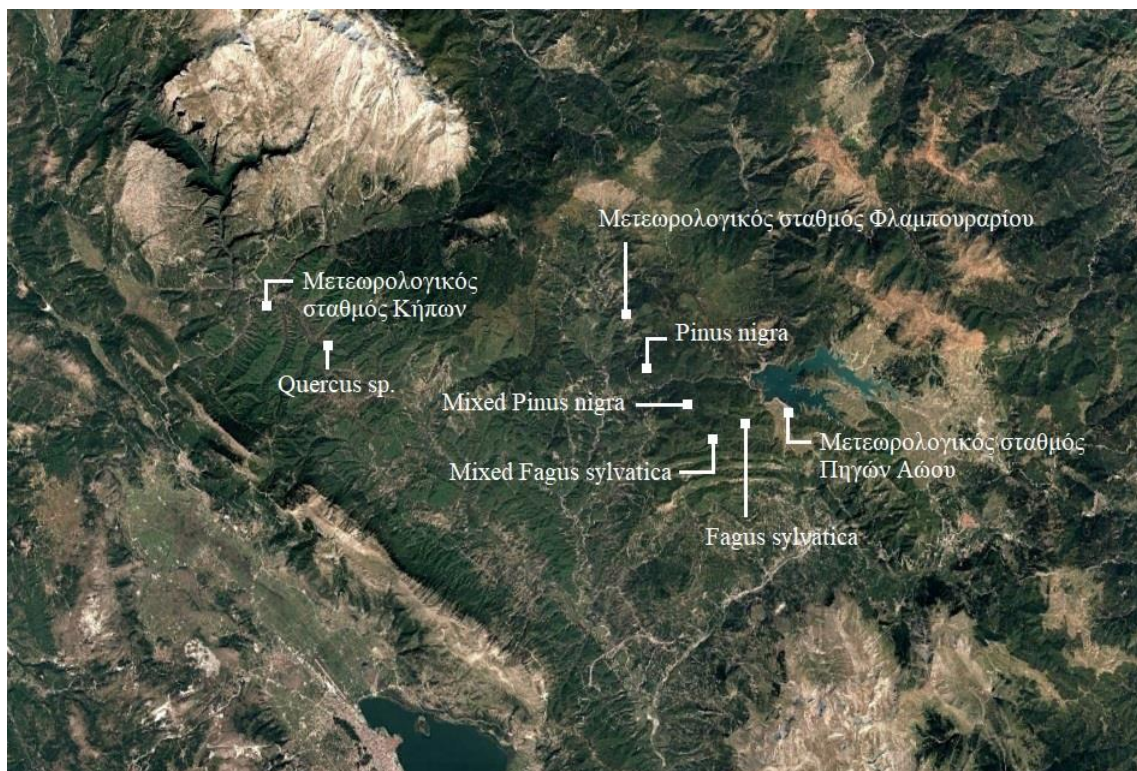
Περιοχή Μελέτης	Υψόμετρο (m)	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Κυρίαρχο Είδος	Περίοδος Μελέτης
<i>Fagus sylvatica</i>	1500	39.8104°	21.0539°	<i>Fagus sylvatica</i>	2013-2014, 2017
<i>Quercus</i> sp.	825	39.8437°	20.8199°	<i>Quercus cerris</i> , <i>Quercus frainetto</i>	2013-2014, 2017
<i>Pinus nigra</i>	1055	39.8354°	21.0018°	<i>Pinus nigra</i>	2013-2014, 2017
Mixed <i>Pinus nigra</i>	1170	39.8187°	21.0293°	<i>Pinus nigra</i>	2017
Mixed <i>Fagus sylvatica</i>	1430	39.8062°	21.0417°	<i>Fagus sylvatica</i>	2017
<i>Pinus halepensis</i>	250	40.1729°	23.7615°	<i>Pinus halepensis</i>	2017



Εικόνα 10. Χάρτης της Ευρωπαϊκής ηπείρου όπου διακρίνονται όλες οι περιοχές μελέτης. Οι ακριβείς θέσεις των πέντε περιοχών στη Βόρεια Πίνδο δίνονται στην Εικόνα 11.

Μετεωρολογικά δεδομένα

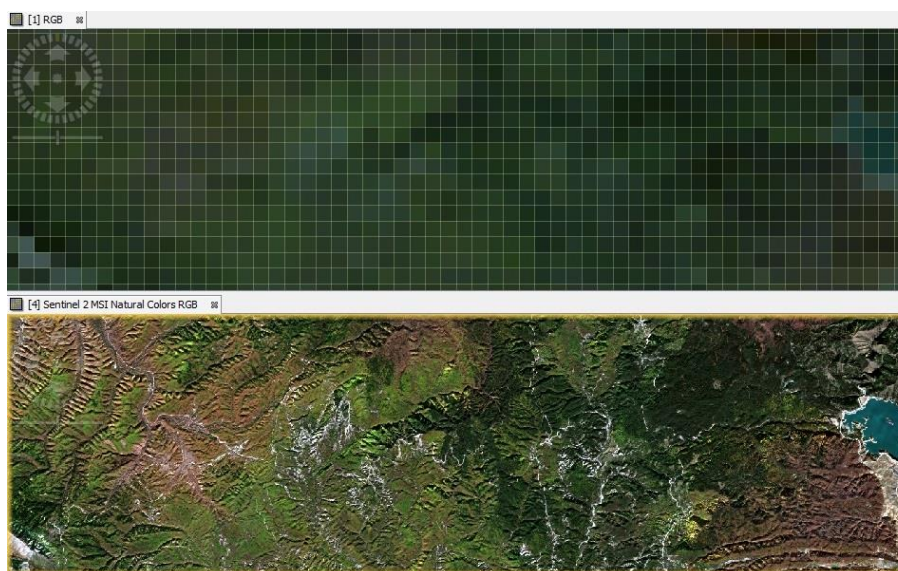
Όπως αναφέρθηκε ήδη, βασικό συστατικό των μοντέλων LUE είναι τα μετεωρολογικά δεδομένα, η ακρίβεια των οποίων είναι καθοριστική για την ακρίβεια του μοντέλου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά δεδομένα από επίγειους σταθμούς που βρίσκονται όσο το δυνατόν εγγύτερα στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Στην περίπτωση των περιοχών που διαθέτουν πύργους eddy, οι μετρήσεις παρέχονται από όργανα που διαθέτει ο ίδιος ο πύργος, όπως αναλύεται παρακάτω (παράγραφος Δεδομένα eddy covariance). Στην περιοχή της Βόρειας Πίνδου τα δεδομένα προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς του εργαστηρίου Βοτανικής του τμήματος Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Για κάθε μια από τις πέντε περιοχές χρησιμοποιούνται δεδομένα από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Συγκεκριμένα, για την περιοχή *Quercus* χρησιμοποιείται ο σταθμός που βρίσκεται στο χωριό Κήποι (39.8620° B, 20.7857° A, 750 m), για την περιοχή *Pinus* χρησιμοποιούνται δεδομένα του σταθμού στο χωριό Φλαμπουράρι (39.8580° B, 20.9889° A, 1025 m), ενώ για τις άλλες τρεις περιοχές χρησιμοποιούνται δεδομένα του σταθμού που βρίσκεται στην όχθη της τεχνητής λίμνης των πηγών του Αώου (39.8188° B, 21.0819° A, 1344 m). Οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν την θερμοκρασία, την βροχόπτωση και την PAR κάθε δέκα λεπτά. Τέλος, για την περιοχή της Βουρβουρούς χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον σταθμό του δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου που βρίσκεται στον Νέο Μαρμαρά (40.0934° B, 23.7807° A, 10 m). Από τον σταθμό αυτό είναι διαθέσιμες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας (ελάχιστης, μέσης και μέγιστης), βροχόπτωσης και PAR (Lagouvardos et al., 2017).



Εικόνα 11. Χάρτης μέρους του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου όπου φαίνονται οι περιοχές μελέτης και οι μετεωρολογικοί σταθμοί.

Δορυφορικά δεδομένα

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα από τρεις διαφορετικούς δορυφορικούς αισθητήρες, τους MODIS (Terra και Aqua), MSI (Sentinel-2) και OLCI (Sentinel-3), με το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας να έχει πραγματοποιηθεί με δεδομένα του MODIS. Και οι τρεις αυτοί αισθητήρες ακολουθούν ηλιοσύγχρονη τροχιά, που σημαίνει ότι διέρχονται από κάθε σημείο την ίδια τοπική ώρα όλες τις ημέρες, γεγονός που τους επιτρέπει να απεικονίζουν την κάθε περιοχή υπό τις ίδιες συνθήκες φωτισμού, αν εξαιρεθούν οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι εποχικές αλλαγές. Πέραν αυτού οι αισθητήρες αυτοί διαθέτουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, όπως αναλύεται παρακάτω. Ειδικότερα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα εξεταστεί η διαφορετική χωρική ανάλυση των τριών αισθητήρων και η πιθανή επίδραση της στην ακρίβεια ενός μοντέλου παραγωγικότητας. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται η περιοχή της Βόρειας Πίνδου όπως φαίνεται σε μία εικόνα MODIS (500 m) και μια εικόνα Sentinel-2A (10 m), όπου είναι εμφανής η διαφορά στην διακριτική ικανότητα των δυο.



Εικόνα 12. Η περιοχή της Βόρειας Πίνδου όπως φαίνεται σε μια εικόνα MODIS (πάνω, 500 m χωρική ανάλυση) και μια εικόνα MSI (κάτω, 10 m χωρική ανάλυση).

MODIS

Ο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) είναι ο βασικός αισθητήρας αυτής της διατριβής, με τα δεδομένα του να χρησιμοποιούνται σε όλα τα μέρη της. Ο MODIS είναι ένας πολυφασματικός αισθητήρας που διαθέτει 36 φασματικά κανάλια (Πίνακας 3) που διαφέρουν ως προς την φασματική και χωρική ανάλυση τους και εκτείνονται σε ολόκληρο το ορατό και υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (405 – 14385 nm). Η ραδιομετρική ανάλυση του MODIS είναι 12 bit, δηλαδή ο αισθητήρας μπορεί να διακρίνει 4096 εντάσεις ακτινοβολίας ανά κανάλι. Δυο αισθητήρες MODIS βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη, ένας στον δορυφόρο Terra (εκτόξευση 18/12/1999) και ένας στον δορυφόρο Aqua (εκτόξευση 4/5/2002), αμφότεροι σε ύψος 705 km. Καθένας τους έχει πλάτος σάρωσης 2330 km (εύρος πεδίου ± 55 μοίρες) που του επιτρέπει να καλύπτει το σύνολο της γήινης επιφάνειας σχεδόν καθημερινά, αν και ο πλήρης κύκλος του διαρκεί 16 ημέρες. Ωστόσο, το μεγάλο

εύρος πεδίου έχει ως αποτέλεσμα τα pixel που απέχουν από την κατακόρυφο (nadir) να εμφανίζουν έντονη αλλοίωση και το μέγεθος τους να μεγαλώνει.

Πίνακας 3. Τα 36 κανάλια του MODIS.

Κανάλι	Μήκος κύματος (nm)	Χωρική ανάλυση (m)	Κανάλι	Μήκος κύματος (nm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	620-670	250	20	3660-3840	1000
2	841-876	250	21	3929-3989	1000
3	459-479	500	22	3929-3989	1000
4	545-565	500	23	4020-4080	1000
5	1230-1250	500	24	4433-4498	1000
6	1628-1652	500	25	4482-4549	1000
7	2105-2155	500	26	1360-1390	1000
8	405-420	1000	27	6535-6895	1000
9	438-448	1000	28	7175-7475	1000
10	483-493	1000	29	8400-8700	1000
11	526-536	1000	30	9580-9880	1000
12	546-556	1000	31	10780-11280	1000
13	662-672	1000	32	11770-12270	1000
14	673-683	1000	33	13185-13485	1000
15	743-753	1000	34	13485-13785	1000
16	862-877	1000	35	13785-14085	1000
17	890-920	1000	36	14085-14385	1000
18	931-941	1000			
19	915-965	1000			

Οι αρχικές λήψεις του αισθητήρα υφίστανται διάφορες επεξεργασίες από τους υπεύθυνους του προγράμματος του MODIS με αποτέλεσμα να διατίθενται πλήθος προϊόντων που διαφέρουν στο περιεχόμενο (κανάλια, χωρική ανάλυση, βαθμός επεξεργασίας). Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα προϊόντα του MODIS (MOD και MYD για τον MODIS/Terra και τον MODIS/Aqua αντίστοιχα) που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή καθώς και οι παράμετροι που εξήχθησαν από το κάθε προϊόν. Τα δεδομένα του MODIS είναι ελεύθερα διαθέσιμα μέσω των ιστοσελίδων της NASA, LAADS Web (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) και ORNL (<http://daac.ornl.gov/MODIS/>).

Πίνακας 4. Τα προϊόντα του MODIS που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. MOD για δεδομένα που προέρχονται από τον Terra και MYD για αυτά από τον Aqua.

Προϊόν	Εξαχθείσα παράμετρος	Χωρική ανάλυση (m)	Χρονική ανάλυση
MOD/MYD021KM	PRI	1000	Ημερήσιο
MOD/MYD03	Γεωμετρία λήψης των MOD/MYD021KM	1000	Ημερήσιο
MOD09A1	NDVI, RDVI, NDWI, LSWI, ND27, NMDI	500	Οκταήμερο
MYD09A1	NDVI	500	Οκταήμερο
MOD17A2	GPP	500	Οκταήμερο

MOD/MYD021KM

Τα ημερήσια αυτά προϊόντα του MODIS περιέχουν τις ραδιομετρικά διορθωμένες τιμές ακτινοβολίας στο επίπεδο του αισθητήρα για τα 36 κανάλια του MODIS σε χωρική ανάλυση 1 km (τα πρώτα επτά κανάλια ομαδοποιούνται). Τα δεδομένα αυτά δεν έχουν σταθερή γεωγραφική προβολή καθώς ομαδοποιούνται σε πακέτα κατά την τροχιά σάρωσης του δορυφόρου, ωστόσο γίνεται γεωαναφορά τους βάση συγκεκριμένων σημείων αναφοράς. Στο προϊόν περιλαμβάνονται παράμετροι που χρησιμεύουν για τη μετατροπή της ακτινοβολίας σε ανακλαστικότητα στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top Of Atmosphere reflectance, TOA), για κάθε κανάλι (Toller and Isaacman, 2009). Καθώς οι εικόνες αυτές δεν έχουν υποστεί επεξεργασία απαιτείται ο έλεγχος τους ώστε να αποκλειστούν εικόνες που περιέχουν σύννεφα ή άλλες αλλοιώσεις και να χρησιμοποιηθούν μόνο οι καθαρές εικόνες για τον υπολογισμό του PRI. Αρχικά, η ποιότητα κάθε εικόνας ελέγχεται οπτικά και όσες περιέχουν σύννεφα ή σκιές από σύννεφα αποκλείονται. Στη συνέχεια, οι εικόνες που παραμένουν ελέγχονται περαιτέρω βάση του λόγου PAR προς $PAR_{potential}$ (TOA PAR) της αντίστοιχης ημέρας από τα δεδομένα του πύργου. Για να θεωρηθεί μια εικόνα ως καθαρή και να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, απαιτείται ο λόγος αυτός να υπερβαίνει το 60%. Το ποσοστό αυτό προκύπτει από το ότι ακόμη και υπό βέλτιστες συνθήκες το 30% της ακτινοβολίας δεν φτάνει στην επιφάνεια της γης (Wald, 2018), και μια μικρή διαφορά μεταξύ δυνητικής και πραγματικής προσπίπτουσας PAR είναι ανεκτή (οι Middleton et al., 2016 το ορίζουν στο 15%).

MOD/MYD03

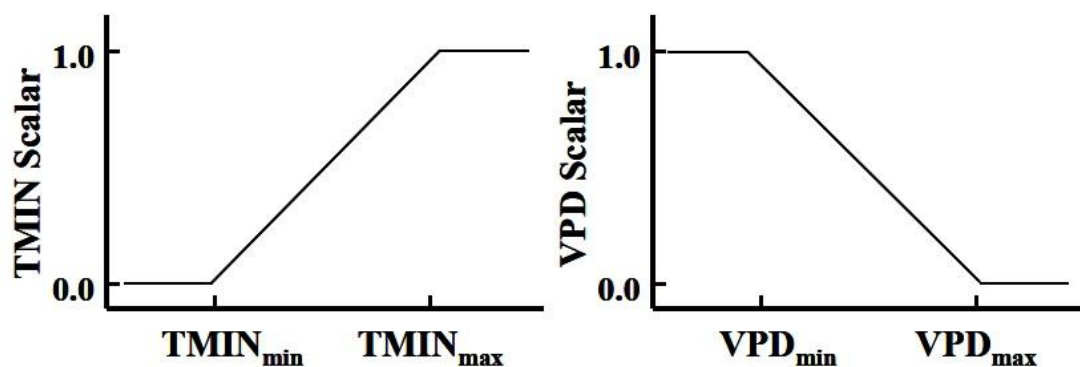
Τα προϊόντα αυτά περιέχουν τις συντεταγμένες, τα δεδομένα γεωμετρίας λήψης (γωνίες ηλίου και δορυφόρου) και φίλτρα στεριάς/νερού για κάθε εικονοστοιχείο της αντίστοιχης εικόνας MOD/MYD021KM. Αφού εντοπιστεί το pixel που περιέχει τον πύργο, τα στοιχεία που παρέχονται από το προϊόν αυτό χρησιμοποιούνται για την αποδοχή ή απόρριψη της αντίστοιχης εικόνας. Βασικό κριτήριο για την καταλληλότητα ή μη μιας λήψης αποτελεί η απόσταση (γωνία) του στόχου από την κατακόρυφο του αισθητήρα (viewing zenith angle, VZA). Καθώς αυξάνεται η VZA αυξάνεται το μέγεθος του pixel, φτάνοντας το 1,5 km για γωνία 36° (Wolfe et al., 1998), προκαλώντας σημαντικές γεωγραφικές αλλοιώσεις.

MOD/MYD09A1

Το προϊόν αυτό περιέχει διορθωμένες τιμές ανακλαστικότητας στο επίπεδο της επιφάνειας της γης (Bottom Of Atmosphere, BOA) για τα επτά πρώτα κανάλια του MODIS, σε χωρική ανάλυση 500 μέτρων. Οι εικόνες των προϊόντων αυτών προκύπτουν μετά από ραδιομετρική, γεωμετρική και ατμοσφαιρική διόρθωση (Vermote et al., 1997) των πρωταρχικών δεδομένων και τη σύνθεση τους σε σταθερή χαρτογραφική προβολή (sinusoidal projection) για κάθε οκτώ ημέρες από τη NASA. Επιπλέον, για τα δύο πρώτα κανάλια παράγεται ένα εικονοστοιχείο για κάθε τέσσερα εικονοστοιχεία 250m, ώστε όλα τα κανάλια να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση. Για κάθε εικονοστοιχείο επιλέγεται η καλύτερη ημέρα του οκταήμερου βάση των δεικτών ποιότητας που δημιουργούνται κατά την διαδικασία διόρθωσης, ενώ καθοριστικής σημασίας είναι και το μέγεθος του εικονοστοιχείου στα πρωταρχικά δεδομένα κάθε ημέρας. Οι δείκτες ποιότητας για κάθε εικονοστοιχείο που επιλέγεται παρέχονται στο τελικό προϊόν ως δυο επιπλέον κανάλια (κανάλια του προϊόντος όχι του αισθητήρα), με το ένα να περιέχει πληροφορίες για τα κανάλια ανακλαστικότητας και τις διορθώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί και το άλλο να παρέχει πληροφορίες για τον στόχο και την ποιότητα της ατμόσφαιρας (κανάλια 8 και 12 αντίστοιχα). Τα κανάλια αυτά (quality bands) χρησιμοποιούνται για την αποδοχή ή απόρριψη της εκάστοτε εικόνας, ανάλογα με τα κριτήρια του χρήστη. Επιπλέον το προϊόν MOD09A1 περιέχει στοιχεία για την ημέρα και την γεωμετρία λήψης κάθε εικονοστοιχείου.

MOD17A2

Το προϊόν αυτό παρέχει τις τιμές GPP (MOD17-GPP, Running and Zhao, 2019) για κάθε οκταήμερο με χωρική ανάλυση 500 μέτρων, όπως υπολογίζονται από το μοντέλο παραγωγικότητας του MODIS (MODIS-LUE, Running et al., 2004), το οποίο βασίζεται στην αρχή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (μοντέλο LUE). Το μοντέλο παραγωγικότητας του MODIS χρησιμοποιεί το οκταήμερο προϊόν fAPAR του MODIS (MOD15, 500 μέτρα χωρική ανάλυση) και ημερήσιες τιμές PAR από το μετεωρολογικό αρχείο GMAO/NASA (Global Modeling and Assimilation Office) για να υπολογίσει την APAR. Ο αλγόριθμος (MODIS-LUE) περιλαμβάνει ένα θερμοκρασιακό και ένα υδατικό scalar που υπολογίζονται σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 13. Οι ημερήσιες τιμές ελάχιστης θερμοκρασίας και VPD που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δυο scalar (θερμοκρασιακού και υδατικού αντίστοιχα) προέρχονται από το αρχείο GMAO/NASA. Το μετεωρολογικό αρχείο GMAO/NASA είναι προϊόν μοντελοποίησης, βασίζεται σε διάφορα διαθέσιμα δεδομένα μεταξύ αυτών και δορυφορικά, και παράγει ωριαίες τιμές διάφορων μετεωρολογικών παραμέτρων για το σύνολο της επιφάνειας της γης με χωρική ανάλυση δεκάδων χιλιομέτρων (Rienecker et al., 2008). Τέλος, το MODIS-LUE βασίζεται στο ετήσιο προϊόν ταξινόμησης του MODIS (MCD12Q1) για τις ειδοειδικές παραμέτρους που χρησιμοποιεί (ϵ_0 , $TMIN_{min}$, $TMIN_{max}$, VPD_{min} , VPD_{max}). Η ταξινόμηση έχει χωρική ανάλυση 500 μέτρα και διακρίνει 14 ταξινομικές ομάδες (11 φυτικές), εκ των οποίων οι πέντε αφορούν δασικά οικοσυστήματα (παρουσιάζονται στον Πίνακα 5).



Εικόνα 13. Τα διαγράμματα υπολογισμού των δυο scalar που χρησιμοποιεί το μοντέλο παραγωγικότητας του MODIS (MODIS-LUE). MOD17A2H user guide, Running and Zhao, 2019.

Πίνακας 5. Οι ειδικές παράμετροι του μοντέλου παραγωγικότητας του MODIS για τις πέντε ταξινομικές ομάδες που αφορούν σε δασικά οικοσυστήματα. MOD17A2H user guide, Runing and Zhao, 2019.

Ταξινομική ομάδα MCD12Q1	ϵ_0 ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1} \text{mol}^{-1}$)	TMIN_{\min} ($^{\circ}\text{C}$)	TMIN_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	VPD_{\min} (Pa)	VPD_{\max} (Pa)
Evergreen Needleleaf Forrest (ENF)	0,215	-8,00	8,31	650	4600
Evergreen Broadleaf Forest (EBF)	0,283	-8,00	9,09	800	3100
Deciduous Needleleaf Forest (DNF)	0,243	-8,00	10,44	650	2300
Deciduous Broadleaf Forest (DBF)	0,260	-6,00	9,94	650	1650
Mixed Forest (MF)	0,235	-7,00	9,50	650	2400

ORNL MODIS

Μέσω του αρχείου ORNL παρέχονται συγκεκριμένα προϊόντα του MODIS σε μια προσιτή στον τελικό χρήστη μορφή (αρχεία excel), απαλλάσσοντας τον από την ανάγκη χρήσης εξειδικευμένων λογισμικών επεξεργασίας εικόνων. Μεταξύ των προϊόντων που διατίθενται μέσω του ORNL είναι και τα MOD/MYD09A1 και MOD17A2 που περιγράφηκαν παραπάνω. Κάθε αρχείο ORNL αντιστοιχεί σε ένα προϊόν του MODIS και περιέχει τις τιμές όλων των παραμέτρων του προϊόντος αυτού, από την έναρξη παραγωγής του έως και την λίγες ημέρες πριν την ημέρα πρόσβασης στο αρχείο. Η εφαρμογή παρέχει έτοιμα δεδομένα για σημεία ενδιαφέροντος (57 επί 57 εικονοστοιχεία), όπως περιοχές με πύργους eddy covariance, ή για οποιοδήποτε σημείο κατά απαίτηση του χρήστη.

MSI (Sentinel-2)

Ο MSI (Multi Spectral Instrument) είναι ένας πολυφασματικός αισθητήρας που διαθέτει 13 κανάλια στο ορατό και υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (433 έως 2280 nm), με ραδιομετρική ανάλυση 12 bit (4096 εντάσεις ακτινοβολίας). Δυο δορυφόροι φέρουν τον αισθητήρα MSI, ο Sentinel-2A που βρίσκεται σε λειτουργία από τον Ιούνιο του 2015 και ο Sentinel-2B που βρίσκεται σε λειτουργία από τον Μάρτιο του 2017. Καθένας τους έχει ύψος τροχιάς 786 km και εύρος πεδίου $\pm 20.6^{\circ}$ καταλήγοντας σε πλάτος σάρωσης 290 km. Ο πλήρης κύκλος κάθε Sentinel-2

διαρκεί δέκα ημέρες και συνδυαστικά επιτυγχάνουν λήψη της ίδιας περιοχής (υπό τις ίδιες συνθήκες) κάθε πέντε ημέρες (Eurospian Space Agency, 2015). Ανάλογα με το κανάλι η χωρική ανάλυση του MSI ποικίλει μεταξύ 10, 20 και 60 μέτρων. Στον Πίνακα 6 δίνονται τα μήκη κύματος των καναλιών του Sentinel-2 με την αντίστοιχη χωρική ανάλυση καθενός. Τα δεδομένα των Sentinel-2 είναι ελεύθερα διαθέσιμα μέσω της ιστοσελίδας <https://scihub.copernicus.eu> της ESA.

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα επιπέδου Level-2A του MSI από τον Sentinel-2A. Οι εικόνες Level-2A περιέχουν ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά διορθωμένα δεδομένα ανακλαστικότητας εδάφους, που παρέχονται σε τμήματα των εκατό τετραγωνικών χιλιομέτρων με σταθερή χαρτογραφική προβολή. Οι ανακλαστικότητες εδάφους από τις εικόνες Level-2A χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης NDVI και RDVI, αλλά και για τη ταξινόμηση περιοχών μελέτης όπως αναλύεται παρακάτω (παράγραφος «Ταξινόμηση Βλάστησης»).

Πίνακας 6. Τα κανάλια του αισθητήρα MSI (Sentinel-2).

Κανάλι	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Εύρος (nm)	Χωρική ανάλυση (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1380	30	60
11	1610	90	60
12	2190	180	20

OLCI (Sentinel-3)

Ο πολυφασματικός αισθητήρας OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) διαθέτει 21 στενά φασματικά κανάλια (Πίνακας 7) στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (392,5 - 1040 nm). Ο OLCI έχει 300 μέτρα χωρική ανάλυση και 14 bit ραδιομετρική (16384 εντάσεις ακτινοβολίας). Όπως οι MODIS και MSI, έτσι και ο αισθητήρας OLCI βρίσκεται σε δύο δορυφόρους, τους Sentinel-3A (Οκτώβριο του 2016) και Sentinel-3B (Απρίλη του 2018). Καθένας τους έχει ύψος τροχιάς 814,5 km και εύρος πεδίου $\pm 34.3^\circ$ καταλήγοντας σε πλάτος σάρωσης 1270 km, που του επιτρέπει να απεικονίζει κάθε περιοχή τουλάχιστον κάθε 4 ημέρες και συνδυαστικά τουλάχιστον κάθε 2. Ωστόσο, ο πλήρης κύκλος των Sentinel-3 και κατ' επέκταση των OLCI διαρκεί 27 ημέρες (Bourg et al., 2023). Τα δεδομένα του OLCI είναι ελεύθερα διαθέσιμα μέσω της ιστοσελίδας <https://scihub.copernicus.eu> της ESA.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα Level-1B, από τον OLCI του Sentinel-3A, που περιέχουν ραδιομετρικά διορθωμένες τιμές ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA). Στις εικόνες αυτές εφαρμόστηκε διόρθωση Rayleigh, μέσω του λογισμικού

επεξεργασίας εικόνων SNAP (Sentinel Application Platform, <http://step.esa.int>), ώστε να παραχθούν τιμές ανακλαστικότητας εδάφους (που αντιστοιχούν στο προϊόν Level-2A) που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης.

Πίνακας 7. Τα κανάλια του αισθητήρα OLCI (Sentinel-3). Όλα τα κανάλια του OLCI έχουν 300 m χωρική ανάλυση.

Κανάλι	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Εύρος (nm)
Oa1	400	15
Oa2	412,5	10
Oa3	442,5	10
Oa4	490	10
Oa5	510	10
Oa6	560	10
Oa7	620	10
Oa8	665	10
Oa9	673,75	7,5
Oa10	681,25	7,5
Oa11	708,75	10
Oa12	753,75	7,5
Oa13	761,25	2,5
Oa14	764,375	3,75
Oa15	767,5	2,5
Oa16	778,75	15
Oa17	865	20
Oa18	885	10
Oa19	900	10
Oa20	940	20
Oa21	1020	40

Δεδομένα eddy covariance

Για τις ανάγκες αυτής της διατριβής χρησιμοποιήθηκε το πακέτο δεδομένων FLUXNET2015 (<https://fluxnet.fluxdata.org/>) που περιέχει τα δεδομένα όλων των πύργων eddy covariance που συμμετέχουν στο δίκτυο fluxnet, ένα παγκόσμιο δίκτυο πύργων eddy covariance (<https://fluxnet.org>). Το πακέτο FLUXNET2015 διατίθεται ελεύθερα και περιέχει τα δεδομένα όλων των πύργων, από την έναρξη λειτουργίας καθενός έως και το τέλος του 2014. Τα δεδομένα από όλους τους πύργους έχουν επεξεργαστεί με τις ίδιες μεθόδους και διατίθενται σε μισάωρο βήμα καθώς και ομαδοποιημένα ανά ημέρα, εβδομάδα, μήνα και χρόνο. Το FLUXNET2015 περιέχει εκτός από τις τιμές GPP, τιμές για ροές ενέργειας, αλλά και διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους (θερμοκρασία, βροχόπτωση κ.α.). Οι παράμετροι του FLUXNET2015 που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία δίνονται στον Πίνακα 8, όπου δίνονται οι μονάδες μέτρησης αλλά και το αρχείο από όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα (μισάωρο ή ημερήσιο βήμα).

Το πακέτο FLUXNET2015 περιλαμβάνει τρεις παραλλαγές κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την διόρθωση λαθών και τη συμπλήρωση κενών στα πρωταρχικά δεδομένα (Pastorello et al., 2020). Οι δυο παραλλαγές προκύπτουν από δυο διαφορετικές μεθόδους διόρθωσης ενώ η τρίτη παραλλαγή, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, προκύπτει από τη μίξη αυτών των δυο. Για την πλειοψηφία των μετεωρολογικών παραμέτρων επιλέχθηκε το αρχείο των ημερήσιων τιμών όπως διατίθενται στο πακέτο FLUXNET2015, εξαιρέση αποτελούν η θερμοκρασία και η ακτινοβολία (PAR). Για τη θερμοκρασία επιλέχθηκε το αρχείο των μισάωρων τιμών για να υπολογιστούν για κάθε μέρα η ελάχιστη και η μέγιστη θερμοκρασία, που δεν είναι διαθέσιμες στο ημερήσιο αρχείο. Όσον αφορά την ακτινοβολία, το πακέτο FLUXNET2015 περιέχει τιμές πυκνότητας ροής φωτοσυνθετικών φωτονίων (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), με τα αρχεία αυτά ωστόσο να εμφανίζουν μεγάλα κενά (σε όλους τους πύργους) που τα καθιστούν προβληματικά. Αντ' αυτού, οι τιμές PAR υπολογίζονται από τις μισάωρες τιμές ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (Short Wave radiation). Η μετατροπή της SW ακτινοβολίας (W m^{-2}) σε PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) γίνεται με τον πολλαπλασιασμό της με μια σταθερά που διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (Howell et al., 1983). Για τον ακριβή προσδιορισμό της σταθεράς αυτής για κάθε μια από τις περιοχές μελέτης, χρησιμοποιείται η σχέση μεταξύ των μισάωρων τιμών SW και PPFD. Οι ημερήσιες τιμές PAR ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) προκύπτουν από την ολοκλήρωση των 48 μισάωρων τιμών κάθε ημέρας. Αυτό επιτυγχάνεται με την πρόσθεση όλων των μισάωρων τιμών και τον πολλαπλασιασμό τους με 1800 (τα δευτερόλεπτα κάθε ημιώρου) επί 10^{-6} (μετατροπή των μmol σε mol). Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζεται η δυνητική PAR (PAR potential) από τη δυνητική SW ακτινοβολία, που αντιστοιχεί στην PAR στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA PAR).

Στην περίπτωση της GPP το πακέτο FLUXNET2015 περιέχει ένα πλήθος διαφορετικών τιμών GPP που πηγάζουν από διαφορετικές προσεγγίσεις τόσο στον υπολογισμό της καθαρής ροής CO_2 (NEE) μεταξύ οικοσυστήματος και ατμόσφαιρας, όσο και του διαχωρισμού της NEE σε GPP και αναπνοή του οικοσυστήματος. Και τα δυο αυτά στάδια υπολογισμού της GPP είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και εν πολλοίς ακόμη υπό διερεύνηση, και ξεφεύγουν από τη στόχευση της παρούσας εργασίας. Επιγραμματικά αναφέρεται πως η GPP που επιλέχθηκε βασίζεται στην NEE υπολογισμένη σύμφωνα με τις εξισώσεις των Papale et al. (2006) και ο διαχωρισμός της σε GPP και αναπνοή έγινε με τη μέθοδο διαχωρισμού των Reichstein et al. (2005). Λεπτομέρειες για τις διαφορετικές μεθόδους μπορούν να βρεθούν στη σχετική με το FLUXNET2015 βιβλιογραφία (Pastorello et al., 2020) και την ιστοσελίδα του δικτύου fluxnet (<https://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/data-processing/>).

Πίνακας 8. Τα δεδομένα από το πακέτο FLUXNET2015 που χρησιμοποιήθηκαν.

Παράμετρος	Χρονικό βήμα	Μονάδα μέτρησης
Θερμοκρασία	Μισάωρο	°C
Βροχόπτωση	Ημερήσιο	mm
SW potential	Μισάωρο	W m ⁻²
SW incoming	Μισάωρο	W m ⁻²
PPFD	Μισάωρο	μmol φωτονίων m ⁻² s ⁻¹
VPD	Ημερήσιο	hPa
Ταχύτητα ανέμου	Ημερήσιο	m s ⁻¹
GPP	Ημερήσιο	g C m ⁻² d ⁻¹
	Μισάωρο	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
SWC	Ημερήσιο	%
Latent heat	Ημερήσιο	W m ⁻²
Sensible heat	Ημερήσιο	W m ⁻²

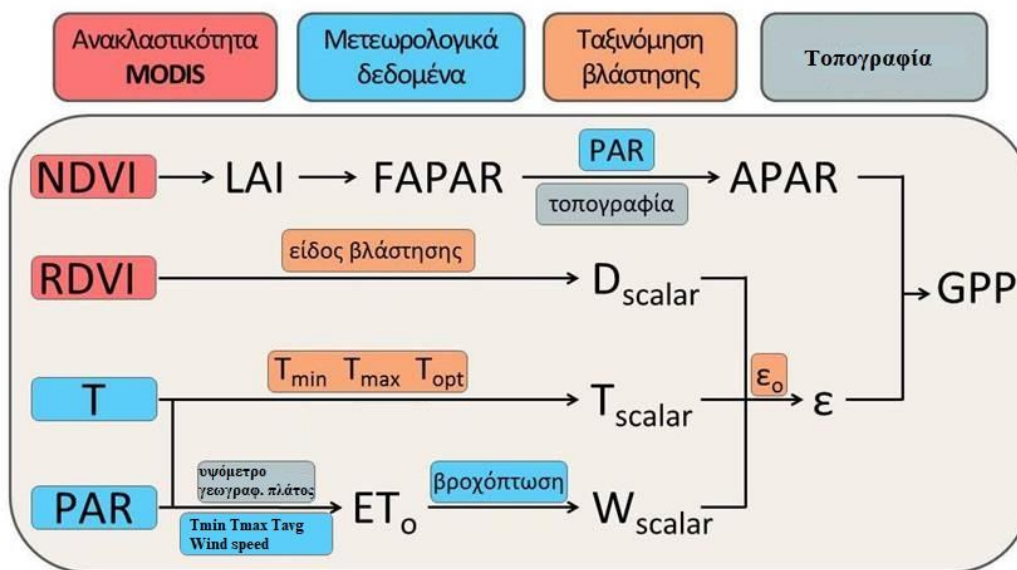
Μοντέλο παραγωγικότητας sCASE

Το μοντέλο sCASE (Stagakis et al., 2015) είναι ένα μοντέλο LUE που αναπτύχθηκε για τη μελέτη της παραγωγικότητας των δασών του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου. Το sCASE χρησιμοποιεί δορυφορικούς δείκτες βλάστησης από το προϊόν MOD09A1 του MODIS/Terra και μετεωρολογικά δεδομένα από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς για να υπολογίσει την ημερήσια τιμή GPP σε χωρική ανάλυση 500 m. Οι δυο δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούνται στο sCASE είναι οι NDVI και RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index, Roujean and Breon, 1995). Και οι δυο χρησιμοποιούν τις ανακλαστικότητες στο κόκκινο (R_{red} , κανάλι 1 του MODIS) και το εγγύς υπέρυθρο (R_{NIR} , κανάλι 2 του MODIS) και υπολογίζονται βάση των εξισώσεων 1 και 6 (NDVI και RDVI αντίστοιχα).

$$RDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{\sqrt{R_{NIR} + R_{red}}} \quad [6]$$

Το μοντέλο sCASE χρησιμοποιεί μια μέγιστη τιμή αποδοτικότητας (ϵ_0) και τρία scalars για να υπολογίσει την επίδραση του αναπτυξιακού σταδίου (D_{scalar}), της θερμοκρασίας (T_{scalar}) και της υδατικής κατάστασης (W_{scalar}) σε αυτήν. Μια σχηματική αναπαράσταση του αλγόριθμου του μοντέλου sCASE δίνεται στην Εικόνα 14, ενώ η τελική μορφή του αλγόριθμου υπολογισμού της GPP από το sCASE δίνεται από την εξίσωση:

$$GPP = PAR * fAPAR * \epsilon_0 * D_{scalar} * T_{scalar} * W_{scalar} \quad [7]$$



Εικόνα 14. Η σχηματική αναπαράσταση του αλγόριθμου υπολογισμού της GPP του μοντέλου sCASE.

Η PAR μετράται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ το fAPAR υπολογίζεται από τον δείκτη NDVI. Συγκεκριμένα, μέσω μιας εμπειρικής σχέσης (εξίσωση 8) υπολογίζεται ο LAI από τον NDVI, που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του fAPAR μέσω της εξίσωσης 9 (Ruimy et al., 1999), όπου k_d ο συντελεστής απόσβεσης της ακτινοβολίας στον θόλο που έχει οριστεί στο 0,65.

$$LAI = 0.035 * e^{\frac{NDVI}{0.17}} \quad [8]$$

$$fAPAR = (1 - e^{-k_a * LAI}) * 0,95 \quad [9]$$

Το D_{scalar} υπολογίζεται από τον δείκτη βλάστησης RDVI και χρησιμεύει ιδιαίτερα στα φυλλοβόλα είδη ρυθμίζοντας την φωτοσύνθεση κατά την διάρκεια της έκπτυξης και της πτώσης των φύλλων. Το D_{scalar} για τα φυλλοβόλα είδη δίνεται από την εξίσωση 10, ενώ μια παραλλαγή του (εξίσωση 11) χρησιμοποιείται για αείφυλλα είδη.

$$D_{scalar} = \frac{1}{1 + 100 * e^{-12 * \frac{RDVI - 0,15}{0,55}}} \quad [10]$$

$$D_{scalar} = \frac{1}{1 + 150 * e^{-15 * \frac{RDVI}{0,6}}} \quad [11]$$

Το T_{scalar} του sCASE ακολουθεί την κωδωνοειδή εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από την θερμοκρασία και περιλαμβάνει και τις τρεις σταθερές που αναλύθηκαν στην εισαγωγή (T_{min} , T_{max} και T_{opt}) και υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης 12, όπου T_{day} η μέση θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας (όχι του εικοσιτετράωρου). Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται μετρήσεις θερμοκρασίας από τους επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς.

$$T_{scalar} = \frac{(T_{day} - T_{min}) * (T_{day} - T_{max})}{[(T_{day} - T_{min}) * (T_{day} - T_{max})] - (T_{day} - T_{opt})^2} \quad [12]$$

Τέλος, η επίδραση της υδατικής κατάστασης υπολογίζεται βάση της διαφοράς της εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης, που αντιπροσωπεύει το ισοζύγιο των διαθέσιμων υδατικών πόρων για την βλάστηση (McKee et al., 1993). Αρχικά, υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (reference evapotranspiration, ET_0) βάσει της μεθόδου Penman-Monteith (Allen et al., 1998) για την εκάστοτε περιοχή μελέτης, και στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της ET_0 και της βροχόπτωσης (υδατικό ισοζύγιο) για ένα βραχύ (10 ημέρες) και ένα μακρό (4 μήνες) χρονικό διάστημα. Το ισοζύγιο των δέκα ημερών αντιπροσωπεύει την υγρασία των ανώτερων εδαφικών στρωμάτων, που εξαρτάται από τις πρόσφατες καιρικές συνθήκες, ενώ το ισοζύγιο των τεσσάρων μηνών τους πόρους των υπόγειων υδάτων (Allen et al., 1998). Τα δυο αυτά υδατικά ισοζύγια μετατρέπονται σε ένα βραχυπρόθεσμο (stW_{scalar}) και ένα μακροπρόθεσμο (ltW_{scalar}) υδατικό scalar μέσω των παρακάτω εμπειρικών εξισώσεων:

$$stW_{scalar} = 1 - e^{-\left(\frac{WB+80}{36}\right)} \quad [13]$$

$$ltW_{scalar} = 1 - e^{-\left(\frac{WB+600}{210}\right)} \quad [14]$$

όπου WB (water balance) το υδατικό ισοζύγιο για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Τελικά, ως W_{scalar} χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή μεταξύ των δυο.

Από τις παραπάνω εξισώσεις, η ϵ_0 , η T_{opt} , η T_{min} και η T_{max} διαφοροποιούνται από είδος σε είδος (ειδοειδικές παράμετροι) και μπορούν να υπολογιστούν από μετρήσεις πεδίου, όπως έγινε για τα είδη στα οποία βασίστηκε η κατασκευή του μοντέλου, είτε να χρησιμοποιηθούν τιμές από την βιβλιογραφία. Στον Πίνακα 9 δίνονται οι τιμές των σταθερών για κάθε περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής.

Πίνακας 9. Ειδοειδικές σταθερές του sCASE για κάθε περιοχή/είδος μελέτης. Στην παρένθεση δίνεται η κατηγορία βλάστησης κάθε περιοχής βάσει του IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), όπου MF = Mixed Forest, ENF = Evergreen Needleleaf forest, DBF = Deciduous Broadleaf forest και EBF = Evergreen Broadleaf Forest.

Περιοχή μελέτης	ε_0 (g C mol ⁻¹ APAR)	T _{min}	T _{max}	T _{opt}
Vielsalm (MF)	0,27	0	40	20
Hyytiälä (ENF)	0,25	-10	40	20
Lavarone (ENF)	0,25	-5	40	20
Loobos (ENF)	0,25	-10	40	20
Hainich (DBF)	0,29	0	40	20
Leinefelde (DBF)	0,29	0	40	20
Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,29	0	45	25
Collelongo (DBF)	0,29	0	40	20
Roccarespampani 1 (DBF)	0,29	0	45	25
Roccarespampani 2 (DBF)	0,29	0	45	25
San Rossore (ENF)	0,25	0	45	20
Puéchabon (EBF)	0,29	-10	40	20
Castelporziano (EBF)	0,29	-10	40	20
Fagus sylvatica (DBF)	0,29	0	40	20
Quercus sp. (DBF)	0,29	0	45	25
Pinus nigra (ENF)	0,25	-10	45	20
Mixed Pinus nigra (MF)	0,25	-10	45	20
Mixed Fagus sylvatica (MF)	0,29	0	40	20
Pinus halepensis (ENF)	0,25	-5	45	25

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής, το μοντέλο sCASE αξιολογήθηκε για πρώτη φορά σε σύγκριση με τιμές GPP από πύργους eddy covariance. Αρχικά, εξετάστηκε η ακρίβεια του μοντέλου sCASE με βάση τα δεδομένα από τους πύργους eddy covariance των 13 περιοχών μελέτης του Πίνακα 1, αναλύθηκε η συνεισφορά κάθε επιμέρους scalar και συγκρίθηκε το sCASE με το μοντέλο παραγωγικότητας του MODIS (προϊόν MOD17A2). Στη συνέχεια, εξετάστηκαν μια σειρά από υδατικά scalars και συγκρίθηκαν με αυτό του sCASE, ενώ ερευνήθηκε η πιθανή βελτίωση του μοντέλου με τη χρήση scalar για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (C_{scalar}). Τα δορυφορικά δεδομένα MODIS (MOD09A1 και MOD17A2) που χρησιμοποιούνται στις περιοχές αυτές προέρχονται από το αρχείο ORNL του MODIS. Τέλος, εξετάστηκε ο ρόλος της χωρικής ανάλυσης των εικόνων που χρησιμοποιεί το sCASE στην ακρίβεια του μοντέλου, με την σύγκριση τριών διαφορετικών δορυφορικών προϊόντων. Ειδικότερα, η GPP για τις περιοχές του Πίνακα 2 υπολογίστηκε με τη χρήση δεδομένων από τους αισθητήρες MODIS (500 m), OLCI (300 m) και MSI (10 m), όπως αναλύεται στη συνέχεια. Στο τμήμα αυτό της έρευνας που αφορά τις περιοχές στην Ελλάδα, τα δεδομένα MODIS (προϊόν MOD09A1) είναι σε μορφή ψηφιακών εικόνων και η εξαγωγή των τιμών ανακλαστικότητας πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος επεξεργασίας SNAP.

Αξιολόγηση sCASE

Για κάθε μια από τις δεκατρείς περιοχές με πύργο eddy, επιλέχθηκαν έως τέσσερα pixel MOD09A1 (500 m), βάση οπτικής αξιολόγησης της αντιπροσωπευτικότητας της περιοχής γύρω από

τον πύργο. Οι μέσες τιμές των δεικτών NDVI και RDVI από τα επιλεγμένα pixel χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο sCASE για τον υπολογισμό της GPP της κάθε περιοχής. Παρότι το προϊόν MOD09A1 παρέχει ατμοσφαιρικά διορθωμένες τιμές ανακλαστικότητας και οι προβληματικές εικόνες δύναται να αναγνωριστούν και να εξαιρεθούν μέσω των δυο quality bands που διαθέτει, θεωρείται επιβεβλημένη η διόρθωση των χρονοσειρών των δυο δεικτών πριν χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.

Για την διόρθωση των δυο δεικτών χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή του αλγόριθμου BISE (Best Index Slope Extraction, Viovy et al., 1992), που όπως και ο αρχικός αλγόριθμος διορθώνει την έντονη πτώση (ή αύξηση) και επανάκαμψη των τιμών των δεικτών σε ορισμένο (σύντομο) χρονικό διάστημα. Τέτοιες μεταβολές για δείκτες όπως ο NDVI θεωρούνται σφάλματα καθώς δεν μπορούν να εξηγηθούν από φυσιολογικές μεταβολές στη φαινολογία της βλάστησης. Οι αλγόριθμοι BISE χαρακτηρίζονται από το χρονικό διάστημα που εξετάζουν, το ποσοστό μεταβολής του δείκτη που θεωρούν αποδεκτό και τέλος την εξίσωση διόρθωσης της λανθασμένης τιμής. Στη συγκεκριμένη εργασία κάθε τιμή συγκρίνεται με τις δυο προηγούμενες και τις δυο επόμενες, με το επιτρεπόμενο ποσοστό μεταβολής να είναι 10 τοις εκατό. Οι τιμές που θεωρούνται λανθασμένες αντικαθίστανται από την μέση τιμή της προηγούμενης και επόμενης τιμής λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση (σε ημέρες) μεταξύ τους, αφού οι διαδοχικές εικόνες του οκταήμερου MOD09A1 δεν ισαπέχουν απαραίτητα. Τέλος, στις διορθωμένες χρονοσειρές των δεικτών εφαρμόστηκε εξομάλυνση (smoothing) πέντε σημείων και παρεμβολή (interpolation) για τον υπολογισμό ημερήσιων τιμών των δεικτών από τις οκταήμερες.

Με την χρήση των τελικών ημερήσιων τιμών των δεικτών NDVI και RDVI υπολογίστηκαν μέσω του αλγόριθμου του sCASE (Εξίσωση 7) οι ημερήσιες τιμές GPP οι οποίες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες των πύργων eddy covariance ώστε να εξακριβωθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Επιπλέον, παραλλαγές του αλγόριθμου sCASE, με την αφαίρεση επιμέρους scalars, χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εξεταστεί η συνεισφορά καθενός από αυτά στην ακρίβεια του μοντέλου. Τέλος, τα ίδια pixel χρησιμοποιήθηκαν και στο προϊόν MOD17A2 για την σύγκριση των μοντέλων sCASE και MODIS-LUE. Καθώς το προϊόν του MODIS είναι οκταήμερο, για να συγκριθούν τα δυο μοντέλα ήταν απαραίτητο να υπολογιστεί η συνολική GPP του sCASE και των πύργων eddy για τα αντίστοιχα οκταήμερα.

Υδατικά scalar

Συνολικά εξετάστηκαν εννέα υδατικά scalars (Πίνακας 12), επιπλέον αυτού του sCASE, οι πλειονότητα των οποίων έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε κάποιο μοντέλο LUE. Τα πέντε από τα εννέα υπολογίζονται από παραμέτρους που μετρούνται από τους πύργους eddy, μεταξύ των οποίων και αυτό του MODIS GPP που είναι το πλέον διαδεδομένο, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα υπολογίζονται από δείκτες του MODIS. Το υδατικό scalar του MODIS GPP (VPD_{scalar}) χρησιμοποιεί το VPD ως δείκτη της υδατικής κατάστασης της βλάστησης και υπολογίζεται από την εξίσωση 15. Διάφορες τιμές VPD_{max} και VPD_{min} έχουν προταθεί κατά καιρούς από την ομάδα που είναι υπεύθυνη για το MODIS GPP, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι τιμές που προτείνονται από τους Heinsch et al. (2003) (Πίνακας 10).

Πίνακας 10. Οι τιμές VPD_{max} και VPD_{min} για κάθε τύπο βλάστησης όπως δίνονται από τους Heinsch et al., 2003. Οι τιμές είναι σε Pascal.

Τύπος βλάστησης	VPD_{max}	VPD_{min}
ENF	2500	650
EBF	3900	1100
DNF	3100	650
DBF	2500	650
MF	2500	650

Δυο άλλα υδατικά scalar που εξετάζονται χρησιμοποιούν το συνδυασμό του VPD_{scalar} (με τιμές $VPD_{max} = 4100$ Pa και $VPD_{min} = 930$ Pa, από Running et al., 2000) και ενός scalar που βασίζεται στο λόγο (SW_{ratio}) του διαθέσιμου νερού (SWC) προς το μέγιστο δυνατό διαθέσιμο νερό για κάθε περιοχή (soil Water Holding Capacity, WHC, το οποίο θεωρείται ίσο με τη μέγιστη τιμή SWC της εκάστοτε περιοχής). Το πρώτο από αυτά τα δυο scalars ($SWC1_{scalar}$, Turner et al., 2006) αποτελεί το γινόμενο του VPD_{scalar} και ενός scalar που υπολογίζεται από το SW_{ratio} βάση της εξίσωσης 16. Αντίθετα, το δεύτερο scalar ($SWC2_{scalar}$, King et al., 2011) χρησιμοποιεί το ελάχιστο μεταξύ των VPD_{scalar} και ενός τροποποιημένου $SW_{ratio,scalar}$ που υπολογίζεται από την εξίσωση 17. Τα δυο παραπάνω υδατικά scalar εξετάζονται στις οκτώ από τις δεκατρείς περιοχές λόγω μη καταγραφής του SWC στις περιοχές Fontainebleau-Barbeau, Puéchabon, Collelongo, Lavarone και San Rossore.

$$VPD_{scalar} = \begin{cases} 0, & VPD \geq VPD_{max} \\ \frac{VPD_{max}-VPD}{VPD_{max}-VPD_{min}}, & VPD_{max} > VPD > VPD_{min} \\ 1, & VPD \leq VPD_{min} \end{cases} \quad [15]$$

$$SW_{ratio,scalar} = \begin{cases} 1, & SW_{ratio} \geq 0,5 \\ 2 * SW_{ratio}, & SW_{ratio} < 0,5 \end{cases} \quad [16]$$

$$SW_{ratio,scalar} = \begin{cases} 1, & SW_{ratio} \geq 0,5 \\ 2 * SW_{ratio}, & 0,1 < SW_{ratio} < 0,5 \\ 0,2, & SW_{ratio} < 0,1 \end{cases} \quad [17]$$

Το επόμενο υδατικό scalar (EF_{scalar} , Yuan et al., 2007) βασίζεται στις ροές θερμότητας και είναι ίσο με το λόγο της λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat, LH) προς το άθροισμα της λανθάνουσας και της αισθητής θερμότητας (Sensible Heat, H). Ο λόγος αυτός, γνωστός ως evaporative fraction (EF), αντιπροσωπεύει το ποσοστό της θερμότητας που διοχετεύεται μέσω της εξάτμισης του νερού μειώνοντας έτσι την αύξηση της θερμοκρασίας της βλάστησης. Ο EF έχει συσχετιστεί με την υδατική κατάσταση της βλάστησης, καθώς το διαθέσιμο νερό καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό της θερμότητας που διοχετεύεται μέσω της εξάτμισης (Liu et al., 2019). Για την χρήση του ως scalar, ο EF υπολογίζεται από τις απόλυτες τιμές των δύο ροών θερμότητας (εξίσωση 18). Τελευταίο υδατικό scalar που χρησιμοποιεί δεδομένα των πύργων eddy είναι το ET_{scalar} (Maselli et al., 2009; Potter et al., 1993) που βασίζεται, όπως και το αντίστοιχο του sCASE, στις τιμές ET_0 και βροχόπτωσης. Το ET_{scalar} υπολογίζεται από την εξίσωση 19, με τις τιμές ET_0 και βροχόπτωσης να αφορούν σε διάστημα εξήντα ημερών.

$$EF_{scalar} = EF = \frac{|LH|}{|LH|+|H|} \quad [18]$$

$$ET_{scalar} = \begin{cases} 1, & \betaροχόπτωση \geq ET_0 \\ 0,5 + 0,5 * \left(\frac{\betaροχόπτωση}{ET_0} \right), & \betaροχόπτωση < ET_0 \end{cases} \quad [19]$$

Πίνακας 11. Οι τέσσερις δείκτες νερού που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία υδατικών scalar. Στις παρενθέσεις δίνονται τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο κανάλι του MODIS που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση (Πίνακας 3).

Δορυφορικός δείκτης	Εξίσωση	Αναφορά
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$\frac{R_{(841-876)} - R_{(1230-1250)}}{R_{(841-876)} + R_{(1230-1250)}} \quad [1]$	Gao, 1996
LSWI (Land Surface Water Index)	$\frac{R_{(841-876)} - R_{(1623-1652)}}{R_{(841-876)} + R_{(1623-1652)}} \quad [2]$	Xiao et al, 2004b
ND27 (Normalized Difference of Bands 2 and 7)	$\frac{R_{(841-876)} - R_{(2105-2155)}}{R_{(841-876)} + Band_{(2105-2155)}} \quad [3]$	Παρούσα μελέτη
NMDI (Normalized Multi-band Drought Index)	$\frac{R_{(841-876)} - (R_{(1623-1652)} - R_{(2105-2155)})}{R_{(841-876)} + (R_{(1623-1652)} - R_{(2105-2155)})} \quad [4]$	Wang and Qu, 2007

Τα υπόλοιπα τέσσερα υδατικά scalars βασίζονται το καθένα σε έναν δορυφορικό δείκτη νερού (Water Indices, WI), δείκτες δηλαδή που έχουν σχετιστεί με την υδατική κατάσταση της βλάστησης. Οι τέσσερις αυτοί δορυφορικοί δείκτες υπολογίστηκαν από το προϊόν MOD09A1 του αρχείου ORNL, σύμφωνα με τις εξισώσεις που δίνονται στον Πίνακα 11. Οι χρονοσειρές των τεσσάρων αυτών δεικτών δεν έχουν υποστεί επεξεργασία με αλγόριθμο BISE όπως οι αντίστοιχες των NDVI και RDVI, εφόσον πρόκειται για δείκτες που ακολουθούν μια δυναμική παράμετρο και δύναται να εμφανίζουν ραγδαίες μεταβολές. Αντί αυτού, όλες οι τιμές των δεικτών αυτών που αντιστοιχούν σε ημέρες για τις οποίες ο NDVI έχει διορθωθεί από τον αλγόριθμο BISE, αποκλείονται από την ανάλυση. Τελικά, για καθέναν από τους τέσσερις δείκτες δημιουργείται ένα υδατικό scalar βάση της παρακάτω γενικής εξίσωσης:

$$WI_{scalar} = \frac{1+WI}{1+WI_{max}} \quad [24]$$

όπου WI_{max} η μέγιστη τιμή του δείκτη για την αντίστοιχη χρονιά.

Πίνακας 12. Τα διαφορετικά υδατικά scalars που συγκρίνονται με αυτό του sCASE. Για καθένα από αυτά δίνονται οι παράμετροι στις οποίες στηρίζεται και μια αναφορά σε μοντέλο LUE που το χρησιμοποιεί.

Υδατικό scalar	Παράμετροι	Μοντέλο LUE
VPD_{scalar}	VPD	Running et al., 2004
$SWC1_{scalar}$	VPD και SWC	Turner et al., 2006
$SWC2_{scalar}$	VPD και SWC	King et al., 2011
EF_{scalar}	LH και H	Yuan et al., 2007
ET_{scalar}	ET_0 και βροχόπτωση	Maselli et al 2009
$NDWI_{scalar}$	NDWI	
$LSWI_{scalar}$	LSWI	Mahadevan et al., 2008
$ND27_{scalar}$	ND27	
$NMDI_{scalar}$	NMDI	

Επίδραση διάχυτης ακτινοβολίας

Ο αρχικός αλγόριθμος του sCASE δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην GPP, γι' αυτό στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εξετάστηκαν πιθανές εξισώσεις (Cloud scalars, $C_{scalars}$) για την συμπερίληψη αυτής της κρίσιμης παραμέτρου στο μοντέλο. Συνολικά εξετάστηκαν δέκα πιθανά C_{scalar} , κάποια από την σχετική βιβλιογραφία και άλλα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής (Πίνακας 14). Καθένα από τα scalars αυτά προστέθηκε στον αλγόριθμο του sCASE και ελέγχθηκε εάν βελτιώνει ή όχι την απόδοση του μοντέλου. Σε όλες τις περιπτώσεις η προσέγγιση της επίδρασης της διάχυτης ακτινοβολίας στην GPP πηγάζει από τον λόγο της προσπίπτουσας PAR προς την δυναμική PAR ($PAR_{potential}$), που αντιστοιχεί στο atmospheric transmittance (τ) και αποτελεί ένδειξη της καθαρότητας της ατμόσφαιρας.

Το μοντέλο CFflux (Turner et al., 2006b) είναι το πρώτο μοντέλο LUE που συμπεριέλαβε ένα scalar για την διάχυτη ακτινοβολία, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μιας ε_{base} που υποκαθιστά την ε_0 . Αρχικά υπολογίζει έναν δείκτη νεφοκάλυψης (cloudiness index, CI) για κάθε ημέρα, που ισούται με ένα μείον τον λόγο $PAR/PAR_{potential}$ (εξίσωση 25), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του scalar νεφοκάλυψης (S_{CI}) σύμφωνα με την εξίσωση 26. Τέλος, με τη χρήση του S_{CI} υπολογίζει από την εξίσωση 27 την ε_{base} για κάθε ημέρα, που αντικαθιστά τη σταθερά ε_0 στον αλγόριθμο υπολογισμού της GPP.

$$CI = 1 - \frac{PAR}{PAR_{potential}} \quad [25]$$

$$S_{CI} = \frac{CI_d - CI_{min}}{CI_{max} - CI_{min}} \quad [26]$$

όπου, CI_d ο δείκτης νεφοκάλυψης για την εκάστοτε ημέρα, CI_{min} η ελάχιστη τιμή του δείκτη για τη χρονιά και CI_{max} η μέγιστη τιμή για τη χρονιά.

$$\varepsilon_{base} = ((\varepsilon_{max} - \varepsilon_{cs}) * S_{CI}) + \varepsilon_{cs} \quad [27]$$

όπου, ε_{max} μια μέγιστη τιμή αποδοτικότητας σε συνθήκες απόλυτης νεφοκάλυψης (προκύπτει από παραμετροποίηση) και ε_{cs} η μέση τιμή της ε για τις ημέρες που χαρακτηρίζονται καθαρές (clear sky). Ως καθαρές ορίζονται οι ημέρες εκείνες για τις οποίες τα scalar θερμοκρασίας (T_{scalar}) και υδατικής καταπόνησης (W_{scalar}) είναι μεγαλύτερα από 0,9 και το S_{CI} είναι μικρότερο από 0,2. Η τιμή της ε_{max}

διαφέρει από οικοσύστημα σε οικοσύστημα, ακόμη και μεταξύ οικοσυστημάτων με το ίδιο κυρίαρχο είδος (King et al., 2011), αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια τιμή που να καλύπτει περισσότερες περιοχές (Turner et al., 2009). Αρχικά είχε οριστεί ένα ανώτατο όριο στη τιμή της ϵ_{\max} ($0,894 \text{ g C mol}^{-1} \text{ APAR}$) βάσει θεωρητικών αναλύσεων της μέγιστης δυνατής φωτοσυνθετικής απόδοσης (Haxeltine and Prentice, 1996; Turner et al., 2006b), όμως το ανώτατο αυτό όριο έχει εμπειρικά αναθεωρηθεί προς τα πάνω, με τους Wang et al. (2018) να το ορίζουν στα $1,1175 \text{ g C mol}^{-1} \text{ APAR}$. Η παραμετροποίηση της ϵ_{\max} για μια περιοχή βασίζεται στη σχέση της μοντελοποιημένης GPP (με τη χρήση της ϵ_{base}) με τη μετρημένη GPP (eddy-GPP αν είναι διαθέσιμη). Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται παραλλαγές της GPP που διαφέρουν ως προς την τιμή της ϵ_{\max} , οι οποίες στη συνέχεια συγκρίνονται με τη μετρημένη GPP. Η τιμή της ϵ_{\max} που παράγει την GPP με τη χαμηλότερη τιμή RMSE ($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη περιοχή. Ο συντελεστής RMSE (Root Mean Square Error) είναι η ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των μοντελοποιημένων και των μετρημένων τιμών. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής η ϵ_{\max} παραμετροποιήθηκε όπως αναλύθηκε παραπάνω (με τη χρήση της ϵ_{base} στο sCASE), για κάθε μια από τις δεκατρείς περιοχές μελέτης με πύργο eddy covariance και οι τιμές για κάθε περιοχή δίνονται στον Πίνακα 13.

Εκτός από το ϵ_{base} ως scalar διάχυτης ακτινοβολίας εξετάζονται και τα CI και S_{CI} . Τα δυο τελευταία ωστόσο χρησιμοποιούνται με την τυπική μορφή των scalar, πολλαπλασιαζόμενα δηλαδή με την ϵ_0 . Επιπλέον, εξετάζεται και μια παραλλαγή της ϵ_{base} (ϵ_{base}') στην οποία η ϵ_{cs} (στην εξίσωση 27) παίρνει την τιμή της ϵ_0 κάθε είδους ή τύπου βλάστησης, με τις ίδιες τιμές ϵ_{\max} με την αρχική ϵ_{base} (Πίνακας 13). Οι Wang et al. (2018) στηρίχτηκαν επίσης στον δείκτη CI για να υπολογίσουν μια διαφορετική ϵ_{base} (ϵW_{base}), η οποία επίσης εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Η ϵW_{base} υπολογίζεται από την εξίσωση 28.

$$\epsilon W_{\text{base}} = (1 - \mu * f_{CI}) * \epsilon_{\max} \quad [28]$$

όπου, ϵ_{\max} η μέγιστη τιμή ϵ για τις ημέρες με πλήρη συννεφιά (όπως αναλύθηκε παραπάνω), μ είναι μια σταθερά που αντιπροσωπεύει την ευαισθησία της GPP στον δείκτη CI και f_{CI} μια παράμετρος που υπολογίζεται από τον CI βάση της εξίσωσης 29.

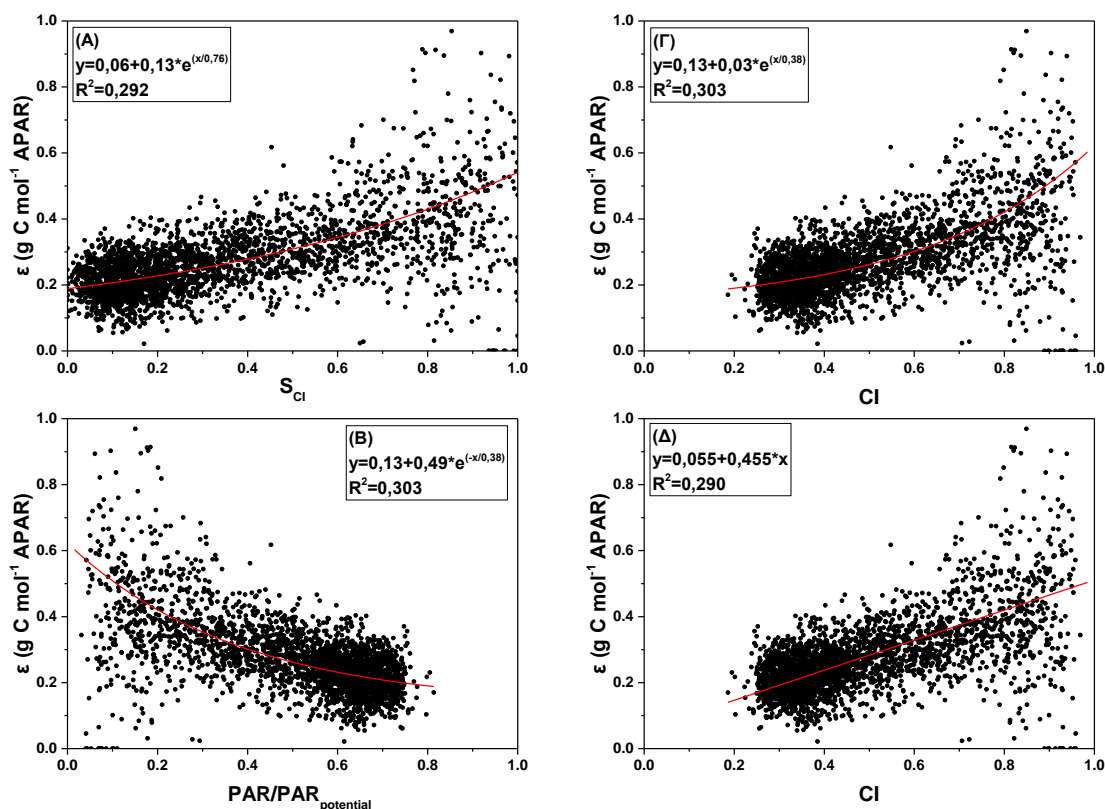
$$f_{CI} = 1 - \frac{CI_a - CI_{\min}}{CI_{\max} - CI_{\min}} \quad [29]$$

Οι τιμές της ϵ_{\max} και της σταθεράς μ διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και υπολογίζονται όπως αναλύθηκε παραπάνω για την ϵ_{\max} (στην περίπτωση της ϵ_{base}), με την διαφορά πως παραμετροποιούνται ταυτόχρονα και οι δυο παράμετροι και επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός των δυο. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τις δεκατρείς περιοχές με τη χρήση της ϵW_{base} στο sCASE, ο βέλτιστος συνδυασμός ϵ_{\max} και μ για κάθε περιοχή περιλαμβάνει την ίδια τιμή ϵ_{\max} με αυτή που βρέθηκε για την ϵ_{base} και τις τιμές μ που δίνονται στον Πίνακα 13. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί πως για κάθε περιοχή, βρέθηκαν επιπλέον συνδυασμοί (ϵ_{\max} και μ) που παρήγαγαν παρόμοια αποτελέσματα με αυτόν που επιλέχθηκε.

Πίνακας 13. Οι τιμές ε_{max} και μ όπως παραμετροποιήθηκαν για κάθε περιοχή. Η ε_{max} αφορά στον υπολογισμό των ε_{base} , ε_{base}' και εW_{base} . Η σταθερά μ χρησιμοποιείται στον υπολογισμό μόνο της εW_{base} .

Περιοχή μελέτης	ε_{max} (g C mol ⁻¹ APAR)	μ
Vielsalm (MF)	0,623	0,65
Hyytiälä (ENF)	0,447	0,55
Lavarone (ENF)	0,626	0,65
Loobos (ENF)	0,559	0,65
Hainich (DBF)	0,670	0,65
Leinefelde (DBF)	0,827	0,70
Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,782	0,70
Collelongo (DBF)	0,626	0,70
Roccarespampani 1 (DBF)	0,559	0,65
Roccarespampani 2 (DBF)	0,447	0,55
San Rossore (ENF)	0,559	0,60
Puéchabon (EBF)	0,350	0,55
Castelporziano (EBF)	0,447	0,60

Στην ίδια λογική με τα παραπάνω, δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής πέντε scalars που προέκυψαν από τη σχέση της ε με τον CI, το S_{CI} και τον λόγο $PAR/PAR_{potential}$. Αρχικά, εξετάστηκε η σχέση της ε με καθεμία από αυτές τις παραμέτρους στην περιοχή San Rossore. Δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι συσχετίσεων (γραμμική, εκθετική κ.τ.λ) και επελέγησαν οι εξισώσεις που αντιστοιχούσαν στις πιο ισχυρές συσχετίσεις (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Οι συσχετίσεις της ϵ με το S_{CI} (A), τον λόγο $PAR/PAR_{potential}$ (B) και τον CI (Γ,Δ). Τα δεδομένα αφορούν στην περιοχή San Rossore. Από τις εξισώσεις των συσχετίσεων αυτών προέκυψαν τα πέντε C_{scalar} της εργασίας αυτής.

Στη συνέχεια αυτές οι εξισώσεις τροποποιήθηκαν με βάση δύο κριτήρια, πρώτον, της επιθυμητής μορφής του scalar που θα προέκυπτε (τυπικό ή της μορφής ϵ_{base}) και δεύτερον, της διαφοροποίησης ή μη της εξίσωσης ανάλογα με το βαθμό νεφοκάλυψης. Από τα πέντε scalar που δημιουργήθηκαν, τα δυο ($C_{scalar1}$ και $C_{scalar5}$) έχουν την μορφή τυπικού scalar που πολλαπλασιάζονται με την ϵ_0 (με την διαφορά ότι παίρνουν τιμές μεγαλύτερες από 1), ενώ τα υπόλοιπα τρία ($C_{scalar2}$, $C_{scalar3}$ και $C_{scalar4}$) έχουν τη μορφή της ϵ_{base} , αντικαθιστώντας την ϵ_0 για κάθε ημέρα. Στην περίπτωση των πρώτων, οι εξισώσεις τροποποιήθηκαν ώστε να προκύπτουν πάντα τιμές μεγαλύτερες από 1. Όσον αφορά το δεύτερο κριτήριο, δυο cloud scalar ($C_{scalar4}$ και $C_{scalar5}$) χρησιμοποιούν μια σταθερή τιμή για τις καθαρές ημέρες (λόγος $PAR/PAR_{potential} > 0,5$) και τις αντίστοιχες εξισώσεις για τις ημέρες με συννεφιά (λόγος $PAR/PAR_{potential} \leq 0,5$). Τα άλλα τρία cloud scalar ($C_{scalar1}$, $C_{scalar2}$ και $C_{scalar3}$) χρησιμοποιούν μια κοινή εξίσωση ανεξάρτητα από το βαθμό νεφοκάλυψης. Αφού καθορίστηκε η τελική μορφή του κάθε cloud scalar, πραγματοποιήθηκε παραμετροποίηση των σταθερών των εξισώσεων καθενός, για να προκύψουν τα πέντε cloud scalar που παρουσιάζονται στη συνέχεια (εξισώσεις 30 έως 34). Η επιλογή της τελικής εξίσωσης κάθε C_{scalar} κρίθηκε από τη σχέση μεταξύ της GPP του sCASE (που περιλαμβάνει το αντίστοιχο cloud scalar) και της αντίστοιχης του πύργου eddy (βάσει των R^2 και RMSE), για το σύνολο των περιοχών μελέτης. Η παραμετροποίηση καθενός από τα πέντε $C_{scalars}$ είχε ως στόχο τη δημιουργία μιας εξίσωσης που θα χρησιμοποιείται σε όλες τις περιοχές, σε αντίθεση με τις τρεις παραλλαγές της ϵ_{base} που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι οποίες περιέχουν σταθερές που διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως δυο scalar περιλαμβάνουν την ειδική παράμετρο ϵ_0 στην εξίσωση τους ($C_{scalar2}$ και $C_{scalar4}$).

$$C_{scalar1} = 1 + 0,01 * e^{\frac{SCI}{0,2}} \quad [30]$$

$$C_{scalar2} = \varepsilon_0 + 0,004 * e^{\frac{CI}{0,2}} \quad [31]$$

$$C_{scalar3} = 0,091 + 0,5 * CI \quad [32]$$

$$C_{scalar4} = \begin{cases} \varepsilon_0, & \frac{PAR}{PAR_{potential}} > 0,5 \\ \varepsilon_0 + 0,4 * e^{\frac{-(PAR/PAR_{potential})}{0,2}}, & \frac{PAR}{PAR_{potential}} \leq 0,5 \end{cases} \quad [33]$$

$$C_{scalar5} = \begin{cases} 1, & \frac{PAR}{PAR_{potential}} > 0,5 \\ 1,25 + e^{\frac{-(PAR/PAR_{potential})}{0,2}}, & \frac{PAR}{PAR_{potential}} \leq 0,5 \end{cases} \quad [34]$$

Πίνακας 14. Τα διαφορετικά C_{scalar} που εξετάζονται για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην GPP.

C_{scalar}	Χρήση ε_0	Βιβλιογραφία
CI	Ναι	
SCI	Ναι	
ε_{base}	Όχι	Turner et al., 2006
ε_{base}'	Όχι	
εW_{base}	Όχι	Wang et al., 2018
$C_{scalar1}$ (SCI)	Ναι	Παρούσα εργασία
$C_{scalar2}$ (CI)	Όχι	Παρούσα εργασία
$C_{scalar3}$ (CI)	Όχι	Παρούσα εργασία
$C_{scalar4}$ (PAR/PAR _{potential})	Όχι	Παρούσα εργασία
$C_{scalar5}$ (PAR/PAR _{potential})	Ναι	Παρούσα εργασία

sCASE και χωρική ανάλυση

Η μελέτη της πιθανής επίδρασης της χωρικής ανάλυσης στην ακρίβεια του sCASE εξετάζεται σε έξι περιοχές στην Ελλάδα (Πίνακας 2), για το 2017. Οι περιοχές αυτές διαφέρουν ως προς το είδος βλάστησης και το ποσοστό κάλυψης, ενώ δυο από αυτές χαρακτηρίζονται ως μεικτές καθώς περιέχουν δυο διαφορετικά είδη (Mixed Pinus nigra και Mixed Fagus sylvatica). Το ποσοστό κάλυψης και η ποσότητα των ειδών κάθε περιοχής υπολογίζονται με ταξινόμηση εικόνων του MSI, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο (παρ. Ταξινόμηση βλάστησης). Βάση των ποσοστών αυτών, για κάθε περιοχή προσδιορίζεται ένα κυρίαρχο είδος και οι ειδοειδικές παράμετροι (Πίνακας 9) που αντιστοιχούν σε αυτό χρησιμοποιούνται στο sCASE για ολόκληρη την περιοχή.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, συγκρίθηκαν τρεις αισθητήρες με διαφορετική χωρική ανάλυση, οι MODIS, OLCI και MSI (500, 300 και 10 m αντίστοιχα). Για κάθε περιοχή επιλέχθηκε μια έκταση

περίπου 2,25 km² που αντιστοιχεί σε 9 (3 επί 3) pixel του MODIS, 25 (5 επί 5) pixel του OLCI και περίπου 19200 pixel του MSI, με σκοπό την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ταύτιση μεταξύ των τριών αισθητήρων. Η επιλογή των pixel του MSI έγινε βάση των συντεταγμένων των αντίστοιχων pixel του MODIS, γι' αυτό ο αριθμός τους διαφέρει ελαφρώς από περιοχή σε περιοχή, αλλά η περιοχή κάλυψης τους ταυτίζεται απόλυτα, σε αντίθεση με τον OLCI, που αποκλίνει ελαφρώς κυρίως λόγω τροχιάς. Για κάθε περιοχή οι εικόνες των τριών αισθητήρων αξιολογήθηκαν βάση των ποιοτικών δεικτών (quality flags) των αντίστοιχων pixel κάθε αισθητήρα και οι εικόνες που περιείχαν προβληματικά pixel αποκλείστηκαν από την ανάλυση (για την συγκεκριμένη περιοχή). Στην περίπτωση του MSI και λόγω του μεγάλου αριθμού pixel, μια εικόνα αποκλείεται όταν το ποσοστό προβληματικών pixel της κάθε περιοχής ξεπερνά το 10%, αλλιώς αποκλείονται μόνο τα επιμέρους pixel. Από τις εικόνες κάθε αισθητήρα που παρέμειναν υπολογίστηκαν οι δείκτες NDVI και RDVI των αντίστοιχων pixel.

Εντέλει, για κάθε αισθητήρα υπολογίστηκαν ο μέσος NDVI και ο μέσος RDVI από το σύνολο των pixel που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή. Οι μέσες τιμές των δύο δεικτών από κάθε αισθητήρα χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της αντίστοιχης GPP από το μοντέλο sCASA. Για τον υπολογισμό των δυο δεικτών από τον MSI χρησιμοποιούνται τα κανάλια 4 (650 - 680) και 8 (784,5 - 899,5), ενώ από τον OLCI τα 8 (660 - 670) και 17 (855 - 875), για το κόκκινο και το υπέρυθρο αντίστοιχα. Από τα παραπάνω προκύπτουν τρεις παραλλαγές του sCASA για κάθε περιοχή, οι οποίες διαφέρουν μόνο ως προς τις τιμές των δυο δεικτών (sCASA_{MODIS}-GPP, sCASA_{OLCI}-GPP και sCASA_{MSI}-GPP). Μια τέταρτη παραλλαγή του sCASA χρησιμοποιεί τα δεδομένα του MSI για κάθε pixel χωριστά και ύστερα υπολογίζει τη μέση τιμή GPP (sCASA_{full_MSI}-GPP) για ολόκληρη την περιοχή. Δηλαδή, ο αλγόριθμος υπολογίζει την GPP για καθένα από τα περίπου 19200 pixel του MSI, με τις επιμέρους τιμές των δεικτών και των ειδοειδικών παραμέτρων κάθε pixel. Αυτή η παραλλαγή του sCASA εκμεταλλεύεται στο έπακρο τις δυνατότητες του MSI, και η GPP που προκύπτει από αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως τιμή αναφοράς, ελλείψει μετρήσεων της GPP. Επιπλέον, η σύγκριση των δυο εκδοχών του sCASA με δεδομένα του MSI μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για την σημασία της σωστής ταξινόμησης στον υπολογισμό της GPP.

Οι συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP πραγματοποιούνται μόνο για τις ημέρες εκείνες που υπάρχουν εικόνες και από τους τρεις αισθητήρες. Για να αποφευχθούν πιθανές αλλοιώσεις, οι χρονοσειρές των δεικτών των τριών αισθητήρων δεν έχουν υποστεί καμία διόρθωση ή επεξεργασία.

Ταξινόμηση βλάστησης

Για κάθε μια από τις έξι περιοχές στην Ελλάδα (Πίνακας 2) που χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση των διαφορετικών χωρικών αναλύσεων του sCASE, πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση των ειδών με την χρήση εικόνων του αισθητήρα MSI και την μέθοδο maximum likelihood στο λογισμικό SNAP. Η μέθοδος maximum likelihood είναι μια μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης (supervised classification), που βασίζεται στον προσδιορισμό συγκεκριμένων φασμάτων για κάθε ταξινομική ομάδα από τον χρήστη για την δημιουργία φασματικών υπογραφών για κάθε ταξινομική ομάδα (κλάση). Αφού οριστούν οι επιθυμητές κλάσεις από τον χρήστη, τα pixel της εικόνας κατατάσσονται από τον αλγόριθμο ταξινόμησης σε μια από αυτές τις κλάσεις, βάσει της πιθανότητας το φάσμα του εκάστοτε pixel να ανήκει στην κατηγορία αυτή. Ο αλγόριθμος maximum likelihood επιλέχθηκε έναντι άλλων πιο εξελιγμένων εργαλείων ταξινόμησης (π.χ. Random Forest), λόγω της απλότητας του. Ο αλγόριθμος maximum likelihood εξακολουθεί να αποτελεί μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδο ταξινόμησης, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί τη μέθοδο με την οποία συγκρίνονται οι νεότεροι αλγόριθμοι (Chowdhury 2024, Ramachandra et al 2023).

Αρχικά επιλέχθηκαν δυο εικόνες του MSI, μια για την περιοχή της Πίνδου (2/4/2017) και μια για την Βουρβουρού (23/9/2017), στις οποίες εφαρμόστηκε η ταξινόμηση. Για κάθε μια από τις έξι περιοχές (1,5 * 1,5 km καθεμία) ορίστηκαν οι κλάσεις ενδιαφέροντος όπως δίνονται στον Πίνακα 15. Για κάθε κλάση επιλέχθηκαν συγκεκριμένα pixel του MSI, για τα οποία είναι γνωστή η κάλυψη, τα φάσματα των οποίων χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο ταξινόμησης ως φασματική υπογραφή για την αντίστοιχη κλάση. Διευκρινίζεται ότι δεν εξετάζονται μεικτά pixel MSI, καθώς σκοπός είναι η σύγκριση του MSI με τους MODIS και OLCI, και όχι η λεπτομερής ταξινόμηση της περιοχής. Στη συνέχεια, καθένα από τα περίπου 19200 pixel του MSI κάθε περιοχής κατατάσσονται από τον αλγόριθμο σε μια από τις κλάσεις που έχουν οριστεί και βάση αυτής της κατάταξης προκύπτουν τα ποσοστά κάθε είδους, καθώς και το ποσοστό της επιφάνειας που δεν περιέχει βλάστηση (δρόμοι, χώμα κ.α.). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 15, για κάθε είδος δημιουργήθηκαν δυο κλάσεις, μια που αφορά σε φωτισμένη και μια σε σκιασμένη βλάστηση, τα ποσοστά των δυο κλάσεων εν τέλει συμψηφίζονται. Τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων επαληθεύτηκαν και σε άλλες εικόνες, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις.

Πίνακας 15. Οι κατηγορίες κάλυψης (κλάσεις) που ορίστηκαν για κάθε περιοχή στην ελεγχόμενη ταξινόμηση maximum likelihood.

Περιοχή	Κλάσεις
Fagus Sylvatica	
Pinus nigra	<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fagus sylvatica</i> shade, <i>Pinus nigra</i> , <i>Pinus nigra</i> shade, Νερό, Δρόμος, Χορτάρι
Mixed Fagus sylvatica	
Mixed Pinus nigra	
Quercus sp.	<i>Quercus sp.</i> , <i>Quercus sp.</i> shade, <i>Pinus nigra</i> , <i>Pinus nigra</i> shade, Δρόμος, Χορτάρι
Pinus halepensis	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus halepensis</i> shade, Δρόμος, Χώμα

PRI

Η σύνδεση δορυφορικών προϊόντων με την αποδοτικότητα (ϵ) αποτελεί ένα σημαντικό ζητούμενο, που θα άλλαζε ριζικά τη δυνατότητα παρακολούθησης των χερσαίων οικοσυστημάτων. Στα πλαίσια την συνεχιζόμενης έρευνας γύρω από τη σχέση του PRI με την ϵ , στη παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα του δείκτη PRI, υπολογισμένου με δεδομένα MODIS, να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αποδοτικότητας ενός οικοσυστήματος. Παράλληλα, εξετάζεται η σχέση του δείκτη PRI, από επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας, με οικοφυσιολογικές παραμέτρους της βλάστησης που μετρήθηκαν στο πεδίο.

MODIS PRI

Για την μελέτη του δορυφορικού PRI από τον αισθητήρα MODIS επιλέχθηκε ένα δάσος κωνοφόρων στην περιοχή του San Rossore στην Ιταλία (IT-SRo, Gruening et al., 2016), μια από τις δεκατρείς περιοχές με πύργο eddy covariance (Πίνακας 1). Τα δεδομένα του πύργου χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ), όπως αναλύεται παρακάτω. Το συγκεκριμένο οικοσύστημα επιλέχθηκε καθώς είναι ένα τυπικό παράδειγμα μεσογειακού οικοσυστήματος που υφίσταται υδατική καταπόνηση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Μάλιστα, στη περίοδο μελέτης περιλαμβάνεται το 2003, μια χρονιά ακραίας ξηρασίας που επηρέασε ολόκληρη την Ευρώπη και είχε επίδραση στην παραγωγικότητα της περιοχής του San Rossore (Ciais et al., 2005). Επιπλέον, η πυκνή και ομοιογενείς βλάστηση της περιοχής γύρω από τον πύργο μειώνει τις εξωγενείς επιδράσεις, ενώ η έκταση της επιτρέπει τη χρήση δεδομένων χαμηλής χωρικής ανάλυσης (μεγάλου μεγέθους pixel) όπως αυτά του MODIS-PRI. Το κανάλι του MODIS στα 531 nm (κανάλι 11 526-535 nm) που χρησιμοποιεί ο PRI έχει χωρική ανάλυση 1km και διατίθεται στα προϊόντα MOD/MYD021KM (Terra και Aqua αντίστοιχα). Καθώς τα προϊόντα αυτά δεν διαθέτουν σταθερή χαρτογραφική προβολή και το μέγεθος των εικονοστοιχείων ποικίλει, είναι απαραίτητο κάθε εικόνα να εξετάζεται μεμονωμένα πριν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του PRI. Αρχικά, κάθε εικόνα εξετάζεται όπως αναλύθηκε παραπάνω (παράγραφος MOD/MYD021KM), ώστε να επιλεγούν μόνο οι καθαρές εικόνες για τον υπολογισμό του PRI. Τα προϊόντα MOD/MYD021KM χρησιμοποιήθηκαν χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση ακολουθώντας το παράδειγμα αντίστοιχων μελετών (Garbulsky et al., 2013; Guarini et al., 2014; Vicca et al., 2016).

Στη συνέχεια, για κάθε εικόνα και με την βοήθεια του αντίστοιχου προϊόντος MOD/MYD03, εντοπίζεται το pixel που περιέχει τον πύργο eddy και αξιολογείται η καταλληλότητα του. Ως καταλληλότητα ορίζεται ο βαθμός στον οποίο η περιοχή που καλύπτει το pixel είναι αντιπροσωπευτική του οικοσυστήματος και η πιθανή επίδραση σε αυτό της θάλασσας η οποία απέχει μόλις 700 μέτρα (προς τα δυτικά) από τον πύργο. Όπως είναι λογικό, όλα τα εικονοστοιχεία που χαρακτηρίζονται ως θάλασσα από το φίλτρο στεριάς/θάλασσας αποκλείονται, ενώ και τα pixel που περιέχουν έστω και μικρό ποσοστό από την θάλασσα (βάση συντεταγμένων) αποκλείονται, ανεξαρτήτως του εάν χαρακτηρίζονται ως στεριά στο αντίστοιχο φίλτρο. Επιπλέον, όλες οι εικόνες με $VZA > 36^\circ$ αποκλείστηκαν για να αποφευχθούν σφάλματα που προκύπτουν από την μεγάλη αλλοίωση στο μέγεθος του pixel. Τέλος, στις περιπτώσεις που το εικονοστοιχείο που περιέχει τον πύργο έχει κριθεί ακατάλληλο εξετάζεται το διπλανό του και χρησιμοποιείται αυτό.

Η μελέτη του PRI του MODIS στην περιοχή του San Rossore πραγματοποιήθηκε για το διάστημα από την αρχή του 2002 έως και το τέλος του 2007. Από τα έξι αυτά χρόνια επιλέχθηκαν 278 εικόνες από τον MODIS/Terra και 273 από τον MODIS/Aqua, από τα δεδομένα των οποίων υπολογίστηκε ο δείκτης PRI μέσω της εξίσωσης 5. Από το σύνολο των τιμών του δείκτη PRI που

υπολογίστηκαν, δημιουργήθηκαν διάφορα υποσύνολα PRI (Πίνακας 16) που διέφεραν ως προς τον δορυφόρο, το κανάλι αναφοράς και τις γωνίες λήψης. Τα δεδομένα από τους δυο δορυφόρους χρησιμοποιήθηκαν ξεχωριστά το καθένα (PRI_Terra και PRI_Aqua) αλλά και ως ένα σύνολο που περιέχει τις τιμές και των δυο (PRI_Both). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ώρα διέλευσης των δυο δορυφόρων από την περιοχή του San Rossore διαφέρει, με τον Terra να περνά πριν το μεσημέρι (από τις 11:00 έως τις 12:00, τοπική ώρα) και τον Aqua μετά (από τις 13:00 ως τις 14:00).

Καθώς οι γωνίες λήψης επιδρούν στη σχέση του PRI με την ϵ (Drolet et al., 2005; Goerner et al., 2011; Middleton et al., 2016; Moreno et al., 2012), οι τιμές PRI σε καθένα από τα τρία σύνολα κατηγοριοποιήθηκαν σε υποσύνολα βάση των γωνιών λήψης της περιοχής στην αντίστοιχη εικόνα. Η λήψη ενός στόχου χαρακτηρίζεται από τέσσερις γωνίες που περιγράφουν τις θέσεις του αισθητήρα και του ηλίου σε σχέση με τη θέση του στόχου και τον άξονα βορά-νότου. Οι τέσσερις αυτές γωνίες είναι: 1) η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου του αισθητήρα και της ευθείας αισθητήρα-στόχου (Viewing Zenith Angle, VZA), 2) η γωνία μεταξύ της ευθείας αισθητήρα-στόχου και του άξονα βορά-νότου (Viewing Azimuth Angle, VAA), 3) η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου του ηλίου και της ευθείας ηλίου-στόχου (Solar Zenith Angle, SZA) και 4) η γωνία μεταξύ της ευθείας ηλίου-στόχου και του άξονα βορά-νότου (Solar Azimuth Angle, SAA). Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ των γωνιών zenith (Relative Zenith Angle, RZA) και azimuth (Relative Azimuth Angle, RAA) του αισθητήρα και του ηλίου. Βάση αυτών των γωνιών μια λήψη και το αντίστοιχο PRI, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε μια από τις τρεις συνθήκες λήψης, nadir (κατακόρυφη λήψη), forward scatter (ο ήλιος βρίσκεται μπροστά από τον αισθητήρα) και backscatter (ο ήλιος βρίσκεται πίσω από τον αισθητήρα). Ωστόσο, έως σήμερα δεν έχουν οριστεί κάποια κοινώς αποδεκτά κριτήρια γωνιών για την κατάταξη των λήψεων σε αυτές τις κατηγορίες. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν εννέα υποσύνολα βάση διαφορετικών κριτηρίων κατάταξης, ένα nadir, τέσσερα forward scatter και τέσσερα backscatter. Τα κριτήρια των υποσυνόλων forward και backscatter ποικίλουν από πολύ αυστηρά ως πολύ γενικά, με τα τελευταία να δημιουργούν υποσύνολα που αλληλεπικαλύπτονται. Τα κριτήρια και ο αριθμός λήψεων ανά κατηγορία δίνονται στον Πίνακα 16.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο MODIS δεν διαθέτει κανάλι στα 570 nm που είναι το τυπικό κανάλι αναφοράς του PRI, και αντί αυτού έχουν δοκιμαστεί άλλα κανάλια του. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά κανάλια αναφοράς για τον υπολογισμό του PRI, τα κανάλια 1 (620 – 670 nm), 12 (546 – 556 nm) και 13 (662 – 672 nm). Ως εκ τούτου, τα υποσύνολα PRI που περιγράφηκαν παραπάνω δημιουργήθηκαν και για τις τρεις παραλλαγές (βάσει καναλιού αναφοράς) του PRI. Η επιλογή των τριών αυτών καναλιών έγινε βάσει της σχετικής βιβλιογραφίας. Το κανάλι 12 είναι το συχνότερα χρησιμοποιούμενο κανάλι αναφοράς (de Sousa et al., 2017; Garbulsky et al., 2008; Moreno et al., 2012), όντας το πλησιέστερο στενό κανάλι στα 570 nm. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του καναλιού 12 σε σχέση με τα υπόλοιπα, είναι η φασματική εγγύτητα του στο κανάλι 11 που πιστεύεται πως μειώνει την ατμοσφαιρική επίδραση στον PRI (Garbulsky et al., 2008). Τα άλλα δυο κανάλια αναφοράς έχουν επίσης εξεταστεί στην σχετική βιβλιογραφία (Drolet et al., 2005; Filella et al., 2018; Middleton et al., 2016), είναι και τα δυο κανάλια που ανήκουν στο κόκκινο τμήμα του ορατού φάσματος αλλά διαφέρουν στο εύρος.

Στο εξής κάθε υποσύνολο PRI θα συνοδεύεται από έναν δείκτη που αντιστοιχεί στο κανάλι αναφοράς και μετά από μια κάτω παύλα θα δίνεται ο δορυφόρος από τον οποίο προέκυψε (Terra, Aqua ή Both), με την κατηγορία συνθηκών λήψης ως δείκτη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16. Τα διαφορετικά υποσύνολα του PRI. Ο δείκτης x αντιστοιχεί στο κανάλι (1, 12 ή 13) του MODIS που χρησιμοποιήθηκε ως κανάλι αναφοράς.

Δορυφόρος	Συνθήκες λήψης	Συντομογραφία	Κριτήρια	Αριθμός λήψεων
Terra	All angles	PRI _x _Terra _{all}	Κανένα	278
	Nadir	PRI _x _Terra _n	VZA < 15	98
	Backscatter	PRI _x _Terra _b	VZA > 15, RAA < 120	129
			VZA > 15, RAA < 90	111
			VZA > 15, RAA < 60	89
			RZA < 10, RAA < 60	50
	Forward scatter	PRI _x _Aqua _f	VZA > 15, RAA > 60	91
			VZA > 15, RAA > 90	69
			VZA > 15, RAA > 120	51
			RZA < 10, RAA > 60	37
Aqua	All angles	PRI _x _Aqua _{all}	Κανένα	273
	Nadir	PRI _x _Aqua _n	VZA < 15	124
	Backscatter	PRI _x _Aqua _b	VZA > 15, RAA < 120	96
			VZA > 15, RAA < 90	78
			VZA > 15, RAA < 60	62
			RZA < 10, RAA < 60	36
	Forward scatter	PRI _x _Aqua _f	VZA > 15, RAA > 60	87
			VZA > 15, RAA > 90	71
			VZA > 15, RAA > 120	53
			RZA < 10, RAA > 60	36
Both	All angles	PRI _x _Both _{all}	Κανένα	551
	Nadir	PRI _x _Both _n	VZA < 15	222
	Backscatter	PRI _x _Both _b	VZA > 15, RAA < 120	225
			VZA > 15, RAA < 90	189
			VZA > 15, RAA < 60	151
			RZA < 10, RAA < 60	86
	Forward scatter	PRI _x _Both _f	VZA > 15, RAA > 60	178
			VZA > 15, RAA > 90	140
			VZA > 15, RAA > 120	104
			RZA < 10, RAA > 60	73

Αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ)

Για την περίοδο μελέτης (2002-2007) υπολογίστηκαν ημερήσιες και ημίωρες τιμές αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) για την περιοχή του San Rossore, διαιρώντας τις τιμές GPP με τις αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας (εξίσωση 3). Παρότι όπως φαίνεται και από την εξίσωση 3 η αποδοτικότητα ορίζεται ως προς την APAR (g C mol^{-1} APAR), αρκετές μελέτες έχουν επιλέξει να διαιρέσουν την GPP με την PAR (Gitelson and Gamon, 2015; Grace et al., 2007), υπολογίζοντας μια διαφορετική εκδοχή της ϵ (g C mol^{-1} PAR). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο παραλλαγές της ϵ . Για τον υπολογισμό της APAR χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές PAR του πύργου και

τιμές fAPAR που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα MODIS (APAR_{Terra} και APAR_{Aqua} για τα δεδομένα MODIS/Terra και MODIS/Aqua αντίστοιχα) με δυο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού. Και οι δυο μέθοδοι χρησιμοποιούν την εμπειρική εξίσωση 8 για τον υπολογισμό του LAI από τον NDVI (μέση τιμή των τεσσάρων πλησιέστερων στον πύργο pixel MOD/MYD09A1), αλλά διαφοροποιούνται στον υπολογισμό του fAPAR από τον LAI. Η πρώτη μέθοδος (Ruimy et al., 1999) αναφέρθηκε ήδη (εξίσωση 9), ενώ η δεύτερη αφορά σε μια πιο πολύπλοκη προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, η δεύτερη μέθοδος (Chen et al., 2005) υπολογίζει χωριστά την APAR για την απευθείας ακτινοβολία και χωριστά για την διάχυτη, λαμβάνοντας υπόψη και την θέση του ηλίου.

Αρχικά, υπολογίζεται από την εξίσωση 35 ο λόγος της διάχυτης SW ακτινοβολίας (SW_{dif} , $W m^{-2}$) προς την συνολική (SW_{inc} , $W m^{-2}$), βάση του οποίου χωρίζεται η ακτινοβολία σε απευθείας (SW_{dir}) και διάχυτη. Η παράμετρος R υπολογίζεται από την εξίσωση 36, όπου G_{sc} η ηλιακή σταθερά ($1380 W m^{-2}$) και θ το solar zenith angle, το οποίο υπολογίζεται βάση των De Pury and Farquhar (1997).

$$\frac{SW_{dif}}{SW_{inc}} = \begin{cases} 0,943 + 0,734 * R - 4,9 * R^2 + 1,796 * R^3 + 2,058 * R^4, & R < 0,8 \\ 0,13, & R \geq 0,8 \end{cases} \quad [5]$$

$$R = \frac{SW_{inc}}{G_{sc}} * \cos\theta \quad [36]$$

Αφού υπολογιστεί ο λόγος της διάχυτης προς τη συνολική SW ακτινοβολία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διάχυτης και απευθείας PAR, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμεύουν στον υπολογισμό της διάχυτης και απευθείας APAR από τις εξισώσεις 37 και 39 αντίστοιχα.

$$APAR_{dif} = PAR_{dif} * \left[\left(1 - e^{-\frac{LAI}{2} * \cos\theta d} \right) * 0,95 \right] + 0,07 * PAR_{air} * (1,1 - 0,1 * LAI) * e^{-\cos\theta} \quad [6]$$

όπου θd είναι ένα αντιπροσωπευτικό zenith angle για την διάδοση της διάχυτης ακτινοβολίας μέσω του θόλου και το συνημίτονο του δίνεται από την εξίσωση:

$$\cos\theta d = 0,537 + 0,025 * LAI \quad [38]$$

$$APAR_{air} = PAR_{air} * \left[\left(1 - e^{-\frac{LAI}{2} * \cos\theta} \right) * 0,95 \right] \quad [39]$$

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται στα δεδομένα μισαώρου και στη συνέχεια οι ημίωρες τιμές απευθείας και διάχυτης APAR ολοκληρώνονται στην ημέρα όπως περιγράφηκε στην παράγραφο «Δεδομένα eddy covariance» για την PAR. Τέλος, από το άθροισμα των δυο προκύπτει η τελική ημερήσια τιμή APAR.

Συνοψίζοντας, οι ημερήσιες (ϵ_d) και ημίωρες (ϵ_{hh}) τιμές αποδοτικότητας υπολογίζονται με πέντε διαφορετικούς τρόπους η καθεμία, που διαφέρουν ως προς την ακτινοβολία με την οποία διαιρείται η GPP. Έτσι, για την ημερήσια ϵ έχουμε την ϵ_d_PAR που προκύπτει από την διαίρεση της GPP με την PAR, δυο $\epsilon_d_APAR_{Terra}$ που προκύπτουν από την διαίρεση με την APAR υπολογισμένη με τις δυο διαφορετικές μεθόδους από δεδομένα MODIS/Terra και δυο $\epsilon_d_APAR_{Aqua}$ για τις δυο μεθόδους υπολογισμού από δεδομένα MODIS/Aqua. Αντίστοιχα, προκύπτουν οι πέντε παραλλαγές της ημίωρης ϵ , ϵ_{hh_PAR} δυο $\epsilon_{hh_APAR_{Terra}}$ και δυο $\epsilon_{hh_APAR_{Aqua}}$. Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα σύνολο τιμών ημίωρων ϵ (για κάθε μια από τις πέντε παραλλαγές) για κάθε υποσύνολο PRI, που περιλαμβάνει την τιμή της ϵ για το μισάωρο κατά το οποίο πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη λήψη (ϵ_{ov}). Η ϵ_{ov} ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την τιμή αποδοτικότητας την στιγμή της λήψης κάθε εικόνας

και δεν αντιστοιχεί σε ένα μόνο μισάωρο καθώς οι λήψεις κάθε αισθητήρα δεν πραγματοποιούνται πάντα στο ίδιο μισάωρο.

Όλες οι τιμές ημερήσιας αποδοτικότητας (ϵ_d) και αποδοτικότητας κατά τη στιγμή διέλευσης (ϵ_{ov}) που εξηγήθηκαν παραπάνω εξετάζονται για την σχέση τους με τον PRI. Διαφορές στη σχέση του PRI με τις διαφορετικές ϵ μπορεί να παρέχουν στοιχεία για την σημασία της ώρας λήψης καθώς και του τρόπου υπολογισμού της APAR. Οι ημίωρες τιμές αποδοτικότητας (ϵ_{hh}) συγκρίνονται με τις αντίστοιχες ημερήσιες ώστε να εξεταστεί η αντιπροσωπευτικότητα κάθε μιας για το σύνολο της ημέρας.

Επίγειες μετρήσεις

Οι επίγειες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιοχές του πάρκου Βόρειας Πίνδου (Πίνακας 2) κατά τα έτη 2013 και 2014, και αποσκοπούν στην διερεύνηση της σχέσης του PRI με τον λόγο καροτενοειδών προς χλωροφύλλες και με την υδατική κατάσταση της βλάστησης. Μελετήθηκαν τέσσερα δασικά είδη που κυριαρχούν στην ευρύτερη περιοχή, τα *Fagus sylvatica*, *Pinus nigra*, *Quercus frainetto* και *Quercus cerris*. Για καθένα από τα είδη αυτά πραγματοποιούνταν μετρήσεις περίπου μια φορά το μήνα.

Επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας

Ο δείκτης PRI υπολογίστηκε από μετρήσεις ανακλαστικότητας που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο με τη χρήση του φορητού φασματοραδιόμετρου JAZ (Ocean Optics Inc., Dunedin FL, USA). Οι μετρήσεις αφορούν τόσο σε ανακλαστικότητα φύλλου, που έγιναν με μανταλάκι φύλλου (Spectroclip-TR, Ocean Optics Inc., Dunedin FL., USA), όσο και σε ανακλαστικότητα μικρού τμήματος του θόλου που έγιναν με τη χρήση οπτικής ίνας 5 μέτρων προσαρμοσμένης σε συσκευή ανύψωσης (Εικόνα 15). Το συγκεκριμένο όργανο διαθέτει εύρος ανίχνευσης στην ορατή και εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία (350 – 1000 nm) με φασματική ανάλυση περίπου 0,35 nm και για την βαθμονόμηση του στο πεδίο χρησιμοποιήθηκε πρότυπο υλικό βαθμονόμησης (SRT-99-120, Labsphere Inc., North Sutton, USA). Οι μετρήσεις σε επίπεδο φύλλου πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του τοπικού μεσημεριού σε 45 τυχαία δείγματα από τη περιοχή μελέτης, από τα οποία τα 30 αφορούσαν φύλλα φωτός (φύλλα που δέχονται απευθείας ακτινοβολία) και τα 15 φύλλα σκιάς. Οι μετρήσεις θόλου πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιόδους της ημέρας ξεκινώντας το πρωί λίγο αφότου τα άτομα που μελετώνται έρθουν σε επαφή με απευθείας ακτινοβολία και τελειώνοντας το μεσημέρι, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια ενδιάμεση μέτρηση. Κάθε μια από τις τρεις μετρήσεις περιλάμβανε 30 λήψεις σε ύψος περίπου πέντε μέτρων υπό γωνία 45° μοιρών σε ηλιόλουστες περιοχές του θόλου. Από τα φάσματα που εξάγονται υπολογίστηκε ο δείκτης PRI, με τελική τιμή του δείκτη για κάθε μέτρηση να θεωρείται η μέση τιμή των τιμών από τα επιμέρους φάσματα. Για τον υπολογισμό του PRI χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή ανακλαστικότητας των τριών καναλιών στα 531 nm (531,19 – 531,55 – 531,91) και των τριών καναλιών στα 570 nm (570,13 – 570,48 – 570,84).

Μέτρηση υδατικού δυναμικού

Μέτρηση υδατικού δυναμικού (Ψ) με χρήση του θαλάμου πίεσης SKPM-1400 (Skye Instruments Ltd, UK). Για τη μέτρηση του δυναμικού νερού το όργανο εφαρμόζει πίεση στο δείγμα (φύλλο ή μικρό τμήμα κλαδιού) εντός του θαλάμου έως ότου ξεκινήσει η εκροή νερού από το δείγμα. Το μέγεθος της πίεσης που χρειάζεται να εφαρμοστεί ώστε να ξεκινήσει η εκροή καθορίζει την τιμή του δυναμικού του δείγματος. Για να αντιστοιχεί η τιμή του δυναμικού του δείγματος στο δυναμικό του ατόμου είναι απαραίτητο να έχει σταματήσει η διαπνοή στο δείγμα, κάτι που επιτυγχάνεται με το να καλύπτεται το δείγμα με αλουμινόχαρτο και να σφραγίζεται αεροστεγώς μέσα σε σακουλάκι για περίπου δέκα λεπτά έως τη μέτρηση (Εικόνα 15). Μετά από αυτό, το δείγμα κόβεται και τοποθετείται αμέσως στο θάλαμο του οργάνου με την τομή προς τα επάνω και εφαρμόζεται πίεση. Η στιγμή που ξεκινά η εκροή νερού από το κλαδί καθορίζεται οπτικά με τη χρήση στερεοσκοπίου. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, οι μετρήσεις του υδατικού δυναμικού πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, σε μικρά τμήματα κλαδιών από πέντε ή έξι καλά φωτισμένα άτομα.

Μέτρηση συγκέντρωσης φωτοσυνθετικών χρωστικών

Στο τέλος κάθε ημέρα μετρήσεων πεδίου, συλλέγονταν φύλλα από τα άτομα στα οποία πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις ανακλαστικότητας και δυναμικού. Είκοσι φύλλα φωτός (από την εξωτερική μεριά του θόλου) και είκοσι φύλλα σκιάς (από το εσωτερικό του θόλου) μεταφέρονταν στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών (χλωροφύλλες, καροτενοειδή). Αρχικά, συγκεκριμένη επιφάνεια αυτών των δειγμάτων εκχυλίζεται με ανθρακικό ασβέστιο και ακετόνη 80% και το εκχύλισμα φυγοκεντρείται. Αφού υπολογιστεί ο όγκος του υπερκείμενου, υπολογίζεται η απορρόφηση σε τέσσερα μήκη κύματος 470 nm, 646 nm, 663 nm και 720 nm, με τη χρήση φασματοραδιόμετρου (Hitachi U-2800, Tokyo, Japan). Από τις απορροφήσεις σε αυτά τα μήκη κύματος υπολογίζονται μέσω ειδικών εξισώσεων (Lichtenthaler and Wellburn, 1983) οι πραγματικές συγκεντρώσεις των χλωροφυλλών α και β και των συνολικών καροτενοειδών σε $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των προγραμμάτων excel (Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO [Version 2309 Build 16.0.16827.20166]) και JASP (JASP Team (2020). JASP (Version 0.14) [Computer software]).

Η αξιολόγηση κάθε μοντελοποιημένης παραμέτρου προκύπτει από τη γραμμική συσχέτιση της με την αντίστοιχη μετρημένη (συντελεστής προσδιορισμού R^2 και επίπεδο σημαντικότητας p-value), καθώς και από τη ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των μοντελοποιημένων και των μετρημένων τιμών (συντελεστής Root Mean Square Error, RMSE).

Ο συντελεστής RMSE υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - M_i)^2}{N}} \quad [40]$$

όπου, O_i οι μετρημένες τιμές, M_i οι μοντελοποιημένες και N ο αριθμός των παρατηρήσεων.



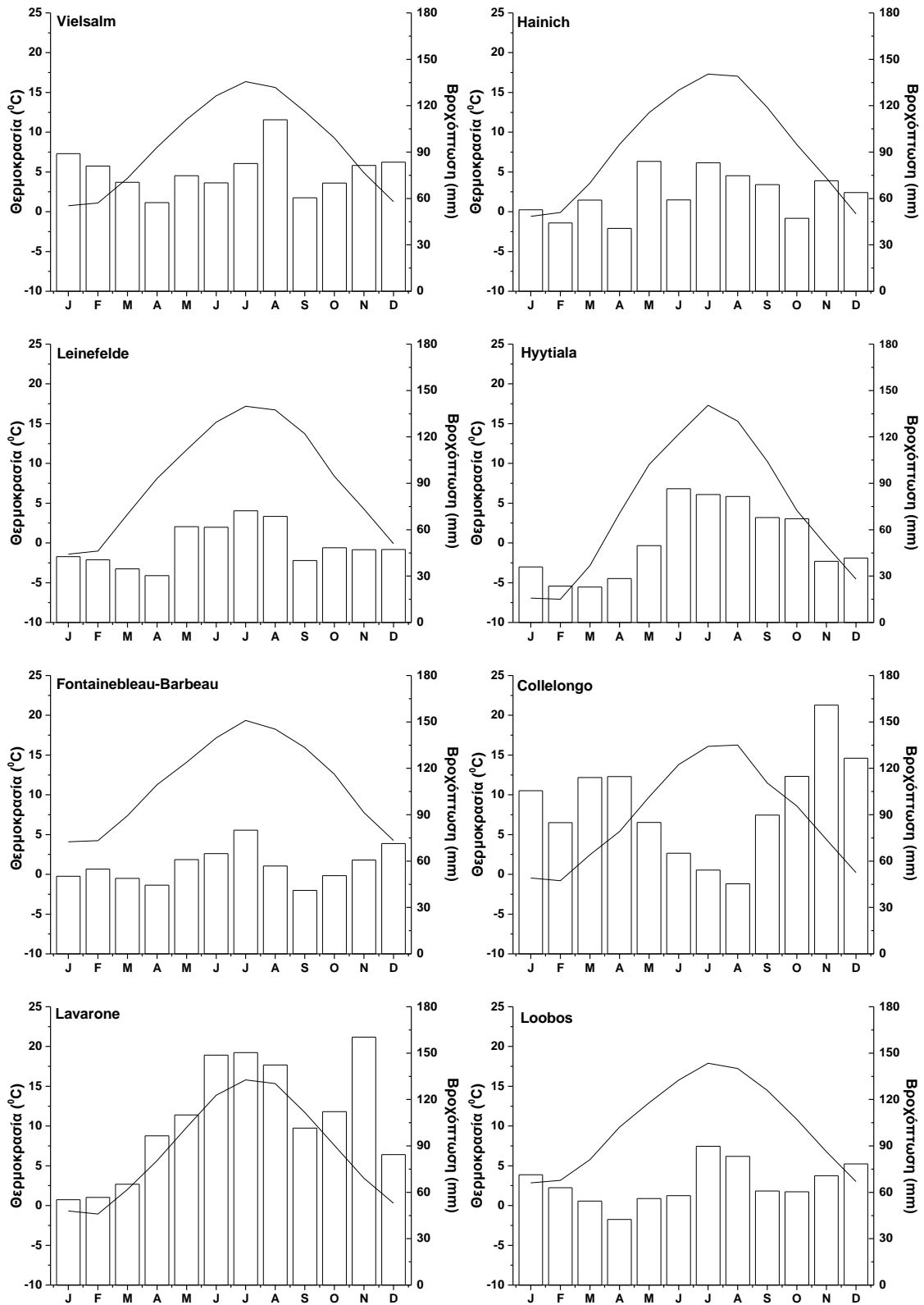
Εικόνα 15. Εργασίες στο πεδίο. Στη μεγάλη φωτογραφία παρουσιάζεται η διαδικασία μέτρησης ανακλαστικότητας θόλου, σε συνεργασία με τον Δρ. Σταύρο Σταγάκη. Πάνω δεξιά παρουσιάζεται η μέτρηση ανακλαστικότητας φύλλου με το μανταλάκι φύλλου. Ακριβώς από κάτω φαίνεται ο θάλαμος πίεσης SKPM-1400 έτοιμος για χρήση, ενώ κάτω δεξιά παρουσιάζεται η προετοιμασία ενός δείγματος για μέτρηση δυναμικού στο θάλαμο.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

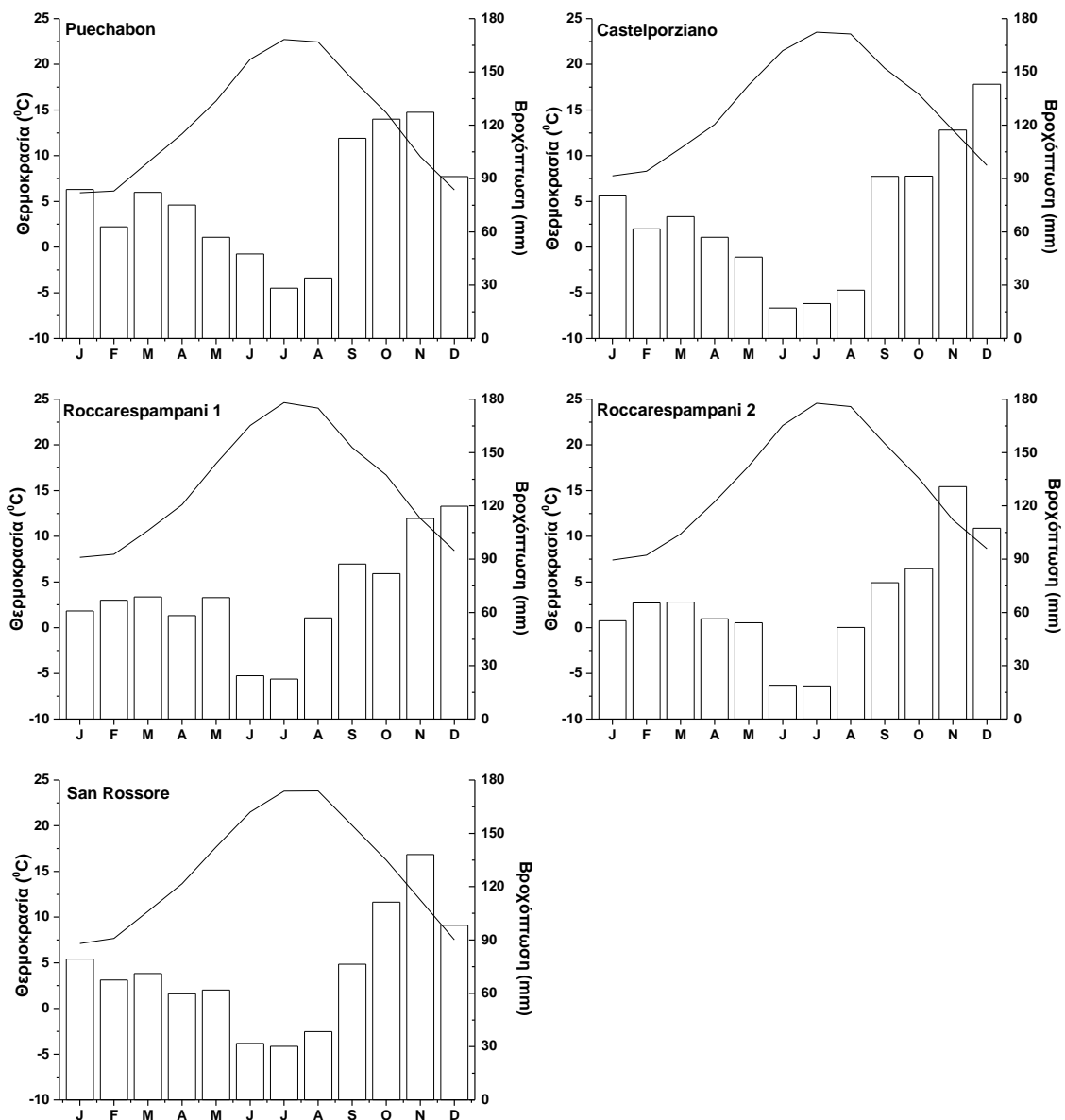
Η παρούσα διατριβή εξετάζει την δυνατότητα χρήσης δορυφορικών δεδομένων για την μελέτη της παραγωγικότητας δασικών οικοσυστημάτων, επικεντρώνοντας στην αρχή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός. Η μελέτη διακρίνεται σε δύο τμήματα, το πρώτο αφορά το μοντέλο υπολογισμού παραγωγικότητας sCARE, ενώ το δεύτερο τον δείκτη PRI. Το μοντέλο sCARE είναι ένα μοντέλο LUE που συνδυάζει δορυφορικά δεδομένα από τον αισθητήρα MODIS και επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα για τον υπολογισμό ημερήσιων τιμών GPP. Αρχικά αξιολογείται η ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου με βάση μετρήσεις παραγωγικότητας από πύργους eddy covariance σε δεκατρείς περιοχές της Ευρώπης (Πίνακας 1), και παράλληλα αναλύεται η βαρύτητα των επιμέρους scalars του μοντέλου. Επιπλέον, καθώς η επίδραση της υδατικής καταπόνησης στην παραγωγικότητα αποτελεί ίσως την κρισιμότερη παράμετρο υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, το υδατικό scalar του sCARE αξιολογείται συγκρινόμενο με άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα υδατικά scalars. Στη συνέχεια εξετάζεται η πιθανή βελτίωση του sCARE με την ενσωμάτωση της επίδρασης της διάχυτης ακτινοβολίας στην παραγωγικότητα των δασικών οικοσυστημάτων. Έχοντας ως βάση τον λόγο της PAR προς την δυναμική PAR, δημιουργούνται και αξιολογούνται διάφορα scalars που προσαρμόζουν την ανάλογα με την ποσόστωση απευθείας και διάχυτης ακτινοβολίας. Οι δεκατρείς περιοχές που χρησιμοποιούνται εμφανίζουν μεγάλη ετερογένεια τόσο ως προς το τύπο βλάστησης, όσο και ως προς τις κλιματικές συνθήκες, προσφέροντας έτσι μια γενική εικόνα για την απόδοση του μοντέλου.

Τέλος, εξετάζεται η επίδραση της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων στην ακρίβεια των υπολογισμών του sCARE, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τρεις αισθητήρες με διαφορετική χωρική ανάλυση. Δεδομένα από τους αισθητήρες MODIS, OLCI και MSI (χωρική ανάλυση 500, 300 και 10 μέτρων αντίστοιχα) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της GPP σε έξι περιοχές στην Ελλάδα (Πίνακας 2) που διαφέρουν ως προς τη σύνθεση και την πυκνότητα της βλάστησης. Οι διαφορετικές τιμές GPP συγκρίνονται μεταξύ τους για την ανίχνευση τυχόν διαφορών και με βάση τα επιμέρους χαρακτηριστικά των περιοχών διερευνώνται τα πιθανά αίτια.

Το δεύτερο σκέλος της έρευνας αφορά στον δείκτη ανακλαστικότητας PRI, έναν δείκτη που έχει συνδεθεί, μεταξύ άλλων, με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ) της βλάστησης. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον αισθητήρα MODIS, εξετάζεται η σχέση του PRI με την ϵ , καθώς και διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχέση αυτή. Η ανάλυση γίνεται σε σύγκριση με δεδομένα από έναν πύργο eddy covariance σε ένα παραθαλάσσιο δάσος κωνοφόρων στην περιοχή San Rossore της Ιταλίας (Πίνακας 1). Παράλληλα, εξετάζεται η σχέση του PRI με κάποιες οικοφυσιολογικές παραμέτρους της βλάστησης (δυναμικό νερού, συγκεντρώσεις χρωστικών), μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε τρία δασικά οικοσυστήματα της Βόρειας Πίνδου (Πίνακας 2).



Σχήμα 2. Μέση μηνιαία θερμοκρασία και μέση μηνιαία βροχόπτωση για τις οκτώ μη μεσογειακές περιοχές του Πίνακα 1. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν υψηλότερα ύψη βροχών κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

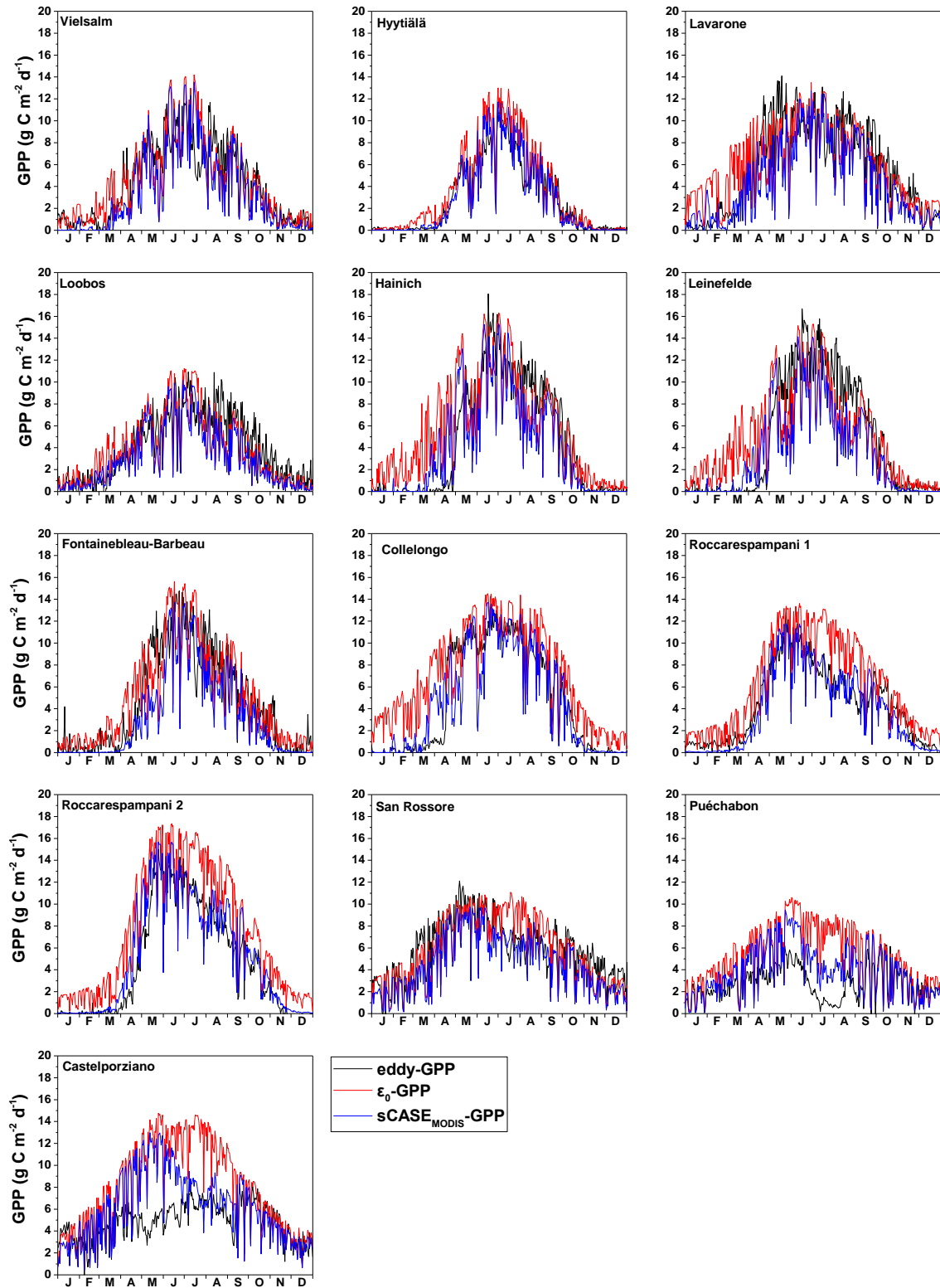


Σχήμα 3. Μέση μηνιαία θερμοκρασία και μέση μηνιαία βροχόπτωση για τις πέντε μεσογειακές περιοχές του Πίνακα 1. Και στις πέντε αυτές περιοχές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται χαμηλή βροχόπτωση σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες.

Αξιολόγηση μοντέλου sCASE

Το μοντέλο sCASE αναπτύχθηκε για την περιοχή της Βόρειας Πίνδου και τα οικοσυστήματα που περιλαμβάνονται σε αυτήν. Στην εργασία αυτή επιχειρείται για πρώτη φορά μια αξιολόγηση του με δεδομένα παραγωγικότητας από πύργους eddy covariance. Δεκατρία δασικά οικοσυστήματα της Ευρώπης (Πίνακας 1) που διαθέτουν πύργο eddy covariance, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν μεγάλη ετερογένεια, τόσο ως προς τα είδη που περιλαμβάνουν (Πίνακας 1), όσο και ως προς τις κλιματικές τους συνθήκες, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2 και 3 όπου παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για τα χρόνια μελέτης κάθε περιοχής. Οι δεκατρείς περιοχές μπορούν να χωριστούν βάση των κλιματικών τους συνθηκών σε δυο γενικές ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει οκτώ περιοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες και σχετικά ίση κατανομή των βροχοπτώσεων σε όλους τους μήνες του έτους, με τα υψηλότερα ύψη βροχών να παρατηρούνται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Σχήμα 2). Εξαιρέση αποτελεί η περιοχή Collelongo, με μείωση των βροχοπτώσεων το καλοκαίρι, που όμως δεν συνοδεύεται από ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες ώστε να προκαλείται υδατική καταπόνηση. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο ότι είναι η νοτιότερη από τις οκτώ περιοχές, αποκλίνοντας από το μεσογειακό κλίμα της ευρύτερης περιοχής όπου ανήκει (στο όριο μεταξύ κεντρικής και νότιας Ιταλίας) λόγω υψομέτρου (1560 μέτρα). Τα οικοσυστήματα των οκτώ αυτών περιοχών δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα υδατικής καταπόνησης και κύριος ανασταλτικός παράγοντας για την φωτοσύνθεση αναμένεται να είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά κατά τους χειμερινούς μήνες για τα αειθαλή είδη. Η πιο ακραία περίπτωση είναι η περιοχή Hyvitiälä, η βορειότερη περιοχή και από τις δεκατρείς, στην οποία επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τον χειμώνα, μεγάλο μέρος του οποίου ολόκληρη η περιοχή είναι καλυμμένη με χιόνι. Αντίθετα, η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει πέντε περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλότερες θερμοκρασίες και ελάχιστες βροχοπτώσεις κατά τους θερινούς μήνες (Σχήμα 3). Οι πέντε αυτές περιοχές έχουν τυπικά χαρακτηριστικά μεσογειακού κλίματος και τα οικοσυστήματα τους αντιμετωπίζουν υδατική καταπόνηση τα καλοκαίρια, κατά την διάρκεια των οποίων συνδυάζονται υψηλές θερμοκρασίες και ελάχιστες βροχοπτώσεις.

Για κάθε μια από τις περιοχές αυτές επιλέχθηκαν ένα έως τέσσερα pixel MODIS (500 μ) που περιλαμβάνουν την περιοχή του πύργου eddy covariance, από τα οποία υπολογίστηκαν οι δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιεί το sCASE. Χρησιμοποιώντας τους δείκτες του MODIS και μετεωρολογικά δεδομένα από τους πύργους eddy υπολογίστηκαν από τη βασική εκδοχή του μοντέλου sCASE (Εξίσωση 7) ημερήσιες τιμές GPP για κάθε περιοχή (sCASE_{MODIS}-GPP), οι οποίες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν από τις διαχειριστικές ομάδες κάθε πύργου με την τεχνική eddy covariance (eddy-GPP ή μετρημένη GPP). Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι ημερήσιες τιμές GPP πολλαπλασιάζοντας την εκάστοτε ϵ_0 με την APAR (ϵ_0 -GPP), χωρίς δηλαδή τη χρήση scalars στον αλγόριθμο του sCASE, οι οποίες επίσης συγκρίθηκαν με τις μετρημένες τιμές GPP. Στο Σχήμα 4 δίνονται οι χρονοσειρές των τριών GPP (eddy-GPP, sCASE_{MODIS}-GPP και ϵ_0 -GPP) των δεκατριών περιοχών μελέτης με πύργους eddy covariance (Πίνακας 1), για μια ενδεικτική χρονιά (2006). Από τις χρονοσειρές των τριών GPP είναι ξεκάθαρο πως η προσθήκη των scalar (sCASE_{MODIS}-GPP) περιορίζει τις υπερβολικές τιμές της ϵ_0 -GPP, αποτυπώνοντας καλύτερα τη διακύμανση της παραγωγικότητας όλων των περιοχών. Σε πολλές περιοχές το sCASE υποεκτιμά τις υψηλές τιμές παραγωγικότητας, ενώ αντιθέτως στις δυο περιοχές με αειθαλή πλατύφυλλα (Puéchabon και Castelporziano) υπερεκτιμά κατά πολύ την παραγωγικότητα (Σχήμα 4). Στις δυο αυτές περιοχές το sCASE αδυνατεί να ακολουθήσει τη διακύμανση της παραγωγικότητας, ιδιαίτερα στη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, παρότι διορθώνει σε κάποιο βαθμό την ϵ_0 -GPP.



Σχήμα 4. Οι ημερήσιες τιμές GPP για το 2006 των τριών τύπων GPP, eddy-GPP, sCASE_{MODIS}-GPP και ϵ_0 -GPP, για τις δεκατρείς περιοχές μελέτης με πύργο eddy covariance (Πίνακας 1).

Η αξιολόγηση κάθε μοντελοποιημένης GPP προκύπτει από τη γραμμική συσχέτιση της με την αντίστοιχη μετρημένη GPP (συντελεστής προσδιορισμού R^2 και επίπεδο σημαντικότητας p -value), καθώς και από τη ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των μοντελοποιημένων και των μετρημένων τιμών GPP (συντελεστής RMSE, $g C m^{-2} d^{-1}$ - Root Mean Square Error). Οι συντελεστές R^2 και RMSE για τις sCASE_{MODIS}-GPP και ϵ_0 -GPP δίνονται στον Πίνακα 17. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας μικρότερο από 0,001.

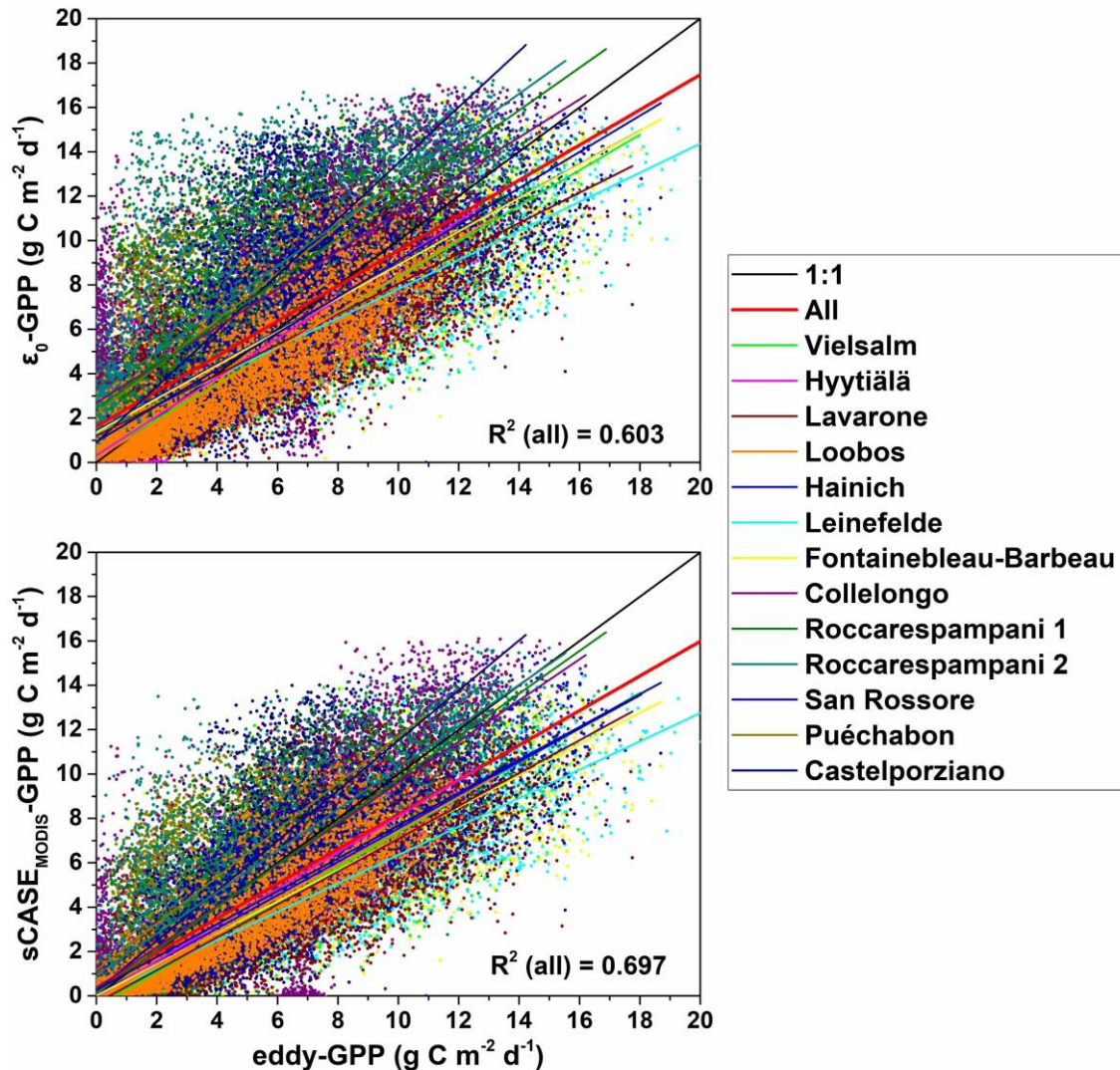
Ξεκινώντας από την πλέον απλοϊκή εφαρμογή της αρχής αποδοτικότητας χρήσης φωτός βλέπουμε πως σε γενικές γραμμές η σχέση μεταξύ της ϵ_0 -GPP και της μετρημένης GPP είναι αρκετά καλή (Πίνακας 17) με εξαίρεση τις δυο περιοχές με αιθαλή πλατύφυλλα (EBF), επιβεβαιώνοντας έτσι την σχέση μεταξύ απορροφημένης ακτινοβολίας και παραγόμενης βιομάζας. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται βελτίωση (κυρίως αύξηση του R^2) της σχέσης της μοντελοποιημένης με την μετρημένη GPP όταν προστίθενται τα scalars στην εξίσωση υπολογισμού της παραγωγικότητας (sCASE). Συνολικά, το sCASE βελτιώνει τη συσχέτιση μοντελοποιημένης και μετρημένης GPP αυξάνοντας τον μέσο R^2 από 0,675 σε 0,750, περιορίζοντας ταυτόχρονα τον μέσο RMSE από 2,746 σε 2,317 $g C m^{-2} d^{-1}$. Το μοντέλο sCASE καταφέρνει να αποτυπώσει τις ημερήσιες μεταβολές της GPP σε ικανοποιητικό βαθμό για την πλειοψηφία των οικοσυστημάτων (Πίνακας 17), με καλύτερη επίδοση στα φυλλοβόλα είδη (DBF) και ασθενέστερη στα αιθαλή πλατύφυλλα (EBF).

Πίνακας 17. Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και συντελεστής RMSE ($g C m^{-2} d^{-1}$) των συσχετίσεων μεταξύ των μοντελοποιημένων ϵ_0 -GPP και sCASE_{MODIS}-GPP (βασική εκδοχή του μοντέλου) και της μετρημένης eddy-GPP. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$. Στην παρένθεση δίνεται η κατηγορία βλάστησης κάθε περιοχής βάσει του IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), όπου MF = Mixed Forest, ENF = Evergreen Needleleaf forest, DBF = Deciduous Broadleaf forest και EBF = Evergreen Broadleaf Forest.

Περιοχή Μελέτης	ϵ_0 -GPP		sCASE _{MODIS} -GPP		
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	
Χωρίς υδατική καταπόνηση	Vielsalm (MF)	0,776	1,960	0,787	2,380
	Hyytiälä (ENF)	0,838	1,391	0,875	1,391
	Lavarone (ENF)	0,641	2,510	0,692	2,940
	Loobos (ENF)	0,772	1,645	0,806	1,877
	Hainich (DBF)	0,764	2,495	0,855	2,291
	Leinefelde (DBF)	0,758	2,674	0,841	2,955
	Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,768	2,447	0,813	2,685
	Collelongo (DBF)	0,672	3,466	0,764	2,360
Με υδατική καταπόνηση	Roccarespampani 1 (DBF)	0,642	3,477	0,781	1,882
	Roccarespampani 2 (DBF)	0,656	4,127	0,767	2,264
	San Rossore (ENF)	0,600	2,162	0,669	2,202
	Puéchabon (EBF)	0,403	3,483	0,528	2,386
	Castelporziano (EBF)	0,483	3,858	0,564	2,507
Average	0,675	2,746	0,750	2,317	
ALL	0,603	2,788	0,697	2,324	

Αξίζει να σημειωθεί πως και στις δυο περιπτώσεις (ϵ_0 -GPP και sCASE_{MODIS}-GPP) ο συντελεστής R^2 της συσχέτισης μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης GPP για όλες τις περιοχές μαζί (ALL), είναι χαμηλότερος από τον μέσο R^2 των συσχετίσεων στις επιμέρους περιοχές (Average), γεγονός που υποδηλώνει διαφορές στη σχέση από περιοχή σε περιοχή. Αυτό

αποτυπώνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 5, όπου παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των δυο μοντελοποιημένων GPP (ϵ_0 -GPP και $sCASE_{MODIS}$ -GPP) με την μετρημένη GPP για τις δεκατρείς περιοχές χωριστά καθώς και όλων μαζί (ALL).



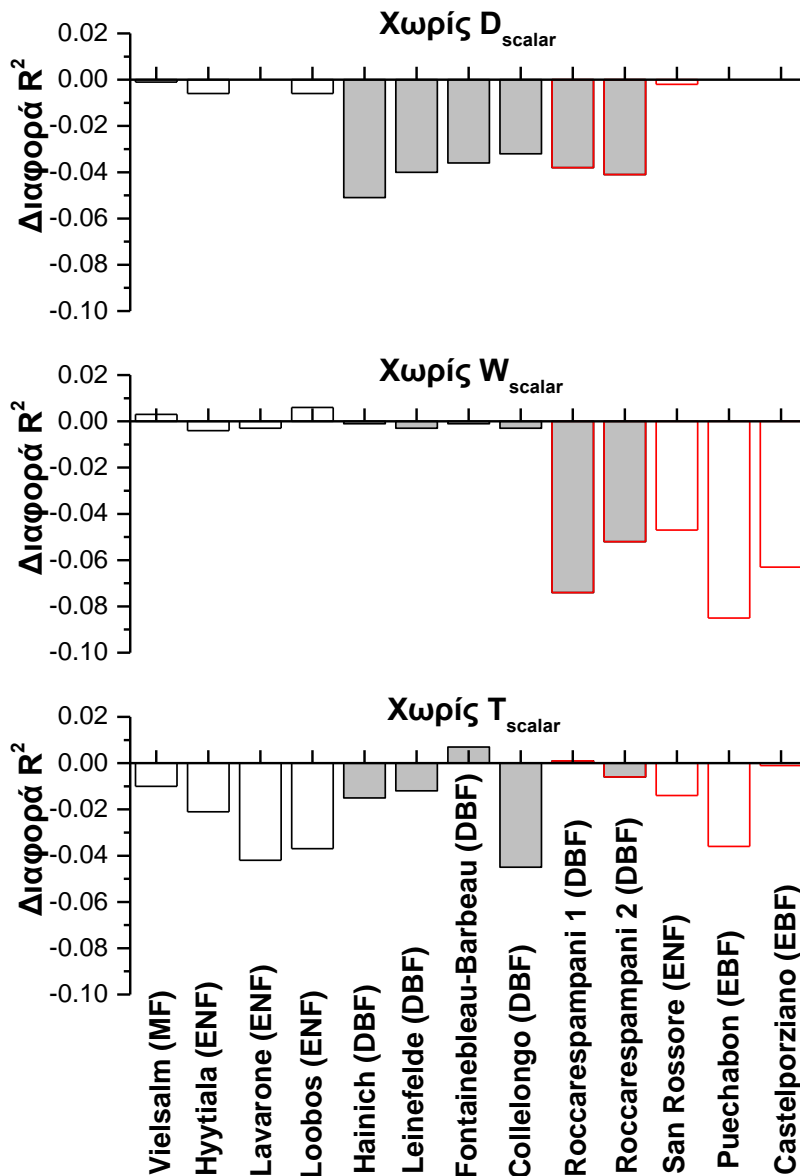
Σχήμα 5. Γραμμικές συσχετίσεις των δυο μοντελοποιημένων GPP (ϵ_0 -GPP και $sCASE_{MODIS}$ -GPP) με την μετρημένη GPP (eddy-GPP), για τις δεκατρείς περιοχές με πύργο eddy covariance. Οι συσχετίσεις αφορούν σε κάθε περιοχή ξεχωριστά αλλά και όλες τις περιοχές μαζί (all). Ο συνολικός αριθμός ημερήσιων τιμών GPP για το σύνολο των περιοχών (all) είναι 54.785.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα τρία scalars (D_{scalar} , T_{scalar} και W_{scalar}) του sCASE βελτιώνουν (αύξηση του R^2) τη σχέση της μοντελοποιημένης με την μετρημένη GPP. Για να διερευνηθεί η επίδραση καθενός από τα τρία scalars στην συνολική απόδοση του μοντέλου υπολογίστηκαν τιμές GPP με παραλλαγές του αλγόριθμου του sCASE (Εξίσωση 7), αφαιρώντας ένα ή δυο scalars κάθε φορά. Οι τιμές GPP των παραλλαγών του sCASE συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες των πύργων eddy και τα αποτελέσματα των συσχετίσεων (τιμές R^2) δίνονται στον Πίνακα 18. Η χρήση ενός μόνο scalar, πλην ειδικών εξαιρέσεων, έχει σημαντική αρνητική επίδραση στην απόδοση του μοντέλου (ο μέσος R^2 υποχωρεί κάτω από 0,706 έναντι 0,750 της βασικής εκδοχής του sCASE),

υπογραμμίζοντας έτσι την πολύπλευρη εξάρτηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, ενώ η αφαίρεση ενός μόνο scalar έχει πιο ήπια επίδραση η οποία εξαρτάται εν πολλύς από τα χαρακτηριστικά του κάθε οικοσυστήματος (Πίνακας 18). Όπως είναι λογικό το αναπτυξιακό scalar (D_{scalar}) επιδρά εντονότερα στα φυλλοβόλα είδη (DBF), με την αφαίρεση του να μην επηρεάζει την απόδοση του μοντέλου στα μη φυλλοβόλα οικοσυστήματα (Σχήμα 6). Το υδατικό scalar (W_{scalar}) έχει έντονη επίδραση στην απόδοση του μοντέλου στα πέντε μεσογειακά οικοσυστήματα, αλλά δεν επηρεάζει στα υπόλοιπα (Σχήμα 6). Τέλος το θερμοκρασιακό scalar (T_{scalar}) έχει εντονότερη επίδραση στα πιο κρύα οικοσυστήματα και ιδίως στα δυο ορεινά (Collelongo και Lavarone), αλλά επιδρά και σε δυο από τα θερμά οικοσυστήματα (Puéchabon και San Rossore). Σε γενικές γραμμές ο πλήρης αλγόριθμος του sCASE έχει καλύτερη απόδοση από τις παραλλαγές του, προσφέροντας μια πιο πλήρη αποτύπωση των μετεωρολογικών επιδράσεων στην παραγωγικότητα.

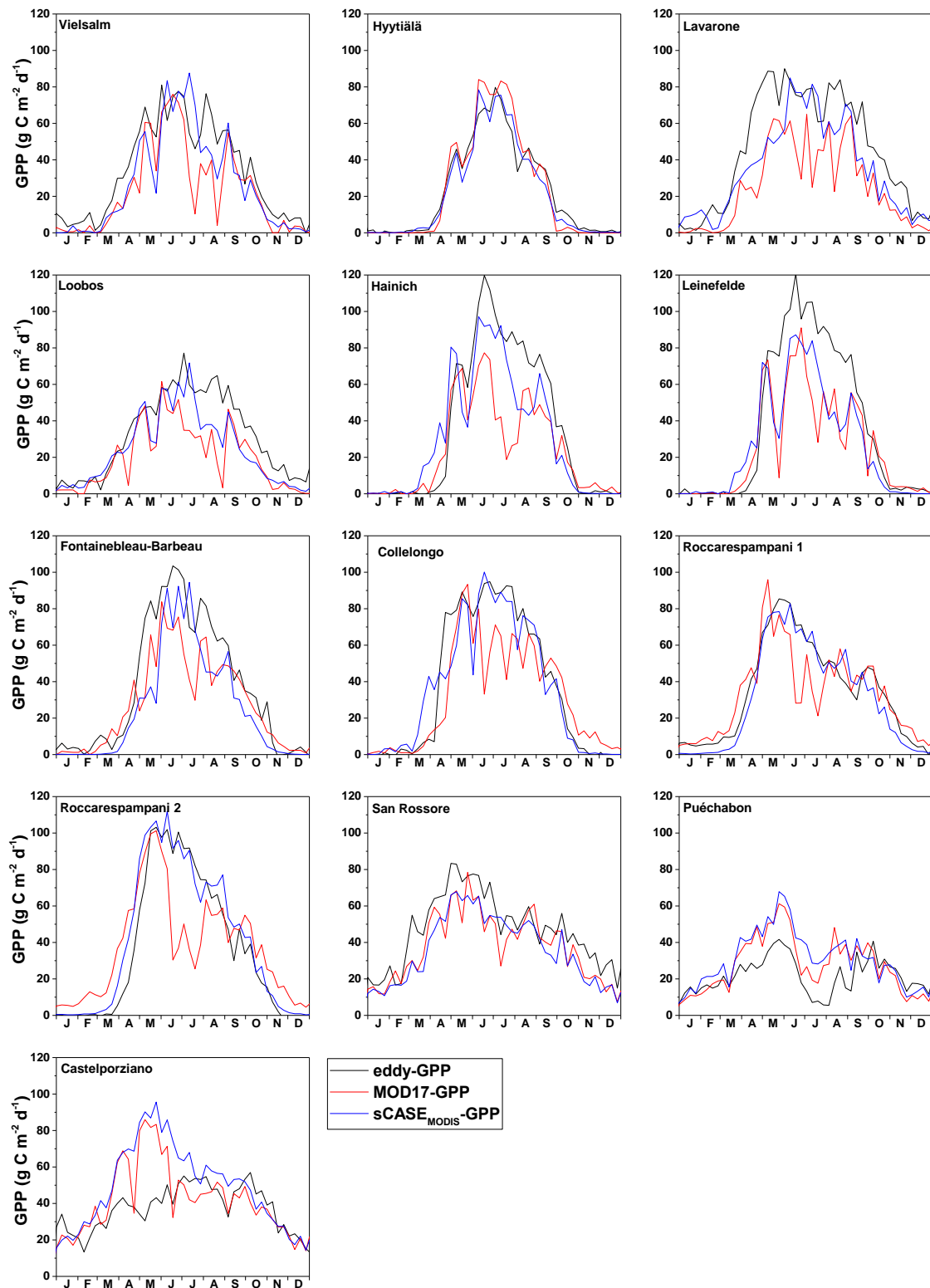
Πίνακας 18. Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) των συσχετίσεων της GPP του sCASE και των παραλλαγών του (αφαίρεση scalars), με την μετρημένη eddy-GPP. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$. Οι περιοχές με φυλλοβόλα είδη είναι τονισμένες με γκρι χρώμα.

	Περιοχή Μελέτης	Πλήρες sCASE	Χωρίς D_{scalar}	Χωρίς T_{scalar}	Χωρίς W_{scalar}	Μόνο D_{scalar}	Μόνο T_{scalar}	Μόνο W_{scalar}
Χωρίς υδατική καταπόνηση	Vielsalm (MF)	0,787	0,786	0,777	0,790	0,783	0,789	0,769
	Hyytiälä (ENF)	0,875	0,868	0,854	0,870	0,852	0,865	0,839
	Lavarone (ENF)	0,692	0,692	0,651	0,690	0,648	0,690	0,644
	Loobos (ENF)	0,806	0,800	0,769	0,812	0,779	0,807	0,760
	Hainich (DBF)	0,855	0,804	0,840	0,855	0,841	0,808	0,758
	Leinefelde (DBF)	0,841	0,801	0,829	0,838	0,827	0,801	0,754
	Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,813	0,777	0,820	0,812	0,821	0,780	0,761
	Collelongo (DBF)	0,764	0,733	0,720	0,761	0,725	0,731	0,662
Με υδατική καταπόνηση	Roccarespampani 1 (DBF)	0,781	0,743	0,782	0,707	0,709	0,650	0,733
	Roccarespampani 2 (DBF)	0,767	0,726	0,761	0,715	0,707	0,676	0,704
	San Rossore (ENF)	0,669	0,667	0,655	0,622	0,602	0,621	0,653
	Puéchabon (EBF)	0,528	0,528	0,492	0,443	0,404	0,443	0,491
	Castelporziano (EBF)	0,564	0,564	0,563	0,501	0,483	0,500	0,562
	Average	0,750	0,730	0,732	0,724	0,706	0,705	0,699
	ALL	0,697	0,667	0,687	0,661	0,652	0,631	0,636



Σχήμα 6. Η διαφορά των συντελεστών R^2 των παραλλαγών του sCASE από τους αντίστοιχους του πλήρους sCASE (βασική εκδοχή του αλγόριθμου), για κάθε περιοχή. Με γκρι σκίαση δίνονται οι περιοχές με φυλλοβόλα είδη (DBF) και με κόκκινο περίγραμμα οι περιοχές με υδατική καταπόνηση.

Συνεχίζοντας την αξιολόγηση του μοντέλου sCASE (της βασικής εκδοχής του αλγόριθμου), η ακρίβεια του συγκρίθηκε με αυτή του μοντέλου παραγωγικότητας του MODIS (MODIS-LUE) βάσει της σχέσης των δύο μοντελοποιημένων GPP με την μετρημένη. Οι τιμές GPP που υπολογίζει το μοντέλο του MODIS (MOD17-GPP) αφορούν οκταήμερα διαστήματα και είναι διαθέσιμες ως ξεχωριστό προϊόν (MOD17A2) με χωρική ανάλυση 500 μέτρων και pixel που ταυτίζονται με αυτά του προϊόντος MOD09A1. Για κάθε περιοχή επιλέχθηκε η μέση GPP των αντίστοιχων pixel που χρησιμοποιήθηκαν για των υπολογισμό των δεικτών βλάστησης του sCASE. Για να είναι δυνατή η σύγκριση των δυο μοντέλων υπολογίστηκαν αρχικά οκταήμερες τιμές GPP τόσο του sCASE (sCASE_{MODIS}-GPP) όσο και των μετρημένων (eddy-GPP), αθροίζοντας τις ημερήσιες τιμές για τα αντίστοιχα οκταήμερα της MOD17-GPP. Στο Σχήμα 7 δίνονται οι χρονοσειρές των οκταήμερων τιμών των τριών GPP, eddy-GPP, sCASE_{MODIS}-GPP και MOD17-GPP, για το 2006.

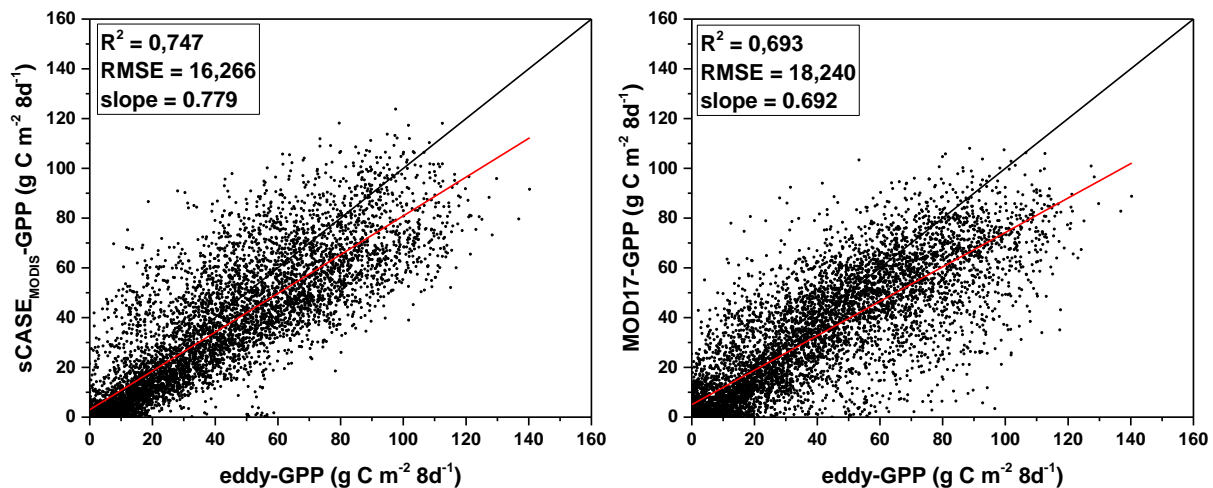


Σχήμα 7. Οι οκταήμερες τιμές GPP για το 2006 των τριών τύπων GPP, eddy-GPP, sCASE_{MODIS}-GPP και ε₀-GPP, για τις δεκατρείς περιοχές μελέτης με πύργο eddy covariance (Πίνακας 1).

Από το Σχήμα 7 προκύπτει πως, το μοντέλο LUE του MODIS (MOD17-GPP) υποεκτιμά την παραγωγικότητα σχεδόν σε όλες τις περιοχές μελέτης, με την κατάσταση να αναστρέφεται στην περίπτωση των δυο περιοχών με αιθαλή πλατύφυλλα (Puéchabon και Castelporziano), όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και για το sCASE στο ημερήσιο βήμα (Σχήμα 4) και φυσικά ισχύει και για τις οκταήμερες τιμές του. Μεταξύ των δυο, το MODIS-LUE υποεκτιμά εντονότερα την παραγωγικότητα σε όλες τις περιοχές εκτός της Hyytiälä, εμφανίζοντας έντονη διακύμανση τους καλοκαιρινούς μήνες που δεν συμφωνεί με της μετρήσεις των πύργων. Συνολικά, παρότι και τα δύο μοντέλα (MODIS-LUE και sCASE) υποεκτιμούν τη παραγωγικότητα, υπερεκτιμούν τη GPP στις χαμηλές τιμές, ειδικά το MODIS-LUE. Στη συνέχεια, οι οκταήμερες τιμές GPP των δυο μοντέλων συσχετίστηκαν με τις τιμές από τους πύργους και τα αποτελέσματα των συσχετίσεων (R^2 και RMSE) δίνονται στον Πίνακα 19. Συγκρίνοντας τα δυο μοντέλα είναι εμφανές πως το sCASE αποδίδει καλύτερα από το MODIS-LUE σε όλες τις περιοχές μελέτης (μέσος R^2 0,810 έναντι 0,722 και μέσος RMSE 16,235 έναντι 19,273) αλλά και συνολικά όταν όλα τα δεδομένα ομαδοποιούνται (R^2 0,747 έναντι 0,693 και RMSE 16,266 έναντι 18,240, Σχήμα 8). Όσον αφορά την sCASE_{MODIS-GPP}, παρατηρείται μια ισχυροποίηση της συσχέτισης (μεγαλύτεροι R^2) στο οκταήμερο βήμα έναντι του ημερήσιου και στις δεκατρείς περιοχές (Πίνακες 17 και 19). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως και στην περίπτωση της MOD17-GPP υπάρχει ασθενής συσχέτιση με τη μετρημένη GPP για τις δυο περιοχές με τα αιθαλή πλατύφυλλα (Puéchabon και Castelporziano). Στις δυο αυτές περιοχές η μοντελοποιημένη GPP (και οι δυο τύποι) εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες τιμές από την μετρημένη, ιδιαίτερα την άνοιξη και το καλοκαίρι (Σχήμα 7), όπως παρατηρήθηκε άλλωστε και στις ημερήσιες τιμές της sCASE_{MODIS-GPP} (Σχήμα 4).

Πίνακας 19. Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και συντελεστής RMSE ($g C m^{-2} \delta t^{-1}$) των συσχετίσεων των sCASE_{MODIS-GPP} και MOD17-GPP με την eddy-GPP. Οι τιμές GPP αφορούν οκταήμερα. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$.

	Περιοχή Μελέτης	MOD17-GPP		sCASE _{MODIS-GPP}	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
Χωρίς υδατική καταπόνηση	Vielsalm (MF)	0,759	19,925	0,876	16,399
	Hyytiälä (ENF)	0,851	11,381	0,920	9,630
	Lavarone (ENF)	0,740	25,615	0,785	20,533
	Loobos (ENF)	0,778	16,069	0,892	13,015
	Hainich (DBF)	0,830	21,151	0,917	16,100
	Leinefelde (DBF)	0,814	34,121	0,910	22,047
	Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,847	18,689	0,901	18,443
	Collelongo (DBF)	0,717	19,456	0,815	15,946
	Με υδατική καταπόνηση	Roccarespampani 1 (DBF)	0,681	16,914	0,818
Roccarespampani 2 (DBF)		0,655	24,524	0,817	15,637
San Rossore (ENF)		0,643	16,117	0,719	15,648
Puéchabon (EBF)		0,527	12,471	0,546	16,809
Castelporziano (EBF)		0,538	14,115	0,617	17,723
	Average	0,722	19,273	0,810	16,235
	ALL	0,693	18,240	0,747	16,266



Σχήμα 8. Οι γραμμικές συσχετίσεις των $sCASE_{MODIS}$ -GPP (αριστερά) και $MOD17$ -GPP (δεξιά) με την μετρημένη GPP ($eddy$ -GPP) όλων των περιοχών μαζί. Οι τιμές GPP αφορούν σε 6.900 οκταήμερα. Στα διαγράμματα δίνεται και ο συντελεστής RMSE ($g C m^{-2} 8d^{-1}$).

Υδατικά scalar και sCASE

Όπως έχει αναφερθεί ήδη και φάνηκε και από την ανάλυση της επίδρασης του υδατικού scalar (W_{scalar}) στην ακρίβεια του sCASE (Σχήμα 6), η αποτύπωση της υδατικής καταπόνησης στην παραγωγικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα μεσογειακά οικοσυστήματα και κατ' επέκταση για τα ελληνικά δασικά οικοσυστήματα. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να συγκριθεί το W_{scalar} του sCASE με άλλα υδατικά scalar που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχα μοντέλα παραγωγικότητας (Πίνακας 12), για να εξεταστεί η πιθανότητα βελτίωσης του sCASE με τη χρήση άλλου υδατικού scalar. Διατηρώντας τον αλγόριθμο του sCASE σταθερό και αλλάζοντας μονάχα το υδατικό scalar, υπολογίστηκαν εννέα παραλλαγές της GPP για κάθε μια περιοχή και όλες τους συσχετίστηκαν με τις αντίστοιχες τιμές GPP από τους πύργους. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων δίνονται στους δυο πίνακες που ακολουθούν (R^2 στον Πίνακα 20 και RMSE στον Πίνακα 21). Κρίνοντας συνολικά τα δέκα (συμπεριλαμβανομένου αυτού του sCASE) διαφορετικά υδατικά scalars δεν παρατηρούνται πολύ μεγάλες διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά τον R^2 , με τον μέσο R^2 να κυμαίνεται από 0,719 ($NMDI_{scalar}$) έως 0,758 ($SWC2_{scalar}$) και τον R^2 για το σύνολο των περιοχών να κυμαίνεται από 0,650 ($NMDI_{scalar}$) έως 0,705 (ET_{scalar}). Ωστόσο, στην περίπτωση του συντελεστή RMSE η εικόνα είναι διαφορετική, με τον μέσο RMSE να κυμαίνεται από 2,317 (W_{scalar}) έως 3,248 $g C m^{-2} d^{-1}$ (EF_{scalar}) και τις τιμές του όταν όλες οι περιοχές εξετάζονται μαζί να κυμαίνονται από 2,324 (W_{scalar}) έως 4,417 $g C m^{-2} d^{-1}$ ($SWC1_{scalar}$).

Με την εξαίρεση του EF_{scalar} , όλα τα υπόλοιπα έχουν παρόμοια απόδοση στα οικοσυστήματα που δεν εμφανίζουν υδατική καταπόνηση (Σχήματα 9Γ και 9Δ), ενώ τα W_{scalar} (του sCASE) και ET_{scalar} υπερτερούν τον υπόλοιπων στις πέντε περιοχές που αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού τους καλοκαιρινούς μήνες (Σχήματα 9Ε και 9ΣΤ), βάσει και των δυο συντελεστών (R^2 και RMSE). Οι διαφορές μεταξύ του W_{scalar} και του ET_{scalar} είναι αμελητέες, με το πρώτο να υπερτερεί ελαφρώς σε επιμέρους οικοσυστήματα (μέσος R^2 0,750 έναντι 0,741 και μέσος RMSE 2,317 έναντι 2,349 $g C m^{-2} d^{-1}$).

² d⁻¹). Όπως αναφέρθηκε ήδη το VPD_{scalar} του MODIS υστερεί στις περιοχές που αντιμετωπίζουν πρόβλημα υδατικής καταπόνησης σε σχέση με τα W_{scalar} και ET_{scalar} (Σχήματα 9Ε και 9ΣΤ), όμως η επίδοση του στις υπόλοιπες υπερτερεί όλων των άλλων (Σχήματα 9Γ και 9Δ), βάσει και των δυο συντελεστών (R² και RMSE). Τα δυο scalar που βασίζονται στο SWC (SWC1_{scalar} και SWC2_{scalar}) παρουσιάζουν καλή απόδοση (τους μεγαλύτερους μέσους R²), όμως πρέπει να σημειωθεί πως εκτός της υστέρησης στις περιοχές με υδατική καταπόνηση, δεν υπάρχουν δεδομένα SWC για πέντε περιοχές μεταξύ των οποίων τρεις που εμφανίζουν σταθερά ασθενείς συσχετίσεις (Puéchabon, Lavarone και San Rossore). Επιπλέον, τα δυο αυτά scalar, εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές RMSE από το W_{scalar} του sCASE, σχεδόν σε όλες τις περιοχές, με τον μέσο RMSE τους να είναι 2,381 και 2,377 g C m⁻² d⁻¹ (για το SWC1_{scalar} και το SWC2_{scalar} αντίστοιχα) έναντι 2,317 g C m⁻² d⁻¹ του W_{scalar}.

Τα τέσσερα υδατικά scalar που βασίζονται σε δείκτες του MODIS παρουσιάζουν περίπου την ίδια ακρίβεια μεταξύ τους, με το NMDI_{scalar} να υστερεί ελαφρώς σε σχέση με τα άλλα τρία (Σχήμα 9). Η απόδοση και των τεσσάρων στις περιοχές χωρίς καταπόνηση είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, αλλά και στις περιοχές με καταπόνηση δεν υστερούν σημαντικά από τα άλλα scalar, πλην των W_{scalar} και ET_{scalar}. Τέλος, όπως αναφέρθηκε ήδη, το EF_{scalar} διαφοροποιείται από τα υπόλοιπα εμφανίζοντας μεγάλη αστάθεια (Σχήμα 9) στις συσχετίσεις του που ξεφεύγει από την διάκριση μεταξύ περιοχών με ή χωρίς υδατική καταπόνηση. Συγκεκριμένα, έχει την καλύτερη συσχέτιση όλων σε τρεις περιοχές με υδατική καταπόνηση (Puéchabon, Roccarespampani 1 και Roccarespampani 2), ενώ έχει μακράν την πιο αδύναμη συσχέτιση σε περιοχές χωρίς υδατική καταπόνηση (Vielsalm, Hainich και Lavarone). Επιπλέον, στις περισσότερες περιοχές, ακόμη και σε αυτές με ισχυρές συσχετίσεις (υψηλοί R²), η χρήση του EF_{scalar} οδηγεί σε υψηλές τιμές RMSE (Σχήμα 9B), με τον μέσο RMSE να είναι ο υψηλότερος μεταξύ όλων των υδατικών scalar (3,248 g C m⁻² d⁻¹).

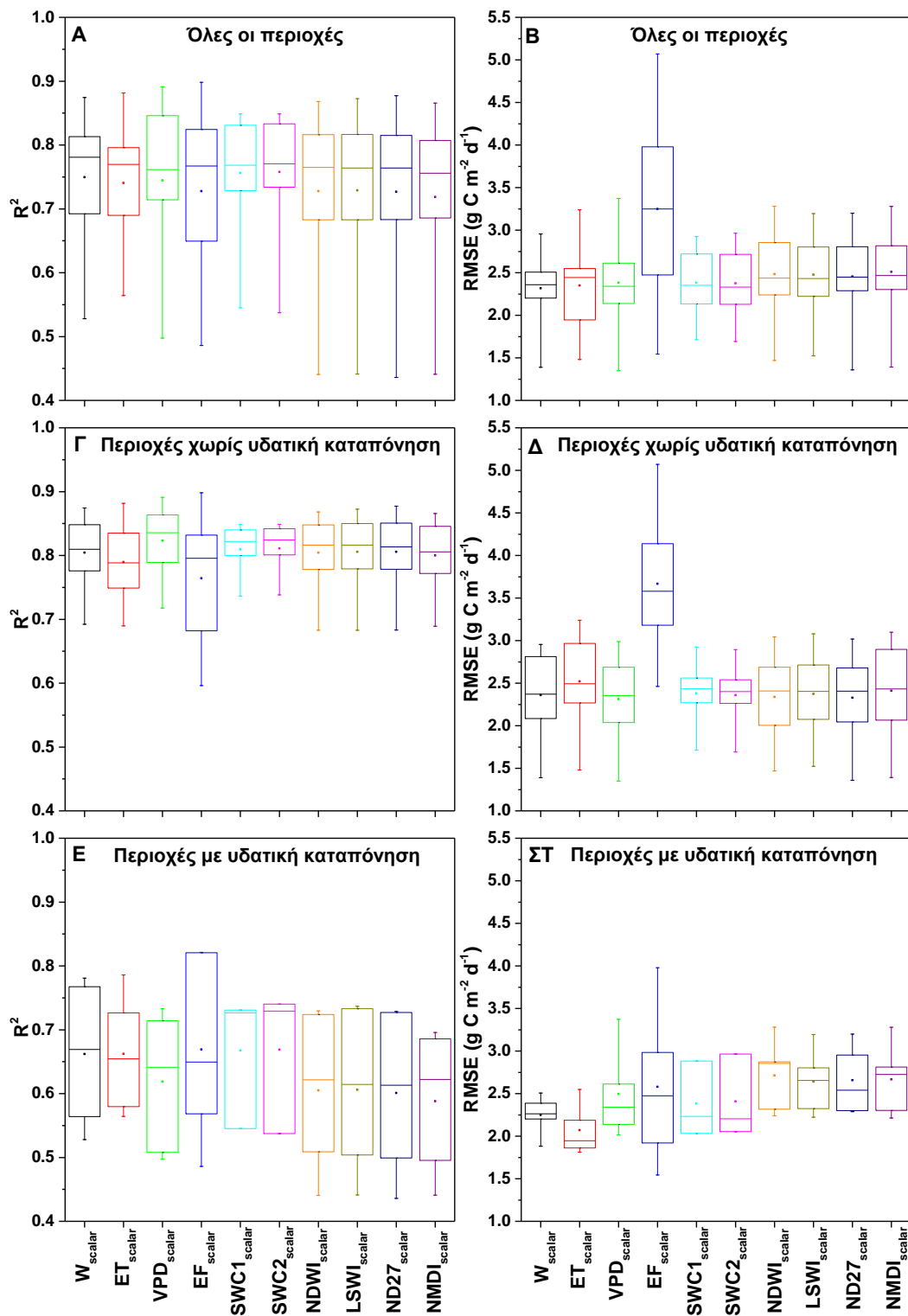
Από τη συνολική απόδοση των εννέα υδατικών scalar που εξετάστηκαν, δεν βρέθηκε κάποιος που να βελτιώνει την ακρίβεια του sCASE ώστε να θεωρηθεί χρήσιμο να αντικαταστήσει το W_{scalar}. Ωστόσο, για λόγους ευκολίας, φαίνεται πως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα υδατικά scalars των δεικτών του MODIS χωρίς να εισάγουν ιδιαίτερο σφάλμα, με προτιμότερο το ND27_{scalar} που αποδίδει ελαφρώς καλύτερα από το LSWI_{scalar}, ειδικά βάσει του RMSE (2,455 έναντι 2,476 g C m⁻² d⁻¹).

Πίνακας 20. Συντελεστής προσδιορισμού R^2 των συσχετίσεων μεταξύ $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $eddy-GPP$, για διαφορετικά υδατικά scalars. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$.

Περιοχή Μελέτης		W_{scalar}	ET_{scalar}	VPD_{scalar}	EF_{scalar}	$SWC1_{scalar}$	$SWC2_{scalar}$	$NDWI_{scalar}$	$LSWI_{scalar}$	$ND27_{scalar}$	$NMDI_{scalar}$
Χωρίς υδατική καταπόνηση	Vielsalm (MF)	0,787	0,769	0,816	0,767	0,800	0,801	0,791	0,794	0,793	0,788
	Hyytiälä (ENF)	0,875	0,882	0,891	0,898	0,822	0,824	0,868	0,873	0,877	0,866
	Lavarone (ENF)	0,692	0,690	0,718	0,596			0,683	0,683	0,683	0,689
	Loobos (ENF)	0,806	0,781	0,826	0,826	0,737	0,738	0,816	0,816	0,812	0,804
	Hainich (DBF)	0,855	0,841	0,868	0,671	0,840	0,842	0,855	0,858	0,860	0,854
	Leinefelde (DBF)	0,841	0,829	0,859	0,838	0,849	0,849	0,841	0,842	0,842	0,837
	Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,813	0,796	0,846	0,824			0,816	0,817	0,815	0,807
	Collelongo (DBF)	0,764	0,729	0,762	0,693			0,765	0,764	0,764	0,756
Με υδατική καταπόνηση	Roccarespampani 1 (DBF)	0,781	0,786	0,733	0,821	0,731	0,729	0,724	0,733	0,727	0,686
	Roccarespampani 2 (DBF)	0,767	0,727	0,714	0,821	0,726	0,740	0,730	0,737	0,729	0,696
	San Rossore (ENF)	0,669	0,655	0,641	0,568			0,621	0,615	0,613	0,622
	Puéchabon (EBF)	0,528	0,580	0,498	0,649			0,441	0,441	0,436	0,441
	Castelporziano (EBF)	0,564	0,564	0,508	0,486	0,545	0,537	0,509	0,504	0,499	0,495
	Average	0,750	0,741	0,745	0,728	0,756	0,758	0,728	0,729	0,727	0,719
ALL	0,697	0,705	0,679	0,667	0,704	0,703	0,662	0,665	0,671	0,650	

Πίνακας 21. Συντελεστής $RMSE$ ($g C m^{-2} d^{-1}$) των συσχετίσεων μεταξύ $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $eddy-GPP$, για διαφορετικά υδατικά scalars. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$.

Περιοχή Μελέτης		W_{scalar}	ET_{scalar}	VPD_{scalar}	EF_{scalar}	$SWC1_{scalar}$	$SWC2_{scalar}$	$NDWI_{scalar}$	$LSWI_{scalar}$	$ND27_{scalar}$	$NMDI_{scalar}$
Χωρίς υδατική καταπόνηση	Vielsalm (MF)	2,380	2,495	2,311	3,879	2,270	2,263	2,378	2,374	2,364	2,399
	Hyytiälä (ENF)	1,391	1,481	1,350	2,462	1,714	1,692	1,471	1,522	1,360	1,391
	Lavarone (ENF)	2,940	2,925	2,846	5,070			3,044	3,080	3,018	2,976
	Loobos (ENF)	1,877	2,092	1,766	3,112	2,560	2,540	1,803	1,946	1,927	1,810
	Hainich (DBF)	2,291	2,488	2,331	4,224	2,433	2,401	2,205	2,205	2,160	2,466
	Leinefelde (DBF)	2,955	3,239	2,988	4,051	2,926	2,894	2,818	2,845	2,805	3,099
	Fontainebleau-Barbeau (DBF)	2,685	3,011	2,531	3,249			2,559	2,581	2,552	2,817
	Collelongo (DBF)	2,360	2,444	2,378	3,282			2,437	2,432	2,449	2,322
Με υδατική καταπόνηση	Roccarespampani 1 (DBF)	1,882	1,811	2,015	2,474	2,034	2,054	2,317	2,223	2,301	2,302
	Roccarespampani 2 (DBF)	2,264	2,187	2,341	1,920	2,233	2,204	2,873	2,803	2,954	2,725
	San Rossore (ENF)	2,202	2,550	2,139	3,980			2,240	2,323	2,289	2,214
	Puéchabon (EBF)	2,386	1,862	2,612	1,545			2,854	2,655	2,539	2,813
	Castelporziano (EBF)	2,507	1,947	3,374	2,983	2,882	2,964	3,281	3,195	3,200	3,280
	Average	2,317	2,349	2,383	3,248	2,381	2,377	2,483	2,476	2,455	2,509
ALL	2,324	2,374	2,380	3,388	4,417	4,415	2,480	2,469	2,447	2,499	



Σχήμα 9. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) και RMSE ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) των συσχετίσεων μεταξύ *sCASEMODIS-GPP* και *eddy-GPP*, για διαφορετικά υδατικά scalars για όλες τις περιοχές (A και B αντίστοιχα), των περιοχών που δεν εμφανίζουν υδατική καταπόνηση (Γ και Δ αντίστοιχα) και των περιοχών που εμφανίζουν υδατική καταπόνηση (E και ΣΤ αντίστοιχα). Τα ορθογώνια αντιπροσωπεύουν το δεύτερο και τρίτο τεταρτημόριο με την γραμμή που τα χωρίζει να αντιστοιχεί στη διάμεσο. Η κουκίδα αντιστοιχεί στη μέση τιμή, με τις κάθετες γραμμές να εκτείνονται ως τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή (πάνω και κάτω αντίστοιχα).

Η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στο sCASE

Η ανάλυση του sCASE έδειξε πως το μοντέλο καταφέρνει να ακολουθεί αρκετά καλά τις ημερήσιες μεταβολές της GPP για την πλειοψηφία των υπό μελέτη οικοσυστημάτων, ωστόσο είναι ξεκάθαρο πως υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του αλγόριθμού του. Ο διαφορετικός τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται η διάχυτη και η απευθείας ακτινοβολία από την βλάστηση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που το sCASE, όπως τα περισσότερα μοντέλα παραγωγικότητας, δεν λαμβάνει υπόψη. Η πιθανή βελτίωση της ακρίβειας των υπολογισμών του sCASE με την ενσωμάτωση της επίδρασης της διάχυτης ακτινοβολίας εξετάστηκε στα δεκατρία οικοσυστήματα, βάσει του λόγου της προσπίπτουσας PAR προς την δυνητική PAR ($PAR_{potential}$). Δέκα διαφορετικοί τρόποι ενσωμάτωσης αυτής της επίδρασης (Cloud scalars, Πίνακας 14) εξετάστηκαν στη μελέτη αυτή, τέσσερις από τους οποίους έχουν τη μορφή ενός επιπλέον scalar στον αλγόριθμο του sCASE, ενώ οι έξι υπολογίζουν τιμές αποδοτικότητας (ϵ) που αντικαθιστούν την ϵ_0 στην εξίσωση 7. Με την χρήση των παραπάνω scalars υπολογίστηκαν τιμές GPP για κάθε περιοχή οι οποίες συσχετίστηκαν με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αυτών δίνονται στους δυο παρακάτω πίνακες (R^2 στον Πίνακα 22 και RMSE στον Πίνακα 23), οι οποίοι περιλαμβάνουν και τις συσχετίσεις του αρχικού sCASE ως μέτρο σύγκρισης.

Σε όλες τις περιπτώσεις, πλην του S_{CI} , η προσθήκη των cloud scalar στο μοντέλο sCASE αυξάνει τον συντελεστή προσδιορισμού (R^2) των συσχετίσεων μεταξύ μοντελοποιημένων και μετρημένων GPP (Σχήμα 10). Από τα δέκα scalar που εξετάστηκαν (Πίνακας 22), το $C_{scalar3}$ έχει τον υψηλότερο μέσο R^2 (0,812), με απειροελάχιστη διαφορά από τα ϵ_{base} και ϵW_{base} (αμφότερα 0,811), ενώ αξιοσημείωτη είναι η απόδοση του CI (0,795). Όταν όλες οι περιοχές εξεταστούν μαζί (all), το ϵ_{base} έχει τον υψηλότερο R^2 (0,840) ακολουθούμενο από τα ϵ_{base} και $C_{scalar3}$ (με 0,808 και 0,800 αντίστοιχα). Η σύγκριση βάσει του συντελεστή RMSE είναι πιο περίπλοκη, παρότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο μέσος RMSE με την χρήση cloud scalar είναι μικρότερος από αυτόν της βασικής εκδοχής του sCASE (Σχήμα 10). Εκτός του S_{CI} (μέσος RMSE 4,832 g C m⁻² d⁻¹), για το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω των αδύναμων συσχετίσεων (χαμηλός R^2), υψηλές τιμές RMSE εμφανίζει επίσης το CI (μέσος RMSE 3,962 g C m⁻² d⁻¹), γεγονός που σημαίνει μειωμένη ακρίβεια των εκτιμήσεων του μοντέλου με την προσθήκη του CI . Όλα τα υπόλοιπα cloud scalars έχουν χαμηλότερες μέσες τιμές RMSE, αν και σε επιμέρους περιοχές η προσθήκη κάποιων cloud scalar τον αυξάνει (Πίνακας 23). Τα ϵ_{base} και ϵW_{base} εμφανίζουν τις χαμηλότερες μέσες τιμές RMSE (1,560 και 1,554 g C m⁻² d⁻¹, αντίστοιχα), ακολουθούμενα από το $C_{scalar3}$ (1,798 g C m⁻² d⁻¹). Όπως αναφέρθηκε ήδη, κάποια cloud scalar επηρεάζουν αρνητικά την ακρίβεια του sCASE σε επιμέρους περιοχές (αύξηση του RMSE), παρότι βελτιώνουν τον μέσο RMSE. Αυτό είναι εντονότερο στην περίπτωση των ϵ_{base} και $C_{scalar2}$ και αποτυπώνεται στο εύρος των τιμών RMSE (Σχήμα 10).

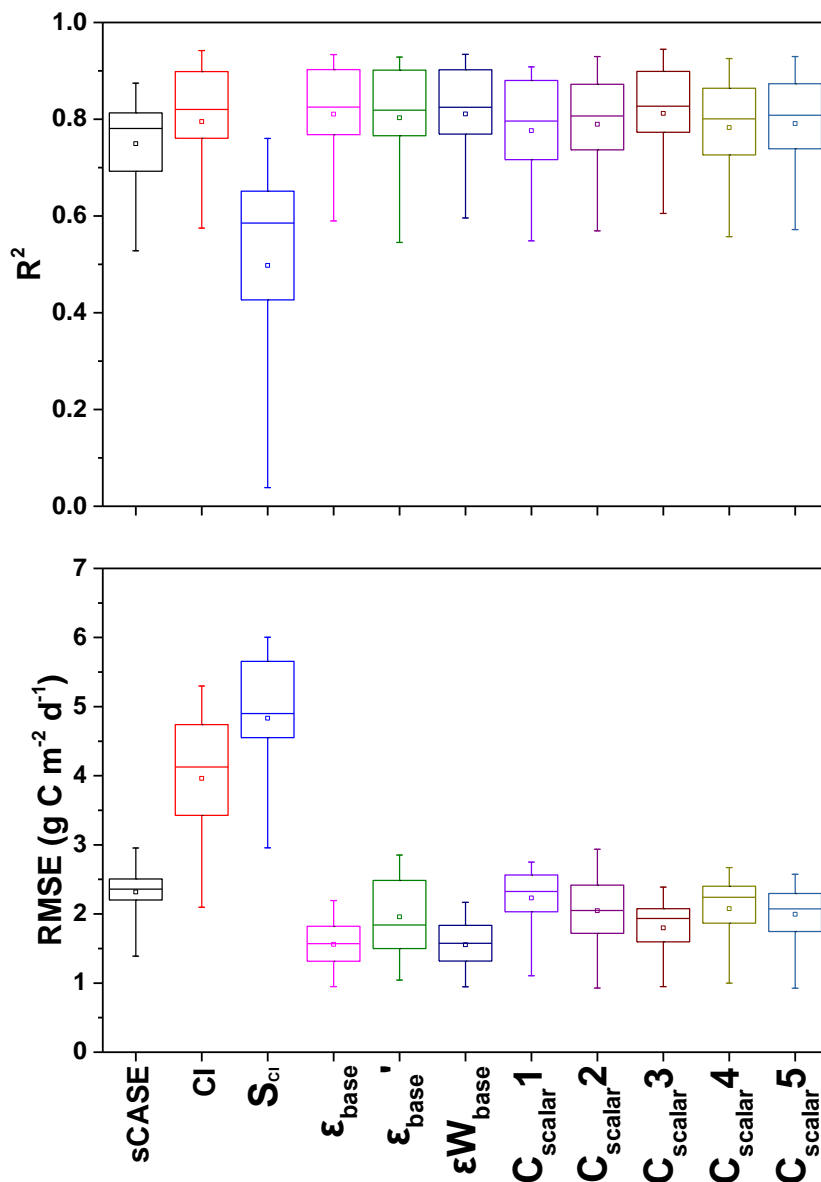
Κρίνοντας τα cloud scalar λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο συντελεστές (R^2 και RMSE), τα ϵ_{base} , ϵW_{base} και $C_{scalar3}$ παρουσιάζουν την καλύτερη εικόνα για το σύνολο των υπό μελέτη περιοχών, καθώς η προσθήκη τους στο sCASE οδηγεί στις υψηλότερες τιμές R^2 και στις χαμηλότερες τιμές RMSE, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Βάσει της επίδοσης των τριών στις επιμέρους περιοχές, το $C_{scalar3}$ υστερεί ελαφρώς λόγω του υψηλότερου μέσου RMSE (Πίνακας 23). Ωστόσο, όταν όλες οι περιοχές εξετάζονται μαζί, το ϵW_{base} υστερεί έναντι του ϵ_{base} και του $C_{scalar3}$, τόσο ως προς τον R^2 (0,769 έναντι 0,840 και 0,800 αντίστοιχα) όσο και τον RMSE (2,057 g C m⁻² d⁻¹ έναντι 1,637 και 1,804 αντίστοιχα). Ως εκ τούτου, το ϵ_{base} είναι το cloud scalar με την καλύτερη απόδοση.

Πίνακας 22. Συντελεστής προσδιορισμού R^2 των συσχετίσεων μεταξύ $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $eddy-GPP$, για διαφορετικά Cloud scalars. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$.

Περιοχή Μελέτης	sCASE	CI	S _{CI}	ϵ_{base}	ϵ'_{base}	ϵW_{base}	C _{scalar1}	C _{scalar2}	C _{scalar3}	C _{scalar4}	C _{scalar5}
Vielsalm (MF)	0,787	0,864	0,622	0,870	0,867	0,871	0,824	0,847	0,870	0,841	0,851
Hyytiälä (ENF)	0,875	0,942	0,760	0,928	0,920	0,928	0,908	0,929	0,945	0,925	0,930
Lavarone (ENF)	0,692	0,761	0,557	0,768	0,766	0,769	0,716	0,737	0,773	0,726	0,739
Loobos (ENF)	0,806	0,885	0,606	0,896	0,892	0,896	0,880	0,872	0,898	0,864	0,870
Hainich (DBF)	0,855	0,930	0,725	0,934	0,928	0,934	0,889	0,907	0,933	0,900	0,911
Leinefelde (DBF)	0,841	0,919	0,753	0,925	0,924	0,924	0,881	0,898	0,924	0,890	0,902
Fontainebleau-Barbeau (DBF)	0,813	0,899	0,651	0,903	0,901	0,902	0,847	0,864	0,899	0,857	0,873
Collelongo (DBF)	0,764	0,793	0,586	0,817	0,812	0,819	0,781	0,791	0,815	0,783	0,793
Roccarespampani 1 (DBF)	0,781	0,820	0,476	0,825	0,819	0,825	0,796	0,807	0,827	0,801	0,808
Roccarespampani 2 (DBF)	0,767	0,783	0,427	0,801	0,791	0,801	0,781	0,790	0,805	0,783	0,788
San Rossore (ENF)	0,669	0,575	0,108	0,679	0,681	0,675	0,674	0,675	0,648	0,675	0,672
Puéchabon (EBF)	0,528	0,586	0,159	0,590	0,545	0,596	0,549	0,569	0,614	0,557	0,572
Castelporziano (EBF)	0,564	0,579	0,038	0,602	0,591	0,600	0,568	0,580	0,605	0,573	0,575
Average	0,750	0,795	0,498	0,811	0,803	0,811	0,777	0,790	0,812	0,783	0,791
ALL	0,697	0,784	0,536	0,840	0,808	0,769	0,706	0,751	0,800	0,740	0,757

Πίνακας 23. Συντελεστής RMSE ($g C m^{-2} d^{-1}$) των συσχετίσεων μεταξύ $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $eddy-GPP$, για διαφορετικά Cloud scalars. Όλες οι συσχετίσεις έχουν επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$.

Περιοχή Μελέτης	sCASE	CI	S _{CI}	ϵ_{base}	ϵ'_{base}	ϵW_{base}	C _{scalar1}	C _{scalar2}	C _{scalar3}	C _{scalar4}	C _{scalar5}
Vielsalm (MF)	2,380	4,128	4,901	1,556	1,675	1,536	2,032	1,719	1,581	1,916	1,747
Hyytiälä (ENF)	1,391	2,846	3,389	0,949	1,042	0,948	1,107	0,929	0,949	0,999	0,925
Lavarone (ENF)	2,940	5,298	6,003	2,194	2,260	2,167	2,693	2,418	2,257	2,671	2,550
Loobos (ENF)	1,877	3,575	4,171	1,048	1,166	1,054	2,750	1,193	1,032	1,428	1,290
Hainich (DBF)	2,291	4,454	5,317	1,317	1,485	1,320	1,936	1,618	1,596	1,866	1,647
Leinefelde (DBF)	2,955	5,039	5,674	1,452	1,500	1,458	2,578	2,221	2,389	2,556	2,297
Fontainebleau-Barbeau (DBF)	2,685	4,860	5,741	1,596	1,740	1,600	2,362	2,050	2,077	2,314	2,074
Collelongo (DBF)	2,360	4,182	4,987	1,956	2,853	1,966	2,325	2,412	1,968	2,273	2,251
Roccarespampani 1 (DBF)	1,882	3,428	4,550	1,569	2,123	1,575	1,853	2,000	1,605	1,806	1,820
Roccarespampani 2 (DBF)	2,264	3,623	4,704	1,892	2,485	1,864	2,301	2,502	1,938	2,242	2,287
San Rossore (ENF)	2,202	4,741	5,655	1,822	1,840	1,836	2,043	1,883	1,936	2,046	2,002
Puéchabon (EBF)	2,386	2,097	2,958	1,315	2,499	1,279	2,477	2,741	1,912	2,403	2,479
Castelporziano (EBF)	2,507	3,242	4,764	1,608	2,777	1,596	2,563	2,936	2,135	2,489	2,574
Average	2,317	3,962	4,832	1,560	1,957	1,554	2,232	2,048	1,798	2,077	1,996
ALL	2,324	4,025	4,846	1,637	2,096	2,057	2,260	2,080	1,804	2,092	2,018

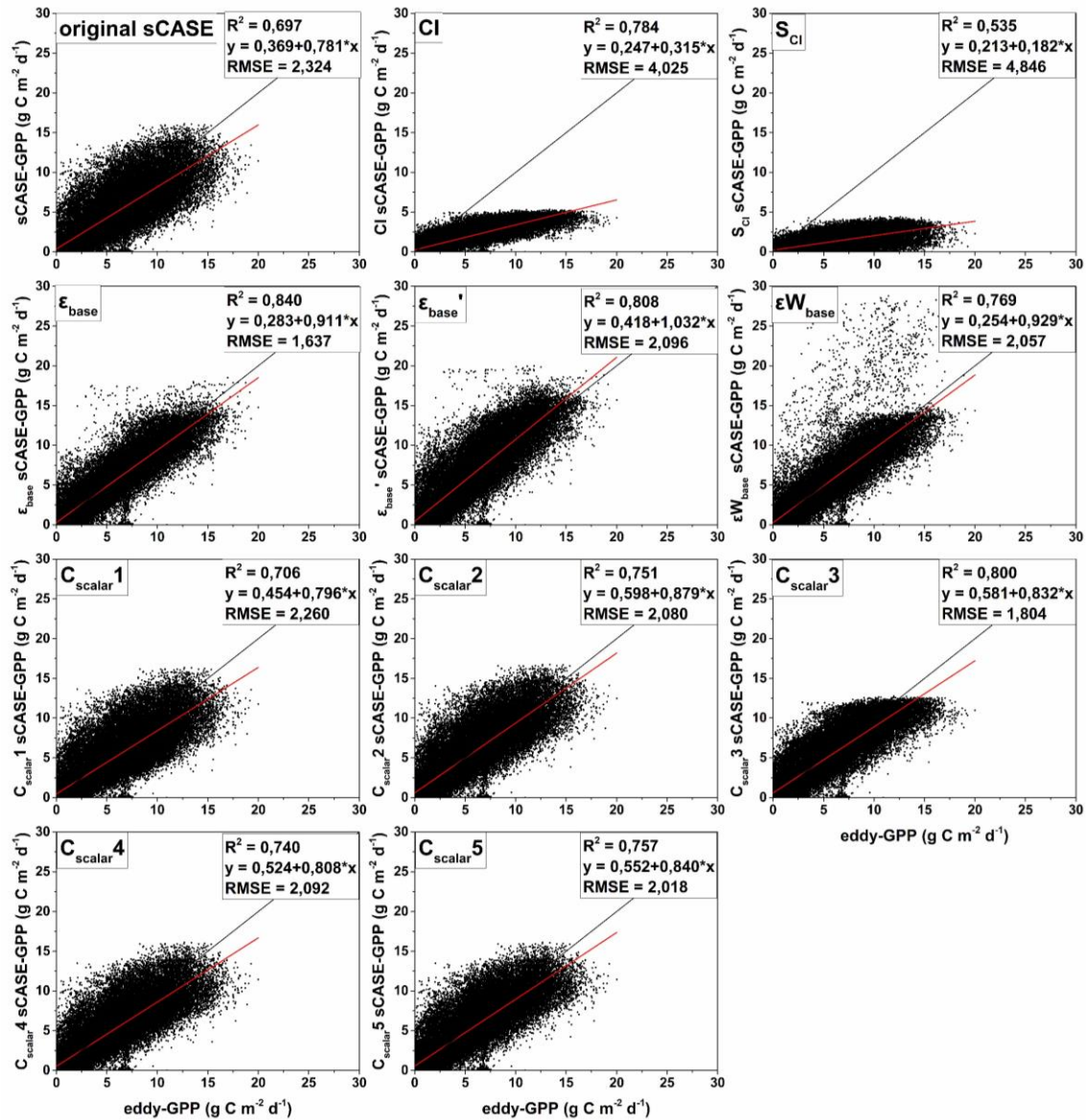


Σχήμα 10. Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και συντελεστής $RMSE$ των συσχετίσεων μεταξύ $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $eddy-GPP$, για διαφορετικά cloud scalars για όλες τις περιοχές. Τα ορθογώνια αντιπροσωπεύουν το δεύτερο και τρίτο τεταρτημόριο με την γραμμή που τα χωρίζει να αντιστοιχεί στη διάμεσο. Η κουκίδα αντιστοιχεί στη μέση τιμή, με τις κάθετες γραμμές να εκτείνονται ως τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή (πάνω και κάτω αντίστοιχα).

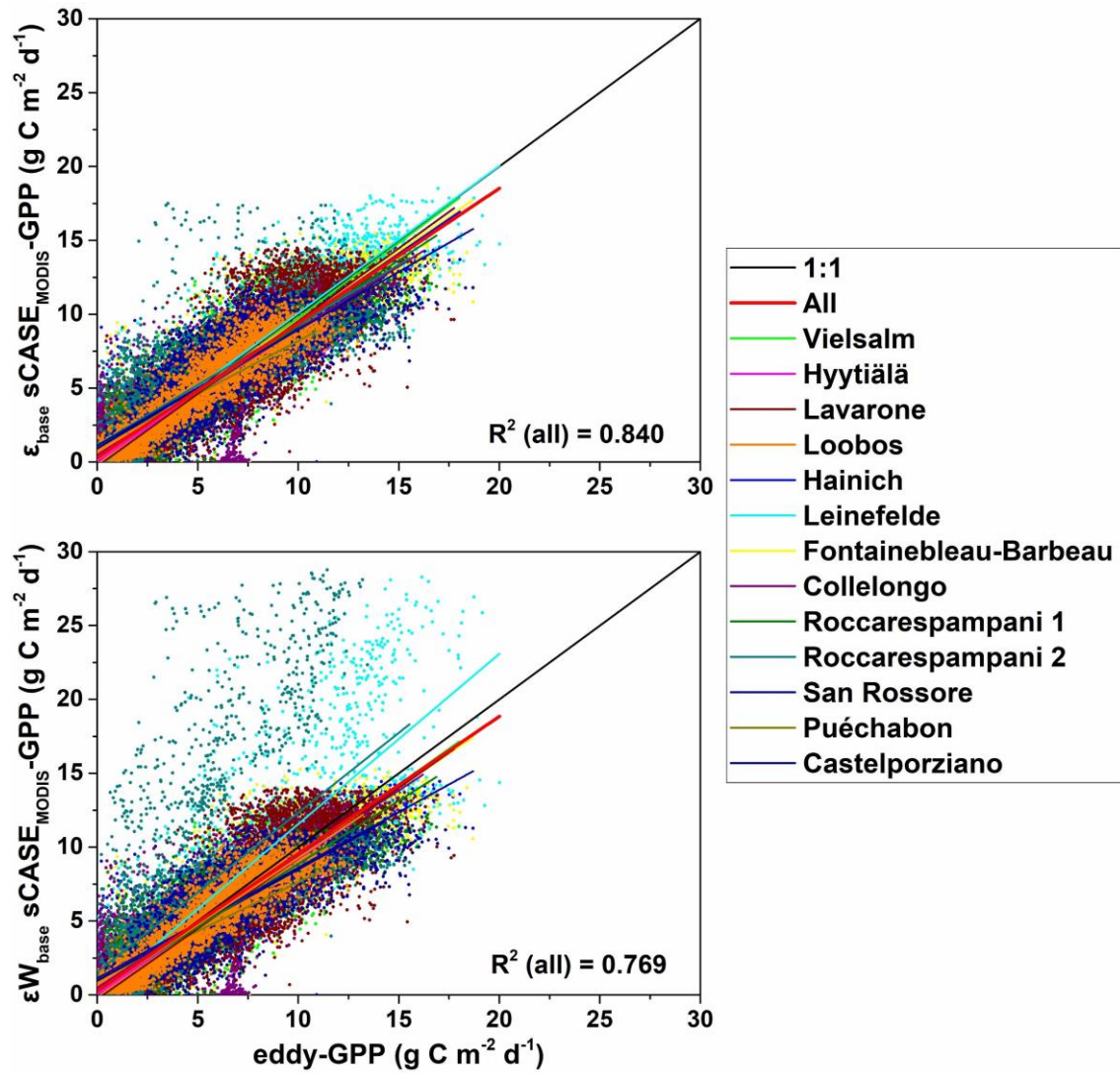
Στο Σχήμα 11 δίνονται οι συσχετίσεις μεταξύ της μετρημένης GPP ($eddy-GPP$) και των δέκα παραλλαγών της GPP του $sCASE$ ($sCASE_{MODIS-GPP}$), μια παραλλαγή για κάθε ένα cloud scalar, για όλες τις περιοχές μαζί. Η εικόνα των συσχετίσεων επιβεβαιώνει το ϵ_{base} ως το cloud scalar με την καλύτερη απόδοση, καθώς το ϵW_{base} οδηγεί σε κάποιες υπερβολικά υψηλές τιμές GPP, ενώ το $C_{scalar3}$ περιορίζει την GPP σε χαμηλά επίπεδα (περίπου στα $13 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Ωστόσο και τα ϵ_{base} και ϵW_{base} εμφανίζουν ένα «πλατό» στις τιμές της GPP λίγο κάτω από $15 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, αν και λιγότερο έντονο και με διάσπαρτες υψηλότερες τιμές. Στον αντίποδα, τα ϵ_{base}' και $C_{scalar2}$ παρότι υστερούν βάσει των δύο συντελεστών (R^2 και $RMSE$), φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα στις υψηλές τιμές GPP. Ανεξαρτήτως αυτού πάντως, στην περίπτωση του ϵ_{base} ο R^2 της συσχέτισης όλων των περιοχών

μαζί είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον μέσο R^2 (0,840 έναντι 0,811), κάτι που υποδηλώνει μια πιο καθολικά ισχύουσα σχέση μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης GPP, με την προσθήκη του στο μοντέλο sCASE. Πράγματι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12, η σχέση των δυο GPP, αυτής του sCASE με την προσθήκη του $\varepsilon_{\text{base}}$ και της eddy-GPP, δεν διαφέρει ιδιαίτερα μεταξύ των δεκατριών περιοχών. Αντιθέτως, η χρήση του $\varepsilon W_{\text{base}}$ οδηγεί σε διαφορές της σχέσης από περιοχή σε περιοχή (Σχήμα 12), αν και όχι στο βαθμό που βρέθηκε για τον αρχικό αλγόριθμο του sCASE (Σχήμα 5).

Εν κατακλείδι, η προσθήκη ενός cloud scalar στον αλγόριθμο του sCASE βελτιώνει την ακρίβεια της GPP, με το $\varepsilon_{\text{base}}$ να αποτελεί την βέλτιστη επιλογή από τα δέκα scalar που δοκιμάστηκαν. Εκτός από το $\varepsilon_{\text{base}}$, τα $C_{\text{scalar}3}$ και $C_{\text{scalar}5}$, αποτελούν δυο ενδιαφέρουσες εναλλακτικές, παρά τα προβλήματα τους, καθώς και οι δυο είναι ανεξάρτητες από ειδοειδικές παραμέτρους και υπολογίζονται εύκολα. Η απόδοση των πέντε cloud scalar που δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, θα μπορούσε να βελτιωθεί αν παραμετροποιούνταν για κάθε περιοχή χωριστά, όπως συμβαίνει με το $\varepsilon_{\text{base}}$ (και τα $\varepsilon_{\text{base}}$ και $\varepsilon W_{\text{base}}$).



Σχήμα 11. Γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ της sCASE_{MODIS}-GPP και της eddy-GPP για όλες τις περιοχές μαζί (54.785 ημερήσιες τιμές GPP). Οι δέκα παραλλαγές της GPP του sCASE προκύπτουν βάσει του cloud scalar, ενώ δίνεται και η βασική εκδοχή του sCASE. Με μαυρο χρώμα δίνεται η γραμμή ένα προς ένα. Ο συντελεστής RMSE είναι σε g C m⁻² d⁻¹.



Σχήμα 12. Γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ της $sCASE_{MODIS}$ -GPP και της $eddy$ -GPP, για κάθε περιοχή ξεχωριστά αλλά και όλων μαζί. Ο συνολικός αριθμός ημερήσιων τιμών GPP για το σύνολο των περιοχών (all) είναι 54.785. Παρουσιάζονται δυο παραλλαγές της GPP του sCASE για δυο διαφορετικά Cloud scalar (ϵ_{base} και ϵW_{base}).

Χωρική ανάλυση του sCASE

Για την εξέταση της πιθανής επίδρασης της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιεί το sCASE στην ακρίβειά του, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από τρεις αισθητήρες με διαφορετική ανάλυση, οι MODIS, OLCI και MSI (500, 300 και 10 μέτρα αντίστοιχα). Για την εφαρμογή του μοντέλου με τους δείκτες των τριών αισθητήρων επιλέχθηκαν έξι περιοχές στην Ελλάδα (Πίνακας 2) με διαφορετικά χαρακτηριστικά (είδος, ετερογένεια, ποσοστό κάλυψης). Για κάθε περιοχή επιλέχθηκε μια έκταση περίπου 2,25 km² η οποία αντιστοιχεί σε 9 pixel MODIS, 25 pixel OLCI και περίπου 19200 pixel MSI. Για να υπολογιστούν τα ακριβή ποσοστά κάθε είδους αλλά και το ποσοστό που δεν περιλαμβάνει βλάστηση πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση σε εικόνες του MSI με βάση τις κλάσεις που δημιουργήθηκαν για κάθε περιοχή (Πίνακας 15). Επιλέχθηκαν μία εικόνα MSI για τη περιοχή της Πίνδου (περιλαμβάνει τις πέντε από τις έξι περιοχές) και μια για την Βουρβουρού, στις οποίες εφαρμόστηκε η μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης maximum likelihood (Εικόνα 16). Με τη μέθοδο αυτή καθένα από τα περίπου 19200 pixel του MSI κατατάχθηκε σε μία από τις κλάσεις και έτσι προέκυψαν τα ποσοστά κάλυψης που δίνονται στον Πίνακα 24.

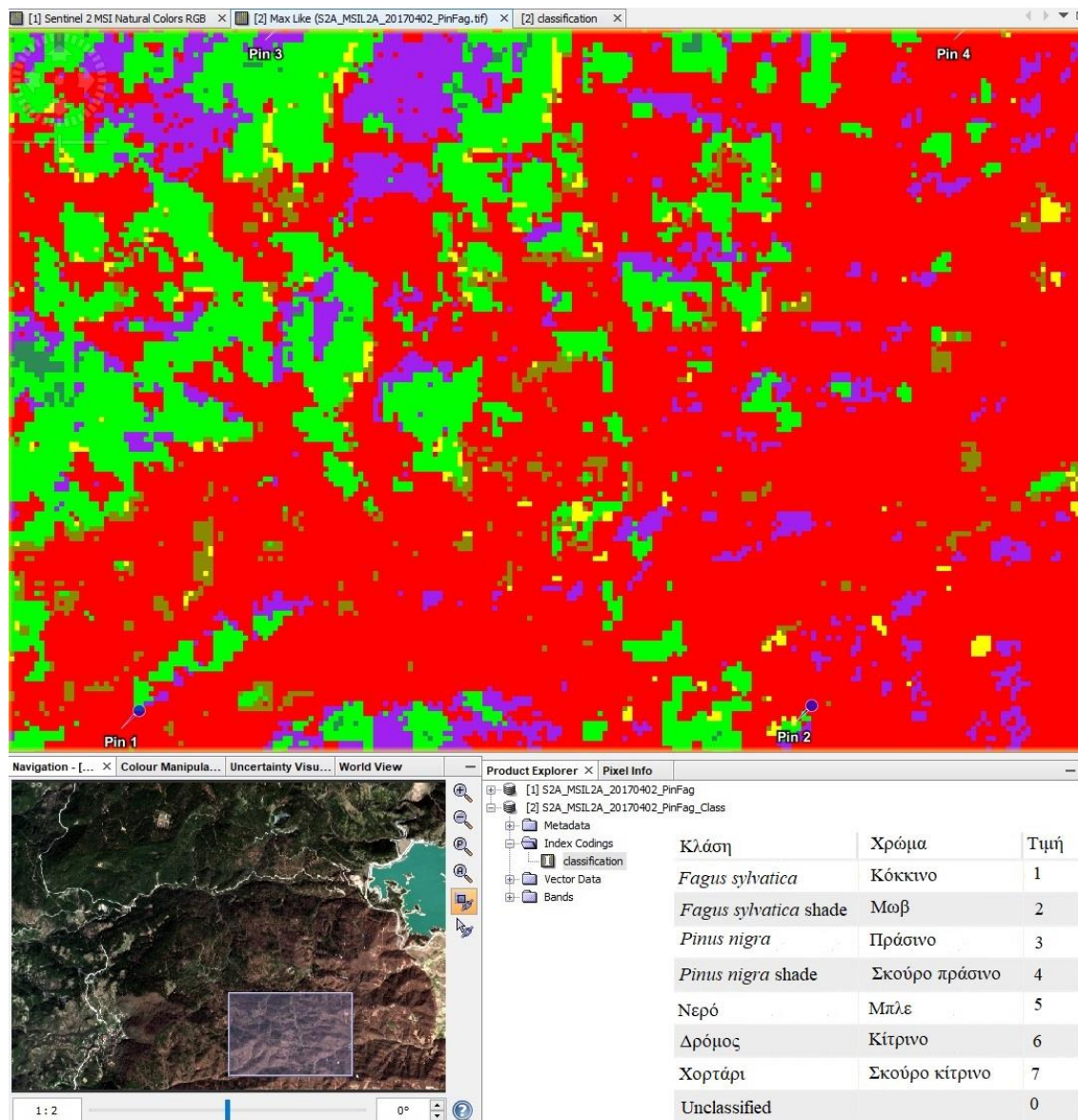
Από όλες τις περιοχές η περιοχή *Pinus nigra* είναι η πιο ομοιογενής, με το 96,3% των συνολικών pixel του MSI να κατατάσσεται στο κυρίαρχο είδος, ακολουθούμενη από την περιοχή *Fagus sylvatica* με 91%. Οι άλλες τέσσερις περιοχές έχουν παρόμοιο ποσοστό του κυρίαρχου είδους, περίπου 76%, αλλά διαφέρουν ως προς την κατανομή του υπόλοιπου ποσοστού τους. Η περιοχή *Pinus halepensis* είναι αυτή με το μεγαλύτερο ποσοστό (24,2%) μη δασικής κάλυψης (δρόμος, χώμα κτλ.), ενώ δεν περιλαμβάνει άλλο είδος. Δεύτερο υψηλότερο ποσοστό μη δασικής κάλυψης έχει η περιοχή *Quercus sp.* (14,9%), η οποία περιλαμβάνει και ένα μικρό ποσοστό *Pinus nigra* (8,8%). Τέλος οι δυο περιοχές που χαρακτηρίζονται ως μεικτές, περιέχουν χαμηλό ποσοστό μη δασικής κάλυψης, με το υπόλοιπο ποσοστό να καταλαμβάνεται από το δεύτερο είδος.

Πίνακας 24. Τα ποσοστά κάλυψης (%) των έξι περιοχών όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο ταξινόμησης maximum likelihood σε εικόνες MSI. Οι κλάσεις της ταξινόμησης δίνονται στον Πίνακα 15.

Περιοχή Μελέτης	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus nigra</i>	<i>Quercus sp.</i>	<i>Pinus halepensis</i>	Δρόμος, Χώμα, Χορτάρι, Νερό
<i>Fagus sylvatica</i>	91	5	-	-	4
<i>Quercus sp.</i>	-	8,8	76,3	-	14,9
<i>Pinus nigra</i>	0,3	96,3	-	-	3,4
Mixed <i>Pinus nigra</i>	18,6	75,8	-	-	5,6
Mixed <i>Fagus sylvatica</i>	76	19,3	-	-	4,7
<i>Pinus halepensis</i>	-	-	-	75,8	24,2

Αφού ολοκληρώθηκε η ταξινόμηση των έξι περιοχών, υπολογίστηκαν ημερήσιες τιμές GPP από το sCASE (αρχική εκδοχή του αλγόριθμου) για το 2017, με τη χρήση των δεικτών βλάστησης NDVI και RDVI των τριών αισθητήρων. Για κάθε περιοχή χρησιμοποιείται η μέση τιμή κάθε δείκτη από το σύνολο των αντίστοιχων pixel κάθε αισθητήρα, με τις ειδοειδικές παραμέτρους του κυρίαρχου είδους, όπως αυτό καθορίστηκε από τη ταξινόμηση. Στην περίπτωση του MSI υπολογίστηκε επίσης η GPP για κάθε pixel χωριστά (sCASE_{full_MSI}-GPP), με τις αντίστοιχες ειδοειδικές παραμέτρους για καθένα, και ύστερα υπολογίστηκε η μέση τιμή GPP (καθώς πρόκειται για παραγωγικότητα ανά m²) για την περιοχή. Αυτή η δεύτερη μορφή της GPP του MSI (sCASE_{full_MSI}-GPP), θεωρείται η ακριβέστερη καθώς εκμεταλλεύεται στο έπακρο τις δυνατότητες του συγκεκριμένου αισθητήρα

(χωρική ανάλυση 10 μέτρα) και χρησιμεύει και ως GPP αναφοράς, ελλείψει μετρήσεων eddy covariance. Η ουσιαστική διαφορά της από την πρώτη μορφή (sCASE_{MSI}-GPP), η οποία χρησιμοποιεί τη μέση τιμή των δυο δεικτών, είναι ότι στη περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη και η χωρική ανάλυση της ταξινόμησης, δηλαδή των ειδοειδικών παραμέτρων. Οι διαφορετικές GPP συγκρίθηκαν μεταξύ τους και με βάση τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής επιχειρήθηκε η εκτίμηση της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης στην ακρίβεια του sCASE.



Εικόνα 16. Στο μεγάλο πλαίσιο δίνεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης της περιοχής *Mixed Fagus sylvatica*, βάσει του αλγόριθμου *maximum likelihood* στο SNAP. Τα ακριβή όρια της περιοχής ορίζονται από τις τέσσερις πινέζες στην εικόνα (pin 1 έως 4). Στο μικρό πλαίσιο κάτω αριστερά δίνεται η αρχική εικόνα του MSI, στην οποία πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση, και εντός αυτής διακρίνεται (σκιασμένο ορθογώνιο) το τμήμα στο οποίο αντιστοιχεί η εικόνα ταξινόμησης. Κάτω δεξιά δίνονται οι κλάσεις της ταξινόμησης και το χρώμα στο οποίο αντιστοιχεί η καθεμία.

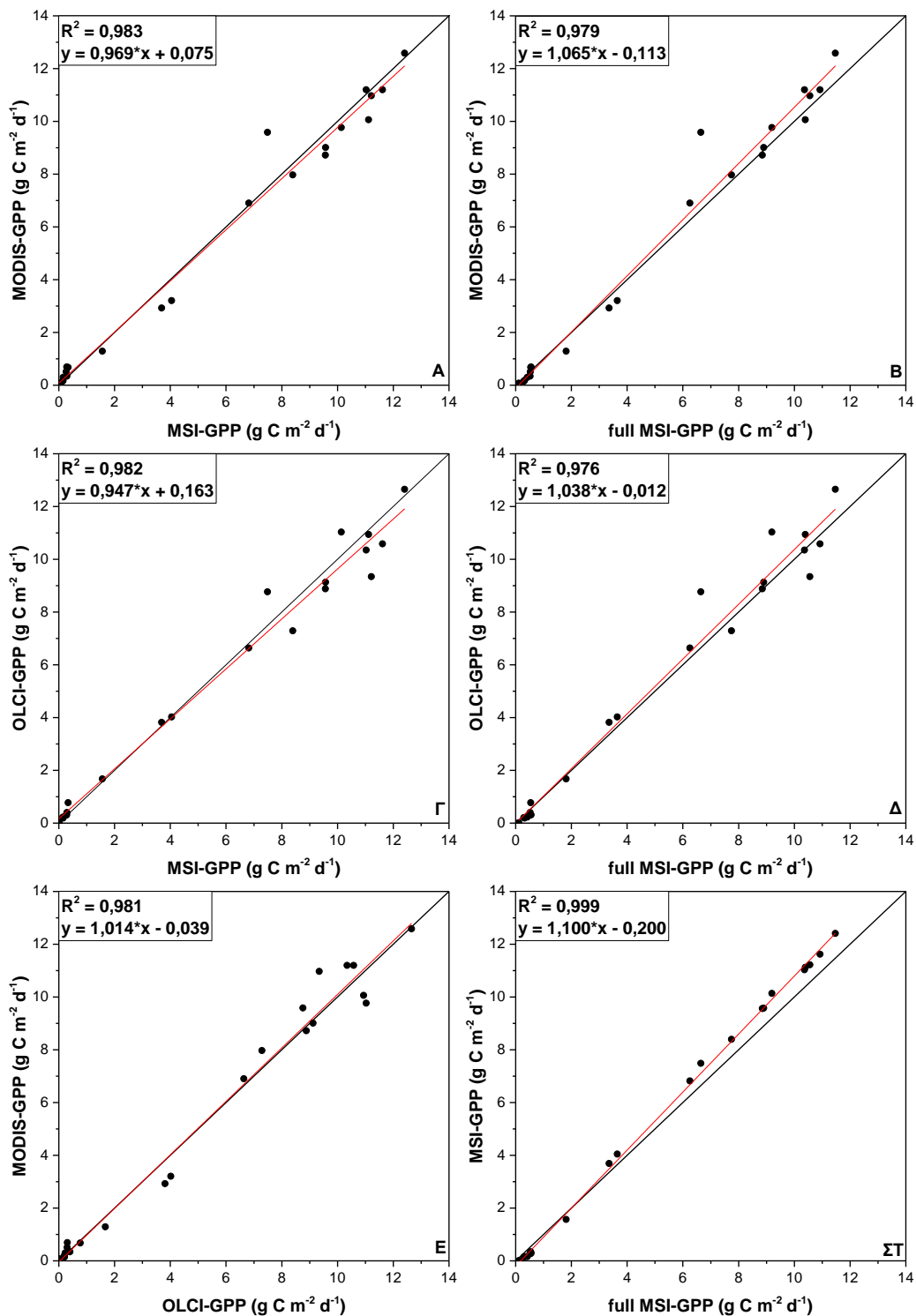
Στη περίπτωση των δυο πυκνών και ομοιογενών οικοσυστημάτων (*Fagus sylvatica* και *Pinus nigra*) δεν εμφανίζονται μεγάλες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών τύπων GPP, με τις συσχετίσεις σε όλες τις περιπτώσεις να έχουν υψηλό R^2 (μεγαλύτερο από 0,946) και τιμές πολύ κοντά στην

γραμμή ένα προς ένα (Σχήματα 13 και 14). Μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται μεταξύ των GPP υπολογισμένων από τις μέσες τιμές των δεικτών των τριών αισθητήρων, ενώ δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές όταν λαμβάνεται υπόψη η ταξινόμηση ($sCASE_{full_MSI-GPP}$). Η σχέση των δυο παραλλαγών της GPP από δεδομένα του MSI είναι πολύ ισχυρή (R^2 0,999 και 0,994 για τις *Fagus sylvatica* και *Pinus nigra* αντίστοιχα), με την $sCASE_{MSI-GPP}$ να εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές. Σε κάθε περίπτωση αυτές οι αποκλίσεις δεν επηρεάζουν τη συνολική σχέση.

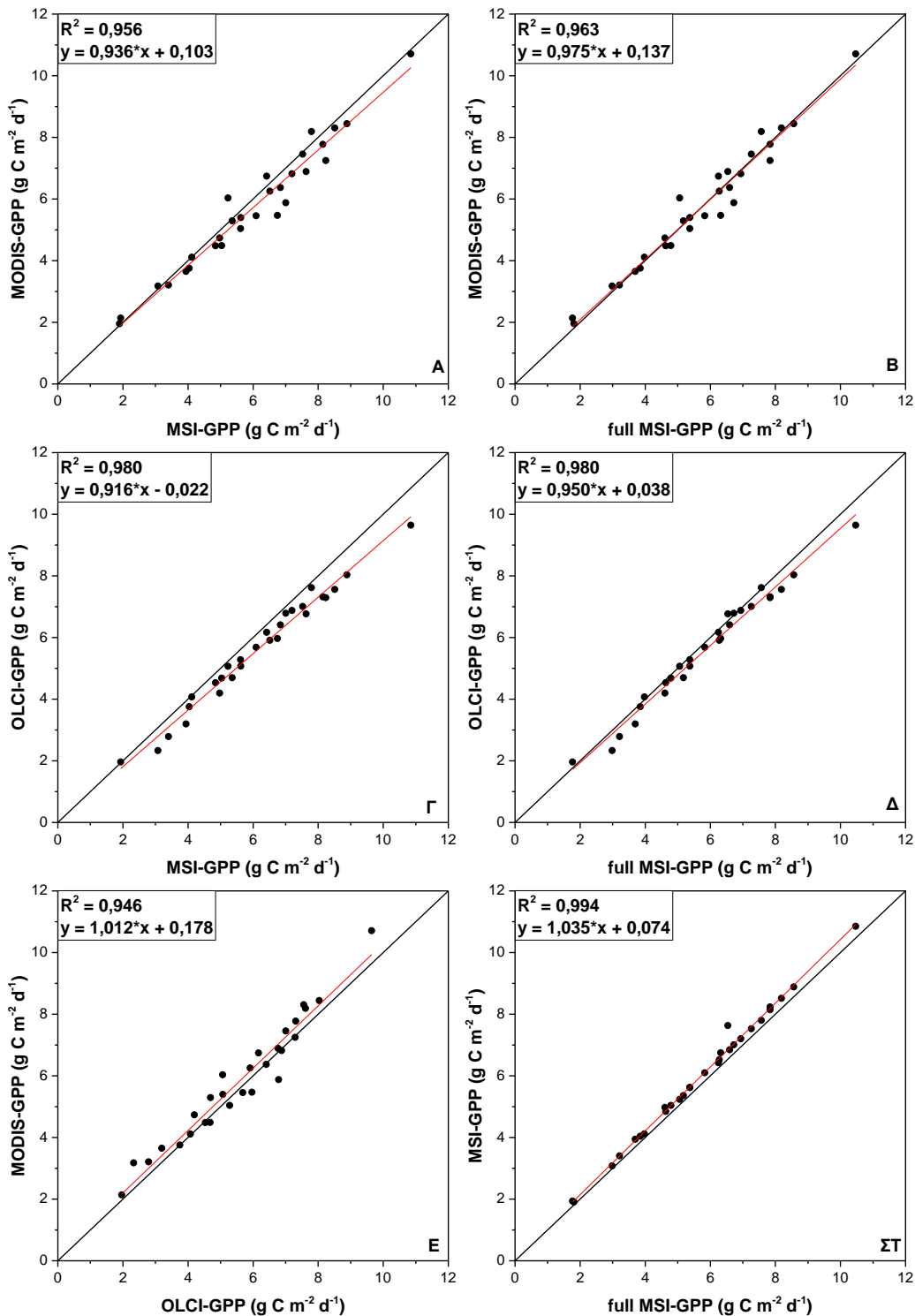
Στον αντίποδα, τα δυο οικοσυστήματα που περιέχουν μεγάλα ποσοστά κενών (*Quercus sp.* και *Pinus halepensis*) επηρεάζονται αρκετά, αν και με διαφορετικό τρόπο το καθένα. Στη περίπτωση της *Pinus halepensis*, της περιοχής με το μεγαλύτερο ποσοστό μη δασικής κάλυψης (24,2%), παρατηρούνται οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των τεσσάρων GPP, με τις επιμέρους σχέσεις όλων των τύπων να χαρακτηρίζονται από χαμηλούς συντελεστές προσδιορισμού R^2 (Σχήμα 15), ο οποίος κυμαίνεται από 0,560 (μεταξύ OLCI και $full_MSI$) έως 0,817 (για τις δύο παραλλαγές του MSI). Οι MODIS και OLCI υποεκτιμούν έντονα την GPP σε σχέση με τον MSI, με τη σχέση να εξασθενεί περαιτέρω όταν λαμβάνεται υπόψη και η ταξινόμηση ($sCASE_{full_MSI-GPP}$), ενώ χαμηλή είναι και η συσχέτιση μεταξύ των δυο τύπων GPP του MSI (Σχήμα 8ΣΤ). Στη περίπτωση της περιοχής *Quercus sp.*, οι GPP υπολογισμένες με τις μέσες τιμές των δεικτών από τους τρεις αισθητήρες συμφωνούν αρκετά μεταξύ τους (Σχήματα 16Α, 16Γ, 16Ε), με τον R^2 να υπερβαίνει το 0,986 και τις ευθείες να ταυτίζονται σχεδόν με τη γραμμή 1 προς 1. Παρόλα αυτά, εμφανίζονται αποκλίσεις σε χαμηλές τιμές GPP, κατά την περίοδο δηλαδή που το δάσος *Quercus sp.* δεν είναι σε πλήρη ανάπτυξη. Οι αποκλίσεις είναι εντονότερες στην περίπτωση του OLCI τόσο σε σχέση με την $sCASE_{MSI-GPP}$ όσο και την $sCASE_{MODIS-GPP}$. Και οι τρεις GPP εμφανίζουν έντονη απόκλιση από την πλήρη μορφή της $sCASE_{full_MSI-GPP}$ (Σχήματα 16Β, 16Δ, 16ΣΤ) με αυξανόμενη υπερεκτίμηση όσο αυξάνεται η GPP (υψηλές κλίσεις των ευθειών), με την $sCASE_{MSI-GPP}$ να εμφανίζει την εντονότερη υπερεκτίμηση μεταξύ των τριών (Σχήμα 16ΣΤ).

Τέλος, στις δυο μεικτές περιοχές (*Mixed Fagus sylvatica* και *Mixed Pinus nigra*) παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των GPP των διαφορετικών αισθητήρων, με τις δυο περιοχές να επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο. Στην περιοχή *Mixed Fagus sylvatica* οι GPP από τις μέσες τιμές των τριών δεικτών συμφωνούν καλά μεταξύ τους (R^2 μεγαλύτεροι από 0,975), με μικρές αποκλίσεις σε χαμηλές τιμές GPP (Σχήματα 17Α, 17Γ, 17Ε), όπως στην περίπτωση της περιοχής *Quercus sp.* Και οι τρεις αυτές GPP όμως, αποκλίνουν από την πλήρη GPP του MSI που λαμβάνει υπόψη την ταξινόμηση, με υποεκτίμηση των χαμηλών GPP και υπερεκτίμηση των υψηλών (Σχήματα 17Β, 17Δ, 17ΣΤ). Η περίπτωση της περιοχής *Mixed Pinus nigra* είναι ιδιαίτερη, καθώς η σχέση των $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $sCASE_{OLCI-GPP}$ είναι καλύτερη με την πλήρη μορφή της GPP του MSI ($sCASE_{full_MSI-GPP}$) σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιεί τις μέσες τιμές των δεικτών του MSI. Οι αποκλίσεις αφορούν σε χαμηλές και μέτριες τιμές GPP (2-6 g C m⁻² d⁻¹), είναι εντονότερες στον OLCI (Σχήμα 18) και αμβλύνονται όταν λαμβάνεται υπόψη η $sCASE_{full_MSI-GPP}$. Πρέπει πάντως να σημειωθεί, πως παρά την βελτίωση (υψηλότεροι R^2) της σχέσης με την $sCASE_{full_MSI-GPP}$, υπάρχει μια ξεκάθαρη υπερεκτίμηση της GPP στην περίπτωση του MODIS αλλά και του MSI με μέση τιμή δεικτών.

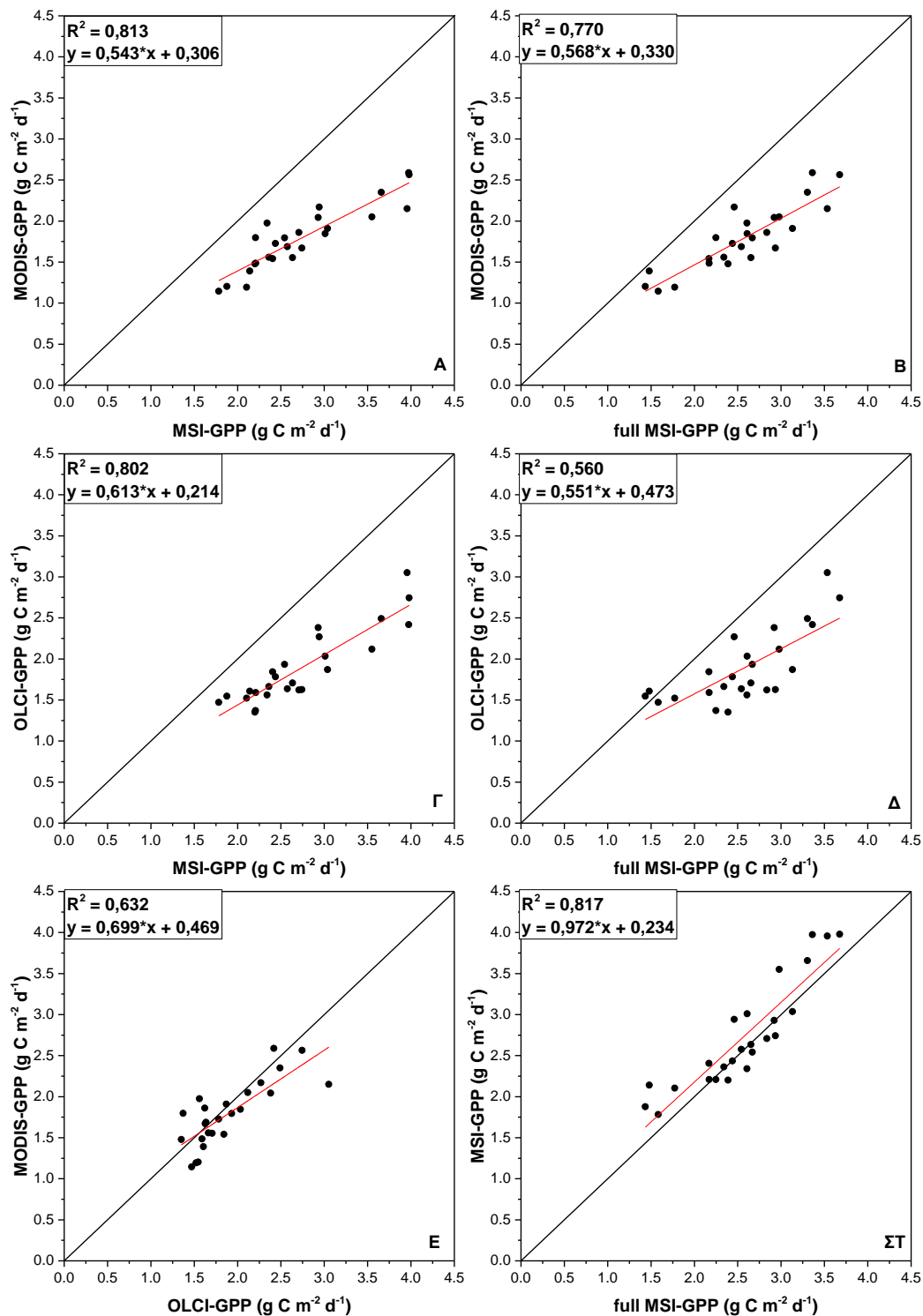
Είναι εμφανές πως η διαφορά στην χωρική ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων επηρεάζει την ακρίβεια του $sCASE$, με τρόπο που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής, με τα κενά στη βλάστηση να επηρεάζουν εντονότερα από την ετερογένεια. Η χωρική ανάλυση της ταξινόμησης είναι επίσης κρίσιμος παράγοντας για την ακρίβεια του μοντέλου, επιδρώντας αρνητικά τόσο στις περιοχές με κενά, όσο και σε αυτές με ετερογένεια στη βλάστηση, όπως φαίνεται και από τη σχέση μεταξύ των δυο διαφορετικών GPP με δεδομένα του MSI. Σε όλες τις περιπτώσεις η χρήση ενιαίας ταξινόμησης οδηγεί σε υπερεκτίμηση της GPP, ειδικά σε υψηλές τιμές παραγωγικότητας.



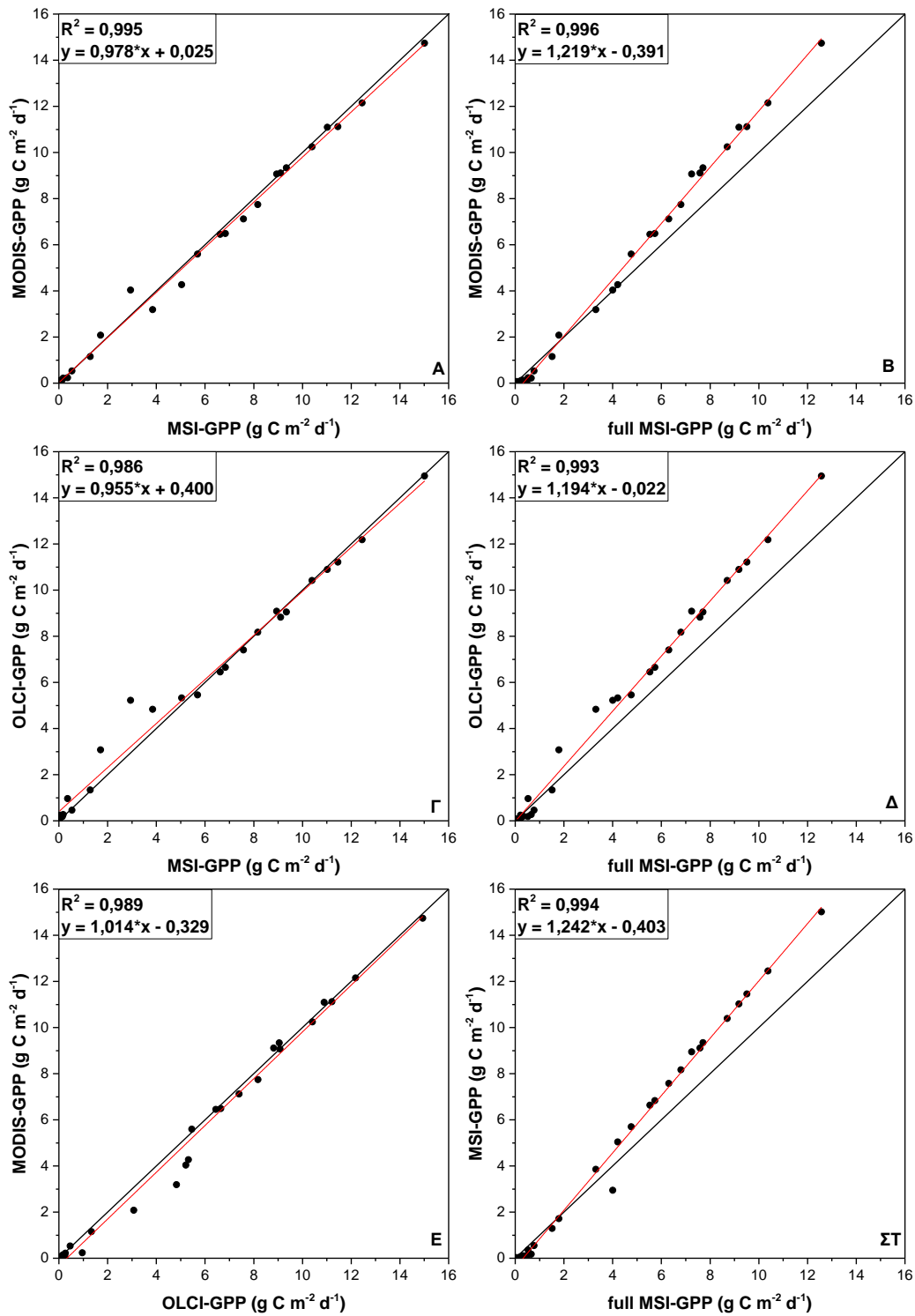
Σχήμα 13. Συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP υπολογισμένων από το sCASE με δεδομένα των τριών αισθητήρων MODIS, OLCI και MSI (δυο μορφές, μια με τη μέση τιμή των δεικτών για όλη τη περιοχή και μια υπολογισμένη για κάθε pixel χωριστά), για την περιοχή *Fagus sylvatica*. Η περιοχή αυτή είναι ομοιογενής (*Fagus sylvatica* 91%) χωρίς σημαντικό ποσοστό μη δασικής κάλυψης (4%). Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.



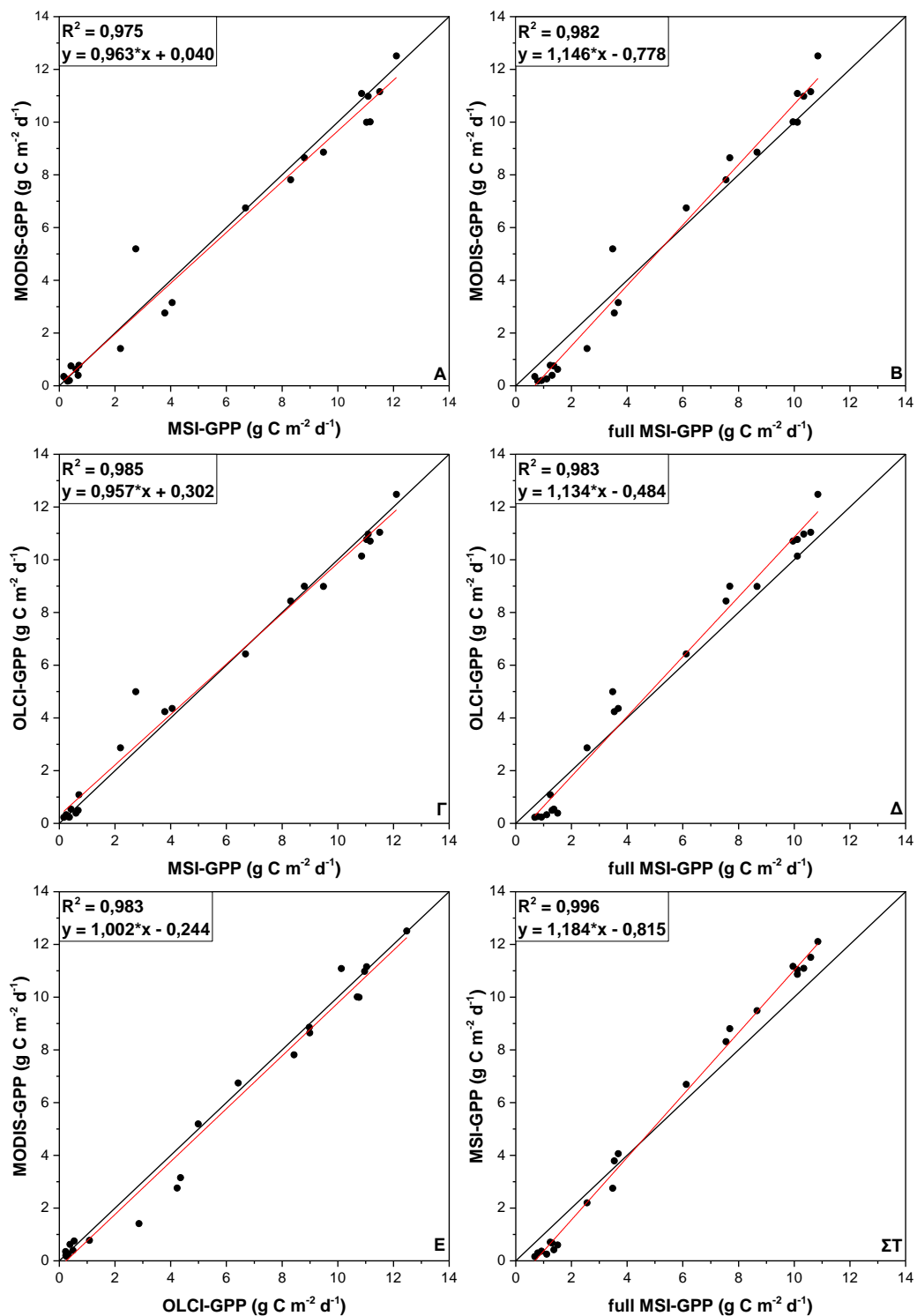
Σχήμα 14. Συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP υπολογισμένων από το sCASE με δεδομένα των τριών αισθητήρων MODIS, OLCI και MSI (δύο μορφές, μια με τη μέση τιμή των δεικτών για όλη τη περιοχή και μια υπολογισμένη για κάθε pixel χωριστά), για την περιοχή *Pinus nigra*. Η περιοχή αυτή είναι η πιο ομοιογενής (*Pinus nigra* 96,3%) χωρίς σημαντικό ποσοστό μη δασικής κάλυψης (3,4%). Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.



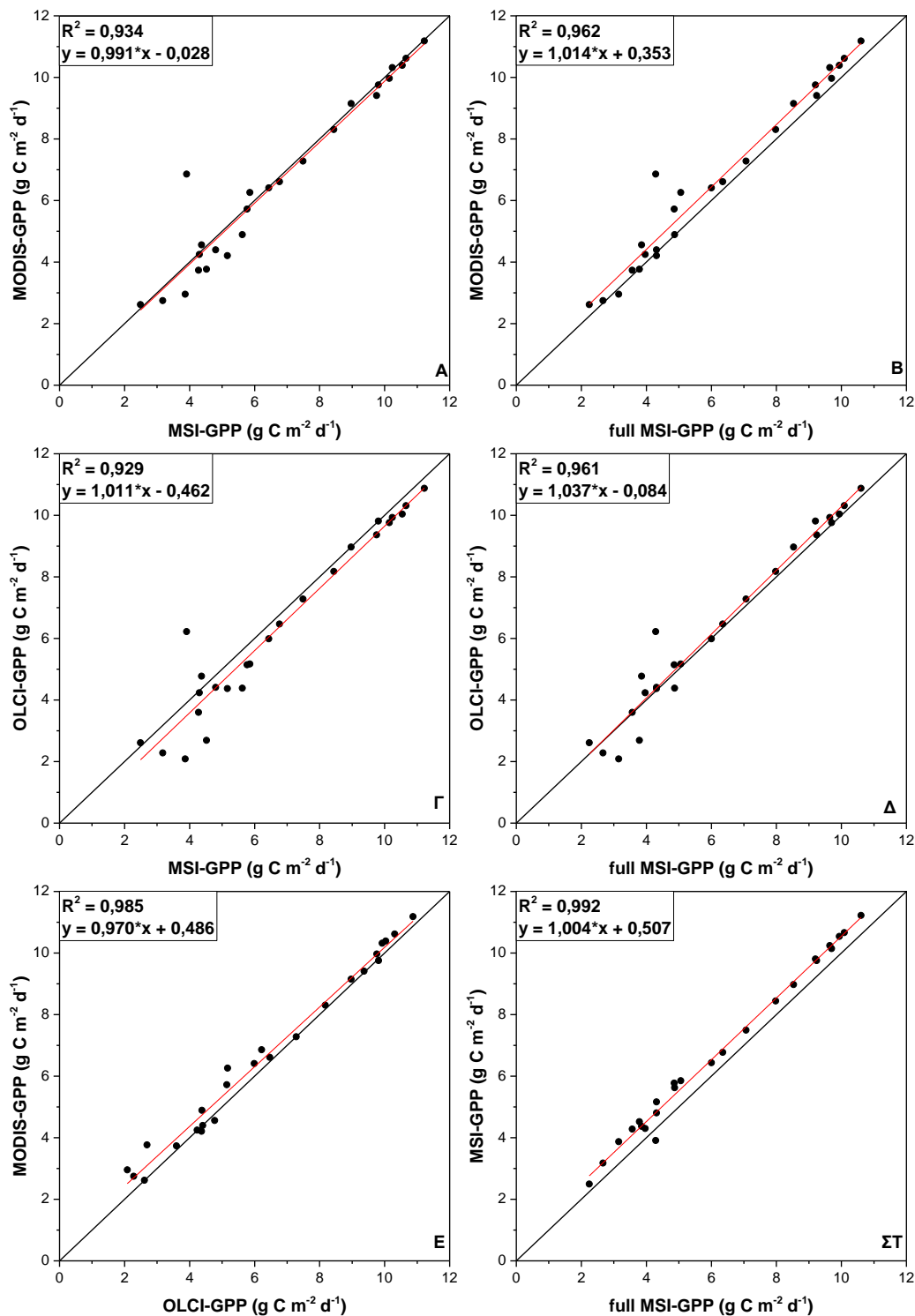
Σχήμα 15. Συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP υπολογισμένων από το sCASE με δεδομένα των τριών αισθητήρων MODIS, OLCI και MSI (δύο μορφές, μια με τη μέση τιμή των δεικτών για όλη τη περιοχή και μια υπολογισμένη για κάθε ρixel χωριστά), για την περιοχή *Pinus halepensis*. Η περιοχή αυτή είναι η περιοχή με το μεγαλύτερο ποσοστό μη δασικής κάλυψης (24,2 %) αλλά περιλαμβάνει μόνο ένα δασικό είδος (*Pinus halepensis* 75,8%). Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.



Σχήμα 16. Συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP υπολογισμένων από το sCASE με δεδομένα των τριών αισθητήρων MODIS, OLCI και MSI (δύο μορφές, μια με τη μέση τιμή των δεικτών για όλη τη περιοχή και μια υπολογισμένη για κάθε pixel χωριστά), για την περιοχή *Quercus sp.*. Η περιοχή αυτή είναι σχετικά ομοιογενής (*Quercus sp.* 76,3%) έχοντας σημαντικό ποσοστό μη δασικής κάλυψης (14,9%). Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.



Σχήμα 17. Συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP υπολογισμένων από το sCASE με δεδομένα των τριών αισθητήρων MODIS, OLCI και MSI (δύο μορφές, μια με τη μέση τιμή των δεικτών για όλη τη περιοχή και μια υπολογισμένη για κάθε pixel χωριστά), για την περιοχή *Mixed Fagus sylvatica*. Η περιοχή αυτή είναι μεικτή περιλαμβάνοντας ένα κύριο είδος (*Fagus sylvatica* 76%) και ένα δευτερεύον (*Pinus nigra* 19,3%), χωρίς σημαντικό ποσοστό μη δασικής κάλυψης (4,7%). Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.



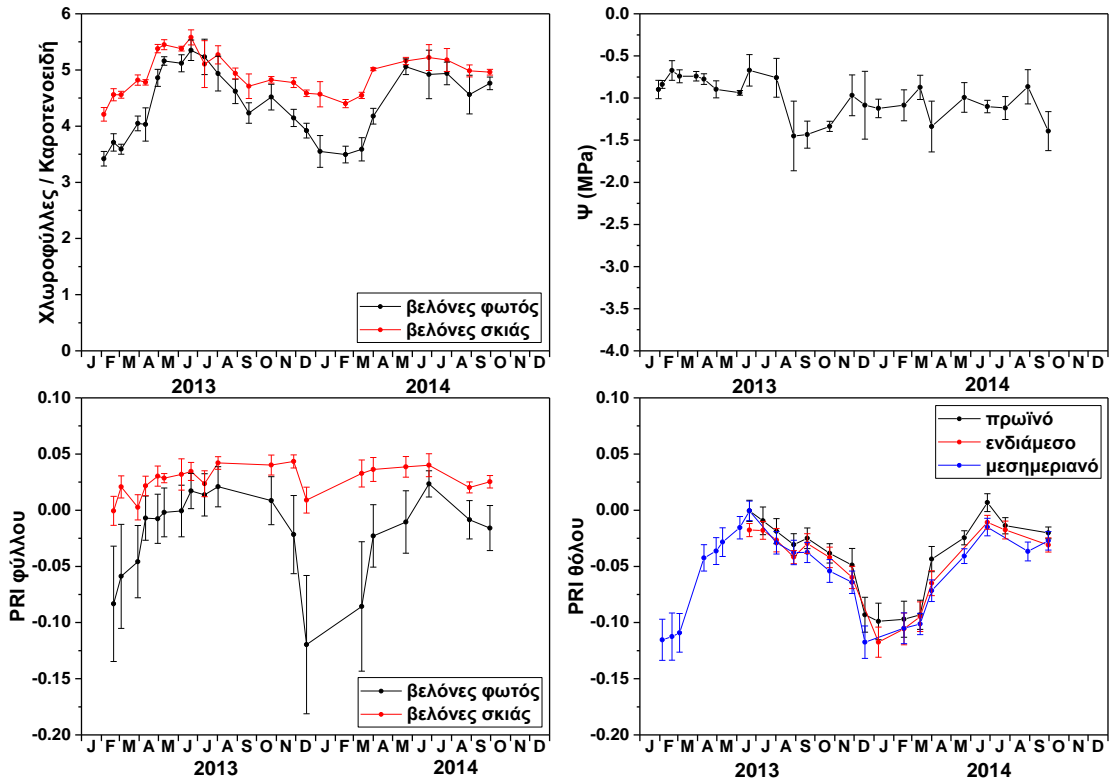
Σχήμα 18. Συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών GPP υπολογισμένων από το sCASA με δεδομένα των τριών αισθητήρων MODIS, OLCI και MSI (δύο μορφές, μια με τη μέση τιμή των δεικτών για όλη τη περιοχή και μια υπολογισμένη για κάθε pixel χωριστά), για την περιοχή *Mixed Pinus nigra*. Η περιοχή αυτή είναι μεικτή περιλαμβάνοντας ένα κύριο είδος (*Pinus nigra* 75,8%) και ένα δευτερεύον (*Fagus sylvatica* 18,6%), χωρίς σημαντικό ποσοστό μη δασικής κάλυψης (5,6%). Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.

Ο δείκτης Photochemical Reflectance Index (PRI)

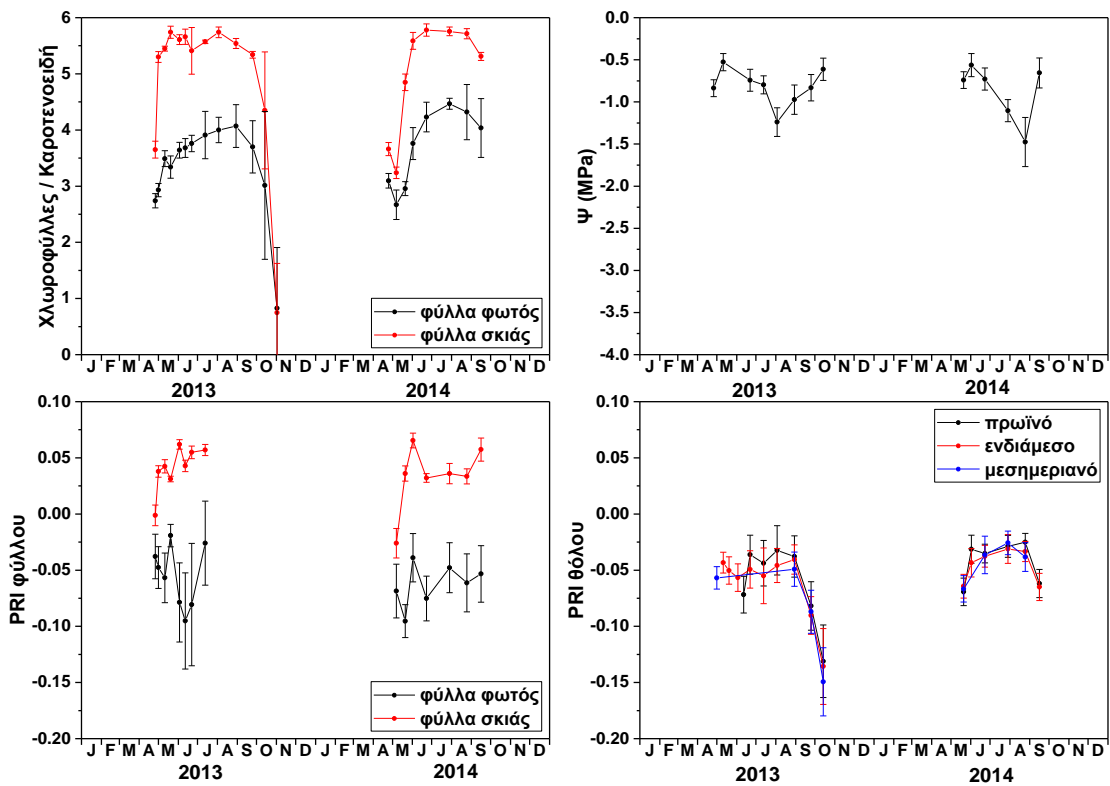
Όπως αναφέρθηκε ήδη, η δυνατότητα υπολογισμού της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης θα βελτιώνει την ακρίβεια των μοντέλων LUE, μειώνοντας την εξάρτησή τους από άλλα δεδομένα και ειδικές παραμετροποιήσεις. Ίσως το πιο υποσχόμενο σχετικό προϊόν είναι ο δείκτης PRI (Εξίσωση 5), ο οποίος εξ αρχής συνδέθηκε με την ϵ , μια σχέση που έχει επιβεβαιωθεί από πλήθος εργασιών. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής εξετάζεται η σχέση του PRI (MODIS PRI) με την ϵ , σε επίπεδο οικοσυστήματος, αφού προηγουμένως διερευνηθεί η οικοφυσιολογική πληροφορία που περιέχεται στον δείκτη. Αυτό πραγματοποιήθηκε με βάση τη σχέση του με οικοφυσιολογικές παραμέτρους της βλάστησης και συγκεκριμένα με τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή και το δυναμικό νερού. Ο PRI έχει βρεθεί να επηρεάζεται από το σύνολο των καροτενοειδών και το λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (Stylinski et al., 2002), ενώ έχει προταθεί και ως δείκτης της υδατικής κατάστασης της βλάστησης (Sarlikioti et al., 2010; Suárez et al., 2008; Zarco-Tejada et al., 2012).

Κατά τα έτη 2013 και 2014 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις (περίπου μια φορά το μήνα για κάθε είδος) των δυο παραπάνω παραμέτρων καθώς και επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας (για τον υπολογισμό του PRI) σε τρεις περιοχές του πάρκου Βόρειας Πίνδου. Μελετήθηκαν τέσσερα δασικά είδη που κυριαρχούν στην ευρύτερη περιοχή, τα *Fagus sylvatica*, *Pinus nigra*, *Quercus frainetto* και *Quercus cerris* (Πίνακας 2). Οι μετρήσεις ανακλαστικότητας πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο φύλλου κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, ξεχωριστά για φύλλα της εξωτερικής στιβάδας του θόλου (φύλλα φωτός) και ξεχωριστά για φύλλα στο εσωτερικό του θόλου (φύλλα σκιάς), και σε επίπεδο θόλου (σε τρεις χρονικές στιγμές της ημέρας). Ο λόγος χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (Chl/Car) υπολογίστηκε και αυτός ξεχωριστά για τα φύλλα φωτός και τα φύλλα σκιάς, σε δείγματα που συλλέχθηκαν το μεσημέρι, ενώ το δυναμικό νερού είναι αντιπροσωπευτικό για τα άτομα του είδους στην περιοχή.

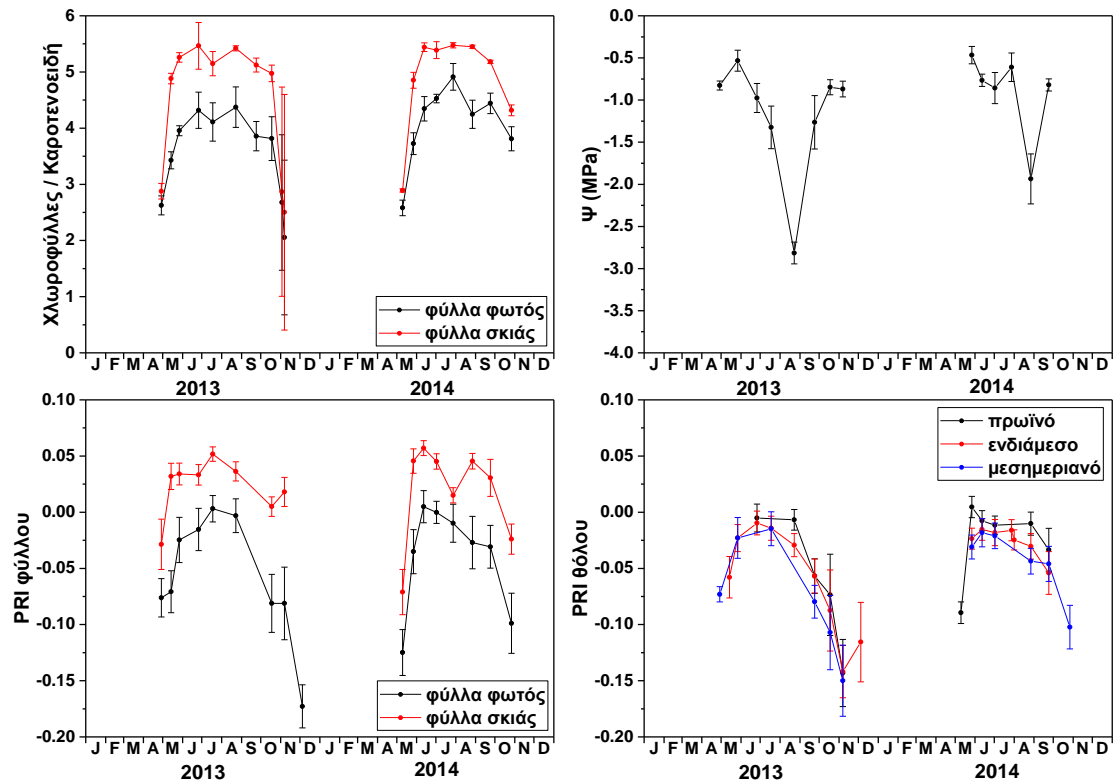
Το *Pinus nigra* (Σχήμα 19) εμφανίζει μια εποχικότητα στο λόγο των χλωροφυλλών προς καροτενοειδή η οποία είναι εντονότερη στις βελόνες φωτός, η οποία σχετίζεται με τις διαδικασίες ανάπτυξης νέων ιστών. Οι PRI (φύλλου και θόλου) φαίνεται πως ακολουθούν την εποχική διακύμανση των χρωστικών, με τη σχέση αυτή να μην είναι ξεκάθαρη στις βελόνες σκιάς στις οποίες αμφοτέρω (ο PRI και ο λόγος Chl/Car) έχουν μικρότερη διακύμανση. Όσον αφορά το δυναμικό νερού, αυτό παραμένει σχετικά σταθερό στη διάρκεια της διαίτης με μικρή πτώση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ούτε το *Fagus sylvatica* εμφανίζει έντονη πτώση του δυναμικού νερού, αν και είναι ξεκάθαρη η μείωση του τον Αύγουστο κάθε χρονιάς (Σχήμα 20). Η εποχικότητα του λόγου Chl/Car είναι ξεκάθαρη, αντικατοπτρίζοντας την έκπτυξη και την πτώση των φύλλων, με τη μεγάλη τυπική απόκλιση του φθινοπώρου να οφείλεται στην ταυτόχρονη ύπαρξη πράσινων και κίτρινων φύλλων. Στη περίπτωση του *Fagus sylvatica*, ο PRI των φύλλων φωτός φαίνεται να μην ακολουθεί το εποχικό πρότυπο των χρωστικών, σε αντίθεση με τον PRI των φύλλων σκιάς και τους τρεις PRI θόλου. Τέλος, τα δυο είδη *Quercus* εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά (Σχήματα 21 και 22), με ξεκάθαρη εποχική διακύμανση του λόγου Chl/Car, με μεγάλη τυπική απόκλιση κατά τους φθινοπωρινούς μήνες, όπως και το *Fagus sylvatica*. Σε αντίθεση με το *Fagus sylvatica*, ο PRI των φύλλων φωτός ακολουθεί το εποχικό πρότυπο, όπως και οι PRI θόλου, με τον PRI των φύλλων σκιάς να διαφοροποιούνται. Κλείνοντας, τα δυο είδη *Quercus* εμφανίζουν έντονη πτώση του δυναμικού νερού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



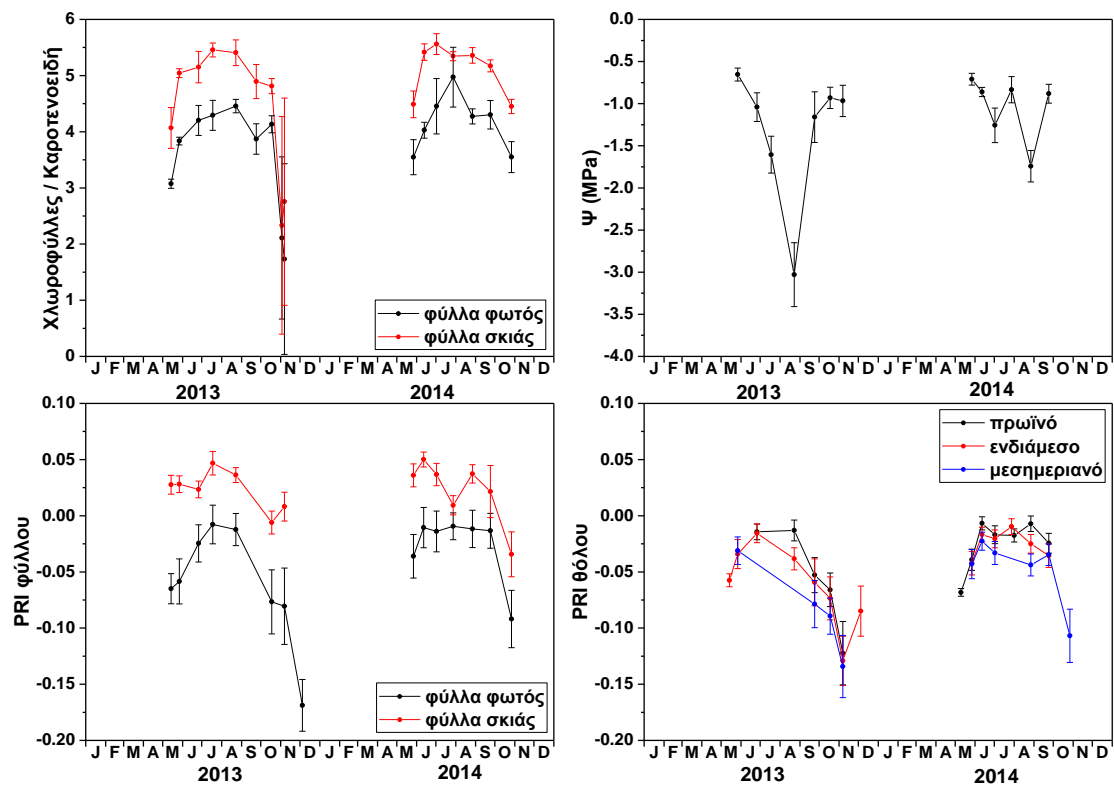
Σχήμα 19. Οι χρονοσειρές των παραμέτρων που μετρήθηκαν στο πεδίο την περίοδο 2013-2014 για το είδος *Pinus nigra*.



Σχήμα 20. Οι χρονοσειρές των παραμέτρων που μετρήθηκαν στο πεδίο την περίοδο 2013-2014 για το είδος *Fagus sylvatica*.



Σχήμα 21. Οι χρονοσειρές των παραμέτρων που μετρήθηκαν στο πεδίο την περίοδο 2013-2014 για το είδος *Quercus frainetto*.



Σχήμα 22. Οι χρονοσειρές των παραμέτρων που μετρήθηκαν στο πεδίο την περίοδο 2013-2014 για το είδος *Quercus cerris*.

Οι τιμές PRI που υπολογίστηκαν από τις επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας (φύλλου και θόλου) συσχετίστηκαν με τις τιμές δυναμικού νερού και του λόγου χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (Chl/Car). Στον Πίνακα 25 δίνονται τα αποτελέσματα (R^2 και p) των συσχετίσεων μεταξύ των διάφορων PRI (φύλλου και θόλου) και του δυναμικού νερού (Ψ). Είναι εμφανές πως καμία σχέση δεν υφίσταται μεταξύ του PRI και του δυναμικού, για οποιοδήποτε από τα τέσσερα είδη που μελετήθηκαν, κάτι που είναι εμφανές και από τη σύγκριση των χρονοσειρών τους που παρουσιάστηκαν παραπάνω (Σχήματα 19 έως 22).

Πίνακας 25. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και το επίπεδο σημαντικότητας (p) των γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ του δυναμικού νερού (Ψ) και των διάφορων τύπων PRI (φύλλου και θόλου), για τα τέσσερα είδη μελέτης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 2013-2014.

Είδος Μελέτης	PRI φύλλου		PRI θόλου (πρωινό)		PRI θόλου (ενδιάμεσο)		PRI θόλου (μυσημεριανό)	
	R^2	p	R^2	p	R^2	p	R^2	p
<i>Pinus nigra</i>	<0,001	0,989	0,001	0,892	0,024	0,614	<0,001	0,981
<i>Fagus sylvatica</i>	0,004	0,865	0,266	0,086	0,145	0,199	0,309	0,195
<i>Quercus frainetto</i>	0,050	0,464	<0,001	0,967	0,013	0,712	0,002	0,889
<i>Quercus cerris</i>	0,094	0,332	0,056	0,509	0,022	0,645	0,019	0,725

Η εικόνα είναι διαφορετική όσον αφορά τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή, ο οποίος συσχετίζεται καλά με τον PRI, τόσο σε επίπεδο φύλλου (για τα φύλλα φωτός), όσο και σε επίπεδο θόλου (Πίνακας 26), καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διακύμανση των PRI στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθεί την εποχικότητα του λόγου Chl/Car. Ξεκινώντας με τον PRI σε επίπεδο φύλλου, παρατηρείται συσχέτισή του με το λόγο Chl/Car στα φύλλα φωτός, αλλά μόνο το *Quercus frainetto* διατηρεί μια στατιστικώς σημαντική αλλά αδύναμη σχέση στα φύλλα σκιάς ($R^2 = 0,313$ με $p = 0,024$). Εξαιρεση αποτελεί το *Fagus sylvatica* για το οποίο δεν υπάρχει καμία σχέση ούτε στα φύλλα φωτός (Σχήμα 23). Όσον αφορά τα υπόλοιπα τρία, η συσχέτιση για τα φύλλα φωτός είναι ισχυρότερη στο *Quercus frainetto* ($R^2 = 0,675$) και πιο αδύναμη στο *Pinus nigra* ($R^2 = 0,495$).

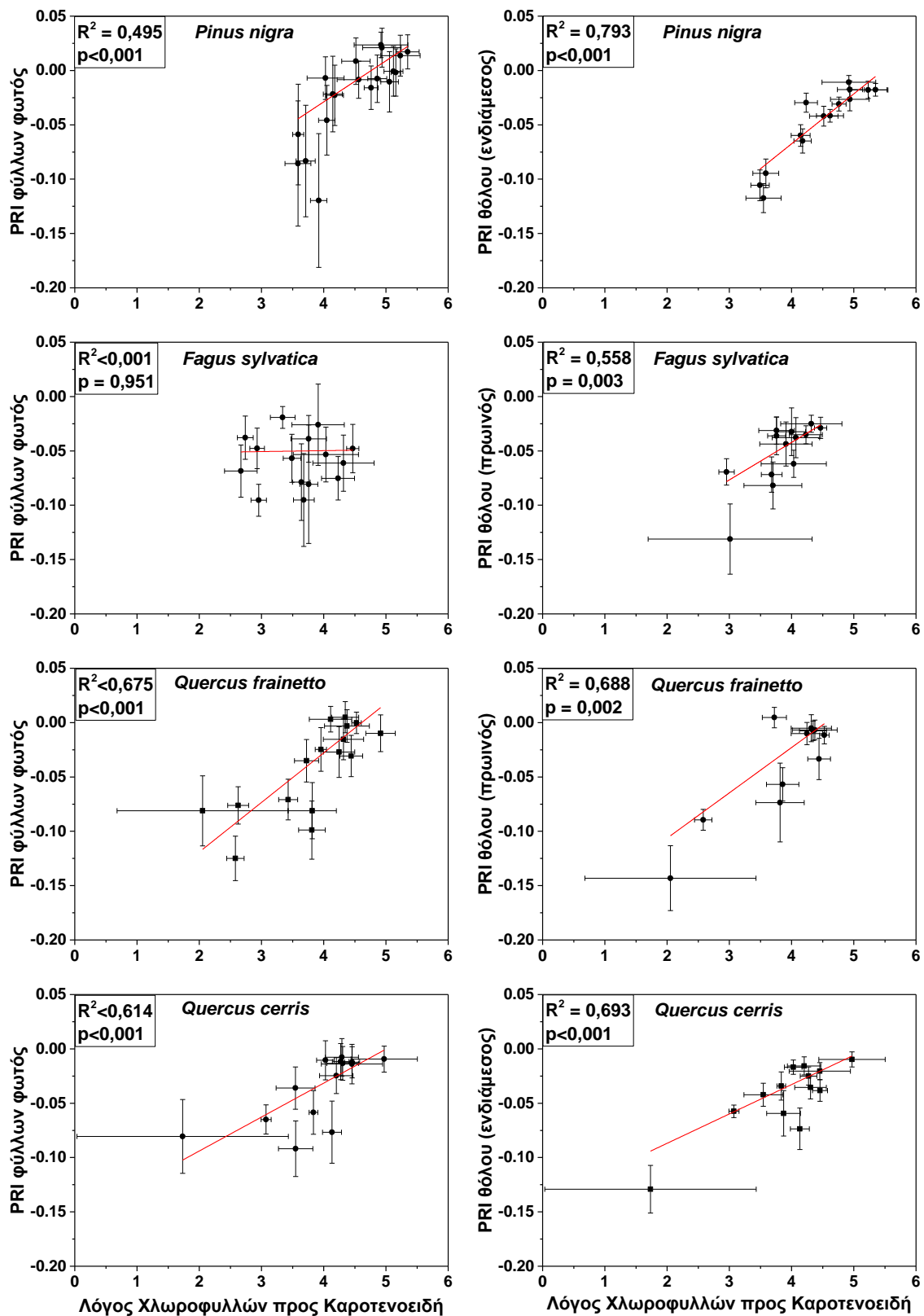
Στο επίπεδο του θόλου, ο PRI συσχετίζεται με το λόγο Chl/Car και στα τέσσερα είδη, αν και παρατηρούνται διαφορές τόσο μεταξύ των ειδών όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας (Πίνακας 26). Η ισχυρότερη σχέση εμφανίζεται στο *Pinus nigra* στο οποίο και παραμένει ισχυρή στη διάρκεια της ημέρας (R^2 0,763 έως 0,793). Στα τρία φυλλοβόλα είδη, παρατηρείται μια αποσύνδεση μεταξύ του λόγου Chl/Car και του PRI της μεσημεριανής λήψης, όταν μόνο το *Quercus frainetto* διατηρεί στατιστικώς σημαντική σχέση ($R^2 = 0,490$ με $p = 0,011$) αν και σημαντικά χαμηλότερη αυτή του πρωινού PRI ($R^2 = 0,688$). Στη περίπτωση του *Fagus sylvatica* πρέπει να διευκρινιστεί πως η σχέση του μεσημεριανού PRI παρότι εμφανίζει υψηλό R^2 (0,446) δεν είναι στατιστικώς σημαντική, κάτι που οφείλεται στον μειωμένο αριθμό λήψεων λόγω συχνής συννεφιάς στη περιοχή κατά τη διάρκεια του μεσημεριού. Συνολικά το *Fagus sylvatica* εμφανίζει την πιο αδύναμη σχέση από τα είδη που εξετάστηκαν, με μέγιστο R^2 0,558 για τον πρωινό PRI (Σχήμα 23). Σε αντίθεση με τα δυο παραπάνω φυλλοβόλα είδη (*Quercus frainetto* και *Fagus sylvatica*), στα οποία ο λόγος Chl/Car συσχετίζεται ισχυρότερα με τον πρωινό PRI, στο *Quercus cerris* μόνο ο PRI της ενδιάμεσης λήψης έχει ισχυρή σχέση ($R^2 = 0,693$).

Από τα παραπάνω, προκύπτει μια ξεκάθαρη επίδραση του λόγου Chl/Car στην εποχική διακύμανση του PRI, αν και παρατηρούνται διαφορές στη σχέση μεταξύ των ειδών. Σε επίπεδο φύλλου η σχέση των δυο αφορά στα φύλλα φωτός, ενώ στην περίπτωση του *Fagus sylvatica* δεν παρατηρείται καμία σχέση. Σε επίπεδο θόλου ο PRI συσχετίζεται με το λόγο Chl/Car και στα

τέσσερα είδη, με τη σχέση των δυο να διατηρείται σχετικά σταθερή στη διάρκεια της ημέρας για το *Pinus nigra*, αλλά να εμφανίζει διαφορές στα τρία φυλλοβόλα είδη, ειδικά όσον αφορά τον μεσημεριανό PRI.

Πίνακας 26. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και το επίπεδο σημαντικότητας (p) των γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ του λόγου χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (Chl/Car) και των διάφορων τύπων PRI (φύλλου και θόλου), για τα τέσσερα είδη μελέτης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 2013-2014.

Είδος Μελέτης	PRI φύλλου				PRI θόλου (πρωινός)		PRI θόλου (ενδιάμεσος)		PRI θόλου (μεσημεριανός)	
	Φωτός		Σκιάς		R^2	p	R^2	p	R^2	p
	R^2	p	R^2	p						
<i>Pinus nigra</i>	0,495	<0,001	0,089	0,216	0,763	<0,001	0,793	<0,001	0,785	<0,001
<i>Fagus sylvatica</i>	<0,001	0,951	0,175	0,121	0,558	0,003	0,341	0,022	0,446	0,070
<i>Quercus frainetto</i>	0,675	<0,001	0,313	0,024	0,688	0,002	0,489	0,005	0,490	0,011
<i>Quercus cerris</i>	0,614	<0,001	0,183	0,127	0,402	0,049	0,693	<0,001	0,290	0,108



Σχήμα 23. Συσχετίσεις των επίγειων PRI με το λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (των φύλλων φωτός), για τα τέσσερα είδη μελέτης στο πάρκο Βόρειας Πίνδου. Σε επίπεδο φύλλου δίνονται οι PRI φύλλων φωτός, ενώ σε επίπεδο θόλου δίνεται ο PRI από τη χρονική στιγμή με την υψηλότερη συσχέτιση για κάθε είδος.

MODIS PRI

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάλυση των επίγειων PRI, η οποία έδειξε μια ξεκάθαρη επίδραση του λόγου Chl/Car στον PRI, στη συνέχεια εξετάζεται η δυνατότητα του δείκτη PRI, υπολογισμένου με δεδομένα MODIS (προϊόντα MOD021KM και MYD021KM για τον MODIS/Terra και τον MODIS/Aqua αντίστοιχα), να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ) ενός παραθαλάσσιου οικοσυστήματος κωνοφόρων στην περιοχή του San Rossore στην Ιταλία, η οποία διαθέτει πύργο eddy covariance (Πίνακας 1). Η σχέση μεταξύ PRI και ϵ έχει μελετηθεί εκτενώς σε επίπεδο φύλλου και θόλου, με πολύ καλά αποτελέσματα, όμως η μελέτη σε επίπεδο οικοσυστήματος παραμένει ακόμη περιορισμένη.

Με τη χρήση των δεδομένων του πύργου, υπολογίστηκαν για την περίοδο μελέτης (2002-2007) ημερήσιες και ημίωρες τιμές αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ), διαιρώντας τις τιμές GPP είτε με την PAR είτε με την APAR. Για τον υπολογισμό της APAR χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές PAR του πύργου και τιμές fAPAR που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα MODIS (APAR_{Terra} και APAR_{Aqua} για τα δεδομένα MODIS/Terra και MODIS/Aqua αντίστοιχα) με δυο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού. Οι δυο μέθοδοι διαφέρουν στο ότι η μια (Μέθοδος 2) υπολογίζει την APAR χωριστά για την απευθείας (APAR_{dir}) και τη διάχυτη (APAR_{diff}) ακτινοβολία και ύστερα τις αθροίζει, ενώ η άλλη (Μέθοδος 1) την υπολογίζει για τη συνολική ακτινοβολία. Συνολικά υπολογίζονται δεκαπέντε διαφορετικοί τύποι ϵ , πέντε ημερήσιες (ϵ_d), πέντε ημίωρες (ϵ_{hh}) και πέντε που περιλαμβάνουν την τιμή της ϵ για το μισάωρο κατά το οποίο πραγματοποιείται η κάθε λήψη (ϵ_{ov}), καθώς η διέλευση κάθε δορυφόρου από μέρα σε μέρα μπορεί να πραγματοποιείται σε διαφορετικό μισάωρο της ώρας διέλευσης. Οι πέντε παραλλαγές κάθε τύπου (ϵ_d , ϵ_{hh} , ϵ_{ov}) προκύπτουν από την ακτινοβολία με την οποία διαιρείται η GPP (PAR, δυο APAR_{Terra} και δυο APAR_{Aqua}). Οι ημίωρες τιμές αποδοτικότητας (ϵ_{hh}) χρησιμεύουν για την μελέτη της αντιπροσωπευτικότητας των στιγμιαίων λήψεων/μετρήσεων για το σύνολο της ημέρας (ϵ_d) και δεν συσχετίζονται απευθείας με τον PRI.

Οι πέντε παραλλαγές κάθε τύπου χρησιμεύουν στην ανάλυση της επίδρασης του τρόπου με τον οποίο ενσωματώνεται η ακτινοβολία στον υπολογισμό της αποδοτικότητας, κυρίως όσον αφορά τη διαφορά μεταξύ PAR και APAR, αλλά και ως προς τον τρόπο υπολογισμού της APAR (ουσιαστικά του fAPAR). Κρίνοντας από τις ημερήσιες τιμές αποδοτικότητας (ϵ_d) για την περιοχή του San Rossore, οι πέντε παραλλαγές της ϵ_d συσχετίζονται καλά μεταξύ τους, με τον συντελεστή προσδιορισμού (R^2) να ξεπερνά το 0,97 για όλους τους συνδυασμούς, αν και διαφέρουν σε μέγεθος. Η μέγιστη τιμή αποδοτικότητας για τις ημέρες λήψης των MODIS ήταν 0,371 g C mol⁻¹ PAR και πολύ υψηλότερη, όπως είναι λογικό, όταν χρησιμοποιείται η APAR, φτάνοντας στα 0,424 και 0,484 g C mol⁻¹ APAR με τη πρώτη μέθοδο υπολογισμού της APAR (ϵ_d _APAR_{Terra} και ϵ_d _APAR_{Aqua} αντίστοιχα) και 0,387 και 0,400 g C mol⁻¹ APAR με τη δεύτερη μέθοδο υπολογισμού (ϵ_d _APAR_{Terra} και ϵ_d _APAR_{Aqua} αντίστοιχα).

Οι πέντε παραλλαγές της ημερήσιας αποδοτικότητας (ϵ_d) και οι πέντε παραλλαγές της αποδοτικότητας κατά το ημίωρο διέλευσης (ϵ_{ov}), εξετάζονται για την σχέση τους με τον PRI που υπολογίστηκε από τις εικόνες MOD021KM και MYD021KM (MODIS/Terra και MODIS/Aqua αντίστοιχα). Από τα έξι χρόνια της μελέτης επιλέχθηκαν 278 εικόνες από τον MODIS/Terra και 273 από τον MODIS/Aqua, από τις οποίες προέκυψαν οι αντίστοιχοι PRI (PRI_{Terra} και PRI_{Aqua}), ενώ ένας επιπλέον PRI προέκυψε από το σύνολο των εικόνων των δυο αισθητήρων (PRI_{Both}). Για καθένα από τα παραπάνω τρία σύνολα PRI δημιουργήθηκαν διάφορα υποσύνολα PRI που διαφέρουν ως προς το κανάλι αναφοράς και τις γωνίες λήψης (Πίνακας 16). Η ποικιλία τόσο των PRI όσο και της αποδοτικότητας (Πίνακας 27) έχει ως στόχο να εξεταστούν διάφοροι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν τη σχέση μεταξύ του PRI και της ϵ , όπως το κανάλι αναφοράς, η ώρα λήψης και οι

γωνίες λήψης. Σε πρώτη φάση εξετάστηκαν τα πλήρη σύνολα (χωρίς κριτήρια γωνιών λήψης) των τριών PRI (Terra, Aqua και Both) και για τα τρία κανάλια αναφοράς (12, 13 και 1), ως προς τη σχέση τους τόσο με την ημερήσια (ϵ_d) όσο και την αποδοτικότητα κατά το ημίωρο διέλευσης (ϵ_{ov}). Παράλληλα, η πιθανή επίδραση της ώρας λήψης στην σχέση PRI και ϵ , εξετάστηκε και βάσει της σχέσης των ημίωνων τιμών αποδοτικότητας (ϵ_{hh}) με τις αντίστοιχες ημερήσιες (ϵ_d). Ύστερα, εξετάστηκαν τα υποσύνολα των PRI, που προκύπτουν από τις διαφορετικές γωνίες λήψης, ως προς τη σχέση τους με τις αντίστοιχες τιμές ϵ_d και ϵ_{ov} . Τέλος, σε μια προσπάθεια ερμηνείας των ευρημάτων, εξετάστηκε η επίδραση που έχει στη σχέση του PRI με την ϵ , το εύρος τιμών της ϵ που αντιστοιχεί σε κάθε σύνολο (και υποσύνολο) λήψεων PRI (διαφορετικές ημέρες).

Πίνακας 27. Οι παραλλαγές των PRI και ϵ , που χρησιμοποιήθηκαν στις συσχετίσεις για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ των δύο. Διευκρινίζεται ότι η ημίωρη ϵ (ϵ_{hh}) δεν περιέχεται στον πίνακα, αφού δεν συσχετίστηκε με τον PRI.

PRI (PRI _{Ref} _SATELLITE _{view})		ϵ (ϵ_{time_Light})	
Κριτήριο 1 : Κανάλι αναφοράς (Ref)		Κριτήριο 1 : Χρονική διάσταση (time)	
620-670 nm	1 (π.χ. PRI ₁ _Terra _{all})	Αποδοτικότητα ημέρας	d (π.χ. ϵ_d_PAR)
546-556 nm	12 (π.χ. PRI ₁₂ _Terra _{all})	Αποδοτικότητα κατά τη διέλευση	ον (π.χ. ϵ_{ov_PAR})
662-672 nm	13 (π.χ. PRI ₁₃ _Terra _{all})	Κριτήριο 2 : Ακτινοβολία (Light)	
Κριτήριο 2 : Δορυφόρος (SATELLITE)		Μετρημένη PAR	PAR (π.χ. ϵ_d_PAR)
Terra	Terra (π.χ. PRI ₁ _Terra _{all})	APAR υπολογισμένη από την PAR και τιμές fAPAR από δεδομένα του MODIS/TERRA	APAR _{TERRA} (π.χ. $\epsilon_d_APAR_{Terra}$)
Aqua	Aqua (π.χ. PRI ₁ _Aqua _{all})	APAR υπολογισμένη από την PAR και τιμές fAPAR από δεδομένα του MODIS/AQUA	APAR _{AQUA} (π.χ. $\epsilon_d_APAR_{Aqua}$)
Terra και Aqua	Both (π.χ. PRI ₁ _Both _{all})	Κριτήριο 3 : Μέθοδος υπολογισμού της APAR	
Κριτήριο 3 : Γωνίες λήψης (view)		Μέθοδος 1 Υπολογισμός APAR από τη συνολική PAR (αναφέρεται στο κείμενο)	
All angles	all (π.χ. PRI ₁ _Terra _{all})	Μέθοδος 2 Υπολογισμός APAR ξεχωριστά για την PAR _{dir} και την PAR _{diff} (αναφέρεται στο κείμενο)	
Nadir	n (π.χ. PRI ₁ _Terra _n)		
Backscatter	b (π.χ. PRI ₁ _Terra _b)		
Forward scatter	f (π.χ. PRI ₁ _Terra _f)		

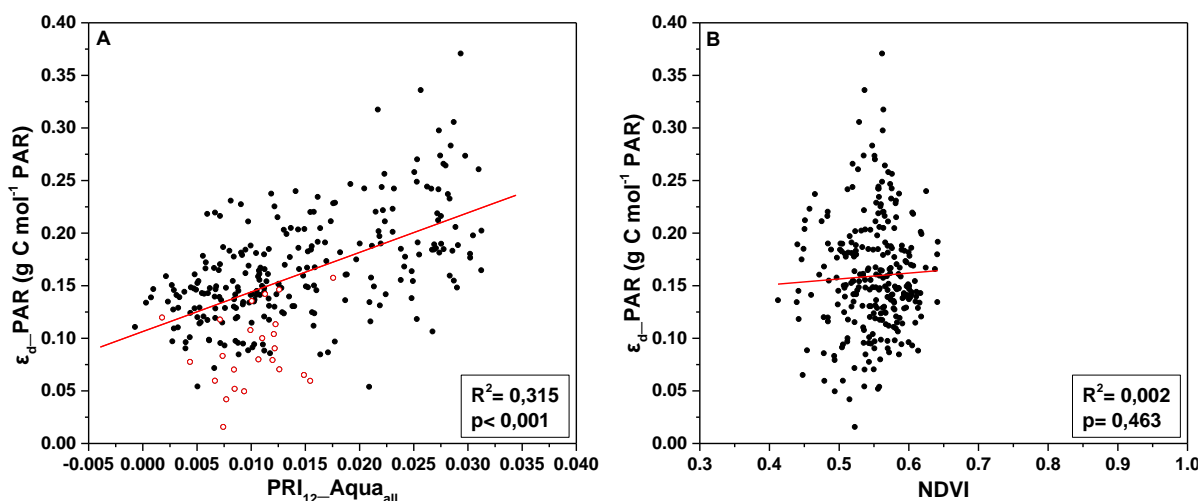
Ο PRI χωρίς κριτήρια γωνιών λήψης

Ξεκινώντας με τα πλήρη σύνολα των PRI και τη σχέση τους με τις ημερήσιες τιμές αποδοτικότητας (ϵ_d), προκύπτει πως όλοι οι συνδυασμοί δίνουν στατιστικώς σημαντικές συσχετίσεις ($p < 0,001$), αν και οι σχέσεις σε όλες τις περιπτώσεις είναι ασθενείς (Πίνακας 28) με τον R^2 να κυμαίνεται μεταξύ 0,218 (PRI₁₂_Terra_{all}) ως 0,315 (PRI₁₂_Aqua_{all}). Το κανάλι 12 φαίνεται να αποδίδει καλύτερα ως κανάλι αναφοράς στη συγκεκριμένη περιοχή, με τα άλλα δυο κανάλια ωστόσο, να υπερτερούν σε μεμονωμένες περιπτώσεις. Επιπλέον, οι PRI που υπολογίστηκαν από δεδομένα Aqua έχουν την καλύτερη σχέση με την αποδοτικότητα, σε όλες τις περιπτώσεις (πέντε παραλλαγές της ϵ_d), συγκρινόμενοι με αυτούς που υπολογίστηκαν από τον Terra και τη μίξη των δυο (Both). Τέλος, ο PRI φαίνεται να σχετίζεται εντονότερα με την αποδοτικότητα υπολογισμένη με τιμές PAR (ϵ_d_PAR) παρά με τις μορφές της που χρησιμοποιούν τιμές APAR.

Πίνακας 28. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) των συσχετίσεων των διάφορων τύπων PRI με τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές αποδοτικότητας χρήσης φωτός. Οι τιμές του συντελεστή RMSE ($g\ C\ mol^{-1}\ PAR$ ή APAR) αφορούν τις μετρημένες και τις μοντελοποιημένες (βάση της αντίστοιχης σχέσης του PRI με την ϵ) τιμές αποδοτικότητας. Οι μέθοδοι 1 και 2 αφορούν την μέθοδο υπολογισμού της APAR. Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.

	Μέθοδος 1						Μέθοδος 2			
	ϵ_d_PAR		$\epsilon_d_APAR_{Terra}$		$\epsilon_d_APAR_{Aqua}$		$\epsilon_d_APAR_{Terra}$		$\epsilon_d_APAR_{Aqua}$	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
PRI ₁₂ _Terra _{all}	0,218	0,047	0,198	0,056	0,210	0,056	0,145	0,050	0,144	0,050
PRI ₁₃ _Terra _{all}	0,245	0,047	0,185	0,057	0,183	0,058	0,153	0,051	0,147	0,051
PRI ₁ _Terra _{all}	0,241	0,046	0,184	0,056	0,180	0,057	0,150	0,050	0,142	0,051
PRI ₁₂ _Aqua _{all}	0,315	0,045	0,287	0,053	0,290	0,056	0,221	0,049	0,214	0,050
PRI ₁₃ _Aqua _{all}	0,292	0,045	0,226	0,055	0,224	0,058	0,189	0,050	0,183	0,051
PRI ₁ _Aqua _{all}	0,311	0,045	0,244	0,054	0,244	0,057	0,207	0,049	0,201	0,050
PRI ₁₂ _Both _{all}	0,259	0,046	0,237	0,054	0,244	0,056	0,178	0,050	0,174	0,050
PRI ₁₃ _Both _{all}	0,266	0,046	0,204	0,056	0,201	0,058	0,170	0,051	0,164	0,051
PRI ₁ _Both _{all}	0,273	0,045	0,212	0,055	0,209	0,057	0,176	0,050	0,170	0,051

Συνολικά, η καλύτερη σχέση είναι μεταξύ του PRI₁₂_Aqua_{all} και της ϵ_d_PAR (Σχήμα 24A). Τα ανοιχτά κόκκινα σημεία ($n=24$) στο Σχήμα 24A αντιστοιχούν στις ημέρες του καλοκαιριού (Ιούνιος έως Αύγουστος) του 2003, το οποίο ήταν εξαιρετικά ξηρό. Παρότι και οι δυο παράμετροι εμφανίζουν χαμηλές τιμές την περίοδο αυτή, η μεν αποδοτικότητα είναι στα χαμηλότερα επίπεδα της σε αντίθεση με τον PRI. Η ασθενής σχέση μεταξύ των δυο θα πρέπει να συγκρίνεται με την παντελή έλλειψη σχέσης μεταξύ της αποδοτικότητας και του NDVI υπολογισμένου και από τους δυο αισθητήρες (Terra $R^2=0,002$, $p=0,397$ και Aqua $R^2=0,002$, $p=0,463$ - Σχήμα 24B).

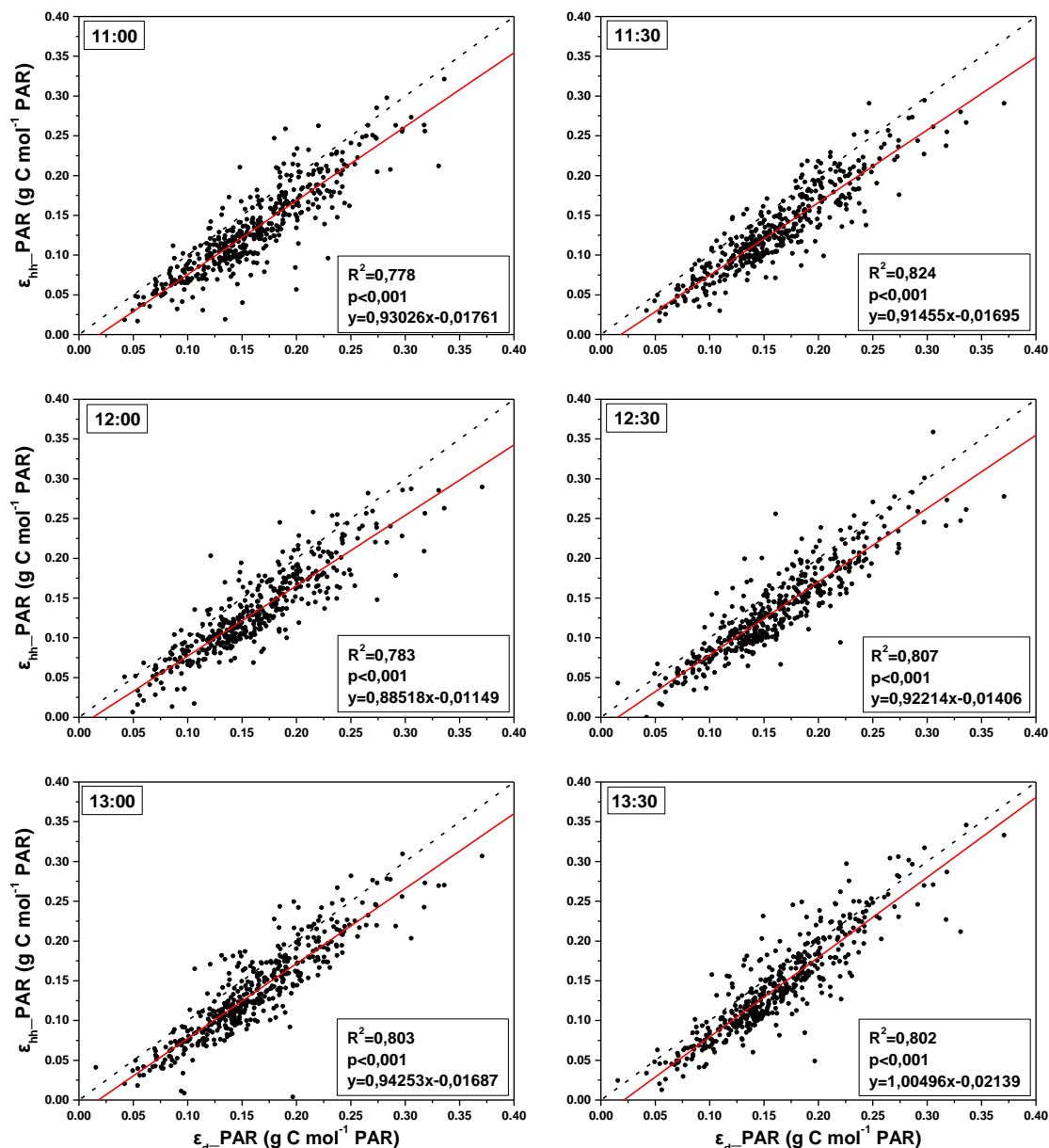


Σχήμα 24. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ημερήσιας αποδοτικότητας (ϵ_d_PAR) και των PRI₁₂_Aqua_{all} (A) και NDVI από δεδομένα του Aqua (B). Τα ανοιχτά κόκκινα σημεία (A) αφορούν την περίοδο του ιδιαίτερα ξηρού καλοκαιριού του 2003.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η πιθανή επίδραση της ώρας διέλευσης του αισθητήρα από την περιοχή μελέτης, στη σχέση του PRI με την ϵ . Αυτό πραγματοποιήθηκε πρώτον, συγκρίνοντας τις ημίωρες τιμές αποδοτικότητας (ϵ_{hh_PAR}) με τις αντίστοιχες ημερήσιες (ϵ_d_PAR) και δεύτερον, αναλύοντας τη σχέση των PRI με την αποδοτικότητα κατά την ώρα διέλευσης (ϵ_{ov}) κάθε αισθητήρα.

Εξετάστηκαν έξι ημίωρα από τις 11:00 έως τις 14:00, τα οποία καλύπτουν τη περίοδο διέλευσης των δύο αισθητήρων, που ξεκινά με τις λήψεις του Terra (11:00 με 12:00, τοπική ώρα) και κλείνει με αυτές του Aqua (13:00 με 14:00, τοπική ώρα), ενώ περιλαμβάνουν και το κρίσιμο διάστημα του τοπικού μεσημεριού. Οι τιμές αποδοτικότητας (ϵ_{hh_PAR}) των έξι αυτών ημιώρων, για τις ημέρες που υπήρχαν λήψεις από τους δυο αισθητήρες, συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές (ϵ_d_PAR), ώστε να εξεταστεί το κατά πόσον κάθε ημίωρο ϵ είναι αντιπροσωπευτική της ημερήσιας αποδοτικότητας.

Και οι έξι ϵ_{hh_PAR} που εξετάστηκαν, συσχετίζονται καλά με την ϵ_d_PAR , με συντελεστή προσδιορισμού (R^2) μεταξύ 0,778 και 0,824 (και $p < 0,001$) και τιμές κοντά στη γραμμή 1 προς 1 (Σχήμα 25). Ωστόσο, οι ϵ_{hh_PAR} κατά την ώρα διέλευσης του Aqua (13:00 με 14:00, τοπική ώρα) είναι πιο κοντά στη γραμμή 1 προς 1 (κλίσεις κοντά στο 1) από τις αντίστοιχες κατά την ώρα διέλευσης του Terra (11:00 με 12:00, τοπική ώρα), γεγονός που μπορεί να εξηγεί το λόγο που ο PRI του Aqua έχει καλύτερη σχέση με την ημερήσια αποδοτικότητα, για τη συγκεκριμένη περιοχή. Σε κάθε περίπτωση, και οι έξι ημίωρες ϵ (ϵ_{hh_PAR}) που εξετάστηκαν, έχουν χαμηλότερες τιμές από την ημερήσια ϵ (ϵ_d_PAR) και κανένα ημίωρο δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα αντιπροσωπευτικό για το σύνολο της ημέρας.



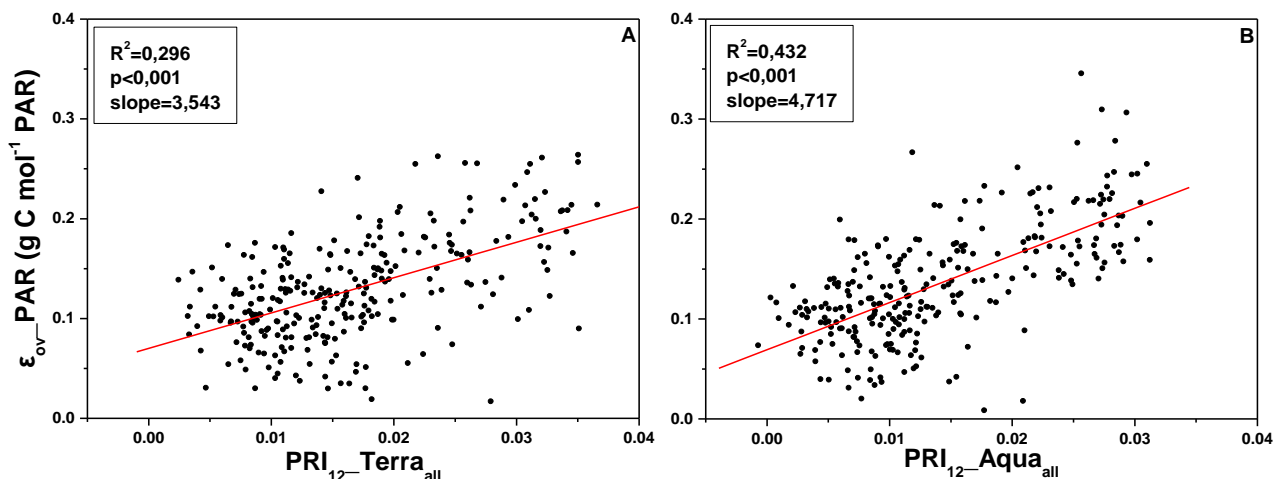
Σχήμα 25. Οι γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των ημώρων τιμών αποδοτικότητας (ϵ_{hh_PAR}) και των αντίστοιχων ημερήσιων (ϵ_{d_PAR}). Η ώρα έναρξης του εκάστοτε ημώρου δίνεται στην αριστερή πάνω γωνία του αντίστοιχου διαγράμματος. Η διακεκομμένη γραμμή είναι η γραμμή 1 προς 1.

Όσον αφορά τη σχέση των PRI με την αποδοτικότητα κατά την στιγμή (ημώρο) διέλευσης (ϵ_{ov}) κάθε αισθητήρα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 29 τα αποτελέσματα για την ϵ υπολογισμένη βάση της PAR (ϵ_{ov_PAR}), με τις άλλες τέσσερις εκδοχές της να εμφανίζουν αντίστοιχα αποτελέσματα, με χαμηλότερους R^2 και παρόμοιους RMSE. Διευκρινίζεται πως η ϵ_{ov} κάθε αισθητήρα δεν συμπίπτει με μια συγκεκριμένη ϵ_{hh} , αφού οι λήψεις κάθε αισθητήρα πραγματοποιούνται σε δυο διαφορετικά ημώρα. Οι συσχετίσεις των PRI του Aqua και του Both με την ϵ_{ov_PAR} είναι βελτιωμένες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες με την ϵ_{d_PAR} , για όλα τα κανάλια αναφοράς, με τον PRI_{12} να εμφανίζει την μεγαλύτερη βελτίωση (Πίνακας 29). Στην περίπτωση του PRI του Terra, η σχέση του με την ϵ_{ov_PAR} βελτιώνεται μόνο με το κανάλι 12 ως κανάλι αναφοράς, με τον $PRI_{1_Terra_all}$ να μεταβάλλεται ελάχιστα (R^2 0,244 από 0,241). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 26, στην περίπτωση της ϵ_{ov}

ο PRI₁₂ του Aqua αποδίδει πολύ καλύτερα από αυτόν του Terra (R^2 0,432 έναντι 0,296), με τις κλίσεις των ευθειών των δυο γραμμικών συσχετίσεων να διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (ANCOVA, $p < 0,001$). Η καλύτερη απόδοση του PRI του Aqua, τόσο με την ημερήσια (ϵ_d) όσο και με την αποδοτικότητα κατά την διέλευση (ϵ_{ov}), και η καλύτερη σχέση των ημίωρων ϵ (ϵ_{hh}) της περιόδου διέλευσης του Aqua με τις ημερήσιες (ϵ_d), καθιστούν τον PRI του Aqua τον καταλληλότερο για την συγκεκριμένη περιοχή.

Πίνακας 29. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) των συσχετίσεων των διάφορων τύπων PRI με τις αντίστοιχες ημερήσιες και ημίωρες (ημίωρο διέλευσης) τιμές αποδοτικότητας χρήσης φωτός. Οι τιμές του συντελεστή RMSE ($g\ C\ mol^{-1}\ PAR$) αφορούν τις μετρημένες και τις μοντελοποιημένες (βάση της αντίστοιχης σχέσης του PRI με την ϵ) τιμές αποδοτικότητας. Όλες οι συσχετίσεις έχουν $p < 0,001$.

	ϵ_d_PAR		ϵ_{ov_PAR}	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
PRI ₁₂ _Terra _{all}	0,218	0,047	0,296	0,044
PRI ₁₃ _Terra _{all}	0,245	0,047	0,237	0,047
PRI ₁ _Terra _{all}	0,241	0,046	0,244	0,045
PRI ₁₂ _Aqua _{all}	0,315	0,045	0,432	0,044
PRI ₁₃ _Aqua _{all}	0,292	0,045	0,356	0,046
PRI ₁ _Aqua _{all}	0,311	0,045	0,381	0,045
PRI ₁₂ _Both _{all}	0,259	0,046	0,343	0,045
PRI ₁₃ _Both _{all}	0,266	0,046	0,286	0,047
PRI ₁ _Both _{all}	0,273	0,045	0,301	0,046



Σχήμα 26. Οι γραμμικές συσχετίσεις των ημίωρων τιμών αποδοτικότητας κατά την διέλευση του αισθητήρα (ϵ_{ov_PAR}) με τον PRI₁₂_Terra_{all} (A) και τον PRI₁₂_Aqua_{all} (B). Οι κλίσεις των δυο ευθειών διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (ANCOVA $p < 0,001$).

Ο PRI και οι γωνίες λήψης

Όπως αναλύθηκε ήδη, οι λήψεις που χρησιμοποιήθηκαν για των υπολογισμό του PRI κατηγοριοποιήθηκαν σε υποσύνολα βάσει των γωνιών λήψης, δηλαδή τη θέση του αισθητήρα και του ήλιου σε σχέση με την περιοχή μελέτης. Για καθένα από τα αρχικά σύνολα PRI (Terra, Aqua

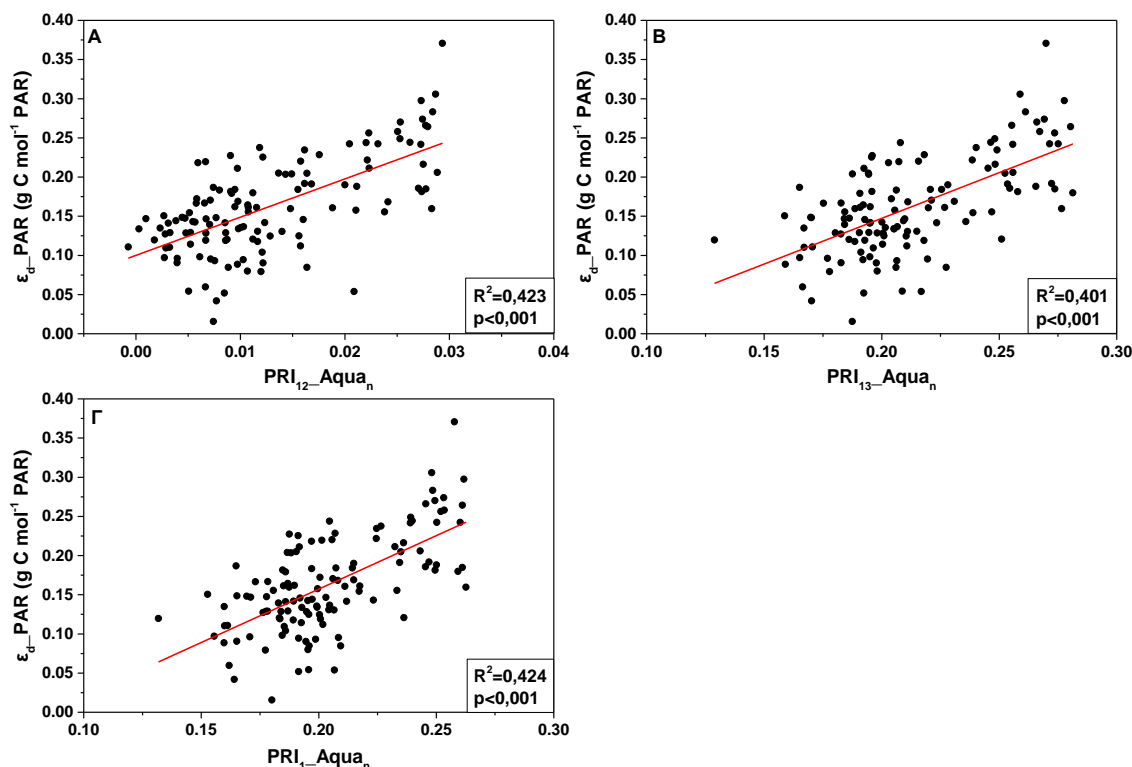
και Both, με τρία κανάλια αναφοράς το καθένα) δημιουργήθηκαν εννέα υποσύνολα γωνιών λήψης, σύμφωνα με τα κριτήρια που δίνονται στον Πίνακα 16. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται η διερεύνηση της επίδρασης των γωνιών λήψης στη σχέση του PRI με την ε σε επίπεδο οικοσυστήματος. Τα βασικά ευρήματα που αφορούν στον PRI χωρίς κριτήρια λήψης επαληθεύονται για όλα τα υποσύνολα του PRI. Σε όλες τις περιπτώσεις ο PRI συσχετίζεται καλύτερα με την αποδοτικότητα που υπολογίζεται βάση της PAR, έναντι των τύπων που χρησιμοποιούν την APAR, ως εκ τούτου μόνο τα αποτελέσματα με την πρώτη μορφή παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακες 30 και 31, για τις ε_d και ε_{on} , αντίστοιχα). Οι τέσσερις άλλες μορφές της αποδοτικότητας (με την APAR από τους δυο αισθητήρες και με τις δυο μεθόδους υπολογισμού), έχουν αντίστοιχα αποτελέσματα με χαμηλότερους R^2 .

Ξεκινώντας με την ημερήσια αποδοτικότητα (ε_d_PAR), ο PRI του Aqua αποδίδει καλύτερα από αυτούς του Terra και Both, με κάποιες εξαιρέσεις στις backscatter λήψεις (Πίνακας 30). Από τα τρία κανάλια αναφοράς, ο PRI_{12} έχει την πιο σταθερή απόδοση μεταξύ των διαφορετικών υποσυνόλων, με τους άλλους δυο (PRI_{13} και PRI_1) ωστόσο, να έχουν καλύτερη απόδοση για συγκεκριμένα υποσύνολα λήψης, γεγονός που πιθανόν να σημαίνει πως οι γωνίες λήψης ίσως καθορίζουν το βέλτιστο κανάλι αναφοράς. Όσον αφορά τις γωνίες λήψης, παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των Terra, Aqua και Both PRI. Ενώ στον Aqua μονάχα οι nadir PRI αποδίδουν καλύτερα από τους all angles PRI, στον Terra οι nadir PRI έχουν ασθενέστερη σχέση με την ημερήσια ε (ε_d_PAR) από τους all angles PRI. Στον Terra, τόσο οι backscatter όσο και οι forward scatter PRI αποδίδουν καλύτερα από τους all angles PRI, με τους πρώτους να παρουσιάζουν ελαφρώς ισχυρότερες συσχετίσεις από τους δεύτερους. Τέλος, στην περίπτωση του Both PRI, και οι τρεις κατηγορίες λήψης βελτιώνουν τη συσχέτιση του PRI με την ε , σε σχέση με τους all angles PRI, με την απόδοση τους να είναι παρόμοια.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι backscatter και forward scatter PRIs έχουν παρόμοια απόδοση, με τα αυστηρά κριτήρια κατάταξης να αποδυναμώνουν τη σχέση του PRI με την ε_d και στις δυο κατηγορίες (Πίνακας 30). Περιέργως, για καθεμία από τις κατηγορίες backscatter και forward scatter, την καλύτερη απόδοση έχει το υποσύνολο εκείνο που καταχρηστικά κατατάσσεται στην αντίστοιχη κατηγορία, έχοντας πολύ ευρεία κριτήρια κατάταξης (backscatter με $|RAA| < 120$ και forward με $|RAA| > 60$). Από όλους τους τύπους PRI την καλύτερη σχέση με την ημερήσια ε (ε_d_PAR) έχουν οι nadir PRI του Aqua ($PRI_{x_Aqua_n}$), με τους $PRI_{12_Aqua_n}$ και $PRI_{1_Aqua_n}$ να έχουν παρόμοια απόδοση, ελαφρώς ισχυρότερη από τον $PRI_{13_Aqua_n}$. Όλες οι συσχετίσεις έχουν συντελεστή προσδιορισμού (R^2) μεγαλύτερο από 0,4 με επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$ (Σχήμα 27).

Πίνακας 30. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) των γραμμικών συσχετίσεων της ημερήσιας αποδοτικότητας (ε_d_PAR) με τους διάφορους τύπους PRI. Οι **bold** αριθμοί αντιστοιχούν σε συσχετίσεις με επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$, ενώ οι *italics* σε συσχετίσεις με $p < 0,05$. Τα γκρι κελιά αφορούν στην καλύτερη συσχέτιση ανά αισθητήρα (Terra, Aqua, Both).

Συνθήκες λήψης	Κριτήρια	Αριθμός λήψεων	ε_d_PAR		
			PRI ₁₂	PRI ₁₃	PRI ₁
Terra					
All angles	Κανένα	278	0,218	0,245	0,241
Nadir	VZA < 15	98	0,152	0,188	0,198
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	129	0,341	0,348	0,329
	VZA > 15, RAA < 90	111	0,304	0,294	0,289
	VZA > 15, RAA < 60	89	0,281	0,186	0,191
	RZA < 10, RAA < 60	50	0,006	0,044	0,018
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	91	0,252	0,344	0,312
	VZA > 15, RAA > 90	69	0,310	0,337	0,302
	VZA > 15, RAA > 120	51	0,065	0,024	0,014
	RZA < 10, RAA > 60	37	0,003	0,017	0,007
Aqua					
All angles	Κανένα	273	0,315	0,292	0,311
Nadir	VZA < 15	124	0,423	0,402	0,424
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	96	0,262	0,194	0,223
	VZA > 15, RAA < 90	78	0,271	0,201	0,229
	VZA > 15, RAA < 60	62	0,287	<i>0,140</i>	0,179
	RZA < 10, RAA < 60	36	0,077	0,099	<i>0,128</i>
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	87	0,290	0,305	0,307
	VZA > 15, RAA > 90	71	0,284	0,302	0,311
	VZA > 15, RAA > 120	53	0,198	0,288	0,283
	RZA < 10, RAA > 60	36	0,029	<i>0,141</i>	<i>0,137</i>
Both					
All angles	Κανένα	551	0,259	0,266	0,273
Nadir	VZA < 15	222	0,287	0,293	0,312
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	225	0,306	0,278	0,282
	VZA > 15, RAA < 90	189	0,286	0,249	0,259
	VZA > 15, RAA < 60	151	0,254	0,157	0,180
	RZA < 10, RAA < 60	86	0,014	<i>0,047</i>	0,037
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	178	0,265	0,324	0,307
	VZA > 15, RAA > 90	140	0,282	0,308	0,290
	VZA > 15, RAA > 120	104	<i>0,084</i>	0,143	0,131
	RZA < 10, RAA > 60	73	0,003	<i>0,060</i>	0,051

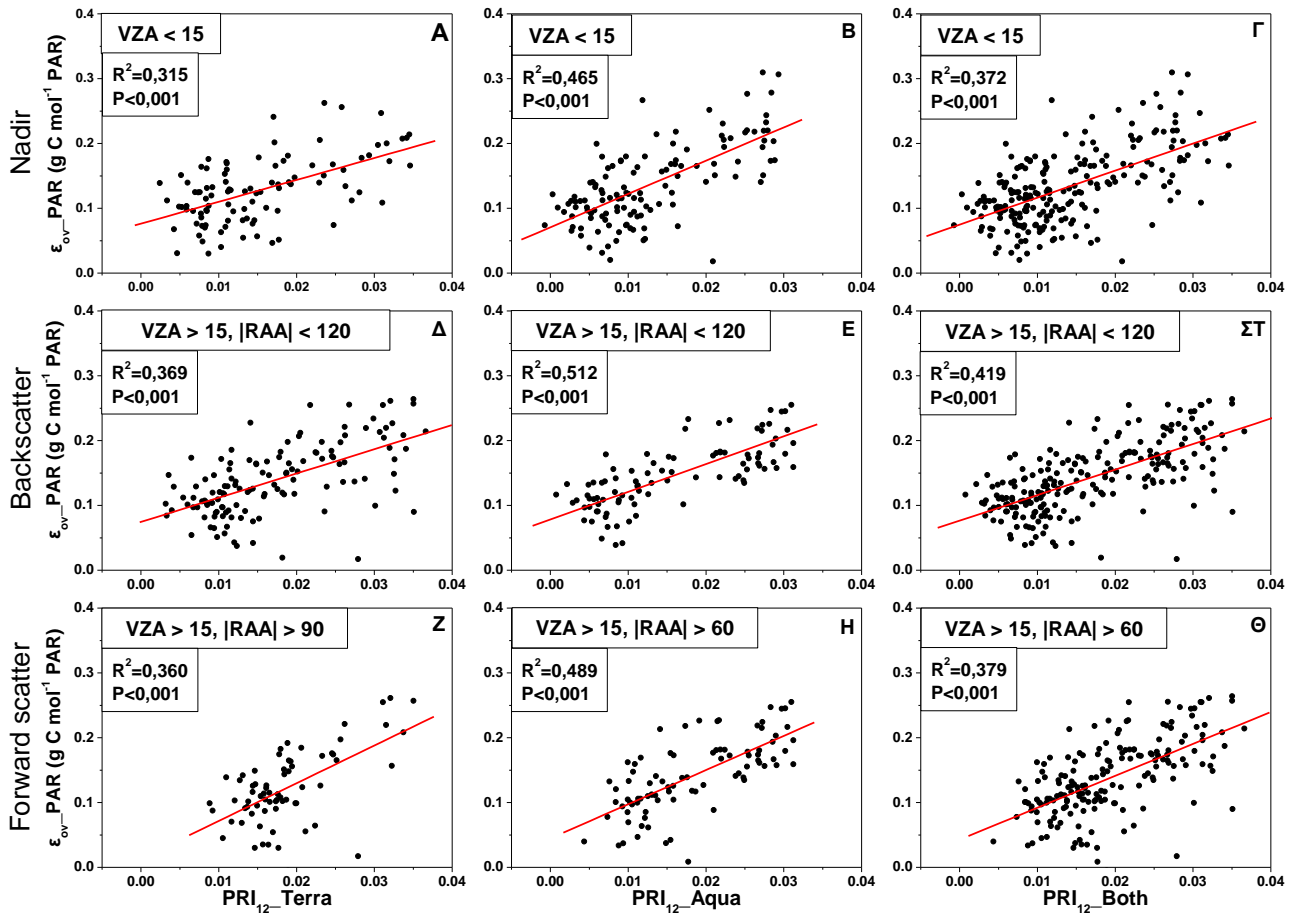


Σχήμα 27. Γραμμικές συσχετίσεις της ημερήσιας αποδοτικότητας (ϵ_d_PAR) με τον $PRI_{12_Aqua_n}$ (A), τον $PRI_{13_Aqua_n}$ (B) και τον $PRI_{1_Aqua_n}$ (Γ). Οι τρεις αυτοί PRI έχουν τις ισχυρότερες συσχετίσεις με την ϵ_d_PAR , από όλους του τύπους που εξετάστηκαν (Πίνακας 30). Προσοχή στη διαφορετική κλίμακα των αξόνων x.

Στην περίπτωση της ημίωρης αποδοτικότητας κατά την διέλευση του αισθητήρα (ϵ_{ov_PAR}), ο PRI του Aqua αποδίδει πολύ καλύτερα από τους PRI του Terra και του Both για όλα τα υποσύνολα (γωνιών λήψης) και όλα τα κανάλια αναφοράς (Πίνακας 31). Ο PRI_{12} αποδίδει καλύτερα από τους άλλους δυο, σχεδόν για κάθε υποσύνολο, και έχει μια σχετικά σταθερή απόδοση μεταξύ των διάφορων συνθηκών λήψης. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση της ημερήσιας αποδοτικότητας (ϵ_d_PAR) έτσι και με την ϵ_{ov_PAR} , όσο αυστηρότερα τα κριτήρια κατάταξης στα υποσύνολα backscatter και forward scatter, τόσο ασθενέστερη η σχέση μεταξύ PRI και ϵ . Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση της ϵ_{ov_PAR} , οι PRI και των τριών κατηγοριών λήψης (nadir, backscatter και forward scatter) παράγουν ισχυρές συσχετίσεις (Πίνακας 31), μάλιστα οι ισχυρότερες συσχετίσεις κάθε αισθητήρα (Terra, Aqua και Both) προέρχονται και από τις τρεις κατηγορίες (Σχήμα 28). Από το σύνολο των διαφορετικών τύπων PRI και ϵ που εξετάστηκαν, η ισχυρότερη συσχέτιση βρέθηκε μεταξύ του $PRI_{12_Aqua_b}$ ($VZA > 15$, $|RAA| < 120$) και της ϵ_{ov_PAR} με $R^2 = 0,512$ ($p < 0,001$).

Πίνακας 31. Οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2) των γραμμικών συσχετίσεων της ημίωρης αποδοτικότητας κατά την διέλευση (ϵ_{ov_PAR}) με τους διάφορους τύπους PRI. Οι **bold** αριθμοί αντιστοιχούν σε συσχετίσεις με επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,001$, ενώ οι *italics* σε συσχετίσεις με $p < 0,05$. Τα γκρι κελιά αφορούν στην καλύτερη συσχέτιση ανά αισθητήρα (Terra, Aqua, Both).

Συνθήκες λήψης	Κριτήρια	Αριθμός λήψεων	ϵ_{ov_PAR}		
			PRI ₁₂	PRI ₁₃	PRI ₁
Terra					
All angles	Κανένα	278	0,296	0,237	0,244
Nadir	VZA < 15	98	0,315	0,220	0,236
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	129	0,369	0,289	0,283
	VZA > 15, RAA < 90	111	0,328	0,249	0,254
	VZA > 15, RAA < 60	89	0,280	0,120	0,130
	RZA < 10, RAA < 60	50	<0,001	0,023	0,006
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	91	0,321	0,353	0,338
	VZA > 15, RAA > 90	69	0,360	0,301	0,282
	VZA > 15, RAA > 120	51	0,072	0,014	0,013
	RZA < 10, RAA > 60	37	0,008	0,004	0,001
Aqua					
All angles	Κανένα	273	0,432	0,356	0,381
Nadir	VZA < 15	124	0,465	0,449	0,472
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	96	0,512	0,341	0,381
	VZA > 15, RAA < 90	78	0,473	0,304	0,351
	VZA > 15, RAA < 60	62	0,397	0,170	0,212
	RZA < 10, RAA < 60	36	0,081	0,090	0,117
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	87	0,489	0,376	0,392
	VZA > 15, RAA > 90	71	0,434	0,318	0,329
	VZA > 15, RAA > 120	53	0,162	0,195	0,201
	RZA < 10, RAA > 60	36	0,019	0,109	0,115
Both					
All angles	Κανένα	551	0,343	0,286	0,301
Nadir	VZA < 15	222	0,372	0,326	0,347
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	225	0,419	0,298	0,311
	VZA > 15, RAA < 90	189	0,374	0,264	0,283
	VZA > 15, RAA < 60	151	0,292	0,142	0,164
	RZA < 10, RAA < 60	86	0,006	0,037	0,027
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	178	0,379	0,346	0,349
	VZA > 15, RAA > 90	140	0,361	0,299	0,299
	VZA > 15, RAA > 120	104	0,074	0,105	0,107
	RZA < 10, RAA > 60	73	<0,001	0,033	0,034



Σχήμα 28. Οι ισχυρότερες γραμμικές συσχετίσεις για κάθε αισθητήρα (Terra, Aqua και Both), των PRI₁₂ με την ε_{ov}_PAR (Πίνακες 31). Τα διαγράμματα Α-Γ αφορούν τους nadir PRI, τα διαγράμματα Δ-ΣΤ αφορά τους backscatter PRI και τα διαγράμματα Ζ-Θ αφορούν τους forward scatter PRI. Τα κριτήρια κατηγορίας λήψης κάθε PRI δίνονται στην αριστερή πάνω γωνία.

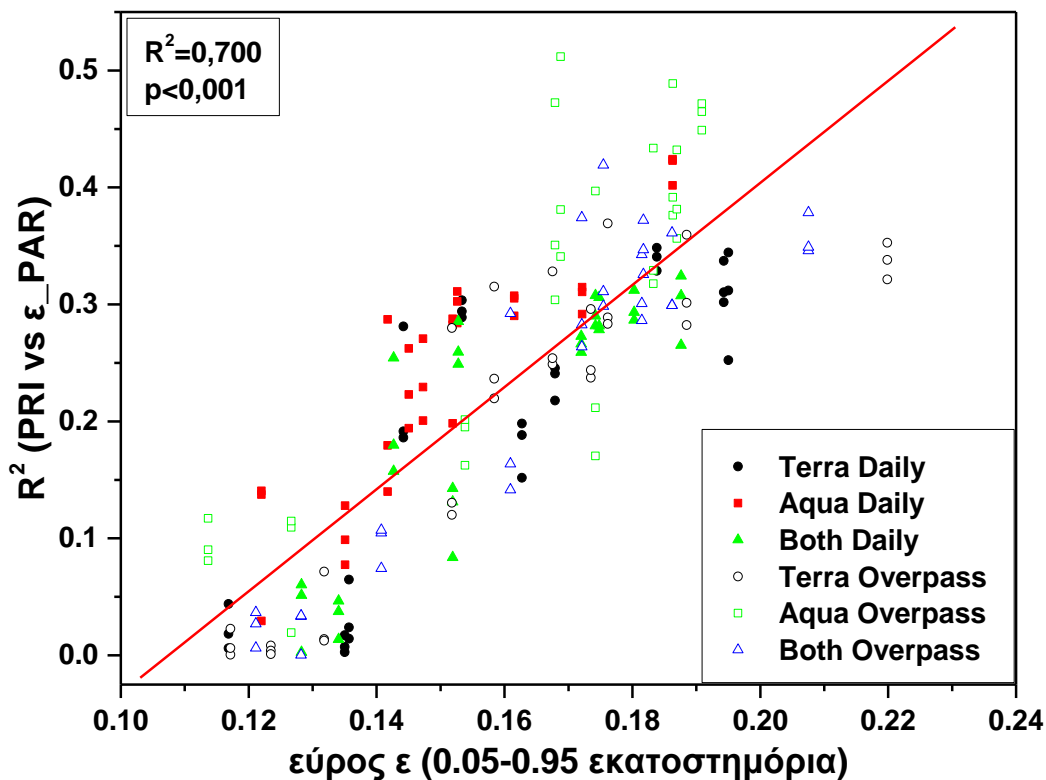
Το εύρος τιμών της ε

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω όσον αφορά τον PRI του MODIS, είναι εμφανές πως υπάρχουν αντικρουόμενα ευρήματα μεταξύ των διάφορων συνδυασμών PRI και ε (Πίνακες 30 και 31), όπως παραδείγματος χάρι η διαφορετική επίδοση των nadir PRI μεταξύ του Aqua και του Terra, ειδικά στην περίπτωση της ημερήσιας ε (ε_d). Μια πιθανή αιτία για τις διαφορές που παρατηρούνται θα μπορούσε να είναι το εύρος τιμών της ε που αντιστοιχεί σε κάθε συνδυασμό, καθώς ένα σύνολο τιμών ε που εμφανίζει μικρό εύρος, λογικά αντιστοιχεί σε μικρές αλλαγές στον κύκλο των ξανθοφυλλών, οι οποίες δύσκολα ανιχνεύονται από τον PRI. Κάθε συνδυασμός PRI (αισθητήρας, γωνίες λήψης) και ε (ε_d_PAR, ε_{ov}_PAR) περιλαμβάνει συγκεκριμένες τιμές ε, λόγω των διαφορετικών ημερών και ωρών λήψης που περιλαμβάνει κάθε σύνολο PRI. Στον Πίνακα 32 παρουσιάζεται το εύρος τιμών της ε (0,05 με 0,95 εκατοστημόρια, για την αποφυγή ακραίων τιμών) για τα διαφορετικά σύνολα και υποσύνολα PRI. Για να εξεταστεί η επίδραση του εύρους τιμών της ε στην ισχύ της σχέσης PRI και ε, το εύρος που αντιστοιχεί σε κάθε PRI αντιπαραβάλλεται με τον συντελεστή προσδιορισμού (R²) της αντίστοιχης γραμμικής συσχέτισης PRI (και για τα τρία κανάλια αναφοράς) και ε (Σχήμα 29). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 29, το εύρος τιμών της ε συνδέεται με μια ισχυρή γραμμική σχέση (R² = 0,700) με τον αντίστοιχο R², με τον συντελεστή να αυξάνεται όσο

διευρύνεται το εύρος τιμών της ε . Είναι εμφανές πως το εύρος τιμών της ε που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες λήψεις PRI, είναι κρίσιμο για την ισχύ της σχέσης του PRI με την ε και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων και στη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων (και συνόλων) PRI.

Πίνακας 32. Το εύρος τιμών (εκατοστημόρια μεταξύ 0,05 και 0,95) της αποδοτικότητας ($g C mol^{-1} PAR$) που αντιστοιχεί σε κάθε σύνολο PRI.

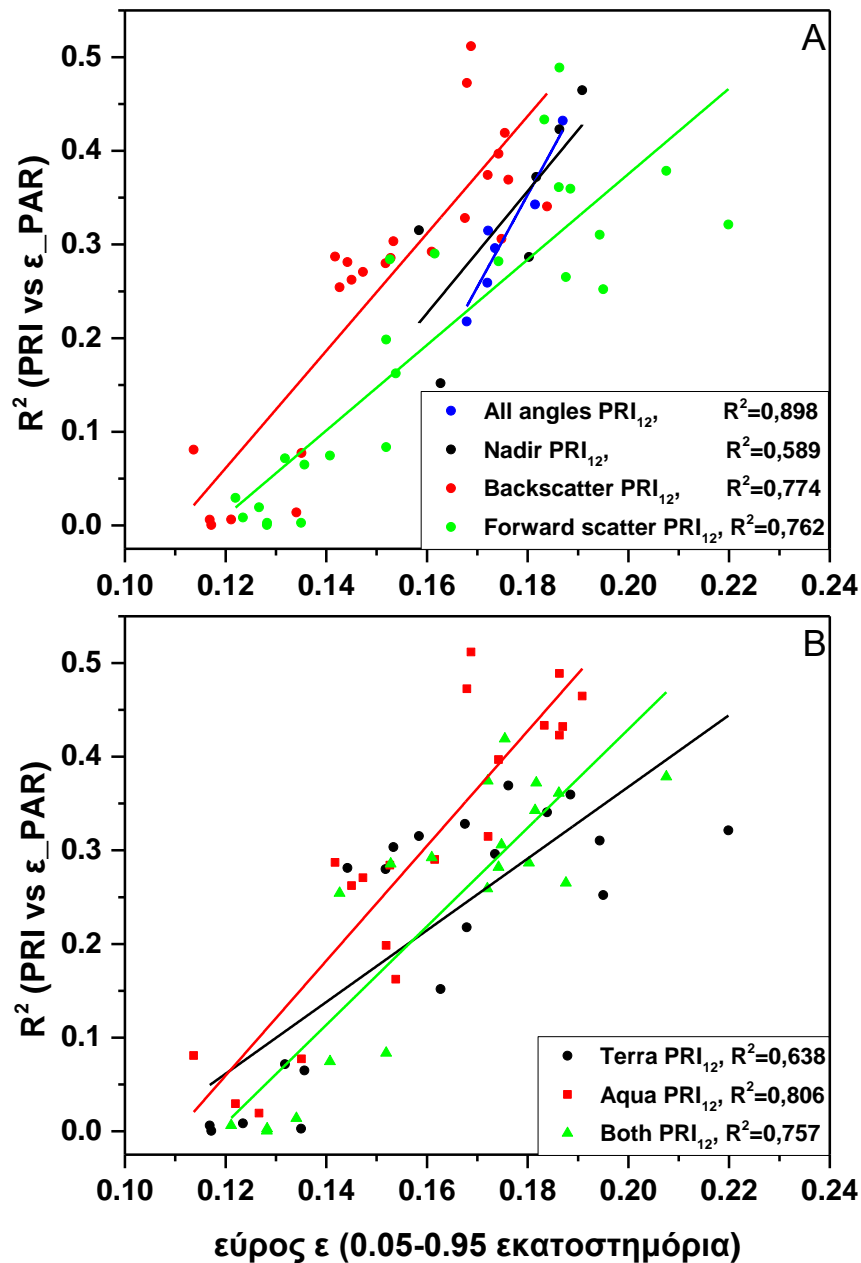
Συνθήκες λήψης	Κριτήρια	Terra		Aqua		Both	
		ε_d_PAR	ε_{ov_PAR}	ε_d_PAR	ε_{ov_PAR}	ε_d_PAR	ε_{ov_PAR}
All angles	Κανένα	0,168	0,173	0,172	0,187	0,172	0,181
Nadir	VZA < 15	0,163	0,158	0,186	0,191	0,180	0,182
Backscatter	VZA > 15, RAA < 120	0,184	0,176	0,145	0,169	0,175	0,175
	VZA > 15, RAA < 90	0,153	0,168	0,147	0,168	0,153	0,172
	VZA > 15, RAA < 60	0,144	0,152	0,142	0,174	0,143	0,161
	RZA < 10, RAA < 60	0,117	0,117	0,135	0,114	0,134	0,121
Forward scatter	VZA > 15, RAA > 60	0,195	0,220	0,162	0,186	0,188	0,208
	VZA > 15, RAA > 90	0,194	0,188	0,153	0,183	0,174	0,186
	VZA > 15, RAA > 120	0,136	0,132	0,152	0,154	0,152	0,141
	RZA < 10, RAA > 60	0,135	0,123	0,122	0,127	0,128	0,128



Σχήμα 29. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ του εύρους τιμών (εκατοστημόρια μεταξύ 0,05 και 0,95) της αποδοτικότητας (ε_d_PAR και ε_{ov_PAR}) με τους συντελεστές προσδιορισμού (R^2) των αντίστοιχων συσχετίσεων PRI και ε . Αφορά σε όλους τους τύπους PRI του Πίνακα 19, δηλαδή και των τριών αισθητήρων (Terra, Aqua, Both), και των τριών καναλιών αναφοράς (12, 13, 1), για όλες τις κατηγορίες γωνιών λήψης (All angles, Nadir, Backscatter, Forward scatter).

Βάσει του παραπάνω, κρίθηκε σκόπιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα (συντελεστής προσδιορισμού της σχέσης PRI και ϵ) των διαφορετικών κατηγοριών λήψης σε σχέση με το εύρος τιμών ϵ που αντιστοιχεί σε καθεμία. Στο Σχήμα 30Α παρουσιάζεται η εξάρτηση του R^2 της σχέσης των PRI_{12} με την ϵ (ϵ_d_PAR και ϵ_{ov_PAR}) από το αντίστοιχο εύρος τιμών της ϵ (0,05 με 0,95 εκατοστημόρια), ανά κατηγορία λήψης. Διευκρινίζεται πως στην περίπτωση των backscatter και forward scatter, τα τέσσερα υποσύνολα κάθε κατηγορίας εξετάζονται μαζί. Και για τις τέσσερις κατηγορίες λήψης (all, nadir, backscatter και forward scatter) το εύρος τιμών της ϵ συσχετίζεται γραμμικά με τους αντίστοιχους R^2 (των συσχετίσεων PRI και ϵ), με τη συσχέτιση να είναι ισχυρότερη για τον all angles PRI ($R^2 = 0,898$) και ασθενέστερη για τον nadir ($R^2 = 0,589$). Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη το εύρος τιμών της ϵ , οι backscatter PRI φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα από αυτούς των άλλων κατηγοριών λήψης (all, nadir και forward scatter), καθώς για το ίδιο εύρος τιμών ϵ αποδίδουν συσχετίσεις (μεταξύ του PRI και της ϵ) με υψηλότερο R^2 , ενώ στον αντίποδα οι forward scatter PRI υστερούν έναντι όλων, συμπεριλαμβανόμενων των all angles PRI. Το επίπεδο σημαντικότητας των παραπάνω διαφορών εξετάστηκε με την μέθοδο ANCOVA, και μόνον οι διαφορές των backscatter PRI με τα υπόλοιπα αποδείχθηκαν στατιστικώς σημαντικές ($p < 0,05$ και στις τρεις περιπτώσεις).

Αντίστοιχα, συγκρίθηκαν και οι PRI_{12} των τριών αισθητήρων (Terra, Aqua και Both) σε σχέση με το εύρος της ϵ που αντιστοιχεί στον καθένα. Αρχικά, η σχέση του εύρους τιμών της ϵ με τον συντελεστή προσδιορισμού (των συσχετίσεων PRI και ϵ) επαληθεύεται και για τους τρεις αισθητήρες, με τη συσχέτιση να είναι ισχυρότερη για τον Aqua PRI ($R^2 = 0,806$) και ασθενέστερη για τον Terra PRI ($R^2 = 0,638$). Από τη σύγκριση των τριών ευθειών προκύπτει πως για τη συγκεκριμένη περιοχή ο PRI του Aqua είναι ο καταλληλότερος (Σχήμα 30B), αποδίδοντας ισχυρότερες συσχετίσεις (μεταξύ PRI και ϵ) για το ίδιο εύρος τιμών της ϵ . Η διαφορά του Aqua PRI είναι στατιστικώς σημαντική (ανάλυση ANCOVA) τόσο από αυτόν του Terra ($p = 0,002$) όσο και από του Both ($p < 0,001$), οι οποίοι δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους ($p = 0,802$). Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη την επίδραση του εύρους τιμών της ϵ , φαίνεται πως οι backscatter λήψεις είναι οι ευνοικότερες για τη σχέση PRI και ϵ , με τον Aqua να αποδίδει καλύτερα από τον Terra.



Σχήμα 30. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ του εύρους τιμών (εκατοστημόρια μεταξύ 0,05 και 0,95) της αποδοτικότητας (ϵ_{d_PAR} και ϵ_{on_PAR}) με τους συντελεστές προσδιορισμού (R^2) των αντίστοιχων συσχετίσεων PRI και ϵ για: (Α) τους PRI_{12} των τεσσάρων κατηγοριών γωνιών λήψης (All angles, Nadir, Backscatter, Forward scatter) και (Β) τους PRI_{12} των τριών αισθητήρων (Terra, Aqua και Both). Στην περίπτωση Α, κάθε κατηγορία γωνιών λήψης περιλαμβάνει τους PRI και των τριών αισθητήρων και αντίστοιχα στην περίπτωση Β, κάθε ομάδα αισθητήρα περιλαμβάνει τους PRI και για τις τέσσερις κατηγορίες λήψεων.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το μοντέλο παραγωγικότητας sCASE

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο sCASE αναπτύχθηκε για τα δασικά οικοσυστήματα της Βόρειας Πίνδου και η παραμετροποίηση του βασίστηκε σε μετρήσεις που έγιναν σε τέσσερα δασικά είδη που κυριαρχούν εντός της περιοχής αυτής (Stagakis et al., 2015). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η πρώτη αξιολόγηση του μοντέλου με δεδομένα από πύργους eddy covariance, της τεχνικής που θεωρείται ως η πιο αξιόπιστη μέτρηση της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP) ενός οικοσυστήματος. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε δεκατρία οικοσυστήματα στην Ευρώπη, το καθένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 1), γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση του μοντέλου και σε οικοσυστήματα πολύ διαφορετικά από αυτά για τα οποία σχεδιάστηκε αρχικά. Από τις δεκατρείς περιοχές μελέτης, οι οκτώ δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα υδατικής καταπόνησης (Σχήμα 2), ενώ οι πέντε που έχουν μεσογειακό κλίμα εμφανίζουν κάποιου βαθμού ξηρασία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Σχήμα 3).

Το sCASE βασίστηκε σε δεδομένα ανακλαστικότητας του MODIS (από τον δορυφόρο Terra) με χωρική ανάλυση 500 μέτρων (MOD09A1) και μετεωρολογικές μετρήσεις από τους πύργους eddy για να υπολογίσει ημερήσιες τιμές GPP σύμφωνα με την εξίσωση 7. Για κάθε περιοχή επιλέχθηκαν ένα έως τέσσερα pixel του MODIS, αντιπροσωπευτικά για την περιοχή γύρω από τον πύργο, από τα οποία υπολογίστηκαν οι δυο βασικοί δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιεί το μοντέλο (NDVI και RDVI). Η αξιολόγηση της ακρίβειας της GPP του sCASE, τόσο του βασικού αλγόριθμου όσο και των διάφορων παραλλαγών που εξετάστηκαν, βασίστηκε σε γραμμικές συσχετίσεις με τις μετρημένες GPP (eddy-GPP) κάθε οικοσυστήματος (συντελεστής προσδιορισμού R^2) και στη ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των τιμών του μοντέλου και των τιμών από την τεχνική eddy covariance (συντελεστής RMSE).

Το μοντέλο sCASE αποδείχθηκε αρκετά ακριβές στις εκτιμήσεις της GPP (μέσος $R^2 = 0,750$ και μέσος $RMSE = 2,317 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), με εξαίρεση τις δυο περιοχές με αιθαλή πλατύφυλλα (Puéchabon και Castelporziano) για τις οποίες η σχέση της μοντελοποιημένης με την μετρημένη GPP είναι ασθενής (Πίνακας 17). Αντίστοιχα, και η ϵ_0 -GPP (GPP υπολογισμένη ως το γινόμενο της ϵ_0 επί την APAR) και η MOD17-GPP (GPP του μοντέλου παραγωγικότητας του MODIS), έχουν τις πιο αδύναμες συσχετίσεις τους με τις eddy-GPP των δύο αυτών περιοχών (Πίνακες 17 και 19, αντίστοιχα). Η χαμηλότερη απόδοση των μοντελοποιημένων GPP στα δυο οικοσυστήματα με αιθαλή πλατύφυλλα που βρέθηκε στην εργασία αυτή, συμφωνεί με τα ευρήματα πλήθους άλλων εργασιών που συγκρίναν την απόδοση διάφορων μοντέλων παραγωγικότητας (όχι μόνο μοντέλων LUE) σε διαφορετικούς τύπους οικοσυστήματος (Raczka et al., 2013; Xie et al., 2020; Yuan et al., 2014a). Συγκεκριμένα, σε μια συγκριτική ανάλυση τεσσάρων μοντέλων LUE (EC-LUE, VPM, GLO-PEM και CASA) οι L. X. Zhang et al. (2015) βρήκαν πως και τα τέσσερα μοντέλα εμφάνιζαν την χαμηλότερη απόδοση (βάση των συντελεστών R^2 και RMSE) στα δάση EBF έναντι των άλλων τύπων δασικής κάλυψης. Ως βασική αιτία αυτής της αδυναμίας έχει προταθεί το γεγονός ότι τα αιθαλή πλατύφυλλα οικοσυστήματα έχουν πολύ χαμηλή εποχική διακύμανση στη φαινολογία τους, ακόμη και σε σύγκριση με τα αιθαλή κωνοφόρα, που καθιστά δύσκολη τη μοντελοποίηση της παραγωγικότητας τους (Chang et al., 2023; Xiao et al., 2004a; Xie et al., 2020; Yuan et al., 2014a).

Σε όλες τις περιοχές που εξετάστηκαν, η χρήση των τριών scalars του sCASE, δηλαδή η βασική εκδοχή του μοντέλου, παρήγαγε ισχυρότερες συσχετίσεις (υψηλότεροι R^2) από την απλή μορφή της

e_0 -GPP, αν και σε κάποιες περιπτώσεις προκαλεί μικρή αύξηση του συντελεστή RMSE. Συνολικά, η χρήση των scalars βελτιώνει τις εκτιμήσεις της GPP, όπως προκύπτει από τις μέσες τιμές των συντελεστών R^2 (αύξηση από 0,675 σε 0,750) και RMSE (μείωση από 2,746 σε 2,317 $g C m^{-2} d^{-1}$). Πάντως, η σχέση της e_0 -GPP με την μετρημένη GPP είναι πολύ καλή για τα περισσότερα οικοσυστήματα, παράγοντας ισχυρές γραμμικές συσχετίσεις, επιβεβαιώνοντας την βάση της θεωρίας της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (Monteith, 1977, 1972). Η απόδοση του sCASE για τα δεκατρία οικοσυστήματα που μελετήθηκαν κρίνεται ικανοποιητική (R^2 από 0,528 έως 0,875 και RMSE από 1,391 έως 2,955 $g C m^{-2} d^{-1}$) και είναι συγκρίσιμη με την απόδοση που έχει βρεθεί για άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα LUE σε δασικά οικοσυστήματα. Σε μια συγκριτική ανάλυση επτά μοντέλων LUE οι Yuan et al. (2014a) βρήκαν πως το μοντέλο με την καλύτερη επίδοση (CFlux) είχε R^2 από 0,000 (σε ένα οικοσύστημα με αειθαλή πλατύφυλλα) έως 0,900 (σε ένα οικοσύστημα με φυλλοβόλα πλατύφυλλα) και τιμές RMSE από 0,525 $g C m^{-2} d^{-1}$ (σε ένα οικοσύστημα με αειθαλή πλατύφυλλα) έως 6,560 $g C m^{-2} d^{-1}$ (σε ένα οικοσύστημα με φυλλοβόλα πλατύφυλλα). Οι διάμεσες τιμές των δυο συντελεστών ανά τύπο βλάστησης ήταν $R^2=0,800$ και $RMSE=2,720 g C m^{-2} d^{-1}$ για τα DBF, $R^2=0,120$ και $RMSE=2,240 g C m^{-2} d^{-1}$ για τα EBF, $R^2=0,600$ και $RMSE=2,080 g C m^{-2} d^{-1}$ για τα ENF και $R^2=0,700$ και $RMSE=1,920 g C m^{-2} d^{-1}$ για τα MF. Σε μια αντίστοιχη ανάλυση τεσσάρων μοντέλων LUE, οι L. X. Zhang et al. (2015) βρήκαν πως τα δυο καλύτερα (VPM και GLO-PEM) είχαν μέσο R^2 0,720 για τα 31 δασικά οικοσυστήματα που εξέτασαν (τέσσερα από τα οποία χρησιμοποιούνται και σε αυτήν την ανάλυση). Αν και η σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών είναι επισφαλής, λόγω της διαφοράς στις περιοχές μελέτης και πιθανόν και στην περίοδο ανάλυσης κοινών περιοχών, είναι προφανές πως το sCASE αποδίδει εφάμιλλα με τα καλύτερα μοντέλα και των δυο αυτών μελετών. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι ειδοειδικές σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν από το sCASE για τις δεκατρείς περιοχές (Πίνακας 9), βασίστηκαν στην παραμετροποίησή του για τα είδη του Πάρκου της Βόρειας Πίνδου, με τροποποιήσεις βάσει των γενικών χαρακτηριστικών των επιμέρους ειδών (από τη βιβλιογραφία). Σε κάθε περίπτωση, είναι πιθανόν κάποιες σταθερές να μην ανταποκρίνονται απόλυτα στην πραγματικότητα, ειδικά στην περίπτωση των δυο EBF (η e_0 των οποίων βασίστηκε στην MOD17-GPP), αφού η αρχική παραμετροποίηση του sCASE δεν περιλάμβανε τέτοιου τύπου είδη. Για την περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας του sCASE, αλλά και γενικά των μοντέλων παραγωγικότητας, είναι απαραίτητη η μελέτη των οικοφυσιολογικών χαρακτηριστικών των διάφορων ειδών βλάστησης, ώστε να βελτιωθούν οι ειδοειδικές σταθερές που τα μοντέλα χρησιμοποιούν (Pei et al., 2022; Xiao et al., 2014).

Σε σύγκριση με το μοντέλο LUE του MODIS (MODIS-LUE) το sCASE αποδίδει καλύτερα για όλα τα οικοσυστήματα, τόσο βάσει του R^2 όσο και βάσει του RMSE (Πίνακας 19), με τον μέσο R^2 να είναι 0,810 έναντι 0,722 και τον μέσο RMSE 16,235 έναντι 19,273 $g C m^{-2} 8d^{-1}$. Στις περισσότερες περιοχές που εξετάστηκαν, οι τιμές της MOD17-GPP είναι χαμηλότερες τόσο από αυτές της eddy-GPP όσο και της $sCASE_{MODIS}$ -GPP ειδικά κατά την περίοδο του καλοκαιριού (Σχήμα 7). Η βελτίωση της συσχέτισης μεταξύ της $sCASE_{MODIS}$ -GPP και της eddy-GPP στο οκταήμερο βήμα έναντι του ημερήσιου (αύξηση μέσου R^2 από 0,750 σε 0,810), έχει καταγραφεί και από άλλες εργασίες (Chang et al., 2023; Yebra et al., 2015) και οφείλεται στο ότι η αύξηση του χρόνου ευνοεί την γραμμική σχέση μεταξύ ακτινοβολίας και παραγωγικότητας (Goetz and Prince, 1999; Medlyn, 1998; Ruimy et al., 1995), που είναι και η φυσιολογική βάση της αρχής της αποδοτικότητας χρήσης φωτός. Η καλύτερη απόδοση του sCASE από το MODIS-LUE, είναι μεν ένδειξη καλής λειτουργίας του μοντέλου αλλά δεν θα πρέπει να δίνεται πολύ μεγάλη βαρύτητα, καθώς η μέτρια απόδοση του MODIS-LUE σε σχέση με δεδομένα πύργων eddy έχει καταγραφεί σε πολλές εργασίες (Almeida et al., 2018; Heinsch et al., 2006; Turner et al., 2006a, 2003; Wang et al., 2017; Zhu et al., 2016) και οι

αιτίες είναι γνωστές (Kanniah et al., 2009; Zhu et al., 2016). Από αυτές, οι σημαντικότερες αφορούν στις ειδοειδικές παραμέτρους που χρησιμοποιεί και ειδικά την ϵ_0 (Martel et al., 2005; Wang et al., 2013), στο αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων (Heinsch et al., 2006; Zhao et al., 2006), σε προβληματικό υπολογισμό του fAPAR (Zhao et al., 2005; Zhu et al., 2016), ενώ και η δομή του αλγόριθμου έχει κριθεί ελλιπής (Almeida et al., 2018; Kanniah et al., 2009).

Τα δυο μοντέλα (sCASE και MODIS-LUE) χρησιμοποιούν τις ίδιες πέντε κλάσεις όσον αφορά δασικά οικοσυστήματα, αλλά διαφέρουν σημαντικά στις τιμές ϵ_0 που χρησιμοποιούν για κάθε κλάση, με αυτές του sCASE να είναι σημαντικά υψηλότερες (Πίνακες 5 και 9). Πολλές μελέτες έχουν βρει πως οι τιμές ϵ_0 του MODIS-LUE δεν ανταποκρίνονται σε αυτές των πύργων eddy covariance, όντας σημαντικά χαμηλότερες (Almeida et al., 2018; Liu et al., 2014; Zhu et al., 2016). Οι χαμηλές τιμές της ϵ_0 έχουν προταθεί ως βασική αιτία για την υποεκτίμηση της GPP από το MODIS-LUE (Martel et al., 2005; Wang et al., 2013), ωστόσο, η αύξηση της ϵ_0 χωρίς τροποποίηση του αλγόριθμου του MODIS-LUE θα οδηγήσει σε περαιτέρω υπερεκτίμηση των χαμηλών τιμών της GPP (Σχήμα 8), αυξάνοντας το σφάλμα του μοντέλου. Όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα, πρέπει να σημειωθεί πως ο MODIS χρησιμοποιεί δεδομένα που μοντελοποιούνται σε παγκόσμιο επίπεδο με χωρική ανάλυση πολλών χιλιομέτρων (GMAO/NASA, Rienecker et al., 2008; Running and Zhao, 2019) σε αντίθεση με το sCASE που χρησιμοποιεί δεδομένα από επίγειες μετρήσεις (στη συγκεκριμένη περίπτωση από τους πύργους eddy covariance). Έρευνες έχουν δείξει πως μόνο τα διαφορετικά μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες διαφορές στην παραγωγικότητα που υπολογίζει ένα μοντέλο (Jung et al., 2007; Zhao et al., 2006; Zheng et al., 2018).

Η εξάρτηση του sCASE από τις επίγειες μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων, αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα του, καθώς η εφαρμογή του σε μεγάλη κλίμακα θα πρέπει είτε να βασιστεί σε χωρική παρεμβολή (spatial interpolation) των τοπικών μετεωρολογικών μετρήσεων, είτε να χρησιμοποιήσει κάποιο παγκόσμιο πακέτο μοντελοποιημένων μετεωρολογικών δεδομένων όπως ο MODIS. Και οι δύο επιλογές έχουν σημαντικά μειονεκτήματα που μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια του μοντέλου. Η χωρική παρεμβολή τοπικών μετεωρολογικών μετρήσεων προκύπτει από πολύπλοκα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη πλήθος παραγόντων (π.χ. τοπογραφία) και οδηγεί σε μειωμένη ακρίβεια των δεδομένων (Li and Hear, 2014, 2011). Τα παγκόσμια μετεωρολογικά πακέτα, όπως αυτό που χρησιμοποιεί ο MODIS, διατίθενται σε πολύ χαμηλή χωρική ανάλυση (πολλών χιλιομέτρων), οπότε πάσχουν σε ακρίβεια, ενώ έχει βρεθεί πως υπερεκτιμούν την PAR (Peng et al., 2019).

Όσον αφορά την βαρύτητα καθενός από τα τρία scalar του sCASE, αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε οικοσυστήματος (Πίνακας 18), όπως είχε παρατηρηθεί και για τα είδη της Βόρειας Πίνδου (Stagakis et al., 2015) και είναι εν πολλοίς αναμενόμενο. Η χρήση ενός μόνο scalar έχει σημαντικά αρνητική επίδραση στην ακρίβεια του μοντέλου, γεγονός που τονίζει την πολύπλοκη εξάρτηση της φωτοσύνθεσης και της παραγωγικότητας από πλήθος παραγόντων. Και τα τρία scalar που χρησιμοποιεί το sCASE είναι κρίσιμα για κάποια από τα οικοσυστήματα, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση τους στον αλγόριθμο του μοντέλου, εφόσον στόχος είναι η χρήση ενός κοινού αλγόριθμου για όλες τις περιοχές. Για τις δεκατρείς περιοχές που εξετάστηκαν, δεν βρέθηκε σημαντική επιβάρυνση της ακρίβειας του μοντέλου από την χρήση επιπλέον scalar σε οικοσυστήματα που αυτά δεν ήταν απαραίτητα, όπως π.χ. το W_{scalar} στις περιοχές που δεν αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού. Ο τελικός αριθμός των scalar που περιλαμβάνει ένα μοντέλο LUE πρέπει να ισορροπεί μεταξύ της υποκαταγραφής της μείωσης της αποδοτικότητας, λόγω της μη συμπερίληψης κάποιου ανασταλτικού παράγοντα, και του πιθανού σφάλματος από την χρήση πάρα πολλών παραγόντων (Pei et al., 2022). Η προσθήκη περισσότερων παραγόντων σε ένα μοντέλο LUE

αυξάνει την πολυπλοκότητα του και την ανάγκη για παραμετροποίηση του, ενώ είναι πιθανό διάφοροι παράγοντες να επικαλύπτονται (Medlyn et al., 2005; Pei et al., 2022; Prentice et al., 2014). Το σύνολο των εξισώσεων και παραμέτρων που περιλαμβάνει ένα μοντέλο, δηλαδή η δομή του αλγόριθμού του, θεωρούνται καθοριστικά για την ακρίβεια των μοντέλων (Xiao et al., 2014; Zheng et al., 2018) και εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο έντονης μελέτης (Bao et al., 2022).

Το αναπτυξιακό scalar (D_{scalar}) είναι απαραίτητο για τα φυλλοβόλα είδη, όμως δεν πρόσφερε κάτι στα αειθαλή (Σχήμα 6). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4, η ϵ_0 -GPP υπερεκτιμά έντονα την παραγωγικότητα κατά την περίοδο του χειμώνα και της άνοιξης στα φυλλοβόλα είδη, κάτι που διορθώνεται σε μεγάλο βαθμό στην περίπτωση της sCASE_{MODIS}-GPP. Η έγκυρη ανίχνευση της έναρξης και της λήξης της αναπτυξιακής περιόδου, καθώς και η ακριβής αποτύπωση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας κατά τις περιόδους αυτές, έχουν βρεθεί να προκαλούν μεγάλες διαφοροποιήσεις στον υπολογισμό της παραγωγικότητας (Falge et al., 2002; Richardson et al., 2012, 2010). Το θερμοκρασιακό scalar (T_{scalar}) επιδρά στα αειθαλή οικοσυστήματα που το χειμώνα υφίστανται χαμηλές θερμοκρασίες και ελαφρότερα σε αειθαλή οικοσυστήματα που αντιμετωπίζουν υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι (Σχήμα 6). Τα φυλλοβόλα είδη που αντιμετωπίζουν υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι δεν φαίνεται να επηρεάζονται έντονα από τη χρήση ή μη του θερμοκρασιακού scalar, όπως είχε παρατηρηθεί και στα φυλλοβόλα είδη που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση του μοντέλου sCASE (Stagakis et al., 2015). Ωστόσο, η χρησιμότητα του T_{scalar} στις περιοχές με αειθαλή είδη που αντιμετωπίζουν υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι τονίζει την ανάγκη για χρήση της κωδωνοειδούς καμπύλης στα scalar θερμοκρασίας, ώστε να αποτυπώνεται η αρνητική επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στην GPP. Εργασίες που χρησιμοποιούν θερμοκρασιακά scalar που δεν περιλαμβάνουν την αρνητική επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών, προτείνουν πως αυτή καλύπτεται από τα υδατικά scalar (Potter et al., 1993; Xiao et al., 2004b), καθώς η υψηλή θερμοκρασία συνοδεύεται από έλλειψη νερού. Αυτό δεν επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, όπως έχουν επισημάνει και άλλες έρευνες (Bao et al., 2022; Horn and Schulz, 2011). Τέλος, το υδατικό scalar (W_{scalar}) είναι απαραίτητο για τις πέντε μεσογειακές περιοχές, όπου η αφαίρεσή του από το sCASE οδηγεί σε σημαντική εξασθένηση της ακρίβειας του μοντέλου, όμως δεν προσφέρει τίποτα στις υπόλοιπες περιοχές (Σχήμα 6). Το υδατικό scalar έχει την πιο έντονη επίδραση στην απόδοση του μοντέλου σε σύγκριση με τα άλλα δυο, για τις περιοχές που κάθε scalar έχει επίδραση, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες μελέτες που θέλουν την υδατική κατάσταση να αποτελεί τον κρισιμότερο περιβαλλοντικό παράγοντα για την ϵ (Tang et al., 2020; Yuan et al., 2014a).

Αξιολόγηση διαφορετικών υδατικών scalars

Η έντονη επίδραση του υδατικού scalar στα μεσογειακά οικοσυστήματα της παρούσας μελέτης, έρχεται να επιβεβαιώσει τη σημασία της ανίχνευσης της υδατικής καταπόνησης στα μεσογειακά οικοσυστήματα για την σωστή μοντελοποίηση της GPP (Moreno et al., 2014). Για να εξακριβωθεί η καταλληλότητα του W_{scalar} του sCASE, δημιουργήθηκαν παραλλαγές του μοντέλου που διέφεραν μόνο ως προς το υδατικό scalar (Πίνακας 12). Σε γενικές γραμμές οι παραλλαγές του sCASE που προέκυψαν από τα δέκα υδατικά scalar έχουν παρόμοια απόδοση (Πίνακες 20 και 21), όσον αφορά και τις δεκατρείς περιοχές μελέτης, με παραπλήσιες μέσες τιμές R^2 (0,719 έως 0,758) και RMSE (2,317 έως 2,509 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, με την εξαίρεση του EF_{scalar} με 3,248 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Η αρχική εκδοχή του sCASE (με το W_{scalar}) έχει τον υψηλότερο μέσο R^2 (0,750, με την εξαίρεση των δύο παραλλαγών με τα SWC scalars, που όμως οφείλεται στην απουσία συγκεκριμένων περιοχών όπως εξηγείται στη συνέχεια) και τον χαμηλότερο μέσο RMSE (2,317 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$), με τις διαφορές με τα υπόλοιπα να είναι ωστόσο μικρές.

Οι παραλλαγές με τα W_{scalar} και ET_{scalar} έχουν παρόμοια απόδοση, με υψηλούς R^2 και χαμηλούς RMSE τόσο στις περιοχές χωρίς υδατική καταπόνηση όσο και σε αυτές που εμφανίζουν καταπόνηση (Σχήμα 9). Η παρόμοια απόδοση των δυο είναι αναμενόμενη αφού αμφότερα βασίζονται στην βροχόπτωση και την εξατμισοδιαπνοή για να υπολογίσουν την υδατική κατάσταση της βλάστησης. Υψηλή είναι και η απόδοση της παραλλαγής που χρησιμοποιεί το scalar του MODIS (VPD_{scalar}), ωστόσο, είναι εμφανές πως το VPD_{scalar} δεν μπορεί να αποτυπώσει την επίδραση του υδατικού στρες στην GPP των περιοχών που αντιμετωπίζουν υδατική καταπόνηση (Σχήμα 9). Η χρήση του EF_{scalar} οδηγεί σε υψηλές τιμές RMSE (Πίνακας 21), σημαντικά υψηλότερες από τα υπόλοιπα water scalar (3,248 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ με το επόμενο να έχει 2,509 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ενώ παρατηρείται μεγάλη αστάθεια στην απόδοση του από περιοχή σε περιοχή (R^2 από 0,486 έως 0,898). Επιπλέον, ακόμη και στις περιοχές που η συσχέτιση είναι ισχυρή (υψηλός R^2), ο συντελεστής RMSE είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι με τα υπόλοιπα υδατικά scalar. Η καλή ή όχι απόδοση του μοντέλου με το EF_{scalar} (βάσει του R^2) δεν καθορίζεται από την υδατική κατάσταση των περιοχών, δηλαδή την διάκριση βάσει της ύπαρξης ή μη υδατικής καταπόνησης, οπότε η αιτία για τις διαφορές από περιοχή σε περιοχή δεν είναι ξεκάθαρη. Μια πιθανή εξήγηση θα μπορούσε να είναι τα προβληματικά δεδομένα eddy covariance σε συγκεκριμένες περιοχές, καθώς οι ροές θερμότητας που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο scalar είναι δύσκολο να υπολογιστούν με ακρίβεια (Mauder et al., 2020). Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι παραλλαγές του sCASE με τα δυο υδατικά scalar που βασίζονται στο SWC έχουν τους υψηλότερους μέσους R^2 , όμως αυτό οφείλεται στο ότι απουσιάζουν δεδομένα για πέντε περιοχές μεταξύ των οποίων κάποιες από αυτές με τη χαμηλότερη απόδοση του sCASE ανεξαρτήτως παραλλαγής (π.χ. Puéchabon). Στις περιοχές για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα SWC, οι δυο παραλλαγές με τα δυο αυτά scalar δεν αποδίδουν καλύτερα από την βασική εκδοχή του sCASE, ο μέσος R^2 της οποίας σε αυτές τις περιοχές αυξάνει στο 0,785, έναντι 0,756 και 0,758 των $SWC1_{\text{scalar}}$ και $SWC2_{\text{scalar}}$, αντίστοιχα. Επιπλέον, οι δυο παραλλαγές που χρησιμοποιούν το SWC υστερούν σημαντικά στις τρεις περιοχές με υδατική καταπόνηση για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα (Πίνακας 20), ενώ και στο σύνολο των περιοχών υστερούν έναντι του W_{scalar} όσον αφορά τον RMSE. Έρευνες έχουν δείξει πως το SWC υστερεί ως δείκτης υδατικής κατάστασης στα δασικά οικοσυστήματα (Y. Zhang et al., 2015), καθώς τα δέντρα έχουν πρόσβαση σε βαθύτερα ύδατα (Schenk and Jackson, 2002). Κλείνοντας, οι παραλλαγές με τα τέσσερα υδατικά scalar που χρησιμοποιούν δείκτες βλάστησης του MODIS, έχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις υπόλοιπες στις περιοχές χωρίς υδατική καταπόνηση, όμως υστερούν στις περιοχές που αντιμετωπίζουν καταπόνηση (Σχήμα 9). Μεταξύ των τεσσάρων δεικτών, ο NMDI υστερεί ελαφρώς από τους άλλους τρεις (βάσει και των δυο

συντελεστών), οι οποίοι έχουν παρόμοια απόδοση μεταξύ τους όσον αφορά τον R^2 , με τον $ND27_{scalar}$ να έχει χαμηλότερη μέση τιμή RMSE από τους άλλους δυο (Πίνακας 21).

Από τα παραπάνω προκύπτει πως τα δυο υδατικά scalar που βασίζονται στο υδατικό ισοζύγιο (W_{scalar} και ET_{scalar}) είναι τα καταλληλότερα για τις περιοχές που αντιμετωπίζουν ξηρασία το καλοκαίρι. Επίσης, το EF_{scalar} παράγει ισχυρές συσχετίσεις για τις τρεις από τις πέντε αυτές περιοχές, υστερώντας αρκετά στις άλλες δυο, και σε κάθε περίπτωση πάσχει από υψηλές τιμές RMSE. Και τα τρία αυτά scalar ανήκουν στην κατηγορία των υδατικών scalar βλάστησης (Pei et al., 2022), που αποτυπώνουν δηλαδή το περιεχόμενο του νερού στη βλάστηση, κατηγορία η οποία έχει βρεθεί από πολλές μελέτες ως η καταλληλότερη για να αποτυπώσει το υδατικό στρες (Pei et al., 2022; L. X. Zhang et al., 2015). Ωστόσο, στις περιοχές που δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα ξηρασίας, τα δυο scalar που βασίζονται στο υδατικό ισοζύγιο, υστερούν λίγο σε σχέση με κάποια από τα άλλα scalars (κυρίως το VPD_{scalar}), γεγονός που υποδηλώνει μια υπερευαισθησία των δυο scalar που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η διαφορά μεταξύ των περιοχών με καταπόνηση και αυτών χωρίς, τονίζει την ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση των υδατικών scalar, καθώς κανένα scalar δεν καλύπτει όλες τις περιοχές με την ίδια ακρίβεια (Pei et al., 2022), ενώ πολλές μελέτες προτείνουν τη χρήση περισσότερων του ενός υδατικά scalars (Bao et al., 2022; Stocker et al., 2020; Wang et al., 2018). Σε κάθε περίπτωση το W_{scalar} του sCASE αποδείχθηκε ένα πολύ καλό εργαλείο για οικοσυστήματα που υποφέρουν από ξηρασία, χωρίς να υστερεί σημαντικά στις υπόλοιπες περιοχές.

Όσον αφορά το VPD_{scalar} , αξίζει να αναφερθεί πως υπολογίστηκε από το VPD που μετρήθηκε στον πύργο και όχι από το παγκόσμιο μετεωρολογικό πακέτο (GMAO/NASA, Rienecker et al., 2008; Running and Zhao, 2019) που χρησιμοποιεί το προϊόν του MODIS (MOD17A2). Απαλλαγμένο από το πιθανό σφάλμα των τιμών VPD λόγω μοντελοποίησης, η χαμηλή απόδοση του VPD_{scalar} στις περιοχές με ξηρασία υποδηλώνει μια αδυναμία του VPD να αποτυπώσει την επίδραση του υδατικού στρες στην GPP. Η επίδραση του VPD στην παραγωγικότητα έχει βρεθεί πως εξαρτάται από το διαθέσιμο νερό (Bao et al., 2022), με φυτά που έχουν πρόσβαση σε νερό να μπορούν να κρατούν τα στόματα ανοιχτά ακόμη και σε συνθήκες έντονης ξηρασίας του αέρα (Tardieu and Simonneau, 1998). Ως λύση σε αυτό το μειονέκτημα του VPD προτείνεται ο συνδυασμός του με έναν παράγοντα υγρασίας εδάφους (Bao et al., 2022), αν και η συνεισφορά του VPD σε ένα τέτοιο σχήμα πρέπει να μελετηθεί.

Τα πέντε υδατικά scalar που βασίζονται σε μετεωρολογικά δεδομένα, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια αυτών των δεδομένων, που όπως αναφέρθηκε ήδη, είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Αντιθέτως, τα τέσσερα υδατικά scalar που βασίζονται σε δείκτες βλάστησης του MODIS, δεν απαιτούν μετεωρολογικά δεδομένα, ούτε έχουν ανάγκη χωρικής παρεμβολής αφού καλύπτουν το σύνολο της επιφάνειας της γης (με διαφορετική συχνότητα φυσικά, ανάλογα τον αισθητήρα). Συνολικά δεν υστερούν πολύ σε σχέση με τα άλλα scalar, αδυνατούν όμως να αποτυπώσουν την επίδραση της ξηρασίας, όπως έχουν σημειώσει και άλλες εργασίες (Xiao, 2014). Ένα σημαντικό μειονέκτημα των scalar αυτών είναι η συχνότητα των δορυφορικών δεικτών στους οποίους βασίζονται, που διαφέρει από αισθητήρα σε αισθητήρα και μπορεί να μην είναι ικανοποιητική υπό την επίδραση και των ατμοσφαιρικών συνθηκών (Pei et al., 2022; Xiao et al., 2004a, 2004b). Επιπλέον, κρίσιμη είναι και η χωρική ανάλυση των δεικτών αυτών, ώστε να αποτυπώνουν όσο το δυνατόν καλύτερα την χωρική διαφοροποίηση ειδικά σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Παρόλα αυτά, η ευκολία που παρέχουν τα καθιστά χρήσιμα εργαλεία για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, με το σφάλμα που εισάγουν να μην είναι πολύ μεγάλο (Y. Zhang et al., 2015; Zheng et al., 2018).

Αξιολόγηση scalars για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στη GPP

Η διάχυτη ακτινοβολία διεισδύει βαθύτερα στη κόμη και δεν προκαλεί κορεσμό στην εξωτερική επιφάνεια της, σε αντίθεση με την απευθείας (Gu et al., 2002; He et al., 2013), με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ) ενός οικοσυστήματος να είναι υψηλότερη σε συνθήκες διάχυτης ακτινοβολίας (Gu et al., 2002; Pei et al., 2022). Καθώς τα περισσότερα μοντέλα LUE, συμπεριλαμβανομένου του sCASE, δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (Bao et al., 2022; Pei et al., 2022) είναι λογικό να υποεκτιμούν την παραγωγικότητα όταν αυξάνεται το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας. Πράγματι, μια μελέτη που χρησιμοποίησε διάφορα μοντέλα έδειξε πως τα περισσότερα μοντέλα LUE υποεκτιμούσαν την GPP τις ημέρες με συννεφιά (Yuan et al., 2014a). Στα πλαίσια της βελτίωσης της ακρίβειας του sCASE, ενσωματώθηκαν στον αλγόριθμό του εξισώσεις (cloud scalar) για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην αποδοτικότητα χρήσης φωτός. Για την εκτίμηση του ποσοστού της διάχυτης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο λόγος της PAR προς την δυνητική PAR ($PAR_{potential}$), βάσει του οποίου υπολογίζονται τα cloud scalars, σύμφωνα με τις εξισώσεις 25 έως 34. Οι δέκα εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν (Πίνακας 14) διακρίνονται σε δυο τύπους, ο πρώτος τύπος αφορά σε υπολογισμό ενός ϵ που μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας και αντικαθιστά την ϵ_0 στον αλγόριθμο (εξίσωση 7) του sCASE και ο δεύτερος τύπος έχει τη μορφή ενός τυπικού scalar που προστίθεται στην αρχική εκδοχή του sCASE. Από τα δέκα cloud scalar που εξετάζονται, τα πέντε προέρχονται από τη βιβλιογραφία (CI , S_{CI} , ϵ_{base} , ϵ_{base}' , ϵW_{base}) και τα άλλα πέντε αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας ($C_{scalar1}$ έως 5).

Ξεκινώντας με τους δυο συντελεστές CI και S_{CI} , είναι εμφανές πως κανένας τους δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως scalar διάχυτης ακτινοβολίας, με τον CI να βελτιώνει τον R^2 αλλά να οδηγεί σε πολύ υψηλούς RMSE και τον S_{CI} να διαταράσσει πλήρως τη σχέση μοντελοποιημένης και μετρημένης GPP (Σχήμα 10). Η αύξηση του R^2 με την χρήση του CI (μέσος R^2 0,795 έναντι 0,750 του βασικού sCASE), υποδηλώνει πως πράγματι ο λόγος της PAR προς την $PAR_{potential}$, ως υποκατάστατο του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας, επιδρά στην παραγωγικότητα και η συμπερίληψη του ευνοεί τα μοντέλα LUE, όπως έχουν σημειώσει πρόσφατες μελέτες (Bao et al., 2022; Xu et al., 2023; Zhou et al., 2016). Η μεγάλη αύξηση του συντελεστή RMSE προκύπτει από την συντριπτική υποεκτίμηση των τιμών GPP που επιφέρει η χρήση του CI ($1 - PAR/PAR_{potential}$) απευθείας στον αλγόριθμο του sCASE (Σχήμα 11), καθιστώντας απαραίτητη την χρήση μιας εξίσωσης που να βασίζεται μεν στο λόγο $PAR/PAR_{potential}$ αλλά να θεραπεύει αυτήν την αρνητική επίδραση. Πράγματι, τα άλλα οκτώ cloud scalar βελτιώνουν την συσχέτιση (αύξηση του μέσου R^2) μειώνοντας παράλληλα και τις μέσες τιμές του συντελεστή RMSE, παράγοντας τιμές GPP στην ίδια τάξη μεγέθους με τις τιμές της eddy-GPP (Σχήμα 11).

Η προσθήκη οποιουδήποτε από τα οκτώ cloud scalar στο sCASE αυξάνει τον μέσο R^2 (τιμές από 0,777 έως 0,812 έναντι 0,750 του αρχικού sCASE), επιδρώντας θετικά στη συσχέτιση για κάθε μια περιοχή ξεχωριστά (Πίνακας 22), με μόνη εξαίρεση το $C_{scalar3}$ στην περιοχή San Rossore. Την καλύτερη απόδοση βάσει του R^2 έχει το $C_{scalar3}$ με τιμές που κυμαίνονται από 0,605 έως 0,945 (μέσος R^2 0,812), ακολουθούμενο από τα ϵ_{base} (0,590 έως 0,934) και ϵW_{base} (0,596 έως 0,934), αμφότερα με μέσο R^2 0,811 (Σχήμα 10). Όταν όλες οι περιοχές εξεταστούν μαζί, που είναι ένας δείκτης της καθολικότητας της σχέσης μεταξύ μοντελοποιημένης και μετρημένης GPP, το ϵ_{base} ξεχωρίζει (με $R^2 = 0,840$) ακολουθούμενο από τα ϵ_{base}' και $C_{scalar3}$ (με 0,808 και 0,800 αντίστοιχα). Πράγματι η σχέση της GPP του sCASE που περιλαμβάνει το ϵ_{base} με την eddy-GPP, δεν διαφέρει ιδιαίτερα μεταξύ των δεκατριών περιοχών, σε αντίθεση με τη διαφορετική σχέση ανά περιοχή που παρατηρείται με τη χρήση του ϵW_{base} (Σχήμα 12), αλλά και της βασικής εκδοχής του sCASE (Σχήμα 5).

Στην περίπτωση του RMSE όμως, παρότι η μέση τιμή του συντελεστή μειώνεται και για τα οκτώ cloud scalar (τιμές από 1,554 έως 2,232 g C m⁻² d⁻¹ έναντι 2,317 g C m⁻² d⁻¹ του αρχικού sCASE), η χρήση κάποιων από αυτών αυξάνει τον συντελεστή RMSE σε επιμέρους περιοχές, με την εντονότερη επίδραση να παρατηρείται στα ϵ_{base} και $C_{scalar2}$ (Σχήμα 10). Τα τρία scalar με τους υψηλότερους μέσους R^2 ($C_{scalar3}$, ϵ_{base} και ϵW_{base}), έχουν την καλύτερη επίδοση και βάσει του RMSE, βελτιώνοντας τον και στις δεκατρείς περιοχές μελέτης (Πίνακας 23). Τις χαμηλότερες τιμές παρουσιάζει η χρήση του ϵW_{base} με μέσο RMSE 1,554 g C m⁻² d⁻¹ (0,948 έως 2,167 g C m⁻² d⁻¹), ακολουθούμενο από το ϵ_{base} με μέσο RMSE 1,560 g C m⁻² d⁻¹ (0,949 έως 2,194 g C m⁻² d⁻¹) και τρίτο το $C_{scalar3}$ με μέσο RMSE 1,798 (0,949 έως 2,389 g C m⁻² d⁻¹). Ωστόσο, όταν όλες οι περιοχές εξετάζονται μαζί, η ακρίβεια του ϵW_{base} υποχωρεί αισθητά σε σχέση με τα άλλα δυο (2,057 g C m⁻² d⁻¹), με το ϵ_{base} να έχει την χαμηλότερη τιμή RMSE (1,637 g C m⁻² d⁻¹), ακολουθούμενο από το $C_{scalar3}$ (1,804 g C m⁻² d⁻¹).

Όπως αναφέρθηκε ήδη, όλα τα cloud scalar που εξετάστηκαν, πλην των CI και S_{CI} , βελτιώνουν τη σχέση της GPP που υπολογίζει το sCASE (sCASE_{MODIS-GPP}) με την μετρημένη (eddy-GPP), τόσο ως προς τη μέση τιμή των συντελεστών R^2 και RMSE (Σχήμα 10) όσο και όταν όλες οι περιοχές εξετάζονται μαζί (Σχήμα 11). Το sCASE με τη χρήση οποιουδήποτε από αυτά τα οκτώ cloud scalar, έχει καλύτερη απόδοση από αυτή που βρέθηκε σε μια συγκριτική ανάλυση δέκα μοντέλων LUE που λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (Xu et al., 2023). Στην εργασία τους αυτή, οι Xu et al. (2023) χρησιμοποίησαν δεδομένα από το πακέτο FLUXNET2015 για 58 πύργους με δασικά οικοσυστήματα, και βρήκαν πως με βάση τον R^2 το καλύτερο μοντέλο ήταν το RTL-LUE με μέσο R^2 0,704 (και μέσο RMSE 2,382 g C m⁻² d⁻¹), ενώ με βάση τον RMSE καλύτερη απόδοση είχε το CFflux με μέσο RMSE 2,194 g C m⁻² d⁻¹ (και μέσο R^2 0,672). Παρότι η υπεροχή του sCASE με την προσθήκη των cloud scalar έναντι των μοντέλων αυτών είναι ξεκάθαρη, ειδικά ως προς τον R^2 , δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα ως προς την απόδοση των cloud scalar, αφού τα μοντέλα αυτά διαφέρουν συνολικά στη δομή τους. Είναι ενδεικτικό πως στην ανάλυση τους οι Xu et al. (2023) βρήκαν πως το μοντέλο που χρησιμοποιεί το ϵW_{base} ήταν αυτό με την χειρότερη απόδοση όλων, με μέσο R^2 κάτω από 0,500 και μέσο RMSE περίπου 4 g C m⁻² d⁻¹, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τα ευρήματα της παρούσας μελέτης. Επίσης, η παραπάνω ανάλυση (Xu et al., 2023) περιλάμβανε και τρία μοντέλα που χρησιμοποιούν το ϵ_{base} και παρότι ήταν μεταξύ αυτών με τη καλύτερη απόδοση (κορυφαίο μεταξύ των τριών το CFflux που αναφέρθηκε παραπάνω), η ακρίβεια τους υστερεί σε σχέση με αυτή του sCASE με τη χρήση του ϵ_{base} (μέσος $R^2=0,811$ και μέσος RMSE=1,554 g C m⁻² d⁻¹). Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η σύγκριση με αποτελέσματα άλλων εργασιών είναι επισφαλής, κάτι που εντείνεται στην περίπτωση των δύο αυτών cloud scalar (ϵW_{base} και ϵ_{base}), καθώς απαιτούν παραμετροποίηση ανά περιοχή (King et al., 2011; Wang et al., 2018). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές τιμές cloud scalar από μελέτη σε μελέτη, ακόμη και για την ίδια περιοχή και το ίδιο διάστημα, καθώς η επιλογή των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων (ϵ_{max} και μ) είναι υποκειμενική.

Οι Xu et al. (2023) απέδωσαν την κακή απόδοση του μοντέλου LUE που χρησιμοποιεί το ϵW_{base} (Wang et al., 2018), στο ότι θεωρεί μια γραμμική σχέση μεταξύ του CI και της GPP, καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι η σχέση μεταξύ των δυο είναι μη γραμμική (Li et al., 2020; Xu et al., 2017). Ωστόσο, αυτό δεν επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας, αφού το ϵW_{base} βρέθηκε να αποδίδει πολύ καλά, ενώ και τα ϵ_{base} και $C_{scalar3}$ χρησιμοποιούν γραμμική σχέση της ϵ με το CI . Παραδόξως, η μελέτη των Xu et al. (2023) περιλάμβανε τρία μοντέλα LUE που χρησιμοποιούν το ϵ_{base} , τα οποία ήταν μεταξύ των καλύτερων μοντέλων, εκ των οποίων το ένα (CFflux) είχε τον χαμηλότερο μέσο RMSE, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, κάτι που αναιρεί την πρότασή τους.

Συγκρίνοντας την επίδραση των cloud scalar (εξαιρουμένων των C_I και S_{CI}) στην απόδοση του sCASE βάσει των R^2 και RMSE, το ε_{base} είναι το cloud scalar που προκαλεί τη μεγαλύτερη βελτίωση στο μοντέλο sCASE, με το $C_{scalar1}$ να έχει την μικρότερη (Σχήμα 10). Από τα πέντε cloud scalar που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, το $C_{scalar3}$ έχει την καλύτερη απόδοση, ακολουθούμενο από το $C_{scalar5}$ (Σχήμα 10). Ωστόσο, από τα διαγράμματα των συσχετίσεων μεταξύ των μοντελοποιημένων (sCASE_{MODIS}-GPP με την προσθήκη των cloud scalar) και των μετρημένων GPP (eddy-GPP) που δίνονται στο Σχήμα 11, προκύπτουν επιπλέον πληροφορίες που δεν αποτυπώνονται στους συντελεστές R^2 και RMSE. Ίσως η σημαντικότερη πληροφορία αφορά το $C_{scalar3}$, η χρήση του οποίου οδηγεί σε περιορισμό της παραγωγικότητας κάτω από τα $13 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Παρόμοια επίδραση, αν και όχι το ίδιο απόλυτη, φαίνεται να έχουν και τα ε_{base} και εW_{base} με περιορισμό της παραγωγικότητας περίπου στα $14 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, με διάσπαρτες τιμές πάνω από αυτό το όριο οι οποίες όμως δεν ανταποκρίνονται στις τιμές των πύργων. Ειδικά στην περίπτωση του εW_{base} , η υπερεκτίμηση σε πολλές περιπτώσεις είναι πολύ μεγάλη, οδηγώντας σε τιμές GPP σχεδόν $30 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Στον αντίποδα, τα ε_{base} και $C_{scalar2}$ τα οποία παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές RMSE φαίνεται να αποτυπώνουν καλύτερα την παραγωγικότητα, χωρίς να παρουσιάζουν κάποιον περιορισμό σε συγκεκριμένη τιμή GPP. Θα πρέπει να σημειωθεί πως η GPP είναι μεγαλύτερη από $13 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ μόλις 1.594 ημέρες, έναντι των συνολικών 54.785 ημερήσιων τιμών GPP από όλες τις περιοχές (2,91%), ενώ τιμές GPP μεγαλύτερες από $15 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ έχουν μόλις 398 ημέρες (0,73%). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σφάλμα της μοντελοποιημένης GPP σε υψηλές τιμές παραγωγικότητας να μην αποτυπώνεται στον συντελεστή RMSE.

Από τα παραπάνω, γίνεται ξεκάθαρο πως η αξιολόγηση των μοντέλων παραγωγικότητας (και όλων των μοντέλων) είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, που απαιτεί να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες και δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε δύο συντελεστές. Η σχετική βιβλιογραφία κυριαρχείται από την αξιολόγηση βάσει των R^2 και RMSE, σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και κάποιος επιπλέον συντελεστής (συνήθως το BIAS), με τη παρουσίαση διαγραμμάτων συσχετίσεων να είναι σπάνια και συνήθως χωρίς να δίνεται βαρύτητα σε αυτά. Αν εξεταστούν συνολικά τα διαφορετικά cloud scalar αυτής της μελέτης, η επιλογή ενός βέλτιστου περιπλέκεται, με το ε_{base} να αποδίδει πολύ καλά βάσει R^2 , RMSE αλλά και της κλίσης της ευθείας (κοντά στη γραμμή 1 προς 1), αλλά να εμφανίζει ένα «πλατό» στις υψηλές τιμές παραγωγικότητας που δεν συμφωνεί με την eddy-GPP. Το ίδιο φαινόμενο και πιο έντονο παρατηρείται και στα εW_{base} και $C_{scalar3}$ όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Αντιθέτως, τα ε_{base} και $C_{scalar2}$ αποτυπώνουν καλύτερα της υψηλές τιμές GPP, αν και πάσχουν στις μεσαίες, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα υψηλές τιμές RMSE. Η επιλογή μεταξύ των παραπάνω cloud scalar είναι καθαρά υποκειμενική και προκύπτει από την βαρύτητα που δίνει ο μελετητής στα επιμέρους στοιχεία της σχέσης της μοντελοποιημένης με τη μετρημένη GPP.

Όσον αφορά τα πέντε cloud scalar που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πρέπει να σημειωθεί πως η απόδοση τους θα μπορούσε να βελτιωθεί αν παραμετροποιούνταν για κάθε περιοχή χωριστά, όπως συμβαίνει με το ε_{base} (και τα ε_{base} και εW_{base}). Έρευνες έχουν δείξει πως η σχέση του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας με την ε και την GPP διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (Emmel et al., 2020; Zhou et al., 2021), καθώς εξαρτάται από τη δομή του θόλου (Kanniah et al., 2012), τις ιδιότητες των φύλλων (Durand et al., 2021) και τις μετεωρολογικές συνθήκες (Gui et al., 2021; Park et al., 2018). Ωστόσο, επιλέγεται η κοινή παραμετροποίηση για όλες τις περιοχές επενδύοντας στην ευκολία υπολογισμού και χρήσης των cloud scalar, με το κόστος στην ακρίβεια τους να μην αποδεικνύεται πολύ μεγάλο.

Η παραμετροποίηση ανά περιοχή που απαιτεί το ε_{base} (και άλλα αντίστοιχα cloud scalar), είναι ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα, και πιθανόν και η αιτία που η πλειοψηφία των μοντέλων LUE δεν

έχουν ενσωματώσει το $\varepsilon_{\text{base}}$ ή κάποιο άλλο αντίστοιχο. Αρχικά, η ίδια η ιδέα πως ένας αλγόριθμος θα τροποποιείται συνεχώς βάσει του πόσο καλά αποδίδει είναι προβληματική, ακόμη και για εμπειρικά μοντέλα όπως τα μοντέλα LUE. Παρότι η διαφορά στη σχέση του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας με την ε ανά περιοχή, έχει οικολογική βάση, όπως αναλύθηκε παραπάνω, η τροποποίηση των παραμέτρων υπολογισμού της $\varepsilon_{\text{base}}$ βάσει αποτελέσματος δεν έχει. Η παραμετροποίηση της εξίσωσης με την συμπερίληψη κάποιου χαρακτηριστικού του θόλου, όπως π.χ. ο LAI, ή διαφοροποιώντας την εξίσωση ανά τύπο βλάστησης, θα ήταν πιο ρεαλιστική. Εναλλακτικά, για μεγαλύτερη ακρίβεια όσον αφορά την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας ανά περιοχή θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τρισδιάστατες αναπαραστάσεις της δομής του θόλου από δεδομένα ενεργητικών αισθητήρων όπως οι LiDAR (Cifuentes et al., 2017). Επιπλέον, ο υπολογισμός του S_{CI} που χρησιμοποιεί το $\varepsilon_{\text{base}}$ περιλαμβάνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του CI ανά έτος, κάτι που δυσχεραίνει την χρήση του σε πραγματικό χρόνο. Ενώ και η διαδικασία παραμετροποίησης αυτή καθαυτή περιορίζει τη χρήση του $\varepsilon_{\text{base}}$, καθώς βασίζεται σε μετρήσεις GPP στο πεδίο, καθιστώντας τη χρήση του σε περιοχές χωρίς τέτοια δεδομένα πρακτικά αδύνατη.

Εν κατακλείδι, η απόδοση του sCASE με τη χρήση των πέντε cloud scalar αποδείχθηκε ικανοποιητική, τόσο σε σύγκριση με τα άλλα scalar που εξετάστηκαν, όσο και με τα ευρήματα αντίστοιχων εργασιών (Xu et al., 2023). Πολύ ενθαρρυντική είναι η απόδοση του $C_{\text{scalar}3}$ το οποίο είναι μια πολύ απλή εξίσωση που αντικαθιστά την ε_0 , δεν περιλαμβάνει ειδικές τιμές και απαιτεί μόνο τις τιμές της PAR και της $PAR_{\text{potential}}$. Η βελτίωση της σχέσης της μοντελοποιημένης με την μετρημένη GPP με την χρήση του $C_{\text{scalar}3}$ για όλα τα οικοσυστήματα που εξετάστηκαν, που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος συνθηκών και ειδών, σηματοδοτεί μια ελπίδα για παράκαμψη του σημαντικού προβλήματος του υπολογισμού της ε_0 για διάφορες λειτουργικές ομάδες (Zheng et al., 2018). Ωστόσο, καθώς οι εξισώσεις των πέντε cloud scalar που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της μελέτης, παραμετροποιήθηκαν βάσει της ακρίβειας του sCASE στις δεκατρείς περιοχές (χαμηλότερες τιμές RMSE), απαιτείται η επαλήθευση των αποτελεσμάτων και σε άλλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων περιοχών με διαφορετικούς τύπους βλάστησης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε περιοχές με αραιή βλάστηση, καθώς η πυκνότητα του θόλου θεωρείται κρίσιμη για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (Liu et al., 2022), καθώς και στις καλλιέργειες οι οποίες είναι μαζί με τα αειθαλή πλατύφυλλα, οι δυσκολότερες κατηγορίες βλάστησης στη μοντελοποίηση (Xu et al., 2023; Zhang et al., 2012) για μια σειρά από λόγους (Guan et al., 2021; Wang et al., 2021).

Τα ευρήματα της εργασίας αυτής επιβεβαιώνουν πως τα μοντέλα LUE μπορούν να βελτιωθούν λαμβάνοντας υπόψη τους την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην αποδοτικότητα. Η προσθήκη ενός cloud scalar στον αλγόριθμο του sCASE βελτιώνει την συνολική απόδοση του, αυξάνοντας κατά πολύ τον R^2 και περιορίζοντας τον RMSE (Σχήμα 10). Ο βελτιωμένος αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του μια σειρά από περιοριστικούς παράγοντες οι οποίοι φαίνονται ικανοί να αποτυπώσουν τις διάφορες επιδράσεις στην GPP χωρίς να αυξάνουν το σφάλμα του μοντέλου. Σε μια εκτενή ανάλυση σε παγκόσμιο επίπεδο οι Bao et al. (2022) βρήκαν πως το βέλτιστο μοντέλο σε παγκόσμιο επίπεδο διέθετε δύο scalar νερού, ένα θερμοκρασίας, ένα για τη διάχυτη ακτινοβολία και ένα για τον κορεσμό σε υψηλά επίπεδα PAR. Από τους παράγοντες αυτούς η βελτιωμένη εκδοχή του sCASE που παρουσιάστηκε εδώ, δεν περιλαμβάνει μονάχα scalar για τον κορεσμό, ωστόσο, η αρνητική επίδραση της έντονης απευθείας ακτινοβολίας πιθανόν αποτυπώνεται από άλλα scalar που αφορούν στην υψηλή θερμοκρασία, την ξηρασία της ατμόσφαιρας και την έλλειψη νερού, στοιχεία που συνυπάρχουν με την έντονη ακτινοβολία (Bao et al., 2022; Piao et al., 2020). Για κάποια από τα cloud scalar που εξετάστηκαν (συμπεριλαμβανομένου του $C_{\text{scalar}3}$), η επίδραση του κορεσμού πιθανόν αποτυπώνεται από το ίδιο το cloud scalar, καθώς η τιμή της ε μειώνεται για υψηλές τιμές του λόγου PAR προς $PAR_{\text{potential}}$. Πρέπει να σημειωθεί πάντως, πως οι Bao et al. (2022) θεωρούν

πως και η χρήση ενός scalar για την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ είναι χρήσιμη, κάτι που καλύπτεται στον αλγόριθμο τους από ένα scalar VPD (ένα από τα δυο υδατικά scalar) που περιλαμβάνει, αλλά δεν λαμβάνεται υπόψη στο sCASE. Το VPD έχει συνδεθεί με το βαθμό που η αυξημένη συγκέντρωση του CO₂ επιδρά στην παραγωγικότητα, λόγω της σχέσης του με το κλείσιμο των στομάτων και την ανταλλαγή αερίων μεταξύ του φυτού και της ατμόσφαιρας (Jiao et al., 2019).

Η επίδραση της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων του sCASE

Για να εξεταστεί η πιθανή επίδραση της χωρικής ανάλυσης στην ακρίβεια της μοντελοποιημένης GPP, συγκρίθηκαν οι τιμές GPP που υπολογίστηκαν από το sCASE με δεδομένα από τρεις αισθητήρες με διαφορετική χωρική ανάλυση ο καθένας (MODIS, OLCI και MSI). Η χρήση του MSI σε συνδυασμό με την ταξινόμηση που πραγματοποιήθηκε με βάση εικόνες του (με μέγεθος pixel 10*10 μέτρα), επιτρέπει την αξιολόγηση τόσο της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης των εικόνων, όσο και της ταξινόμησης. Η μελέτη αφορούσε σε έξι περιοχές της Ελλάδας (Πίνακας 2) με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που επέτρεπαν την εξέταση της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης υπό διαφορετικές συνθήκες κάλυψης.

Στη περίπτωση των δυο πυκνών και ομοιογενών οικοσυστημάτων (*Fagus sylvatica* και *Pinus nigra*) δεν εμφανίζονται μεγάλες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών τύπων GPP, με τις συσχετίσεις σε όλες τις περιπτώσεις να έχουν υψηλό R^2 και τιμές πολύ κοντά στη γραμμή ένα προς ένα (Σχήματα 13 και 14). Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται στις δυο αυτές περιοχές, φαίνεται να πηγάζουν κυρίως από μικροδιαφορές στους δείκτες βλάστησης και όχι από την ταξινόμηση. Σε κάθε περίπτωση, δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα τη συνολική σχέση μεταξύ των διάφορων τύπων GPP και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Αντιθέτως, στην περίπτωση της περιοχής *Pinus halepensis*, που είναι η περιοχή με το μεγαλύτερο ποσοστό μη δασικής κάλυψης (24,2%), παρατηρούνται έντονες διαφορές μεταξύ όλων των τύπων GPP, με τους MODIS και OLCI να υποεκτιμούν αρκετά την GPP σε σχέση με τον MSI. Οι αποκλίσεις μεταξύ των τριών GPP από τις μέσες τιμές των αισθητήρων (Σχήματα 15Α, 15Γ, 15Ε) υποδηλώνουν ότι υπάρχει επίδραση των δεικτών βλάστησης, δηλαδή της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων, στην ακρίβεια του μοντέλου στην περιοχή αυτή. Επιπλέον, καθώς η σχέση των $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $sCASE_{OLCI-GPP}$ με την $sCASE_{full_MSI-GPP}$ είναι ασθενέστερη συγκριτικά με αυτήν με την $sCASE_{MSI-GPP}$, η ταξινόμηση επιβαρύνει επιπλέον την ακρίβεια του μοντέλου στην συγκεκριμένη περιοχή. Σε αυτό συνηγορεί και η απόκλιση των τιμών μεταξύ των δύο τύπων GPP του MSI (Σχήμα 15ΣΤ).

Στις άλλες τρεις περιοχές (*Quercus sp.*, *Mixed Fagus sylvatica* και *Mixed Pinus nigra*) οι GPP υπολογισμένες με τις μέσες τιμές των δεικτών από τους τρεις αισθητήρες συμφωνούν αρκετά μεταξύ τους (υψηλές τιμές R^2), με αποκλίσεις να παρατηρούνται σε χαμηλές και μέτριες τιμές GPP (Σχήματα 16, 17, 18), οι οποίες αφορούν την περίοδο που τα φυλλοβόλα είδη δεν διαθέτουν φύλλα ή δεν έχουν πλήρως ανεπτυγμένη κόμη. Παρότι οι αποκλίσεις αυτές δεν επηρεάζουν έντονα τη συνολική σχέση μεταξύ των τριών διαφορετικών GPP κάθε περιοχής, σε μεμονωμένες περιπτώσεις (συγκεκριμένες ημέρες) αφορούν μεγάλες ποσοστιαίες διαφορές και συνεπώς δεν μπορούν να αγνοηθούν. Η περιοχή *Quercus sp.* περιέχει ένα ποσοστό *Pinus nigra* (8,8%), το οποίο σε συνδυασμό με το υψηλό ποσοστό μη δασικής κάλυψης της περιοχής (14,9%) μπορεί να προκαλεί αυτές τις αποκλίσεις μεταξύ των δεικτών βλάστησης των τριών αισθητήρων. Οι άλλες δυο περιοχές (*Mixed Fagus sylvatica* και *Mixed Pinus nigra*) δεν έχουν υψηλά ποσοστά μη δασικής κάλυψης, είναι όμως μεικτές, περιλαμβάνοντας ένα φυλλοβόλο και ένα αειθαλές είδος. Και στις τρεις περιπτώσεις, η επίδραση των δεικτών εξασθενεί στις υψηλές τιμές GPP, όταν όλα τα είδη είναι σε πλήρη λειτουργικότητα, γεγονός που πιθανόν να σημαίνει πως η ετερογένεια είναι λιγότερο σημαντική και η βασική αιτία των διαφορών είναι τα κενά στην κάλυψη.

Όσον αφορά τη ταξινόμηση, οι τρεις αυτές περιοχές συμπεριφέρονται διαφορετικά όταν αυτή λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς του sCASE ($sCASE_{full_MSI-GPP}$), αν και σε κάποιο βαθμό όλες φαίνεται να επηρεάζονται. Στη περίπτωση της περιοχής *Quercus sp.* και οι τρεις GPP από τις μέσες τιμές των τριών δεικτών, εμφανίζουν έντονη απόκλιση από την πλήρη μορφή της $sCASE_{full_MSI-GPP}$ (Σχήματα 15Β, 15Δ, 15ΣΤ) με αυξανόμενη υπερεκτίμηση όσο αυξάνεται η GPP.

Αυτή η απόκλιση πιθανόν οφείλεται στην λανθασμένη ταξινόμηση του ποσοστού *Pinus nigra* αλλά και του υψηλού ποσοστού μη δασικής κάλυψης (14,9%). Αντίστοιχη είναι η κατάσταση και στην περιοχή Mixed *Fagus sylvatica*, όπου οι τρεις GPP, αποκλίνουν από την πλήρη GPP του MSI, με υποεκτίμηση των χαμηλών GPP και υπερεκτίμηση των υψηλών (Σχήματα 17B, 17Δ και 17ΣΤ). Η υποεκτίμηση των χαμηλών GPP του χειμώνα προκύπτει από την λανθασμένη ταξινόμηση των *Pinus nigra* (19,3%), που έχει ως αποτέλεσμα την λανθασμένη αποτύπωση της παραγωγικότητάς τους πιθανόν κυρίως λόγω του αναπτυσσόμενου scalar. Ενώ αντιθέτως, κατά την περίοδο των υψηλών GPP, η παραγωγικότητα των *Pinus nigra* υπερεκτιμάται με τη χρήση της υψηλότερης ϵ_0 των *Fagus sylvatica*. Τέλος, στην περίπτωση της περιοχής Mixed *Pinus nigra* παρά την βελτίωση της σχέσης των $sCASE_{MODIS-GPP}$ και $sCASE_{OLCI-GPP}$ με την $sCASE_{full_MSI-GPP}$ (υψηλότεροι R^2), παρατηρείται μια σταθερή υπερεκτίμηση της GPP στην περίπτωση του MODIS, ενώ το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του MSI με μέσες τιμές δεικτών. Η αιτία αυτής της υπερεκτίμησης δεν είναι ξεκάθαρη, καθώς θα αναμενόταν μια υποεκτίμηση της GPP των *Fagus sylvatica* (εμφανής στις υψηλές τιμές GPP της περιοχής), λόγω χαμηλότερης ϵ_0 , ωστόσο είναι πιθανόν αυτό να οφείλεται στην δράση των D_{scalar} και T_{scalar} .

Συνοψίζοντας είναι ξεκάθαρο πως η χωρική ανάλυση τόσο των δεδομένων τηλεπισκόπησης όσο και της ταξινόμησης είναι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα μοντέλα παραγωγικότητας, με τις επιδράσεις τους να είναι εντονότερες σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη, μέτριες σε περιοχές με ετερογένεια και αμελητέες σε πυκνές ομοιογενείς περιοχές. Τα ευρήματα αυτά συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που δείχνουν ότι η χωρική ανάλυση επιδρά στην ακρίβεια υπολογισμού της GPP σε περιοχές με ετερογένεια και κενά στην βλάστηση (As-syakur et al., 2010; Gelybó et al., 2013; Huang et al., 2022; Knox et al., 2017; Krofcheck et al., 2016). Πρέπει να σημειωθεί πως και στις τέσσερις περιοχές που εμφανίζουν είτε ετερογένεια είτε κενά στην κάλυψη, το κυρίαρχο είδος καταλαμβάνει ποσοστό μεγαλύτερο από 75% της συνολικής βλάστησης της περιοχής (Πίνακας 24), οπότε είναι πιθανό, η επίδραση της χωρικής ανάλυσης (και των δεικτών βλάστησης και της ταξινόμησης) να είναι ακόμα εντονότερη σε περιοχές που τα διάφορα είδη έχουν παραπλήσια ποσοστά.

Η χωρική ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων, δηλαδή των δεικτών βλάστησης, είναι καθοριστική για την ακρίβεια του fAPAR (Cai et al., 2014) και συνεπώς της APAR, η οποία αποτελεί το ένα από τα δυο μέρη της εξίσωσης υπολογισμού της GPP (Εξίσωση 3). Ο σωστός υπολογισμός της APAR είναι βασικός για την ακρίβεια των εκτιμήσεων της παραγωγικότητας (Ruimy et al., 1999; Xiao et al., 2019), ωστόσο, ο ρόλος της χωρικής ανάλυσης των δεικτών βλάστησης δεν έχει αξιολογηθεί διεξοδικά (Huang et al., 2022). Η επίδραση της χωρικής ανάλυσης συνδέεται τόσο με την ετερογένεια της περιοχής όσο και με το ποσοστό κάλυψης, με το δεύτερο να αποδεικνύεται πολύ πιο κρίσιμο, καθώς οι εντονότερες διαφορές παρατηρούνται στην περιοχή με το μεγαλύτερο ποσοστό μη δασικής κάλυψης (*Pinus halepensis*). Επιπλέον, τόσο στην περιοχή *Quercus* sp. όσο και στις μεικτές περιοχές (Mixed *Fagus sylvatica* και Mixed *Pinus nigra*) οι σημαντικότερες διαφορές εντοπίζονται όταν τα φυλλοβόλα είδη δεν έχουν φύλλα, λειτουργώντας πρακτικά ως κενά στη βλάστηση. Στις τέσσερις αυτές περιοχές οι GPP υπολογισμένες με δεδομένα των MODIS ($sCASE_{MODIS_GPP}$) και OLCI ($sCASE_{OLCI_GPP}$) συμφωνούν καλύτερα μεταξύ τους, απ' ό,τι με τη GPP του MSI ($sCASE_{MSI_GPP}$), γεγονός που τονίζει την σημασία της χωρικής ανάλυσης των δεικτών αφού οι MODIS και OLCI είναι μεσαίας χωρικής ανάλυσης (500 και 300 μέτρα, αντίστοιχα), με τον MSI να είναι υψηλής (10 μέτρα). Μάλιστα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως αυτή η ισχυρή σχέση υφίσταται παρότι οι περιοχές των δυο δεν ταιριάζουν απόλυτα, λόγω διαφορετικής χωρικής ανάλυσης και τροχιακών χαρακτηριστικών. Στον αντίποδα, η σχέση μεταξύ

του MODIS και του MSI, ευνοείται από την απόλυτη ταύτιση των περιοχών τους, αφού η επιλογή των pixel του MSI βασίζεται σε αυτά του MODIS.

Η επίδραση της χωρικής ανάλυσης των δεικτών βλάστησης στις περιοχές με κενά στην κάλυψη μπορεί, να αποδοθεί στον διαφορετικό τρόπο που το συνολικό φάσμα κάθε αισθητήρα επηρεάζεται από τα φάσματα των μη φυτικών στοιχείων της περιοχής (Krofcheck et al., 2016). Επίσης, έχει δειχθεί πως σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη οι γωνίες λήψης των αισθητήρων μπορούν να προκαλέσουν έντονες διακυμάνσεις στην τιμή του NDVI (Knox et al., 2017). Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως οι γωνίες λήψης του MSI για όλες τις περιοχές κυμαίνονται μεταξύ 6 και 10 μοιρών, τη στιγμή που οι αντίστοιχες του MODIS κυμαίνονται από 0 έως 60 μοίρες και αυτές του OLCI από 0 έως 56. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ενώ ο MSI «βλέπει» το στόχο σχεδόν κάθετα σε όλες τις λήψεις του, οι MODIS και OLCI βλέπουν το στόχο υπό διαφορετική γωνία κάθε φορά.

Αντίστοιχη είναι η εικόνα και όσον αφορά την χωρική ανάλυση της ταξινόμησης, με την επίδραση της να είναι έντονη στην περιοχή *Pinus halepensis* (χαμηλοί συντελεστές R^2), σημαντική στις μεικτές περιοχές (έντονες κλίσεις των ευθειών) και αμελητέα στις δυο ομοιογενείς περιοχές. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί πως η ταξινόμηση φαίνεται να επηρεάζει ελαφρώς την περιοχή *Fagus sylvatica*, η οποία περιέχει ένα μικρό ποσοστό *Pinus nigra* (5%), σε αντίθεση με την περιοχή *Pinus nigra* που δεν περιέχει άλλο είδος. Επιπλέον και η περιοχή *Quercus* sp., που επίσης περιέχει ένα ποσοστό *Pinus nigra* (8,8%) επηρεάζεται έντονα από την ταξινόμηση, όπως και οι δυο μεικτές περιοχές, αν και η *Mixed Pinus nigra* ελαφρώς. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση κοινής ταξινόμησης για μια περιοχή οδηγεί σε υπερεκτίμηση της παραγωγικότητας, ειδικά σε μεσαίες προς υψηλές τιμές, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών GPP από δεδομένα MSI. Αυτό παρατηρείται σε μικρό βαθμό ακόμη και στις ομοιογενείς περιοχές (Σχήματα 13ΣΤ και 14ΣΤ). Συνολικά, η χωρική ανάλυση της ταξινόμησης φαίνεται να είναι πιο κρίσιμη από την χωρική ανάλυση των δεικτών στις ετερογενείς περιοχές όπως έχουν σημειώσει και άλλες μελέτες (Zheng et al., 2018), ειδικά σε περιοχές που περιέχουν είδη με φυσιολογικές διαφορές (Gelybó et al., 2013). Η λανθασμένη ταξινόμηση επηρεάζει τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο του μοντέλου, με κρισιμότερη την ϵ_0 , οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις στην GPP (Wagle et al., 2016; Xiao et al., 2014).

Κλείνοντας, ο MSI αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για την παρακολούθηση περιοχών με ετερογένεια και χαμηλή κάλυψη, όπως είναι οι καλλιέργειες, για τις οποίες τα προϊόντα με χαμηλή χωρική ανάλυση αποδεικνύονται ανεπαρκή (Quaife et al., 2008; Xiao et al., 2011). Ωστόσο, αισθητήρες με χαμηλή ή μέτρια χωρική ανάλυση, όπως ο MODIS και ο OLCI, αποτελούν πολύ καλές εναλλακτικές για περιοχές με ομοιογένεια και υψηλή κάλυψη, όπως και για εφαρμογές σε πολύ μεγάλη κλίμακα (Zhao and Liu, 2014; Zheng et al., 2018). Ο συνδυασμός των δυο τύπων δεδομένων, μέσω τεχνικών data fusion, θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια των εκτιμήσεων για τα διάφορα οικοσυστήματα σε παγκόσμιο επίπεδο (He et al., 2018; Huang et al., 2022), εκμεταλλευόμενος την υψηλή χωρική ανάλυση του MSI και την καθημερινή λήψη του MODIS.

Ο δείκτης PRI

Βασική επιδίωξη της μελέτης αυτής, όσον αφορά τον δείκτη βλάστησης PRI (Gamon et al., 1992), είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης του ως «υποκατάστατο» της αποδοτικότητας χρήσης φωτός σε μοντέλα παραγωγικότητας LUE. Πριν από αυτό, επιχειρήθηκε η διερεύνηση της σχέσης του δείκτη με συγκεκριμένες παραμέτρους της βλάστησης, σε επίπεδο φύλλου και μέρους του θόλου, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του φυσιολογικού περιεχομένου του σήματος του δείκτη. Ειδικότερα, εξετάστηκε η σχέση του δείκτη PRI από επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας, με οικοφυσιολογικές παραμέτρους της βλάστησης που μετρήθηκαν στο πεδίο και συγκεκριμένα το δυναμικό νερού και τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή. Οι επίγειες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιοχές του πάρκου Βόρειας Πίνδου (Πίνακας 2) κατά τα έτη 2013 και 2014, περίπου μια φορά τον μήνα για καθένα από τα τέσσερα δασικά είδη που μελετήθηκαν, τα *Fagus sylvatica*, *Pinus nigra*, *Quercus frainetto* και *Quercus cerris*.

Ξεκινώντας από το δυναμικό νερού, είναι ξεκάθαρο πως δεν υπάρχει καμία σχέση του με τον PRI (ούτε φύλλου ούτε θόλου), για κανένα από τα τέσσερα είδη που μελετήθηκαν (Πίνακας 25). Η μέτρηση του δυναμικού νερού πραγματοποιούνταν κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, όμως ούτε ο PRI θόλου που μετρήθηκε το μεσημέρι συσχετίζεται με το δυναμικό. Η παντελής έλλειψη συσχέτισης που βρέθηκε στην παρούσα εργασία έρχεται σε αντίθεση με τα ευρήματα αντίστοιχων εργασιών (Stagakis et al., 2010; Suárez et al., 2008; Zarco-Tejada et al., 2012). Ωστόσο, οι Ballester et al., (2018), βρήκαν μεγάλες διαφορές στη σχέση PRI και δυναμικού μεταξύ των ειδών που μελέτησαν, με τον συντελεστή R^2 να κυμαίνεται από 0,00 έως 0,680. Επιπλέον, όταν εξέτασαν όλα τα είδη μαζί δεν βρήκαν καμία σχέση ($R^2=0,01$) μεταξύ του PRI και του Ψ.

Αντιθέτως, ο PRI, τόσο σε επίπεδο φύλλου όσο και σε επίπεδο θόλου, συσχετίζεται με το λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (Πίνακας 26), όπως έχει βρεθεί σε πλήθος εργασιών (Filella et al., 2009; Sims and Gamon, 2002; Stylinski et al., 2002). Καθώς θεωρητικά η σχέση του PRI με την ε βασίζεται στην ανίχνευση από τον δείκτη των αλλαγών στο κύκλο των ξανθοφυλλών (Peñuelas et al., 1995), η εξάρτηση του PRI από το σύνολο των καροτενοειδών δυνητικά επηρεάζει τη σχέση των δυο. Ο ρόλος που παίζει η εξάρτηση του PRI από τον λόγο των χλωροφυλλών προς τα καροτενοειδή στη σχέση PRI και ε, δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος, με κάποιους ερευνητές να θεωρούν πως επιδρά αρνητικά (Hmimina et al., 2014; Merlier et al., 2015) ενώ άλλους να θεωρούν πως ευνοεί τη σχέση (Garbulsky et al., 2014; Stagakis et al., 2014). Η φωτοπροστατευτική δράση και άλλων καροτενοειδών πέραν των ξανθοφυλλών (Frank and Brudvig, 2004; Telfer, 2005), ίσως να συνηγορεί υπέρ της δεύτερης άποψης (Filella et al., 2009). Η σχέση του PRI με τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή εντοπίζεται και στα τέσσερα είδη, ωστόσο, παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των ειδών, με τη σχέση να είναι ισχυρότερη στο *Pinus nigra* και ασθενέστερη στο *Fagus sylvatica*. Τέτοιες διαφορές μεταξύ ειδών έχουν βρεθεί και σε άλλες εργασίες (Filella et al., 2009; Wong et al., 2020; Wong and Gamon, 2015), με τα αίτια να θεωρούνται πως πηγάζουν από τις δομικές διαφορές μεταξύ διαφορετικών ειδών αλλά και την ύπαρξη άλλων χρωστικών (Gitelson et al., 2017; Sims and Gamon, 2002). Η καλύτερη σχέση του PRI με τον λόγο Chl/Car στο *Pinus nigra* συμφωνεί με τα ευρήματα της σχετικής βιβλιογραφίας που θέλουν τη σχέση να είναι ισχυρότερη στα κωνοφόρα έναντι των πλατύφυλλων, με τις εργασίες ωστόσο που αφορούν σε πλατύφυλλα να είναι λίγες (Zhang et al., 2016). Όσον αφορά την ασθενέστερη σχέση στο *Fagus sylvatica*, αυτή μπορεί να οφείλεται στο ότι το είδος αυτό περιέχει ανθοκυανίνες, οι οποίες έχει βρεθεί πως διαταράσσουν τη σχέση του PRI με το λόγο Chl/Car, αλλά και αυτό καθαυτό το σήμα του δείκτη, καθώς απορροφούν και στα δύο μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του (Gitelson et al., 2017).

Διαφορές παρατηρούνται και μεταξύ των φύλλων φωτός και σκιάς (Πίνακας 26), με τον PRI να συσχετίζεται με το λόγο Chl/Car μόνο στα φύλλα φωτός, ενώ στην περίπτωση του *Fagus sylvatica* δεν υπάρχει συσχέτιση ούτε στα φύλλα φωτός (Σχήμα 23). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα ευρήματα των Filella et al. (2009), οι οποίοι βρήκαν στατιστικά σημαντική συσχέτιση μόνο για τα φύλλα σκιάς του είδους *Pinus sylvestris* και καμία συσχέτιση (ούτε σε φύλλα φωτός ούτε σκιάς) για το *Quercus ilex*. Ωστόσο, τα ευρήματα της παραπάνω εργασίας είναι επισφαλής, καθώς αφορούν σε μικρό αριθμό μετρήσεων, κάτι που θέλει προσοχή και στην παρούσα μελέτη, καθώς ο αριθμός των μετρήσεων διαφέρει ανά περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση, ο λόγος Chl/Car είναι υψηλότερος στα φύλλα σκιάς έναντι των φύλλων φωτός και στα τέσσερα είδη, κάτι που οφείλεται σε χαμηλότερη συγκέντρωση καροτενοειδών στα φύλλα σκιάς. Η χαμηλή συγκέντρωση καροτενοειδών στα φύλλα σκιάς και η χαμηλή διακύμανσή της στο χρόνο, θα μπορούσε να εξηγήει την απουσία συσχέτισης του λόγου Chl/Car με τον PRI στα φύλλα σκιάς.

Κλείνοντας, στα τρία φυλλοβόλα είδη η συσχέτιση του PRI θόλου είναι ασθενέστερη για τον PRI που μετρήθηκε το μεσημέρι έναντι των δύο που μετρήθηκαν νωρίτερα μέσα στην ημέρα (πρωινός και ενδιάμεσος PRI). Η αποσύνδεση του PRI από τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή μέσα στην ημέρα θα μπορούσε να προκύπτει από αλλαγές στον κύκλο των ξανθοφυλλών, οι οποίες αποτυπώνονται στον PRI όμως δεν αλλάζουν τον λόγο Chl/Car (Filella et al., 2009; Gamon et al., 2015). Η χρονική διάσταση θεωρείται καθοριστική για το «περιεχόμενο» του σήματος του PRI, με τις μεταβολές που παρατηρούνται μεταξύ ωρών να οφείλονται στις ξανθοφύλλες, ενώ το σύνολο των καροτενοειδών καθορίζει τις αλλαγές σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (Gamon et al., 2005).

Κρίνοντας συνολικά τα παραπάνω, πράγματι ο λόγος χλωροφυλλών προς καροτενοειδή φαίνεται να επιδρά στο σήμα του PRI, ωστόσο η σχέση των δυο δεν έχει την ισχύ που θα καθιστούσε τον λόγο Chl/Car τον καθοριστικό παράγοντα για τον PRI. Η συσχέτιση σε επίπεδο φύλλου είναι μέτρια, ενώ η αποσύνδεση του μεσημεριανού PRI θόλου από τον λόγο Chl/Car υποδηλώνει πως άλλοι παράγοντες επιδρούν πιο καθοριστικά στο σήμα του PRI. Παρότι πολλές εργασίες έχουν βρει σχέση μεταξύ του λόγου Chl/Car και του PRI, τα αποτελέσματα στη σχετική βιβλιογραφία είναι αρκετά ετερογενή (Garbulsky et al., 2011; Zhang et al., 2016), με πολλούς παράγοντες να διαφοροποιούνται μεταξύ των διάφορων μελετών (είδη, φύλλα ή θόλος, συνθήκες φωτισμού, χρονική διάσταση), κάτι που δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Είναι ξεκάθαρο πως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση αυτής της σχέσης ώστε να εξακριβωθεί η βαρύτητα της επίδρασης του λόγου Chl/Car στον PRI και τα αίτια που την διαφοροποιούν μεταξύ των διάφορων καταστάσεων.

MODIS PRI

Η σύνδεση δορυφορικών προϊόντων με την αποδοτικότητα (ϵ) αποτελεί ένα σημαντικό ζητούμενο, που θα άλλαζε ριζικά τη δυνατότητα παρακολούθησης των χερσαίων οικοσυστημάτων. Στα πλαίσια την συνεχιζόμενης έρευνας γύρω από τη σχέση του PRI με την ϵ , στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα του δείκτη PRI, υπολογισμένου με δεδομένα MODIS, να παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αποδοτικότητας ενός οικοσυστήματος. Πραγματοποιήθηκε μια σε βάθος ανάλυση της σχέσης του PRI με την ϵ , στη περιοχή San Rossore (Πίνακας 1), και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Παράλληλα, εξετάστηκαν παραλλαγές της ϵ , με έμφαση στη διαφοροποίηση της μέσα στη μέρα αλλά και την παράμετρο της ακτινοβολίας.

Ξεκινώντας από την ανάλυση της αποδοτικότητας στην περιοχή του San Rossore, οι πέντε παραλλαγές βάσει της ακτινοβολίας συσχετίζονται καλά μεταξύ τους ($R^2 > 0,97$), όπως έχουν δείξει και προηγούμενες μελέτες (Drolet et al., 2008), οδηγούν ωστόσο, σε διαφορές στο μέγεθος της ϵ_d . Η ισχυρή συσχέτιση των διαφορετικών ϵ_d προκύπτει από την ισχυρή επίδραση που έχουν στην τιμή της αποδοτικότητας οι τιμές της GPP και της PAR, με την επίδραση της fAPAR να μην είναι ικανή να τις αποκλίνει αισθητά, ειδικά σε ένα αειθαλές δάσος όπως αυτό. Η μέγιστη τιμή της ϵ_d PAR για τις ημέρες λήψεως τους MODIS ήταν $0,371 \text{ g C mol}^{-1} \text{ PAR}$, ενώ οι τιμές αποδοτικότητας ήταν μεγαλύτερες, όπως είναι λογικό, όταν αφορούν στην APAR. Συγκεκριμένα, οι ϵ_d APAR ήταν $0,424$ και $0,484 \text{ g C mol}^{-1} \text{ APAR}$ με τη πρώτη μέθοδο υπολογισμού της APAR (ϵ_d APAR_{Terra} και ϵ_d APAR_{Aqua} αντίστοιχα) και $0,387$ και $0,400 \text{ g C mol}^{-1} \text{ APAR}$ με τη δεύτερη μέθοδο υπολογισμού (ϵ_d APAR_{Terra} και ϵ_d APAR_{Aqua} αντίστοιχα). Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά μεταξύ της ϵ_d APAR των δύο μεθόδων υπολογισμού της APAR, που προκύπτει από τη διαφορά στην τιμή APAR που υπολογίζουν οι δυο μέθοδοι, με την δεύτερη μέθοδο να υπολογίζει υψηλότερες τιμές APAR, άρα μικρότερες τιμές ϵ , καθώς λαμβάνει υπόψη την υψηλότερη απορρόφηση της διάχυτης ακτινοβολίας (Chen et al., 2005; Knohl and Baldocchi, 2008). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και η σημαντικά υψηλότερη τιμή ϵ που βρέθηκε για τις ημέρες λήψεων του MODIS (ϵ_d APAR από $0,387$ έως $0,484 \text{ g C mol}^{-1} \text{ APAR}$, ανάλογα τη μέθοδο), που αντιστοιχούν σε καθαρές ημέρες χωρίς συννεφιά, από την ϵ_0 που χρησιμοποιούν τόσο το sCASE όσο και το MODIS-LUE για τα ENF ($0,250$ και $0,215 \text{ g C mol}^{-1} \text{ APAR}$, αντίστοιχα). Οι τιμές αποδοτικότητας που βρέθηκαν συμφωνούν με αυτές που έχουν βρει αντίστοιχες μελέτες σε κωνοφόρα είδη (Moreno et al., 2012; Turner et al., 2003; Y. Zhang et al., 2017).

Ο PRI αποδείχθηκε ικανός να παρακολουθεί τις εποχικές διακυμάνσεις της αποδοτικότητας (ϵ) του υπό μελέτη δάσους αειφυλλων κωνοφόρων, το οποίο είναι αντιμέτωπο με ξηρασία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της έντονης ξηρασίας του καλοκαιριού του 2003, η σχέση του PRI με την ϵ εξασθενεί, με τον δείκτη να μην ακολουθεί τις πολύ χαμηλές τιμές της ϵ (Σχήμα 24). Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν παλαιότερες μελέτες που θέλουν τον PRI να ακολουθεί τις διακυμάνσεις της ϵ σε ξηρά οικοσυστήματα (Goerner et al., 2009; Guarini et al., 2014), αλλά να αδυνατεί να παρακολουθήσει τις συνέπειες ακραίας και μακράς ξηρασίας (Guarini et al., 2014; Vicca et al., 2016). Η αποσύνδεση του PRI από την ϵ κατά την διάρκεια έντονης ξηρασίας, μπορεί να οφείλεται σε αλλαγές στα χαρακτηριστικά της βλάστησης που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια τέτοιων γεγονότων, οι οποίες δεν σχετίζονται με τον κύκλο των ξανθοφυλλών και κατά συνέπεια δεν αποτυπώνονται στον PRI (Guarini et al., 2014; Vicca et al., 2016). Η ακραία σε ένταση και διάρκεια ξηρασία, μπορεί να ενεργοποιεί εναλλακτικούς φωτοπροστατευτικούς μηχανισμούς, να προκαλεί αλλαγές στις συγκεντρώσεις όλων των χρωστικών, καθώς και δομικές αλλαγές στη βλάστηση, τα οποία να έχουν ως συνέπεια την αποσύνδεση του PRI και της ϵ . Είναι ενδεικτικό πως οι C. Zhang et al. (2017), βρήκαν ότι μετά την δέκατη έκτη συνεχόμενη ημέρα ξηρασίας, οπότε και

ήταν εμφανής η πτώση φύλλων, ο PRI παρέμενε σχετικά σταθερός, σε αντίθεση με την φωτοσύνθεση η οποία συνέχισε να μειώνεται.

Ο PRI βρέθηκε να συσχετίζεται καλύτερα με την ϵ που υπολογίστηκε με βάση την προσπίπτουσα PAR (ϵ_{PAR}), συγκριτικά με την ϵ που βασίζεται σε τιμές APAR (ϵ_{APAR}), ανεξάρτητα από το κανάλι αναφοράς, τον αισθητήρα (MODIS του Terra ή του Aqua) ή τις συνθήκες λήψης (γωνίες ηλίου και αισθητήρα) του PRI. Επιπλέον, η σχέση του PRI με την ϵ βρέθηκε να επηρεάζεται από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της APAR από τον NDVI του MODIS (Πίνακας 28), με την πιο απλή μέθοδο (Μέθοδος 1) να υπολογίζει τιμές ϵ που συσχετίζονται καλύτερα με τον PRI απ' ό,τι αυτές της πολυπλοκότερης Μεθόδου 2. Είναι εμφανές πως η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η APAR, είναι κρίσιμη για την σχέση του PRI με την ϵ , ειδικά αν ληφθεί υπόψη πως δεν υπάρχει μια καθολικά αποδεκτή μέθοδος. Τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα ευρήματα των Drolet et al. (2008), οι οποίοι βρήκαν πως η σχέση του PRI με την ϵ παρέμενε σταθερή είτε χρησιμοποιούσαν την PAR είτε την APAR (υπολογισμένη από το προϊόν fAPAR του MODIS, MOD15) για τον υπολογισμό της ϵ . Η καλύτερη συσχέτιση του PRI με την ϵ_{PAR} έναντι της ϵ_{APAR} θα μπορούσε να οφείλεται σε λανθασμένο υπολογισμό της APAR λόγω του θορύβου του NDVI. Έχει βρεθεί πως τόσο ο PRI (Hilker et al., 2008) όσο και η ϵ που υπολογίζεται από την PAR (Gitelson and Gamon, 2015) επηρεάζονται από τη δομή του θόλου, γεγονός που θα μπορούσε να εξηγεί την καλύτερη συσχέτιση των δυο. Ωστόσο, η επίπεδη επιφάνεια της περιοχής μελέτης (San Rossore) καθώς και η χαμηλή διακύμανση του fAPAR στο συγκεκριμένο οικοσύστημα, πιθανόν περιορίζουν την επίδραση των δομικών συστατικών, όπως έχει βρεθεί για άλλα αείφυλλα δάση (Goerner et al., 2011). Στο τελευταίο συνηγορεί και το γεγονός πως στο συγκεκριμένο οικοσύστημα δεν βρέθηκε καμία σχέση του NDVI (και κατ' επέκταση του LAI και της APAR) ούτε με την ϵ (Σχήμα 24) ούτε με τον PRI.

Όταν εξετάζεται ο PRI κάθε αισθητήρα με όλες τις λήψεις (χωρίς κριτήρια γωνιών λήψης, all angles PRI) η σχέση του με την αποδοτικότητα είναι σχετικά ασθενής (Πίνακας 28), όπως έχει βρεθεί και από άλλες μελέτες που αφορούσαν σε δάση κωνοφόρων και τον PRI χωρίς κριτήρια λήψης (Drolet et al., 2008; Goerner et al., 2011; Middleton et al., 2016). Ο περιορισμός των PRI βάσει των γωνιών λήψης, βελτιώνει τη συσχέτιση του PRI με την ϵ , ειδικά όταν χρησιμοποιείται η ϵ κατά τη στιγμή λήψης της κάθε εικόνας αντί της ημερήσιας (Πίνακες 30 και 31). Η βέλτιστη συσχέτιση (υψηλότερος συντελεστής προσδιορισμού, $R^2=0,512$) που βρέθηκε στην παρούσα ανάλυση αφορά τον PRI_{12_Aqua_b} με $|RAA|<120$ και την $\epsilon_{\text{ov_PAR}}$. Όταν οι κατηγορίες λήψης (all angles, nadir, backscatter και forward scatter) συγκριθούν μεταξύ τους λαμβάνοντας υπόψη το εύρος τιμών της ϵ που αντιστοιχεί σε κάθε υποσύνολο PRI, ο backscatter PRI έχει την καλύτερη επίδοση έναντι των άλλων (Σχήμα 30A). Οι backscatter λήψεις θεωρούνται βέλτιστες για τον PRI λόγω του χαμηλού ποσοστού σκιασμένης κόμης που περιέχουν, που έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή επίδραση της σκίασης στις τιμές του δείκτη (Drolet et al., 2008, 2005; Guarini et al., 2014), αλλά και οι άλλες συνθήκες λήψης (forward scatter και nadir) έχουν βρεθεί να βελτιώνουν την σχέση του PRI με την ϵ (Goerner et al., 2011; Middleton et al., 2016; Stagakis et al., 2014). Πρέπει να σημειωθεί πως τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των επιμέρους υποσυνόλων PRI (Πίνακας 16), είναι κρίσιμα για το τελικό αποτέλεσμα (ισχύς της σχέσης PRI και ϵ) και πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη, καθώς συχνά διαφέρουν μεταξύ εργασιών. Για το συγκεκριμένο οικοσύστημα, τα αυστηρά κριτήρια για το backscatter και το forward scatter PRI δεν βελτιώνουν τη σχέση του PRI με την ϵ (Πίνακες 30 και 31), παρ' ό,τι οδηγούν σε σύνολα PRI με πολύ ομοιόμορφες συνθήκες λήψης, καθώς αντιστοιχούν σε πολύ μικρό εύρος τιμών ϵ (Πίνακας 32). Αντιθέτως, τα πολύ ευρεία κριτήρια επωφελούνται από το μεγάλο εύρος τιμών της ϵ και παράγουν τις πιο υψηλές συσχετίσεις.

Όσον αφορά τις ημίωρες τιμές αποδοτικότητας (ϵ_{hh_PAR}), παρότι και οι έξι που εξετάστηκαν (από τις 11:00 ως τις 14:00) συσχετίζονται καλά με την ημερήσια αποδοτικότητα (ϵ_d_PAR), καμία δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα αντιπροσωπευτική της ημερήσιας. Προηγούμενες μελέτες (Drolet et al., 2008; Sims et al., 2005) έχουν κρίνει τις ημίωρες ϵ του μεσημεριού καθαρών (ανέφελων) ημερών ως αντιπροσωπευτικές της ϵ_d , κάτι που δεν επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα της παρούσας μελέτης (Σχήμα 25). Οι ημίωρες τιμές ϵ (ϵ_{hh_PAR}) κατά τη χρονική περίοδο που διέρχεται ο Aqua, συσχετίζονται καλύτερα (ευθεία πιο κοντά στη γραμμή 1 προς 1) με τις ημερήσιες τιμές ϵ (ϵ_d_PAR), συγκριτικά με τις ημίωρες ϵ (ϵ_{hh_PAR}) κατά την διέλευση του Terra (Σχήμα 25). Επιπλέον, ο PRI του Aqua έχει καλύτερη επίδοση από τον PRI του Terra, για όλες τις κατηγορίες λήψης, λαμβάνοντας υπόψη το εύρος τιμών της ϵ (Σχήμα 30B). Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές πως η ώρα διέλευσης του δορυφόρου από την περιοχή μελέτης (και συνεπώς λήψης της εικόνας) είναι κρίσιμη για την απόδοση του PRI, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες εργασίες (Garbulsky et al., 2013; Middleton et al., 2016). Το γεγονός πως η σχέση του PRI του Terra με την ϵ διέλευσης (ϵ_{ov}) δεν είναι σημαντικά ισχυρότερη από την σχέση του με την ημερήσια (Πίνακες 30 και 31), πιθανώς υποδηλώνει πως άλλοι παράγοντες επιδρούν στην σχέση των δυο κατά το χρόνο διέλευσης του Terra από την συγκεκριμένη περιοχή. Συγκεκριμένα, ο Terra διέρχεται από την περιοχή πριν από το μεσημέρι (από τις 11:00 έως τις 12:00, τοπική ώρα), χρόνος κατά τον οποίο δύναται να συμβαίνουν ποσοτικές αλλαγές στις χρωστικές της βλάστησης (π.χ. σύνθεση νέων μορίων) οι οποίες επηρεάζουν τη σχέση του PRI με την ϵ . Ενώ οι εναλλαγές μεταξύ των τριών χρωστικών του κύκλου των ξανθοφυλλών είναι μια ταχύτατη διεργασία (Adams et al., 2004) και αποτυπώνεται άμεσα στον PRI (Gamon and Berry, 2012; Gamon and Bond, 2013), αλλαγές στις ποσότητες των χρωστικών, οι οποίες συμβαίνουν στη διάρκεια της ημέρας (Kyparissis et al., 2000), είναι αργές και μπορεί να αποσυνδέουν τον PRI από την ϵ . Αντιθέτως, κατά τις μεσημεριανές ώρες και τη περίοδο διέλευσης του Aqua, πιθανότατα η παραγωγή ξανθοφυλλών ως απόκριση στο στρες έχει ολοκληρωθεί, οδηγώντας σε καλύτερη συσχέτιση μεταξύ του PRI και της ϵ .

Όσον αφορά το κανάλι αναφοράς, για το συγκεκριμένο οικοσύστημα ο PRI με κανάλι αναφοράς το κανάλι 12 (PRI₁₂) εμφανίζει την πιο σταθερή απόδοση μεταξύ των διάφορων συνόλων που εξετάστηκαν (Πίνακες 30 και 31). Πάντως, οι άλλοι δυο τύποι PRI (PRI₁₃ και PRI₁) είχαν αντίστοιχης ισχύος συσχετίσεις για συγκεκριμένες κατηγορίες (γωνίες) λήψης, κυρίως με την ημερήσια ϵ , ενισχύοντας την εκτίμηση πως οι γωνίες λήψης των εικόνων επιδρούν στο βέλτιστο μήκος κύματος αναφοράς για τον PRI (Stagakis et al., 2014). Στη βιβλιογραφία βρέθηκαν επτά εργασίες που συνέκριναν την αποτελεσματικότητα διάφορων παραλλαγών του MODIS PRI (διαφορετικό κανάλι αναφοράς) να παρακολουθούν την ϵ διάφορων οικοσυστημάτων. Από αυτές, τρεις βρήκαν ως βέλτιστο κανάλι αναφοράς το 1 (Goerner et al., 2009; Middleton et al., 2016; Ulsig et al., 2017), δύο βρήκαν το 12 (Goerner et al., 2011; Guarini et al., 2014), μια το 13 (Drolet et al., 2005) και μια το 14 (Drolet et al., 2008). Ενώ οι He et al. (2016), βρήκαν πως ο PRI με κανάλι αναφοράς το 10 είχε την ισχυρότερη συσχέτιση με την GPP. Από τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω εργασιών, συμπεριλαμβανομένης της παρούσας, δεν προκύπτει κάποιος ξεκάθαρος παράγοντας που να καθορίζει το βέλτιστο κανάλι αναφοράς.

Κλείνοντας την ανάλυση του PRI του MODIS, πρέπει να τονιστεί η σημαντική επίδραση του εύρους τιμών της ϵ που αντιστοιχεί σε κάθε σύνολο PRI, στην σχέση του δείκτη με την ϵ . Περιορισμένο εύρος τιμών ϵ συνοδεύεται από χαμηλούς συντελεστές προσδιορισμού (R^2) των αντίστοιχων γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ PRI και ϵ , ανεξαρτήτως αισθητήρα, συνθηκών λήψης, καναλιού αναφοράς και τύπου ϵ (ημερήσια ή ημίωρη) που χρησιμοποιείται (Σχήμα 29). Το εύρος τιμών της ϵ φαίνεται να δρα ως ανασταλτικός παράγοντας για την σχέση του PRI με την ϵ και ειδικά ως ένας παράγοντας στρέβλωσης της σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών συνόλων PRI, εξού και πρέπει

να λαμβάνεται υπόψη όταν μελετάται η σχέση του PRI με την ϵ . Αυτή η επίδραση του εύρους στη σχέση PRI και ϵ , είναι πιο σημαντική για τον PRI υπολογισμένο από δορυφορικά δεδομένα, καθώς η ανάγκη για καθαρές ατμοσφαιρικές συνθήκες περιορίζει ακόμη περισσότερο το εύρος τιμών της ϵ που αντιστοιχεί σε ημέρες με χρήσιμες δορυφορικές εικόνες. Αυτή η ιδιαιτερότητα θα μπορούσε να εξηγήει εν μέρει το ότι στις εργασίες που χρησιμοποιούν επίγεια δεδομένα ή δεδομένα UAV για τον υπολογισμό του PRI, παρατηρούνται ισχυρότερες συσχετίσεις μεταξύ του PRI και της ϵ (Zhang et al., 2016).

Επιπλέον, το εύρος τιμών της ϵ θα μπορούσε να είναι ο παράγοντας που εξηγεί τα αντικρουόμενα ευρήματα στην σχετική με τον PRI βιβλιογραφία, τα οποία αφορούν σε διαφορετικές περιοχές μελέτης, με διαφορετικές ώρες διέλευσης των αισθητήρων (λήψης των εικόνων) και διαφορετικές γωνίες λήψης των εικόνων. Παλαιότερες εργασίες έχουν εκφράσει προβληματισμό για την καταλληλότητα του PRI σε περιοχές με χαμηλή διακύμανση της ϵ (Goerner et al., 2011; Middleton et al., 2016). Οι Middleton et al. (2016) πρότειναν πως η περιορισμένη διακύμανση της ϵ , μπορεί να επηρεάσει τη σχέση του PRI με την ϵ , λόγω του ότι ο θόρυβος στο σήμα του PRI θα επισκιάζει τις αλλαγές της ανακλαστικότητας που οφείλονται στο κύκλο των ξανθοφυλλών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη αλλαγή της ανακλαστικότητας στα 531 nm που μπορεί να προκαλέσει ο κύκλος των ξανθοφυλλών είναι της τάξης του 7% (Hall et al., 2008) και ότι ο θόρυβος στο κανάλι 11 του MODIS είναι περίπου 3% του συνολικού σήματος (Moreno et al., 2012; Xiong et al., 2003), πράγματι ο θόρυβος θα μπορούσε να εμποδίσει την ανίχνευση μικρών αλλαγών στην ανακλαστικότητα των ξανθοφυλλών που θα αντιστοιχούσαν σε μικρές μεταβολές της ϵ . Συνεπώς, τα ευρήματα της εργασίας αυτής, καθιστούν απαραίτητο όταν συγκρίνονται διαφορετικά σύνολα PRI, να λαμβάνεται υπόψη το εύρος τιμών της ϵ που αντιστοιχεί σε κάθε σύνολο.

Είναι σίγουρο πως ο MODIS έδωσε την δυνατότητα για τα αρχικά βήματα στην μελέτη του PRI σε επίπεδο οικοσυστήματος, και παρά τα δομικά του προβλήματα, βοήθησε στην κατανόηση των προβλημάτων αλλά και των προϋποθέσεων για την εφαρμογή του PRI σε μεγάλη κλίμακα. Από τις γνώσεις που προέκυψαν από την εφαρμογή του MODIS PRI, σχεδιάστηκαν νέοι υπερφασματικοί αισθητήρες που περιλαμβάνουν τα μήκη κύματος που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του PRI και (θα) επιτρέψουν την περεταίρω μελέτη του PRI σε επίπεδο οικοσυστήματος. Αυτοί οι νέοι αισθητήρες θα παρέχουν εικόνες με πιο σταθερές συνθήκες λήψης, καλύτερη φασματική και χωρική ανάλυση, υστερώντας ωστόσο στη συχνότητα λήψης έναντι του MODIS. Ένα σημαντικό μειονέκτημα για πολλούς από αυτούς τους αισθητήρες είναι ότι οι λήψεις τους αφορούν προκαθορισμένες περιοχές (PRISMA, DESIS), περιορίζοντας έτσι τις πιθανές χρήσεις τους. Μεταξύ των αισθητήρων που έχουν εκτοξευθεί πρόσφατα ή έχουν προγραμματιστεί για το άμεσο μέλλον, ο πιο πολλά υποσχόμενος όσον αφορά τον PRI, είναι ο FluORescence Imaging Spectrometer (FLORIS), μέρος του προγράμματος FLuorescence EXplorer (FLEX) της ESA. Ο αισθητήρας αυτός είναι σχεδιασμένος ειδικά για τη μελέτη της φωτοσύνθεσης, περιλαμβάνοντας κανάλια για τον PRI με εύρος 2 nm και χωρική ανάλυση 300 μέτρα. Η εκτόξευση του FLEX είναι προγραμματισμένη για το 2025.

Τηλεπισκόπηση, δυνατότητες και μειονεκτήματα

Πέντε δεκαετίες μετά τον πρώτο δορυφόρο που σχεδιάστηκε για να μελετήσει το περιβάλλον, η τηλεπισκόπηση έχει πια καθιερωθεί ως ένα αξιόπιστο εργαλείο μελέτης της γήινης επιφάνειας και των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν. Η χωρική και χρονική δυνατότητα που παρέχει η τηλεπισκόπηση δεν θα μπορούσε ποτέ να επιτευχθεί με άλλα μέσα, και άλλαξε για πάντα τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τον πλανήτη μας (Lechner et al., 2020). Ειδικά στην περίπτωση της χωρικής διεύρυνσης, πέραν από την δυνατότητα ταυτόχρονης παρατήρησης τεράστιων εκτάσεων, η τηλεπισκόπηση παρείχε τη δυνατότητα μελέτης περιοχών απροσπέλαστων για τον άνθρωπο. Ταυτόχρονα, η συνεχής παρατήρηση επέτρεψε την καταγραφή και αναγνώριση αλλαγών στην λειτουργία των γήινων οικοσυστημάτων που συνέβησαν μέσα στα χρόνια και η ανάλυση αυτών των προτύπων επιτρέπει την πρόβλεψη μελλοντικών αλλαγών. Η κλιματική αλλαγή και η ανθρώπινη παρέμβαση στα οικοσυστήματα, δύσκολα θα μπορούσαν να κατανοηθούν σε βάθος χωρίς την ύπαρξη της τηλεπισκόπησης.

Έως σήμερα η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών, που καλύπτουν όλους τους τύπους οικοσυστημάτων (δασικά, καλλιέργειες, υδάτινα), έχει επεκταθεί στη μελέτη τεχνητών δομών όπως τα αστικά κέντρα, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και σε επιστήμες εκτός των περιβαλλοντικών, όπως η αρχαιολογία (Dubovik et al., 2021). Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης παρέχουν τη δυνατότητα της άμεσης ανάλυσης των σημείων ενδιαφέροντος, ενώ κάθε λήψη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πλήθος εφαρμογών ασύνδετων μεταξύ τους. Επιπλέον, η μη επεμβατική φύση της τηλεπισκόπησης την καθιστά ιδανική για την επαναλαμβανόμενη μελέτη ευάλωτων οικοσυστημάτων και οργανισμών. Όσον αφορά τα χερσαία οικοσυστήματα η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών, όπως η χαρτογράφηση και ταξινόμηση της βλάστησης (Bauer and Cipra, 1973; Williams and Carter, 1976), η καταγραφή αλλαγών στα χαρακτηριστικά της βλάστησης αλλά και στις χρήσεις της γης (Achard et al., 2002; Hall et al., 1991), η παρακολούθηση της βιοποικιλότητας και της αλληλεπίδραση των ειδών (Seeley and Asner, 2021), η παρακολούθηση του κύκλου του άνθρακα (Jackson et al., 2018) και η γεωργία ακριβείας (Khanal et al., 2020).

Όμως οι δεκαετίες αυτές έφεραν στο προσκήνιο και τις αδυναμίες της τηλεπισκόπησης, οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις είναι δομικές και δεν δύναται να ξεπεραστούν. Το μεγαλύτερο ίσως μειονέκτημα της τηλεπισκόπησης είναι η αδυναμία μέτρησης των βιοφυσικών παραμέτρων, καθώς βασίζεται σε έμμεσες μεθόδους υπολογισμού που περιλαμβάνουν και διάφορες παραδοχές (Disney, 2016), γεγονός που καθιστά την επαλήθευση των υπολογισμών με δεδομένα πεδίου επιβεβλημένη. Επιπλέον, το πραγματικό περιεχόμενο των δεδομένων τηλεπισκόπησης είναι πολύπλοκο και για την εξαγωγή συμπερασμάτων για συγκεκριμένους στόχους, συχνά απαιτούνται πολύπλοκα μοντέλα που να υπολογίζουν τον τρόπο που αλληλεπιδρά η ακτινοβολία με τον εκάστοτε στόχο (Disney, 2016).

Στην περίπτωση των δορυφορικών αισθητήρων ένα εξίσου σημαντικό μειονέκτημα είναι η εξάρτηση τους από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Ryu et al., 2019). Εκτός από τη προφανή αδυναμία λήψης εικόνων τις ημέρες με συννεφιά (εξαιρούνται συγκεκριμένοι ενεργητικοί αισθητήρες), οι διαφορές στην σύσταση των αερίων της ατμόσφαιρας από μέρα σε μέρα μπορεί να επηρεάσουν τη συνάφεια μεταξύ διαδοχικών λήψεων. Παρ' ότι το πρόβλημα είναι γνωστό εδώ και δεκαετίες (Kaufman and Fraser, 1982) και έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές διόρθωσης της επίδρασης της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρική διόρθωση), εξακολουθεί να παραμένει ένα σημαντικό ζήτημα για την δορυφορική τηλεπισκόπηση (Liang and Li, 2020).

Στο τεχνικό κομμάτι, το μεγαλύτερο ζητούμενο για το μέλλον της τηλεπισκόπησης είναι η εξέλιξη των αισθητήρων ώστε να παράγουν εικόνες που να συνδυάζουν υψηλή χωρική, χρονική και φασματική ανάλυση (Dubovik et al., 2021). Στην πράξη κανένα όργανο δεν μπορεί να συνδυάσει

όλα αυτά τα χαρακτηριστικά και ο σχεδιασμός των οργάνων βασίζεται σε συμβιβασμούς μεταξύ των διάφορων τύπων ανάλυσης. Βασικό εμπόδιο προς αυτή την εξέλιξη αποτελεί ο όγκος των παραγόμενων δεδομένων όσο αυξάνεται η ανάλυση. Ωστόσο, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει υπάρξει ραγδαία όλα αυτά τα χρόνια, με τους αισθητήρες να έχουν βελτιωθεί πολύ, ενώ επαναστατική είναι και η εξέλιξη στη δυνατότητα μεταφοράς και ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων (Waldrop, 2016). Ειδικά όσον αφορά τον όγκο των δεδομένων, τεχνολογίες αυτοματοποιημένης ανάλυσης δεδομένων τηλεπισκόπησης από online πλατφόρμες όπως η Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017; Lin et al., 2022), αλλά και εφαρμογές μηχανικής μάθησης (Bebie et al., 2022; Kong et al., 2023), έχουν αλλάξει ριζικά τη δυνατότητα χειρισμού των δεδομένων τηλεπισκόπησης.

Οι online πλατφόρμες έχουν απαλλάξει τους χρήστες από την ανάγκη αποθηκευτικών μέσων, αφού δεν απαιτείται η προμήθεια των εικόνων, αλλά και από την ανάγκη υπολογιστών με υψηλή υπολογιστική δύναμη (Gorelick et al., 2017). Ενώ οι εφαρμογές μηχανικής μάθησης έχουν αλλάξει ριζικά τον τρόπο που χρησιμοποιούνται τα δεδομένα τηλεπισκόπησης, αλλά και τον χρόνο που απαιτείται για την ανάλυση τους (Reichstein et al., 2019). Η δυνατότητα τους να χειρίζονται μεγάλο όγκο δεδομένων, αναγνωρίζοντας μοτίβα και σχέσεις, έχει αυτοματοποιήσει πολλές διεργασίες, αλλά και δημιουργήσει πλήθος νέων τεχνικών. Διάφοροι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (π.χ. Support Vector Machine, Artificial Neural Network) έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της βλάστησης, με τις εφαρμογές που αφορούν στη ταξινόμηση να κυριαρχούν. Εκτός από τη ταξινόμηση η μηχανική μάθηση έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό πολλών παραμέτρων όπως ο LAI, η εξατμισοδιαπνοή και η GPP μεταξύ άλλων (Liang, 2020).

Στο κομμάτι των αισθητήρων, η εξέλιξη τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία, τόσο ως προς την ποικιλία και την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, όσο και ως προς διαθεσιμότητα αυτή καθ' αυτή. Νέοι πολυφασματικοί αισθητήρες με πολύ καλή χωρική ανάλυση (π.χ. MSI) ή/και πολύ υψηλή ραδιομετρική (π.χ. OLCI) διαθέτουν ελεύθερα τα δεδομένα τους, ενώ το ίδιο ισχύει και για μια σειρά από νέους υπερφασματικούς αισθητήρες με εξαιρετική φασματική ανάλυση. Παράλληλα, όλο και περισσότερα δεδομένα από ενεργητικούς αισθητήρες (LiDAR, SAR) γίνονται διαθέσιμα. Ενώ πραγματική επανάσταση έχουν φέρει οι αισθητήρες για μη επανδρωμένα αεροναυτικά οχήματα (UAV), επιτρέποντας στον καθένα να αποκτά τα δεδομένα που θέλει (τύπο, περιοχή) με τη συχνότητα που επιθυμεί. Το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων, έχουν οδηγήσει σε διάφορες τεχνικές συνδυασμού δεδομένων (data fusion) από διαφορετικούς αισθητήρες (multisource fusion) ή διαφορετικές περιόδους (multitemporal fusion) επεκτείνοντας την ακρίβεια των δεδομένων και τις εφαρμογές τους (Ghamisi et al., 2019).

Συνοψίζοντας, παρά τους περιορισμούς της, η τηλεπισκόπηση έχει αλλάξει εκ βάθρων την περιβαλλοντική έρευνα, καθιστώντας αδιανόητο ένα μέλλον χωρίς αυτήν. Η εξέλιξη των οργάνων αλλά και η σωστή ερμηνεία των δεδομένων μπορούν να οδηγήσουν την κατανόησή μας για τον πλανήτη και τις διεργασίες του σε νέα επίπεδα. Ωστόσο, θα πρέπει να έχουμε πάντα κατά νου, πως η επαλήθευση με απευθείας μετρήσεις στο πεδίο είναι ο μόνος τρόπος για σωστή κατανόηση των δεδομένων τηλεπισκόπησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο sCASE αποδείχθηκε ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον υπολογισμό της ολικής πρωτογενούς παραγωγικότητας (GPP), σε ποικιλία οικοσυστημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, με την απόδοση του να είναι καλύτερη στα πλατύφυλλα φυλλοβόλα (DBF) είδη και περιορισμένη στα πλατύφυλλα αειθαλή (EBF). Επιπλέον, το μοντέλο sCASE αποδίδει αρκετά καλύτερα από το αντίστοιχο του MODIS (MOD17A2) και στις δεκατριείς περιοχές, με την απόδοση του να είναι συγκρίσιμη με αυτή άλλων ευρέως χρησιμοποιούμενων μοντέλων στη βιβλιογραφία. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του sCASE είναι η ισχυρή του εξάρτηση από επίγειες μετεωρολογικές μετρήσεις, που καθιστά την εφαρμογή του σε μεγάλη κλίμακα επισφαλή. Τα τρία scalars (αναπτυξιακό, θερμοκρασιακό και υδατικό) που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος του sCASE για να αποτυπώσει τη μείωση της αποδοτικότητας, βελτιώνουν την απόδοση του μοντέλου, με την βαρύτητα καθενός να καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του κάθε οικοσυστήματος. Από τα τρία, το υδατικό scalar (W_{scalar}) είχε την εντονότερη επίδραση στην ακρίβεια της GPP, με το W_{scalar} του sCASE να καταφέρνει να αποτυπώσει αρκετά καλά τις επιπτώσεις της ξηρασίας στην GPP. Παρότι το W_{scalar} υστερεί ελαφρώς στις περιοχές που δεν αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού, κρίνοντας στο σύνολο των περιοχών είχε την καλύτερη απόδοση μεταξύ όσων εξετάστηκαν. Από τα υπόλοιπα υδατικά scalar που εξετάστηκαν αξίζει να αναφερθεί η σχετικά καλή απόδοση αυτών που βασίζονται σε δείκτες βλάστησης του MODIS, αν και υστερούν στις περιοχές με έντονη ξηρασία, καθώς η χρήση τους αποδεσμεύει το μοντέλο από την ανάγκη διάφορων μετεωρολογικών παραμέτρων. Συνολικά, τα υδατικά scalar που βασίζονται σε παραμέτρους του περιεχόμενου στη βλάστηση νερού (όπως το W_{scalar}), είναι καταλληλότερα για την ανίχνευση του υδατικού στρες.

Η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας στην παραγωγικότητα επαληθεύτηκε από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας, με την προσθήκη ενός cloud scalar στο sCASE να βελτιώνει αισθητά την απόδοση του σε όλες τις περιοχές. Η πλειοψηφία των cloud scalars που εξετάστηκαν (δέκα συνολικά) βελτίωσαν την απόδοση του sCASE, αυξάνοντας τον μέσο R^2 και μειώνοντας των μέσο RMSE. Το ϵ_{base} ήταν το cloud scalar που βελτίωσε περισσότερο το sCASE ακολουθούμενο από το $C_{\text{scalar}3}$ και το ϵW_{base} . Παρότι το ϵ_{base} υπερτερεί έναντι των πέντε cloud scalar που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η πολυπλοκότητα του και η παραμετροποίηση του ανά περιοχή το καθιστούν δύσχρηστο. Αντιθέτως, τα πέντε C_{scalar} είναι πολύ πιο απλά στον υπολογισμό τους, δεν απαιτούν επιπλέον παραμετροποίηση και μπορούν εύκολα να προστεθούν σε οποιοδήποτε μοντέλο LUE. Ειδικότερα το $C_{\text{scalar}3}$, που ήταν το καλύτερο από τα πέντε, υστερώντας ελάχιστα σε σχέση με το ϵ_{base} , αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική αφού δεν περιλαμβάνει καμία ειδοειδική παράμετρο, αντικαθιστώντας μάλιστα την ϵ_0 στον αλγόριθμο του sCASE. Η απόδοση αυτών των scalar πρέπει να εξεταστεί και σε άλλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων και περιοχών με άλλους τύπους βλάστησης, για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια τους στην αποτύπωση της επίδρασης της διάχυτης ακτινοβολίας στην παραγωγικότητα. Παρότι υπάρχουν αδυναμίες σε όλα τα cloud scalar που εξετάστηκαν, είναι ξεκάθαρο πως τα μοντέλα LUE θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν ένα cloud scalar, ώστε να παρέχουν όσο το δυνατόν ακριβέστερες τιμές GPP.

Κλείνοντας με το sCASE, εξετάστηκε η επίδραση της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων αλλά και της ταξινόμησης στην ακρίβεια του μοντέλου, με την χρήση δεδομένων από τρεις αισθητήρες με διαφορετική χωρική ανάλυση. Αμφότερες αποδείχτηκαν ιδιαίτερες κρίσιμες σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη, ενώ η επίδραση τους σε περιοχές με ετερογένεια ήταν ηπιότερη. Αντιθέτως, οι πυκνές ομοιογενείς περιοχές δεν φάνηκε να επηρεάζονται. Στις περιοχές με

ετερογένεια, η χωρική ανάλυση της ταξινόμησης φαίνεται να είναι η κρισιμότερη εκ των δυο, με την επίδραση της χωρικής ανάλυσης των δεικτών βλάστησης στις περιοχές αυτές να σχετίζεται με τα κενά στη βλάστηση που δημιουργούν τα φυλλοβόλα είδη. Συνοψίζοντας, είναι ξεκάθαρο πως η χωρική ανάλυση τόσο των δεδομένων τηλεπισκόπησης όσο και της ταξινόμησης είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μοντέλων παραγωγικότητας.

Συνοψίζοντας, αυτή η πρώτη αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου sCASE με βάση επίγειες μετρήσεις πύργων eddy covariance έδειξε πως το sCASE υπολογίζει την παραγωγικότητα με μεγάλη ακρίβεια και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές εκτός της αρχικής του παραμετροποίησης. Το sCASE θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση ενός πανελλήνιου συστήματος παρακολούθησης της δασικής παραγωγικότητας, παρέχοντας ταυτόχρονα μια γενική εικόνα για την κατάσταση των δασών και μια αδρή εικόνα για την απορρόφηση CO₂ στα πλαίσια των εθνικών πολιτικών για το κλίμα. Παράλληλα, τα ευρήματα της παρούσας ανάλυσης δείχνουν πως το sCASE, αλλά και όλα τα αντίστοιχα μοντέλα παραγωγικότητας, μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω με τη χρήση νέων αισθητήρων και τεχνικών. Τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης (όπως του MSI) σε συνδυασμό με νέες τεχνικές ταξινόμησης (π.χ. RF, SVM), μπορούν να βελτιώσουν κατά πολύ την ακρίβεια των μοντέλων. Επιπλέον, δεδομένα ενεργητικών αισθητήρων (π.χ. LiDAR, SAR) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ακριβέστερο υπολογισμό του LAI και την τρισδιάστατη απεικόνιση της δομής των οικοσυστημάτων.

Όσον αφορά τον δείκτη PRI, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής μελέτη του τόσο με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων, όσο και επίγειων μετρήσεων ανακλαστικότητας. Στο πρώτο σκέλος, οι μετρήσεις PRI στο πεδίο έδειξαν πως ο δείκτης συσχετίζεται με το λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή και στα τέσσερα είδη που μελετήθηκαν, ωστόσο, παρατηρούνται διαφορές στη σχέση μεταξύ των ειδών. Οι διαφορές αυτές έχουν αποδοθεί στα δομικά χαρακτηριστικά των φύλλων καθώς και στην ύπαρξη άλλων χρωστικών. Η αποσύνδεση του PRI θόλου από τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή μέσα στην ημέρα, που παρατηρήθηκε στα τρία φυλλοβόλα είδη (*Fagus sylvatica*, *Quercus frainetto* και *Quercus cerris*), θα μπορούσε να προκύπτει από αλλαγές στον κύκλο των ξανθοφυλλών, οι οποίες αποτυπώνονται στον PRI όμως δεν αλλάζουν τον λόγο Chl/Car. Τέλος, δεν βρέθηκε καμία σχέση μεταξύ του PRI και του δυναμικού νερού (Ψ) για κανένα από τα τέσσερα είδη.

Σε γενικές γραμμές, ο δορυφορικός PRI, από δεδομένα του αισθητήρα MODIS (με χωρική ανάλυση 1 km), συσχετίστηκε ικανοποιητικά με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός (ϵ) ενός οικοσυστήματος αείφυλλων κωνοφόρων (San Rossore). Ο PRI καταφέρνει να ακολουθήσει την εποχιακή διακύμανση της ϵ , αν και η σχέση των δυο αποκλίνει υπό συνθήκες έντονης και παρατεταμένης ξηρασίας. Η ικανότητα του PRI να ακολουθεί την ϵ βελτιώνεται (μέγιστος $R^2=0,512$) όταν χρησιμοποιούνται μόνο λήψεις με συγκεκριμένες συνθήκες (γωνίες αισθητήρα και ηλίου), ειδικά με την ημίωρη ϵ κατά την διέλευση του αισθητήρα (ϵ_{ov}), τονίζοντας την επίδραση των γωνιών και της ώρας λήψης των εικόνων στη σχέση PRI και ϵ . Οι PRI και των δυο αισθητήρων MODIS (Terra και Aqua) έδωσαν στατιστικώς σημαντικές συσχετίσεις με την ϵ , με αυτόν του Aqua να έχει ισχυρότερες συσχετίσεις, λόγω της διέλευσης του από τη περιοχή μελέτης ακριβώς μετά το μεσημέρι. Ο backscatter PRI είχε την καλύτερη απόδοση (έναντι των nadir και forward scatter), ωστόσο, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στα κριτήρια που εφαρμόζονται για την κατηγοριοποίηση των λήψεων, καθώς επηρεάζουν έντονα το τελικό αποτέλεσμα. Σε όλες τις περιπτώσεις (αισθητήρα, κανάλι αναφοράς, συνθήκες λήψης), ο PRI συσχετίστηκε καλύτερα με την ϵ υπολογισμένη με τιμές PAR αντί APAR, ένα αποτέλεσμα που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση. Όσον αφορά το κανάλι αναφοράς, για το συγκεκριμένο οικοσύστημα ο PRI με κανάλι αναφοράς το 12 (546 – 556 nm, PRI₁₂) είχε την πιο σταθερή και καθολική απόδοση ανάμεσα στα διάφορα σύνολα PRI. Οι συνθήκες λήψης

φαίνεται να αλλάζουν το βέλτιστο κανάλι αναφοράς, με τα κανάλια στο κόκκινο τμήμα του φάσματος να είναι πιο ευαίσθητα στις γωνίες λήψης.

Η ικανότητα του PRI να ακολουθεί την ε βρέθηκε να επηρεάζεται έντονα από το εύρος τιμών της ε που αντιστοιχεί στις λήψεις κάθε συνόλου PRI. Η ισχύς της σχέσης του PRI με την ε συσχετίζεται γραμμικά με το εύρος τιμών της ε , με το χαμηλό εύρος ε να αποσυνδέει τις δυο παραμέτρους. Το εύρος τιμών της ε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε μελλοντικές μελέτες, ειδικά όταν συγκρίνονται διαφορετικά σύνολα PRI, και μπορεί να εξηγήει τα αντικρουόμενα αποτελέσματα στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, αυτή η εξάρτηση της σχέσης του PRI με την ε , ίσως πηγάζει από χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περιοχής οπότε χρειάζεται επιπλέον μελέτη για το κατά πόσον ισχύει και για άλλα οικοσυστήματα.

Συνοψίζοντας, η σχέση του PRI με την αποδοτικότητα σε επίπεδο οικοσυστήματος επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας, με τη μέτρια ισχύ της σχέσης να οφείλεται στα χαρακτηριστικά του αισθητήρα MODIS (χαμηλή χωρική ανάλυση, μέτρια φασματική, έλλειψη καναλιού στα 570 nm). Οι σχετικά λίγες εργασίες που έχουν εξετάσει τον PRI από δορυφορικά δεδομένα (κυρίως του MODIS) έχουν καταγράψει τη δυναμική του συγκεκριμένου δείκτη να παρακολουθεί την αποδοτικότητα, γεγονός που έχει οδηγήσει στο σχεδιασμό νέων οργάνων και αποστολών, επικεντρωμένων στον PRI. Αισθητήρες με υψηλή φασματική ανάλυση στα κανάλια του PRI, με υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο και πιο ομοιογενείς συνθήκες λήψης, θα επιτρέψουν τον ακριβέστερο υπολογισμό του δείκτη με τελικό στόχο την δημιουργία μοντέλων παραγωγικότητας που θα χρησιμοποιούν τον PRI αντί της ε ($\varepsilon_0 * \text{scalars}$). Σε κάθε περίπτωση, η αποτύπωση από δορυφορικά δεδομένα μιας τόσο δυναμικής παραμέτρου όπως η ε , θα είναι πάντα εξαρτημένη από τη συχνότητα των λήψεων, η οποία επηρεάζεται έντονα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Όπως όλοι οι οπτικοί φασματικοί δείκτες, έτσι και ο PRI είναι διαθέσιμος μόνο για ημέρες με καθαρή ατμόσφαιρα, κάτι που αποτελεί ένα μεγάλο μειονέκτημα για την εφαρμογή του σε μοντέλα ημερήσιας παραγωγικότητας σε μεγάλη κλίμακα.

Είναι ξεκάθαρο πως η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη του φυσικού περιβάλλοντος, προσφέροντας μη παρεμβατικές μετρήσεις σε μεγάλη συχνότητα, που επιτρέπουν την μόνιμη παρακολούθηση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην γήινη επιφάνεια. Τις τελευταίες δυο δεκαετίες η τηλεπισκόπηση γνώρισε μεγάλη άνθιση, εκμεταλλεζόμενη στο έπακρο τις τεχνολογικές εξελίξεις, που την κατέστησε βασικό εργαλείο της μελέτης του περιβάλλοντος. Η χρήση των μεθόδων τηλεπισκόπησης σε συνδυασμό με στοχευμένες μετρήσεις πεδίου θα βοηθήσουν στην καλύτερη αντίληψη μας για τον πλανήτη που κατοικούμε και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε. Και ίσως, αν τα ευρήματα της επιστημονικής κοινότητας γίνουν ευρέως γνωστά, να προλάβουμε τις ακόμη μεγαλύτερες προκλήσεις που βρίσκονται μπροστά μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ολική πρωτογενής παραγωγικότητα (Gross Primary Productivity, GPP) των χερσαίων οικοσυστημάτων αποτελεί τη μεγαλύτερη ροή άνθρακα μεταξύ ατμόσφαιρας και βιόσφαιρας, γεγονός που την έχει θέσει στο επίκεντρο της έρευνας για την κλιματική αλλαγή. Η τηλεπισκόπηση παρέχει τα μέσα για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας σε μεγάλη κλίμακα, μέσω μοντέλων παραγωγικότητας, με τα μοντέλα LUE (Light Use Efficiency models) να είναι ίσως τα πιο ευρέως χρησιμοποιημένα. Τα μοντέλα LUE βασίζονται στην αρχή της αποδοτικότητας χρήσης φωτός (ϵ), που θέλει την παραγόμενη βιομάζα να εξαρτάται γραμμικά από την διαθέσιμη ακτινοβολία. Η παρούσα μελέτη ερευνά την ακρίβεια ενός μοντέλου LUE (sCASE) που βασίζεται σε δορυφορικά και μετεωρολογικά δεδομένα, με βάση μετρήσεις από πύργους eddy covariance, αναλύει τα επιμέρους συστατικά του και εξετάζει πιθανές βελτιώσεις. Επιπλέον, εξετάζεται και η σχέση του δείκτη βλάστησης PRI (Photochemical Reflectance Index) με την ϵ , μια σχέση που θα μπορούσε να λύσει το πρόβλημα του υπολογισμού της αποδοτικότητας διαφορετικών οικοσυστημάτων.

Η ημερήσια παραγωγικότητα (GPP) που υπολογίστηκε από το μοντέλο sCASE συγκρίθηκε με αυτή που μετρήθηκε σε δεκατρείς περιοχές με πύργους eddy covariance στην Ευρώπη, με το sCASE να αποδεικνύεται αρκετά ακριβές για τις περισσότερες περιοχές, υστερώντας σε περιοχές με αιθαλή πλατύφυλλα, κάτι που ισχύει για όλα τα μοντέλα παραγωγικότητας (όχι μόνο LUE). Η ακρίβεια του sCASE υπερτερεί έναντι αυτής του μοντέλου LUE του MODIS (προϊόν MOD17A2) στο σύνολο των περιοχών που εξετάστηκαν, και είναι συγκρίσιμη με αντίστοιχα μοντέλα LUE στη βιβλιογραφία. Και τα τρία scalar που χρησιμοποιεί η αρχική εκδοχή του sCASE (αναπτυξιακό, θερμοκρασιακό και υδατικό), κρίνονται απαραίτητα για την ακρίβεια της GPP, με τη βαρύτητα καθενός να καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του κάθε οικοσυστήματος. Η σύγκριση του υδατικού scalar του sCASE με άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα υδατικά scalar, έδειξε πως είναι πολύ ακριβές στην αποτύπωση της υδατικής κατάστασης της βλάστησης σε περιοχές με υδατική καταπόνηση, αν και υπερβάλει ελαφρώς σε περιοχές χωρίς καταπόνηση. Σε κάθε περίπτωση, κανένα από τα άλλα υδατικά scalar που εξετάστηκαν, δεν βρέθηκε να βελτιώνει την ακρίβεια του sCASE στο σύνολο των περιοχών έναντι του W_{scalar} .

Για τη βελτίωση του sCASE εξετάστηκε η χρήση ενός επιπλέον scalar για την επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας (cloud scalar), η οποία έχει βρεθεί πως αυξάνει την ϵ των οικοσυστημάτων, κάτι που αγνοεί η αρχική εκδοχή του μοντέλου, όπως και τα περισσότερα μοντέλα LUE. Χρησιμοποιούνται δέκα πιθανά cloud scalar, πέντε εκ των οποίων δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα περισσότερα cloud scalar βελτιώνουν την ακρίβεια του sCASE στο σύνολο των περιοχών μελέτης, αυξάνοντας τον συντελεστή προσδιορισμού (R^2) και μειώνοντας τον συντελεστή RMSE, μεταξύ των μοντελοποιημένων και των μετρημένων ημερήσιων τιμών GPP. Παρότι τα πέντε cloud scalar που δημιουργήθηκαν σε αυτή την εργασία υστερούν ελαφρώς έναντι του ϵ_{base} , η ευκολία υπολογισμού τους τα καθιστά πολύ καλά εργαλεία για την συμπερίληψη της επίδρασης της διάχυτης ακτινοβολίας στα μοντέλα LUE. Ωστόσο, η απόδοσή τους θα πρέπει να εξεταστεί και σε άλλες περιοχές, για να αξιολογηθεί η γενικότερη απόδοσή τους.

Η σημασία της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων που χρησιμοποιεί το sCASE, εξετάστηκε σε έξι περιοχές στην Ελλάδα που διαφέρουν σε ποσοστό κάλυψης και ετερογένεια, με τη χρήση δεδομένων από τρεις αισθητήρες με διαφορετική χωρική ανάλυση. Παραλλαγές της GPP των περιοχών αυτών υπολογίστηκαν με δεδομένα από τους MODIS, OLCI και MSI (500, 300 και 10 m, αντίστοιχα) και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Η χωρική ανάλυση των δεικτών βλάστησης που

χρησιμοποιεί το sCASE αποδείχθηκε κρίσιμη για της περιοχές με κενά στη βλάστηση, επηρεάζοντας λιγότερο τις περιοχές με ετερογένεια, με της πυκνές ομοιογενείς περιοχές να μένουν ανεπηρέαστες. Πιο κρίσιμη στην ακρίβεια του sCASE αποδείχθηκε η χωρική ανάλυση της ταξινόμησης, επηρεάζοντας έντονα τόσο τις περιοχές με κενά όσο και αυτές με ετερογένεια. Επιπλέον, η ταξινόμηση φαίνεται να επηρεάζει την ακρίβεια ακόμη και σε μικρές διαφορές στο θόλο.

Ο PRI που υπολογίστηκε από τις επίγειες μετρήσεις ανακλαστικότητας συσχετίστηκε με το λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή (Chl/Car), αν και βρέθηκαν διαφορές μεταξύ των τεσσάρων ειδών, αλλά δεν είχε καμία συσχέτιση με το δυναμικό νερού (Ψ). Οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερα δασικά είδη της Βόρειας Πίνδου, ένα κωνοφόρο (*Pinus nigra*) και τρία φυλλοβόλα (*Fagus sylvatica*, *Quercus frainetto* και *Quercus cerris*). Στα τρία φυλλοβόλα είδη παρατηρήθηκε μια αποσύνδεση του PRI θόλου από τον λόγο χλωροφυλλών προς καροτενοειδή μέσα στην ημέρα, η οποία θα μπορούσε να προκύπτει από αλλαγές στον κύκλο των ξανθοφυλλών.

Όσον αφορά τη σχέση του PRI με την ε , αυτή εξετάστηκε σε ένα οικοσύστημα με αειθαλή κωνοφόρα στην Ιταλία (San Rossore) που διαθέτει πύργο eddy covariance. Ο PRI υπολογίστηκε από δεδομένα του αισθητήρα MODIS (με χωρική ανάλυση 1 km), από δυο διαφορετικούς δορυφόρους (Terra και Aqua) οι οποίοι διαφέρουν ως προς την ώρα διέλευσης από την περιοχή μελέτης. Ο PRI καταφέρνει να παρακολουθήσει την εποχιακή διακύμανση της ε , αν και η σχέση τους αποκλίνει υπό συνθήκες έντονης και παρατεταμένης ξηρασίας. Η σχέση των δυο βελτιώνεται όταν χρησιμοποιούνται πιο σταθερές συνθήκες λήψεις (γωνίες αισθητήρα και ηλίου), με τις backscatter λήψεις να ευνοούν τη σχέση έναντι των άλλων (nadir, forward scatter). Προσοχή ωστόσο απαιτείται στα κριτήρια κατηγοριοποίησης των λήψεων, καθώς επηρεάζουν το αποτέλεσμα, με τα αυστηρά κριτήρια να αποδυναμώνουν τη σχέση PRI και ε . Οι ημίωρες τιμές αποδοτικότητας (ε_{hh}) αποκλίνουν από τις ημερήσιες (ε_d), κάτι που επηρεάζει την σχέση μεταξύ δορυφορικού PRI (MODIS PRI) και ημερήσιας ε , με τον PRI του Aqua να αποδίδει καλύτερα στη συγκεκριμένη περιοχή εκμεταλλευόμενος την ώρα διέλευσης του συγκεκριμένου δορυφόρου (μετά το μεσημέρι). Επιπλέον, οι PRI και των δυο αισθητήρων MODIS (Terra και Aqua) συσχετίζονται καλύτερα με την αποδοτικότητα κατά την στιγμή διέλευσης του δορυφόρου (ε_{ov}) έναντι της ημερήσιας αποδοτικότητας. Από τα τρία κανάλια αναφοράς που εξετάστηκαν, ο PRI που χρησιμοποιεί το κανάλι 12 (546 – 556 nm, PRI₁₂) είχε την ισχυρότερη απόδοση στο συγκεκριμένο οικοσύστημα, διατηρώντας τη σχέση του για τα διάφορα σύνολα PRI που εξετάστηκαν, με τις γωνίες λήψεις πάντως να επιδρούν στην απόδοση των καναλιών αναφοράς. Σε όλες τις περιπτώσεις (αισθητήρα, κανάλι αναφοράς, συνθήκες λήψης), ο PRI συσχετίστηκε καλύτερα με την ε υπολογισμένη με τιμές PAR αντί APAR, ένα αποτέλεσμα που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Όλα τα παραπάνω ευρήματα για την σχέση του PRI με την ε , φαίνεται να επηρεάζονται έντονα από το εύρος τιμών της ε που αντιστοιχεί σε κάθε σύνολο PRI, με το χαμηλό εύρος τιμών να οδηγεί σε αδύναμες συσχετίσεις. Αυτή η επίδραση του εύρους τιμών της ε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν συγκρίνονται διαφορετικά σύνολα PRI και πιθανόν να εξηγεί τα αντικρουόμενα αποτελέσματα στη βιβλιογραφία όσον αφορά τη σχέση του PRI με την αποδοτικότητα.

ABSTRACT

Gross Primary Productivity (GPP) of terrestrial ecosystems is the largest carbon flux between the atmosphere and the biosphere, which has set it in the spotlight of climate change research. Remote sensing provides the means for the calculation of productivity on large scale, through productivity models, with Light Use Efficiency (LUE or ϵ) models being the most frequently used. LUE models are based on the light use efficiency principle, which mandates a linear dependence of biomass production on the amount of radiation available. The present study investigates the accuracy of a LUE model (sCASE) that uses satellite and meteorological data, based on GPP measurements from eddy covariance towers, analyzes the components of its algorithm and tests possible improvements. Additionally, the relationship between the vegetation index PRI (Photochemical Reflectance Index) and LUE is investigated, a relationship that could offer a bypass for the difficult task of estimating efficiency values of different ecosystems.

The daily productivity (GPP) values estimated by sCASE were compared to those measured on thirteen eddy covariance sites in Europe and were found to be very accurate for most sites, failing to capture GPP of evergreen broadleaved ecosystems, a common problem for all productivity models (not only LUE type). sCASE was found to be more accurate than the LUE model of MODIS (MOD17A2 product) for all the sites of this study, matching the accuracy of other widely used LUE models in literature. All three scalars used by the original sCASE algorithm (developmental temperature and water), were proven to be crucial for its accuracy, with the importance of each one depending on the site characteristics. The comparison of sCASE's water scalar (W_{scalar}) with other widely used water scalars from literature, showed that it can capture adequately well the water availability of water stressed sites, slightly overestimating water effects on sites without water limitations. Overall, W_{scalar} performed better or equally good to all the other water scalars that were tested, when their performance on all sites is considered.

In order to improve sCASE accuracy, the use of an extra scalar accounting for the effect of diffuse radiation (cloud scalar) was tested. Diffuse radiation is known to increase canopy LUE, but sCASE, as most of the LUE models, does not incorporate this in its GPP estimates. Ten cloud scalars were used with sCASE, five of which were developed in this study. Most of them improved the accuracy of sCASE estimations for all the sites, increasing the coefficient of determination (R^2) of the linear regressions and reducing the Root Mean Square Error (RMSE) between modelled and measured GPP values. Although ϵ_{base} performed better than the five cloud scalars that were created in this study, their simplicity makes them useful tools for incorporating the effects of diffuse radiation in LUE models. However, their wider applicability for GPP estimation should be validated on other sites as well.

The importance of the spatial resolution of the data used by sCASE, was investigated over six sites in Greece that differ in species composition, forest density and coverage. That was done by estimating GPP with sCASE using three different sensor data, MODIS, OLCI and MSI, which have different spatial resolution (500, 300 and 10 m respectively). The spatial scale of the vegetation indices used from sCASE was found to be crucial for sites with fragmented canopy, affecting heterogeneous sites to a lesser degree and having no effect on homogenous and dense sites. More important for the accuracy of sCASE was the spatial resolution of the classification that the model

uses, which strongly affected both sites with heterogeneity and sites with fragmentation. Moreover, classification seems to affect accuracy even for small differences in canopy characteristics.

PRI calculated from ground-based reflectance measurements correlated well with the chlorophyll to carotenoids ratio (Chl/Car), although differences exist between species, but was found to have no relationship with water potential (Ψ). The ground measurements were conducted to four tree species of the North Pindus area, one coniferous (*Pinus nigra*) and three deciduous (*Fagus sylvatica*, *Quercus frainetto* και *Quercus cerris*). On the three deciduous species, canopy PRI and Chl/Car was found to diverge in the course of the day, which could be due to changes in the xanthophyll cycle.

The relationship of PRI and LUE was tested over an evergreen needleleaf forest in Italy (San Rossore), which is equipped with an eddy covariance tower. PRI was calculated from MODIS data (with 1 km spatial resolution) of both satellites (Terra and Aqua), which have different acquisition times on the specific site. PRI was found capable of following LUE seasonal variability, although unable to capture the effects of severe and prolonged water stress. The PRI:LUE relationship benefits from more stable viewing conditions (sensor and light angles), with backscatter acquisitions performing better than the other types (nadir and forward scatter). Attention should be given on the criteria used to categorize acquisitions as they seem to affect the outcome, with strict criteria weakening the relationship.

Half-hour LUE values (ϵ_{hh}) differ from those for the entire day (ϵ_{d}), which affects the relationship of satellite PRI (MODIS PRI) with daily LUE, with Aqua PRI performing better for the specific site benefiting from its overpass time (right after local noon). Additionally, PRI from both MODIS sensors (Terra and Aqua) correlate better with the LUE at the time of satellite overpass (ϵ_{ov}) from the study site, compared to daily LUE. From the three MODIS bands used as PRI reference band, PRI with band 12 (546 – 556 nm, PRI₁₂) had the best performance for this site, being more stable between PRI datasets. However, the performance of the various reference bands seems to be affected by the viewing conditions. In all cases (satellite, reference band, viewing conditions), PRI correlated stronger with LUE calculated using PAR values instead of APAR, a finding that must be further investigated.

All these findings concerning the PRI:LUE relationship, seem to be strongly affected by the range of LUE values corresponding to each PRI group, with lower LUE variability resulting to weaker PRI:LUE correlations. LUE range effect should be accounted for when different PRI datasets are compared and might explain the contradicting findings in the existing literature.

BIBΛIOΓΡΑΦΙΑ

- 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* (80-.). 297, 999–1002. <https://doi.org/10.1126/science.1070656>
- Adams, W.W., Zarter, C.R., Ebbert, V., Demmig-Adams, B., 2004. Photoprotective Strategies of Overwintering Evergreens. *Bioscience* 54, 41–49. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0041:psooe\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0041:psooe]2.0.co;2)
- Ahmad, P., Sarwat, M., Sharma, S., 2008. Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. *J. Plant Biol.* <https://doi.org/10.1007/BF03030694>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Almeida, C.T. de, Delgado, R.C., Galvão, L.S., Aragão, L.E. de O.C. e., Ramos, M.C., 2018. Improvements of the MODIS Gross Primary Productivity model based on a comprehensive uncertainty assessment over the Brazilian Amazonia. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 145, 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.016>
- Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., Murray-Tortarolo, G., Papale, D., Parazoo, N.C., Peylin, P., Piao, S., Sitch, S., Viovy, N., Wiltshire, A., Zhao, M., 2015. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review. *Rev. Geophys.* 53, 785–818. <https://doi.org/10.1002/2015RG000483>
- Anderson, J.R., 1971. Land Use Classification Schemes Used in Selected Recent Geographic Applications of Remote Sensing. *Photogramm. Eng.* 379–387.
- As-syakur, R.A., Osawa, T., Adnyana, I.W.S., 2010. Medium spatial resolution satellite imagery to estimate gross: primary production in an urban area. *Remote Sens.* 2, 1496–1507. <https://doi.org/10.3390/rs2061496>
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L., 1984. Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat 1. *Agron. J.* 76, 300–306. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>
- Asrar, G., Kanemasu, E.T., Yoshida, M., 1985. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sens. Environ.* 17, 1–11. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90108-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90108-7)
- Avery, T.E., Berlin, G.L., 1992. *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. Prentice Hall, Saddle River, NJ.
- Baldocchi, D., Valentini, R., Running, S., Oechel, W., Dahlman, R., 1996. Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 2, 159–168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00069.x>
- Baldocchi, D.D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Glob. Chang. Biol.* 9, 479–492. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>
- Baldocchi, D.D., Vogel, C.A., 1996. Energy and CO₂ flux densities above and below a temperate broad-leaved forest and a boreal pine forest. *Tree Physiol.* 16, 5–16. <https://doi.org/10.1093/treephys/16.1-2.5>
- Ballester, C., Zarco-Tejada, P.J., Nicolás, E., Alarcón, J.J., Fereres, E., Intrigliolo, D.S., Gonzalez-Dugo, V., 2018. Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precis. Agric.* 19, 178–193. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9512-y>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A.R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sens. Rev.* 13, 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Bao, S., Wutzler, T., Koirala, S., Cuntz, M., Ibrom, A., Besnard, S., Walther, S., Šigut, L., Moreno, A., Weber, U., Wohlfahrt, G., Cleverly, J., Migliavacca, M., Woodgate, W., Merbold, L., Veenendaal, E., Carvalhais, N., 2022. Environment-sensitivity functions for gross primary productivity in light use efficiency models. *Agric. For. Meteorol.* 312. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108708>
- 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 Sens. Environ.* 78, 264–273. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00224-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00224-3)

- Battin, T.J., Luysaert, S., Kaplan, L.A., Aufdenkampe, A.K., Richter, A., Tranvik, L.J., 2009. The boundless carbon cycle. *Nat. Geosci.* <https://doi.org/10.1038/ngeo618>
- Bauer, M., Cipra, J., 1973. Identification of Agricultural Crops by Computer Processing of ERTS MSS Data, LARS Technical Reports.
- Bebie, M., Cavalaris, C., Kyparissis, A., 2022. Assessing Durum Wheat Yield through Sentinel-2 Imagery: A Machine Learning Approach. *Remote Sens.* 14. <https://doi.org/10.3390/rs14163880>
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M.A., Baldocchi, D., Bonan, G.B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luysaert, S., Margolis, H., Oleson, K.W., Rouspard, O., Veenendaal, E., Viovy, N., Williams, C., Woodward, F.I., Papale, D., 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science* (80-.). 329, 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>
- Bergen, K.M., Goetz, S.J., Dubayah, R.O., Henebry, G.M., Hunsaker, C.T., Imhoff, M.L., Nelson, R.F., Parker, G.G., Radeloff, V.C., 2009. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 114. <https://doi.org/10.1029/2008JG000883>
- Bernacchi, C.J., Pimentel, C., Long, S.P., 2003. In vivo temperature response functions of parameters required to model RuBP-limited photosynthesis. *Plant. Cell Environ.* 26, 1419–1430. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2003.01050.x>
- Billingsley, F., 1984. Remote sensing for monitoring vegetation: an emphasis on satellites, in: WOODWELL, G.M. (Ed.), *The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing*. John Wiley & Sons, pp. 161–180.
- Bonan, G.B., Patton, E.G., Finnigan, J.J., Baldocchi, D.D., Harman, I.N., 2021. Moving beyond the incorrect but useful paradigm: reevaluating big-leaf and multilayer plant canopies to model biosphere-atmosphere fluxes – a review. *Agric. For. Meteorol.* 306, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108435>
- Bourg, L., Bruniquel, C., Morris, H., Dash, J., Preusker, R., Dransfeld, S., 2023. Copernicus Sentinel-3 OLCI Land User Handbook, ESA.
- Bruhwiller, L., Michalak, A.M., Birdsey, R., Fisher, J.B., Houghton, R.A., Huntzinger, D.N., Miller, J.B., 2018. Overview of the global carbon cycle, in: Cavallaro, N., Shrestha, G., Birdsey, R., Mayes, M.A., Najjar, R.G., Reed, S.C., Romero-Lankao, P., Zhu, Z. (Eds.), *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 42–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018.Ch1>
- Buiten, H.J., Clevers, J.G.P.W., 1993. Land observation by remote sensing: theory and applications. Gordon and Breach Sci. Publ.
- Bungard, R.A., Ruban, A. V., Hibberd, J.M., Press, M.C., Horton, P., Scholes, J.D., 1999. Unusual carotenoid composition and a new type of xanthophyll cycle in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 96, 1135–1139. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.3.1135>
- Burba, G., 2013. Eddy Covariance Method-for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications. Li-Cor Biosciences, Lincoln.
- Cai, W., Yuan, W., Liang, S., Liu, S., Dong, W., Chen, Y., Liu, D., Zhang, H., 2014. Large differences in terrestrial vegetation production derived from satellite-based light use efficiency models. *Remote Sens.* 6, 8945–8965. <https://doi.org/10.3390/rs6098945>
- Campbell, J.B., Wynne, R.H. (Eds.), 2011. *Introduction to Remote Sensing*, 5th ed. The Guilford Press.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P. V., Jackson, R.B., 2008. *Biology*, 8th ed. Pearson Benjamin Cummings.
- Carlson, T.N., Ripley, D.A., 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 62, 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Carnegie, D., Degloria, S., Colwell, R., 1974. Usefulness of ERTS-1 and supporting aircraft data for monitoring plant development and range conditions in California's annual grassland.
- Carter, G.A., Knapp, A.K., 2001. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.* 88, 677–684. <https://doi.org/10.2307/2657068>
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Grégoire, J.M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.* 77, 22–33. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00191-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00191-2)
- Cescatti, A., 1997. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecol. Modell.* 101, 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00050-1)
- Chang, X., Xing, Y., Gong, W., Yang, C., Guo, Z., Wang, D., Wang, J., Yang, H., Xue, G., Yang, S., 2023. Evaluating gross primary productivity over 9 ChinaFlux sites based on random forest regression

- models, remote sensing, and eddy covariance data. *Sci. Total Environ.* 875, 162601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162601>
- Chasmer, L., Kljun, N., Hopkinson, C., Brown, S., Milne, T., Giroux, K., Barr, A., Devito, K., Creed, I., Petrone, R., 2011. Characterizing vegetation structural and topographic characteristics sampled by eddy covariance within two mature aspen stands using lidar and a flux footprint model: Scaling to MODIS. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 116. <https://doi.org/10.1029/2010JG001567>
- Chaves, M.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S., 2003. Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.* 30, 239–264. <https://doi.org/10.1071/FP02076>
- Chen, D.X., Coughenour, M.B., 2004. Photosynthesis, transpiration, and primary productivity: Scaling up from leaves to canopies and regions using process models and remotely sensed data. *Global Biogeochem. Cycles* 18, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2002GB001979>
- Chen, J.M., Chen, X., Ju, W., Geng, X., 2005. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *J. Hydrol.* 305, 15–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.029>
- Chen, J.M., Mo, G., Pisek, J., Liu, J., Deng, F., Ishizawa, M., Chan, D., 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. *Global Biogeochem. Cycles* 26, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2010GB003996>
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Rueda, V.M., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Chapter 11: Regional Climate Projections, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. pp. 847–940.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>
- Cifuentes, R., Van der Zande, D., Salas, C., Tits, L., Farifteh, J., Coppin, P., 2017. Modeling 3D Canopy Structure and Transmitted PAR Using Terrestrial LiDAR. *Can. J. Remote Sens.* 43, 124–139. <https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1286937>
- Cohen, C.J., 2000. Early history of remote sensing. *Proc. - Appl. Imag. Pattern Recognit. Work.* 2000-Janua, 3–9. <https://doi.org/10.1109/AIPRW.2000.953595>
- Colwell, R.K., 1974. Predictability, Constancy, and Contingency of Periodic Phenomena. *Ecology* 55, 1148–1153. <https://doi.org/10.2307/1940366>
- Colwell, R.K., 1973. Competition and Coexistence in a Simple Tropical Community. *Am. Nat.* 107, 737–760. <https://doi.org/10.1086/282872>
- Coops, N.C., Hilker, T., Hall, F.G., Nichol, C.J., Drolet, G.G., 2010. Estimation of Light-use Efficiency of Terrestrial Ecosystems from Space: A Status Report. *Bioscience* 60, 788–797. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.10.5>
- Cracknell, A.P., 2018. The development of remote sensing in the last 40 years. *Int. J. Remote Sens.* 39, 8387–8427. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1550919>
- Curran, P.J., 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90069-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90069-2)
- Dassot, M., Constant, T., Fournier, M., 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Ann. For. Sci.* 68, 959–974. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0102-2>
- De Pury, D.G.G., Farquhar, G.D., 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell Environ.* 20, 537–557. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.00094.x>
- de Sousa, C.H.R., Hilker, T., Waring, R., de Moura, Y.M., Lyapustin, A., 2017. Progress in remote sensing of photosynthetic activity over the amazon basin. *Remote Sens.* 9, 48. <https://doi.org/10.3390/rs9010048>
- Deering, D.W., 1978. RANGELAND REFLECTANCE CHARACTERISTICS MEASURED BY AIRCRAFT AND SPACECRAFT SENSORS. Texas A&M University.
- Demmig-Adams, B., 1990. Carotenoids and photoprotection in plants: A role for the xanthophyll zeaxanthin. *BBA - Bioenerg.* 1020, 1–24. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(90\)90088-L](https://doi.org/10.1016/0005-2728(90)90088-L)
- Demmig-Adams, B., Adams, W.W., 1996. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends Plant Sci.* 1, 21–26. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(96\)80019-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(96)80019-7)

- Disney, M., 2016. Remote Sensing of Vegetation: Potentials, Limitations, Developments and Applications, in: Hikosaka, K., Niinemets, Ü., Anten, N. (Eds.), *Canopy Photosynthesis: From Basics to Applications*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-017-7291-4_11
- Doyle, I., 1980. Sherman Mills Fairchild. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46, 923–936.
- 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 Sens. Environ.* 98, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.006>
- 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 Sens. Environ.* 112, 3064–3078. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.002>
- Dubovik, O., Schuster, G.L., Xu, F., Hu, Y., Bösch, H., Landgraf, J., Li, Z., 2021. Grand Challenges in Satellite Remote Sensing. *Front. Remote Sens.* 2, 1–10. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.619818>
- Durand, M., Murchie, E.H., Lindfors, A. V., Urban, O., Aphalo, P.J., Robson, T.M., 2021. Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a changing environment. *Agric. For. Meteorol.* 311, 108684. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108684>
- Emmel, C., D’Odorico, P., Reville, A., Hörtnagl, L., Ammann, C., Buchmann, N., Eugster, W., 2020. Canopy photosynthesis of six major arable crops is enhanced under diffuse light due to canopy architecture. *Glob. Chang. Biol.* 26, 5164–5177. <https://doi.org/10.1111/gcb.15226>
- Esteban, R., Becerril, J.M., García-Plazaola, J.I., 2009. Lutein epoxide cycle, more than just a forest tale. *Plant Signal. Behav.* 4, 342–344. <https://doi.org/10.4161/psb.4.4.8197>
- European Space Agency, 2015. SENTINEL-2 User Handbook. <https://doi.org/10.1021/ie51400a018>
- 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, Ü., Rebmann, C., Suyker, A., Valentini, R., Wilson, K., Wofsy, S., 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agric. For. Meteorol.* 113, 53–74. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00102-8)
- Farquhar, G.D., Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78–90–90.
- Fassnacht, F.E., Neumann, C., Forster, M., Buddenbaum, H., Ghosh, A., Clasen, A., Joshi, P.K., Koch, B., 2014. Comparison of feature reduction algorithms for classifying tree species with hyperspectral data on three central european test sites. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 7, 2547–2561. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2329390>
- Field, C.B., Gamon, J.A., Peñuelas, J., 1995. Remote Sensing of Terrestrial Photosynthesis, in: *Ecophysiology of Photosynthesis*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 511–527. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79354-7_24
- 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). *Physiol. Plant.* 211–216.
- Filella, I., Peñuelas, J., Llorens, L., Estiarte, M., 2004. Reflectance assessment of seasonal and annual changes in biomass and CO₂ uptake of a Mediterranean shrubland submitted to experimental warming and drought. *Remote Sens. Environ.* 90, 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.010>
- Filella, I., Porcar-Castell, A., Munné-Bosch, S., Bäck, J., Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., 2009. PRI assessment of long-term changes in carotenoids/chlorophyll ratio and short-term changes in de-epoxidation state of the xanthophyll cycle. *Int. J. Remote Sens.* 30, 4443–4455. <https://doi.org/10.1080/01431160802575661>
- Filella, I., Zhang, C., Seco, R., Potosnak, M., Guenther, A., Karl, T., Gamon, J., Pallardy, S., Gu, L., Kim, S., Balzarolo, M., Fernandez-Martinez, M., Penuelas, J., 2018. A MODIS photochemical reflectance index (PRI) as an estimator of isoprene emissions in a temperate deciduous forest. *Remote Sens.* 10, 557. <https://doi.org/10.3390/rs10040557>
- Fischer, W. A., Badgley, P. A., Orr, D. G., Zissis, G. J. et al., 1975. History of remote sensing. In Reeves, R. G. (Editor-in-Chief) *Manual of Remote Sensing*. Falls Church: American Society of Photogrammetry, pp. 27–50.
- Frank, H.A., Brudvig, G.W., 2004. Redox functions of carotenoids in photosynthesis. *Biochemistry*. <https://doi.org/10.1021/bi0492096>
- Frankenberg, C., Berry, J., 2017. Solar induced chlorophyll fluorescence: Origins, relation to photosynthesis and retrieval, *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10632-3>

- Frankenberg, C., Fisher, J.B., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S.S., Lee, J.-E., Toon, G.C., Butz, A., Jung, M., Kuze, A., Yokota, T., 2011. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophys. Res. Lett.* 38, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011GL048738>
- Fu, Z., Ciais, P., Bastos, A., Stoy, P.C., Yang, H., Green, J.K., Wang, B., Yu, K., Huang, Y., Knohl, A., Šigut, L., Gharun, M., Cuntz, M., Arriga, N., Roland, M., Peichl, M., Migliavacca, M., Cremonese, E., Varlagin, A., Brümmer, C., Gourlez De La Motte, L., Fares, S., Buchmann, N., El-Madany, T.S., Pitacco, A., Vendrame, N., Li, Z., Vincke, C., Magliulo, E., Koebsch, F., 2020. Sensitivity of gross primary productivity to climatic drivers during the summer drought of 2018 in Europe: Sensitivity of GPP to climate drivers. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 375. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0747>
- Fussell, J., Rundquist, D., Harrington, J.A., 1986. On defining remote sensing. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 52, 1507–1511.
- Gallagher, J.N., Biscoe, P. V., 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci.* 91, 47–60. <https://doi.org/10.1017/S0021859600056616>
- Gamon, J.A., Berry, J.A., 2012. Facultative and constitutive pigment effects on the Photochemical Reflectance Index (PRI) in sun and shade conifer needles. *Isr. J. Plant Sci.* 60, 85–95. <https://doi.org/10.1560/IJPS.60.1-2.85>
- Gamon, J.A., Bond, B., 2013. Effects of irradiance and photosynthetic downregulation on the photochemical reflectance index in Douglas-fir and ponderosa pine. *Remote Sens. Environ.* 135, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.032>
- Gamon, J.A., Field, C.B., Bilger, W., Björkman, O., Fredeen, A.L., Peñuelas, J., 1990. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia* 85, 1–7. <https://doi.org/10.1007/BF00317336>
- 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 Photosynthesis¹. *Biotropica* 37, 547–560. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00072.x>
- Gamon, J.A., Kovalchuck, O., Wong, C.Y.S., Harris, A., Garrity, S.R., 2015. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences* 12, 4149–4159. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4149-2015>
- Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- 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. <https://doi.org/10.1007/s004420050337>
- Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58, 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Garbulsky, M.F., Filella, I., Verger, A., Peñuelas, J., 2014. Photosynthetic light use efficiency from satellite sensors: From global to Mediterranean vegetation. *Environ. Exp. Bot.* 103, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.009>
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, 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 Sens. Environ.* 115, 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.023>
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Ogaya, R., Filella, I., 2013. Leaf and stand-level carbon uptake of a Mediterranean forest estimated using the satellite-derived reflectance indices EVI and PRI. *Int. J. Remote Sens.* 34, 1282–1296. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.718457>
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Papale, D., Filella, I., 2008. Remote estimation of carbon dioxide uptake by a Mediterranean forest. *Glob. Chang. Biol.* 14, 2860–2867. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01684.x>
- García-Plazaola, J.I., Matsubara, S., Osmond, C.B., 2007. The lutein epoxide cycle in higher plants: Its relationships to other xanthophyll cycles and possible functions. *Funct. Plant Biol.* 34, 759–773. <https://doi.org/10.1071/FP07095>
- Gelybó, G., Barcza, Z., Kern, A., Kljun, N., 2013. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. *Agric. For. Meteorol.* 174–175, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.02.003>
- Ghamisi, P., Rasti, B., Yokoya, N., Wang, Q., Hofle, B., Bruzzone, L., Bovolo, F., Chi, M., Anders, K., Gloaguen, R., Atkinson, P.M., Benediktsson, J.A., 2019. Multisource and multitemporal data fusion in remote sensing: A comprehensive review of the state of the art. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* <https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2890023>
- Ghannoum, O., 2009. C4 photosynthesis and water stress. *Ann. Bot.* 103, 635–644.

- <https://doi.org/10.1093/aob/mcn093>
- Gilabert, M.A., Moreno, A., Maselli, F., Chiesi, M., Martinez, B., Seufert, G., Melia, J., 2012. Tracking seasonal drought effects on ecosystem light use efficiency in a mediterranean forest using climatic and remote sensing data, in: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). pp. 1147–1150. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351345>
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Gitelson, A.A., Gamon, J.A., 2015. The need for a common basis for defining light-use efficiency: Implications for productivity estimation. *Remote Sens. Environ.* 156, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.017>
- Gitelson, A.A., Gamon, J.A., Solovchenko, A., 2017. Multiple drivers of seasonal change in PRI: Implications for photosynthesis 1. Leaf level. *Remote Sens. Environ.* 191, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.014>
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., Rundquist, D., 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.* 80, 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., Chivkunova, O.B., 2001. Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves. *Photochem. Photobiol.* 74, 38–45. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2001\)0740038opaneo2.0.co2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)0740038opaneo2.0.co2)
- Gitelson, A.A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., Arkebauer, T.J., 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Goel, N.S., 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sens. Rev.* 4, 1–212. <https://doi.org/10.1080/02757258809532105>
- Goel, S.N., 1989. Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Theory Appl. Opt. Remote Sens.* 205–251.
- 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 Sens. Environ.* 113, 1101–1111. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.001>
- Goerner, A., Reichstein, M., Rambal, S., 2008. Estimation of photosynthetic light use efficiency in SEMI-ARID ecosystems with the MODIS-DERIVED photochemical reflectance index, in: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). pp. 756–758. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779458>
- Goerner, A., Reichstein, M., Tomelleri, E., Hanan, N., Rambal, S., Papale, D., Dragoni, D., Schmillius, C., 2011. Remote sensing of ecosystem light use efficiency with MODIS-based PRI. *Biogeosciences* 8, 189–202. <https://doi.org/10.5194/bg-8-189-2011>
- Goetz, A. F. H. (1975). Portable field reflectance spectrometer. JPL Technical Report (pp. 183–188). Pasadena, California Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J., Rock, B., 1985. Imaging spectrometry for Earth remote sensing. *Science* (80-.). 228, 1–19.
- Goetz, S.J., 1997. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *Int. J. Remote Sens.* 18, 71–94. <https://doi.org/10.1080/014311697219286>
- Goetz, S.J., Prince, S.D., 1999. Modelling Terrestrial Carbon Exchange and Storage: Evidence and Implications of Functional Convergence in Light-use Efficiency. *Adv. Ecol. Res.* 28, 57–92. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60029-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60029-X)
- Goetz, S.J., Prince, S.D., Goward, S.N., Thawley, M.M., Small, J., 1999. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach. *Ecol. Modell.* 122, 239–255. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00140-4)
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (Eds.), 2017. Digital image processing, 4th ed. Pearson.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Goward, S.N., Huemmrich, K.F., 1992. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. *Remote Sens. Environ.* 39, 119–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90131-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90131-3)
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00033449>
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 70, 29–51. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
- 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? *Glob. Chang. Biol.* 13, 1484–1497. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01352.x>
- Große-Stoltenberg, A., Hellmann, C., Werner, C., Oldeland, J., Thiele, J., 2016. Evaluation of continuous VNIR-SWIR spectra versus narrowband hyperspectral indices to discriminate the invasive *Acacia longifolia* within a mediterranean dune ecosystem. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8040334>
- Gruening, C., Goded, I., Cescatti, A., Manca, G., Seufert, G., 2016. FLUXNET2015 IT-SRo San Rossore. <https://doi.org/10.18140/FLX/1440176>
- Gu, L., Baldocchi, D., Verma, S.B., Black, T.A., Vesala, T., Falge, E.M., Dowty, P.R., 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107. <https://doi.org/10.1029/2001jd001242>
- Gu, Y., Wylie, B.K., Howard, D.M., Phuyal, K.P., Ji, L., 2013. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. *Ecol. Indic.* 30, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.041>
- Guan, X., Chen, J.M., Shen, H., Xie, X., 2021. A modified two-leaf light use efficiency model for improving the simulation of GPP using a radiation scalar. *Agric. For. Meteorol.* 307, 108546. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108546>
- Guanter, L., Frankenberg, C., Dudhia, A., Lewis, P.E., Gómez-Dans, J., Kuze, A., Suto, H., Grainger, R.G., 2012. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. *Remote Sens. Environ.* 121, 236–251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.006>
- Guanter, L., Zhang, Y., Jung, M., Joiner, J., Voigt, M., Berry, J.A., Frankenberg, C., Huete, A.R., Zarco-Tejada, P., Lee, J.E., Moran, M.S., Ponce-Campos, G., Beer, C., Camps-Valls, G., Buchmann, N., Gianelle, D., Klumpp, K., Cescatti, A., Baker, J.M., Griffis, T.J., 2014. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320008111>
- Guarini, R., Nichol, C., Clement, R., Loizzo, R., Grace, J., Borghetti, M., 2014. The utility of MODIS-sPRI for investigating the photosynthetic light-use efficiency in a Mediterranean deciduous forest. *Int. J. Remote Sens.* 35, 6157–6172. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.950762>
- Gui, X., Wang, L., Su, X., Yi, X., Chen, X., Yao, R., Wang, S., 2021. Environmental factors modulate the diffuse fertilization effect on gross primary productivity across Chinese ecosystems. *Sci. Total Environ.* 793, 148443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148443>
- Guo, J.M., Trotter, C.M., 2004. Estimating photosynthetic light-use efficiency using the photochemical reflectance index: variations among species. *Funct. Plant Biol.* 31, 255–265. <https://doi.org/10.1071/FP03185>
- Haines-Young, R.H., Barr, C.J., Black, H., Briggs, D.J., Bunce, R.G.H., Clarke, R., Cooper, A., Dawson, F.H., Firbank, L., Fuller, R., Furse, M.T., Gillespie, M.K., Hill, R., Hornung, M., Howard, D., McCann, T., Morecroft, M., Petit, S., Sier, A., Smart, S., Smith, G.M., Stott, A.P., Stuart, R., Watkins, J., 2000. Accounting for nature: assessing habitats in the UK countryside, New Scientist. London.
- Hall, D.O., Rao, K.K. (Eds.), 1994. Photosynthesis, 5th ed. Cambridge University Press.
- 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. <https://doi.org/10.2307/2937203>
- Hall, F.G., Hilker, T., Coops, N.C., 2011. PHOTOSYN SAT, photosynthesis from space: Theoretical foundations of a satellite concept and validation from tower and spaceborne data. *Remote Sens. Environ.* 115, 1918–1925. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.014>
- 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 Sens. Environ.* 112, 3201–3211. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.015>
- Hall, F.G., Townshend, J.R., Engman, E.T., 1995. Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters. *Remote Sens. Environ.* 51, 138–156. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00071-T](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00071-T)
- Hanes, J., Liang, L., Morisette, J., 2014. Land Surface Phenology, in: Hanes, J. (Ed.), *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Springer, pp. 99–126. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25047-7_1
- Harley, P.C., Thomas, R.B., Reynolds, J.F., Strain, B.R., 1992. Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO₂. *Plant, Cell Environ.* 15, 271–282. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00974.x>
- Haxeltine, A., Prentice, I.C., 1996. A General Model for the Light-Use Efficiency of Primary Production. *Funct. Ecol.* 10, 551–561. <https://doi.org/10.2307/2390165>
- He, M., Ju, W., Zhou, Y., Chen, J., He, H., Wang, S., Wang, H., Guan, D., Yan, J., Li, Y., Hao, Y., Zhao, F., 2013. Development of a two-leaf light use efficiency model for improving the calculation of terrestrial

- gross primary productivity. *Agric. For. Meteorol.* 173, 28–39.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.003>
- He, M., Kimball, J.S., Maneta, M.P., Maxwell, B.D., Moreno, A., Beguería, S., Wu, X., 2018. Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused landsat-MODIS data. *Remote Sens.* 10.
<https://doi.org/10.3390/rs10030372>
- He, M., Kimball, J.S., Running, S., Ballantyne, A., Guan, K., Huemmrich, F., 2016. Satellite detection of soil moisture related water stress impacts on ecosystem productivity using the MODIS-based photochemical reflectance index. *Remote Sens. Environ.* 186, 173–183.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.019>
- Heinsch, F. A., Reeves, M., Votava, P., Kang, S., Milesi, C., Zhao, M., Glassy, J., Jolly, W. M., Loehman, R., Bowker, C. F. Kimball, J. S., Nemani, R. R., and Running, S. W.: GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm, Tech. rep., The University of Montana, Missoula, 2003.
- Heinsch, F.A., Zhao, M., 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., Wofsy, S.C., Dunn, A.L., Munger, J.W., Baldocchi, D.D., Xu, L., 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 Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 1908–1923. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.853936>
- Hernandez-Clemente, R., Kolari, P., Porcar-Castell, A., Korhonen, L., Mottus, M., 2016. Tracking the Seasonal Dynamics of Boreal Forest Photosynthesis Using EO-1 Hyperion Reflectance: Sensitivity to Structural and Illumination Effects. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 54, 5105–5116.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2554466>
- Hilker, T., Coops, N.C., Hall, F.G., Nichol, C.J., Lyapustin, A., Black, T.A., Wulder, M.A., Leuning, R., Barr, A., Hollinger, D.Y., Munger, B., Tucker, C.J., 2011. Inferring terrestrial photosynthetic light use efficiency of temperate ecosystems from space. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 116.
<https://doi.org/10.1029/2011JG001692>
- Hilker, T., Coops, N.C., Wulder, M.A., Black, T.A., Guy, R.D., 2008. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. *Sci. Total Environ.* 404, 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.007>
- Hilker, T., Hall, F.G., Coops, N.C., Lyapustin, A., Wang, Y., Nesic, Z., Grant, N., Black, T.A., Wulder, M.A., Kljun, N., Hopkinson, C., Chasmer, L., 2010. Remote sensing of photosynthetic light-use efficiency across two forested biomes: Spatial scaling. *Remote Sens. Environ.* 114, 2863–2874.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.004>
- Hilker, T., Lyapustin, A., Hall, F.G., Wang, Y., 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 Sens. Environ.* 113, 2463–2475. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.012>
- Hmimina, G., Dufrêne, E., Soudani, K., 2014. Relationship between photochemical reflectance index and leaf ecophysiological and biochemical parameters under two different water statuses: Towards a rapid and efficient correction method using real-time measurements. *Plant, Cell Environ.* 37, 473–487.
<https://doi.org/10.1111/pce.12171>
- Horn, J.E., Schulz, K., 2011. Identification of a general light use efficiency model for gross primary production. *Biogeosciences* 8, 999–1021. <https://doi.org/10.5194/bg-8-999-2011>
- Howell, T.A., Meek, D.W., Hatfield, J.L., 1983. Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol.* 28, 157–175.
[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(83\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0002-1571(83)90005-5)
- Huang, K., Wang, S., Zhou, L., Wang, H., Zhang, J., Yan, J., Zhao, L., Wang, Y., Shi, P., 2014. Impacts of diffuse radiation on light use efficiency across terrestrial ecosystems based on eddy covariance observation in China. *PLoS One* 9, 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110988>
- Huang, X., Lin, S., Li, X., Ma, M., Wu, C., Yuan, W., 2022. How Well Can Matching High Spatial Resolution Landsat Data with Flux Tower Footprints Improve Estimates of Vegetation Gross Primary Production. *Remote Sens.* 14. <https://doi.org/10.3390/rs14236062>
- Huang, X., Xiao, J., Ma, M., 2019. Evaluating the performance of satellite-derived vegetation indices for estimating gross primary productivity using FLUXNET observations across the globe. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11151823>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, X., Gao, X., Ferreira, L., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83, 195–213.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)85959-9](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)85959-9)
- Huete, A., Miura, T., Yoshioka, H., Ratana, P., Broich, M., 2014. Indices of Vegetation Activity, in: Hanes, J.M. (Ed.), *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–

41. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25047-7_1
- Huete, A.R., 2004. Remote Sensing for Environmental Monitoring, in: *Environmental Monitoring and Characterization*. Elsevier Inc., pp. 183–206. <https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50013-8>
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Huete, A.R., Liu, H.Q., 1994. An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric and Soil-Correcting Variants of the NDVI for the MODISEOS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 32, 897–905. <https://doi.org/10.1109/36.298018>
- Huete, A.R., Liu, H.Q., van Leeuwen, W.J.D., 1997. Use of vegetation indices in forested regions: Issues of linearity and saturation, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE, pp. 1966–1968. <https://doi.org/10.1109/igarss.1997.609169>
- Hunt, E.R., Rock, B.N., 1989. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 30, 43–54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)
- Hussain, S., Ulhassan, Z., Brestic, M., Zivcak, M., Weijun Zhou, Allakhverdiev, S.I., Yang, X., Safdar, M.E., Yang, W., Liu, W., 2021. Photosynthesis research under climate change. *Photosynth. Res.* 150, 5–19. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00861-z>
- Jackson, R.B., Le Quéré, C., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Korsbakken, J.I., Liu, Z., Peters, G.P., Zheng, B., 2018. Global energy growth is outpacing decarbonization. *Environ. Res. Lett.* 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303>
- Jackson, R.D., 1983. Spectral indices in N-Space. *Remote Sens. Environ.* 13, 409–421. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(83\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90010-X)
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.* 13, 651–656. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00651>
- Jacquemoud, S., Baret, F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34, 75–91. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90100-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90100-Z)
- Jahns, P., Holzwarth, A.R., 2012. The role of the xanthophyll cycle and of lutein in photoprotection of photosystem II. *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1817, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2011.04.012>
- Jarvis, P.G., 1995. Scaling processes and problems. *Plant, Cell Environ.* 18, 1079–1089. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00620.x>
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. Trans. R. Soc. London. B, Biol. Sci.* 273, 593–610. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>
- Jarvis, P.G., Leverenz, J.W., 1983. Productivity of Temperate, Deciduous and Evergreen Forests, in: *Physiological Plant Ecology IV*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 233–280. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68156-1_9
- Jensen, J.R., 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Second edition, Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Second edition. Prentice Hall; Series in Geographic Information Science.
- Jia, W., Coops, N.C., Tortini, R., Pang, Y., Black, T.A., 2018. Remote sensing of variation of light use efficiency in two age classes of Douglas-fir. *Remote Sens. Environ.* 219, 284–297. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.017>
- Jiao, X.C., Song, X.M., Zhang, D.L., Du, Q.J., Li, J.M., 2019. Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Sci. Rep.* 9, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>
- Jordan, C., 1969. Derivation of Leaf-Area Index from quality of light on the forest floor. *Ecol. Ecol. Soc. Am.* 50, 663–666. <https://doi.org/10.1155/2012/651039>
- Jung, M., Reichstein, M., Bondeau, A., 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences* 6, 2001–2013. <https://doi.org/10.5194/bg-6-2001-2009>
- Jung, M., Vetter, M., Herold, M., Churkina, G., Reichstein, M., Zaehle, S., Ciais, P., Viovy, N., Bondeau, A., Chen, Y., Trusilova, K., Feser, F., Heimann, M., 2007. Uncertainties of modeling gross primary productivity over Europe: A systematic study on the effects of using different drivers and terrestrial biosphere models. *Global Biogeochem. Cycles* 21, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006GB002915>
- Junker, L.V., Ensminger, I., 2016. Relationship between leaf optical properties, chlorophyll fluorescence and pigment changes in senescing Acer saccharum leaves. *Tree Physiol.* 36, 694–711. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv148>
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, A.N., Tucker, C.J., 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 6, 1271–1318.

- <https://doi.org/10.1080/01431168508948281>
- Kanniah, K.D., Beringer, J., Hutley, L.B., Tapper, N.J., Zhu, X., 2009. Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia. *Remote Sens. Environ.* 113, 1808–1822. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.013>
- Kanniah, K.D., Beringer, J., North, P., Hutley, L., 2012. Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: A review. *Prog. Phys. Geogr.* 36, 209–237. <https://doi.org/10.1177/0309133311434244>
- Kaufman, Y.J., 1984. Atmospheric Effects On Remote Sensing Of Surface Reflectance, in: Slater, P.N. (Ed.), *Remote Sensing: Critical Review of Technology*. SPIE, p. 20. <https://doi.org/10.1117/12.966238>
- Kaufman, Y.J., Fraser, R.S., 1982. Different atmospheric effects in remote sensing of uniform and nonuniform surfaces. *Adv. Sp. Res.* 2, 147–155. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(82\)90342-8](https://doi.org/10.1016/0273-1177(82)90342-8)
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 261–270. <https://doi.org/10.1109/36.134076>
- Kerle, N., Janssen, L.L.F., Huurneman, G.C., Bakker, W., Grabmaier, K., van der Meer, F., Prakash, A., Tempfli, K., Gieske, A., Hecker, C., Parodi, G., Reeves, C., Weir, M., Gorte, B., Horn, J., Pohl, C., van Ruitenbeek, F., Woldai, T., 2004. *Principles of Remote Sensing: An introductory textbook*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede.
- Khanal, S., Kushal, K.C., Fulton, J.P., Shearer, S., Ozkan, E., 2020. Remote sensing in agriculture—accomplishments, limitations, and opportunities. *Remote Sens.* 12, 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>
- Kim, J., Ryu, Y., Dechant, B., Lee, H., Kim, H.S., Kornfeld, A., Berry, J.A., 2021. Solar-induced chlorophyll fluorescence is non-linearly related to canopy photosynthesis in a temperate evergreen needleleaf forest during the fall transition. *Remote Sens. Environ.* 258, 112362. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112362>
- King, D.A., Turner, D.P., Ritts, W.D., 2011. Parameterization of a diagnostic carbon cycle model for continental scale application. *Remote Sens. Environ.* 115, 1653–1664. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.024>
- King, M.D., Herring, D.D., 2003. SATELLITES, in: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Elsevier, pp. 2038–2047. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227090-8/00363-8>
- Knipling, E.B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sens. Environ.* 1, 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)
- Knohl, A., Baldocchi, D.D., 2008. Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JG000663>
- Knox, S.H., Dronova, I., Sturtevant, C., Oikawa, P.Y., Matthes, J.H., Verfaillie, J., Baldocchi, D., 2017. Using digital camera and Landsat imagery with eddy covariance data to model gross primary production in restored wetlands. *Agric. For. Meteorol.* 237–238, 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.020>
- Kong, D., Yuan, D., Li, H., Zhang, J., Yang, S., Li, Y., Bai, Y., Zhang, S., 2023. Improving the Estimation of Gross Primary Productivity across Global Biomes by Modeling Light Use Efficiency through Machine Learning. *Remote Sens.* 15. <https://doi.org/10.3390/rs15082086>
- Krofcheck, D.J., Eitel, J.U.H., Lippitt, C.D., Vierling, L.A., Schulthess, U., Litvak, M.E., 2016. Remote sensing based simple models of GPP in both disturbed and undisturbed piñon-juniper woodlands in the southwestern U.S. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8010020>
- Kumar M. and J. L. Monteith. 1981. Remote sensing of crop growth. In: H. Smith (Ed) *Plants and the daylight spectrum*. Academic Press, San Diego, California. pp. 133-144.
- Kyparissis, A., Drilias, P., Manetas, Y., 2000. Seasonal fluctuations in photoprotective (xanthophyll cycle) and photoselective (chlorophylls) capacity in eight Mediterranean plant species belonging to two different growth forms. *Aust. J. Plant Physiol.* 27, 265–272. <https://doi.org/10.1071/pp99037>
- Laffly, D., 2020. A brief history of remote sensing, in: *TORUS 2 - Toward an Open Resource Using Services: Cloud Computing for Environmental Data*. pp. 1–21. <https://doi.org/10.1002/9781119720553.ch1>
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K., Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geosci. Data J.* 4, 4–16. <https://doi.org/10.1002/gdj3.44>
- Landsberg, J.J., Prince, S.D., Jarvis, P.G., McMurtrie, R.E., Luxmoore, R., Medlyn, B.E., 1997. *Energy Conversion and Use in Forests: An Analysis of Forest Production in Terms of Radiation Utilisation*

- Efficiency (ϵ), in: Gholz, H.L., Nakane, K., Shimoda, H. (Eds.), *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 273–298. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5446-8_11
- Landsberg, J.J., Waring, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95, 209–228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)
- Larcher, W. (Walter), 2003. *Physiological plant ecology : ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer.
- Lasslop, G., Migliavacca, M., Bohrer, G., Reichstein, M., Bahn, M., Ibrom, A., Jacobs, C., Kolari, P., Papale, D., Vesala, T., Wohlfahrt, G., Cescatti, A., 2012. On the choice of the driving temperature for eddy-covariance carbon dioxide flux partitioning. *Biogeosciences* 9, 5243–5259. <https://doi.org/10.5194/bg-9-5243-2012>
- Latowski, D., Kuczyńska, P., Strzałka, K., 2011. Xanthophyll cycle - a mechanism protecting plants against oxidative stress. *Redox Rep.* 16, 78–90. <https://doi.org/10.1179/174329211X13020951739938>
- Lawlor, D.W., 2002. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: Stomata vs. Metabolism and the role of ATP. *Ann. Bot.* 89, 871–885. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf110>
- Le Quéré, C., Andrew, R., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P., Ivar Korsbakken, J., Peters, G., Canadell, J., Arneth, A., Arora, V., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Ciais, P., Chini, L., Ciais, P., Doney, S., Gkritzalis, T., Goll, D., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F., Hoppema, M., Houghton, R., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A., Johannessen, T., Jones, C., Kato, E., Keeling, R., Klein Goldewijk, K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D., Nabel, J., Nakaoka, S.I., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Skjelvan, I., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., Van Der Laan-Luijkx, I., Van Der Werf, G., Viovy, N., Walker, A., Wiltshire, A., Wright, R., Zaehle, S., Zheng, B., 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 2141–2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>
- Lechner, A.M., Foody, G.M., Boyd, D.S., 2020. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth* 2, 405–412. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>
- Lee, B., Kim, N., Kim, E.S., Jang, K., Kang, M., Lim, J.H., Cho, J., Lee, Y., 2020. An Artificial Intelligence Approach to Predict Gross Primary productivity in the forests of South Korea using satellite remote sensing data. *Forests* 11. <https://doi.org/10.3390/f11091000>
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D.J., Parker, G.G., Acker, S.A., Gower, S.T., 2002. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 11, 393–399. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.2002.00303.x>
- Leonelli, L., Brooks, M.D., Niyogi, K.K., 2017. Engineering the lutein epoxide cycle into *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, E7002–E7008. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704373114>
- Li, C., Jia, X., Ma, J., Liu, P., Yang, R., Bai, Y., Hayat, M., Liu, J., Zha, T., 2020. Linking diffuse radiation and ecosystem productivity of a desert steppe ecosystem. *PeerJ* 2020, 1–21. <https://doi.org/10.7717/peerj.9043>
- Li, J., Heap, A.D., 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environ. Model. Softw.* 53, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Li, J., Heap, A.D., 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecol. Inform.* 6, 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>
- Liang, S., 2020. A systematic view of remote sensing, in: Liang, Shunlin, Wang, J. (Eds.), *Advanced Remote Sensing*. Elsevier, pp. 1–57. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815826-5.00001-5>
- Liang, S., Li, X., 2020. Atmospheric correction of optical imagery, in: Liang, Shunlin, Wang, J. (Eds.), *Advanced Remote Sensing*. Elsevier, pp. 131–156. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815826-5.00004-0>
- Lichtenthaler, H.K., Wellburn, A.R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 11, 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W., 2004. *REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION*, 5th ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Lin, S., Huang, X., Zheng, Y., Zhang, X., Yuan, W., 2022. An Open Data Approach for Estimating Vegetation Gross Primary Production at Fine Spatial Resolution. *Remote Sens.* 14, 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs14112651>
- Linder, S., 1985. Potential and actual production in Australian forest stands., in: Landsberg, J.J., Parsons, W.

- (Eds.), *Research for Forest Management*. CSIRO, Canberra, Australia, pp. 11–35.
- Liu, P., Tong, X., Zhang, Jinsong, Meng, P., Li, J., Zhang, Jingru, Zhou, Y., 2022. Effect of diffuse fraction on gross primary productivity and light use efficiency in a warm-temperate mixed plantation. *Front. Plant Sci.* 13, 966125. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.966125>
- Liu, X., Xu, J., Yang, S., Lv, Y., 2019. Surface energy partitioning and evaporative fraction in a water-saving irrigated rice field. *Atmosphere (Basel)*. 10, 1–13. <https://doi.org/10.3390/atmos10020051>
- Liu, Z., Wang, L., Wang, S., 2014. Comparison of different GPP models in China using MODIS image and ChinaFLUX data. *Remote Sens.* 6, 10215–10231. <https://doi.org/10.3390/rs61010215>
- Lu, C., Zhang, J., 1999. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. *J. Exp. Bot.* 50, 1199–1206. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.336.1199>
- Madry, S., 2013. Introduction and History of Space Remote Sensing, in: Pelton, J.N., Madry, S., Camacho-Lara, S. (Eds.), *Handbook of Satellite Applications*. Springer, New York, pp. 657–666. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6423-5_37-3
- Madry, S., Pelton, J., 2010. Satellites in the Service of Humanity, in: Pelton, J.N., Buckley, A. (Eds.), *The Farthest Shore: A 21st Century Guide to Space*. Apogee Press, Burlington.
- Mahadevan, P., S. C. Wofsy, D. M. Matross, X. Xiao, A. L. Dunn, J. C. Lin, C. Gerbig, J. W. Munger, V. Y. Chow, and E. W. Gottlieb (2008), A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), *Global Biogeochem. Cycles*, 22, B2005, doi:10.1029/2006GB002735.
- Mäkelä, A., Landsberg, J., Ek, A.R., Burk, T.E., Ter-Mikaelian, M., Ågren, G.I., Oliver, C.D., Puttonen, P., 2000. Process-based models for forest ecosystem management, current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiol.* 20, 289–298.
- Mäkelä, A., Pulkkinen, M., Kolari, P., Lagergren, F., Berbigier, P., Lindroth, A., Loustau, D., Nikinmaa, E., Vesala, T., Hari, P., 2008. Developing an empirical model of stand GPP with the LUE approach: Analysis of eddy covariance data at five contrasting conifer sites in Europe. *Glob. Chang. Biol.* 14, 92–108. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01463.x>
- Malingrèau, J.P., Tucker, C.J., Laporte, N., 1989. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *Int. J. Remote Sens.* 10, 855–867. <https://doi.org/10.1080/01431168908903926>
- 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 Physiol.* 25, 689–699. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.689>
- Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P., 2009. Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 113, 657–667. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.008>
- Massari, C., Modanesi, S., Dari, J., Gruber, A., De Lannoy, G.J.M., Giroto, M., Quintana-Seguí, P., Le Page, M., Jarlan, L., Zribi, M., Ouadi, N., Vreugdenhil, M., Zappa, L., Dorigo, W., Wagner, W., Brombacher, J., Pelgrum, H., Jaquot, P., Freeman, V., Volden, E., Prieto, D.F., Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L., 2021. A review of irrigation information retrievals from space and their utility for users. *Remote Sens.* 13, 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs13204112>
- Mather, P.M., Koch, M., 2010. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction, Fourth Edition*. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470666517>
- Mauder, M., Foken, T., Cuxart, J., 2020. *Surface-Energy-Balance Closure over Land: A Review*, *Boundary-Layer Meteorology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6>
- Maxwell, K., Johnson, G., 2000. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51, 659–668. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.02.001>
- McCallum, I., Wagner, W., Schmullius, C., Shvidenko, A., Obersteiner, M., Fritz, S., Nilsson, S., 2010. Comparison of four global FAPAR datasets over Northern Eurasia for the year 2000. *Remote Sens. Environ.* 114, 941–949. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.009>
- McKee, T., Doesken, N., Kleist, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, in: *Eight Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Anaheim, California, pp. 179–184. <https://doi.org/10.1002/jso.23002>
- Medlyn, B.E., 1998. Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiol.* 18, 167–176. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.3.167>
- Medlyn, B.E., Robinson, A.P., Clement, R., McMurtrie, R.E., 2005. On the validation of models of forest CO₂ exchange using eddy covariance data: some perils and pitfalls. *Tree Physiol.* 25, 839–857. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.839>
- Mercado, L.M., Bellouin, N., Sitch, S., Boucher, O., Huntingford, C., Wild, M., Cox, P.M., 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature* 458, 1014–1017.

- <https://doi.org/10.1038/nature07949>
- Merlier, E., Hmimina, G., Dufrêne, E., Soudani, K., 2015. Explaining the variability of the photochemical reflectance index (PRI) at the canopy-scale: Disentangling the effects of phenological and physiological changes. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 151, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.08.006>
- 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 Sens. Environ.* 113, 2037–2051. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.003>
- Middleton, E.M., Cheng, Y. Ben, Hilker, T., Huemmrich, K.F., Blacks, T.A., Krishnan, P., Coops, N.C., 2008. Relating a spectral index from modis and tower-based measurements to ecosystem light use efficiency for a fluxnet-canada coniferous forest, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. pp. 307–310. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4778989>
- Middleton, E.M., Drolet, G., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Knox, R.G., Black, A., Barr, A., Lyapustin, A.I., Gervin, J.C., Margolis, H., 2004. Direct satellite inference of ecosystem light use efficiency for carbon exchange using MODIS on terra and aqua, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. pp. 2038–2041. <https://doi.org/10.1109/igarss.2004.1370750>
- Middleton, E.M., Huemmrich, K.F., Landis, D.R., Black, T.A., Barr, A.G., McCaughey, J.H., 2016. Photosynthetic efficiency of northern forest ecosystems using a MODIS-derived Photochemical Reflectance Index (PRI). *Remote Sens. Environ.* 187, 345–366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.021>
- Milton, E.J., Schaepman, M.E., Anderson, K., Kneubühler, M., Fox, N., 2009. Progress in field spectroscopy. *Remote Sens. Environ.* 113, S92–S109. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.001>
- Mohammed, G.H., Colombo, R., Middleton, E.M., Rascher, U., van der Tol, C., Nedbal, L., Goulas, Y., Pérez-Priego, O., Damm, A., Meroni, M., Joiner, J., Cogliati, S., Verhoef, W., Malenovský, Z., Gastellu-Etchegorry, J.P., Miller, J.R., Guanter, L., Moreno, J., Moya, I., Berry, J.A., Frankenberg, C., Zarco-Tejada, P.J., 2019. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sens. Environ.* 231, 111177. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.030>
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B Biol. Sci.* 281, 277–294.
- Monteith, J.L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 747–766. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*
- Moore, G.K., 1979. What is a picture worth? a history of remote sensing. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 477–485. <https://doi.org/10.1080/02626667909491887>
- Moreno, A., Maselli, F., Chiesi, M., Genesio, L., Vaccari, F., Seufert, G., Gilabert, M.A., 2014. Monitoring water stress in mediterranean semi-natural vegetation with satellite and meteorological data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 26, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.003>
- Moreno, A., Maselli, F., Gilabert, M.A., Chiesi, M., Martínez, B., Seufert, G., 2012. Assessment of MODIS imagery to track light-use efficiency in a water-limited Mediterranean pine forest. *Remote Sens. Environ.* 123, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.003>
- Möttus, M., Hernández-Clemente, R., Perheentupa, V., Markiet, V., Aalto, J., Bäck, J., Nichol, C.J., 2018. Measurement of diurnal variation in needle PRI and shoot photosynthesis in a boreal forest. *Remote Sens.* 10, 1019. <https://doi.org/10.3390/rs10071019>
- Mu, Q., Zhao, M., Heinsch, F.A., Liu, M., Tian, H., Running, S.W., 2007. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 112, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2006JG000179>
- 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 Sens. Environ.* 83, 214–231. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3)
- Myneni, R.B., Ross, J. (Eds.), 1991. *Photon-Vegetation Interactions Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75389-3>
- Myneni, R.B., Ross, J., Asrar, G., 1989. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agric. For. Meteorol.* [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90002-6)
- Myneni, R.B., Williams, D.L., 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.* 49, 200–211. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7)
- Nakaji, T., Oguma, H., Fujinuma, Y., 2006. Seasonal changes in the relationship between photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency of Japanese larch needles. *Int. J. Remote Sens.*

- 27, 493–509. <https://doi.org/10.1080/01431160500329528>
- 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* (80-.). 300, 1560–1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>
- Ni, W., Li, X., Woodcock, C.E., Roujean, J.L., Davis, R.E., 1997. Transmission of solar radiation in boreal conifer forests: Measurements and models. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102, 29555–29566. <https://doi.org/10.1029/97jd00198>
- 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. *Agric. For. Meteorol.* 101, 131–142. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00167-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00167-7)
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W., Limperis, T., 1977. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance.
- Niyogi, K.K., 2000. Safety valves for photosynthesis. *Curr. Opin. Plant Biol.* [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(00\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(00)00113-8)
- Niyogi, K.K., 1999. Photoprotection revisited: Genetic and molecular approaches. *Annu. Rev. Plant Biol.* 50, 333–359. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.333>
- Osmond, C.B., Björkman, O., Anderson, D.J., 1980. Physiological Processes in Plant Ecology: the Structure for a Synthesis, in: Osmond, C.B., Björkman, O., Anderson, D.J. (Eds.), *Physiological Processes in Plant Ecology: Toward a Synthesis with Atriplex*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-3-642-67637-6_1
- Papageorgiou, G., 1975. Chlorophyll Fluorescence: An Intrinsic Probe of Photosynthesis, in: *Energetics of Photosynthesis*. ACADEMIC PRESS, INC., pp. 319–371. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-294350-8.50011-8>
- Papale, D., Black, T.A., Carvalhais, N., Cescatti, A., Chen, J., Jung, M., Kiely, G., Lasslop, G., Mahecha, M.D., Margolis, H., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E., Olesen, J.E., Reichstein, M., Tramontana, G., van Gorsel, E., Wohlfahrt, G., Ráduly, B., 2015. Effect of spatial sampling from European flux towers for estimating carbon and water fluxes with artificial neural networks. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 120, 1941–1957. <https://doi.org/10.1002/2015JG002997>
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D., 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* 3, 571–583. <https://doi.org/10.5194/bg-3-571-2006>
- Park, S. Bin, Knohl, A., Lucas-Moffat, A.M., Migliavacca, M., Gerbig, C., Vesala, T., Peltola, O., Mammarella, I., Kolle, O., Lavrič, J.V., Prokushkin, A., Heimann, M., 2018. Strong radiative effect induced by clouds and smoke on forest net ecosystem productivity in central Siberia. *Agric. For. Meteorol.* 250–251, 376–387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.009>
- Pastorello, G., Trotta, C., Canfora, E., Chu, H., Christianson, D., Cheah, Y.W., Poindexter, C., Chen, J., Elbashandy, A., Humphrey, M., Isaac, P., Polidori, D., Ribeca, A., van Ingen, C., Zhang, L., Amiro, B., Ammann, C., Arain, M.A., Ardö, J., Arkebauer, T., Arndt, S.K., Arriga, N., Aubinet, M., Aurela, M., Baldocchi, D., Barr, A., Beamesderfer, E., Marchesini, L.B., Bergeron, O., Beringer, J., Bernhofer, C., Berveiller, D., Billesbach, D., Black, T.A., Blanken, P.D., Bohrer, G., Boike, J., Bolstad, P. V., Bonal, D., Bonnefond, J.M., Bowling, D.R., Bracho, R., Brodeur, J., Brümmer, C., Buchmann, N., Burban, B., Burns, S.P., Buysse, P., Cale, P., Cavagna, M., Cellier, P., Chen, S., Chini, I., Christensen, T.R., Cleverly, J., Collalti, A., Consalvo, C., Cook, B.D., Cook, D., Coursolle, C., Cremonese, E., Curtis, P.S., D’Andrea, E., da Rocha, H., Dai, X., Davis, K.J., De Cinti, B., de Grandcourt, A., De Ligne, A., De Oliveira, R.C., Delpierre, N., Desai, A.R., Di Bella, C.M., di Tommasi, P., Dolman, H., Domingo, F., Dong, G., Dore, S., Duce, P., Dufrêne, E., Dunn, A., Dušek, J., Eamus, D., Eichelmann, U., ElKhidir, H.A.M., Eugster, W., Ewenz, C.M., Ewers, B., Famulari, D., Fares, S., Feigenwinter, I., Feitz, A., Fensholt, R., Filippa, G., Fischer, M., Frank, J., Galvagno, M., Gharun, M., Gianelle, D., Gielen, B., Gioli, B., Gitelson, A., Goded, I., Goeckede, M., Goldstein, A.H., Gough, C.M., Goulden, M.L., Graf, A., Griebel, A., Gruening, C., Grünwald, T., Hammerle, A., Han, S., Han, X., Hansen, B.U., Hanson, C., Hatakka, J., He, Y., Hehn, M., Heinesch, B., Hinko-Najera, N., Hörtnagl, L., Hutley, L., Ibrom, A., Ikawa, H., Jackowicz-Korczynski, M., Janouš, D., Jans, W., Jassal, R., Jiang, S., Kato, T., Khomik, M., Klatt, J., Knohl, A., Knox, S., Kobayashi, H., Koerber, G., Kolle, O., Kosugi, Y., Kotani, A., Kowalski, A., Kruijt, B., Kurbatova, J., Kutsch, W.L., Kwon, H., Launiainen, S., Laurila, T., Law, B., Leuning, R., Li, Yingnian, Liddell, M., Limousin, J.M., Lion, M., Liska, A.J., Lohila, A., López-Ballesteros, A., López-Blanco, E., Loubet, B., Loustau, D., Lucas-Moffat, A., Lüers, J., Ma, S., Macfarlane, C., Magliulo, V., Maier, R., Mammarella, I., Manca, G., Marcolla, B., Margolis, H.A., Marras, S., Massman, W., Mastepanov, M., Matamala, R., Matthes, J.H., Mazzenga, F., McCaughey,

- H., McHugh, I., McMillan, A.M.S., Merbold, L., Meyer, W., Meyers, T., Miller, S.D., Minerbi, S., Moderow, U., Monson, R.K., Montagnani, L., Moore, C.E., Moors, E., Moreaux, V., Moureaux, C., Munger, J.W., Nakai, T., Neiryneck, J., Nesic, Z., Nicolini, G., Noormets, A., Northwood, M., Nosoetto, M., Nouvellon, Y., Novick, K., Oechel, W., Olesen, J.E., Ourcival, J.M., Papuga, S.A., Parmentier, F.J., Paul-Limoges, E., Pavelka, M., Peichl, M., Pendall, E., Phillips, R.P., Pilegaard, K., Pirk, N., Posse, G., Powell, T., Prasse, H., Prober, S.M., Rambal, S., Rannik, Ü., Raz-Yaseef, N., Reed, D., de Dios, V.R., Restrepo-Coupe, N., Reverter, B.R., Roland, M., Sabbatini, S., Sachs, T., Saleska, S.R., Sánchez-Cañete, E.P., Sanchez-Mejia, Z.M., Schmid, H.P., Schmidt, M., Schneider, K., Schrader, F., Schroder, I., Scott, R.L., Sedláč, P., Serrano-Ortíz, P., Shao, C., Shi, P., Shironya, I., Siebicke, L., Šigut, L., Silberstein, R., Sirca, C., Spano, D., Steinbrecher, R., Stevens, R.M., Sturtevant, C., Suyker, A., Tagesson, T., Takamashi, S., Tang, Y., Tapper, N., Thom, J., Tiedemann, F., Tomassucci, M., Tuovinen, J.P., Urbanski, S., Valentini, R., van der Molen, M., van Gorsel, E., van Huissteden, K., Varlagin, A., Verfaillie, J., Vesala, T., Vincke, C., Vitale, D., Vygodskaya, N., Walker, J.P., Walter-Shea, E., Wang, H., Weber, R., Westermann, S., Wille, C., Wofsy, S., Wohlfahrt, G., Wolf, S., Woodgate, W., Li, Yuelin, Zampedri, R., Zhang, J., Zhou, G., Zona, D., Agarwal, D., Biraud, S., Torn, M., Papale, D., 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Sci. Data* 7, 1–27. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>
- Patro, R.N., Subudhi, S., Biswal, P.K., Dell’Acqua, F., 2021. A Review of Unsupervised Band Selection Techniques: Land Cover Classification for Hyperspectral Earth Observation Data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 9, 72–111. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3051979>
- Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972. Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Shortgrass Prairie, in: *Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vol. 2. pp. 1357–1381.
- Pei, Y., Dong, J., Zhang, Y., Yuan, W., Doughty, R., Yang, J., Zhou, D., Zhang, L., Xiao, X., 2022. Evolution of light use efficiency models: Improvement, uncertainties, and implications. *Agric. For. Meteorol.* 317, 108905. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108905>
- Peng, X., She, J., Zhang, S., Tan, J., Li, Y., 2019. Evaluation of multi-reanalysis solar radiation products using global surface observations. *Atmosphere (Basel)*. 10. <https://doi.org/10.3390/atmos10020042>
- Peñuelas, J., Filella, I., Gamon, J.A., 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol.* 131, 291–296. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb03064.x>
- Peñuelas, J., Sardans, J., Estiarte, M., Ogaya, R., Carnicer, J., Coll, M., Barbeta, A., Rivas-Ubach, A., Llusà, J., Garbulsky, M., Filella, I., Jump, A.S., 2013. Evidence of current impact of climate change on life: A walk from genes to the biosphere. *Glob. Chang. Biol.* 19, 2303–2338. <https://doi.org/10.1111/gcb.12143>
- Philipson, W.R., Teng, W.L., 1988. Operational interpretation of AVHRR vegetation indices for world crop information. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 54, 55–58.
- Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Viovy, N., Demarty, J., 2007. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global Biogeochem. Cycles* 21, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2006GB002888>
- Piao, S., Nan, H., Huntingford, C., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S., Peng, S., Ahlström, A., Canadell, J.G., Cong, N., Levis, S., Levy, P.E., Liu, L., Lomas, M.R., Mao, J., Myneni, R.B., Peylin, P., Poulter, B., Shi, X., Yin, G., Viovy, N., Wang, T., Wang, X., Zaehle, S., Zeng, N., Zeng, Z., Chen, A., 2014. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nat. Commun.* 5, 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms6018>
- Piao, S., Wang, X., Wang, K., Li, X., Bastos, A., Canadell, J.G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S., 2020. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives. *Glob. Chang. Biol.* 26, 300–318. <https://doi.org/10.1111/gcb.14884>
- Pinheiro, C., Chaves, M.M., 2011. Photosynthesis and drought: Can we make metabolic connections from available data? *J. Exp. Bot.* 62, 869–882. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq340>
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., 2004. Seeing the trees in the forest. *Photogramm. Eng. Remote Sensing.* <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.589>
- Porcar-Castell, A., Garcia-Plazaola, J.I., Nichol, C.J., Kolari, P., Olascoaga, B., Kuusinen, N., Fernández-Marín, B., Pulkkinen, M., Juurola, E., Nikinmaa, E., 2012. Physiology of the seasonal relationship between the photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency. *Oecologia* 170, 313–323. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2317-9>
- Porcar-Castell, A., Tyystjärvi, E., Atherton, J., Van Der Tol, C., Flexas, J., Pfündel, E.E., Moreno, J., Frankenberg, C., Berry, J.A., 2014. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: Mechanisms and challenges. *J. Exp. Bot.* 65, 4065–4095. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru191>

- 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 Biogeochem. Cycles* 7, 811–841. <https://doi.org/10.1029/93GB02725>
- Prentice, I.C., Liang, X., Medlyn, B.E., Wang, Y.P., 2014. Reliable, robust and realistic: The three R's of next-generation land surface modelling. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/acpd-14-24811-2014>
- Prince, S.D., 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 12, 1313–1330. <https://doi.org/10.1080/01431169108929728>
- Prince, S.D., Goward, S.N., 1995. Global Primary Production: A Remote Sensing Approach. *J. Biogeogr.* 22, 815. <https://doi.org/10.2307/2845983>
- Przybilla, H., Wester-Ebbinghaus, W., 1979. Image flight with remote-controlled small plane. *Image Measurement and Aerial Imaging. J. Photogramm. Remote Sens.*
- Qian, S.E., 2021. Hyperspectral Satellites, Evolution, and Development History. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 14, 7032–7056. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3090256>
- Quaife, T., Quegan, S., Disney, M., Lewis, P., Lomas, M., Woodward, F.I., 2008. Impact of land cover uncertainties on estimates of biospheric carbon fluxes. *Global Biogeochem. Cycles* 22, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007GB003097>
- Raczka, B., Davis, K., Huntzinger, D., Neilson, R., Poulter, B., Richardson, A., Xiao, J., Baker, I., Ciais, P., Keenan, T., Law, B., Post, W., Ricciuto, D., Schaefer, K., Tian, H., Tomelleri, E., Verbeeck, H., Viovy, N., 2013. Evaluation of continental carbon cycle simulations with North American flux tower observations. *Ecol. Monogr.* 83, 531–556.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., Prabhat, 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature* 566, 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grünwald, T., Havránková, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Glob. Chang. Biol.* <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Richards, J.A. (Ed.), 2009. *Remote Sensing With Imaging Radar*. Springer, New York.
- Richardson, A.D., Anderson, R.S., Arain, M.A., Barr, A.G., Bohrer, G., Chen, G., Chen, J.M., Ciais, P., Davis, K.J., Desai, A.R., Dietze, M.C., Dragoni, D., Garrity, S.R., Gough, C.M., Grant, R., Hollinger, D.Y., Margolis, H.A., McCaughey, H., Migliavacca, M., Monson, R.K., Munger, J.W., Poulter, B., Raczka, B.M., Ricciuto, D.M., Sahoo, A.K., Schaefer, K., Tian, H., Vargas, R., Verbeeck, H., Xiao, J., Xue, Y., 2012. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American Carbon Program Site Synthesis. *Glob. Chang. Biol.* 18, 566–584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02562.x>
- Richardson, A.D., Black, T.A., Ciais, P., Delbart, N., Friedl, M.A., Gobron, N., Hollinger, D.Y., Kutsch, W.L., Longdoz, B., Luyssaert, S., Migliavacca, M., Montagnani, L., Munger, J.W., Moors, E., Piao, S., Rebmann, C., Reichstein, M., Saigusa, N., Tomelleri, E., Vargas, R., Varlagin, A., 2010. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 365, 3227–3246. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0102>
- Ridge, I. (Ed.), 2002. *Plants*. Oxford University Press.
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Tolding, R., Bacmeister, J., Takacs, L., Liu, H.C., Gu, W., Sienkiewicz, M., Koster, R.D., Gelaro, R., Stajner, I., Nielsen, J.E., 2008. The GEOS-5 Data Assimilation System—Documentation of versions 5.0.1 and 5.1.0, and 5.2.0, NASA Tech. Rep. Series on Global Modeling and Data Assimilation, NASA.
- Ross, J., 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-8647-3>
- Roujean, J.L., Breon, F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 51, 375–384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite), in: *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. NASA, pp. 309–317.
- Rouse, R.W.H., Haas, J.A.W., Deering, D.W., 1973. *MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS*.
- Ruimy, A., Dedieu, G., Saugier, B., 1996. TURC: A diagnostic model of continental gross primary

- productivity and net primary productivity. *Global Biogeochem. Cycles* 10, 269–285.
<https://doi.org/10.1029/96GB00349>
- Ruimy, A., Jarvis, P.G., Baldocchi, D.D., Saugier, B., 1995. CO₂ Fluxes over Plant Canopies and Solar Radiation: A Review. *Adv. Ecol. Res.* 26, 1–68. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60063-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60063-X)
- Ruimy, A., Kergoat, L., Bondeau, A., 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Glob. Chang. Biol.* 5, 56–64. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00007.x>
- Running, S., Zhao, M., 2019. User 's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2H/A3H) and Year-end Gap Filled (MOD17A2HGF/A3HGF) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6).
- 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 Sens. Environ.* 70, 108–127. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00061-9)
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H., 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Bioscience* 54, 547–560. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:acsmog\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:acsmog]2.0.co;2)
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R., Glassy, J.M., 2000. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System, in: *Methods in Ecosystem Science*. pp. 44–57. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1224-9_4
- Ryu, Y., Baldocchi, D.D., Kobayashi, H., Van Ingen, C., Li, J., Black, T.A., Beringer, J., Van Gorsel, E., Knohl, A., Law, B.E., Rouspard, O., 2011. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochem. Cycles* 25. <https://doi.org/10.1029/2011GB004053>
- Ryu, Y., Berry, J.A., Baldocchi, D.D., 2019. What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities. *Remote Sens. Environ.* 223, 95–114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.016>
- Sarlikioti, V., Driever, S.M., Marcelis, L.F.M., 2010. Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress. *Ann. Appl. Biol.* 157, 81–89. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00411.x>
- Schenk, H.J., Jackson, R.B., 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *J. Ecol.* 90, 480–494. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2002.00682.x>
- Schlau-Cohen, G.S., Berry, J., 2015. Photosynthetic fluorescence, from molecule to planet. *Phys. Today* 68, 66–637. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2924>
- Schmid, H.P., 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agric. For. Meteorol.* 113, 159–183. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00107-7)
- Seeley, M., Asner, G.P., 2021. Imaging spectroscopy for conservation applications. *Remote Sens.* 13, 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs13020292>
- Sellers, P.J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 6, 1335–1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
- 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. <https://doi.org/10.1038/35106547>
- Signarbieux, C., Feller, U., 2011. Non-stomatal limitations of photosynthesis in grassland species under artificial drought in the field. *Environ. Exp. Bot.* 71, 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.12.003>
- 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 Sens. Environ.* 81, 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Sims, D.A., Rahman, A.F., Cordova, V.D., Baldocchi, D.D., Flanagan, L.B., Goldstein, A.H., Hollinger, D.Y., Misson, L., Monson, R.K., Schmid, H.P., Wofsy, S.C., Xu, L., 2005. Midday values of gross CO₂ flux and light use efficiency during satellite overpasses can be used to directly estimate eight-day mean flux. *Agric. For. Meteorol.* 131, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.04.006>
- Sims, D.A., Rahman, A.F., Vermote, E.F., Jiang, Z., 2011. Seasonal and inter-annual variation in view angle effects on MODIS vegetation indices at three forest sites. *Remote Sens. Environ.* 115, 3112–3120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.018>
- Sims, P.L., Bradford, J.A., 2001. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie. *Agric. For. Meteorol.* 109, 117–134. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00264-7)
- Sjöström, M., Zhao, M., Archibald, S., Arneeth, A., Cappelaere, B., Falk, U., de Grandcourt, A., Hanan, N., Kergoat, L., Kutsch, W., Merbold, L., Mougín, E., Nickless, A., Nouvellon, Y., Scholes, R.J., Veenendaal, E.M., Ardö, J., 2013. Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using

- eddy covariance data. *Remote Sens. Environ.* 131, 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.023>
- Skoog, I.A., 2010. The Alfred Nobel rocket camera. An early aerial photography attempt. *Acta Astronaut.* 66, 624–635. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.06.011>
- Stagakis, S., Markos, N., Sykioti, O., Kyparissis, A., 2014. Tracking seasonal changes of leaf and canopy light use efficiency in a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using field measurements and multi-angular satellite hyperspectral imagery. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 97, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.012>
- Stagakis, S., Markos, N., Sykioti, O., Kyparissis, A., 2010. Monitoring canopy biophysical and biochemical parameters in ecosystem scale using satellite hyperspectral imagery: An application on a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using multiangular CHRIS/PROBA observations. *Remote Sens. Environ.* 114, 977–994. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.006>
- Stagakis, S., Markos, N., Vanikiotis, T., Tzotsos, A., Sykioti, O., Kyparissis, A., 2015. SCASE: A primary productivity monitoring system for the forests of north pindus national park (epirus, greece). *Eur. J. Remote Sens.* 48, 223–243. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154813>
- Steddom, K., Jones, D., Rush, C., 2005. A Picture Is Worth A Thousand Words. *APSnet Featur.* <https://doi.org/10.1094/APSnetFeature-2005-0405>
- Stocker, B.D., Wang, H., Smith, N.G., Harrison, S.P., Keenan, T.F., Sandoval, D., Davis, T., Prentice, I.C., 2020. P-model v1.0: An optimality-based light use efficiency model for simulating ecosystem gross primary production. *Geosci. Model Dev.* 13, 1545–1581. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1545-2020>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0905-9>
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J., 2008. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sens. Environ.* 112, 560–575. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.009>
- Tang, S., Wang, X., He, M., Huang, L., Zhang, Y., Yang, H., Piao, S., 2020. Global Patterns and Climate Controls of Terrestrial Ecosystem Light Use Efficiency. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 125, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2020JG005908>
- Tardieu, F., Simonneau, T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: Modelling isohydric and anisohydric behaviours. *J. Exp. Bot.* 49, 419–432. https://doi.org/10.1093/jxb/49.special_issue.419
- Telfer, A., 2005. Too much light? How β -carotene protects the photosystem II reaction centre. *Photochem. Photobiol. Sci.* 4, 950–956. <https://doi.org/10.1039/b507888c>
- Teng, W., 1990. AVHRR monitoring of U.S. crops during the 1988 drought. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 56, 1143–1146.
- Toller, G., Isaacman, A., 2009. MODIS Level 1B Product User's Guide. Nasa.
- Tramontana, G., Jung, M., Schwalm, C.R., Ichii, K., Camps-Valls, G., Ráduly, B., Reichstein, M., Arain, M.A., Cescatti, A., Kiely, G., Merbold, L., Serrano-Ortiz, P., Sickert, S., Wolf, S., Papale, D., 2016. Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms. *Biogeosciences* 13, 4291–4313. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4291-2016>
- Tucker, C.J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8, 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- 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. <https://doi.org/10.1038/319195a0>
- Tucker, C.J., Sellers, P.J., 1986. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.* 7, 1395–1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Running, S.W., Zhao, M., Costa, M.H., Kirschbaum, A.A., Ham, J.M., Saleska, S.R., Ahl, D.E., 2006a. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sens. Environ.* 102, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.017>
- 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. *Glob. Chang. Biol.* 11, 666–684. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00936.x>
- Turner, D.P., Ritts, W.D., Styles, J.M., Yang, Z., Cohen, W.B., Law, B.E., Thornton, P.E., 2006b. A diagnostic carbon flux model to monitor the effects of disturbance and interannual variation in climate on regional NEP. *Tellus, Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* 58, 476–490. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00221.x>

- Turner, D.P., Ritts, W.D., Wharton, S., Thomas, C., Monson, R., Black, T.A., Falk, M., 2009. Assessing FPAR source and parameter optimization scheme in application of a diagnostic carbon flux model. *Remote Sens. Environ.* 113, 1529–1539. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.003>
- Turner, D.P., Urbanski, S., Bremer, D., Wofsy, S.C., Meyers, T., Gower, S.T., Gregory, M., 2003. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Glob. Chang. Biol.* 9, 383–395. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00573.x>
- Ulsig, L., Nichol, C.J., Huemmrich, K.F., Landis, D.R., Middleton, E.M., Lyapustin, A.I., Mammarella, I., Levula, J., Porcar-Castell, A., 2017. Detecting inter-annual variations in the phenology of evergreen conifers using long-term MODIS vegetation index time series. *Remote Sens.* 9, 49. <https://doi.org/10.3390/rs9010049>
- van Wittenbergh, S., Sabater, N., Cendrero-Mateo, M.P., Tenjo, C., Moncholi, A., Alonso, L., Moreno, J., 2021. Towards the quantitative and physically-based interpretation of solar-induced vegetation fluorescence retrieved from global imaging. *Photosynthetica* 59, 438–457. <https://doi.org/10.32615/ps.2021.034>
- Verheef, W., 1984. Light Scattering by Leaf layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: the SAIL Model. *Remote Sens. Environ.* 141, 125–141.
- Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6s: an overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35, 675–686. <https://doi.org/10.1109/36.581987>
- Veroustraete, F., Sabbe, H., Eerens, H., 2002. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote Sens. Environ.* 83, 376–399. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00043-3)
- Verstraete, M.M., Pinty, B., 1996. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34, 1254–1265. <https://doi.org/10.1109/36.536541>
- Vicca, S., Balzarolo, M., Filella, I., Granier, A., Herbst, M., Knohl, A., Longdoz, B., Mund, M., Nagy, Z., Pintér, K., Rambal, S., Verbesselt, J., Verger, A., Zeileis, A., Zhang, C., Peñuelas, J., 2016. Remotely-sensed detection of effects of extreme droughts on gross primary production. *Sci. Rep.* 6. <https://doi.org/10.1038/srep28269>
- Viovy, N., Arino, O., Belward, A.S., 1992. The best index slope extraction (Bise): A method for reducing noise in NDVI time-series. *Int. J. Remote Sens.* 13, 1585–1590. <https://doi.org/10.1080/01431169208904212>
- Wagle, P., Gowda, P.H., Xiao, X., Anup, K.C., 2016. Parameterizing ecosystem light use efficiency and water use efficiency to estimate maize gross primary production and evapotranspiration using MODIS EVI. *Agric. For. Meteorol.* 222, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.009>
- Wald, L., 2018. BASICS IN SOLAR RADIATION AT EARTH SURFACE.
- Waldrop, M.M., 2016. More Than Moore. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/530144a>
- Wang, H., Jia, G., Fu, C., Feng, J., Zhao, T., Ma, Z., 2010. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sens. Environ.* 114, 2248–2258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.001>
- Wang, L., Qu, J.J., 2007. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>
- Wang, L., Zhu, H., Lin, A., Zou, L., Qin, W., Du, Q., 2017. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy covariance flux data. *Remote Sens.* 9. <https://doi.org/10.3390/rs9050418>
- Wang, S., Ibrom, A., Bauer-Gottwein, P., Garcia, M., 2018. Incorporating diffuse radiation into a light use efficiency and evapotranspiration model: An 11-year study in a high latitude deciduous forest. *Agric. For. Meteorol.* 248, 479–493. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.023>
- Wang, X., Ma, M., Li, X., Song, Y., Tan, J., Huang, G., Zhang, Z., Zhao, T., Feng, J., Ma, Z., Wei, W., Bai, Y., 2013. Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in northern China. *Int. J. Remote Sens.* 34, 587–599. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.715774>
- Wang, Y., Li, R., Hu, J., Fu, Y., Duan, J., Cheng, Y., 2021. Daily estimation of gross primary production under all sky using a light use efficiency model coupled with satellite passive microwave measurements. *Remote Sens. Environ.* 267, 112721. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112721>
- Williams, R.S., Carter, W.D., 1976. ERTS-1: A New Window on Our Planet.
- Wise, R.R., Naylor, A.W., 1987. Chilling-Enhanced Photooxidation: Evidence for the Role of Singlet Oxygen and Superoxide in the Breakdown of Pigments and Endogenous Antioxidants. *Plant Physiol.* 83, 278–282. <https://doi.org/10.1104/pp.83.2.278>
- 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* (80-.). 260, 1314–1317. <https://doi.org/10.1126/science.260.5112.1314>
- Wolanin, A., Camps-Valls, G., Gómez-Chova, L., Mateo-García, G., van der Tol, C., Zhang, Y., Guanter, L., 2019. Estimating crop primary productivity with Sentinel-2 and Landsat 8 using machine learning methods trained with radiative transfer simulations. *Remote Sens. Environ.* 225, 441–457. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.002>
- Wolfe, R.E., Roy, D.P., Vermote, E., 1998. MODIS land data storage, gridding, and compositing methodology: Level 2 grid. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1324–1338. <https://doi.org/10.1109/36.701082>
- Wong, C.Y.S., D'Odorico, P., Arain, M.A., Ensminger, I., 2020. Tracking the phenology of photosynthesis using carotenoid-sensitive and near-infrared reflectance vegetation indices in a temperate evergreen and mixed deciduous forest. *New Phytol.* 226, 1682–1695. <https://doi.org/10.1111/nph.16479>
- Wong, C.Y.S., Gamon, J.A., 2015. Three causes of variation in the photochemical reflectance index (PRI) in evergreen conifers. *New Phytol.* 206, 187–195. <https://doi.org/10.1111/nph.13159>
- Wood, R.W., 1913. Photography By Invisible Light. *Sci. Am.* 109, 380–381. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican11151913-380>
- Wu, C., Liu, Z., Xu, S., 2016. Remote sensing of crop light use efficiency using photochemical reflectance index, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE, pp. 1719–1722. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729440>
- Wu, Z., Deng, Y., Yu, X., 2010. Seasonal changes of the relationships between photochemical reflectance index and light use efficiency in broadleaf forest, in: *2010 18th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2010*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567837>
- Xiao, J., 2014. Assessing Net Ecosystem Exchange of Carbon Dioxide Between the Terrestrial Biosphere and the Atmosphere Using Fluxnet Observations and Remote Sensing, in: Hanes, J. (Ed.), *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 149–169. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25047-7_6
- Xiao, J., Chevallier, F., Gomez, C., Guanter, L., Hicke, J.A., Huete, A.R., Ichii, K., Ni, W., Pang, Y., Rahman, A.F., Sun, G., Yuan, W., Zhang, L., Zhang, X., 2019. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. *Remote Sens. Environ.* 233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>
- Xiao, J., Davis, K.J., Urban, N.M., Keller, K., 2014. Uncertainty in model parameters and regional carbon fluxes: A model-data fusion approach. *Agric. For. Meteorol.* 189–190, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.022>
- Xiao, J., Davis, K.J., Urban, N.M., Keller, K., Saliendra, N.Z., 2011. Upscaling carbon fluxes from towers to the regional scale: Influence of parameter variability and land cover representation on regional flux estimates. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 116, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2010JG001568>
- Xiao, J., Moody, A., 2005. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. *Remote Sens. Environ.* 98, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.011>
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E.A., Zhang, Q., Moore, B., 2004a. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sens. Environ.* 89, 519–534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>
- Xiao, X., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., Moore, B., Ojima, D., 2004b. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sens. Environ.* 91, 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.010>
- Xie, X., Li, A., Tan, J., Jin, H., Nan, X., Zhang, Z., Bian, J., Lei, G., 2020. Assessments of gross primary productivity estimations with satellite data-driven models using eddy covariance observation sites over the northern hemisphere. *Agric. For. Meteorol.* 280, 107771. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107771>
- Xiong, X., Sun, J.-Q., Esposito, J.A., Guenther, B., Barnes, W.L., 2003. MODIS reflective solar bands calibration algorithm and on-orbit performance, in: *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III*. <https://doi.org/10.1117/12.466096>
- Xu, H., Zhang, Z., Chen, J., Zhu, M., Kang, M., 2017. Cloudiness regulates gross primary productivity of a poplar plantation under different environmental conditions. *Can. J. For. Res.* 47, 648–658. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0413>
- Xu, H., Zhang, Z., Wu, X., Wan, J., 2023. Light use efficiency models incorporating diffuse radiation impacts for simulating terrestrial ecosystem gross primary productivity: A global comparison. *Agric. For. Meteorol.* 332, 109376. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109376>

- Xue, J., Su, B., 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *J. Sensors* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yamamoto, H.Y., 1979. Biochemistry Of The Violaxanthin Cycle In Higher Plants. *Pure Appl. Chem.* 51, 639–648. <https://doi.org/10.1351/pac197951030639>
- Yang, P., Van Der Tol, C., Campbell, P.K.E., Middleton, E.M., 2021. Unraveling the physical and physiological basis for the solar-induced chlorophyll fluorescence and photosynthesis relationship using continuous leaf and canopy measurements of a corn crop. *Biogeosciences* 18, 441–465. <https://doi.org/10.5194/bg-18-441-2021>
- Yeber, M., Van Dijk, A.I.J.M., Leuning, R., Guerschman, J.P., 2015. Global vegetation gross primary production estimation using satellite-derived light-use efficiency and canopy conductance. *Remote Sens. Environ.* 163, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.016>
- Young, A.J., Phillip, D., Ruban, A. V., Horton, P., Frank, H.A., 1997. The xanthophyll cycle and carotenoid-mediated dissipation of excess excitation energy in photosynthesis. *Pure Appl. Chem.* 69, 2125–2130. <https://doi.org/10.1351/pac199769102125>
- Yuan, W., Cai, W., Nguy-Robertson, A.L., Fang, H., Suyker, A.E., Chen, Y., Dong, W., Liu, S., Zhang, H., 2015. Uncertainty in simulating gross primary production of cropland ecosystem from satellite-based models. *Agric. For. Meteorol.* 207, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.016>
- Yuan, W., Cai, W., Xia, J., Chen, J., Liu, S., Dong, W., Merbold, L., Law, B., Arain, A., Beringer, J., Bernhofer, C., Black, A., Blanken, P.D., Cescatti, A., Chen, Y., Francois, L., Gianelle, D., Janssens, I.A., Jung, M., Kato, T., Kiely, G., Liu, D., Marcolla, B., Montagnani, L., Raschi, A., Rouspard, O., Varlagin, A., Wohlfahrt, G., 2014a. Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database. *Agric. For. Meteorol.* 192–193, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.007>
- Yuan, W., Liu, S., Dong, W., Liang, S., Zhao, S., Chen, J., Xu, W., Li, X., Barr, A., Andrew Black, T., Yan, W., Goulden, M.L., Kulmala, L., Lindroth, A., Margolis, H.A., Matsuura, Y., Moors, E., Van Der Molen, M., Ohta, T., Pilegaard, K., Varlagin, A., Vesala, T., 2014b. Differentiating moss from higher plants is critical in studying the carbon cycle of the boreal biome. *Nat. Commun.* 5, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5270>
- Yuan, W., Liu, S., Zhou, Guangsheng, Zhou, Guoyi, 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. *Agric. For. Meteorol.* 143, 189–207. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.001>
- 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 Sens. Environ.* 117, 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>
- Zarco-Tejada, P.J., Pushnik, J.C., Dobrowski, S., Ustin, S.L., 2003. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sens. Environ.* 84, 283–294. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00113-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00113-X)
- Zeng, J., Matsunaga, T., Tan, Z.H., Saigusa, N., Shirai, T., Tang, Y., Peng, S., Fukuda, Y., 2020. Global terrestrial carbon fluxes of 1999–2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest. *Sci. Data* 7, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00653-5>
- Zhang, C., Filella, I., Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., 2016. Affecting factors and recent improvements of the photochemical reflectance index (pri) for remotely sensing foliar, canopy and ecosystemic radiation-use efficiencies. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs8090677>
- Zhang, C., Preece, C., Filella, I., Farré-Armengol, G., Peñuelas, J., 2017. Assessment of the response of photosynthetic activity of Mediterranean evergreen oaks to enhanced drought stress and recovery by using PRI and R690/R630. *Forests* 8. <https://doi.org/10.3390/f8100386>
- Zhang, F., Chen, J.M., Chen, J., Gough, C.M., Martin, T.A., Dragoni, D., 2012. Evaluating spatial and temporal patterns of MODIS GPP over the conterminous U.S. against flux measurements and a process model. *Remote Sens. Environ.* 124, 717–729. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.023>
- Zhang, L.X., Zhou, D.C., Fan, J.W., Hu, Z.M., 2015. Comparison of four light use efficiency models for estimating terrestrial gross primary production. *Ecol. Modell.* 300, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.001>
- Zhang, X., Ni-meister, W., 2014. Remote Sensing of Forest Biomass, in: Hanes, J. (Ed.), *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 63–98. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25047-7_3
- Zhang, Y., Song, C., Sun, G., Band, L.E., Noormets, A., Zhang, Q., 2015. Understanding moisture stress on light use efficiency across terrestrial ecosystems based on global flux and remote-sensing data. *J.*

- Geophys. Res. Biogeosciences 120, 2053–2066. <https://doi.org/10.1002/2015JG003023>
- Zhang, Y., Xiao, X., Wu, X., Zhou, S., Zhang, G., Qin, Y., Dong, J., 2017. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. *Sci. Data* 4. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.165>
- Zhang, Z., Xin, Q., Li, W., 2021. Machine Learning-Based Modeling of Vegetation Leaf Area Index and Gross Primary Productivity Across North America and Comparison With a Process-Based Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 13, 1–25. <https://doi.org/10.1029/2021MS002802>
- Zhao, M., Heinsch, F.A., Nemani, R.R., Running, S.W., 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sens. Environ.* 95, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.011>
- Zhao, M., Running, S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* (80-.). 329, 940–943. <https://doi.org/10.1126/science.1192666>
- 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. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 111. <https://doi.org/10.1029/2004JG000004>
- Zhao, S., Liu, S., 2014. Scale criticality in estimating ecosystem carbon dynamics. *Glob. Chang. Biol.* 20, 2240–2251. <https://doi.org/10.1111/gcb.12496>
- Zheng, Y., Zhang, L., Xiao, J., Yuan, W., Yan, M., Li, T., Zhang, Z., 2018. Sources of uncertainty in gross primary productivity simulated by light use efficiency models: Model structure, parameters, input data, and spatial resolution. *Agric. For. Meteorol.* 263, 242–257. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.003>
- Zhou, H., Yue, X., Lei, Y., Tian, C., Ma, Y., Cao, Y., 2021. Large Contributions of Diffuse Radiation to Global Gross Primary Productivity During 1981–2015. *Global Biogeochem. Cycles* 35, e2021GB006957. <https://doi.org/10.1029/2021GB006957>
- Zhou, Y., Wu, X., Ju, W., Chen, J.M., Wang, S., Wang, H., Yuan, W., Andrew Black, T., Jassal, R., Ibrom, A., Han, S., Yan, J., Margolis, H., Rouspard, O., Li, Y., Zhao, F., Kiely, G., Starr, G., Pavelka, M., Montagnani, L., Wohlfahrt, G., D’Odorico, P., Cook, D., Arain, M.A., Bonal, D., Beringer, J., Blanken, P.D., Loubet, B., Leclerc, M.Y., Matteucci, G., Nagy, Z., Olejnik, J., Paw U, K.T., Varlagin, A., 2016. Global parameterization and validation of a two-leaf light use efficiency model for predicting gross primary production across FLUXNET sites. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 121, 1045–1072. <https://doi.org/10.1002/2014JG002876>
- Zhu, H., Lin, A., Wang, L., Xia, Y., Zou, L., 2016. Evaluation of MODIS gross primary production across multiple biomes in China using eddy covariance flux data. *Remote Sens.* 8, 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs8050395>

