



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΕΡΓΟ ΑΠΘ: ΘΑΛΗΣ 85492



Χαρτογράφηση βλάστησης και εκτίμηση βιομάζας με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης στο πλαίσιο της σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή και του Πρωτοκόλλου του Κιότο

## Παραδοτέο 4.γ

Τίτλος Τεχνικής Έκθεσης:

**Χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης και χλωροφύλλης βάσει  
ανάλυσης υπερφασματικών εικόνων CASI**



Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2014

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ**

Δρ. Ιωάννης Γήτας, Αναπλ. Καθηγητής Σχολής Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος Α.Π.Θ.

Τηλ: 2310992699

E-mail: igitas@for.auth.gr

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΠΑΡΑΔΟΤΕΟΥ**

Δρ. Βασιλεία Καραθανάση, Αναπλ. Καθηγήτρια Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τηλ: 210 7722695

E-mail: karathan@survey.ntua.gr

**ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Δρ. Βασιλεία Καραθανάση

Δρ. Ιωάννης Γήτας

Δρ. Πολυχρόνης Κολοκούσης

Δρ. Χρήστος Καρυδάς

Δρ. Δημήτριος Σταυρακούδης

Υποψ. Δρ. Χαρούλα Ανδρέου

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή ..... 4

2. Περιοχή μελέτης..... 5

3. Φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης..... 7

    3.1 Χλωροφύλλη και άλλες χρωστικές (κυρίως καροτενοειδή)..... 10

4. Μεθοδολογία ..... 12

    4.1 Δείκτες βλάστησης ..... 12

    4.2 Δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη..... 12

    4.3 Προεπεξεργασία των δεδομένων..... 16

    4.4 Εφαρμογή των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης στα σημεία επίγειου ελέγχου ..... 16

5. Αποτελέσματα..... 19

    5.1 Δείκτες που προτείνονται στο λογισμικό ENVI ..... 19

    5.2 Δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία ..... 20

    5.3 Αξιολόγηση με χρήση του χάρτη δασικού ύψους..... 25

6. Συμπεράσματα ..... 27

Βιβλιογραφία ..... 28

## 1. Εισαγωγή

Η γνώση της χωρικής κατανομής των ειδών μέσα στο δάσος είναι απαραίτητη προκειμένου να προχωρήσουμε σε εκτιμήσεις βιομάζας για τις εθνικές αναφορές της Σύμβασης-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC) και το Πρωτόκολλο του Κιότο (<https://unfccc.int/2860.php>). Βασικοί παράμετροι που απαιτούνται για την εκτίμηση της βιομάζας είναι το είδος της δασικής κάλυψης, το ύψος των δέντρων και η πυκνότητα της βλάστησης. Βάσει αυτών, η συνολική βιομάζα μπορεί να εκτιμηθεί είτε μέσω αλλομετρικών εξισώσεων είτε απευθείας, εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο.

Η παρούσα μελέτη διερευνά μεθοδολογίες εκτίμησης της πυκνότητας βλάστησης μέσω τηλεσκοπικών δεδομένων που ελήφθησαν από τον αερομεταφερόμενο υπερφασματικό αισθητήρα CASI. Αντίθετα με το είδος κάλυψης γης ή το ύψος των δέντρων όμως, η πυκνότητα της βλάστησης αποτελεί μία γενικότερη έννοια, που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους. Ένας δείκτης πυκνότητας είναι ο αριθμός δέντρων ανά μονάδα επιφάνειας, η γνώση του οποίου είναι αναγκαία για την τελική εκτίμηση βιομάζας μέσω αλλομετρικών εξισώσεων. Η εκτίμηση όμως του αριθμού των δέντρων απαιτεί εικόνες υπερυψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας, καθώς η κόμη κάθε δέντρου πρέπει να απεικονίζεται από έναν ικανό αριθμό εικονοστοιχείων, προκειμένου να είναι εφικτή η αναγνώριση του δέντρου. Στα πλαίσια του προγράμματος, η εκτίμηση του αριθμού των κορμών διενεργείται τόσο μέσω αεροφωτογραφιών της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΑΕ (Παραδοτέο 4.α), όσο και μέσω υπερφασματικών εικόνων GeoEye (Παραδοτέο 4.β). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, η χωρική διακριτική ικανότητα (το μέγεθος του εικονοστοιχείου) των αντίστοιχων εικόνων είναι 0.5 m, γεγονός που καθιστά εφικτή την αναγνώριση μεμονωμένων δέντρων.

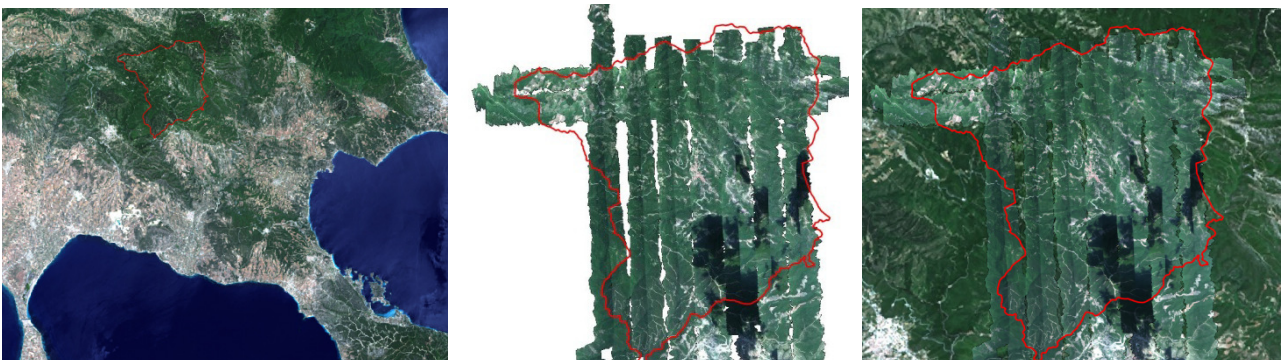
Η υπερφασματική εικόνα CASI χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα (2 m), δυσχεραίνοντας την αξιοποίησή της για την εκτίμηση του αριθμού των δέντρων. Εντούτοις, παρέχει μία λεπτομερή καταγραφή του ορατού και εγγύς υπέρυθρου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μέσω πολλαπλών διαύλων ευαίσθητων σε πολύ στενά (περίπου 7 nm) διαδοχικά διαστήματα του φάσματος. Το γεγονός αυτό τον καθιστά κατάλληλο για την εκτίμηση της πυκνότητας βλάστησης μέσω κατάλληλα επιλεγμένων δεικτών βλάστησης (vegetation indices), οι οποίοι ορίζονται ως αδιάστατα, ραδιομετρικά μέτρα που λειτουργούν ως δείκτες της σχετικής αφθονίας και της δραστηριότητας της πράσινης βλάστησης, του ποσοστού φυτικής κάλυψης, του περιεχόμενου σε χλωροφύλλη και της ποσότητας πράσινης βιομάζας.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μία μεθοδολογία χαρτογράφησης της πυκνότητας βλάστησης και χλωροφύλλης μέσω δεικτών βλάστησης, που υπολογίζονται από τους διαύλους της υπερφασματικής εικόνας CASI. Υπολογίστηκε δε ένας μεγάλος αριθμός δεικτών που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι διάφοροι δείκτες συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς την ευαισθησία τους στην περιοχή μελέτης και τελικά επιλέχθηκαν αυτοί που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης της περιοχής. Τέλος, δόθηκε βαρύτητα στην επιλογή δεικτών που συγχρόνως ελαχιστοποιούν τις επιδράσεις εξωτερικών παραγόντων (γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, επίδραση της ατμόσφαιρας κλπ.).

## 2. Περιοχή μελέτης

Το πανεπιστημιακό δάσος Ταξιάρχη–Βραστάμων είναι δημόσιο δάσος και η κυριότητά του ανήκει στο Ελληνικό Κράτος (Εικόνα 1). Καταλαμβάνει έκταση περίπου 5800 εκταρίων (ha, δηλαδή 58000 περίπου στρεμμάτων) στις νότιες και νοτιοδυτικές πλαγιές του όρους Χολομώντα Χαλκιδικής, με υψόμετρο από 320 m έως 1165 m και σε απόσταση 70 Km από τη Θεσσαλονίκη. Η συνολική έκταση των 5800 ha κατηγοριοποιείται σε: δασοσκεπή έκταση (περίπου 3895 ha), από τα οποία 107 ha είναι Κοινοτικό δάσος, 264 ha είναι μερικώς δασοσκεπής έκταση, 1592 ha είναι καλλιεργούμενη έκταση και 85 ha είναι άγονη έκταση. Το κλίμα είναι Μεσογειακό-Ηπειρωτικό. Η μέση θερμοκρασία αέρος είναι 10.7°C, ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος είναι οι ψυχρότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία αέρος 1.7°C και οι Ιούλιος και Αύγουστος οι θερμότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία 20.2°C. Η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα που έχει καταγραφεί είναι 35.5°C και η χαμηλότερη -15°C. Η μέση ετήσια υγρασία είναι 73.1%. Στο δάσος παρατηρείται μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 748mm. Από φυτοκοινωνικής άποψης το δάσος ανήκει στη ζώνη Quercetalia (δρύες). Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εμφανίζεται η ένωση Quercetumconfertae, ενώ λείψανα της ένωσης Quercetumfagetum εμφανίζονται τοπικά καθώς επίσης και η ένωση Quercetumilicis στα ρεύματα. Η περιοχή του δάσους του Ταξιάρχη αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δάσος πλατύφυλλων ειδών της ελληνικής επικράτειας. Αναγεννάται με φυσικό τρόπο και μόνο σε ακραίες δυσμενείς συνθήκες γίνεται επέμβαση με τεχνητή αναγέννηση.



**Εικόνα 1.** Έγχρωμο σύνθετο 321 (RGB) της Landsat 8 της 2/6/2013 (αριστερά), οι λωρίδες λήψης του CASI 550 (στο κέντρο) και οριοθετημένο (με κόκκινο χρώμα) το δάσος του Ταξιάρχη σε υπέρθεση της απεικόνισης CASI σε μεγένθυση της Landsat 8 (δεξιά).

Η βλάστηση της περιοχής κυριαρχείται από φυλλοβόλα δέντρα και διαρθρώνεται σε τρεις ζώνες: την Ευμεσογειακή ζώνη, την Παραμεσογειακή ζώνη και τη ζώνη των δασών Οξιάς. Οι ζώνες διακρίνονται ανάλογα με τη χλωριδική σύνθεση, το υψόμετρό τους, τις πετρολογικές και εδαφικές συνθήκες, την έκθεση και κλίση του τοπίου, τη θερμοκρασία αέρος και τη βροχόπτωση. Το μεγαλύτερο μέρος του δάσους καταλαμβάνει η πλατύφυλλος Δρυς. Άλλα σπουδαία είδη είναι η Οξιά, η Μαύρη Πεύκη, η Χαλέπειος Πεύκη, ενώ υπάρχουν και άλλα ξυλώδη είδη όπως το Ρείκι, η Αριά, ο Φράξος, ο Πλάτανος, η Ιτιά κλπ. Ιδιαίτερη σημασία για την περιοχή αποτελεί το Έλατο, φυτεμένο από τους κατοίκους στα δικά τους κτήματα, με σκοπό να κοπούν και να πουληθούν ως Χριστουγεννιάτικα δένδρα. Με την καλλιέργεια των Χριστουγεννιάτικων δενδρυλλίων ασχολούνται πολλές δεκαετίες στην περιοχή, με περίπου 2 εκατομμύρια δενδρύλλια να προσφέρουν εισόδημα, προστασία των εδαφών και καταφύγιο της πανίδας. Από άποψης χλωρίδας υπάρχουν περισσότερα από περίπου 50 ξυλώδη και σχεδόν 200 ποώδη είδη. Το όρος Χολομώντας με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης προστατεύεται, έχοντας ως επίκεντρο ενδιαφέροντος τα αρπακτικά πουλιά, ενώ υπάρχουν αρκετά καταφύγια άγριας ζωής όπου απαγορεύεται κάθε μορφής κυνήγι.

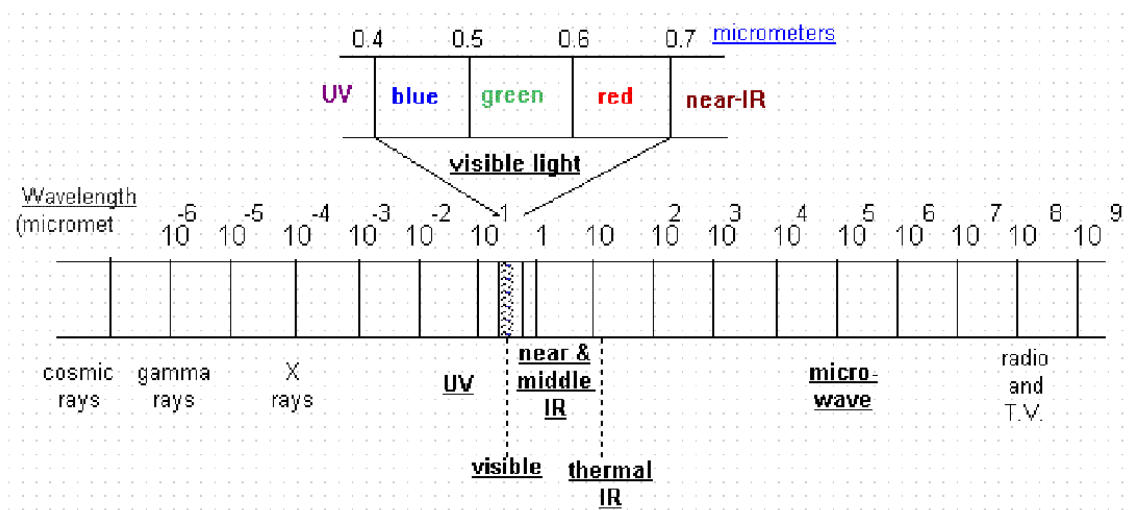
Αναφορικά με το ύψος της κομοστέγης των δένδρων τα βασικότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης είναι τα εξής:

- Το δασικό ύψος εξαρτάται από το δασικό τύπο μιας περιοχής. Συγκεκριμένα, η δασική περιοχή του Ταξιάρχη αποτελείται κυρίως από δρύες και οξιές που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 25-27 μέτρα αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη περιοχή συναντάται επίσης μαύρη Πεύκη, τραχεία Πεύκη και έλατα που είναι φυτεμένα από το δασαρχείο ή από ιδιώτες και έχουν μέγιστο ύψος περίπου 6 μέτρα.
- Επιπρόσθετα, το δασικό ύψος εξαρτάται από την ηλικία των δέντρων. Αρχικά σημειώνεται ότι ο τρόπος διαχείρισης του δάσους είναι πρεμνοφυής. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρόνο υλοτομείται ένα κομμάτι του δάσους —στη συγκεκριμένη περίπτωση 40 εκτάρια το χρόνο— με στόχο της ανανέωσής του. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο τρόπο της διαχείρισης θεωρείται ότι κάθε 25 χρόνια το δάσος ανανεώνεται πλήρως. Παρόλα αυτά στο συγκεκριμένο δάσος συναντιούνται δέντρα ηλικίας 10 έως 70 ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές ομάδες ηλικιών στη συγκεκριμένη δασική περιοχή ενδιαφέροντος. Μια μέση προσέγγιση αύξησης του δασικού ύψους στα 10 χρόνια είναι περίπου 6 μέτρα. Το δασικό ύψος αναφοράς αναφέρεται συνήθως σε εκείνο που έχει το δέντρο όταν η ηλικία του είναι 40 ετών, γιατί θεωρείται ότι οι μετέπειτα μεταβολές στο ύψος του είναι πολύ μικρές.
- Ένας άλλος παράγοντας που σχετίζεται με το δασικό ύψος είναι η ποιότητα του τόπου. Για την περίπτωση της περιοχής μελέτης η χειρότερη ποιότητα του τόπου είναι η Πέμπτη, η οποία συναντάται συνήθως σε βραχώδεις περιοχές, με το μέγιστο δασικό ύψος να φτάνει περίπου τα 8 μέτρα. Οι



καλύτερες ποιότητες του τόπου στην περιοχή μας είναι η Πρώτη σε ελάχιστα σημεία και η Δεύτερη (περίπου 20% της συνολικής περιοχής) με το μέγιστο δασικό ύψος να είναι 27 και 23 μέτρα αντίστοιχα.

Για τη μελέτη έγιναν επίγειες μετρήσεις με το ραδιόμετρο GER 1500 (στις 25/7/2013), μετρήσεις από τον αερομεταφερόμενο υπερφασματικό δέκτη CASI 550 (στις 25/7/2013) και βοηθητικά χρησιμοποιήθηκε η απεικόνιση Landsat 8 της 2/6/2013.



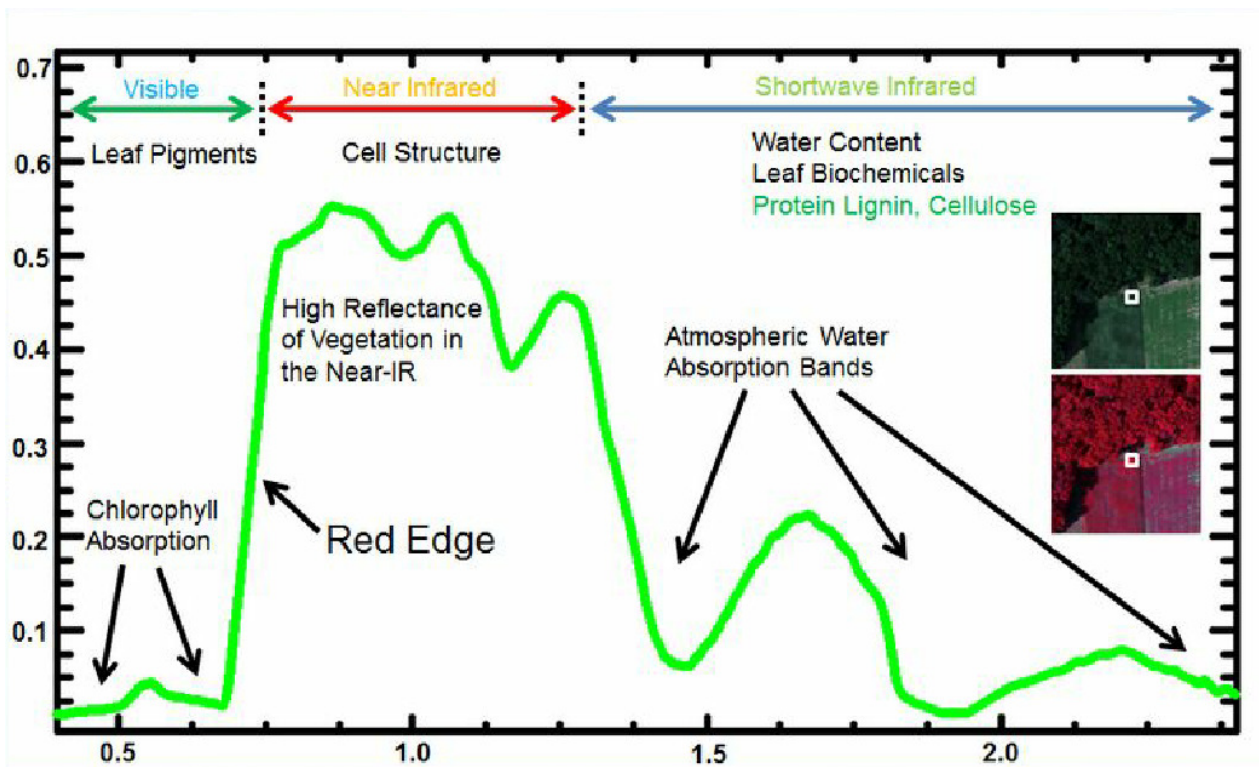
Εικόνα 2

### 3. Φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα φύλλα των φυτών είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των εφαρμογών της φασματοσκοπίας και της τηλεπισκόπησης στη μελέτη και την ανάλυση της βλάστησης. Οι βιολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες της βλάστησης επιδρούν στο συντελεστή ανάκλασης, στη μετάδοση και στην απορροφητικότητα (absorptance) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που προέρχεται από διάφορες περιοχές στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Εικόνα 2). Αν και τα συστατικά των φυτών (π.χ. κλαδιά, άνθη) έχουν μια επίδραση στη φασματική απόκριση, η συμβολή τους είναι μικρή όταν συγκρίνεται με αυτή των φύλλων των φυτών.

Το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορεί να διαχωριστούν ποιοτικά σε δύο φασματικές υποκατηγορίες προκειμένου να αξιολογήσουμε τις βασικές ιδιότητες των φύλλων που αφορούν σε διαφορετικά συστατικά ενός φύλλου: α) 400-750 nm (ειδικές χρωστικές της βλάστησης, όπως χλωροφύλλες a και b, καροτίνες a και b και ξανθοφύλλες) και β) 750-1350 nm (εσωτερική δομή των φύλλων). Τα περισσότερα φυτά εμφανίζονται πράσινα λόγω της μεγάλης (70-90%) απορρόφησης του φωτός από τη χλωροφύλλη στα 450 nm (μπλε) και 680 nm (κόκκινο) και σχετικά

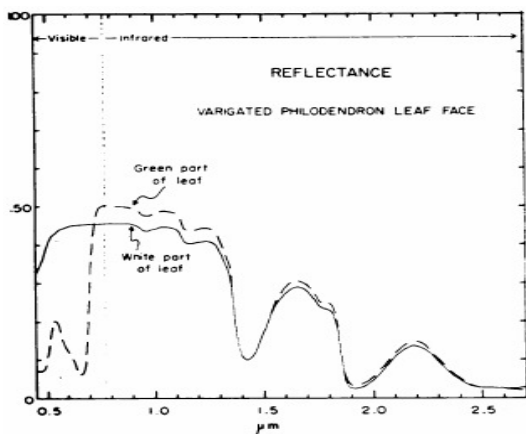
λιγότερη απορρόφηση στα πράσινα μήκη κύματος (550 nm) (Εικόνα 3). Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της ανάπτυξης των φυτών, η συγκέντρωση χλωροφύλλης είναι σχετικά χαμηλή έναντι των καροτενοειδών και η οπτική εμφάνιση ενός φύλλου είναι πολύ ανοιχτή πράσινη. Το μπλε και κόκκινο φως απορροφάται και χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση και τις φωτοχημικές αντιδράσεις. Δεδομένου ότι τα φυτά ωριμάζουν, η αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης είναι ανάλογη με άλλες χρωστικές και το φυτό εμφανίζεται από πράσινο έως σκούρο πράσινο μέχρι τη γήρανσή του, όπου η σύνθεση της χλωροφύλλης παύει, με συνέπεια τη λιγότερη απορρόφηση φωτός στα μπλε και κόκκινα μήκη κύματος. Στο γερασμένο φυτό κυριαρχούν άλλες χρωστικές ουσίες (εκτός της χλωροφύλλης), με συνέπεια να κυριαρχεί ένα κίτρινο έως καφετί χρώμα.



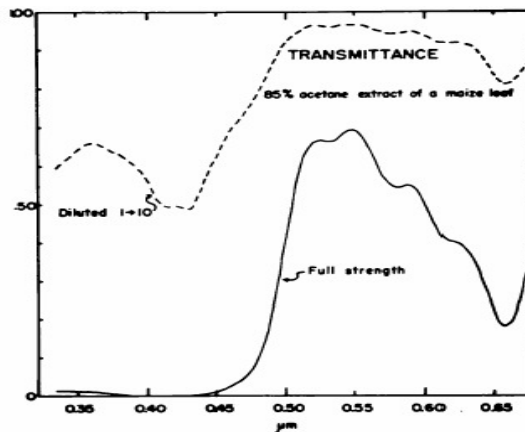
Εικόνα 3

Στην φασματική κατηγορία από 750 έως 1350 nm, ο συντελεστής ανάκλασης επηρεάζεται κυρίως από την εσωτερική δομή των φύλλων. Σε αυτήν τη φασματική ζώνη εμφανίζεται σχετικά υψηλότερος συντελεστής ανάκλασης, όταν συγκρίνεται με το ορατό φως, με πάνω από 50% της εισερχόμενης ακτινοβολίας να ανακλάται από τα ώριμα φύλλα. Ο συντελεστής ανάκλασης είναι στο υψηλότερό του σημείο στην πλήρη ωριμότητα και μειώνεται μέχρι την κατάρρευση του κυτταρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια της γήρανσης.





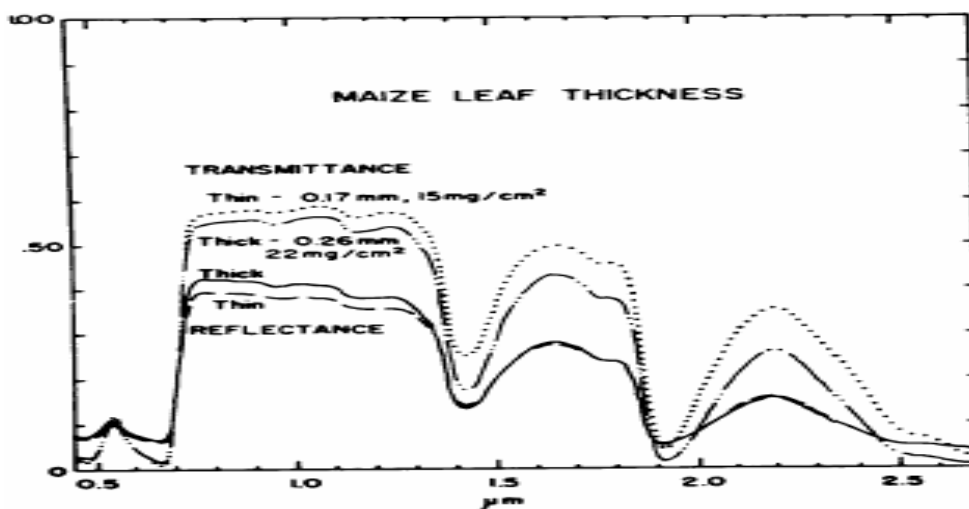
Σχήμα 1



Σχήμα 2

Έχει παρατηρηθεί ότι η έλλειψη ισχυρής ανακλαστικότητας στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος από τα περισσότερα φύλλα μπορεί να αποδοθεί στις χρωστικές ουσίες των φύλλων, που απορροφούν το ορατό φως. Το Σχήμα 1 δείχνει ότι φύλλα που στερούνται τις συνηθισμένες χρωστικές ουσίες ανακλούν μεγάλο ποσό του ορατού φωτός ακριβώς όπως ανακλούν και το κοντινό υπέρυθρο. Το Σχήμα 2 επιβεβαιώνει ότι χρωστικές ουσίες που έχουν χαρακτηριστικό χρώμα παρουσιάζουν μικρή απορρόφηση στο υπέρυθρο και μπορούν να ανιχνευτούν στο φύλλο, αφού απορροφούν έντονα στο υπεριώδες και στο ιώδες και σε αυτά τα μήκη κύματος το φύλλο έχει μικρό συντελεστή ανάκλασης και σχεδόν καθόλου εκπομπή ακτινοβολίας.

Μια παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι ο συντελεστής ανάκλασης ενός φύλλου γενικά δεν είναι εξαρτώμενος (τουλάχιστον έντονα) από το πάχος των φύλλων, μέσα σε συνηθισμένο εύρος πάχους (Σχήμα 3). Η ανακλαστικότητα επηρεάζεται εντονότερα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπου οι χρωστικές ουσίες των φύλλων απορροφούν την ενέργεια.

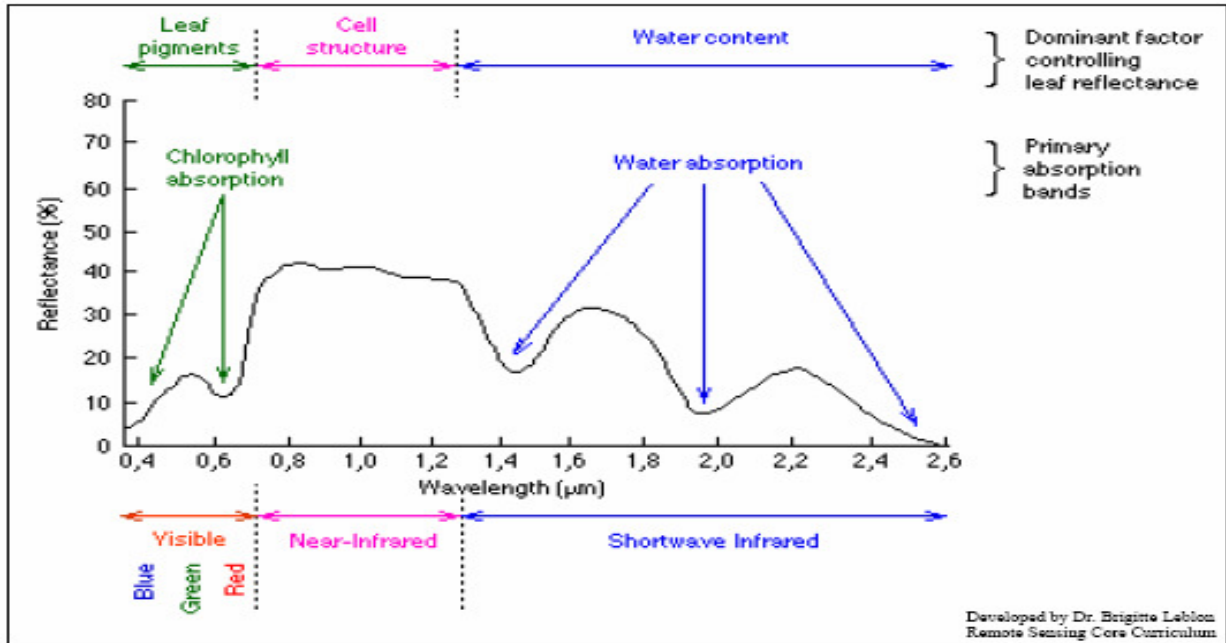


Σχήμα 3

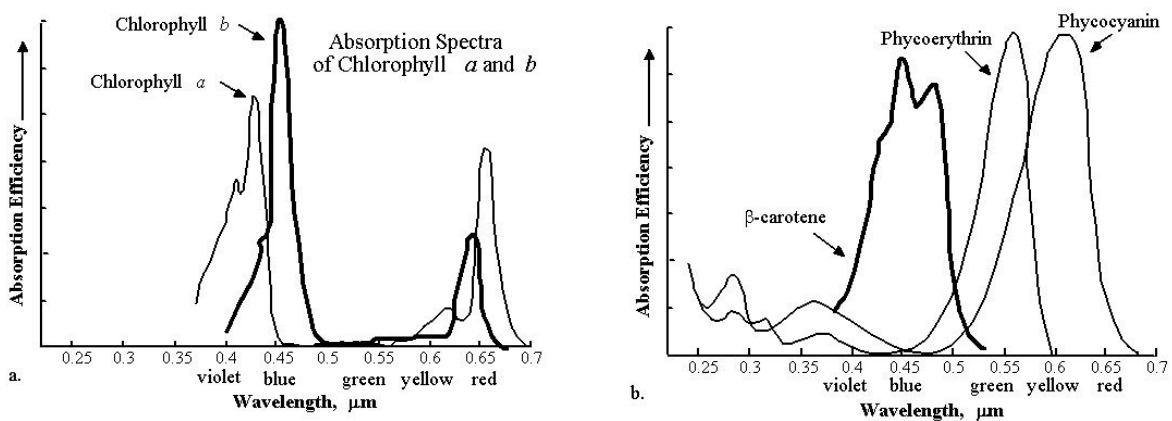
Οι οπτικές ιδιότητες των φύλλων έχει αποδειχθεί ότι συσχετίζονται με τη φωτοσυνθετική απόδοσή τους και με τα αποθέματα θερμικής ενέργειας (Ehleringer and Mooney, 1978; Gates, 1976). Επιπλέον, η κατανόηση των δομικών τμημάτων των φύλλων που επηρεάζουν το συντελεστή ανάκλασης του φύλλου είναι σημαντική για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των φασματοσκοπικών μετρήσεων. Ο συντελεστής ανάκλασης των φύλλων στην κοντινή υπέρυθη περιοχή (NIR 750-1350 nm) επηρεάζεται πρώτιστα από τη δομή των φύλλων, εκτιμώντας ότι ο συντελεστής ανάκλασης στην ορατή περιοχή (400-700 nm) καθορίζεται συνήθως από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές ουσίες, και ο συντελεστής ανάκλασης στη μέση υπέρυθη περιοχή (1350-2500 nm) από την περιεκτικότητα σε νερό (Gates et al., 1965). Στη μετάβαση από το κόκκινο στα υπέρυθρα μήκη κύματος, ο συντελεστής ανάκλασης των φύλλων αυξάνεται πολύ, παράγοντας ένα ευδιάκριτο φασματικό χαρακτηριστικό γνώρισμα το οποίο ονομάζεται κόκκινη άκρη (red edge). Ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης αυτής της ακμής έχει συσχετιστεί με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, με τα στάδια ανάπτυξης του φυτού, αλλά και με την καταπόνηση του φυτού (Lichtenthaler et al., 1996; Vogelmann et al., 1993; Vogelmann, 1993). Αντίθετα, η ανάλυση του συντελεστή ανάκλασης φύλλων μέσα στην κοντινή υπέρυθη περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την επίδραση των δομικών ιδιοτήτων των φύλλων στο συντελεστή ανάκλασης, σε αντιδιαστολή με τα χημικά συστατικά του φύλλου όπως η χλωροφύλλη και το νερό (Curran et al., 1992; Gates, 1970).

### 3.1 Χλωροφύλλη και άλλες χρωστικές (κυρίως καροτενοειδή)

Οι χλωροφύλλες a και b έχουν τα μέγιστα σημεία απορροφητικότητας τους στο κόκκινο και στην μπλε περιοχή του φάσματος (Εικόνες 4 και 5). Δυστυχώς στην μπλε περιοχή έχουμε μέγιστες επικαλύψεις με την απορροφητικότητα των καροτενοειδών, οπότε δεν χρησιμοποιείται γενικά αυτή η φασματική ζώνη για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη. Η μέγιστη απορροφητικότητα στην κόκκινη περιοχή εμφανίζεται μεταξύ 660 και 680 nm. Εντούτοις, ο συντελεστής ανάκλασης σε αυτά τα μήκη κύματος δεν έχει αποδειχθεί (ακόμη) τόσο χρήσιμος για την πρόβλεψη της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη όπως ο συντελεστής ανάκλασης σε ελαφρώς μεγαλύτερα ή μικρότερα μήκη κύματος. Αυτό συμβαίνει επειδή το σχετικά χαμηλό περιεχόμενο χλωροφύλλης είναι επαρκές για να προκαλέσει κορεσμό στην απορρόφηση στην περιοχή 660 έως 680 nm, μειώνοντας κατά συνέπεια την ευαισθησία των φασματικών δεικτών στην υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης, που είναι βασισμένοι (οι δείκτες) σε αυτά τα μήκη κύματος. Συνεπώς, εμπειρικά μοντέλα για την πρόβλεψη της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη από την ανάκλαση είναι κατά ένα μεγάλο μέρος βασισμένα στην ανακλαστικότητα στις περιοχές των 550 ή 700 nm, όπου προκειμένου να κορεστεί η απορρόφηση, απαιτείται μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη.



Εικόνα 4



Εικόνα 5

Η εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε καροτενοειδή από τις τιμές ανακλαστικότητα είναι πολύ δυσκολότερη από την εκτίμηση της χλωροφύλλης. Αυτό συμβαίνει λόγω της επικάλυψης των μέγιστων τμημάτων απορρόφησης μεταξύ της χλωροφύλλης και του καροτενοειδούς (Εικόνα 5) και λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης της χλωροφύλλης από τα καροτενοειδή στα περισσότερα φύλλα. Συνεπώς, οι εμπειρικοί δείκτες που έχουν δημιουργηθεί έχουν αποδειχθεί επιτυχέστεροι για την εκτίμηση της αναλογίας των καροτενοειδών προς τη χλωροφύλλη, απ' ότι στην εκτίμηση της απόλυτης συγκέντρωσης καροτενοειδών (Merzlyak et al., 1999; Penuelas et al., 1995). Οι περισσότεροι δείκτες για την εκτίμηση της αναλογίας (καροτενοειδών/χλωροφύλλη) είναι με βάση τη σύγκριση του συντελεστή ανάκλασης στην περιοχή της μέγιστης απορρόφησης των καροτενοειδών (400-500 nm) ως προς τον συντελεστή ανάκλασης στην κόκκινη περιοχή, ο οποίος επηρεάζεται μόνο από τη χλωροφύλλη.

## 4. Μεθοδολογία

### 4.1 Δείκτες βλάστησης

Από τη δεκαετία ακόμη του 1960, οι επιστήμονες έχουν εξαγάγει και έχουν διαμορφώσει διάφορες βιοφυσικές μεταβλητές της βλάστησης χρησιμοποιώντας μεθόδους και τεχνικές τηλεπισκόπησης. Ένα μεγάλο μέρος της έρευνας που έχει γίνει για την ανάπτυξη των δεικτών βλάστησης —οι οποίοι ορίζονται ως αδιάστατα, ραδιομετρικά μέτρα που λειτουργούν ως δείκτες της σχετικής αφθονίας και της δραστηριότητας της πράσινης βλάστησης, του ποσοστού φυτικής κάλυψης, του περιεχόμενου σε χλωροφύλλη και της ποσότητας πράσινης βιομάζας— έχει δείξει ότι κάθε δείκτης, θα πρέπει να:

- μεγιστοποιεί την ευαισθησία των βιοφυσικών παραμέτρων των φυτών,
- εξομαλύνει το μοντέλο ή τις εξωτερικές επιδράσεις του (γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, επίδραση της ατμόσφαιρας κλπ.),
- εξομαλύνει τις εσωτερικές επιπτώσεις στη βλάστηση, όπως οι διακυμάνσεις της ανάκλασης στο σύστημα ρίζας-θόλου των φυτών και να λαμβάνει υπόψη την τοπογραφία του εδάφους και τις διαφορές στην ξυλώδη βλάστηση (μη φωτοσυνθετιζόμενων τμημάτων),
- συνδυάζεται με κάποια συγκεκριμένη βιοφυσική παράμετρο μέτρησης όπως για παράδειγμα η βιομάζα, ως μέρος της προσπάθειας για την επικύρωση του δείκτη και τον έλεγχο της ποιότητάς του.

Υπάρχουν δεκάδες δείκτες βλάστησης που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία. Πολλοί είναι λειτουργικά ισοδύναμοι ως προς το περιεχόμενο των πληροφοριών (Perry Jr. and Lautenschlager, 1984), ενώ ορισμένοι προσφέρουν μοναδικές βιοφυσικές πληροφορίες (Qi et al., 1995).

### 4.2 Δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, αφενός υπολογίστηκαν και αξιολογήθηκαν με χρήση του εργαλείου «Vegetation Analysis» οι δείκτες βλάστησης και χρωστικών που διαθέτει το λογισμικό ENVI.

Επίσης, δημιουργήθηκαν και υπολογίστηκαν στο λογισμικό ENVI με το εργαλείο «BandMaths» οι δείκτες βλάστησης που ακολουθούν και οι οποίοι επιλέχτηκαν από την πρόσφατη διεθνή βιβλιογραφία ως οι πλέον κατάλληλοι.

**NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index): Ο πλέον γνωστός και ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης βλάστησης είναι ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (NDVI) ο οποίος βασίζεται στην αντίθεση λόγω χρωστικών ουσιών της βλάστησης μεταξύ της μέγιστης απορρόφησης της χλωροφύλλης στο κόκκινο και της μέγιστης ανακλαστικότητας στο υπέρυθρο που προκαλείται από την κυτταρική δομή των φύλλων. Χρησιμοποιώντας τον υπερφασματικό δέκτη CASI 550, ο δείκτης αυτός (NDVI(CASI)) περιγράφεται στον Πίνακα 1 (Rouse et al., 1974).

**RDVI** (Renormalized Difference Vegetation Index): Ενδεδειγμένος για την γραμμικοποίηση (linearization) χαρακτηριστικών της βλάστησης με βιοφυσικές παραμέτρους, σε περίπτωση πυκνής βλάστησης και πολυεπίπεδης κομοστέγης. Η ανάγκη προέκυψε από το επίπεδο κορεσμού (χρώματος) το οποίο παρουσιάζει ο NDVI και τη διάθεσή του να αποκλίνει από τις γραμμικές σχέσεις με τις βιοφυσικές παραμέτρους (Roujean and Breon, 1995). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TRDVI** (Transformed Renormalized Difference Vegetation Index): Παραλλαγή του προηγούμενου δείκτη, στην προσπάθεια να γίνει ο δείκτης περισσότερο ευαίσθητος σε περίπτωση κανονικής πυκνότητας βλάστησης (Haboudane et al., 2007). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**MSR** (Modified Simple Ratio): Δείκτης αναλογίας βλάστησης, ευαίσθητος στις μεταβολές της χλωροφύλλης. Για να επηρεάζεται λιγότερο η βλάστηση από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. σύννεφα, έδαφος) έχει χρησιμοποιηθεί ο τροποποιημένος δείκτης αναλογίας βλάστησης, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 1 (Chen, 1996).

**OSAVI** (Optimized Soil-Adjusted Vegetation): Πρόκειται για έναν δείκτη βλάστησης βέλτιστα προσαρμοσμένο στην φασματική συμπεριφορά των υποκείμενων εδαφικών pixels (Rondeaux et al., 1996), Περιγράφεται στον πίνακα 1.

**NDVI(GER 1500)**: Κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης με βάση τις μετρήσεις και τις φασματικές περιοχές από το ραδιόμετρο GER 1500 (χρησιμοποιήθηκε βοηθητικά). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

Ακόμη, δημιουργήθηκαν οι δείκτες χλωροφύλλης (και γενικότερα χρωστικών της βλάστησης) που ακολουθούν και οι οποίοι επίσης επιλέχθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία ως οι πλέον κατάλληλοι για να δοκιμαστούν στην περιοχή μελέτης. Κάποιοι από αυτούς αναφέρονται στη φασματική περιοχή “Red Edge” (περίπου από 680 nm έως 730 nm) η οποία αποτελεί περιοχή ταχείας μεταβολής της ανακλαστικότητας της βλάστησης, όπου η χλωροφύλλη από σχεδόν πλήρη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ορατό μέρος του φάσματος, καταλήγει να ανακλά πολύ έντονα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα των 700 nm.

**MCARI** (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index): Αποτελεί παραλλαγή του δείκτη CAR1 (Kim et al., 1994) ο οποίος αναπτύχθηκε για τη μέτρηση της απορρόφησης του φωτός από τη χλωροφύλλη στο κόκκινο (670 nm) και συγκεκριμένα μετρά το βαθμό απορρόφησης της χλωροφύλλης στα 670 nm (στο κόκκινο) σε σχέση με την απορρόφηση στα 550 nm (στο πράσινο) και με την ανακλαστικότητα στα 700 (ή 705) nm. Η παραλλαγή του MCARI (Daughtry et al., 2000) σχεδιάστηκε για να αποδώσει καλύτερα τη μείωση της μεταβλητότητας της φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας λόγω μη φωτοσυνθετικών υλικών (π.χ. ξυλώδους τμήματος). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.



**TCARI** (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index): Αποτελεί και αυτός παραλλαγή του δείκτη CARI με στόχο να αντισταθμίσει τις διακυμάνσεις στην ανάκλαση της ακτινοβολίας από τις επιδράσεις των κοντινών ρίχει του εδάφους αλλά και των μη φωτοσυνθετικών υλικών και να αυξήσει την ευαισθησία σε χαμηλές τιμές χλωροφύλλης (Haboudane et al., 2002). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**MCARI / OSAVI**: Δείκτης με στόχο να μειωθεί δραστικά η ευαισθησία που εμφανίζεται εξαιτίας της ανάκλασης των υποκείμενων (του φυτού) ρixels του εδάφους (Daughtry et al., 2000). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TCARI / OSAVI**: Ανάλογος δείκτης με τον προηγούμενο, με στόχο να αυξήσει την ευαισθησία σε πολύ χαμηλές τιμές της μεταβολής που εμφανίζεται εξαιτίας της ανάκλασης των υποκείμενων (του φυτού) ρixels του εδάφους (Daughtry et al., 2000). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TVI** (Triangular Vegetation Index): Έχει ως στόχο να χαρακτηρίσει την ακτινοβολούμενη ενέργεια που απορροφάται από τις χρωστικές των φύλλων σε συνδυασμό με το μέγεθος της ανακλαστικότητας στο πράσινο, από την άποψη της σχετικής διαφοράς της ανακλαστικότητας μεταξύ κόκκινου και εγγύς υπέρυθρου (Broge and Leblanc, 2001). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**MCARI-1**: Αποτελεί παραλλαγή του MCARI με σκοπό την διατήρηση της ευαισθησίας της χλωροφύλλης στις επιδράσεις των γειτονικών ρixels του εδάφους (Haboudane et al., 2004). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**MCARI-2**: Αποτελεί και αυτός παραλλαγή του MCARI με σκοπό την ελάττωση των επιδράσεων του εδάφους και της ατμόσφαιρας στη χλωροφύλλη (Haboudane et al., 2004). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TCI** (Triangular Chlorophyll Index): Με ανάλογη ιδέα όπως ο δείκτης TVI και βασικό στόχο ότι η μεταβολή στη συγκέντρωση της χλωροφύλλης προκαλεί μια μετατόπιση στο κόκκινο, η οποία αντικατοπτρίζεται σε αλλαγή στην ανακλαστικότητα στα 702 nm (Haboudane et al., 2007). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TCI-1**: Αποτελεί απλή παραλλαγή του TCI με ακριβώς τον ίδιο στόχο. Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TCI-2**: Αποτελεί παραλλαγή του TCI με στόχο ο δείκτης να είναι ευαίσθητος και σε μεταβολές στο κόκκινο ιδιαίτερα στην περιοχή αμέσως μετά το Red Edge (Haboudane et al., 2007). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**TCI-3**: Αποτελεί παραλλαγή του TCI-1 με στόχο να είναι περισσότερο ευαίσθητος από αυτόν. Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**R750 / R710**: Ο Red Edge αυτός απλός λόγος ανιχνεύει τις χρωστικές της βλάστησης (Zarco-Tejada et al., 2001). Περιγράφεται στον Πίνακα 1.

**VoG-2** : Υπολογίζει τις χλωροφύλλες a και b της κομοστέγης (Zarco-Tejada et al., 2001). Περιγράφεται στον

Πίνακα 1.

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
NDVI (CASI)	$( [Band770:Band780] + [Band784:Band790] ) - ( [Band655:Band665] + [Band676:Band685] ) / ( [Band770:Band780] + [Band784:Band790] ) + ( [Band655:Band665] + [Band676:Band685] )$
RDVI	$(Band802 - Band672) / \sqrt{Band802 + Band672}$
TRDVI	$1.50 * (Band802 - Band672) / \sqrt{(Band802 + Band672) + 0.50}$
MSR	$( [Band802 / Band672] - 1 ) / \sqrt{ [ [Band802 / Band672] + 1 ] }$
OSAVI	$( (1 + 0.16) * (Band802 - Band672) ) / (Band802 + Band672 + 0.16)$
NDVI (GER 1500)	$( [Band770:Band780] + [Band784:Band790] ) - ( [Band655:Band665] + [Band676:Band685] ) / ( [Band770:Band780] + [Band784:Band790] ) + ( [Band655:Band665] + [Band676:Band685] )$
ΔΕΙΚΤΕΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
MCARI	$( [Band702 - Band672] - 0.2 * (Band702 - Band551) ) * (Band702 / Band672)$
TCARI	$3 * [ ( [Band702 - Band672] - 0.2 * (Band702 - Band551) ) * (Band702 / Band672) ]$
[TCARI / OSAVI]	$3 * [ ( [Band702 - Band672] - 0.2 * (Band702 - Band551) ) * (Band702 / Band672) ] / ( ( (1 + 0.16) * (Band802 - Band672) ) / (Band802 + Band672 + 0.16) )$
[MCARI / OSAVI]	$( [Band702 - Band672] - 0.2 * (Band702 - Band551) ) * (Band702 / Band672) / ( ( (1 + 0.16) * (Band802 - Band672) ) / (Band802 + Band672 + 0.16) )$
TVI	$0.50 * [ 120 * (Band748 - Band551) - 200 * (Band672 - Band551) ]$
MCARI-1	$1.20 * [ 2.50 * (Band802 - Band672) - 1.30 * (Band802 - Band551) ]$
MCARI-2	$1.50 * [ 2.50 * (Band802 - Band672) - 1.30 * (Band802 - Band551) ] / \sqrt{ (2 * Band802 + 1)^2 - (6 * Band802 - 5 * \sqrt{Band672}) - 0.50 }$
TCI	$[ 1.20 * (Band702 - Band551) - 1.50 * (Band672 - Band551) ] * \sqrt{Band702 / Band552}$
TCI-1	$[ 1.20 * (Band702 - Band551) - 1.50 * (Band672 - Band551) ] * \sqrt{Band702 / Band552}$
TCI-2	$[ 1.20 * (Band702 - Band551) - 1.50 * (Band672 - Band551) ] * (Band802 + Band672 + 0.50) / \sqrt{Band702}$
TCI-3	$[ 1.20 * (Band702 - Band551) - 1.50 * (Band672 - Band551) ] * (Band702 / Band552)$
ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΟ RED EDGE	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
R750/R710	Band748 / Band710
VOG-2	$(Band733 - Band748) / (Band717 + Band725)$

Πίνακας 1



**Εικόνα 6.** Ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI, όπου με διαβαθμίσεις του κόκκινου χρώματος διακρίνεται η βλάστηση (με έντονο κόκκινο η πυκνή, υγιής βλάστηση) ενώ τα εδάφη, χωρίς ή με αραιή βλάστηση, εμφανίζονται από λευκά (άμμος) έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.

#### 4.3 Προεπεξεργασία των δεδομένων

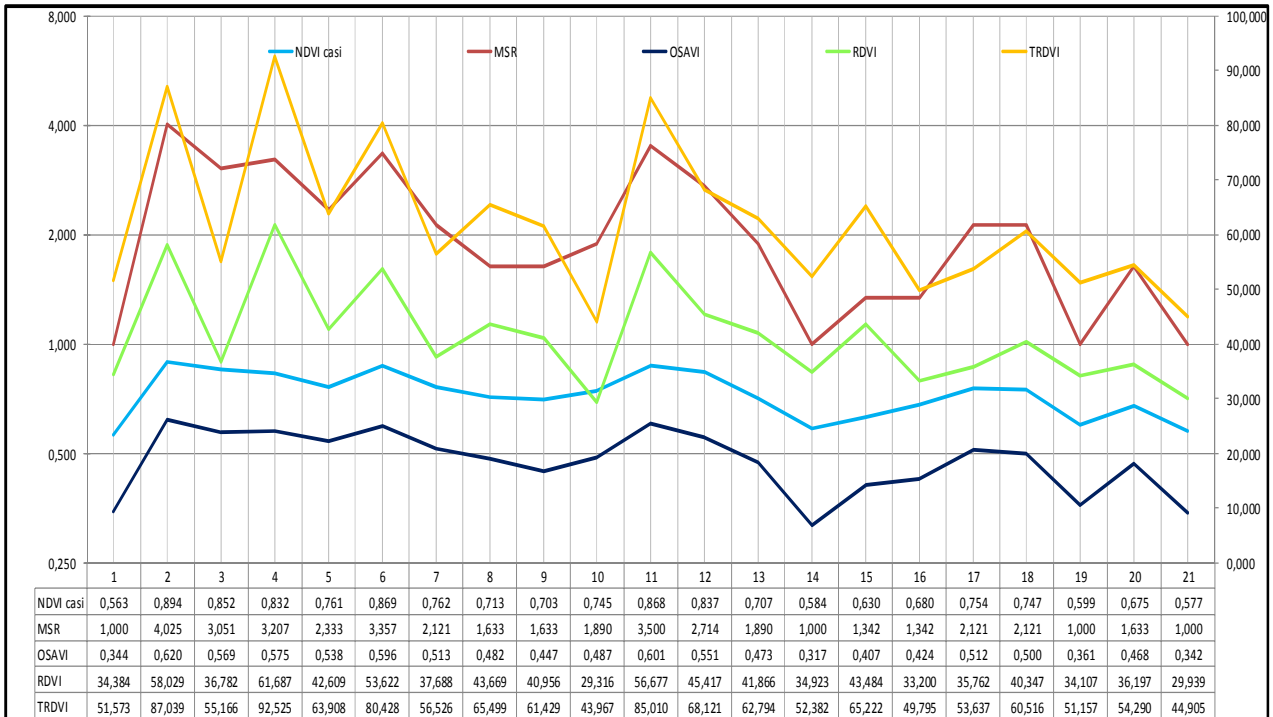
Η εικόνα αναφοράς του CASI, για την περιοχή μελέτης, έχει γεωμετρική διακριτική δυνατότητα 2m και διαθέτει 71 φασματικά κανάλια τα οποία καλύπτουν την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 421.8 nm έως 967.7 nm, με βήμα περίπου 7 nm. Έγινε ατμοσφαιρική διόρθωση με το λογισμικό ATCOR3 και γεωμετρική διόρθωση στο Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS 84 / UTMzone 34N και στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια μάσκα με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI ώστε να απομακρυνθούν περιοχές μη βλάστησης (όπως δρόμοι και σπίτια).

#### 4.4 Εφαρμογή των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης στα σημεία επίγειου ελέγχου

Η εφαρμογή των δεικτών του Πίνακα 1 στα υπερφασματικά δεδομένα του CASI για τα σημεία στα οποία έγιναν μετρήσεις με το φασματοραδιόμετρο GER έδωσε τα αποτελέσματα που ακολουθούν στους Πίνακες 2 και 3.

GER_ID	Map X	Map Y	X <sub>ΕΙΚΟΝΑΣ</sub>	Y <sub>ΕΙΚΟΝΑΣ</sub>	NDVI casi	RDVI	TRDMI	MSR	OSAVI
1	712540,00	4478700,00	3071	2751	0,563	34,384	51,573	1,000	0,344
2	712498,00	4478684,00	3050	2759	0,894	58,029	87,039	4,025	0,620
3	712514,00	4478666,00	3058	2768	0,852	36,782	55,166	3,051	0,569
4	712248,00	4478104,00	2925	3049	0,832	61,687	92,525	3,207	0,575
5	712252,00	4478084,00	2927	3059	0,761	42,609	63,908	2,333	0,538
6	711854,00	4476442,00	2728	3880	0,869	53,622	80,428	3,357	0,596
7	712092,00	4476024,00	2847	4089	0,762	37,688	56,526	2,121	0,513
8	712106,00	4476024,00	2854	4089	0,713	43,669	65,499	1,633	0,482
9	712308,00	4475956,00	2955	4123	0,703	40,956	61,429	1,633	0,447
10	712336,00	4475920,00	2969	4141	0,745	29,316	43,967	1,890	0,487
11	712366,00	4475864,00	2984	4169	0,868	56,677	85,010	3,500	0,601
12	712494,00	4475832,00	3048	4185	0,837	45,417	68,121	2,714	0,551
13	712566,00	4475812,00	3084	4195	0,707	41,866	62,794	1,890	0,473
14	712892,00	4475714,00	3247	4244	0,584	34,923	52,382	1,000	0,317
15	712896,00	4475672,00	3249	4265	0,630	43,484	65,222	1,342	0,407
16	712588,00	4474538,00	3095	4832	0,680	33,200	49,795	1,342	0,424
17	712574,00	4474520,00	3088	4841	0,754	35,762	53,637	2,121	0,512
18	712576,00	4474464,00	3089	4869	0,747	40,347	60,516	2,121	0,500
19	712556,00	4474312,00	3079	4945	0,599	34,107	51,157	1,000	0,361
20	712566,00	4474298,00	3084	4952	0,675	36,197	54,290	1,633	0,468
21	712558,00	4473504,00	3080	5349	0,577	29,939	44,905	1,000	0,342

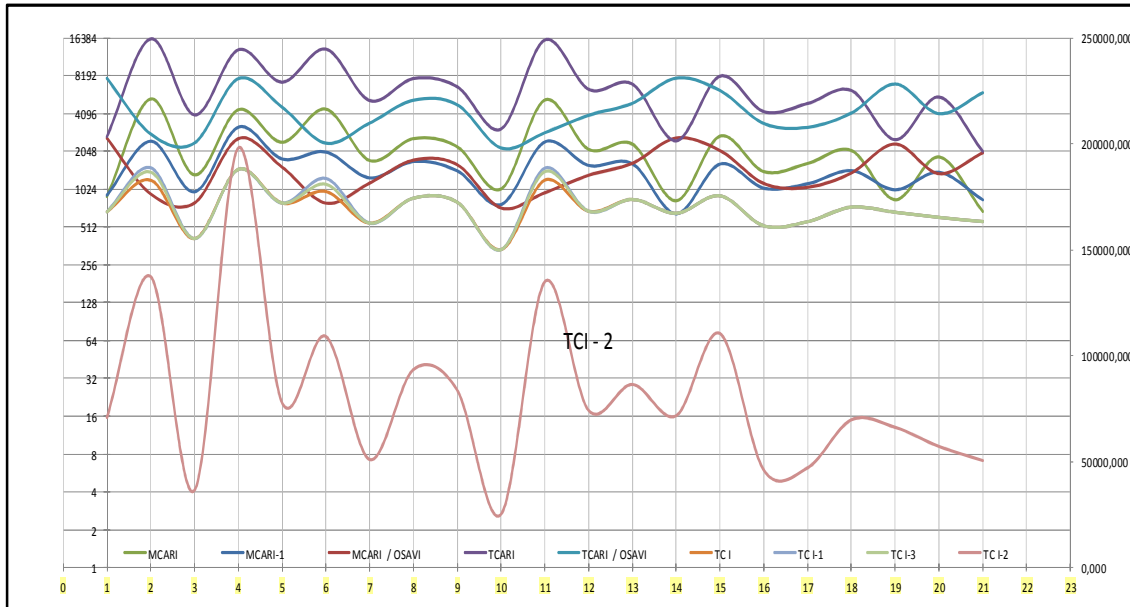
**Πίνακας 2.** Τα 21 σημεία επίγειου ελέγχου, τα οποία μετρήθηκαν με το ραδιόμετρο GER 1500 και οι τιμές των δεικτών βλάστησης.



Γράφημα των δεικτών βλάστησης NDVI, MSR, OSAVI, RDVI και TRDVI για τα 21 σημεία επιγείου ελέγχου. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι ο δείκτης TRDVI παρουσιάζει τις εντονότερες διαφορές.

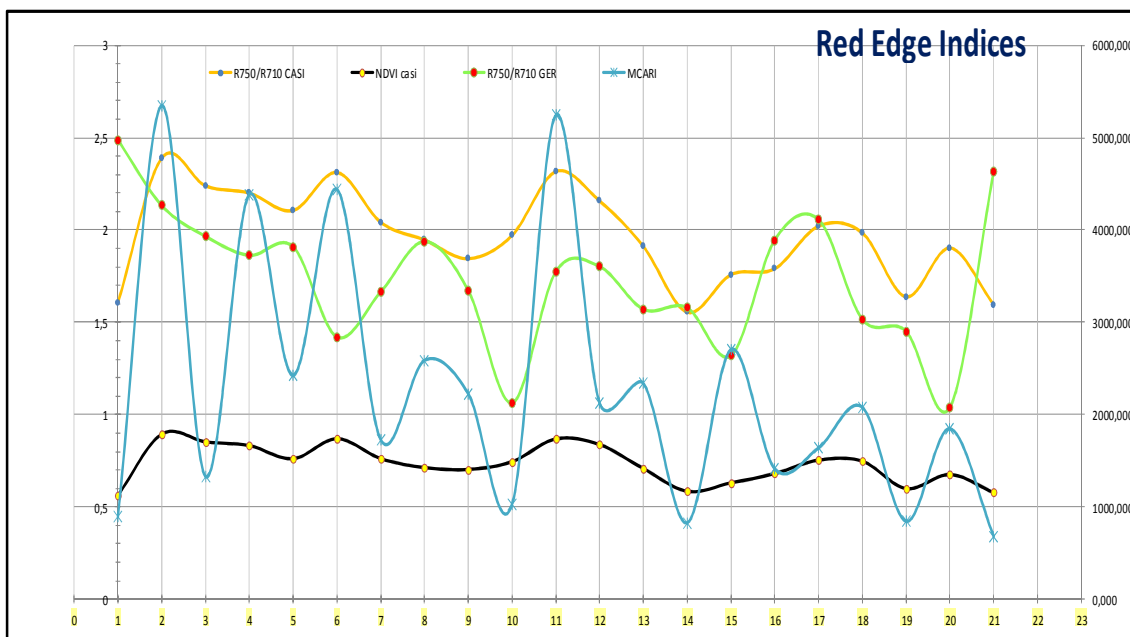
GER_ID	MCARI	MCARI-1	MCARI / OSAVI	TCARI	TCARI / OSAVI	TC-1	TC-1-1	TC-1-2	TC-1-3	R750/R710 CASI	R750/R710 GER	Δ2	Vog2 (GER)	Vog2 (CASI)
1	895,200	915,360	2602,224	2685,600	7806,673	676,500	676,500	70826,719	676,500	1,605	2,488	0,778	-0,110	-0,09051
2	5346,600	2462,760	936,587	16039,799	2809,761	1207,648	1516,320	137294,688	1399,200	2,389	2,132	0,066	-0,066	-0,19763
3	1329,600	975,840	795,098	3988,800	2385,293	414,300	414,300	36485,508	414,300	2,239	1,965	0,075	-0,068	-0,19417
4	4382,000	3184,200	2582,952	13146,000	7748,857	1470,600	1470,600	198013,313	1470,600	2,200	1,862	0,114	-0,060	-0,15242
5	2422,000	1780,200	1533,375	7266,000	4600,124	794,100	794,100	77904,664	794,100	2,105	1,909	0,039	-0,057	-0,15413
6	4440,000	2020,800	792,497	13320,000	2377,490	980,490	1246,912	109064,273	1120,200	2,311	1,421	0,794	-0,041	-0,19333
7	1729,600	1259,040	1143,735	5188,800	3431,204	549,600	549,600	50996,457	549,600	2,042	1,664	0,143	-0,043	-0,15583
8	2586,800	1698,120	1739,982	7760,400	5219,947	868,500	868,500	93459,438	868,500	1,946	1,937	0,000	-0,061	-0,13626
9	2226,800	1431,720	1600,524	6680,400	4801,572	806,400	806,400	83652,609	806,400	1,844	1,672	0,030	-0,051	-0,11603
10	1027,600	772,440	725,508	3082,800	2176,523	338,400	338,400	25132,221	338,400	1,971	1,063	0,824	-0,013	-0,14802
11	5244,000	2431,200	958,247	15732,000	2874,741	1207,346	1503,592	134839,313	1411,200	2,316	1,774	0,294	-0,051	-0,18574
12	2125,200	1582,680	1320,747	6375,600	3962,240	684,000	684,000	74233,523	684,000	2,157	1,802	0,126	-0,058	-0,16759
13	2336,800	1630,320	1646,040	7010,400	4938,121	847,800	847,800	86441,836	847,800	1,910	1,570	0,115	-0,041	-0,12425
14	827,600	652,080	2608,990	2482,800	7826,970	659,100	659,100	71715,805	659,100	1,554	1,579	0,001	-0,037	-0,09082
15	2703,600	1620,840	2076,274	8110,800	6228,821	906,900	906,900	110474,305	906,900	1,757	1,319	0,192	-0,036	-0,11724
16	1413,200	1042,680	1136,409	4239,600	3409,227	523,200	523,200	46052,992	523,200	1,790	1,945	0,024	-0,075	-0,11166
17	1639,200	1127,280	1059,738	4917,600	3179,215	564,000	564,000	47055,531	564,000	2,020	2,056	0,001	-0,075	-0,13921
18	2078,000	1437,000	1377,435	6234,000	4132,307	736,200	736,200	69726,844	736,200	1,984	1,516	0,219	-0,052	-0,1317
19	844,200	1011,960	2341,339	2532,600	7024,017	671,100	671,100	66212,477	671,100	1,637	1,451	0,035	-0,036	-0,08958
20	1846,400	1392,960	1359,382	5539,200	4078,147	610,800	610,800	57188,770	610,800	1,902	1,040	0,744	-0,008	-0,12724
21	682,200	842,760	1995,114	2046,600	5985,342	565,200	565,200	50528,059	565,200	1,596	2,314	0,516	-0,098	-0,0836

Πίνακας 3. Τα 21 σημεία επίγειου ελέγχου, τα οποία μετρήθηκαν με το ραδιόμετρο GER 1500 και οι τιμές των δεικτών χλωροφύλλης και Red Edge.



Γράφημα των **δεικτών χλωροφύλλης** MCARI, MCARI-1, MCARI/OSAVI, TCARI, TCARI/OSAVI, TCI, TCI-1, TCI-2 και TCI-3 για τα 21 σημεία επιγείου ελέγχου. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι ο δείκτης **TCI-2** παρουσιάζει τις εντονότερες διαφορές.

Επίσης, ο δείκτης Red Edge (R750/710) εφαρμόστηκε τόσο στα δεδομένα GER όσο και στα δεδομένα CASI. Από το επόμενο διάγραμμα έγινε αντιληπτή η εύλογη ασυμφωνία των δύο συνόλων δεδομένων, ιδιαίτερα για κάποιες επίγειες μετρήσεις, αφού οι ανακλαστικότητατες CASI αφορούν στην κομοστέγη, ενώ οι μετρήσεις GER για πολλά σημεία επιγείου ελέγχου αφορούν σε σωρεία κομμένων κλαδιών για ένα συγκεκριμένο είδος στην περιοχή της μέτρησης.



Γράφημα των δεικτών Red Edge (R750/710) για CASI και GER 1500 δεδομένα και των δεικτών βλάστησης NDVI και MCARI, για τα 21 σημεία επιγείου ελέγχου.



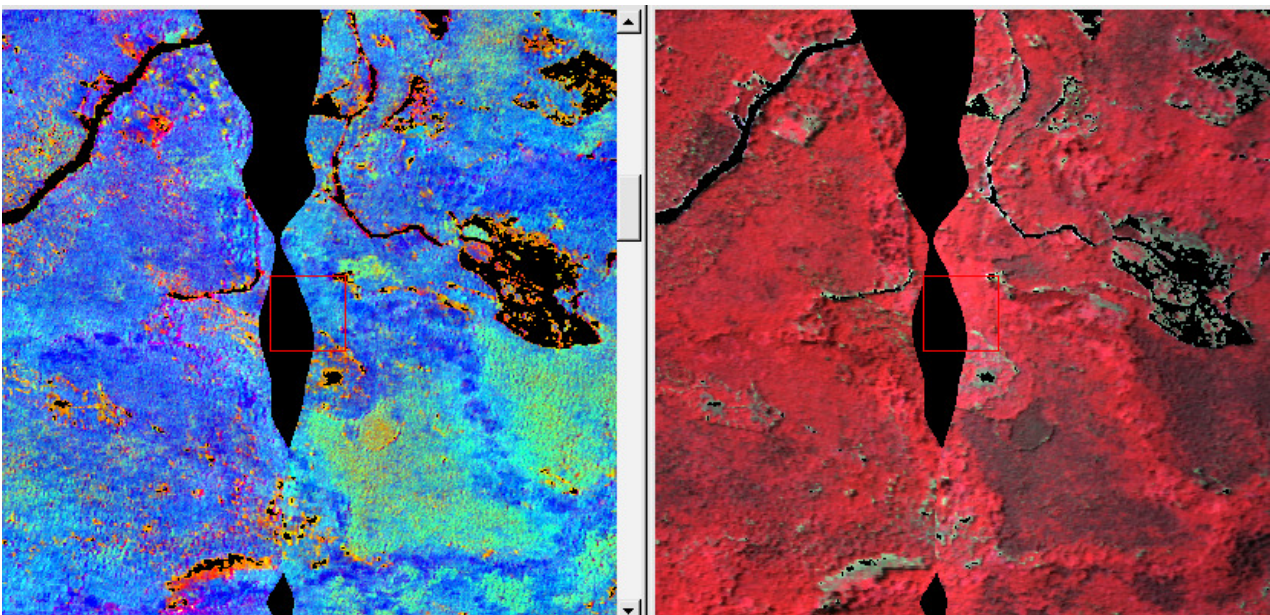
## 5. Αποτελέσματα

### 5.1 Δείκτες που προτείνονται στο λογισμικό ENVI

Από τους δείκτες που προτείνονται στο λογισμικό ENVI, οι **NDVI**, **Red Edge Normalized Difference Vegetation Index** (παραλλαγή του NDVI στο Red Edge), **Photochemical Reflectance Index** (είναι πολύ ευαίσθητος σε μεταβολές καροτενοειδών (ιδιαίτερα της ξανθοφύλλης) σε υγιές φύλλωμα) και **Red Green Ratio** (είναι ευαίσθητος στις μεταβολές της ανθοκυανίνης σε σχέση με τη χλωροφύλλη) αξιολογήθηκαν ως οι βέλτιστοι για την φωτοερμηνεία των μεταβολών των παραμέτρων της βλάστησης.

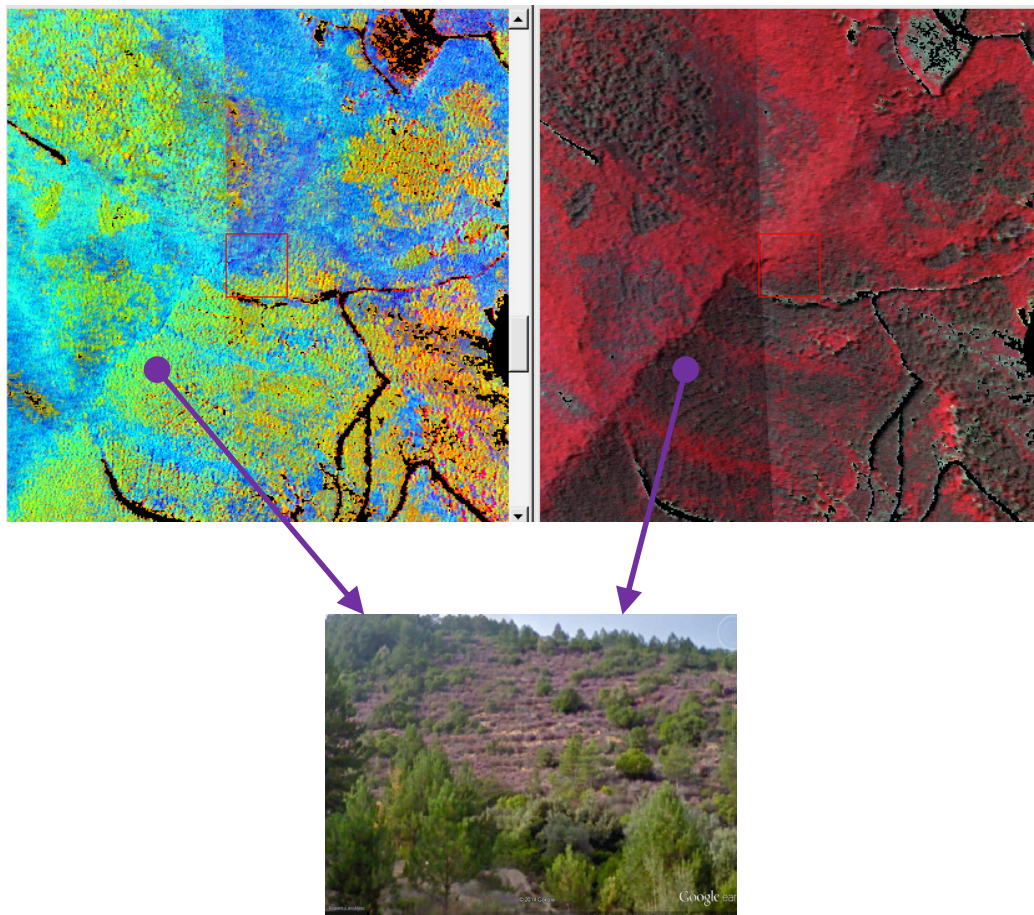
Δημιουργήθηκαν ψευδοέγχρωμα σύνθετα με τους δείκτες αυτούς και με τα υπερφασματικά δεδομένα του CASI. Ψευδοέγχρωμο σύνθετο αναφορά, για την φωτοερμηνεία της περιοχής, αποτέλεσε το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green αντίστοιχα του CASI όπου με διαβαθμίσεις του κόκκινου χρώματος διακρίνεται η βλάστηση (με έντονο κόκκινο η πυκνή, υγιής βλάστηση) ενώ τα εδάφη χωρίς ή με αραιή βλάστηση εμφανίζονται από λευκά (άμμος) έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.

Επίσης δημιουργήθηκε και φωτοερμηνεύτηκε το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης του λογισμικού ENVI: Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε).



**Εικόνα 7.** (Αριστερά) Ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης που υπολογίζονται στο λογισμικό ENVI: Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε). Με σκούρο μπλε εμφανίζεται πυκνή, μη γηρασμένη βλάστηση, με ανοιχτό πράσινο εμφανίζεται η χαμηλή, πώδης βλάστηση, με κόκκινο έχουμε πλήρη απουσία φωτοσύνθεσης, επομένως και βλάστησης. Στα (δεξιά) έχουμε το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI.

Το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο) και Photochemical Reflectance Index (στο μπλε) είναι ικανοποιητικά ενδεικτικό για τα καρτενοειδή (είναι κίτρινες, πορτοκαλί και κόκκινες χρωστικές) που βρίσκονται σε όλα τα φωτοσυνθετικά κύτταρα, όμως το χρώμα τους καλύπτεται από αυτό της χλωροφύλλης. Το φθινόπωρο, όταν η χλωροφύλλη αποσυντίθεται, γίνεται ορατό το χρώμα τους. Με σκούρο μπλε εμφανίζεται βλάστηση με πλούσια φωτοσυνθετική ικανότητα. Στην περιοχή που απεικονίζεται στην Εικόνα 8 αντιπαρατίθεται και επίγεια φωτογραφία, όπου διακρίνονται οι χαρακτηριστικού χρώματος θάμνοι της περιοχής.



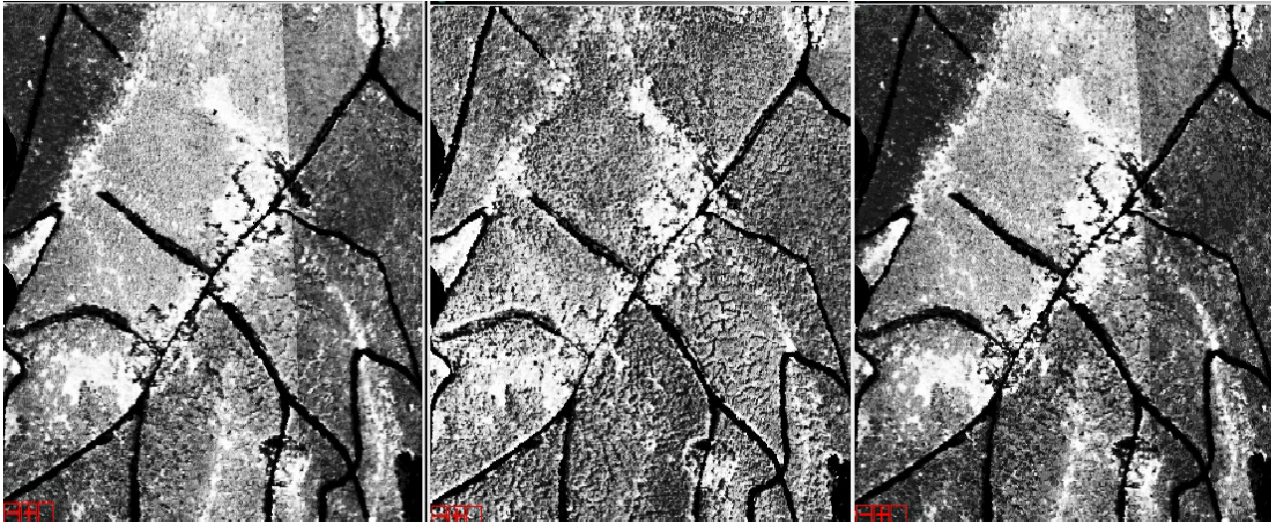
**Εικόνα 8.** (Αριστερά και δεξιά) το ίδιο ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB με την Εικόνα 7. Η περιοχή είναι αυτή που εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.

## 5.2 Δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία

Εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν οι δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης που αναφέρονται στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βέλτιστοι. Σε μερικούς, έγινε εφαρμογή της τεχνικής “density slicing” (τεμαχιοποίηση ή διαστρωμάτωση της πυκνότητας). Με τον τρόπο αυτό οι πληροφορίες του κάθε δείκτη, όπως απεικονίζονται ως grayscale εικόνα, μπορούν να αναλυθούν και να ερμηνευθούν πιο εύκολα, επειδή οι διαφορές μεταξύ των χρωμάτων είναι ενδεικτικότερες από τις διαβαθμίσεις του γκρι (στις grayscale εικόνες).

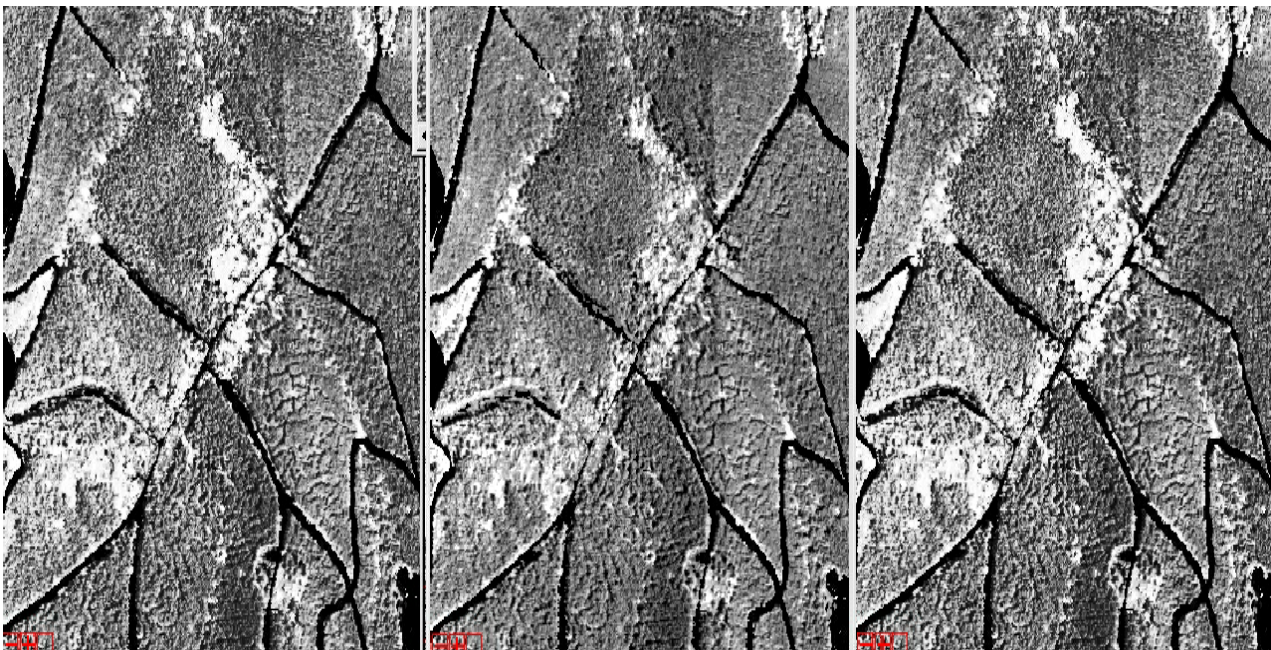


Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται οι δείκτες βλάστησης NDVI, TRDVI και MSR, οι οποίοι έδειξαν (με φωτοερμηνεία) ότι διαβαθμίζουν καλύτερα τη βλάστηση στην περιοχή μελέτης. Είναι εμφανής η ικανότητα μείωσης των επιπτώσεων των εξωτερικών παραμέτρων (γεωμετρία λήψης, φωτισμός, κλπ.) του δείκτη TRDVI (Transformed Renormalized Difference Vegetation Index).



**Εικόνα 9.** Δείκτες βλάστησης. (Αριστερά) απεικονίζεται ο δείκτης βλάστησης NDVI, στο (κέντρο) ο δείκτης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης MSR. Είναι εμφανής η καλύτερη φασματική απόκριση και ευαισθησία του δείκτη TRDVI (Transformed Renormalized Difference Vegetation Index).

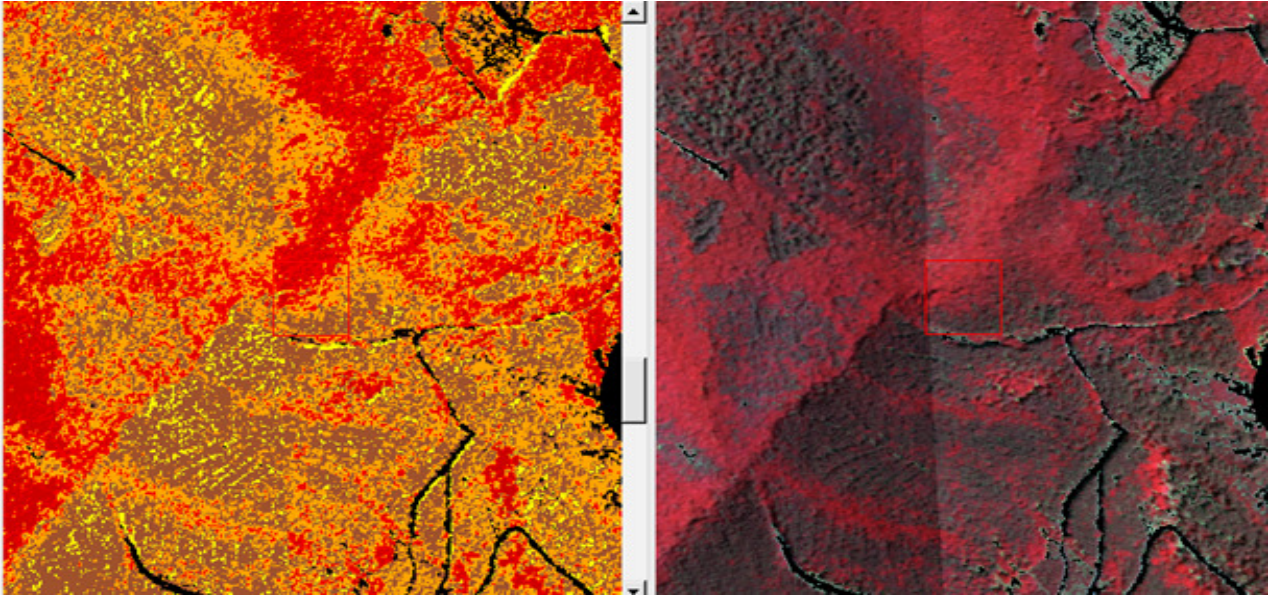
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις καλύτεροι δείκτες χλωροφύλλης: ο MCARI, ο TCI-2 και ο MSR. Ο δείκτης TCI-2 εμφανίζει το μικρότερο κορεσμό ως προς τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης.



**Εικόνα 10.** Δείκτες χλωροφύλλης. (Αριστερά) απεικονίζεται ο δείκτης χλωροφύλλης MCARI, στο (κέντρο) ο δείκτης TCI-2 και (δεξιά) ο δείκτης MSR. Ο δείκτης TCI-2 είναι ο πλέον ευαίσθητος στις μεταβολές των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης.

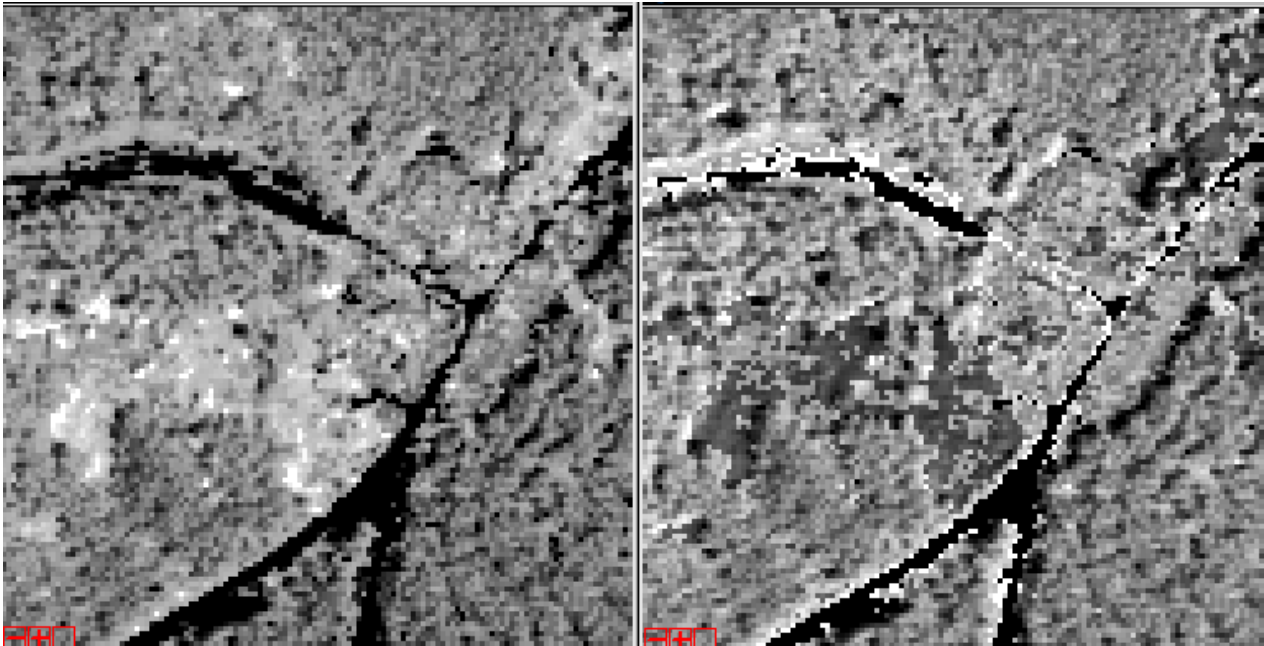


Στην Εικόνα 11 εμφανίζεται ο δείκτης TCI-2, ο οποίος παρουσίασε τα βέλτιστα αποτελέσματα σε σύγκριση με το έγχρωμο σύνθετο αναφοράς. Στα αποτελέσματα του δείκτη TCI-2 έχει γίνει διαστρωμάτωση σε πέντε κατηγορίες (η παλέτα είναι σε αναλογία με το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI). Το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές που φωτοσυνθέτουν έντονα, ανάλογα το κόκκινο, το πορτοκαλί περιοχές μέτριας φωτοσύνθεσης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας.



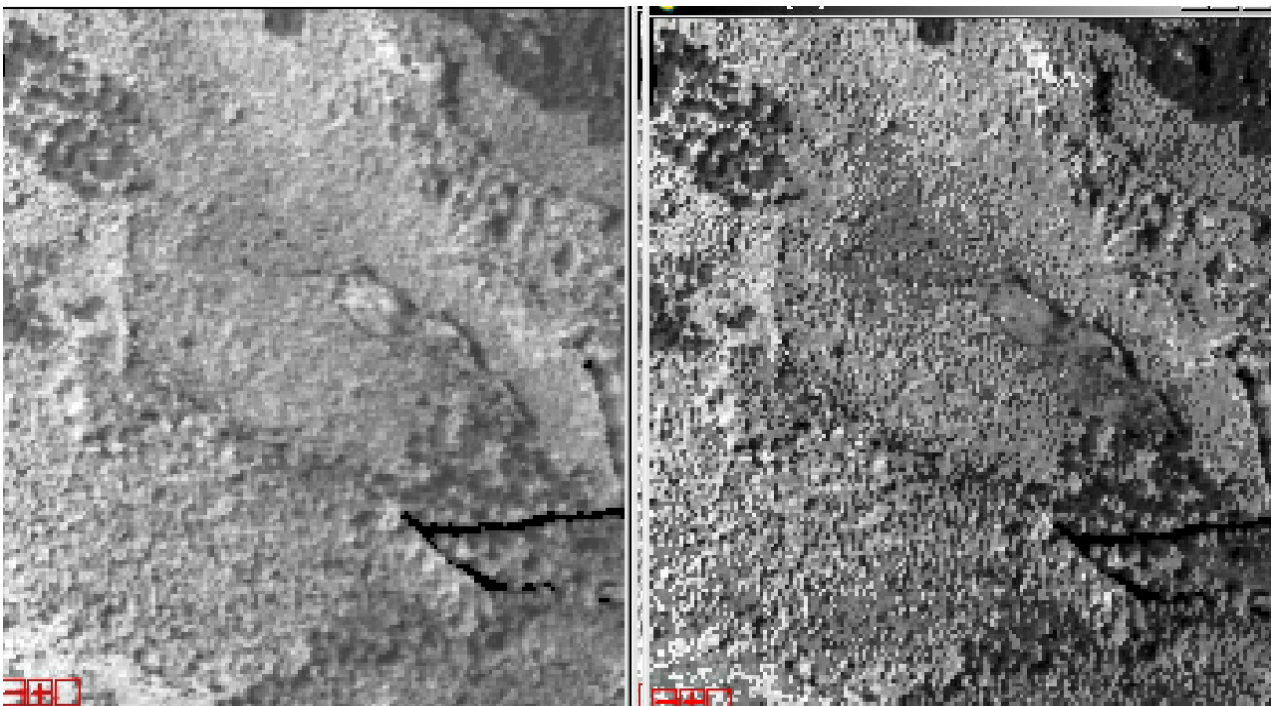
**Εικόνα 11.** Στα (αριστερά), έχουμε μια εικόνα *density slicing* του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (η παλέτα είναι σε αναλογία με το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI). Το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές που φωτοσυνθέτουν έντονα, ανάλογα το κόκκινο, το πορτοκαλί περιοχές μέτριας φωτοσύνθεσης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας. Στα (δεξιά) έχουμε το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI.

Επίσης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του δείκτη **χλωροφύλλης TCARI** με τον δείκτη χλωροφύλλης TCARI / OSAVI. Ο **TCARI** εμφανίζεται περισσότερο ευαίσθητος στην ύπαρξη συγκεντρώσεων χλωροφύλλης και με μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στις τιμές φωτεινότητας σε σχέση με τον **TCARI / OSAVI**, ο οποίος ανιχνεύει και διαχωρίζει ικανοποιητικά pixels αραιής σχετικά βλάστησης τα οποία επηρεάζονται από το έδαφος. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 12.



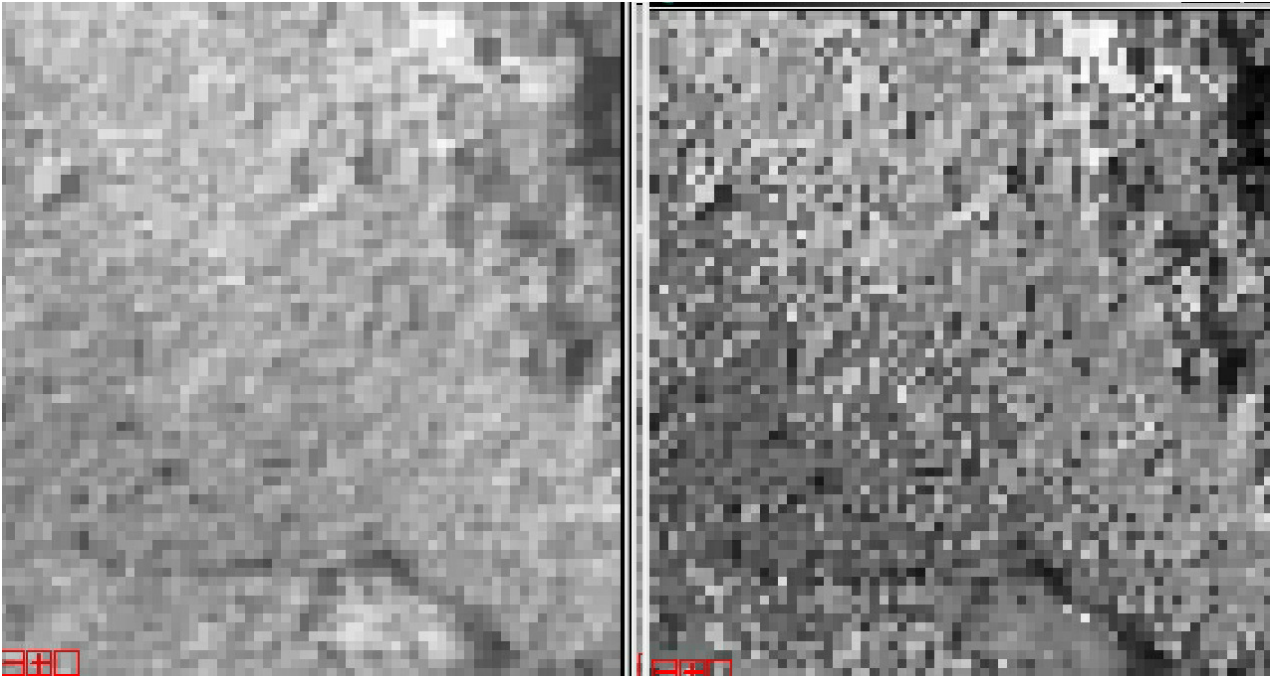
**Εικόνα 12.** (Αριστερά) απεικονίζεται ο δείκτης χλωροφύλλης TCARI και (δεξιά) ο δείκτης TCARI / OSAVI. Ο τελευταίος αποδεικνύεται αποτελεσματικός εκτιμητής της χλωροφύλλης σε περιπτώσεις ανάμιξης εδάφους – βλάστησης.

Στην Εικόνα 13 γίνεται σύγκριση των δύο βέλτιστων δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης. Δηλαδή του TCI-2 με τον TRDVI. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ομοιότητες διαβάθμισης και γι' αυτό στην Εικόνα 14 εμφανίζεται μεγένθυση της Εικόνας 13.



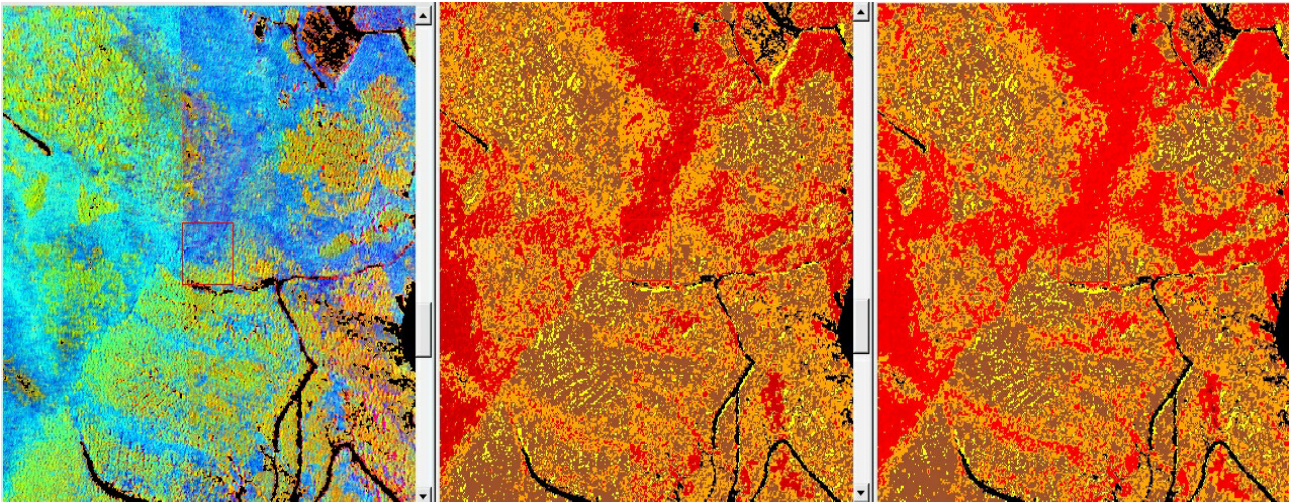
**Εικόνα 13.** Η οπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων των TRDVI (αριστερά) και TCI-2 (δεξιά) δείχνει μεγάλη ομοιότητα.





**Εικόνα 14.** Μεγέθυνση των αποτελεσμάτων των TRDVI (αριστερά) και TCI-2 (δεξιά).

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται οι ίδιοι δείκτες ύστερα από διαστρωμάτωση των αποτελεσμάτων τους. Τα αποτελέσματα του δείκτη TCI-2, παρουσιάζουν πέντε κατηγορίες (η παλέτα είναι σε αναλογία με το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI). Το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές που φωτοσυνθέτουν έντονα, ανάλογα το κόκκινο, το πορτοκαλί περιοχές μέτριας φωτοσύνθεσης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας. Η ίδια διαστρωμάτωση έχει γίνει και στα αποτελέσματα του δείκτη βλάστησης TRDVI. Η οπτική σύγκριση των θεματικών κατηγοριών που προκύπτουν από τους TCI-2 και TRDVI δείχνει μεγάλη ομοιότητα. Για λόγους σύγκρισης εμφανίζεται και το έγχρωμο σύνθετο το οποίο προέκυψε από τον συνδυασμό των βέλτιστων δεικτών για την περιοχή μελέτης του λογισμικού ENVI.

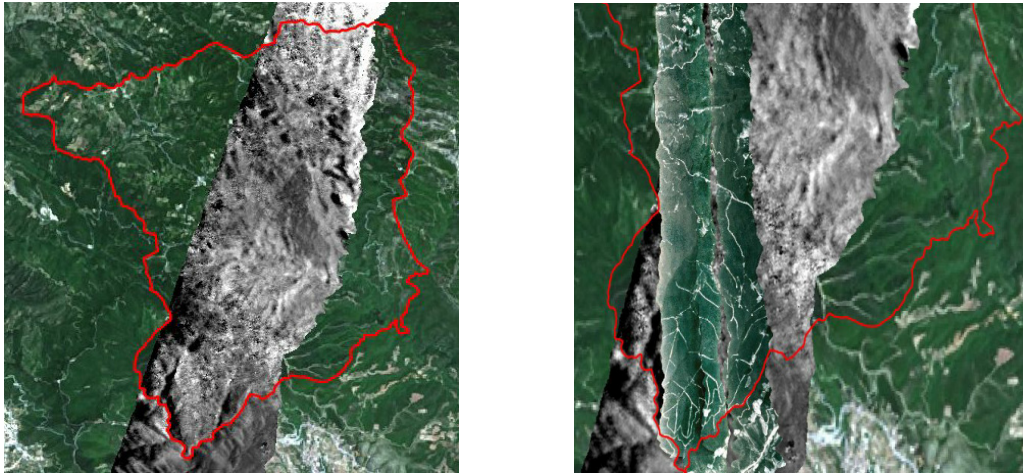


**Εικόνα 15.** Στα (αριστερά), ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης που υπολογίζονται στο λογισμικό ENVI: Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε). Με σκούρο μπλε εμφανίζεται πυκνή, μη γηρασμένη βλάστηση, με ανοιχτό πράσινο εμφανίζεται η χαμηλή, παύδης βλάστηση, με κόκκινο έχουμε πλήρη απουσία φωτοσύνθεσης, επομένως και βλάστησης. **Στο κέντρο** μια εικόνα density slicing του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (η παλέτα είναι σε αναλογία με το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI). Το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές που φωτοσυνθέτουν έντονα, ανάλογα το κόκκινο, το πορτοκαλί περιοχές μέτριας φωτοσύνθεσης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας. Στα (δεξιά) έχουμε μια εικόνα density slicing του δείκτη βλάστησης TRDVI, σε πέντε χρωματικές κατηγορίες (η παλέτα είναι σε πλήρη αναλογία με την εικόνα Density Slicing του δείκτη TCI-2). Η οπτική σύγκριση των θεματικών κατηγοριών που προκύπτουν από τους TCI-2 και TRDVI δείκτες δείχνει μεγάλη ομοιότητα.

### 5.3 Αξιολόγηση με χρήση του χάρτη δασικού ύψους

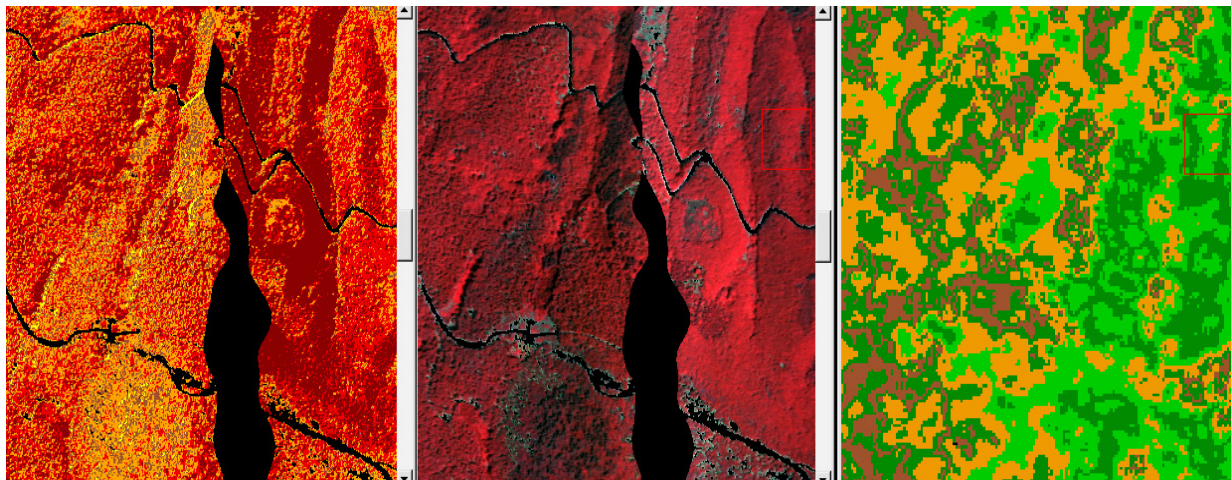
Για την αξιολόγηση της χαρτογράφησης της πυκνότητας της βλάστησης χρησιμοποιήθηκε χάρτης εκτίμησης του δασικού ύψους της περιοχής, με χρήση συμβολομετρίας διπλής ανάκλασης. Η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία ως μια τεχνική υπολογισμού και εκτίμησης των δασικών παραμέτρων. Στην περιοχή του δάσους του Ταξιάρχη χρησιμοποιήθηκε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR (από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR) δυο διαφορετικών συχνοτήτων (μπάντα L και X) για την εκτίμηση του δασικού ύψους και παρήχθη χάρτης εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης (Εικόνα 16) από την αφαίρεσή τους, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως αξιολογητής, με την υπόθεση ότι **όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της δασικής κομοστέγης, τόσο πυκνότερη είναι η βλάστηση στο σημείο αυτό**. Για την συσχέτιση έγινε αναδόμηση της εικόνας του χάρτη εκτίμησης σε 2 m (από 5 m), όπου είναι η χωρική ακρίβεια των εικόνων του CASI. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, κρίθηκαν ικανοποιητικά για την περιοχή μελέτης.





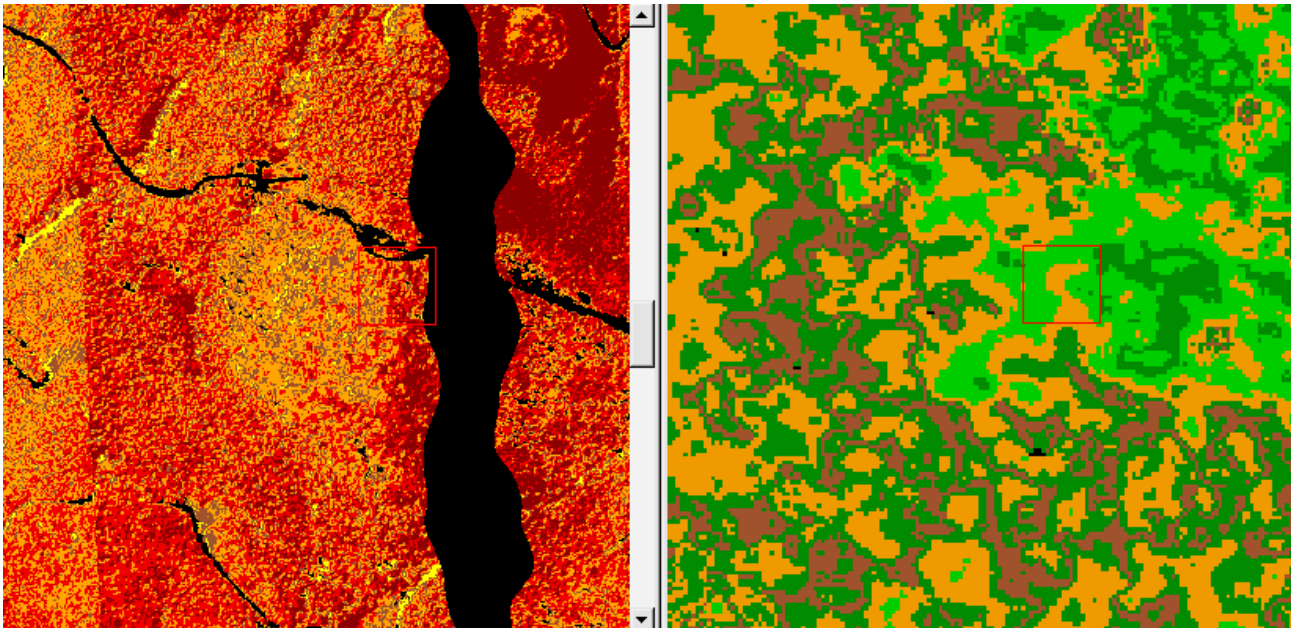
**Εικόνα 16.** (Αριστερά) απεικονίζεται με γκρι ο χάρτης εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, με το περίγραμμα του δάσους του Ταξιάρχη (κόκκινη γραμμή) και υπόβαθρο το έγχρωμο σύνθετο 321 (RGB) της Landsat 8 της 2/6/2013. Στα (δεξιά) έχει γίνει επίθεση της απεικόνισης CASI. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, έγινε στο κοινό τμήμα των εικόνων.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρούμε ότι υπάρχει καλή συμφωνία στην εκτίμηση του δασικού ύψους, με τα αποτελέσματα του δείκτη TCI-2 και το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI, ενώ πολύ μεγάλη είναι και η συνάφεια που εμφανίζεται στην Εικόνα 17, ανάμεσα στον χάρτη πυκνότητας βλάστησης όπως προέκυψε από τον δείκτη TCI-2 και τον χάρτη εκτίμησης του δασικού ύψους.



**Εικόνα 17.** (Αριστερά) έχουμε μια εικόνα της περιοχής μελέτης density slicing του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (η παλέτα είναι σε αναλογία με το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, του CASI). Το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές πυκνής βλάστησης, που φωτοσυνθέτουν έντονα, ανάλογα το κόκκινο, το πορτοκαλί περιοχές μέτριας πυκνότητας βλάστησης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας. Στο (κέντρο) έχουμε το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB καναλιών VNIR, Red και Green, αντιστοίχως, του CASI, όπου με διαβαθμίσεις του κόκκινου χρώματος διακρίνεται η βλάστηση (με έντονο κόκκινο η πυκνή, υγιής βλάστηση) ενώ τα εδάφη χωρίς ή με αραιή βλάστηση εμφανίζονται από λευκά (άμμος) έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. (Δεξιά) έχουμε μία εικόνα density slicing του χάρτη εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, με παλέτα (σκούρο πράσινο=πολύ υψηλά δέντρα, πράσινο=υψηλά, πορτοκαλί=μέσου ύψους, καφέ=δέντρα χαμηλού ύψους).

Μια άλλη περιοχή παρατήρησης και σύγκρισης του χάρτη πυκνότητας βλάστησης όπως προέκυψε από τον δείκτη TCI-2 με τον χάρτη εκτίμησης του δασικού ύψους παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.



**Εικόνα 18.** (Αριστερά) έχουμε μια εικόνα της περιοχής μελέτης density slicing του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (η παλέτα είναι σε αναλογία με το ψευδοέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green, του CASI). Το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές πυκνής βλάστησης που φωτοσυνθέτουν έντονα, ανάλογα το κόκκινο, το πορτοκαλί περιοχές μέτριας πυκνότητας βλάστησης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας. (Δεξιά) έχουμε μία εικόνα density slicing του χάρτη εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, με παλέτα (σκούρο πράσινο=πολύ υψηλά δέντρα, πράσινο=υψηλά, πορτοκαλί=μέσου ύψους, καφέ=δέντρα χαμηλού ύψους).

## 6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια να εκτιμηθεί και να χαρτογραφηθεί η πυκνότητα βλάστησης και χλωροφύλλης με τη βοήθεια δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης.

Επειδή η ευαισθησία που δείχνουν οι δείκτες στη βλάστηση και ιδιαίτερα στις χρωστικές όπως η χλωροφύλλη παρουσιάζει μικρές (αλλά ουσιαστικές) βελτιστοποιήσεις από δείκτη σε δείκτη, συγκρίθηκαν οι δείκτες του Πίνακα 1 και επιλέχθηκαν οι πλέον ευαίσθητοι για την περιοχή μελέτης.

- Ο δείκτης βλάστησης **TRDVI** έδειξε ότι χαρτογραφεί ικανοποιητικά τη βλάστηση και παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία στις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης, ελαχιστοποιώντας συγχρόνως τις επιδράσεις των εξωτερικών παραμέτρων.
- Ο δείκτης χλωροφύλλης **TCI-2** βρέθηκε περισσότερο ευαίσθητος στη μεταβολή των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης.
- Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα αποτελέσματα παρουσίασε ο δείκτης **TCARI / OSAVI**, ως σταθερός εκτιμητής της βλάστησης σε περιπτώσεις ανάμιξης εδάφους – βλάστησης.



Οι άλλοι δείκτες κατέδειξαν σχετική ευαισθησία ως προς την περιεχόμενη χλωροφύλλη και την πυκνότητα βλάστησης, ενώ κάποιοι (NDVI, MSR) εμφάνισαν γρήγορα φαινόμενα κορεσμού.

## Βιβλιογραφία

- Broge, N.H., Leblanc, E., 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76, 156–172. doi:10.1016/S0034-4257(00)00197-8
- Chen, J.M., 1996. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian journal of remote sensing* 22, 229–242.
- Curran, P.J., Dungan, J.L., Macler, B.A., Plummer, S.E., Peterson, D.L., 1992. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration. *Remote Sensing of Environment* 39, 153–166. doi:10.1016/0034-4257(92)90133-5
- Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., de Colstoun, E.B., McMurtrey III, J.E., 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74, 229–239. doi:10.1016/S0034-4257(00)00113-9
- Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., 1978. Leaf hairs: Effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub. *Oecologia* 37, 183–200. doi:10.1007/BF00344990
- Gates, D.M., 1970. Animal climates (where animals must live). *Environmental Research* 3, 132–144. doi:10.1016/0013-9351(70)90011-3
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C., Weidner, V.R., 1965. Spectral Properties of Plants. *Appl. Opt.* 4, 11–20. doi:10.1364/AO.4.000011
- Gates, W.L., 1976. An Essay on Climate Dynamics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 57, 542–547. doi:10.1175/1520-0477(1976)057<0542:AE0CD>2.0.CO;2
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I.B., 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90, 337–352. doi:10.1016/j.rse.2003.12.013
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Vigneault, P., 2007. Indices-based approach for crop chlorophyll content retrieval from hyperspectral data, in: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*. Presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, pp. 3297–3300. doi:10.1109/IGARSS.2007.4423549
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., Dextraze, L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 81, 416–426. doi:10.1016/S0034-4257(02)00018-4
- Kim, M.S., Daughtry, C.S.T., Chappelle, E.W., McMurtrey, J.E., Walthall, C.L., 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (A<sub>par</sub>), in: *Proceedings of 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. CNES, pp. 299–306.
- Lichtenthaler, H.K., Gitelson, A., Lang, M., 1996. Non-Destructive Determination of Chlorophyll Content of Leaves of a Green and an Aurea Mutant of Tobacco by Reflectance Measurements. *Journal of Plant Physiology* 148, 483–493. doi:10.1016/S0176-1617(96)80283-5



- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., Rakitin, V.Y., 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* 106, 135–141. doi:10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x
- Penuelas, J., Baret, F., Filella, I., 1995. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31, 221–230.
- Perry Jr., C.R., Lautenschlager, L.F., 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 14, 169–182. doi:10.1016/0034-4257(84)90013-0
- Qi, J., Cabot, F., Moran, M.S., Dedieu, G., 1995. Biophysical parameter estimations using multidirectional spectral measurements. *Remote Sensing of Environment* 54, 71–83. doi:10.1016/0034-4257(95)00102-7
- Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55, 95–107. doi:10.1016/0034-4257(95)00186-7
- Roujean, J.-L., Breon, F.-M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 51, 375–384. doi:10.1016/0034-4257(94)00114-3
- Rouse, J., Jr, Deering, D., Schell, J., Harlan, J., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD.
- Vogelmann, J.E., Rock, B.N., Moss, D.M., 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing* 14, 1563–1575. doi:10.1080/01431169308953986
- Vogelmann, T.C., 1993. Plant Tissue Optics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 44, 231–251. doi:10.1146/annurev.pp.44.060193.001311
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Noland, T.L., Mohammed, G.H., Sampson, P.H., 2001. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 1491–1507. doi:10.1109/36.934080