ePublishing

Open Schools Journal for Open Science

Vol 3, No 1 (2020)

Εφαρμογές της υπέρυθρης φωτογραφίας στη Φυσική

Σαββίνα Πουρνάρα, Παναγιώτης Λάζος

doi: 10.12681/osj.22366

Copyright © 2020, Σαββίνα Πουρνάρα, Παναγιώτης Λάζος

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

To cite this article:

Πουρνάρα Σ., & Λάζος Π. (2020). Εφαρμογές της υπέρυθρης φωτογραφίας στη Φυσική. *Open Schools Journal for Open Science*, *3*(1). https://doi.org/10.12681/osj.22366

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 02/08/2025 15:43:32

Open Schools Journal for Open Science

Volume 4

Εφαρμογές της υπέρυθρης φωτογραφίας στη Φυσική

Σαββίνα Πουρνάρα[1], Παναγιώτης Λάζος [2],

[1] 26ο ΓΕΛ Αθηνών - Μαράσλειο, Αθήνα, Ελλάδα
[2] Φυσικός, 26ο ΓΕΛ Αθηνών - Μαράσλειο, Αθήνα, Ελλάδα

Περίληψη

Πολλά φυσικά φαινόμενα είναι αόρατα στην παρατήρηση διά του οφθαλμού. Με την βοήθεια, ωστόσο, της ψηφιακής τεχνολογίας και της υπέρυθρης ακτινοβολίας μπορούμε να εντοπίσουμε και να μελετήσουμε μία σειρά από ενδιαφέροντα φαινόμενα στην καθημερινή ζωή και όχι μόνο. Η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μεγαλύτερα μήκη κύματος από εκείνα του ορατού φωτός. Στην εργασία μας παρουσιάζονται και αναλύονται φωτογραφίες που έχουν ληφθεί στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (Near Infrared Radiation, NIR) με μία ψηφιακή κάμερα η οποία έχει μετατραπεί κατάλληλα. Η μετατροπή πραγματοποιήθηκε με την αντικατάσταση του φίλτρου αποκοπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας εμπρός από τον αισθητήρα από κατάλληλο φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευσή της. Σε αυτήν τα αντικείμενα της εργασίας μελετιούνται με βάση πως την ανακλούν, εκπέμπουν και απορροφούν προκειμένου να μελετήσουμε τη βλάστηση, τη σύνθεση του εδάφους ή ακόμα να ανακαλύψουμε το υπέρυθρο ουράνιο τόξο. Η ανακλαστικότητα των φυτών οφείλεται στις ιδιότητες των φυλλωμάτων τους, την εσωτερική τους δομή και τα βιοχημικά τους συστατικά. Μέρος της φωτεινής ενέργειας που απορροφάται για τη φωτοσύνθεση επανεκπέμπεται μέσω φαινομένων φθορισμού και οι μεταβολές στον φωτοσυνθετικό ρυθμό προκαλούν αλλοιώσεις στην εκπομπή φθορισμού. Έτσι μπορούμε εύκολα με υπέρυθρη φωτογραφία να διακρίνουμε τη παρουσία φυτών, το πόσο υγιή είναι ή τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις που υπάρχουν σε δορυφορικές IR φωτογραφίες. Επιπλέον είναι εφικτό να παρατηρήσουμε το υπέρυθρο τμήμα από το ουράνιο τόξο αλλά και να εντοπίσουμε αντικείμενα με μεγάλη θερμοκρασία στο απόλυτο σκοτάδι (π.χ. ηλεκτρικό κολλητήρι, αναμμένα ηλεκτρικά μάτια κουζίνας, νήμα λαμπτήρα πυρακτώσεως που έχει μόλις σβήσει κλπ).

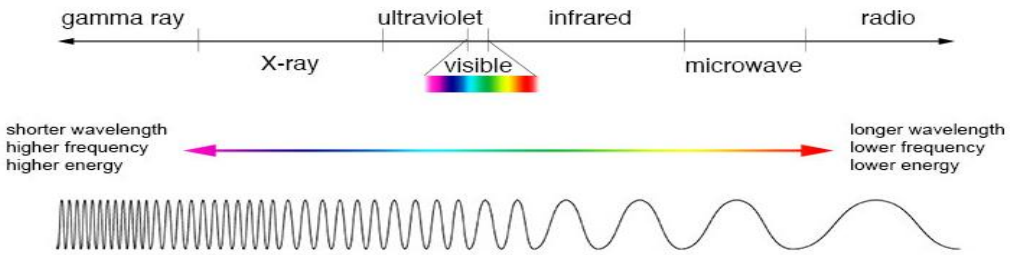
Λέξεις κλειδιά

Εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία, ψηφιακή φωτογραφία, αισθητήρας, χλωρίδα.

Εισαγωγή

ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι μια συνεχής κλίμακα συχνοτήτων ή μηκών κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία είναι μια μορφή ενέργειας με επιμέρους μορφές όπως το ορατό φως, που είναι μόνο ένα μικρό τμήμα του φάσματος της συγκεκριμένης ακτινοβολίας και έχει ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρομαγνητικών μηκών κύματος (Σχήμα 1). Η διαφορά μεταξύ αυτών των μηκών κύματος σχετίζεται με την ποσότητα ενέργειας που μεταφέρουν. Το φάσμα της ακτινοβολίας είναι επίσης χωρισμένο σε επτά περιοχές κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος και της αύξησης της ενέργειας και της συχνότητας, μία εκ των οποίων είναι η υπέρυθρη ακτινοβολία. Η υπέρυθρη ακτινοβολία, που ονομάζεται επίσης υπέρυθρο φως, είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μεγαλύτερα μήκη κύματος και χαμηλότερες συχνότητες από αυτές του ορατού φωτός, καθώς καλύπτει μια περιοχή από 300GHz έως 400THz (1mm-750nm) ενώ το ορατό φως εκτείνεται από περίπου 400 νανόμετρα (ιώδες) έως 700 νανόμετρα (κόκκινο).



Σχήμα 1: Σύγκριση μήκους κύματος, συχνότητας και ενέργειας για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ακτινοβολία IR έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος και τη μικρότερη ενέργεια και χωρίζεται σε 3 φασματικές περιοχές: την εγγύς, την μέση και την υπέρυθρη ακτινοβολία. Μία από τις φασματικές περιοχές της είναι η λεγόμενη Near-infrared ή NIR. Η κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία κυμαίνεται από 120 έως 400 THz (2.500-750 nm). Η υπέρυθρη περιοχή του φάσματος βρίσκεται ακριβώς μετά από τα ορατά μήκη κύματος. Ανακαλύφθηκε από τον William Herschel το 1800 μετρώντας το ηλιακό φως που διασκορπιζόταν με ένα πρίσμα και μετρώντας την αύξηση της θερμοκρασίας ακριβώς πέρα από το κόκκινο άκρο του φάσματος. Οι φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με αυτό το εύρος είναι παρόμοιες με αυτές για το ορατό φως.

Η ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ

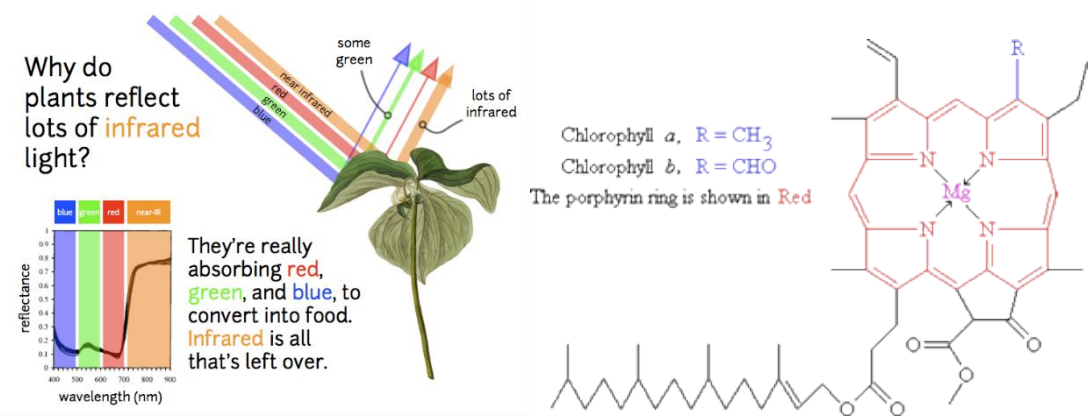
Η NIR μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί με φασματόμετρα, με πολλούς τύπους αισθητήρων εικόνας για υπέρυθρη φωτογραφία και με φωτογραφικό φιλμ. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε αρχικά μία

ψηφιακή κάμερα ES15 της Samsung (10,2 Mp) για να συλλαμβάνει και να αναλύει τις υπέρυθρες φωτογραφίες. Για να μετατρέψουμε την κάμερά μας σε ευαίσθητη στην ακτινοβολία NIR, ακολουθήσαμε τα παρακάτω βήματα: Αρχικά αφαιρέσαμε το φίλτρο IR το οποίο βρίσκεται είτε πάνω από τον αισθητήρα είτε σε άλλες περιπτώσεις πίσω από το φακό της φωτογραφικής μηχανής. Στη συνέχεια αντικαταστήσαμε το φίλτρο υπέρυθρων ακτινών με ένα κομμάτι

υπερβολικά χρωματισμένης αρνητικής φωτογραφικής μεμβράνης, επιτρέποντας έτσι στα υπέρυθρα μήκη κύματος να περάσουν από τον φακό στον αισθητήρα απεικόνισης.

Η ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ NIR ΣΤΑ ΦΥΤΑ

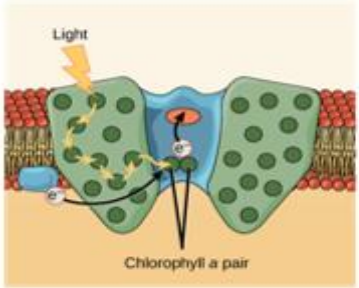
Η χλωροφύλλη είναι μια ένωση γνωστή ως χημική ουσία και χωρίζεται σε χλωροφύλλη a και χλωροφύλλη b που είναι εξειδικευμένα οργανικά μόρια και τα κύρια φωτοσυνθετικά μόρια που είναι υπεύθυνα για την απορρόφηση του φωτός στη διαδικασία που είναι γνωστή ως φωτοσύνθεση. Αυτές οι χρωστικές ουσίες απορροφούν μόνο συγκεκριμένα μήκη κύματος εντός του ορατού φάσματος φωτός, ενώ αντανακλούν άλλα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.

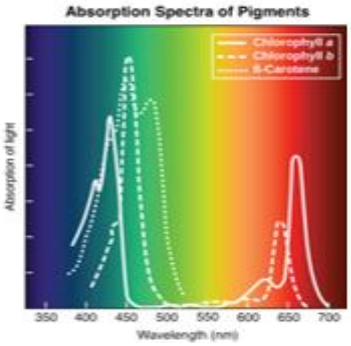


Σχήμα 2: Απορροφούμενα και αντανακλόμενα μήκη κύματος των φυτών.

Η χλωροφύλλη a και η χλωροφύλλη b βρίσκονται στους χλωροπλάστες του φυτού και διαφέρουν μόνο ελαφρώς στη σύνθεση μίας μόνο πλευρικής αλυσίδας. Η χλωροφύλλη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι μία χημική που σημαίνει ότι αποτελείται από ένα κεντρικό μεταλλικό ιόν που είναι συνδεδεμένο με ένα οργανικό μόριο που αποτελείται από άνθρακα, υδρογόνο και άλλα στοιχεία όπως το οξυγόνο και το άζωτο. Το κεντρικό ιόν μετάλλου στη χλωροφύλλη είναι το μαγνήσιο και το οργανικό μόριο είναι η πορφυρίνη. Το ορατό φως και το εγγύς υπέρυθρο φως τυπικά απορροφώνται και εκπέμπονται από ηλεκτρόνια σε μόρια και άτομα που μετακινούνται από το ένα ενεργειακό επίπεδο στο άλλο. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και τα φωτόνια ασκούν δυνάμεις που μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια. Καθώς τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν μεταξύ επιτρεπόμενων τροχιών, η ενέργεια πρέπει να διατηρηθεί. Αυτή η διατήρηση επιτυγχάνεται με την εκπομπή

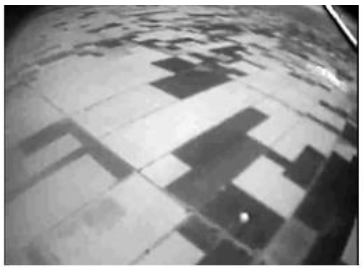
φωτονίων όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται από μια υψηλότερη δυνητική τροχιακή ενέργεια σε μια χαμηλότερη δυνητική τροχιακή ενέργεια. Συνεπώς, το φως εκπέμπεται μόνο σε ορισμένες συχνότητες που είναι χαρακτηριστικές για κάθε άτομο και μόριο. Αντίστοιχα, τα άτομα και τα μόρια απορροφούν μόνο ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων και μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και αντανακλούν όλες τις άλλες συχνότητες και μήκη κύματος του φωτός. Αυτή η δράση επιτρέπει στους χημικούς μηχανισμούς που αποτελούν τη βάση για την ανθρώπινη όραση και τη φωτοσύνθεση των φυτών. Η φωτεινή ενέργεια ενεργοποιεί τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης όταν οι χρωστικές απορροφούν το φως. Οι οργανικές χρωστικές έχουν ένα περιορισμένο εύρος ενεργειακών επιπέδων που μπορούν να απορροφήσουν. Τα επίπεδα ενέργειας χαμηλότερα από εκείνα που αντιπροσωπεύονται από το κόκκινο φως είναι ανεπαρκή για την αύξηση ενός τροχιακού ηλεκτρονίου που βρίσκεται σε διεγερμένη (κβαντική) κατάσταση. Οι αμφιβληστροειδείς χρωστικές μπορούν μόνο να "δουν" (απορροφήσουν) φως από τα 700 nm έως 400 nm , το οποίο επομένως ονομάζεται ορατό φως. Για τους ίδιους λόγους, τα μόρια χρωστικής των φυτών απορροφούν μόνο φως στην περιοχή μήκους κύματος από 700 nm έως 400 nm.





Σχήμα 3: Ένα τυπικό φωτοσυνθετικό σύστημα (αριστερά).

Σχήμα 4: Ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας NIR από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές ουσίες (δεξιά).



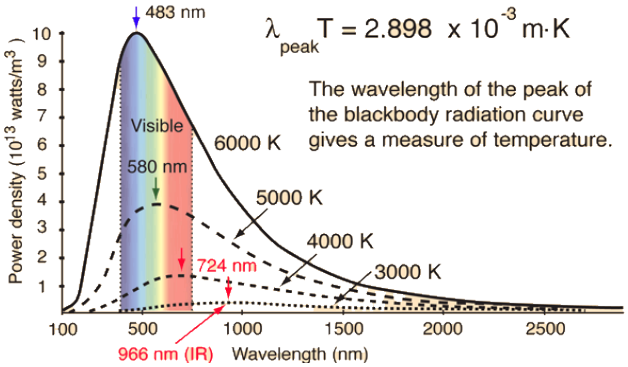
Σχήμα 5: Αστικό τοπίο στην εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (αριστερά).

Σχήμα 6: Γεωργικές καλλιέργειες στην εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (δεξιά).

Η ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΗΣ NIR ΣΤΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ

Κάθε αντικείμενο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το μήκος κύματος στο οποίο ακτινοβολεί ένα αντικείμενο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Σύμφωνα με τον νόμο μετατόπισης του Wien (law of displacement), όταν η θερμοκρασία ενός αντικειμένου αυξάνεται, η συνολική ακτινοβολούμενη ενέργεια αυξάνεται και η κορυφή της καμπύλης ακτινοβολίας μετακινείται σε μικρότερα μήκη κύματος που σημαίνει υψηλότερες συχνότητες. Έτσι, το μήκος κύματος της κορυφής της καμπύλης ακτινοβολίας μειώνεται καθώς η θερμοκρασία του μέλανος σώματος αυξάνεται κάτι που βλέπουμε χαρακτηριστικά στο Σχήμα 7.

$$\lambda_{peak} T = 2.898 x 10^{-3} m \cdot K$$



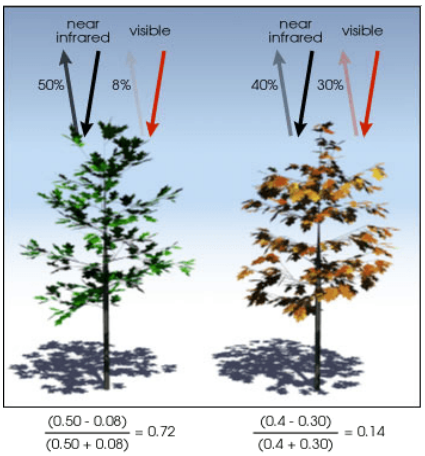
Σχήμα 7: Διάγραμμα θερμοκρασίας εκπεμπόμενης θερμικής ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος

Αντικείμενα με θερμοκρασίες της τάξης των 600-1000K εκπέμπουν ένα σημαντικό ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής τους ακτινοβολίας σε μήκη κύματος στην περιοχή της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να καταγραφεί με την κάμερα που έχουμε μετασκευάσει, όπως φαίνεται στις ηλεκτρικής εστίες στα σχήματα 8 και 9. Οι λήψεις έχουν πραγματοποιηθεί σε απόλυτο σκοτάδι.

Σχήματα 8 & 9: Ηλεκτρικές εστίες που ακτινοβολούν υπέρυθρη ακτινοβολία σε απόλυτο σκοτάδι.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Εκτός από την ανάκλαση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, έχουν προταθεί πολλοί δείκτες βλάστησης υψηλής φασματικής ανάλυσης (οι οποίοι εν μέρει απομακρύνουν τις διαταραχές που προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες), με σκοπό την παρακολούθηση της βιομάζας, της φαινολογίας (περιοδικές μεταβολές) και των φυσιολογικών συνθηκών των φυτών και τα καλύμματα. Πολυφασματικές εικόνες, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών κόκκινου και υπέρυθρης ακτινοβολίας, έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους για διακρίσεις βλάστησης-εδάφους και γεωργική παρακολούθηση σε εφαρμογές τηλεανίχνευσης. Αλλά παραμένουν σπάνια σε εικόνες εδάφους και UAV, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας κατάλληλων συσκευών απεικόνισης 2D. Μια γενική μεθοδολογία προτείνεται μερικές φορές για την από κοινού λήψη των εγγύς υπέρυθρων και κόκκινων ζωνών από μια τυποποιημένη κάμερα RGB, αφού αφαιρεθεί το εσωτερικό φίλτρο παρεμπόδισης υπέρυθρων. Οι τιμές NDVI που λαμβάνονται από συσκευές έχουν συγκριθεί με τις τιμές αναφοράς για ένα σύνολο φασμάτων φωτισμού εδάφους και βλάστησης. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι ζώνες NDVI μπορούν τώρα να αποκτηθούν με συσκευές απεικόνισης 2D υψηλής χωρικής ανάλυσης, ανοίγοντας νέες ευκαιρίες για εφαρμογές παρακολούθησης καλλιεργειών.



Σχήμα 10: Διαφορές τιμών του NDVI ανάλογα με την υγιή ή στρεσαρισμένη βλάστηση.

Οι περισσότεροι δείκτες βλάστησης αξιοποιούν τη διαφορά στην ανακλαστικότητα μεταξύ της ορατής περιοχής και της περιοχής εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι η χλωροφύλλη βρίσκεται κυρίως στα φυτά και έχει μοναδική απορρόφηση στην κόκκινη περιοχή, αυτή η περιοχή επιλέγεται συχνά, αντί να χρησιμοποιεί την ορατή περιοχή στο σύνολό της. Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης διαφορών είναι ένας υπολογισμός φασματικής ζώνης που χρησιμοποιεί τις ζώνες Ορατό (RGB) και Near Infrared (NIR) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το True NDVI, επίσης γνωστό ως Red NDVI, ορίζεται παρακάτω και έχει χρησιμοποιηθεί στην επιστημονική έρευνα για πάνω από 40 χρόνια και επινοήθηκε από τους Rouse et al. του NASA / Goddard Space Flight Centre το 1973. Η βασική ιδέα είναι ότι η χλωροφύλλη στα φυτά απορροφά το κόκκινο φως κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης και τα υγιή φυτά αντανακλούν πολύ έντονα στη ζώνη NIR. Το RED NDVI είναι ένας αριθμός που κυμαίνεται μεταξύ +1 και -1 με +1 που υποδηλώνει υγιή βλάστηση και

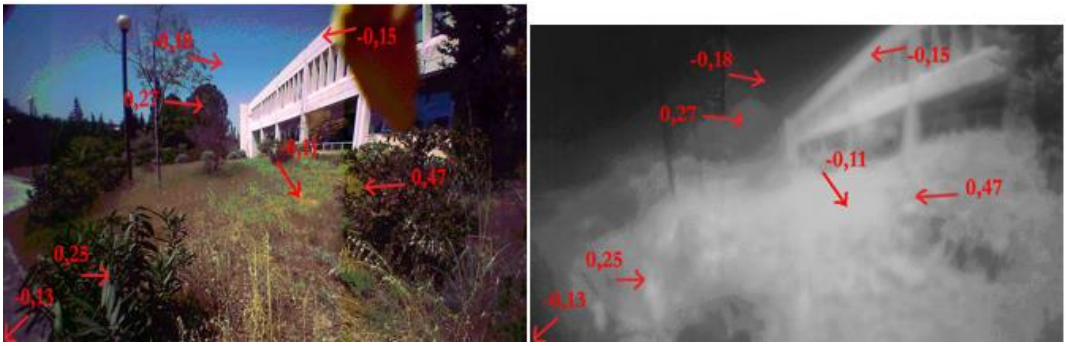
-1 που δείχνει νεκρή ή εξαιρετικά έντονη βλάστηση. Ο δείκτης βλάστησης RED NDVI έχει μελετηθεί και υιοθετηθεί ευρέως από την επιστημονική κοινότητα ως μέσο μέτρησης της υγείας των φυτών και δίνεται από τον τύπο (β).

[NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)] (β)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10 όταν το φυσικό ηλιακό φως φωτίζει τα φύλλα σε ένα υγιές φυτό ή δέντρο, όπως δείχνει το δέντρο στα αριστερά, η κόκκινη ζώνη απορροφά περισσότερο φως και αντανακλά περισσότερο φως NIR παράγοντας μεγαλύτερη τιμή NDVI. Αντίθετα, το δέντρο στα δεξιά απορροφά λιγότερο κόκκινο φως και αντανακλά λιγότερο NIR με αποτέλεσμα χαμηλότερη τιμή NDVI.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Οι παρατηρήσεις στο υπέρυθρο φάσμα έχουν γίνει από παρατηρητήρια εδάφους από τη δεκαετία του 1960. Η NIR μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί με φασματόμετρα και με πολλούς τύπους αισθητήρων εικόνας. Σε αυτή την έρευνα αντικείμενα φωτογραφήθηκαν, εξετάστηκαν και αναλύθηκαν ανάλογα με την ανακλαστικότητά τους και την ακτινοβολία τους στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Το κύριο υπόβαθρο της μελέτης είναι αφενός η ανάκλαση της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας και αφετέρου η απορρόφηση και η εκπομπή της ακτινοβολίας NIR λόγω της θερμικής ενέργειας των σωμάτων.



Σχήματα 11 & 12: Τιμές NDVI για διαφορετικά είδη βλάστησης, ανέφελο ουρανό και κτήριο.

Τιμές NDVI	Ξηρή/νεκρή βλάστηση	Υγιής βλάστηση	Άλλα(π.χ. ουρανός, κτίρια)
0,47		X	
0,27		X	
0,25		X	
-0,11	X		
-0,13	X		
-0,15			X
-0,18			X

Πίνακας 1:Αξιολόγηση των τιμών NDVI και συμπεράσματα σχετικά το είδος της βλάστησης

Στη συγκεκριμένη έρευνα πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα βήματα:

1) Έγινε λήψη δύο φωτογραφιών στο ορατό φως και στο εγγύς υπέρυθρο σε αστικό τοπίο.

2) Μετρήθηκαν οι δείκτες NDVI σε διαφορετικά σημεία του χώρου στο πρόγραμμα Photoshop με βάση τη φωτεινότητα για την ασπρόμαυρη εικόνα και τη φωτεινότητα μόνο στο κόκκινο φάσμα για την έγχρωμη εικόνα, σύμφωνα με τα Σχήματα 11 και 12.

3) Αξιολόγηση των μετρήσεων για να συμπεράνουμε αν η βλάστηση στα υπό μελέτη σημεία είναι υγιής ή όχι (ξερή). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 1.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όταν το φως προσπίπτει σε ένα φύλλο, μέρος του φάσματος του φωτός ανακλάται. Η ανακλαστικότητα των φυτών οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες του φυλλώματος τους, στην εσωτερική τους δομή και στα βιοχημικά συστατικά που περιέχουν. Έτσι, η ανάλυση του φωτός που ανακλάται μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση τόσο της βιομάζας όσο και της φυσιολογικής κατάστασης ενός φυτού, δηλαδή της φωτοσυνθετικής του κατάστασης. Μια τέτοια εκτίμηση έχει μεγάλη αξία.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΙ ΦΥΛΛΩΣΙΑΣ

Η ανακλαστικότητα των φύλλων του φυτού μπορεί να ανιχνευθεί χρησιμοποιώντας φασματογράφους στενού εύρους ζώνης που μετράνε στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Στο ορατό φάσμα (400-700 nm), η ανάκλαση των φύλλων είναι χαμηλή λόγω της απορρόφησης από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές, οι οποίες είναι κυρίως χλωροφύλλη και τα καροτενοειδή. Στην περιοχή της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (700-1100 nm), όπου δεν υπάρχουν ισχυρά χαρακτηριστικά απορρόφησης, πράγμα που σημαίνει ότι η απορρόφηση από φωτοσυνθετικές χρωστικές ουσίες μειώνεται, το μέγεθος ανακλαστικότητας κυριαρχείται από δομικές ασυνέχειες που υπάρχουν στο φύλλο. Στο επίπεδο της φυλλωσιάς, η φασματική ανακλαστικότητα είναι ένας συνδυασμός ανάκλασης εδάφους και βλάστησης και η στάθμιση για οποιονδήποτε από αυτούς τους δύο παράγοντες εξαρτάται από εξωτερικές παραμέτρους όπως ο φωτισμός (π.χ. η θέση του ήλιου ή η γωνία θέασης) ή η δομή της φυλλωσιάς.

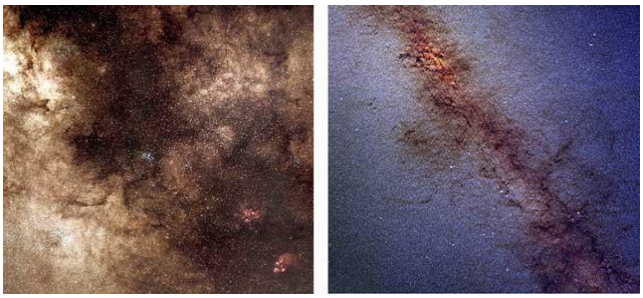
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΧΡΩΣΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Η σύνθεση φωτοσυνθετικών χρωστικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της φυσιολογικής κατάστασης ενός φυτού. Η ανάκλαση θα μπορούσε να παράσχει ένα γρήγορο και εύκολο εναλλακτικό μέσο για την αξιολόγηση της χρωστικής σύνθεσης για τον προσδιορισμό της

κατάστασης της θρέψης των φυτών (με αξιολόγηση της χλωροφύλλης) και της «στρεσαρισμένης» βλάστησης (με αξιολόγηση των καροτενοειδών και της χλωροφύλλης a ή και της φωτοσυνθετικής αποτελεσματικότητας (με αξιολόγηση της ξανθοφύλλης). Επιπλέον, έχουν ενσωματωθεί δευτερογενείς τεχνικές για να ελαχιστοποιηθούν οι μεταβολές ως αποτέλεσμα της ανάκλασης του εδάφους. Έτσι, το «red edge» - το μήκος κύματος της μέγιστης κλίσης στην αύξηση της ανάκλασης από το κόκκινο στο εγγύς υπέρυθρο έχει βρεθεί ότι είναι ένας καλός δείκτης της περιεκτικότητας χλωροφύλλης στα φύλλα, και επίσης (πιο αμφιλεγόμενα) στο επίπεδο της φυλλωσιάς. Μέρος της φωτεινής ενέργειας που απορροφάται από τη χλωροφύλλη για φωτοσύνθεση χάνεται ως θερμότητα ή φθορισμό και οι μεταβολές στον φωτοσυνθετικό ρυθμό προκαλούν συμπληρωματικές αλλαγές στην εκπομπή φθορισμού ή τη διάχυση της θερμότητας. Έτσι, η μέτρηση αυτών των δύο διεργασιών παρέχει μία έμμεση εκτίμηση της φωτοχημικής απόδοσης, άρα και της υγείας των φυτών. Ο φθορισμός χρησιμοποιείται ήδη ευρέως ως διαγνωστικό εργαλείο για την καταπόνηση των φυτών και τη φωτοσυνθετική τους απόδοση. Λόγω του σχετικά μικρού ποσοστού ανάκλασης, η εφαρμογή του δείκτη φωτοχημικής ανάκλασης απαιτεί προσεκτική προσοχή στις συνέπειες συγχύσεως της δομής της φυλλωσιάς, του ετερογενούς τοπίου και των ατμοσφαιρικών παραγόντων. Η ευαισθησία της φυλλωσιάς στην ακτινοβολία της φασματικής περιοχής των 700 nm έως 1000 nm φαίνεται να προκαλείται από την ικανότητα της ακτινοβολίας σε αυτό το μήκος κύματος να διεισδύει στη φυλλωσιά σε αντίθεση με άλλα μακρύτερα μήκη κύματος απορρόφησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Οι εικόνες που καταγράφηκαν στο εγγύς υπέρυθρο εμφανίζονται ως "λευκό", καθιστώντας έτσι δυνατό να καθοριστεί αν η ληφθείσα εικόνα αντιστοιχεί σε υγιή ή όχι βλάστηση. Η φασματική ανακλαστικότητα της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας μπορεί να παράσχει έναν εναλλακτικό τρόπο εκτίμησης της χρωστικής σύνθεσης για τη διάγνωση πιθανών καταστάσεων στρες ή για τον προσδιορισμό της ποσότητας ζημιών που προκλήθηκαν από παράσιτα και παθογόνα. Οι επιστήμονες μπορούν επομένως να μελετήσουν τις ασθένειες των φυτών όπου υπάρχει μια αλλαγή στη χρωστική ή την κυτταρική δομή ή ακόμη και να αναγνωρίσουν διαφορετικούς τύπους φυτών σύμφωνα με τα διαφορετικά πρότυπα απορρόφησης και ανάκλασης της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας. Πιο περίπλοκες χρήσεις γίνονται με τη βοήθεια της ακτινοβολίας NIR. Ανάμεσά τους υπάρχει η πρόβλεψη της γεωργικής παραγωγικότητας από μια σειρά δορυφόρων της Γεωλογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (USGS) και της NASA που μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες να εκτιμήσουν την υγεία των καλλιεργειών τους. Σε μια πολύ μεγαλύτερη κλίμακα χρήσεων, η εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της διαφοράς υψομέτρου των νεφών του Δία ανάλογα με τη διαφορετική τους ποσότητα ανακλώμενης ακτινοβολίας NIR ή ακόμη και την ανίχνευση ουράνιων αντικειμένων (όπως στα Σχήματα 13 και 14) όπως κόκκινους νάνους και κόκκινους γίγαντες ή εξωπλανήτες λόγω της εκπεμπόμενης θερμότητας. Το εγγύς υπέρυθρο έχει ένα ευρύ φάσμα χρήσεων και γίνονται νέες εφαρμογές που βασίζονται σε αυτό.



Σχήματα 13 & 14: Το κέντρο του Γαλαξία στο ορατό (αριστερά) και στο εγγύς υπέρυθρο (δεξιά).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Filella, I. and Peñuelas, J. (1994) «The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status» *Int. J. Remote Sensing* 15;1459–1470

[2] HyperPhysics, Georgia State University

http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/wien.html#c4

Lichtenthaler, H.K. and Miehé, J.A. (1997) «Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress» *Trends Plant Sci*8; 316–320

[3] Light and photosynthetic pigments

https://www.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments

[4] National Aeronautics and Space Administration, Science Mission Directorate (2010) «Reflected Near-Infrared Waves»

[5] NDVI DEFINITIONS (RED, BLUE, ENHANCED)

http://www.senteksystems.com/2015/11/23/ndvi-definitions-red-blue-enhanced/

[6] P*eñuelas Josep et al* «Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status» *Trends in Plant Science* , Volume 3, Issue 4, 151-156

[7] Remote sensing and GIS in Agriculture

http://www.seos-project.eu/modules/agriculture/agriculture-c01-s02.html