

Χαρτογράφηση Πυκνότητας Βλάστησης με Χρήση Υπερφασματικών Απεικονίσεων

B. Ανδρώνης, Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός, Ε.ΔΙ.Π. - Ε.Μ.Π.
Υποψήφιος Διδάκτωρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης Ε.Μ.Π.
B. Καραθανάση, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται χαρτογράφηση στην πυκνότητα βλάστησης ενός ελληνικού δάσους με την χρήση υπερφασματικών απεικονίσεων από τον αερομεταφερόμενο υπερφασματικό δέκτη CASI 550. Υπολογίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δείκτες βλάστησης και δείκτες χρωστικών, κυρίως χλωροφύλλης, για τη διάκριση της βλάστησης και της πυκνότητάς της και δημιουργήθηκαν κατάλληλα ψευδέγχρωμα σύνθετα RGB για να απεικονίσουν τις μεταβολές της πυκνότητας. Για την αξιολόγηση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης εκτίμησης του δασικού ύψους της περιοχής, ο οποίος δημιουργήθηκε με χρήση συμβολομετρίας διπλής συχνότητας. Κάποιοι δείκτες όπως ο TCI-2 εμφανίστηκαν ιδιαίτερα αξιόπιστοι, άλλοι κατέδειξαν σχετική ευαισθησία ως προς την περιεχόμενη χλωροφύλλη και την πυκνότητα βλάστησης, ενώ κάποιοι εμφάνισαν γρήγορα φαινόμενα κορεσμού.

Εισαγωγή

Εδώ και πολλά χρόνια έχουν διαμορφωθεί συνθήκες για την χαρτογράφηση της βλάστησης αξιοποιώντας τις τηλεπισκοπικές μεθόδους και λαμβάνοντας υπόψιν τις βιοφυσικές μεταβλητές της βλάστησης (John R. Jensen, 1986). Σε πολλές έρευνες χρησιμοποιούνται δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης (Baret, F. and Guyot, G., 1991) οι οποίοι ορίζονται ως αδιάστατα, ραδιομετρικά μεγέθη της σχετικής αφθονίας και της δραστηριότητας της πράσινης βλάστησης, του ποσοστού φυτικής κάλυψης, του περιεχόμενου της βλάστησης σε χλωροφύλλη και της ποσότητας πράσινης βιομάζας. Υπάρχουν αρκετοί δείκτες που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία (Todd et al, 1998) και είναι λειτουργικώς ισοδύναμοι στο περιεχόμενο των πληροφοριών (Perry, C. R. and Lautenschlager L. F., 1984), ενώ ορισμένοι προσφέρουν μοναδικές βιοφυσικές πληροφορίες (Qi et al, 1995). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δείκτες βλάστησης και χρωστικών σε υπερφασματικά (Haboudane et al, 2004) και πολυφασματικά δεδομένα (Hanson et al, 1987) για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης μιας δασικής έκτασης.

Η περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι το πανεπιστημιακό δάσος του Ταξιάρχη – Βραστάμων. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 5800 εκταρίων (ha), δηλαδή 58000 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), 264 ha είναι μερικώς δασοσκεπής έκταση, 1592 ha είναι γεωργικώς 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 748 mm. Από φυτοκοινωνικής άποψης το δάσος ανήκει στη ζώνη Quercetalia (δρύες). Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εμφανίζεται η ένωση Quercetum Confertae, ενώ μικρά τμήματα της ένωσης Querceto Fagetum εμφανίζονται τοπικά καθώς επίσης η ένωση Quercetum Ilicis 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 πολυφασματικής απεικόνισης Landsat 8 της 2/6/2013 (αριστερά), οι λωρίδες λήψης του υπερφασματικού δέκτη CASI 550 στις 25/7/2013 (στο κέντρο) και οριοθετημένο με κόκκινη γραμμή το δάσος του Ταξιάρχη σε υπέρθεση στην μεγένθυση της Landsat 8 και του CASI (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 (τα ορεινά δάση στη χώρα μας δημιουργούν ομοειδείς ομάδες, οι οποίες διαμορφώνονται κατά υψομετρικές ζώνες – τις ζώνες βλάστησης). Αυτές 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 50 περίπου 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.

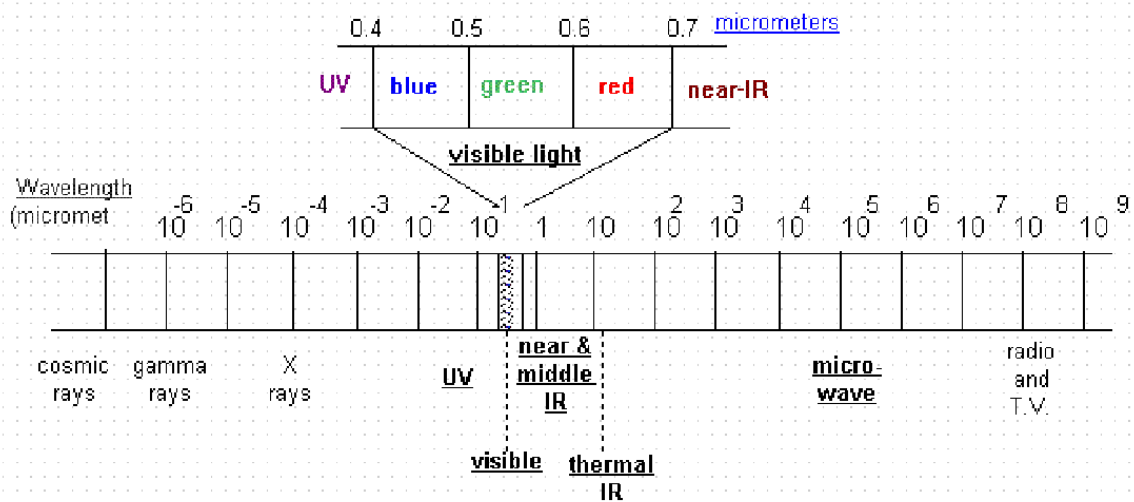
Πρέπει ακόμη να αναφερθούν (για λόγους όπου η χαρτογράφηση θα γίνει ευκολότερα κατανοητή) τα βασικότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης που σχετίζονται με τη μεταβλητή του δασικού ύψους (ύψος της κομοστέγης των δένδρων). Αυτά είναι :

- Το δασικό ύψος, το οποίο εξαρτάται από το δασικό τύπο μια περιοχής. Συγκεκριμένα, η δασική περιοχή του Ταξιάρχη αποτελείται κυρίως από δρύες και οξιές που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 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.

- Η ηλικία των δέντρων, η οποία επηρεάζει το δασικό ύψος. Ο τρόπος διαχείρισης του δάσους είναι πρεμνοφυής. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρόνο υλοτομείται ένα κομμάτι του δάσους, στη συγκεκριμένη περίπτωση 40 ha το χρόνο, με στόχο της ανανέωσής του. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο τρόπο της διαχείρισης θεωρείται ότι κάθε 25 χρόνια το δάσος ανανεώνεται πλήρως. Όμως στο συγκεκριμένο δάσος συναντώνται δέντρα ηλικίας 10 έως 70 ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές ομάδες ηλικιών στη συγκεκριμένη δασική περιοχή ενδιαφέροντος και μια μέση προσέγγιση αύξησης του δασικού ύψους στα 10 χρόνια είναι περίπου 6 μέτρα (Karamvavis K. and Karathanassi V., 2015). Το δασικό ύψος εξετάζεται συνήθως όταν ένα δέντρο έχει ηλικία 40 ετών (ύψος αναφοράς) γιατί τότε θεωρείται ότι οι μεταβολές στο ύψος του είναι πολύ μικρές.
- η ποιότητα του τόπου, είναι ένας ακόμη παράγοντας που σχετίζεται με το δασικό ύψος. Για την περιοχή μελέτης η χειρότερη ποιότητα του τόπου είναι η 5η όπου 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 1η σε ελάχιστα σημεία και η 2η (περίπου 20% της συνολικής περιοχής) με το μέγιστο δασικό ύψος να είναι 27 και 23 μέτρα αντίστοιχα.

Φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης

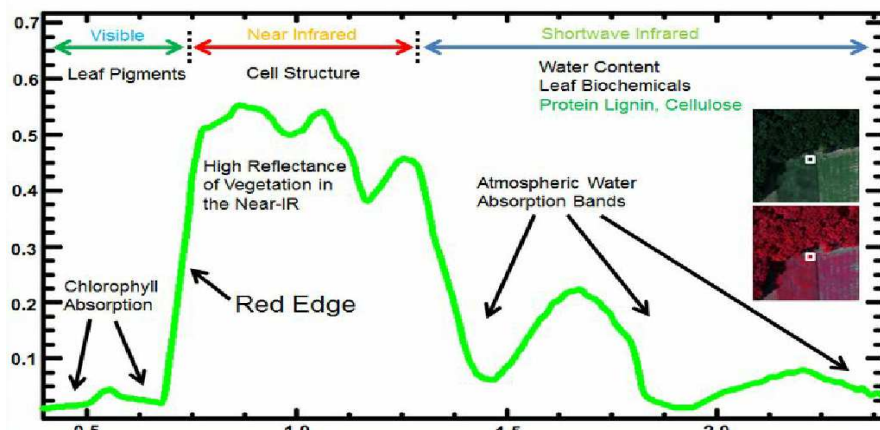
Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα φύλλα των φυτών είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των εφαρμογών της φασματοσκοπίας και της τηλεπισκόπησης στη μελέτη και την ανάλυση της βλάστησης. Οι βιολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες της βλάστησης επιδρούν στο συντελεστή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



Εικόνα 2. Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (HMA)

Το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορούν να διαχωριστούν ποιοτικά σε δύο φασματικές ζώνες προκειμένου να αξιολογήσουμε τις βασικές ιδιότητες των φύλλων: **α)** στη ζώνη 400-750 nm όπου οι χρωστικές της βλάστησης όπως οι χλωροφύλλες a και b, οι καροτίνες a και b και οι ξανθοφύλλες διαμορφώνουν την φασματική υπογραφή του φυτού και **β)** στη ζώνη 750-1350 nm όπου η εσωτερική δομή των φύλλων είναι υπεύθυνη για την υπογραφή. 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 της σχετικά λιγότερης απορρόφησης 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 καρωτενοειδών και η οπτική εμφάνιση ενός φύλλου είναι ανοιχτή πράσινη. Το μπλε και κόκκινο φως απορροφάται και χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση και τις φωτοχημικές αντιδράσεις. Δεδομένου ότι τα φυτά ωριμάζουν, η αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης είναι ανάλογη με άλλες χρωστικές και το φυτό εμφανίζεται από πράσινο έως σκούρο πράσινο. Κατά τη γήρανση, η σύνθεση της χλωροφύλλης παύει, με συνέπεια τη λιγότερη απορρόφηση φωτός στα μπλε και κόκκινα μήκη κύματος (Roy, 1989). Στο γερασμένο φυτό κυριαρχούν άλλες χρωστικές ουσίες (εκτός της χλωροφύλλης), με συνέπεια να εμφανίζεται με ένα κίτρινο έως καφετί χρώμα.

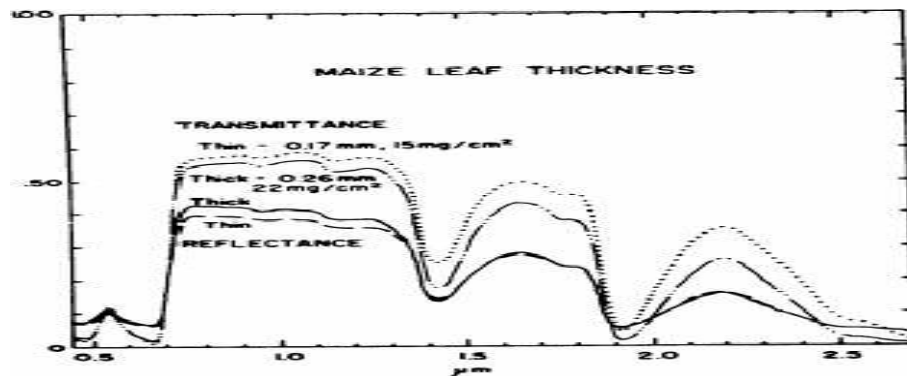


Εικόνα 3. Φασματική υπογραφή της βλάστησης και φασματικά χαρακτηριστικά της στο Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (ΗΜΑ), πηγή : <http://www.harrisgeospatial.com>

Στην φασματική ζώνη από 750 έως 1350 nm, ο συντελεστής ανάκλασης επηρεάζεται κυρίως από την εσωτερική δομή των φύλλων. Σε αυτήν την 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 με την κατάρρευση του κυτταρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Έχει παρατηρηθεί, ότι η έλλειψη ισχυρής ανακλαστικότητα από τα φύλλα στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος μπορεί να αποδοθεί στις χρωστικές ουσίες των φύλλων, που απορροφούν το ορατό φως (Asner, 1998). Το σχήμα 1 δείχνει ότι φύλλα που στερούνται τις συνηθισμένες χρωστικές ουσίες ανακλούν μεγάλο ποσό του ορατού φωτός ακριβώς όπως ανακλούν και στο κοντινό υπέρυθρο. Επιβεβαιώνεται 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. Σε αυτά τα μήκη κύματος το φύλλο έχει μικρό συντελεστή ανάκλασης και σχεδόν καθόλου εκπομπή ακτινοβολίας. Το σχήμα 1 επίσης επιβεβαιώνει ότι ο συντελεστής ανάκλασης ενός φύλλου γενικά δεν είναι εξαρτώμενος (τουλάχιστον έντονα) από το πάχος των φύλλων, μέσα σε συνηθισμένο εύρος πάχους. Η ανακλαστικότητα επηρεάζεται εντονότερα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπου οι χρωστικές ουσίες των φύλλων απορροφούν την ενέργεια.

Έχει αποδειχθεί ότι οι οπτικές ιδιότητες των φύλλων συσχετίζονται με τη φωτοσυνθετική απόδοσή τους (Gates D.M., 1976), και με τα αποθέματα θερμικής ενέργειας τους (Ehleringer and Mooney, 1978). Επιπλέον, η κατανόηση των δομικών τμημάτων των φύλλων που επηρεάζουν τον συντελεστή ανάκλασης του φύλλου, είναι σημαντική για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των φασματοσκοπικών μετρήσεων. Ο συντελεστής ανάκλασης των φύλλων

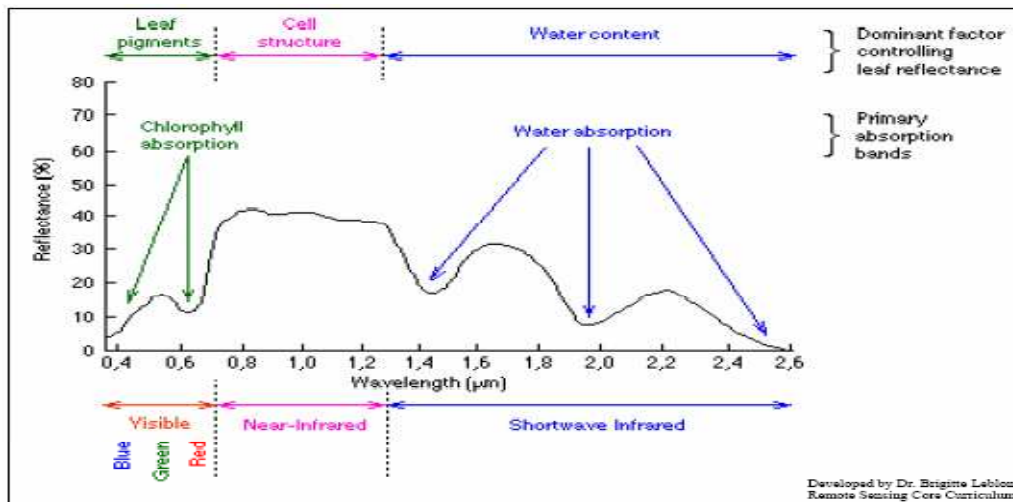
στη κοντινή υπέρυθρη περιοχή (NIR 750-1350 nm) επηρεάζεται πρωτίστως από τη δομή των φύλλων, ενώ ο συντελεστής ανάκλασης στη μέση υπέρυθρη περιοχή (1350-2500 nm) από την περιεκτικότητα σε νερό (Gates et al, 1965). Στη μετάβαση από το κόκκινο στα υπέρυθρα μήκη κύματος, ο συντελεστής ανάκλασης των φύλλων αυξάνεται πολύ, δημιουργώντας ένα ευδιάκριτο φασματικό χαρακτηριστικό γνώρισμα το οποίο ονομάζεται «Κόκκινη Άκρη» (Red Edge). Ο προσδιορισμός με ακρίβεια της θέσης αυτής (του Red Edge) έχει συσχετιστεί με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, με τα στάδια ανάπτυξης του φυτού (Vogelmann, 1993) αλλά και με την καταπόνηση του φυτού (Gitelson, Lang and Lichtenthaler, 1996). Αντίθετα, η ανάλυση του συντελεστή ανάκλασης φύλλων μέσα στην κοντινή υπέρυθρη περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την επίδραση των δομικών ιδιοτήτων των φύλλων στο συντελεστή ανάκλασης (Gates D.M., 1970), σε αντιδιαστολή με τα χημικά συστατικά του φύλλου όπως η χλωροφύλλη και το νερό (Curran et al, 1992).



Σχήμα 1

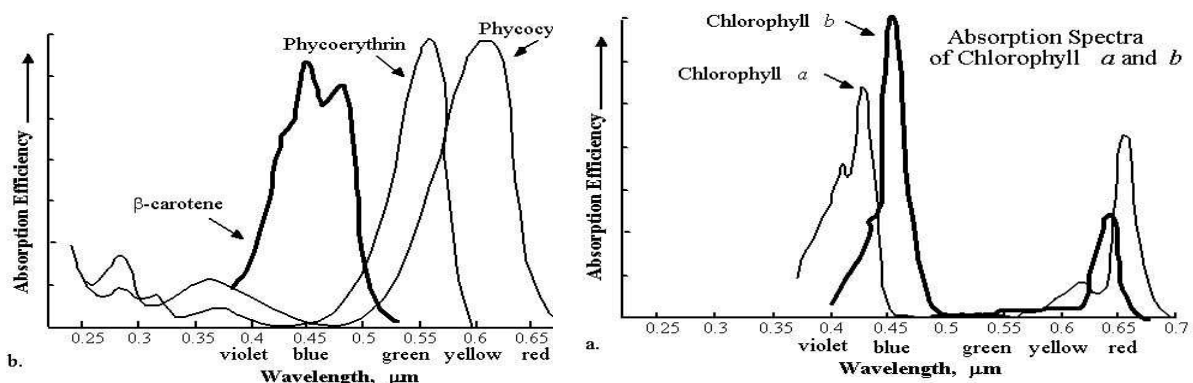
Χλωροφύλλη και άλλες χρωστικές (κυρίως καρωτενοειδή)

Οι χλωροφύλλες a και b έχουν τα μέγιστα σημεία απορροφητικότητας τους στην κόκκινη και στην μπλε περιοχή του φάσματος (εικόνες 3 και 4). Ατυχώς στην μπλε περιοχή, έχουμε μέγιστες επικαλύψεις με την απορροφητικότητα των καρωτενοειδών, 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 αλλά 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 (Penuelas et al, 1995).



Εικόνα3. Διάγραμμα απορροφητικότητας της βλάστησης στις περιοχές του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος (ΗΜΑ)

Η εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε καρωτενοειδή με βάση τις τιμές ανακλαστικότητας, είναι πολύ δυσκολότερη από την εκτίμηση της χλωροφύλλης. Αυτό συμβαίνει λόγω της επικάλυψης των μέγιστων τμημάτων απορρόφησης μεταξύ της χλωροφύλλης και του καρωτενοειδούς (εικόνα 4, αριστερά) και λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης της χλωροφύλλης από τα καρωτενοειδή στα περισσότερα φύλλα. Κατά συνέπεια, οι εμπειρικοί δείκτες που έχουν δημιουργηθεί έχουν αποδειχθεί επιτυχέστεροι για την εκτίμηση της αναλογίας των καρωτενοειδών προς τη χλωροφύλλη, απ' ό,τι για την εκτίμηση της απόλυτης συγκέντρωσης καρωτενοειδών (Merzlyak et al, 1999). Οι περισσότεροι δείκτες για την εκτίμηση της αναλογίας καρωτενοειδή/χλωροφύλλη είναι με βάση τη σύγκριση του συντελεστή ανάκλασης στην περιοχή της μέγιστης απορρόφησης των καρωτενοειδών (400nm-500 nm) ως προς τον συντελεστή ανάκλασης στην κόκκινη περιοχή, ο οποίος επηρεάζεται μόνο από τη χλωροφύλλη.



Εικόνα 4. Φασματικά παράθυρα στο ΗΜΑ που δείχνουν τα σημεία απορροφητικότητας για τις χλωροφύλλες a και b

Δείκτες βλάστησης

Οι δείκτες που ακολουθούν επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλοι για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης. Ο ακριβής αλγόριθμός τους περιγράφεται στον πίνακα 1 :

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 (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).
- 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).
- MSR** (Modified Simple Ratio): δείκτης αναλογίας βλάστησης, ευαίσθητος στις μεταβολές της χλωροφύλλης. Για να επηρεάζεται λιγότερο η βλάστηση από περιβαλλοντικούς παράγοντες (πχ. σύννεφα, έδαφος) έχει χρησιμοποιηθεί ο τροποποιημένος δείκτης αναλογίας βλάστησης (Chen, 1996).
- OSAVI** (Optimized Soil – Adjusted Vegetation): Πρόκειται για έναν δείκτη βλάστησης, βέλτιστα προσαρμοσμένο στην φασματική συμπεριφορά των υποκείμενων εδαφικών pixels. Στην πραγματικότητα πρόκειται για έναν δείκτη SAVI με $L = 0.16$, τιμή για την οποία έδειξαν (οι Rondeaux et al, 1996) ότι ελαχιστοποιείται η τυπική απόκλιση στην ανάμειξη εδάφους και βλάστησης.
- RENDVI** (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index): Πρόκειται για έναν τροποποιημένο δείκτη βλάστησης, οποίος χρησιμοποιεί κυρίως περιοχές στο Red Edge αντί για τις «κλασικές» κορυφές ανάκλασης και απορρόφησης (στα κανάλια Red και NIR).
- MRENDVI** (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index): Πρόκειται για έναν τροποποιημένο δείκτη RENDVI βλάστησης, βέλτιστα προσαρμοσμένο για την ανάκλαση των φύλλων.

Δείκτες χλωροφύλλης και χρωστικών

Οι δείκτες χλωροφύλλης και γενικότερα χρωστικών της βλάστησης που ακολουθούν, επιλέχθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία ως οι πλέον κατάλληλοι για την χαρτογράφηση της βιομάζας. Κάποιοι από αυτούς αναφέρονται στην 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. Ο αλγόριθμός τους περιγράφεται στον πίνακα 1:

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

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 εικονοστοιχείων

- που απεικονίζουν έδαφος αλλά και των μη φωτοσυνθετικών υλικών και να αυξήσει την ευαισθησία σε χαμηλές τιμές χλωροφύλλης (Haboudane et al, 2002).
- MCARI / OSAVI:** Αναπτύχθηκε με στόχο να μειωθεί δραστικά η ευαισθησία που εμφανίζεται εξαιτίας της ανάκλασης του υποκείμενου του φυτού εδάφους (Daughtry et al, 2000).
- TCARI / OSAVI:** Ανάλογος δείκτης με τον προηγούμενο, με στόχο να αυξήσει την ευαισθησία σε πολύ χαμηλές τιμές της μεταβολής που εμφανίζεται εξαιτίας της ανάκλασης του υποκείμενου του φυτού εδάφους (Daughtry et al, 2000).
- 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, 2000)..
- MCARI-1 :** Αποτελεί παραλλαγή του MCARI με σκοπό την διατήρηση της ευαισθησίας της χλωροφύλλης στις επιδράσεις των γειτονικών εικονοστοιχείων που απεικονίζουν έδαφος (Haboudane et al, 2004).
- MCARI-2 :** Αποτελεί και αυτός παραλλαγή του MCARI με σκοπό την ελάττωση των επιδράσεων του εδάφους και της ατμόσφαιρας στην χλωροφύλλη (Haboudane et al, 2004).
- TCI :** (Triangular Chlorophyll Index) : Παρόμοιος του δείκτη TVI με βασική ιδέα ότι η μεταβολή στη συγκεντρωση της χλωροφύλλης προκαλεί μια μετατόπιση στο κόκκινο, η οποία αντικατοπτρίζεται σε αλλαγή στην ανακλαστικότητα στα 702 nm (Haboudane et al, 2007).
- TCI-1 :** Αποτελεί απλή παραλλαγή του TCI.
- TCI-2 :** Αποτελεί παραλλαγή του TCI με βάση την παρατήρηση ότι οι μεταβολές στο κόκκινο είναι ευαίσθητες και στην περιοχή αμέσως μετά το Red Edge (Haboudane et al, 2007).
- TCI-3 :** Αποτελεί παραλλαγή του TCI-1 με στόχο να είναι περισσότερο ευαίσθητος από αυτόν.
- R750 / R710 :** Ο λόγος ανιχνεύει ικανοποιητικά τις χρωστικές της βλάστησης (Zarco-Tejada et al, 2001).
- VoG-2 :** (Vogelmann Red Edge Index 2): Ευαίσθητος στις μεταβολές των χρωστικών, υπολογίζει τις χλωροφύλλες a και b της κομοστέγης (Vogelmann, 1993).
- PRI :** (Photochemical Reflectance Index) : Πρόκειται για έναν δείκτη ευαίσθητο στις μεταβολές των καροτινοειδών χρωστικών (π.χ. χρωστικές ξανθοφύλλης και χλωροφύλλης) σε ζωντανό φύλλωμα (Gamon et al, 1992).
- RGRI** (Red Green Ratio Index): Πρόκει, αι για έναν δείκτη της ερυθρότητας των φύλλων, ο οποίος δείχνει την χλωροφύλλη σε σχέση με την χρωστική ανθοκυαμίνη και χρησιμοποιείται ως ενδεικτικός δείκτης για την ανάπτυξη του φυλλώματος .

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
NDVI (CASI)	$([\text{Band}770:\text{Band}780] + [\text{Band}784:\text{Band}790]) - ([\text{Band}655:\text{Band}665] + [\text{Band}676:\text{Band}685]) / ([\text{Band}770:\text{Band}780] + [\text{Band}784:\text{Band}790]) + ([\text{Band}655:\text{Band}665] + [\text{Band}676:\text{Band}685])$
RDMI	$(\text{Band}802 - \text{Band}672) / \text{SQRT}([\text{Band}802 + \text{Band}672])$
TRDVI	$1.50 * (\text{Band}802 - \text{Band}672) / \text{SQRT}([\text{Band}802 + \text{Band}672] + 0.50)$
MSR	$[(\text{Band}802 / \text{Band}672) - 1] / \text{SQRT}[(\text{Band}802 / \text{Band}672) + 1]$
OSAVI	$[(1 + 0.16) * (\text{Band}802 - \text{Band}672)] / (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.16)$
ΔΕΙΚΤΕΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
MCARI	$[(\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)$
TCARI	$3 * [[(\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)]$
[TCARI / OSAVI]	$3 * [[[(\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)] / [(1 + 0.16) * (\text{Band}802 - \text{Band}672)]] / (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.16)$
[MCARI / OSAVI]	$[[(\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)] / [(1 + 0.16) * (\text{Band}802 - \text{Band}672)] / (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.16)$
TVI	$0.50 * [120 * (\text{Band}748 - \text{Band}551) - 200 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)]$
MCARI-1	$1.20 * [2.50 * (\text{Band}802 - \text{Band}672) - 1.30 * (\text{Band}802 - \text{Band}551)]$
MCARI-2	$1.50 * [2.50 * (\text{Band}802 - \text{Band}672) - 1.30 * (\text{Band}802 - \text{Band}551)] / \text{SQRT}([2 * \text{Band}802 + 1]^2 - (6 * \text{Band}802 - 5 * \text{SQRT}(\text{Band}672)) - 0.50)$
TCI	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * \text{SQRT}(\text{Band}702 / \text{Band}552)$
TCI-1	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * \text{SQRT}(\text{Band}702 / \text{Band}552)$
TCI-2	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.50) / \text{SQRT}(\text{Band}702)$
TCI-3	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}552)$
ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΟ RED EDGE	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
R750/R710	$\text{Band}748 / \text{Band}710$
VOG-2	$(\text{Band}733 - \text{Band}748) / (\text{Band}717 + \text{Band}725)$
RENDVI	$(\text{Band}750 - \text{Band}705) / (\text{Band}750 + \text{Band}705)$
MRENDVI	$(\text{Band}750 - \text{Band}705) / (\text{Band}750 + \text{Band}705 - 2 * \text{Band}445)$
PRI	$(\text{Band}531 - \text{Band}570) / (\text{Band}531 + \text{Band}570)$
RGRI	$(\text{Band}600 + \text{Band}601 + \text{Band}602 + \dots + \text{Band}699) / (\text{Band}500 + \text{Band}501 + \text{Band}502 + \dots + \text{Band}599)$

Πίνακας 1. Δείχνει τον αλγόριθμο του κάθε δείκτη

Δεδομένα και Προεπεξεργασίες

Για την περιοχή μελέτης λήφθηκαν απεικονίσεις με τον αερομεταφερόμενο υπερφασματικό δέκτη CASI 550 (στις 25/7/2013) και βοηθητικά χρησιμοποιήθηκε η απεικόνιση Landsat 8 της 2/6/2013 και ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR (L band) και ένα συμβολομετρικό ζευγάρι Cosmo Skymed (X band) για την εκτίμηση του δασικού ύψους του δάσους (στις 22/01/2010 και 9/3/2010). Η υπερφασματική απεικόνιση CASI της περιοχής μελέτης έχει χωρική διακριτική δυνατότητα 2 m 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. Στην απεικόνιση, έγινε αρχικά ατμοσφαιρική διόρθωση με το λογισμικό ATCOR και γεωμετρική διόρθωση στο Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS 84 / UTM zone 34N. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια μάσκα με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI ώστε να απομακρυνθούν χαρακτηριστικά πολύγωνα μη βλάστησης (όπως δρόμοι και σπίτια). Το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green αντίστοιχα της απεικόνισης CASI χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο για την φωτοερμηνεία της περιοχής.

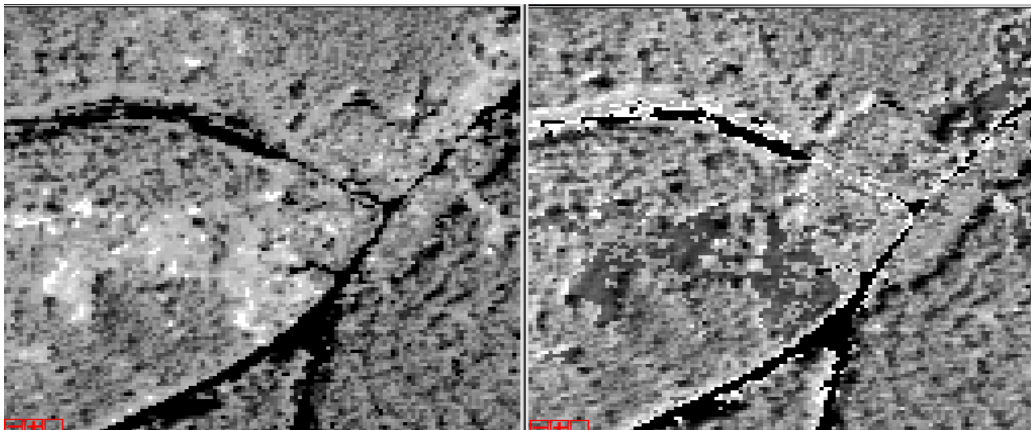


Εικόνα 5. Ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green αντίστοιχα του CASI όπου με διαβαθμίσεις του κόκκινου χρώματος διακρίνεται η βλάστηση (με έντονο κόκκινο η πυκνή, υγιής βλάστηση) ενώ τα εδάφη, χωρίς ή με αραιή βλάστηση, εμφανίζονται από λευκά έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.

Σε αυτό διακρίνεται με έντονο κόκκινο χρώμα η πυκνή, υγιής βλάστηση, ενώ τα εδάφη χωρίς ή με αραιή βλάστηση, εμφανίζονται από λευκά έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. Οι οικιστικές περιοχές εμφανίζονται σε διαβαθμίσεις του γκρι.

Ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων

Οι ψηφιακές επεξεργασίες έγιναν με το λογισμικό ENVI και το QGIS. Δημιουργήθηκαν συνολικά 22 δείκτες βλάστησης και χρωστικών (χλωροφύλλης κ.α.), και ύστερα από φωτοερμηνεία και αξιολόγησή τους δημιουργήθηκαν τα καταλληλότερα ψευδέγχρωμα σύνθετα για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης. Ως προς τους δείκτες βλάστησης ελέγχθηκαν οι NDVI, RDVI, TRDVI, MSR, OSAVI, RENDVI και MRENDVI και με φωτοερμηνεία προκρίθηκαν για την περιοχή μελέτης, με τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά την ημερομηνία λήψης των απεικονίσεων οι OSAVI, NDVI, TRDVI και MSR. Αυτοί χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τους δείκτες χλωροφύλλης TCARI, MCARI και TCI-2 οι οποίοι εμφανίστηκαν ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις μεταβολές της χλωροφύλλης. Ο δείκτης TCARI αποδείχτηκε περισσότερο ευαίσθητος στην υπέρξη συγκεντρώσεων χλωροφύλλης και με μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στις διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι σε σχέση με τον TCARI / OSAVI ο οποίος ανιχνεύει και διαχωρίζει καλύτερα pixel βλάστησης τα οποία επηρεάζονται από το γειτονικό υπόστρωμα (πχ βλάστηση δίπλα σε δρόμο). Ακολουθούν εικόνες των επιλεγμένων δεικτών:

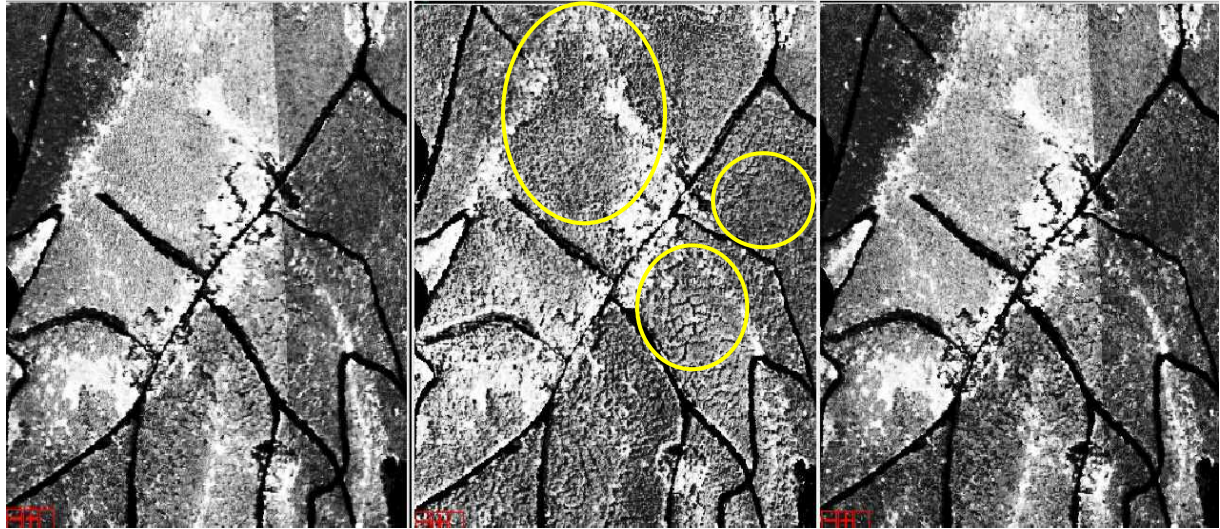


Εικόνα 6. (αριστερά) Απεικονίζεται ο δείκτης χλωροφύλλης TCARI και (δεξιά) ο δείκτης TCARI / OSAVI.



Εικόνα 7. απεικονίζεται επίγεια σε δύο προφίλ (κάτοψη και 3D) η περιοχή της εικόνας 6

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι δείκτες βλάστησης NDVI, TRDVI και MSR, οι οποίοι έδειξαν (με φωτοερμηνεία) να ανταποκρίνονται καλύτερα στην περιοχή.

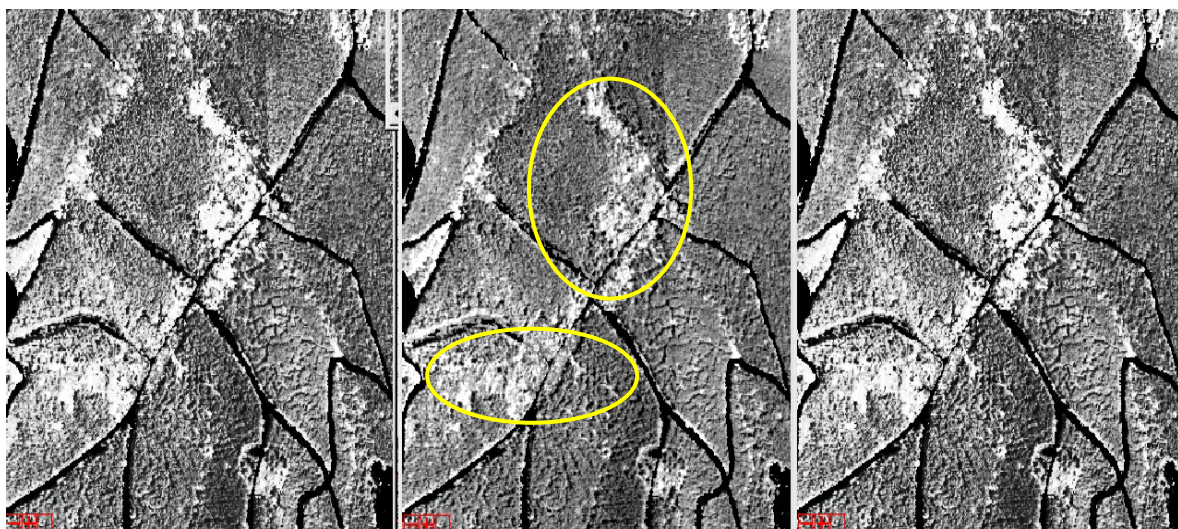


Εικόνα 8. (αριστερά) Απεικονίζεται ο δείκτης βλάστησης NDVI, στο (κέντρο) ο δείκτης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης MSR. Είναι εμφανής η καλύτερη φασματική απόκριση και ευαισθησία του δείκτη TRDVI στην περιοχή όπως διακρίνεται καλύτερα στις περιοχές που οριοθετούνται από τις κίτρινες γραμμές.



Εικόνα 9. απεικονίζεται επίγεια η περιοχή της εικόνας 8

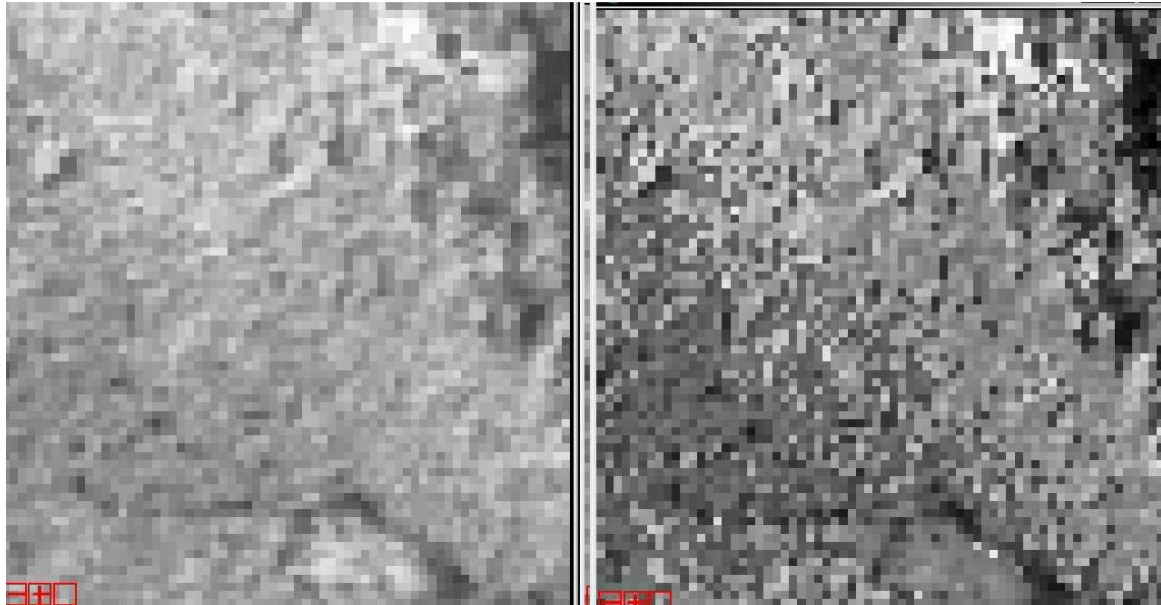
Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι δείκτες χλωροφύλλης MCARI, TCI-2 και TCARI:



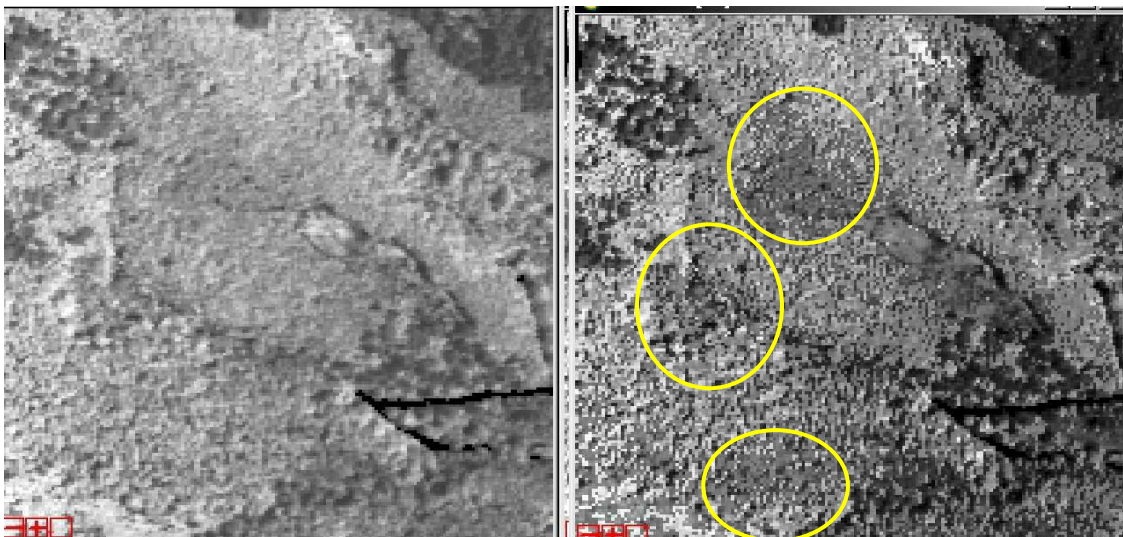
Εικόνα 10. (αριστερά) Απεικονίζεται ο δείκτης χλωροφύλλης MCARI, στο (κέντρο) ο δείκτης TCI-2 και (δεξιά) ο δείκτης TCARI. Με φωτοερμηνεία προκρίνεται ο δείκτης TCI-2 ως ικανοποιητικά

ευαίσθητος στις μεταβολές των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης όπως διακρίνεται καλύτερα στις περιοχές που οριοθετούνται από τις κίτρινες γραμμές.

Ακολουθεί οπτική σύγκριση των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης TRDVI και TCI-2:

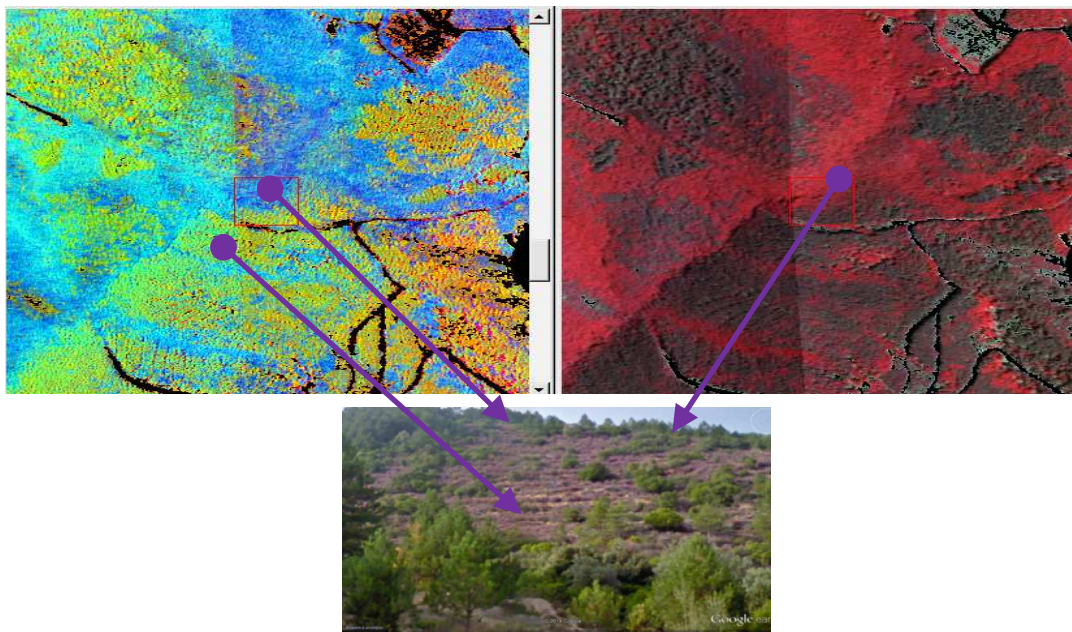


Εικόνα 11. Δείκτης βλάστησης και δείκτης χλωροφύλλης. Απεικονίζεται (αριστερά) ο δείκτης βλάστησης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2. Είναι εμφανής η μεγαλύτερη ευασθησία που καταδεικνύει ο δείκτης TCI-2 και η οποία αποτυπώνεται στην διαφοροποίηση του τόνου του δείκτη (βλέπε συγκριτικά και εικόνα 12).

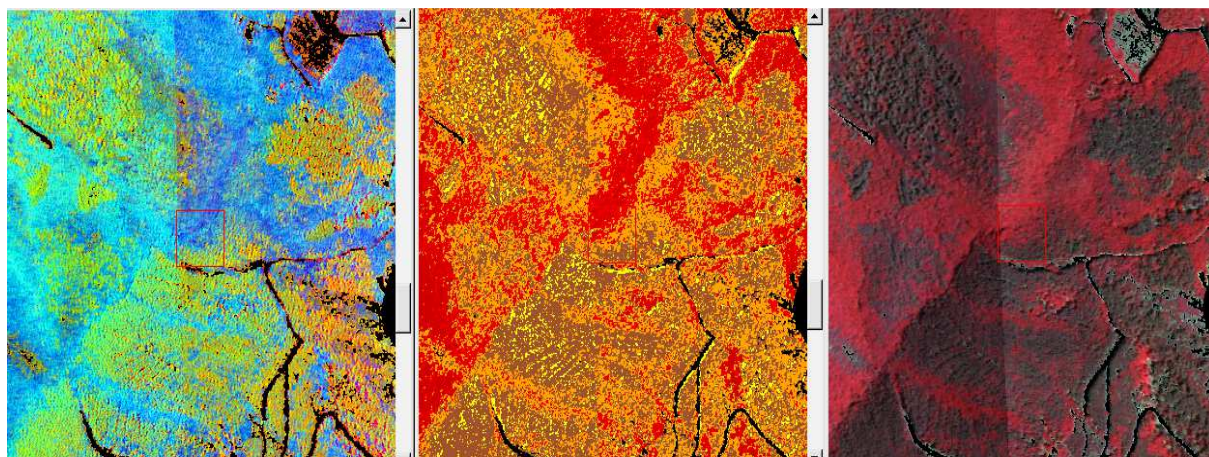


Εικόνα 12. Σμίκρυνση της προηγούμενης εικόνας. Απεικονίζεται (αριστερά) ο δείκτης βλάστησης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2. Ο τελευταίος εμφανίζει καλή απόκριση στην χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης, μέσω της υψηλής συγκέντρωσης σε χλωροφύλλη, όπως παρατηρείται στις περιοχές με τις κίτρινες γραμμές..

Το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο) και Photochemical Reflectance Index (στο μπλε) είναι αρκετά ενδεικτικό για την πυκνότητα βλάστησης προσδιορίζοντας καλά ποσοτικά τις χρωστικές και τις μεταβολές που παρουσιάζουν στα φωτοσυνθετικά κύτταρα των φυτών. Με σκούρο μπλε εμφανίζεται βλάστηση με πλούσια φωτοσυνθετική ικανότητα ενώ με πρασινωπό χρώμα ποώδης βλάστηση (εικόνα 13). Το σύνθετο αυτό, το οποίο αξιολογήθηκε ως καλά ενδεικτικό της πυκνότητας βλάστησης, συγκρίθηκε με τον δείκτη TCI-2 (εικόνες 6 έως 12) και από την σύγκριση αυτή (στην οποία έλαβε μέρος και το «κλασικό» ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green όπου η βλάστηση εμφανίζεται με διαβαθμίσεις του κόκκινου) έγινε η τελική αξιολόγηση της πυκνότητας βλάστησης (όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο). Για να γίνει ευκολότερη η οπτική σύγκριση του δείκτη TCI-2 χρησιμοποιήθηκε η τεχνική “Density Slicing” (τεμαχιοποίηση ή διαστρωμάτωση της πυκνότητας) Πρόκειται για μια τεχνική που ενισχύει τις πληροφορίες που συλλέγονται από την φωτεινότητα ενός φασματικού καναλιού, διαιρώντας τις ψηφιακές τιμές των pixels σε διαστήματα (ίσα ή και άνισα) και στη συνέχεια, αντιστοιχίζοντας σε κάθε διάστημα, ένα χρώμα. Με τον τρόπο αυτόν οι πληροφορίες του δείκτη TCI-2 (ο οποίος απεικονίζεται ως μια grayscale εικόνα), μπορούν να ερμηνευθούν και να αναλυθούν πιο εύκολα, επειδή οι διαφορές μεταξύ των χρωμάτων είναι ενδεικτικότερες από τις διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι (εικόνα 14).



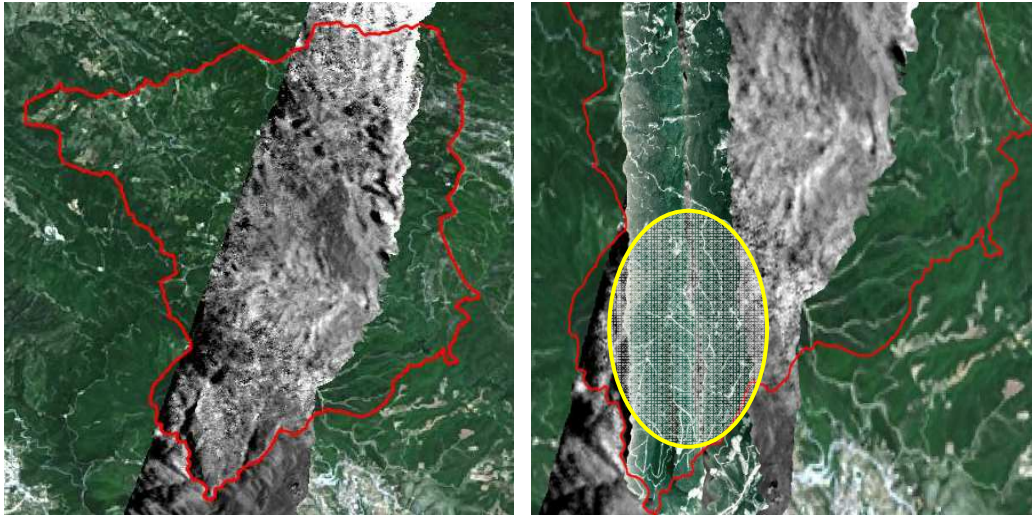
Εικόνα 13: (αριστερά), ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών των βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης: Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε). Με σκούρο μπλε εμφανίζεται πυκνή, μη γηρασμένη βλάστηση, με ανοιχτό πράσινο εμφανίζεται η χαμηλή, ποώδης βλάστηση, με κόκκινο έχουμε πλήρη απουσία φωτοσύνθεσης, επομένως και βλάστησης. Στα (δεξιά) έχουμε το «κλασικό» ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green όπου η βλάστηση εμφανίζεται με διαβαθμίσεις του κόκκινου. Εμφανίζεται ακόμη και η επίγεια φωτογραφία της περιοχής όπου με τα βέλη φαίνονται περιοχές πυκνής και ποώδους βλάστησης.



Εικόνα 14. Στα (αριστερά), έχουμε το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης: 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, ποώδης βλάστηση, με κόκκινο έχουμε πλήρη απουσία φωτοσύνθεσης, επομένως και βλάστησης. Στο (κέντρο) έχουμε μια εικόνα Density Slicing του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (η παλέτα ερμηνεύεται: 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 «κλασικό» ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB καναλιών VNIR, Red και Green όπου η βλάστηση εμφανίζεται σε διαβαθμίσεις του κόκκινου.

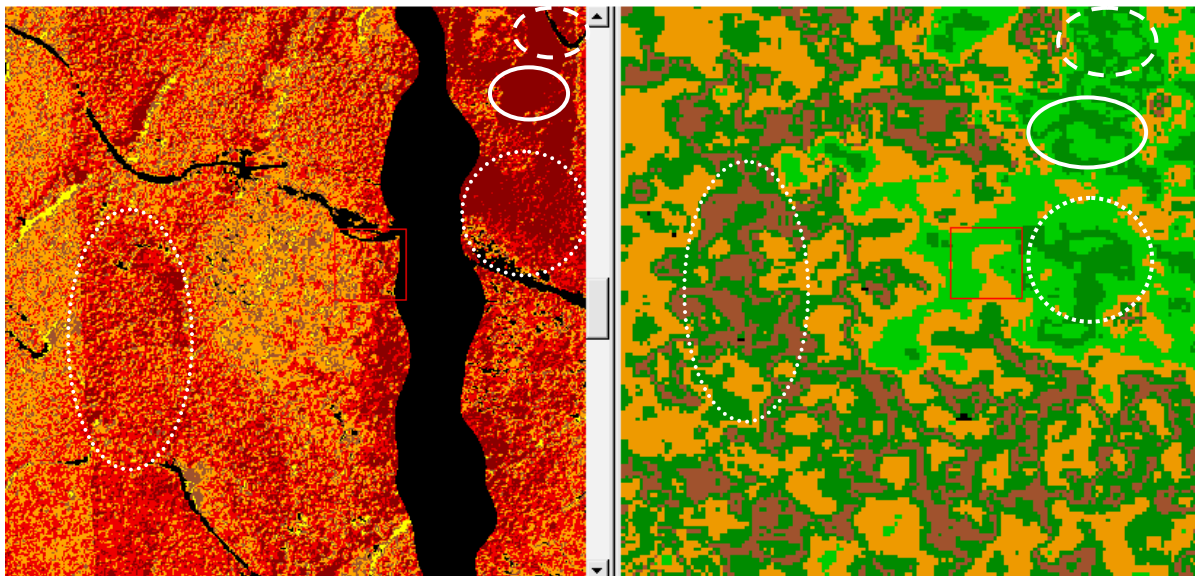
Αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση της χαρτογράφησης της πυκνότητας της βλάστησης, χρησιμοποιήθηκε ένας χάρτης εκτίμησης του δασικού ύψους της περιοχής, από την εργασία των *Karamvasis K., Karathanassi V., 2015*, ο οποίος προέκυψε με χρήση συμβολομετρίας διπλής συχνότητας (η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία ως μια τεχνική υπολογισμού και εκτίμησης των δασικών παραμέτρων. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, οι περισσότερες έρευνες διεξάγονται σε μικρές χωρικές κλίμακες λόγω της έλλειψης μεθόδων και μοντέλων για την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας σε ευρύτερες περιοχές). Στην περιοχή του δάσους του Ταξιάρχη χρησιμοποιήθηκε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR (L band) και ένα συμβολομετρικό ζευγάρι Cosmo Skymed (Xband) για την εκτίμηση του δασικού ύψους και παρήχθη χάρτης εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης (εικόνα 15) 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 απεικονίσεων του δέκτη CASI. Η αξιολόγηση έγινε στο κοινό επικαλυπτόμενο τμήμα των δεδομένων (εικόνα 15, δεξιά) και δείχνει ότι ο δείκτης TCI-2, ο οποίος προκρίθηκε από τους άλλους δείκτες, δίνει αποτελέσματα τα οποία κρίνονται ικανοποιητικά για την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 15. Απεικονίζεται (αριστερά) με γκρι ο χάρτης εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, με υπόβαθρο το περίγραμμα του δάσους του Ταξιάρχη (κόκκινη γραμμή) και το έγχρωμο σύνθετο 321 (RGB) της Landsat 8 της 2/6/2013. Στα (δεξιά) έχει γίνει επίθεση των απεικονίσεων του δέκτη CASI. Με κίτρινο χρώμα οριοθετείται η περιοχή όπου έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στην εικόνα 16 που ακολουθεί, γίνεται οπτική σύγκριση του δείκτη TCI-2 (με Density Slicing) και του χάρτη εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης (στον οποίο επίσης έχει γίνει Density Slicing). Παρατηρούμε, αν και υπάρχει μια μικρή αλλά εμφανής διαφορά κλίμακας μεταξύ των δύο εικόνων, μια καλή συμφωνία στην εκτίμηση του δασικού ύψους, με τα αποτελέσματα του δείκτη TCI-2 :



Εικόνα 16. Στα (αριστερά) έχουμε μια εικόνα Density Slicing, τμήματος της περιοχής μελέτης, του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (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) και (δεξιά) απεικονίζεται εικόνα Density Slicing του χάρτη εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, με παλέτα: σκούρο πράσινο=πολύ υψηλά δέντρα, πράσινο=υψηλά, πορτοκαλί=σχετικά υψηλά, καφέ=δέντρα χαμηλού ύψους. Στις περιοχές που οριοθετούνται από τις άσπρες γραμμές εμφανίζεται η συνάφεια στη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια να χαρτογραφηθεί η πυκνότητα βλάστησης με την βοήθεια δεικτών βλάστησης και χρωστικών. Επειδή η διαφοροποίηση μεταξύ των δεικτών, συνήθως δεν είναι οπτικά εμφανής και 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 και για τα δεδομένα την χρονική περίοδο που αποκτήθηκαν (καλοκαίρι 2013). Ο δείκτης βλάστησης TRDVI έδειξε ότι χαρτογραφεί ικανοποιητικά την βλάστηση, ενώ παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία στις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης, ελαχιστοποιώντας τις επιδράσεις του υπόβαθρου. Ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2 βρέθηκε περισσότερο ευαίσθητος στην μεταβολή των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης, ιδιαίτερα έδειξε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η απορρόφησή της διευρύνεται και προκαλεί μετατόπιση (στο κόκκινο) των ανακλάσεων ως προς το όριο του κόκκινου. Ως αποτέλεσμα έχουμε την ανάκλαση της κομοστέγης των φυτών να επηρεάζεται από την περιεκτικότητα της χλωροφύλλης και τελικά να αποτελεί έναν αξιόπιστο εκτιμητή της πυκνότητας βλάστησης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνος του για να χαρτογραφήσει την πυκνότητα βλάστησης της περιοχής. Και άλλοι δείκτες εμφανίστηκαν ενδιαφέροντες, όπως ο δείκτης TCARI / OSAVI, ως σταθερός εκτιμητής της βλάστησης σε περιπτώσεις ανάμιξης εδάφους – βλάστησης. Οι υπόλοιποι δείκτες (του πίνακα 1) κατέδειξαν σχετική ευαισθησία ως προς την περιεχόμενη χλωροφύλλη και την πυκνότητα βλάστησης και μπορούν αποσπασματικά να χρησιμοποιηθούν για μια τοπική χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης, ενώ κάποιιοι (όπως ο NDVI και ο MSR) εμφάνισαν γρήγορα φαινόμενα κορεσμού και δεν θα τους επελέγαμε από μόνους τους για την χαρτογράφηση. Πρέπει επίσης να αναφερθεί το πολύ ενδιαφέρον ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών των βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης: Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε) το οποίο έδειξε πως αποτελεί έναν πολύ ενδιαφέρον εκτιμητή της πυκνότητας βλάστησης, ιδιαίτερα σε μέση και χαμηλή βλάστηση.

Βιβλιογραφία

- Asner G. P., “Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance”, *Remote Sensing of Environment*, 64:234-253, 1998.
- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. environ.* 35, pp. 161–173.
- Blackmer, T. M., and Schepers, J. S. “Use of a chlorophylling Remote Sensing Estimation of Fractionally Absorbed Phometerto monitor N status and schedule fertigation of corn”, *J. Production Agriculture* 8:56–60, 1995.
- Broge N. H. and Leblanc E., “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, pp. 156-172.
- Chen, J., "Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications", *Can. J. Remote Sens.* 22 , 229–242., 1996.
- Curran, P.J., Duncan, J.L., Macler, BA, Plummer, S.E., and Peterson D.L., “Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration”. *Remote Sensing of Environment*, 39: 153-166, 1992.

- Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M. S., Brown de Colstoun E., McMurtrey J. E., "Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance", *Remote Sensing of Environment*, 74: 229-239, 2000.
- Ehleringer, J., Mooney H., A., "Leaf hairs: effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub". *Oecologia* 37:183-200, 1978.
- Gamon, J.A., Penuelas, J. and Field, C.B., "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency", *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44, 1992
- Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J., C., Weidner V., R., "Spectral Properties of Plants," *Appl. Opt.*4, 11-20, 1965.
- Gates, D. M., "Physical and physiological properties of plants". In National Research Council, Committee on Remote Sensing for Agricultural Purposes, *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*, 224–252. National Academy of Sciences, Washington D.C., USA, 1970.
- Gitelson, A., and Merzlyak M., "Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus Hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. Leaves." *Journal of Plant Physiology* 143, 286–292, 1994.
- Huete, A. R., "A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Relationships between chlorophyll meter readings and leaf", *Remote Sens. Environ.* 25:295–309, 1988.
- Haboudane D., Miller J., Pattey E., Strachan I. B., "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture", 2003.
- Haboudane D., Tremblay N., Miller J., Vigneault P., "Remote Estimation of Crop Chlorophyll Content Using Spectral Indices Derived From Hyperspectral Data", 2008.
- Hanson H.C., Dahl E., "The use of basic principles in the classification of range vegetation", *J Range Manage*; 10:26-33, 1987.
- Jackson R.D. and Huete, A.R., "Interpreting vegetation indices", Univ. of Arizona, Tuscon, 1991.
- Karamvavis K., Karathanassi V., "Forest Canopy Height Estimation Using Double-Frequency Repeat Pass Interferometry", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, June 2015.
- Karathanassi V., "Special Topics in Remote Sensing", Associate Professor, School of Rural and Surveying Engineering, N.T.U.A., Athens, 2014.
- Kim, M. S., Daughtry, C. S. T., Chappelle, E. W., McMurtrey III, J. E., and Walthall, C. L., "The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation", *Proceedings of the 6th Symp. on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Jan. 17–21, 1994, Val D’Isere, France, (pp. 299–306), 1994.
- Le Maire G. et al, "Towards universal broadleaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements," *Remote Sens. Environ.*, vol.89, pp. 1 – 28, 2004.
- Merzlyak M., Gitelson A., Chivkunova O. and Rakitin V., "Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening", *Physiologia Plantarum*", Volume 106, Issue 1, pages: 135–141, May 1999.
- Penuelas J., Baret F., Filella I. "Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance". 1995.
- Perry, C. R., Jr. and Lautenschlager L., F., "Functional equivalence of spectral vegetation indices", *Remote Sensing of Environment* vol. 14, 169 182, 1984.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F., "Optimisation of the Soil-Adjusted Vegetation Indexes", *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p.95-107, 1996.

- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. and Deering D.W. "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS-1" Third Earth Resources Technology Satellite Symposium 1: 309-317, 1974.
- Roujean, J.-L. and Breon, F. M., "Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements", *Remote Sens. Environment* 51: 375-384, 1995.
- Roy P. S., "Spectral reflectance characteristics of vegetation and their use in estimating productive potential", *Proceedings: Plant Sciences*, Volume 99, Issue 1, pp 59-81, 1989
- Qi X., Tai CY., Wasserman BP., "Plasma membrane intrinsic proteins of *Beta vulgaris*", *L. Plant Physiol.* 108:387–392, 1995.
- Vogelmann Thomas C., "Plant Tissue Optics", *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Vol. 44 : 231-251, 1993.
- Xiao Yueting et al, "The temporal changing information extraction on spectral reflectance and growth parameters of typical crops", Beijing, China, 2008.
- Zarco-Tejada, P.J., Miller J. R., Morales A., Berjon A. and Aguera J., "Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops", *RSE*, 90(4), 463-476, 2004.

Vegetation Density Mapping using Hyperspectral Imagery

V. Andronis, PhD candidate of Laboratory of Remote Sensing, School of Rural and Surveying Engineering, N.T.U.A.

V. Karathanassi, Associate Professor of Remote Sensing, School of Rural and Surveying Engineering, N.T.U.A.

Abstract

This paper attempts to map the vegetation density of a Greek forest using hyperspectral imagery obtained by the airborne hyperspectral CASI 550. Vegetation indices, colors indicators like TCI-2, as well as, appropriate RGB color composites have been applied to distinguish the vegetation and classify its density. For the evaluation of the method, the vegetation density forest maps have been compared with the forest canopy height map of the area. Some indicators appeared highly reliable, others showed relative sensitivity to the content of chlorophyll and vegetation density and some showed high levels of saturation.