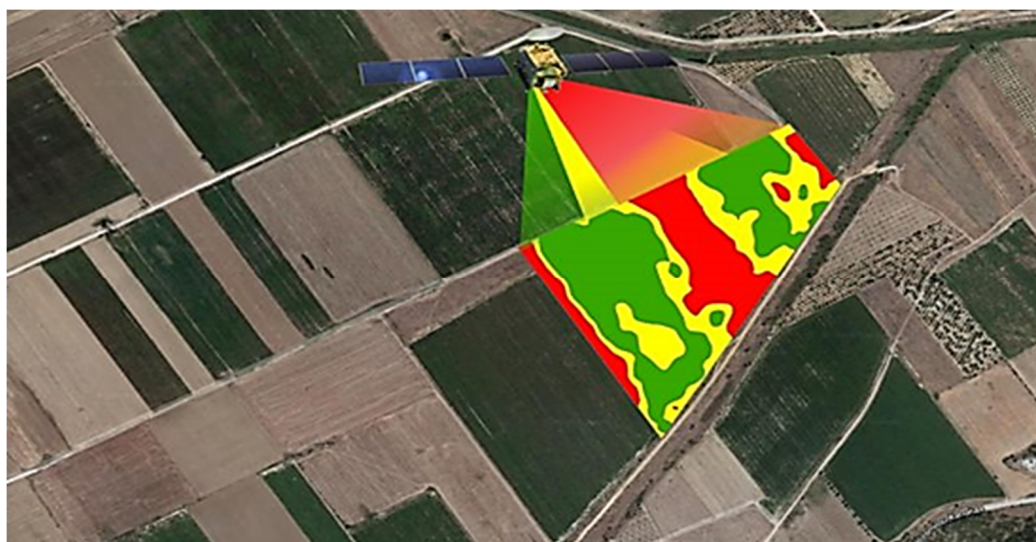




Πανεπιστήμιο Πατρών
Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φασματικοί δείκτες βλάστησης και οι εφαρμογές τους στη γεωργία



ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων:

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΛΑΜΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

Αμαλιάδα, 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά, τον επιβλέποντα καθηγητή μου τον Δρ. Νικόλαο Μαλάμο Αναπληρωτή Καθηγητή για την στήριξη και καθοδήγηση καθώς και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Δημήτριο Κουλούρη για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας, όσο και της συγγραφικής διαδικασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Γεωπονίας, τους καθηγητές, αλλά και τους ανθρώπους που εργάζονται σε αυτό, που καταβάλουν προσπάθεια καθημερινά, ώστε να βοηθήσουν τους φοιτητές και που με στήριξε σε αυτήν μου την προσπάθεια και με βοήθησε να ολοκληρώσω με επιτυχία αυτόν τον κύκλο των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ	9
1.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στη Γεωργία	12
2. ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ	15
2.1 Δορυφόροι	15
2.1.1 Landsat/Landsat 8	17
2.1.2 Sentinel 2A/B	19
2.1.3 Εναρμονισμένο πρόγραμμα Landsat/Sentinel-2 (HLS)	20
2.1.4 Planet Doves	21
2.2 Αισθητήρες	22
2.3 Δορυφορική εικόνα	24
3. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ	27
3.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	27
3.2 Εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία	28
3.3 Φασματική ανάκλαση και εκπομπή ακτινοβολίας	28
3.4 Η ανακλαστικότητα της NIR στα φυτά	29
3.5 Υπερφασματική και Πολυφασματική απεικόνιση	30
3.6 Περιοχή-Ζώνη Red Edge	30
4. ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	32
4.1 Δείκτες που προκύπτουν από λόγους των φασματικών καναλιών	33
4.1.1 RS (RATIO INDEX)	33
4.1.2 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	34
4.1.3 NDWI (Normalized difference water index)	38
4.1.4 NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	40
4.1.5 GNDVI (Green-Normalized Difference Vegetation Index)	41
4.1.6 RE-NDVI (Red Edge-Normalized Difference Vegetation Index)	42
4.1.7 SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	42
4.1.8 EVI (Enhanced Vegetation Index)	43
4.1.9 TVWSI (Temperature Vegetation Water Stress Index)	45
4.1.10 CVI (chlorophyll vegetation index):	46
4.1.11 RCI (Red Chlorophyll Index)	47
4.1.12 GCI (Green Chlorophyll Index)	48
4.1.13 SIPI (Structure Intensive Pigment Vegetation Index)	48
4.1.14 ARVI (Atmospherically resistant vegetation index)	49
4.1.15 TVDI (Temperature vegetation Dryness index)	49
4.2 Δείκτες που μετρούν την ραδιομετρική απόσταση από τη γραμμή εδάφους (distance-based) ..	50
4.2.1 PVI (Perpendicular Vegetation Index)	51

4.2.2 OSAVI (Optimized Soil Adjusted vegetation index).....	52
4.2.3 MSAVI-2 (Modified Soil-Adjusted vegetation index).....	52
4.2.4 Δείκτης WDVI (Weighted Difference Vegetation Index).....	54
4.3 LAI (Leaf Area Index)	54
5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	57
5.1 Παρακολούθηση καλλιέργειας και απόδοσης. (Crop Monitoring and Yield).....	58
5.2 Διαχείριση λίπανσης (Nutrient Management).....	59
5.3 Διαχείριση άρδευσης και εξατμισοδιαπνοή (Irrigation Water Management & E.T.)	60
5.4 Εδαφική υγρασία και υδατικό στρες. (Soil Moisture & Water Stress)	63
5.5 Διαχείριση ασθενειών και εντόμων (Crop Disease Management & Insect detection)	65
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα. 1 Χάρτης παραλλακτικότητας δεδομένων σε επίπεδα (Φουντάς & Γέμος, 2015).....	13
Εικόνα. 2_Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα διάφορα φάσματα.	27
Εικόνα. 3_ Αντανακλώμενα μήκη κύματος βλάστησης των φυτών κ εδάφους.	29
Εικόνα. 4_Διαφορά μεταξύ Υγειούς και Μη Βλάστησης.....	35
Εικόνα. 5_Καμπύλες φασματικής ανάκλασης για διαφορετικά καλύμματα εδάφους, με διαστήματα φασματικών ζωνών. (Jorge et al, 2019).....	36
Εικόνα. 6_Απεικόνιση τιμών NDVI σε καλλιέργεια.	37
Εικόνα. 7_Αποίκνωση δείκτη SAVI για διαφορετικά στάδια ανάπτυξης.....	43
Εικόνα. 8_Απεικόνιση EVI με βάση τα δεδομένα MODIS.	44
Εικόνα. 9_Εννοιολογικό μοντέλο.	45
Εικόνα. 10_Παράδειγμα γραμμής εδάφους μεταξύ της κόκκινης και κοντινής υπέρυθρης ανάκλασης.....	50
Εικόνα. 11_Γράφημα παράστασης γραμμής εδάφους μεταξύ NIR/RED.....	53
Εικόνα. 12_LST–NDVI τραπεζοειδές χώρος	65

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

VI - Vegetation Index

RS - Remote Sensing

GPS - Global Positioning System

GIS - Geographic Information System

LWIR - Long Wave Infrared

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

VIIRS - visible infrared imaging radiometer suite

AVHRR - (Advanced Very High Resolution Radiometer.

NASA - National Aeronautics and Space Administration

EROS - Earth Resource Observation and Science

US.G.S. - United States Geological Survey

TIRS - Thermal Infrared Sensor

OLI - Operational Land Imager

ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus

MSI - Multi-Spectral Imager

EOS - Earth Observation System

EC - European Commission

ESA - European Space Agency

UAV - unmanned aerial vehicle

VRT - Variable Rate Technology

ISCCP - International Satellite Cloud Climatology Project

LST - Land Surface Temperature

nm - nanometer

ET - Evapotranspiration

ET_o - Reference evapotranspiration

K_{cb} - basal crop coefficient

K_c - single crop coefficient

CWR - Crop water requirements

PAR - Photosynthetically active radiation

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για παγκόσμια ολοκληρωμένη, συστηματική και βιώσιμη γεωργική παραγωγή είναι πιθανό να συνεχίσει να αυξάνεται ενόψει των αναμενόμενων συχνότερων και εντονότερων ακραίων κλιματικών φαινομένων, και της αυξανόμενης ζήτησης τροφίμων που οδηγείται και οφείλεται από την αύξηση του πληθυσμού και την οικονομική ανάπτυξη.

Η συνεχής και αυξανόμενη ανάπτυξη και πρόοδος της Τηλεπισκόπησης (RS) σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και Συστήματα Προσδιορισμού Θέσης (GPS) στον γεωργικό τομέα είναι ικανή να εντοπίζει τη μεταβλητότητα του εδάφους και των παραμέτρων/μεταβλητών των καλλιεργειών εντός του αγρού και να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για πρακτικές διαχείρισης και στις εφαρμογές των καλλιεργειών.

Οι δείκτες βλάστησης που παρέχονται από διάφορες πλατφόρμες (satellite, airborne, ground-based) και τους αισθητήρες τους έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν ως κοινό εργαλείο για τη διαχείριση των γεωργικών και φυσικών πόρων και των παραμέτρων/μεταβλητών με σκοπό την μέγιστη και βέλτιστη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των εφαρμογών για τις καλλιέργειες, παράλληλα μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα από την περιττή και αλόγιστη χρήση των λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων.

ABSTRACT

The need for comprehensive, systematic and sustainable global agricultural production is likely to continue to grow in the face of anticipated more frequent and intensely extreme climate events and the increasing demand for food driven by population growth and economic development.

The continuous and growing development and progress of remote sensing in combination with technologies such as GIS and GPS in the agriculture field is capable to detect the variability of soil and parameters/variables within crops and providing useful information for management practices and crop applications as well.

Vegetation Indices derived by various platforms (satellite, UAV, ground-based) and their sensors have the potential to be applied as a common tool for agriculture and nature resources management and parameters/variables for aiming of optimal and maximum exploitation capability of crops applications, alongside reducing the environmental footprint from unnecessary and inconsiderate use of fertilizers and crop chemicals.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργικός τομέας αποτελεί κινητήρια δύναμη της οικονομικής ανάπτυξης για πολλά έθνη, παρέχει τις πιο βασικές ανάγκες της ανθρωπότητας: επισιτισμό/τρόφιμα και φυτικές ίνες. Οι τεχνολογικές αλλαγές κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, έχουν μεταμορφώσει το πρόσωπο της γεωργικού τομέα

Οι βελτιωμένες ποικιλίες καλλιεργειών, τα συνθετικά λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα και η άρδευση κατά τη διάρκεια της δεκαετία του 1960–1980, βελτιώσαν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και την επισιτιστική ασφάλεια, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Κατά συνέπεια, παρά τον διπλασιασμό του πληθυσμού και τον τριπλασιασμό της ζήτησης τροφίμων από τη δεκαετία του 1960, ο παγκόσμιος γεωργικός τομέας ήταν σε θέση να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις με μόνο 30% επέκταση στην καλλιεργούμενη έκταση. Η ζήτηση τροφίμων και γεωργικών προϊόντων προβλέπεται να αυξηθεί περαιτέρω κατά περισσότερο από 70% έως το 2050.

Δεδομένης της περιορισμένης διαθεσιμότητας καλλιεργήσιμων εκτάσεων, σημαντικό μέρος αυτής της αυξημένης ζήτησης θα καλυφθεί μέσω της εντατικοποίησης του γεωργικού τομέα, , δηλαδή αυξημένη χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων, νερού και άλλων εισροών. Ωστόσο, η εντατικοποίηση της χρήσης των γεωργικών εισροών προκαλεί επίσης υποβάθμιση του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της εξάντλησης των υπόγειων υδάτων, των μειωμένων επιφανειακών ροών και του ευτροφισμού.

Η υπερβολική ή/και αναποτελεσματική χρήση των φυσικών πόρων (π.χ. έδαφος και νερό), των λιπασμάτων και των φυτοφαρμάκων για τη γεωργική παραγωγή προκαλούν οικονομικές απώλειες, καθώς και αυξημένες απώλειες νερού και θρεπτικών ουσιών από τη γεωργία που οδηγούν σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Για ένα οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμο σύστημα παραγωγής, υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης τεχνολογιών και τεχνικών που μπορούν να αυξήσουν την παραγωγή καλλιεργειών μέσω της αυξημένης αποδοτικότητας της χρήσης των εισροών και της μείωσης των περιβαλλοντικών απωλειών (Sishodia RP et al., 2020 Giller et al., 2021).

Οι στρατηγικές γεωργικής παραγωγής έχουν αλλάξει σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης, των οικονομικών αποφάσεων για μείωση των εισροών και μεγιστοποίηση των κερδών και μέσω περιβαλλοντικών κατευθυντήριων γραμμών για την επίτευξη καλύτερης ασφαλέστερης και αποτελεσματικότερης χρήσης των γεωργικών χημικών ουσιών. Οι τρέχουσες τεχνολογίες που διατίθενται στους γεωργούς τους επιτρέπουν να επιλέγουν την πιο κερδοφόρα στρατηγική διαχείρισης που εκτείνεται από το χρονοδιάγραμμα της φύτευσης έως τις εφαρμογές μεταβλητής δόσης. μέσω της γεωργίας ακριβείας. Τα συστήματα γεωργικής παραγωγής είναι εγγενώς μεταβλητά λόγω της χωρικής διακύμανσης των ιδιοτήτων του εδάφους, η τοπογραφία και το κλίμα είναι χωρικά μεταβλητά.

Για την επίτευξη του στόχου των βιώσιμων συστημάτων καλλιέργειας, η μεταβλητότητα πρέπει να εξετάζεται τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, επειδή οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των καλλιεργειών έχουν διαφορετική

χωρική και χρονική συμπεριφορά. Η πρόοδος σε τεχνολογίες όπως τα Παγκόσμια Συστήματα Εντοπισμού Θέσης (GPS), τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και η τηλεπισκόπηση έχουν δημιουργήσει τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η χωρική μεταβλητότητα που υπάρχει στον τομέα και διαχείρισής του με κατάλληλες εξειδικευμένες πρακτικές πεδίου (Ghosh et al, 2022).

Η αξιολόγηση των γεωργικών αποφάσεων μπορεί να δομηθεί γύρω από τη χρήση της χωρικής και χρονικής διακύμανσης εντός των αγρών. Τα οικονομικά και ταχεία μέσα αναγνώρισης της χωρικής μεταβλητότητας λαμβάνονται με τη χρήση γεωτεχνολογίας (εικόνες τηλεπισκόπησης καλλιέργειας, επεξεργασία εικόνας, προσέγγιση μοντελοποίησης GIS και χρήση GPS) και τεχνικές εξαγωγής δεδομένων για την ανάπτυξη μοντέλων (Panda et al, 2010, Hatfield et al, 2010). Οι φωτογραφίες από μεγάλη απόσταση, μια παλιά τεχνολογία που έχει γίνει πρόσφατα ευρέως διαθέσιμη μέσω της προόδου στις δορυφορικές δυνατότητες μαζί με την ανάπτυξη και βελτίωση των αισθητήρων, σε συνδυασμό με την υψηλή ανάλυση τεχνικών επεξεργασίας αποτελεί βασικό παράγοντα για να θεσπιστεί περισσότερη ακρίβεια (Basso et al, 2004).

Στον τομέα των εφαρμογών τηλεπισκόπησης, οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει δείκτες βλάστησης (VI) Vegetation Index για ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των φυτικών καλυμμάτων χρησιμοποιώντας φασματικές μετρήσεις. Οι φασματικοί δείκτες βλάστησης, είναι μαθηματικοί ποσοτικοί συνδυασμοί της απορρόφησης και σκέδασης των τιμών των φυτών σε διαφορετικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η τηλεπισκόπηση μέσω των διαφόρων VIs μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την ενίσχυση την εκτίμησης των διαφορετικών γεωπονικών παραμέτρων καθώς η φασματική απόκριση της φυτικής έκτασης παρουσιάζει ένα πολύπλοκο μείγμα βλάστησης, φωτεινότητας του εδάφους, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σκιάς, χρώματος εδάφους και υγρασίας, επιπλέον, οι VI επηρεάζονται από χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της ατμόσφαιρας. Πάνω από σαράντα δείκτες βλάστησης έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, προκειμένου να ενισχυθεί η απόκριση της βλάστησης και να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των παραπλεύρων παραγόντων Αυτοί οι δείκτες έχουν εφαρμοστεί ευρέως στο πλαίσιο εφαρμογών RS χρησιμοποιώντας διαφορετικές αερομεταφερόμενες, δορυφορικές και με βάση το έδαφος πλατφόρμες σε συνδυασμό με την ανάπτυξη τεχνολογίας αισθητήρων (Hatfield et al, 2010, Xue et al, 2017).

1. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ

Ο όρος της τηλεπισκόπησης επινοήθηκε το 1960. Η έννοια της τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει βασικά στάδια

- Τη πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ΗΜΕ), ο ήλιος ή ο πομπός είναι η πηγή ενέργειας.
- Μετάδοση της ενέργειας από τις πηγές στην επιφάνεια της Γης (καθώς και απορρόφηση & σκέδαση από την ατμόσφαιρα).
- Αλληλεπίδραση της ενέργειας με τα αντικείμενα στην επιφάνεια της Γης
- Μετάδοση της ενέργειας στους αισθητήρες τηλεπισκόπησης.
- Δημιουργία δεδομένων σε εικονογραφική ή/και ψηφιακή μορφή.
- Ανάλυση, ερμηνεία και χρήση δεδομένων.
- Λήψη και εφαρμογή αποφάσεων με βάση τα δεδομένα.

(Ray, 2016).

Η τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) είναι η επιστήμη της απόκτησης, λήψης και ερμηνείας πληροφοριών από απόσταση στη Γη, χρησιμοποιώντας αισθητήρες οι οποίοι δεν βρίσκονται σε φυσική επαφή με το αντικείμενο που παρατηρείται αλλά βρίσκονται σε μεταβλητές αποστάσεις σε συνδυασμό με ανάλογο εξοπλισμό τεχνολογικής ανάπτυξης (Romano, 2020).

Η τηλεπισκόπηση συνήθως περιορίζεται σε μεθόδους ανίχνευσης και μέτρησης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ορατής και μη ορατής ακτινοβολίας που αλληλοεπιδρά με επιφανειακά υλικά και την ατμόσφαιρα. Παρατηρήθηκε ότι κάθε αντικείμενο έχει διαφορετική αλληλεπίδραση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το οποίο οδηγεί στη διάκριση των αντικειμένων μεταξύ τους. Αυτή η διάκριση ονομάζεται φασματική υπογραφή του αντικειμένου (Sishodia et al, 2020).

Οι τεχνολογίες RS παρέχουν ένα διαγνωστικό εργαλείο που μπορεί να χρησιμεύσει ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης στις κοινές ανάγκες και απειλές που αντιμετωπίζουν οι αγρότες στις καλλιέργειες, στο τομέα της γεωργίας επιτρέποντας στους διαχειριστές των καλλιεργειών και/ή τους αγρότες να παρεμβαίνουν νωρίς στην αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων πριν εξαπλωθούν στην καλλιέργεια με αρνητικές συνέπειες στη παραγωγικότητα της καθώς και στον προγραμματισμό των αναγκών σε άρδευση και ανάγκης λίπανσης ή θρεπτικών στοιχείων, ώστε να διασφαλιστεί η υγεία των καλλιεργειών. Για την εκτέλεση της διαδικασίας σε διαφορετικές περιοχές επιφάνειας Γης που κυμαίνεται σε μεγέθη και είδη καλλιεργειών, χρησιμοποιούνται διάφορα είδη και συνδυασμός σε πλατφόρμες και αισθητήρες.

Οι τεχνολογίες RS και GIS έχουν μεγάλη χρησιμότητα να παρέχουν δεδομένα στους διαχειριστές καλλιεργειών και αγρότες που βοηθούν στην παρακολούθηση των καλλιεργειών και στο σχεδιασμό της αποτελεσματικής χρήσης των φυσικών πόρων σε εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο. Όταν αυτά τα δεδομένα οργανώνονται σε ένα GIS γίνονται ένα σημαντικό εργαλείο που βοηθά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις καλλιέργειες και τις γεωργικές στρατηγικές (Zhu et al, 2017). Με τις εξελίξεις και ανάπτυξη στις τεχνολογίες αισθητήρων, διαχείρισης και ανάλυσης δεδομένων, τη

δεδομένη στιγμή αρκετές επιλογές RS είναι διαθέσιμες στη γεωργική κοινότητα (Khanal et al, 2020).

Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης βασίζεται στη χρήση διαφορετικών τύπων αισθητήρων, οι οποίοι περιλαμβάνονται σε τρεις θεμελιώδης και ευρείες κατηγορίες πλατφορμών τηλεπισκόπησης Δορυφορικοί αισθητήρες, αυτόνομα εναέρια οχήματα (UAV) και επίγειοι αισθητήρες. Για τη παρατήρηση της επιφάνειας και των συνθηκών της ατμόσφαιρας της Γης (Liaghat & Balasundram 2010). Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω, όπως οι αισθητήρες εδάφους και προκύπτουν σε διαφορετικές διαμορφώσεις. Υπάρχουν φορητοί αισθητήρες εδάφους, υπάρχουν αισθητήρες εδάφους τοποθετημένοι σε όχημα, όπως αυτά που τοποθετούνται σε γεωργικούς ελκυστήρες και υπάρχουν ελεύθεροι αισθητήρες εδάφους που συνήθως τοποθετούνται σε στύλους. Οι αισθητήρες εδάφους χρησιμοποιούνται συνήθως για τον έλεγχο κατάστασης της υγείας του εδάφους, για τον έλεγχο των επιπέδων θρεπτικών ουσιών, της περιεκτικότητας σε υγρασία στο έδαφος και των τοπικών συνθηκών και επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της αλατότητας του εδάφους (Zhu et al, 2017).

Οι εναέριοι αισθητήρες έχουν γίνει αρκετά προσιτοί και προσβάσιμοι λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας τους, της δυνατότητας και ικανότητας άμεσης ανίχνευσης και αντιμετώπισης των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν εν τη γενέσει τους. Αυτοί οι εναέριοι αισθητήρες μπορούν να τραβήξουν εικόνες υψηλής ανάλυσης της Γης, καθώς και συλλογή δεδομένων διαφορετικών αισθητήρων πετώντας σε χαμηλά υψόμετρα για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους επάνω από καλλιέργειες.

Τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω αυτών των αισθητήρων μπορούν να βοηθήσουν στην ανίχνευση ζιζανίων, την εκτίμηση επιπέδου ωρίμανσης της παραγωγής και άλλες λεπτομερείς αναλύσεις, όπως η μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη και ανίχνευσης ασθενειών και εντομών. Ενώ έχουν καταστεί ευρέως προσβάσιμα και προσιτά, εξακολουθούν να καθίστανται ακατάλληλα σε έντονες συνθήκες όπως ισχυρούς ανέμους και συννεφιά, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα της χρήσης τους.

Η πιο απομακρυσμένη από όλες τις πλατφόρμες αισθητήρων για απεικόνιση είναι οι δορυφορικοί αισθητήρες. Η χρήση δορυφορικής απεικόνισης στη γεωργία βοηθά στην κάλυψη μιας τεράστιας έκτασης Γης και μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της κατάστασης των καλλιεργειών. Οι δορυφορικοί αισθητήρες μπορούν να καλύψουν μια μεγάλη ποικιλία ικανοτήτων. Καθώς μπορούν να παρακάμψουν τις κλιματικές συνθήκες, είναι ιδανικοί για την παρατήρηση φυτών και δένδρων. Μετά από ένα συμβάν φυσικής καταστροφής, μπορεί να βοηθήσει στον υπολογισμό της απώλειας και να βοηθήσει στην εκτίμηση της απόδοσης των καλλιεργειών. Εκτός από τους αισθητήρες, το GPS από τους δορυφόρους παρέχει ακριβείς πληροφορίες τοποθεσίας που είναι θεμελιώδεις στις νέες γεωργικές καινοτομίες όπως αυτόματος γεωργικός εξοπλισμός και οχήματα.

Εντοπίζοντας τα χρώματα σε ένα πεδίο καλλιεργειών, οι αισθητήρες μεταδίδουν πληροφορίες που μπορούν να βοηθήσουν στην εξαγωγή της κατάστασης της υγείας ενός φυτού. Εξετάζοντας το χρώμα του φυτού μέσω δεδομένων ακριβείας που παρέχονται από τους αισθητήρες, τα επίπεδα χλωροφύλλης ενός φυτού μπορούν να μετρηθούν μέσω των οποίων οι αγρότες μπορεί να διαπιστώσουν οποιαδήποτε έλλειψη θρέψης ή πρόβλημα με την υγεία ενός φυτού. (<https://geopard.tech/blog/types-of-remote-sensing-in-agriculture/>)

Η ανάκλαση του φωτός από τα φύλλα αλλάζει στο υπέρυθρο φάσμα εάν το φύλλο έχει υποστεί εσωτερική βλάβη, αυτό μπορεί επίσης να δείξει εάν δεν υπάρχει επαρκής περιεκτικότητα σε νερό. Ομοίως, πολλοί δείκτες βλάστησης έχουν αναπτυχθεί και δοκιμασθεί για την ικανότητά τους δια των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης εφαρμογών στον αγροτικό τομέα, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης μεταβλητής δόσης λιπασμάτων, του προγραμματισμού άρδευσης, εντοπισμού εντομών και ελέγχου ασθενειών, της χαρτογράφησης ζιζανίων και της πρόβλεψης απόδοσης (Sishodia et al, 2020). Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης που αποκτώνται από αισθητήρες σε πλατφόρμες τηλεπισκόπησης απαιτούν επεξεργασία πριν τα δεδομένα μπορούν να είναι χρησιμοποιήσιμα από τους ερευνητές, χρήστες και διαχειριστές καλλιέργειας. (<https://gisgeography.com/remote-sensing-earth-observation-guide/>)

Αρκετά εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων είναι διαθέσιμα στο υποσύνολο για μετασχηματισμό, απεικόνιση και εξαγωγή σε διάφορες μορφές αρχείων. Μόλις υποβληθούν σε επεξεργασία τα δεδομένα από τον αντίστοιχο εξοπλισμό σε αξιοποιήσιμες πληροφορίες. Για την ανάλυση διαφορετικών πτυχών της καλλιέργειας στις διάφορες εφαρμογές, οι διαχειριστές καλλιέργειας μπορεί να προβούν σε λήψη αποφάσεων και διαχείρισης.

Ωστόσο ορισμένες πλατφόρμες αισθητήρων μετατρέπουν απευθείας τα δεδομένα που λαμβάνονται με αποτέλεσμα να γίνεται αμέσως η λήψη αποφάσεων και διαχείρισης, παρέχοντας πλεονέκτημα. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση αλλαγών στις καλλιέργειες ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη παραγωγή. Η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή διαφόρων αναλύσεων και την υλοποίηση εφαρμογής ανάλογων μέτρων (Khanal et al , 2020).

Η τηλεπισκόπηση έχει πιθανές εφαρμογές σε σχεδόν κάθε πτυχή του τομέα της γεωργίας, από την προετοιμασία της Γης μέχρι τη συγκομιδή. Η αφθονία της υψηλής χωρικής ανάλυσης πολλαπλών-χρονικά δορυφορικών δεδομένων μαζί με τα χαμηλού κόστους UAV και εμπορικά διαθέσιμοι επίγειοι αισθητήρες έχουν αλλάξει την προσέγγιση στο τομέα της γεωργίας.

Δεδομένου ότι η τηλεπισκόπηση είναι ένας μη καταστροφικός τρόπος παρακολούθησης της βλάστησης χωρικά και χρονικά,, εμφανίζεται ως αναπόφευκτο εργαλείο για την επίτευξη των στόχων στο αγροτικό τομέα και τις εφαρμογές του. Μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση χρήσης της επιφάνειας της Γης και παράλληλα πιο φιλική προς το περιβάλλον αντιμετώπιση, στην παρακολούθηση της χρήσης της γεωργικής Γης, στην πρόβλεψη της παραγωγής καλλιεργειών εντός της περιόδου, και στην παροχή υπηρεσιών του οικοσυστήματος που σχετίζονται με το έδαφος ή τους υδάτινους πόρους, όπως με τη βιοποικιλότητα των φυτών, οι εφαρμογές σχετίζονται με διάφορες απαιτήσεις των αγροτών και καλλιεργειών που περιλαμβάνουν διαφορετικές χωρικές κλίμακες και διαφορετικές χρονικές κλίμακες από σε πραγματικό χρόνο έως δεκαετίες, με διάφορα επίπεδα ακρίβειας και εκ των προτέρων γνώση σχετικά με την κατάσταση των καλλιεργειών.

Αυτό επηρεάζει άμεσα τις επιλογές λύσεων που βασίζονται στην τηλεπισκόπηση όσον αφορά την απόκτηση δεδομένων (Weiss et al, 2020). Οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης έχουν εξελιχθεί με την πάροδο των ετών, και την παρόν στιγμή ο γεωργικός τομέας έχει πολλές επιλογές όσον αφορά και τις πλατφόρμες και τους αισθητήρες όπου συλλέγονται διάφορα γεωργικά δεδομένα. Με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης, ο γεωργικός τομέας μπορεί να ανιχνεύσει και να ποσολογήσει την υγεία των γεωργικών συστημάτων, βοηθώντας να λάβουν διαχειριστικές αποφάσεις που

μπορούν να αυξήσουν τα κέρδη των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, μειώνοντας παράλληλα τα έξοδα και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που καθοδηγούνται από τη γεωργία (Khanal et al , 2020). Κοινή προσδοκία από την τηλεπισκόπηση είναι η ικανότητα απόκτησης δεδομένων σε υψηλές αναλύσεις (χωρικές, φασματικές, ραδιομετρικές και χρονικές) με χαμηλό κόστος, με υποστήριξη ανοικτών πηγών και για τη δημιουργία νέων εφαρμογών με την ενσωμάτωση δεδομένων από δορυφορικούς/εναέριους και επίγειους αισθητήρες από κοινού (Sishodia et al, 2020).

Με τη διαθεσιμότητα τέτοιων αισθητήρων και πλατφορμών, είναι σημαντικό για τη γεωργικό τομέα να αναπτύξει καλύτερη κατανόηση των ευκαιριών και των περιορισμών κάθε τεχνολογίας, ώστε να διασφαλιστεί ότι η αξία προέρχεται από δεδομένα ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος και τα τεχνικά εμπόδια της συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να βελτιώνεται, η δύναμη και οι ικανότητες της τηλεπισκόπησης αυξάνονται γρήγορα (Khanal et al , 2020). Η τηλεπισκόπηση, σε συνδυασμό με βασικά τεχνολογικά συστήματα όπως GIS και GPS, και επιπλέον εργαλεία και εξοπλισμό είναι κρίσιμη για την εφαρμογή επεμβάσεων, της επίτευξης, της βελτίωσης, ανάπτυξης αλλά και αξιολόγησης της γεωργικής εκμετάλλευσης στο μέγιστο. Η τηλεπισκόπηση, με τις ποικίλες μεθόδους και εφαρμογές της στο γεωργικό τομέα, είναι κρίσιμη και απαραίτητη για τους γεωργούς και τις καλλιέργειες (Ghosh et al, 2022).

1.1 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στη Γεωργία

Ο όρος Geographical Information Systems (GIS) μεταφράζεται ως Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ένα GIS ορίζεται ως ένα ισχυρό σύστημα υπολογιστών για τη λήψη, συλλογή, την αποθήκευση, τον έλεγχο και ανάκτηση δεδομένων κατά βούληση, καθώς και την ανάλυση, μετασχηματισμό και την εμφάνιση των χωρικών δεδομένων για συγκεκριμένο σκοπό, που σχετίζονται με θέσεις στην επιφάνεια της Γης. Το GIS μπορεί να δείξει πολλά διαφορετικά είδη δεδομένων σε έναν χάρτη και να παράγει αναφορές κατάλληλες για τον αγροτικό τομέα, είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα εφαρμογών που αναπτύχθηκε τα τελευταία 50 χρόνια.

Διεθνώς, το GIS άρχισε να χρησιμοποιείται στη γεωργία τη δεκαετία του 1970. Έχει εφαρμοστεί στην έρευνα την αξιολόγηση και την ανάλυση της διαχείρισης των πληροφοριών για τους γεωργικούς πόρους. Μετά τη δεκαετία του 1990, η εφαρμογή του GIS στον τομέα της γεωργίας έχει εμβαθύνει και διαδοθεί (Zhang & Cao, 2019).

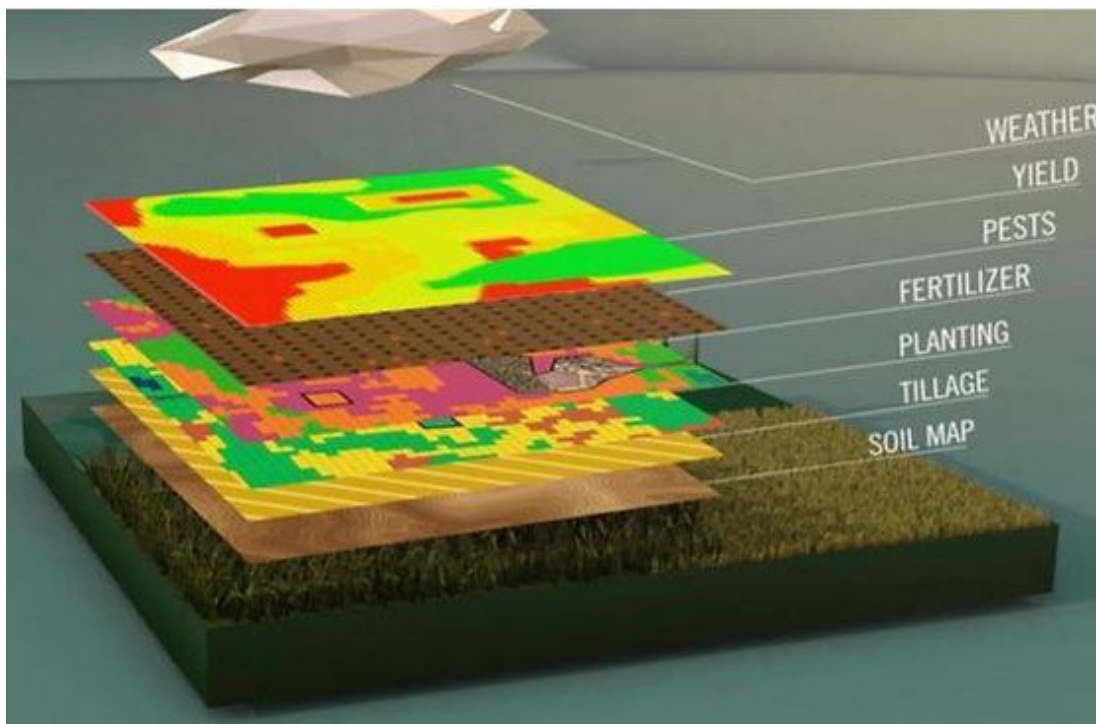
Το GIS, σε συνεργασία μαζί με άλλες τεχνολογίες, όπως η RS, το GPS, υπολογιστικά συστήματα, και ανάλυση δεδομένων, διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην παρακολούθηση των καλλιεργειών και στην εφαρμογή βέλτιστων και στοχευμένων πρακτικών διαχείρισης και είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη αύξησης και βελτίωσης της παραγωγικότητας των καλλιεργειών διευκολύνοντας τις διαδικασίες, μειώνοντας τα έξοδα, την περιβαλλοντική μόλυνση και συμβάλλοντας στην επίτευξη επισιτιστικής ασφάλειας.

Ενώ οι εικόνες τηλεπισκόπησης και τα συσχετισμένα αναλυτικά στοιχεία επιτρέπουν την παρακολούθηση της υγείας των καλλιεργειών και την πρόβλεψη της απόδοσης, Η τεχνολογία GIS επιτρέπει τη συλλογή, αποθήκευση, ανάκτηση, και απεικόνιση δεδομένων που συνδέονταν γεωγραφικά. Οι εικόνες που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του γενικού σθένους, προσβολή από ασθένειες ή

παράσιτα, ή αποκλίσεις από την αναμενόμενη ανάπτυξη λόγω ξηρασίας ή άλλων αβιοτικών καταπονήσεων.

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για την εκτίμηση της υγείας των καλλιεργειών βασίζεται στον προσδιορισμό από δείκτες βλάστησης που διατίθενται για την αποτίμηση της έκτασης και του σθένους της βλάστησης, δυναμική ανάπτυξης καλλιεργειών, τις καταπονήσεις λόγω βιοτικών ή αβιοτικών παραγόντων, και άλλες χρήσιμες εκτιμήσεις (Ghosh & Kumpatla, 2022).

Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες σχετικά με διάφορα χαρακτηριστικά και τα εργαλεία για να απεικονίσει και να αναλύσει δεδομένα σε πολλά επίπεδα δεδομένων (data layer), στον ίδιο αγρό και τα παρουσιάζει μέσω διαισθητικής και ενδεικτικής μορφής χαρτών.



Εικόνα. 1 Χάρτης παραλλακτικότητας δεδομένων σε επίπεδα (Φουντάς & Γέμτος, 2015).

Ένα σύστημα GIS μπορεί να απεικονίσει την παραλλακτικότητα ενός μετρούμενου μεγέθους και να αναλύσει δεδομένα σε πολλά επίπεδα (data layers) στον ίδιο αγρό. Κάθε επίπεδο μπορεί να έχει πληροφορίες που αφορούν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Τις τελευταίες δεκαετίες σημειώθηκε σημαντική αύξηση στην εφαρμογή εργαλείων GIS για ευρύ και διαφορετικές εφαρμογές στη γεωργία από τοπική, περιφερειακή, μέχρι εθνική και παγκόσμια κλίμακα. Καθώς παρέχουν πληροφορίες με βάση τα δεδομένα για στοχευμένη διαχείριση των καλλιεργειών. Αυτές οι εφαρμογές πιο συχνά περιλαμβάνουν τη χρήση GIS με μονάδες λειτουργίας και συνιστώσα εργαλεία μαζί με συνεργατικές τεχνολογίες όπως τηλεπισκόπηση, GPS και ανάλυση δεδομένων που συγκεντρώθηκαν και παρέχουν διευκρίνιση πληροφοριών προς την (βαθύτερη) κατανόηση μιας δεδομένης εκμετάλλευσης ή περιοχής και τη διευκόλυνση

της παρέμβασης ή των διορθωτικών μέτρων για την βελτίωση των καλλιεργειών και των εδαφών.

Δεδομένου ότι τα δεδομένα GIS συνδέονται με κοινό σύστημα αναφοράς, επιπλέον πλεονέκτημα που προσφέρει είναι ότι τα ίδια δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές εφαρμογές ή στόχους και με τη δυνατότητα εισαγωγής νέων δεδομένων και συνδυάζοντας αυτά με τα υπάρχοντα δεδομένα, μπορούμε να κάνουμε μια κοινή ανάλυση για την εξαγωγή νέων πληροφοριών.

Τα GIS έχουν χρησιμοποιηθεί για γεωργικές εφαρμογές εδώ και αρκετό καιρό. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες και αναδυόμενες εφαρμογές GIS, είτε από μόνες τους είτε σε συνδυασμό με άλλες συνεργατικές τεχνολογίες έχουν αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης και προόδου και έχουν πραγματοποιήσει σημαντικό αντίκτυπο σχετικά με τη γεωργική παραγωγικότητα και τις αλυσίδες εφοδιασμού (Ghosh & Kumpatla, 2022).

2. ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ

2.1 Δορυφόροι

Ένας δορυφόρος είναι ένα αντικείμενο στο διάστημα που κινείται γύρω από ένα μεγαλύτερο αντικείμενο. Οι δραστηριότητες παρατήρησης της Γης από δορυφόρους επιταχύνουν έναν μετασχηματισμό που βασίζεται στα δεδομένα στον γεωργικό τομέα, ο οποίος βοηθά τους αγρότες να προσαρμοστούν στις διπλές προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης του πληθυσμού. Τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης που παράγονται από δορυφορικές αποστολές επιτρέπουν στους επιστήμονες να δημιουργήσουν λεπτομερείς εικόνες του περιβάλλοντος του πλανήτη, συμπεριλαμβανομένης της κάλυψης βλάστησης, των ιδιοτήτων του εδάφους, των εποχιακών συνθηκών και των μακροπρόθεσμων αλλαγών (<https://earth.esa.int/eogateway/news/how-space-data-are-transforming-the-global-food-system>, <https://nasaharvest.org/nasa-agriculture-activities>).

Οι νέες τεχνολογίες που σχετίζονται με διάφορες πτυχές της διαχείρισης των καλλιεργειών έχουν τεθεί σε ισχύ στη γεωργία τα τελευταία χρόνια. Κυρίως, αυτές οι τεχνολογίες επικεντρώνονται στη διευκόλυνση της αύξησης του καθαρού εισοδήματος για τους αγρότες ακολουθώντας τις συστάσεις ερευνητών και συμβούλων για βιώσιμη χρήση πρώτων υλών και σπάνιων πόρων, όπως το νερό. Οι δορυφόροι έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση συγκεκριμένων καλλιεργειών, με υψηλή προστιθέμενη αξία, όπως αναθεωρήθηκε από τους Pádua et al. (2017). Σύμφωνα με τη φασματική ανάλυση των αισθητήρων, οι δορυφόροι επιτρέπουν την ανίχνευση και παρακολούθηση πολλών χαρακτηριστικών καλλιεργειών και εδάφους, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Η δορυφορική παρατήρηση της Γης είναι μια μορφή τηλεπισκόπησης που επικεντρώνεται στη λήψη πληροφοριών σχετικά με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της Γης από πλατφόρμες μέχρι 36,000 km μακριά στο διάστημα. Οι πληροφορίες που προκύπτουν δεν προέρχονται από μία μόνο δορυφορική αποστολή αλλά ένα ολόκληρο εύρος δορυφόρων με διαφορετικά όργανα στόχων αποστολών. Ο στόχος της εφαρμογής καθορίζει την επιλογή του συστήματος παρατήρησης δορυφορικών δεδομένων (EOS) της αποστολής και της ενοργάνωσης. Τα δορυφορικά (EOS) βρίσκονται σε τροχιά από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, με υπερσύγχρονη χωρική ανάλυση σε επίπεδο στο οποίο μπορούν να απεικονιστούν οι λεπτομέρειες της επιφάνειας της Γης. Οι μετρήσεις παρατήρησης της Γης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την παροχή τέτοιων χωρικών πληροφοριών και είναι καίριας σημασίας για τη βελτίωση της διαχείρισης των καλλιεργειών και των εισροών τους.

Τις τελευταίες δεκαετίες, ένας αυξανόμενος αριθμός δορυφορικών συστημάτων για παρατήρηση της Γης παρείχαν μεγάλα σύνολα δεδομένων τηλεπισκόπησης εικόνων και δεικτών, συμβάλλοντας στην παρακολούθηση περιβαλλοντικών αλλαγών τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, παρά την αυξανόμενη διαθεσιμότητά τους, αυτές οι πληροφορίες δεν μπορούν εύκολα να συγκριθούν λόγω των διαφορών μεταξύ των αισθητήρων (Anderson et al., 2011; Teillet & Ren, 2008).

Μέχρι στιγμής έχουν εκτοξευθεί περισσότεροι από 1000 δορυφόροι τηλεπισκόπησης διαθέσιμοι στο διάστημα, και μεταξύ αυτών, περίπου 593 είναι από τις ΗΠΑ, πάνω από 135 είναι από τη Ρωσία και περίπου 192 είναι από την Κίνα και επί του παρόντος, περίπου 50 χώρες χρησιμοποιούν δορυφόρους τηλεπισκόπησης. Αυτοί οι δορυφόροι έχουν ενημερωθεί με αισθητήρες νέας γενιάς. Οι λίγοι φασματικοί αισθητήρες από τις πρώτες αποστολές έχουν αναβαθμιστεί σε υπερφασματικούς αισθητήρες με εκατοντάδες φασματικές ζώνες. Οι χωρικές και φασματικές αναλύσεις έχουν βελτιωθεί σε μεγάλο ποσοστό αύξησης. Οι χρόνοι επανέπίσκεψης έχουν μειωθεί από μήνες σε ημέρες. Επιπλέον, όλο και περισσότερα δεδομένα τηλεπισκόπησης είναι διαθέσιμα ως ανοιχτές πηγές δεδομένων (Zhu et al, 2017).

Οι δορυφόροι προσφέρουν στον γεωργικό τομέα και τους καλλιεργητές δυνατότητες με τον υπολογισμό της κατάστασης του νερού και των θρεπτικών συστατικών, τον σχεδιασμό προγραμματισμού λίπανσης των καλλιεργειών και την ενημέρωση για την άρδευση κατά τη διάρκεια της σεζόν, την πρόβλεψη των αποδόσεων κατά τη διάρκεια της σεζόν, την ανίχνευση και έλεγχο παρασίτων και ασθενειών και την εκτίμηση του χρόνου συγκομιδής. Η ανάπτυξη και εξελίξεις σε δορυφορικούς αστερισμούς, αισθητήρες και εκτόξευση επιτρέπουν αυξημένη συνδεσιμότητα και ικανότητα παρατήρησης. Συνδυασμός αυτών των εξελίξεων με «εξυπνότερους» υπολογιστές υποδομές δεδομένων και ανάλυση, αυξάνουν τις δυνατότητες χρήσης δορυφορικών τεχνολογιών σε ολόκληρο τον γεωργικό τομέα.

Καθώς η ανάπτυξη και οι εξελίξεις δημιουργούν νέες δυνατότητες για προϊόντα, υπηρεσίες και υποστήριξη αποφάσεων, αποτελεί επίσης πρόκληση για τον γεωργικό τομέα και τους καλλιεργητές να διασφαλιστεί ότι η πρόσφατη τεχνολογία συνδέεται κατάλληλα με τις προκλήσεις της παραγωγής και, ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη των οφελών που απαιτούνται για την κάλυψη των κοινωνικών, οικονομικών, πολιτικών και περιβαλλοντικών αναγκών.

Η χαρτογράφηση τύπου-καλλιεργειών σε εθνικό και τοπικό επίπεδο πραγματοποιείται σε πολλά μέρη του κόσμου χρησιμοποιώντας ελεύθερα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα συστημάτων παρατήρησης της Γης, όπως από Landsat και Sentinel. Η δυναμικότητα των (EOS) για παρακολούθηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων βασίζεται στην ικανότητά τους να παρακολουθούν μεγάλες εκτάσεις Γης και της ατμόσφαιρας τακτικά και με συνέπεια. Διαφορετικοί αισθητήρες EOS μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση κοινών περιβαλλοντικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων των ατμοσφαιρικών μεταβλητών, των ιδιοτήτων εδάφους, της βλάστησης και των υδρολογικών παραμέτρων (https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/SatellitesForAgriculture1825_181217_WEB.pdf).

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί προσεγγίσεις συγχώνευσης δεδομένων για τη βελτίωση της χρονικής δειγματοληψίας σε χωρικές κλίμακες Landsat. Αυτά τα μοντέλα συγχώνευσης χωρικών και χρονικών δεδομένων επιτρέπουν το συνδυασμό λήψης εικόνων υψηλής συχνότητας αλλά προς το παρόν χαμηλής χωρικής ανάλυσης (π.χ., MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer και VIIRS (visible infrared imaging radiometer suite) με λιγότερο συχνές αλλά υψηλές εικόνες χωρικής ανάλυσης (π.χ., Landsat και Sentinel-2) (Michael et al, 2019).

Οι δορυφόροι καταστούν δυνατή και ενισχύουν την παροχή πληροφοριών εντοπισμού θέσης, διευκόλυνση της επικοινωνίας, στη παροχή ευρείας κλίμακας παρατήρησης σε

τακτική βάση. Κοιτάζοντας στο μέλλον, ο διαστημικός τομέας πρόκειται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη δημιουργία «εξυπνότερων» και επιδραστικών γεωργικών λύσεων που οδηγούνται από την αυξανόμενη διαθεσιμότητα πλεονεκτικών εικόνων παρατήρησης της Γης, καθώς και αυξανόμενα δεδομένα και πληροφορίες που αναμένονται από συνδεδεμένους αισθητήρες. Αυτό θα δημιουργήσει πολλές νέες ερευνητικές ερωτήσεις και, εν τέλει, καινοτόμα εμπορικά προϊόντα και υπηρεσίες. Η ώθηση να είμαστε «εξυπνότεροι» και να αναπτύξουμε λύσεις που αυξάνουν με βιώσιμο τρόπο την παραγωγή τροφίμων δημιουργεί ανάγκες και απαιτήσεις σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού (https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/SatellitesForAgriculture1825_181217_WEB.pdf).

2.1.1 Landsat/Landsat 8

Το πρόγραμμα Landsat NASA (National Aeronautics και Space Administration)/US.G.S.(United States Geological Survey) παρέχει την πρώτη και τη μεγαλύτερη συνεχή διαστημική καταγραφή της ύπαρξης επιφάνειας της Γης. Η σειρά δορυφόρων Landsat είναι μια κοινή επιχείρηση USGS και NASA για την παρατήρηση της Γης που αντιπροσωπεύει το μακροβιότερο λειτουργικό σύστημα δορυφόρων στον κόσμο για οπτική τηλεπισκόπηση μέτριας ανάλυσης για ξηρά, παράκτιες περιοχές και ρηχά νερά.

Από το 1972, η σειρά δορυφόρων Landsat λαμβάνουν συνεχώς εικόνες της επιφάνειας της Γης δίνοντας πληροφορίες απαραίτητες για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τους πόρους και το περιβάλλον της Γης, παρέχοντας ανελλιπώς δεδομένα, βοηθώντας τους διαχειριστές Γης και τις αρχές που χαράσσουν πολιτικές να παίρνουν επικαιροποιημένες αποφάσεις σχετικά με τους φυσικούς πόρους και το περιβάλλον. Ο Landsat 1 εκτοξεύτηκε το έτος 1972 και ακολουθήθηκε από μια σειρά διαδοχικών, χρονικά επικαλυπτόμενων, εκτοξεύσεων Landsat (Landsat 2, 3, 4, 5, 7, 8) με το Landsat 9 να είναι η πιο πρόσφατη αποστολή, η οποία ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2021 (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>, https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html).

Ωστόσο, ο δορυφόρος Landsat-6 απέτυχε να επιτύχει την τροχιά του και η επικοινωνία με τον δορυφόρο δεν επιτεύχθηκε ποτέ, αλλά οι άλλοι οκτώ δορυφόροι το έκαναν. Συνεπώς η σειρά συνεχίζεται μέχρι σήμερα, καθιστώντας το Landsat το μεγαλύτερο συνεχές πρόγραμμα απεικόνισης της Γης στην ιστορία, εξασφαλίζοντας ένα μόνιμο, παγκόσμιο αρχείο απεικόνισης Landsat για να καταστεί δυνατή η μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της μεταβαλλόμενης επιφάνειας της Γης και του κλίματος, τόσο φυσικού όσο και ανθρωπογενούς (Wulder et al., 2008, <https://gisgeography.com/landsat/>).

Η σειρά δορυφόρων Landsat παρέχει τη μεγαλύτερη χρονική καταγραφή διαστημικών παρατηρήσεων επιφάνειας σχεδόν παγκόσμια ανακλαστική κάλυψη και παρατηρήσεις θερμικής ακτινοβολίας, με αυξανόμενη φασματική και χωρική πιστότητα. Τα δεδομένα προσφέρουν μια μοναδική καταγραφή της επιφάνειας της Γης και τροποποιήσεών της με την πάροδο του χρόνου και οι χρονοσειρές δεδομένων βαθμονομούνται για να παρέχουν χαρακτηρισμένες και συνεπείς καταγραφές. Τα

δεδομένα από τη σειρά δορυφόρων Landsat παρέχουν μια ανεκτίμητη πηγή πληροφοριών για το περιβάλλον της Γης, ιδιαίτερα ιδιότητες της επιφάνειας της Γης και πώς έχει επηρεαστεί από ανθρώπινες δραστηριότητες. Όχι μόνο οι εικόνες που προκύπτουν παρέχουν έγκαιρες πληροφορίες σχετικά με τις τρέχουσες συνθήκες, αλλά με το πέρασμα του χρόνου παρέχουν ένα όλο και πιο χρήσιμο ιστορικό αρχείο (Wulder et al. 2019, Townshend, 2001).

Τα δεδομένα της σειράς Landsat έχουν αναδείξει τις δυνατότητες χαρτογράφησης και παρακολούθησης της κάλυψης της Γης και των βιοφυσικών και γεωφυσικών ιδιοτήτων της επιφάνειας της Γης για τις εφαρμογές πρόγνωσης/πρόβλεψης χρήσης της (Roy et al, 2014). Αυτό διευκολύνει την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών και στρατηγικών που ενισχύουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών, βοηθώντας τους γεωργούς να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες παγκόσμιες απαιτήσεις τροφίμων, προφυλάσσοντας παράλληλα από τυχόν δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις (<https://earth.esa.int/eogateway/news/how-space-data-are-transforming-the-global-food-system>, <https://nasaharvest.org/nasa-agriculture-activities>)

Οι γεωργικές εφαρμογές βασισμένες στο Landsat αναπτύχθηκαν λίγο μετά την εκτόξευση του Landsat 1 και έχουν λάβει χρηματοδότηση από πολλούς φορείς. Το ρεκόρ των 40 και πλέον ετών του Landsat, συνεχίστηκε με την επιτυχή εκτόξευση του Landsat 8 τον Φεβρουάριο του 2013, στο πλαίσιο του μακροπρόθεσμου προγράμματος Landsat από το USGS και τη NASA (Roy et al, 2014). Η NASA ηγήθηκε της αποστολής και ήταν υπεύθυνη για την μηχανική και το σχεδιασμό του συστήματος, την ανάπτυξη του τμήματος πτήσης, την εξασφάλιση υπηρεσιών εκτόξευσης, την ενσωμάτωση των συστημάτων εδάφους πτήσης, και τη διεξαγωγή προετοιμασίας της τροχιάς και επαλήθευσης. Το USGS ηγήθηκε της ανάπτυξης του επίγειου συστήματος της αποστολής Landsat 8. Στις 30 Μαΐου 2013 το USGS ανέλαβε επίσημα την ευθύνη για τις επιχειρήσεις αποστολής, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής, αρχειοθέτησης, επεξεργασίας και διανομής δεδομένων του Landsat 8 (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-8>).

Ο δορυφόρος Landsat 8 φέρει ένα διπλό αισθητήρα τον Operational Land Imager (OLI) και τον Thermal Infrared Sensor (TIRS), καταχωρίζοντας πάνω από 500 λήψεις εικόνας την ημέρα στο αρχείο δεδομένων στο USGS Earth Resource Observation and Science (EROS) Center, South Dakota. Οι νέες λήψεις συμπληρώνουν τις πλέον πάνω από τέσσερα εκατομμύρια λήψεις που αποκτήθηκαν από προηγούμενες αποστολές Landsat που είναι αποθηκευμένες. Ο πρωταρχικός στόχος της αποστολής Landsat 8 στο μέλλον είναι να επεκτείνει το αρχείο Landsat και να διατηρήσει τη συνέχεια των παρατηρήσεων, έτσι ώστε τα δεδομένα του Landsat 8 να είναι συνεπή και συγκρίσιμα με εκείνα των προηγούμενων σειρών Landsat (Roy et al, 2014).

Οι αισθητήρες του Landsat 8 λειτουργούν στο φάσμα του ορατού, του κοντινού υπέρυθρου, του υπέρυθρου μικρού μήκους και του θερμικού υπέρυθρου φάσματος. Ο Landsat 8 καταγράφει περισσότερες από 500 σκηνές την ημέρα, μια αύξηση σημαντική από τις 250 σκηνές την ημέρα στο Landsat 7. Συμπερασματικά, το Landsat 8 είναι από τις πιο πρόσφατη γενιά δορυφορικών αποστολών Landsat αισθητήρων για εικόνες παρατήρησης της Γης. Οι εικόνες Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), μαζί με Landsat (OLI) και (TIRS) αντιπροσωπεύουν θεμελιώδη εργαλεία για την παρατήρηση της Γης λόγω του βέλτιστου συνδυασμού της ραδιομετρικής και γεωμετρικής ανάλυσης εικόνων που παρέχεται από αυτούς τους αισθητήρες.

Η επιτυχής έναρξη λειτουργίας του Landsat 8 επέτρεψε τη συνέχεια της επιτυχημένης σειράς και τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν πρόοδο στα καθιερωμένα προγράμματα χαρτογράφησης και παρακολούθησης, επιτρέποντας μια γενική προώθηση της ανάπτυξης νέων προσεγγίσεων έρευνας για τις παγκόσμιες αλλαγές, για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης και της δυναμικής της επιφάνειας της Γης προστατεύοντας παράλληλα και μεγιστοποιώντας τις προηγούμενες επενδύσεις σειράς Landsat (Roy et al, 2014).

Οι κοινότητες επιστήμης και διαχείρισης πόρων επωφελούνται από τη συνέχεια της αποστολής Landsat, την ανοικτή πρόσβαση σε νέες και ιστορικές εικόνες και μια αυξανόμενη ευρεία σειρά των προϊόντων δεδομένων εικόνας. Η ελεύθερη και ανοικτή πρόσβαση σε εικόνες Landsat έχει ενθαρρύνει τη χρήση δεδομένων Landsat για την αντιμετώπιση αναρίθμητων επιστημονικών ζητημάτων, βελτίωση της διαχείρισης πόρων, ενημέρωση δραστηριοτήτων αναφοράς, και να υποστηρίξει μια ολοένα και μεγαλύτερη βάση χρηστών που πραγματοποιεί εξελιγμένες, ολοκληρωμένες και συχνά άνευ προηγουμένου αναλύσεις (Wulder et al, 2019).

2.1.2 Sentinel 2A/B

Οι Sentinel-2A/2B είναι μια αποστολή δορυφορικής παρατήρησης της Γης από το πρόγραμμα Copernicus της European Union που λαμβάνει συστηματικά οπτικές εικόνες σε υψηλή χωρική ανάλυση πάνω από τα χερσαία και παράκτια ύδατα. Ο SENTINEL-2A, ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2015 από το διαστημικό λιμένα στο Kourou, της Γαλλικής Γουϊάνας. Ο Sentinel-2B ξεκίνησε από τον ίδια τοποθεσία τον Μάρτιο του 2017. Ο δορυφόρος Sentinel-2 είναι οι πρώτοι οπτικοί δορυφόροι παρατήρησης της Γης στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα Copernicus και αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε την Airbus Defence και Space για την European Space Agency (ESA) (satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/, <https://geoint.com.au/productservice/satellite-imagery/sentinel-2a-2b/>).

Η αποστολή Copernicus Sentinel-2 αποτελείται από έναν αστερισμό με δύο δίδυμους δορυφόρους πολικής τροχιάς τοποθετημένους στην ίδια τροχιά, στις 180° ο ένας από τον άλλο. Αποσκοπεί στην παρακολούθηση της μεταβλητότητας των συνθηκών της επιφάνειας της Γης, και το ευρύ Πλάτος λωρίδας σάρωσης (290 km) και υψηλό χρόνο επανεξέτασης (10 ημέρες στον ισημερινό με έναν δορυφόρο και 5 ημέρες με 2 δορυφόρους κάτω από χωρίς σύννεφα συνθήκες που καταλήγει σε 2-3 ημέρες σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη θα υποστηρίξει την παρακολούθηση των επιφανειακών αλλαγών της Γης (<https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>).

Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με οπτικό-ηλεκτρονικό πολυφασματικό αισθητήρα για επισκόπηση με ανάλυση 10 έως 60 m στις φασματικές ζώνες ορατού, NIR, short-wave infrared (SWIR), και περιλαμβάνει τρεις ζώνες στην «κόκκινη ακμή», μεταξύ των οποίων 13 φασματικών καναλιών, που εξασφαλίζει τη σύλληψη και παροχή βασικών πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση βλάστησης, συμπεριλαμβανομένων των χρονικών αλλαγών και επίσης ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις στην ποιότητα της ατμοσφαιρικής φωτογραφίας.

Με τις 13 φασματικές ζώνες, 290 km πλάτους λωρίδας σάρωσης και υψηλή συχνότητα επανεξέτασης, ο αισθητήρας του SENTINEL-2 Multi-Spectral Imager (MSI)

υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα μελετών και προγραμμάτων Γης, και μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία ενός ευρωπαϊκού αρχείου εικόνων χωρίς σύννεφα. Οι φασματικές ζώνες του SENTINEL-2 θα παρέχουν δεδομένα για την ταξινόμηση κάλυψης/αλλαγής της Γης, την ατμοσφαιρική διόρθωση και τον διαχωρισμό νέφους/χιονιού προσφέροντας οπτικές εικόνες υψηλής ανάλυσης.

Οι δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με τελευταίας τεχνολογίας όργανο λήψης πολυφασματικών εικόνων που λειτουργεί παθητικά, συλλέγοντας το φως του ήλιου που αντανακλάται από τη Γη (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

Τα δεδομένα δορυφορικής εικόνας Sentinel-2 υποστηρίζουν:

- Γενική κάλυψη Γης, χρήση της Γης και χάρτες ανίχνευσης αλλαγών
- Χάρτες γεωφυσικών μεταβλητών για LAI, περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη φύλλων, και περιεκτικότητα σε νερό φύλλων.

Ο δορυφόρος Sentinel-2A είναι η πρώτη πολιτική αποστολή οπτικής παρατήρησης της Γης του είδους της που περιλαμβάνει τρεις ζώνες στην «κόκκινη ακμή», οι οποίες παρέχουν με την κατάσταση της βλάστησης.

Τα δεδομένα του Sentinel-2 παρέχουν GMES (Global Monitoring for Environment and Security) πρόγραμμα, το οποίο υλοποιείται από κοινού από την EC (European Commission) και υπηρεσίες που σχετίζονται με ESA (European Space Agency), για παράδειγμα, στη διαχείριση της Γης, τη γεωργική παραγωγή και τη δασοκομία, καθώς και στην παρακολούθηση των φυσικών καταστροφών και των ανθρωπιστικών δραστηριοτήτων (satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/).

2.1.3 Εναρμονισμένο πρόγραμμα Landsat/Sentinel-2 (HLS)

Το εναρμονισμένο πρόγραμμα Landsat Sentinel-2A/B (HLS) αποτελεί επέκταση της έρευνας που διεξάγεται από NASA GSFC (Goddard Space Flight Center), που λαμβάνει δεδομένα εισόδου από τους κοινούς δορυφόρους NASA/USGS Landsat 8 και δορυφόρους ESA (European Space Agency) Sentinel-2A και Sentinel-2B για τη δημιουργία ενός εναρμονισμένου, προϊόντος δεδομένων έτοιμου για ανάλυση επιφανειακής ανάκλασης με παρατηρήσεις κάθε δύο έως τρεις ημέρες.

Το εναρμονισμένο πρόγραμμα Landsat/Sentinel-2A/B (HLS) από NASA GSFC (Goddard Space Flight Center) έχει επικεντρωθεί στις απαραίτητες ραδιομετρικές και γεωμετρικές διορθώσεις για την δημιουργία ενός αρμονικά απρόσκοπτου προϊόν ανάκλασης της επιφάνειας χρησιμοποιώντας και τους δύο αισθητήρες ως εισροές (Claverie et al., 2018). Οι δραστηριότητες αυτές συμπληρώθηκαν από μέλη NASA/USGS Landsat Ομάδα βαθμονόμησης και ESA Sentinel-2 Ομάδα επικύρωσης, οι οποίες έχουν συνεργαστεί για να αποδείξουν ότι οι μετρήσεις από τον αισθητήρα Landsat-8 OLI και Sentinel-2 (MSI) συμφωνούν εντός των ατομικών αβεβαιοτήτων τους.

Φασματικές ομοιότητες μεταξύ των Landsat 8 (OLI) και Sentinel-2 (MSI) παρουσιάζουν την ευκαιρία εναρμόνισης των δεδομένων και των δύο αισθητήρων για τη δημιουργία προϊόντων εικόνας υψηλότερης συχνότητας για την παρακολούθηση

της επιφάνειας της Γης και τις εφαρμογές. Οι συχνοί χρόνοι επανεξέτασης του HLS επιτρέπουν τη χρόνο-σειρά εφαρμογών επιφάνειας Γης στην κλίμακα πεδίου/αγρού, την υποστήριξη ευρύς φάσματος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της γεωργικής υγείας, προσβολές εντόμων, και εκ φύσεως επικίνδυνες επιπτώσεις.

Αποστολές όπως Landsat 9 (launch in late-2021) and Sentinel-2C (προγραμματισμένο για εκτόξευση το 2023) επίσης θα ενσωματωθούν στα προϊόντα δεδομένων HLS, με περαιτέρω βελτίωση των χρόνων επανεξέτασης και των δυνατοτήτων παρακολούθησης της Γης. Το χρονολόγιο διαθεσιμότητας δεδομένων του HLS project δημιουργεί νέα δεδομένα τόσο από αυτά που διαβιβάζονται στον επίγειο σταθμό όσο και από ιστορικά δεδομένα από το αρχείο Landsat 8 και Sentinel-2A/B (<https://earthdata.nasa.gov/esds/harmonized-landsat-sentinel-2>, Wulder et al, 2019).

2.1.4 PlanetScope Doves

Οι δορυφόροι PlanetScope Doves άρχισαν να εκτοξεύονται το 2014. Το PlanetScope είναι ένας από τους δορυφορικούς αστερισμούς πολλαπλών ομάδων μεμονωμένων δορυφόρων που ονομάζονται σμήνη, που έχουν σχεδιαστεί για την παρατήρηση της Γης. Ο δορυφορικός αστερισμός PlanetScope αποτελείται από περισσότερους από 180 δορυφόρους που ονομάζονται Doves. Οι δορυφόροι του PlanetScope που εκτοξεύτηκαν από τον Νοέμβριο του 2018 έχουν χαρακτηριστικά αισθητήρων που επιτρέπουν βελτιωμένη φασματική ανάλυση. Το δεύτερο σμήνος δορυφόρων PlanetScope έχει αισθητήρα απεικόνισης πλαισίου τεσσάρων ζωνών (https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf).

Το τρίτο σμήνος αισθητήρων PlanetScope (γνωστό ως Super-Dove) είναι σε τροχιά και παράγει καθημερινές εικόνες με 8 φασματικά κανάλια (coastal blue, blue, green I, green, red, yellow, Red Edge και NIR) (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope/description>, https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/flock_1).

Κάθε δορυφόρος Dove είναι ένας κύβος που ζυγίζει 4 κιλά (περίπου 1000 φορές χαμηλότερα από τους παλαιού τύπου εμπορικούς δορυφόρους απεικόνισης), αποτελείται από τρεις κυβικές μονάδες και έχει διαστάσεις μόνο 10 cm x 10 cm x 30 cm σε μήκος, πλάτος και ύψος.

Ο αστερισμός δορυφόρων PlanetScope είναι σε τροχιά γύρω από τους πόλους κάθε 90 λεπτά, ο αστερισμός ταξιδεύει σε χαμηλότερη τροχιά από τους περισσότερους δορυφόρους, σε απόσταση ύψους περίπου μεταξύ 240 και 400 miles πάνω από τη Γη. Για σύγκριση, οι δορυφόροι για τον καιρό και οι δορυφόροι τηλεπικοινωνίας συχνά δίνονται γεωστατικές τροχιές, που είναι κυκλικές τροχιές πάνω από τον ισημερινό της Γης σε απόσταση περίπου 22,236 miles πάνω από τη Γη. Οι εικόνες συλλέγονται σε γεωγραφικά πλάτη σε απόσταση 52 μοιρών από τον ισημερινό της Γης, που περιλαμβάνουν εκτάσεις βόρεια και νότια του ισημερινού που καλύπτουν την πλειονότητα των κατοικημένων περιοχών και των γεωργικών περιοχών του κόσμου.

Τα δεδομένα από τα Doves είναι μια εξαιρετική πηγή για την παρακολούθηση της βλάστησης. Και ένα μεγάλο μέρος των γεωργικών περιοχών και του πληθυσμού του κόσμου βρίσκονται στην περιοχή που απεικονίζεται από το σμήνος, είναι σε θέση να απεικονίσει ολόκληρη την επιφάνεια της Γης κάθε μέρα (ισοδυναμεί με καθημερινή

ικανότητα συλλογής 200 εκατομμύρια km²/day). Αυτή η ικανότητα αλλάζει βασιζόμενη με τον αριθμό των δορυφόρων σε τροχιά και καθ' όλη τη διάρκεια της σεζόν, καθώς οι δορυφόροι απεικονίζουν λιγότερο στο βόρειο ημισφαίριο το χειμώνα λόγω της μείωσης της ποσότητας των ωρών με φως του ήλιου.

Οι πληροφορίες που λαμβάνουμε αυξάνονται συνεχώς σε ποσότητα και ποιότητα με τεχνολογικές βελτιώσεις που αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς, που βελτιώνει συνεχώς τα χαρακτηριστικά της αποστολής, όπως οι χρόνοι επανεξέτασης, οι χωρικές και φασματικές αναλύσεις. Τα Doves απεικονίζουν τον πλανήτη καθημερινά σε εικόνες ανάλυσης 3 έως 5 m. Συνεπώς, παρέχεται ικανότητα υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης από τον μεγαλύτερο στόλο μικρών δορυφόρων κύβων

(https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf/, https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/flock_1).

Συμπληρώνει τα δεδομένα Sentinel-2 με καλύτερη χωρική ανάλυση και καλύτερη χρονική κάλυψη, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική στις συννεφιασμένες περιοχές, καθώς αυξάνει την πιθανότητα απόκτησης μιας εικόνας χωρίς σύννεφα. Επίσης η μετάβαση από τις συλλογές Landsat σε δεδομένα πηγής PlanetDove παρουσιάζουν μια σημαντική πρόκληση στην οποία τα δεδομένα PlanetDove δεν διαθέτουν την ίδια φασματική ανάλυση ή σταθερότητα. Ωστόσο, παρέχει ουσιαστικά υψηλότερη χωρική και χρονική ανάλυση από ό,τι Landsat (Csillik et al, 2020).

2.2 Αισθητήρες

Η αξιοποίηση θερμικών αισθητήρων μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση στο πλαίσιο της άρδευσης. Η θερμότητα που εκπέμπεται από οποιαδήποτε πηγή εμφανίζεται ως ελαφρύτερος τόνος στην περιοχή υπέρυθρων. Οι δορυφορικοί αισθητήρες τηλεπισκόπησης έχουν αναπτυχθεί για πάνω από 40 χρόνια. Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα όργανα που βρίσκονται σε δορυφόρο ή δορυφορικό αστερισμό συλλέγοντας πληροφορίες σχετικά με ένα αντικείμενο ή ένα φαινόμενο στην επιφάνεια της Γης και χωρίς να βρίσκεται σε άμεση φυσική επαφή με το αντικείμενο ή το φαινόμενο. Σε σύγκριση με τις αερομεταφερόμενες και επίγειες πλατφόρμες, οι διαστημικές πλατφόρμες είναι ο πιο σταθερός φορέας (Zhu et al, 2017).

Η συχνότητα με την οποία ένας δορυφορικός αισθητήρας μπορεί να αποκτήσει δεδομένα ολόκληρης της Γης εξαρτάται από τον αισθητήρα και τα τροχιακά χαρακτηριστικά. Οι κύριοι παράγοντες σχετικά με τα χαρακτηριστικά ενός δορυφορικού αισθητήρα είναι η φασματική και χρονική ανάλυση που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το σχεδιασμό των αισθητήρων και την τροχιά του δορυφόρου.

Η φασματική ανάλυση περιγράφει τον αριθμό και πλάτος φασματικών ζωνών στο σύστημα αισθητήρα. Η χρονική ανάλυση αναφέρετε στη μέτρηση του επαναλαμβανόμενου κύκλου ή συχνότητα με την οποία ένας αισθητήρας επανεξετάζει το ίδιο μέρος της επιφάνειας της Γης. Τα χαρακτηριστικά συχνότητας καθορίζονται από το σχεδιασμό του δορυφορικού αισθητήρα και το μοτίβο τροχιάς του (Shunlin & Jindi, 2020).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός αισθητήρα και της επιφάνειας της Γης έχει δύο τρόπους: ενεργός ή παθητικός.

- Οι παθητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία να φωτίζει την επιφάνεια της Γης και ανιχνεύουν την ανάκλαση από την επιφάνεια. Συνήθως καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή ορατού (430–720 nm) και (NIR) (750–950 nm). Η ενέργεια που μετράτε από παθητικούς αισθητήρες είναι συνάρτηση της σύνθεσης της επιφάνειας, της φυσικής θερμοκρασίας, της τραχύτητας της επιφάνειας και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών της Γης
 - Οι ενεργοί αισθητήρες παρέχουν τη δική τους πηγή ενέργειας για να φωτίσουν τα αντικείμενα και να μετρήσουν τις παρατηρήσεις. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή του ορατού and NIR και ραντάρ
κύματα
- (<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#sensors>).

Επίσης κατηγοριοποίηση γίνεται και από άποψη λειτουργικότητας σε:

- Αισθητήρες απεικόνισης και
- Αισθητήρες Μη- απεικόνισης

Οι αισθητήρες απεικόνισης περιλαμβάνουν και χρησιμοποιούν συστήματα οπτικής απεικόνισης, συστήματα θερμικής απεικόνισης και συστήματα απεικόνισης ραντάρ. Τα συστήματα οπτικής απεικόνισης χρησιμοποιούν τα φάσματα ορατού, NIR, και SWIR και συνήθως παράγουν πανχρωματικές, πολυφασματικές και υπερφαστικές εικόνες. Τα συστήματα θερμικής απεικόνισης χρησιμοποιούν μεσαία έως μεγάλα μήκη υπέρυθρων κυμάτων. Οι αισθητήρες μη απεικόνισης περιλαμβάνουν ραδιόμετρα μικροκυμάτων, υψομετρητή μικροκυμάτων, μαγνητικοί αισθητήρες, βαρυμετρήματα, αποστασιόμετρα λείζερ, και υψομετρητές λείζερ (Zhu et al, 2017). Η συνεχής βελτίωση των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης που βασίζεται σε δορυφορικούς αισθητήρες οδηγεί σε ποσοτικά και ποιοτικά καλύτερα διαθέσιμα δεδομένα για τη γεωργία (Mulla 2013).

Τα όργανα Landsat 8 αντιπροσωπεύουν μια εξελικτική πρόοδο στην τεχνολογία, ιδιαίτερα, η ζώνη (NIR) του αισθητήρα OLI είναι πιο κοντά σε πλάτος με τη ζώνη του αισθητήρα MODIS και αποφεύγει τη λειτουργία απορρόφησης υδρατμών(0.825 μm) που εμφανίζεται στη ζώνη NIR του αισθητήρα ETM+. Ο αισθητήρας TIRS ανιχνεύει την ακτινοβολία που εκπέμπεται σε δύο θερμικές υπέρυθρες ζώνες 100 m, σε σύγκριση με το υψηλό και χαμηλό κέρδος θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας ενιαίας ζώνης 60 m ETM+. Η μειωμένη χωρική ανάλυση του αισθητήρα TIRS δεν είναι η βέλτιστη αλλά ήταν αναγκαία από τους περιορισμούς λόγω κόστους μηχανικής. Ωστόσο, οι δυο θερμικές ζώνες του αισθητήρα TIRS επιτρέπουν τη θερμική μήκους κύματος ατμοσφαιρική διόρθωση και περισσότερη αξιόπιστη ανάκτησης και εκπομπής θερμοκρασίας της επιφάνειας.

Οι αισθητήρες OLI και TIRS σχεδιάστηκαν τεχνικά να ενσωματώνουν εξελίξεις που βελτιώνουν την απόδοσή τους σε σχέση με τους προηγούμενους αισθητήρες Landsat. Οι συντελεστές βαθμονόμησης για όλους τους αισθητήρες Landsat έχουν ρυθμιστεί για να μεγιστοποιούν παγκοσμίως το εύρος της ακτινοβολίας της επιφάνειας γης στη κάθε φασματική ζώνη. Το δυναμικό εύρος του αισθητήρα OLI είναι βελτιωμένο σε σύγκριση με προηγούμενους αισθητήρες Landsat, μειώνοντας την ζώνη κορεσμού σε σχέση με επιφάνειες ανάκλασης όπως χιόνι ή σύννεφο (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>).

Οι φασματικές ζώνες των αισθητήρων OLI και TIRS παραμένουν ευρέως συγκρίσιμες με τις ζώνες του Landsat 7 (ETM+). Σε σύγκριση με το ETM +, ο αισθητήρας OLI έχει δύο πρόσθετες ανακλαστικές ζώνες μήκους κύματος:

- μια νέα μικρότερη μπλε ζώνη μήκους κύματος (0.43–0.45 μm) προβλεπόμενη για βελτιωμένη ευαισθησία στη χλωροφύλλη και άλλα αιωρούμενα υλικά στα παράκτια ύδατα και για την ανάκτηση ατμοσφαιρικών ιδιοτήτων αερολύματος, και
- μια νέα ζώνη SWIR (1.36–1.39μm) για ανίχνευση νεφών

Οι άλλες ζώνες αισθητήρα OLI είναι φασματικά στενότερες στις περισσότερες περιπτώσεις από τις αντίστοιχες ζώνες ETM+ (Wulder et al, 2019, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>).

Η Γεωργία είναι τομέας που απαιτεί τεχνολογικές λύσεις με στόχους την αύξηση, μείωση συνολικού κόστους της παραγωγής και τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον αγρονομικές προσεγγίσεις. και βιώσιμες πρακτικές. Η αυξανόμενη τεχνολογική πρόοδος και ανάπτυξη των τεχνολογιών και εφαρμογών που βασίζονται σε δορυφορικούς αισθητήρες τα τελευταία χρόνια διευκολύνει σημαντικά την επίτευξη αυτών των στόχων (Toth & Józskó, 2016).

2.3 Δορυφορική εικόνα

Δεδομένου ότι τα αντικείμενα (συμπεριλαμβανομένης της βλάστησης) έχουν τα μοναδικά φασματικά χαρακτηριστικά τους (περιοχές αντανάκλασης ή εκπομπής), μπορούν να αναγνωριστούν από εικόνες τηλεπισκόπησης σύμφωνα με τα μοναδικά φασματικά χαρακτηριστικά τους. Τα δεδομένα δορυφορικών εικόνων χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο από τη γεωργική βιομηχανία για τη λήψη αποφάσεων, την κατανόηση των αλλαγών και την εκτίμηση των μελλοντικών συνθηκών. Η διαδεδωμένη φύση της τεχνολογίας δορυφορικών εικόνων στη σύγχρονη εποχή έχει βελτιώσει δραματικά την ικανότητα και τις δυνατότητες των ερευνητών, γεωπόνων και των γεωργών στη διαχείριση του αγρού ή πεδίου (Zhu et al, 2017).

Η δημιουργία και ο σκοπός των δορυφόρων δεν είναι ίδια για όλους συνεπώς και τα επακόλουθα δεδομένα εικόνας τους. Διάφοροι φορείς που λειτουργούν και διαχειρίζονται δορυφόρους έχουν διαφορετικούς σκοπούς και χρήσεις για τους δορυφόρους και τα δεδομένα που δημιουργούν καθίστανται διαθέσιμα σε διαφορετικές χωρικές αναλύσεις και χρονικές κλίμακες (Yang, 2018).

Χωρική ανάλυση είναι χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας, δηλαδή το μέγεθος του pixel σε πραγματικές διαστάσεις, δηλαδή ένα pixel πόσα μέτρα πραγματικής επιφάνειας αντιπροσωπεύει.

Τα δεδομένα Landsat, για παράδειγμα, έχουν ανάλυση 30 μέτρων, που σημαίνει ότι κάθε pixel αντιπροσωπεύει μια περιοχή 30m x 30m στο έδαφος.

- Χαμηλή ανάλυση: πάνω από 60m/pixel
- Μεσαία ανάλυση: 10 – 30m/pixel
- Υψηλή έως πολύ υψηλή ανάλυση: 30 cm – 5m/pixel

(<https://eos.com/blog/satellite-data-what-spatial-resolution-is-enough-for-you/>).

Πολλά συστήματα αισθητήρα έχουν μία ενιαία ευρεία ζώνη στο ορατό φάσμα, και πολυφασματικές ζώνες στο φάσμα ορατού-NIR ή θερμική-IR. Τα υπερφασματικά συστήματα έχουν συνήθως εκατοντάδες στενές φασματικές ζώνες.(Shunlin & Jindi, 2020)

Ενώ η διάταξη των pixel περιγράφει τη χωρική δομή μιας εικόνας, τα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά περιγράφουν το πραγματικό περιεχόμενο πληροφοριών σε μια εικόνα. Κάθε φορά που μια εικόνα λαμβάνεται σε φιλμ ή από αισθητήρα, η ευαισθησία της στο μέγεθος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας καθορίζει τη ραδιομετρική ανάλυση. Η ραδιομετρική ανάλυση ενός συστήματος απεικόνισης περιγράφει την ικανότητά του να διακρίνει πολύ μικρές διαφορές στην ενέργεια. Όσο λεπτότερη είναι η ραδιομετρική ανάλυση ενός αισθητήρα, τόσο πιο ευαίσθητος είναι στην ανίχνευση μικρών διαφορών στην ανάκλαση ή την εκπομπή ενέργειας (Prem Chandra et al, 2020).

Τα δορυφορικά δεδομένα είναι συλλογές εκατομμυρίων pixel που σχετίζονται με μια απόσταση στη Γη. Μερικές φορές, ένα pixel μπορεί να αναπαριστά ένα τετραγωνικό μέτρο στο χώρο του εδάφους μπορεί να είναι 30 m², 1km², ή ακόμα μεγαλύτερο. Κάθε χρόνο, ωστόσο, η τεχνολογία βελτιώνεται και οι δυνατότητες χωρικής ανάλυσης πλησιάζουν τα επίπεδα πιο κοντά σε αναλύσεις τετραγωνικού εκατοστού (<https://farmtogether.com/learn/blog/the-power-of-satellite-imagery-in-agriculture>).

Οι δορυφορικές εικόνες προσφέρουν τεχνολογικές λύσεις στους ερευνητές, γεωπόνους και γεωργούς που επιτρέπει να αποκτήσουν περισσότερες πληροφορίες για την παρακολούθηση και κατάσταση των καλλιεργειών σε ολόκληρη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, τον έλεγχο και τη διαχείριση των γεωργικών πόρων, του εδάφους, της προστασίας των καλλιεργειών από ακραίες καιρικές συνθήκες, καθώς και ασθενειών, παρασίτων και άλλων απειλών. Η ενσωμάτωση δορυφορικών εικόνων με άλλες τεχνολογίες μπορεί επίσης να ανιχνεύσει την υγρασία και καταπόνηση του εδάφους και τον κορεσμό των θρεπτικών ουσιών.

Εκτός αυτού, οι εικόνες παρέχουν την ευκαιρία βελτιστοποίησης και αποτελεσματικότητας των μεθόδων διαδικασιών στο αγρό ή πεδίο, επιτρέποντας την λήψη καλύτερων αποφάσεων καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Επιπλέον, οι καλλιεργητές με την πρόσβαση σε ιστορικό χρονοσειρών δορυφορικών εικόνων και παροχής δεδομένων, διαθέτουν τον εντοπισμό παλαιότερων κλιματικών προτύπων και δημιουργίας ιστορικού χαρτών του αγρού ή πεδίου και ως αποτέλεσμα να τους επιτρέπει τον μελλοντικό σχεδιασμό και βελτιωμένης διαχείρισης.

Με την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας παρατήρησης της Γης, εικόνες τηλεπισκόπησης με διαφορετικές χωρικές, χρονικές και φασματικές αναλύσεις είναι πλέον διαθέσιμες. Δεδομένου ότι οι διαφορετικοί αισθητήρες έχουν διαφορετικές χωρικές, χρονικές, φασματικές αναλύσεις και ραδιομετρικά χαρακτηριστικά, η επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων είναι σημαντική για τη χαρτογράφηση κάλυψης της βλάστησης και των παραμέτρων καλλιέργειας (Adolfo et al,2021, Yang et al, 2013).

Η εξαγωγή πληροφοριών αναφορικά με τη βλάστηση από εικόνες τηλεπισκόπησης είναι η διαδικασία εξαγωγής πληροφοριών βλάστησης με την ερμηνεία δορυφορικών εικόνων με βάση τα ερμηνεύτρια στοιχεία όπως το χρώμα εικόνας, η υφή, ο τόνος, το μοτίβο και οι πληροφορίες συσχέτισης κ.λπ.. Τα γενικά βήματα που εμπλέκονται στη χαρτογράφηση της βλάστησης περιλαμβάνουν την προ επεξεργασία της εικόνας και την ταξινόμηση της εικόνας. Η προ επεξεργασία εικόνων ασχολείται με όλα τα

προκαταρκτικά βήματα που είναι απαραίτητα για τη βελτίωση της ποιότητας των αρχικών εικόνων. Η προ επεξεργασία δορυφορικών εικόνων πριν από την εξαγωγή πληροφοριών αναφορικά με τη βλάστηση είναι απαραίτητη για την απομάκρυνση αρνητικών παραγόντων όπως θόρυβος και την βελτίωση της ερμηνείας των δεδομένων εικόνας.

Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται μια χρονοσειρά εικόνων ή όταν μια περιοχή αποτελείται από πολλές εικόνες, καθώς είναι ουσιαστικά σημαντικό να καταστούν αυτές οι εικόνες συμβατές χωρικά και φασματικά. Το ιδανικό αποτέλεσμα της προ επεξεργασίας εικόνας είναι ότι όλες οι εικόνες μετά την προ επεξεργασία της εικόνας θα πρέπει να εμφανίζονται σαν να αποκτήθηκαν από τον ίδιο αισθητήρα. Στη χαρτογράφηση κάλυψης της βλάστησης με τη χρήση εικόνων τηλεπισκόπησης, ειδικά χαρτογράφησης σε μεγάλες περιοχές, σύννεφα και οι συνοδευτικές σκιές επιβάλλουν μεγάλο παράγοντα για την ταυτοποίηση της βλάστησης και έτσι πρέπει να αφαιρεθεί ή να καλυφθεί (Sha et al, 2008).

Οι περισσότερες από αυτές τις εικόνες που λαμβάνονται από απόσταση επηρεάζονται από ατμοσφαιρικές συνθήκες και κλιματικούς παράγοντες, όπως τα σύννεφα. Για τη μελέτη της επιφάνειας της Γης, σύννεφα και οι συνοδευτικές σκιές θεωρούνται ως ένα είδος μόλυνσης για εικόνες τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης, που χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατηγοριοποίηση της χρήσης Γης και ανίχνευση αλλαγών με αποτέλεσμα να λείπουν πληροφορίες σε εικόνες, καθώς και μείωση της χρηστικότητας των δεδομένων ή ακόμα και απώλεια δεδομένων.

Επομένως η κάλυψη από τα σύννεφα και οι συνοδευτικές σκιές είναι αναπόφευκτοι επιβαρυντικοί παράγοντες για τις οπτικές εικόνες στην περιοχή των ορατών και υπέρυθρων φασμάτων, οδηγεί σε ελλείπουσες πληροφορίες και χωροχρονική ασυνέχεια, και, ως εκ τούτου, επηρεάζει την ακριβή εφαρμογή των χρονοσειρών των δορυφορικών εικόνων. Συνεπώς, η αφαίρεση νεφών είναι σημαντικός παράγοντας.

Σύμφωνα με την εκτίμηση του International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), η παγκόσμια ετήσια μέση νεφοκάλυψη είναι τόσο υψηλή όσο 66%. Η ακριβής εξαγωγή νεφών και σκιές σύννεφων από τις εικόνες με αυτόν τον μολυσματικό παράγοντα μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των αρνητικών επιδράσεων από τη κάλυψη των σύννεφων που επιφέρει στην εφαρμογή των εικόνων. Τα σύννεφα παράγονται κυρίως από την ατμοσφαιρική διασπορά μεγάλων σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένης της σκόνης, καπνός και σταγονίδια νερού. Οι χωρικές κατανομές των αραιών νεφών είναι τοπικά συγκεντρωτικές και συνεχείς πάνω από την επιφάνεια της Γης (Shen et al, 2014, Smirnov et al, 2002).

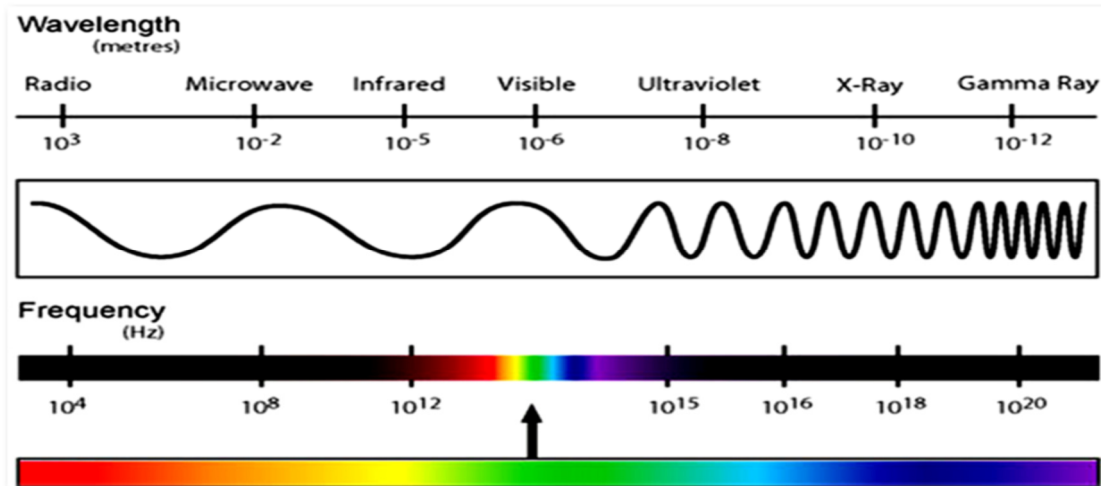
Οι δορυφορικές εικόνες επεκτείνουν σημαντικά τις δυνατότητες των γεωπόνων και γεωργών στον τομέα της γεωργίας. Η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται και να βελτιώνεται, επιτρέποντάς την λήψη εικόνων της καλύτερης ποιότητας. Η χρήση δεδομένων από εικόνες και η ενσωμάτωσή τους με άλλες καινοτόμες τεχνολογίες μπορεί να εξοικονομήσει πόρους, να ανταποκριθεί στις αλλαγές και τις απειλές εγκαίρως, να αυξήσει τις αποδόσεις των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και να αυξήσει τις εισροές

(https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/SatellitesForAgriculture1825_181217_WEB.pdf).

3. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

3.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον δεν γίνονται άμεσα αντιληπτά από τον άνθρωπο, γιατί το ανθρώπινο μάτι είναι ικανό να ευαισθητοποιείται μόνο σε ένα πολύ μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 350 – 700 nm. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται από μήκος κύματος 0.01 Angstrom (γ ακτίνες) μέχρι 3×10^6 μέτρα που χαρακτηρίζει την υψηλή και χαμηλή συχνότητα των ραδιοφωνικών κυμάτων.



Εικόνα. 2_Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα διάφορα φάσματα.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να πάρει διάφορες μορφές στον χώρο.

Αυτές είναι:

- Διερχόμενη ακτινοβολία που είναι η ακτινοβολία που διέρχεται δια μέσου κάποιου υλικού.
- Απορροφούμενη ακτινοβολία που είναι η ακτινοβολία που μπορεί να απορροφηθεί από ένα υλικό και να αποδώσει την ενέργειά της κυρίως για τη θέρμανση του υλικού.
- Εκπεμπόμενη ακτινοβολία η οποία ορίζεται ως η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα υλικό σαν αποτέλεσμα της δομής του.
- Διαχεόμενη ακτινοβολία η οποία είναι η ακτινοβολία που διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις και χάνεται είτε λόγω απορρόφησης είτε λόγω περαιτέρω διάχυσης.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία η οποία εκφράζει την προσπίπτουσα ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια του υλικού με γωνία ανάκλασης ίση και αντίθετη με τη γωνία πρόσπτωσης. (Φουντάς & Γέμτος, 2015).

Οι δείκτες βλάστησης βασίζονται σε διαφορετικό μήκος κύματος ανάκλασης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα κάθε στόχου, χρησιμοποιώντας τους ενεργητικούς και παθητικούς αισθητήρες. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που χρησιμοποιείται χωρίζεται σε μπλε (450 nm), πράσινο (550 nm), κόκκινο (650 nm), κόκκινη άκρη (700), κοντά στο υπέρυθρο (800–900 nm) και SWIR(1300–2200 nm). στις υπέρυθρες ζώνες βραχέων κυμάτων (Xue & Su, 2017).

3.2 Εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία

Η υπέρυθρη ακτινοβολία απορροφάτε, μεταδίδεται και εκπέμπεται από ενώσεις, ανάλογα με τις δονήσεις του χημικού δεσμού μεταξύ ατόμων ή μορίων συστατικών. Οι συχνότητες των δονήσεων καθορίζουν τα μέρη του υπέρυθρου φάσματος που απορροφούν, μεταδίδουν ή ανακλούν. Έτσι, κάθε μόριο ή ένωση έχει το δικό του μοναδικό δακτυλικό αποτύπωμα ή φασματική υπογραφή (Valinger et al., 2017).

Με βάση τη φασματική υπογραφή, είναι δυνατό να γνωρίζουμε το μέγεθος, το σχήμα των ατόμων και των μορίων και τους δεσμούς που τα συγκρατούν. Οι πληροφορίες για τη δομή των ενώσεων βοηθούν στον προσδιορισμό της σύνθεσης των ενώσεων ή των φυτών. Ανάλογα με την αλληλεπίδραση με το φως, είναι επίσης δυνατό να βρεθεί η ποσότητα αυτών των ενώσεων. Αυτό καθιστά το υπέρυθρο πολύτιμο στη μελέτη των διαφόρων ενώσεων, καθώς και των συγκεντρώσεών τους. Επιπλέον, το υπέρυθρο φάσμα δεν χρησιμοποιείται από τα φυτά στη φωτοσύνθεση ή σε οποιαδήποτε άλλη λειτουργία των φυτών, επομένως δεν υπάρχει «παρέμβαση» στην παραγωγή φασματικών υπογραφών.

Το κοντινό υπέρυθρο (NIR) είναι το πλέον κατάλληλο για την ανίχνευση οργανικών ενώσεων επειδή οι δεσμοί μεταξύ άνθρακα και υδρογόνου (CH), οξυγόνου και υδρογόνου (OH) και αζώτου και υδρογόνου (NH) απορροφούν μήκη κύματος που εμπίπτουν στο φάσμα του κοντινού υπέρυθρου. Οι οργανικές ενώσεις είναι τα κύρια συστατικά που βρίσκονται σε ζωντανούς ιστούς, συμπεριλαμβανομένων των φυτών, καθιστώντας το NIR κατάλληλο για χρήση στη γεωργία (Jorge et al, 2019).

Επιπλέον, κοντά στο υπέρυθρο μπορεί να διεισδύσει βαθύτερα σε ένα δείγμα από οποιοδήποτε άλλο μέρος του υπέρυθρου φάσματος. Το NIR είναι το τμήμα του φάσματος IR που μπορεί να αναγνωρίσει συστατικά σε ένα δείγμα. ενώ, το μεσαίο υπέρυθρο φάσμα παρέχει πληροφορίες για τις σχέσεις δομής-λειτουργίας των ενώσεων. Η ικανότητα του NIR να προσδιορίζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ουσιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω σημειακών μετρήσεων και απεικόνισης (Valinger et al., 2017).

3.3 Φασματική ανάκλαση και εκπομπή ακτινοβολίας

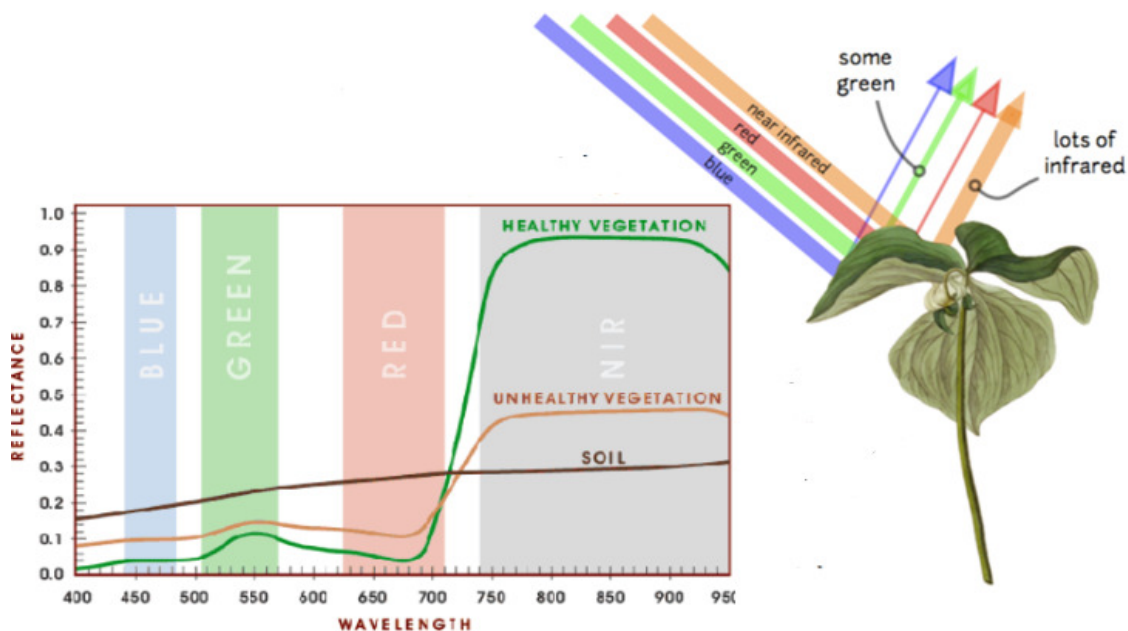
Η τεχνολογία τηλεπισκόπησης χρησιμοποιεί τις ορατές, υπέρυθρες και μικροκυματικές περιοχές ακτινοβολίας για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα διάφορα αντικείμενα στην επιφάνεια της Γης. Οι αντιδράσεις των αντικειμένων είναι διαφορετικές στις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι τυπικές αποκρίσεις χρησιμοποιούνται για τη διάκριση αντικειμένων όπως η βλάστηση, το νερό, το γυμνό χρώμα και άλλα παρόμοια χαρακτηριστικά (Ray, 2016).

Τα ορατά μήκη κύματος ή ενέργεια, που ονομάζουμε φως (10^{-7} m), και που χρησιμοποιούμε για να δούμε, απορροφάτε επίσης από τα φύλλα των φυτών για φωτοσύνθεση. Το ηλιακό υπέρυθρο (10^{-5} m) είναι πέρα από το κόκκινο άκρο του

φάσματος του ορατού φωτός. Τα φύλλα δεν μπορούν να το χρησιμοποιήσουν για φωτοσύνθεση και ως εκ τούτου το απορρίπτουν μέσω ανάκλασης ή μετάδοσης. Ωστόσο, το ηλιακό υπέρυθρο επηρεάζει τον ενεργειακό ισοζύγιο. Με την ηλιακή ενέργεια ένα μόνο στρώμα φύλλων θα απορροφά γενικά το 80% της εισερχόμενης ορατής ακτινοβολίας, ενώ αντανακλά το 10% και μεταδίδει το 10%. Με υπέρυθρο περίπου 20% απορροφάτε με το 50% να αντανακλάται και το 30% να μεταδίδεται. Οι Brown και Gillespie (1995) εξήγησαν ότι περίπου η μισή ηλιακή ενέργεια είναι ορατό φως και η άλλη μισή είναι ηλιακό υπέρυθρο. Αυτή η ενέργεια που φτάνει στο έδαφος απορροφάτε, μεταδίδεται ή ανακλάται από το έδαφος. Η ποσότητα της απορροφούμενης ενέργειας, η οποία εκπέμπεται ως επίγεια ακτινοβολία, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του αντικειμένου. Ο Kotzen (2003) εξήγησε περαιτέρω ότι εμποδίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία τα κλαδιά και τα φύλλα ενός δέντρου μειώνουν άμεσα την ενέργεια που φτάνει στο έδαφος, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία μεγάλων κυμάτων από το έδαφος (Baluja et al, 2012).

3.4 Η ανακλαστικότητα της NIR στα φυτά

Η χλωροφύλλη είναι μια ένωση γνωστή ως χημική ουσία που είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση του φωτός στη διαδικασία που είναι γνωστή ως φωτοσύνθεση και χωρίζεται σε χλωροφύλλη a και χλωροφύλλη b. Η χλωροφύλλη απορροφάει μόνο συγκεκριμένα μήκη κύματος εντός του ορατού φάσματος φωτός, ενώ αντανακλάει άλλα όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 3.



Εικόνα. 3_ Αντανακλώμενα μήκη κύματος βλάστησης των φυτών κ εδάφους.

Η χλωροφύλλη a και η χλωροφύλλη b βρίσκονται στους χλωροπλάστες του φυτού και διαφέρουν μόνο ελαφρώς στη σύνθεση μίας μόνο πλευρικής αλυσίδας. 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. 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 (Πουρνάρα Σ., Λάζος Π. 2020).

3.5 Υπερφασματική και Πολυφασματική απεικόνιση

Υπάρχουν δύο τύποι τεχνολογιών τηλεπισκόπησης δεδομένης της πηγής ενέργειας, η παθητική (π.χ. οπτική) και η ενεργητική τηλεπισκόπηση (π.χ. LiDAR και Radar). Η παθητική οπτική τηλεπισκόπηση συνήθως χωρίζεται περαιτέρω σε δύο ομάδες με βάση τις φασματικές αναλύσεις των αισθητήρων, την πολυφασματική και την υπερφασματική τηλεπισκόπηση (Lu et al, 2020).

Η πολυφασματική απεικόνιση διευκολύνεται με τη συλλογή φασματικών σημάτων σε μερικές διακριτές ζώνες, καθεμία από τις οποίες εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα από δεκάδες έως εκατοντάδες νανόμετρα. Οι πολυφασματικές εικόνες (π.χ. εικόνες Landsat και Sentinel 2) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε γεωργικές μελέτες για την ανάκτηση διαφόρων ιδιοτήτων των καλλιεργειών και του εδάφους, όπως η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η βιομάζα, η απόδοση και η υποβάθμιση του εδάφους (Hunt & Daughtry, 2018). Ωστόσο, λόγω των περιορισμών στη φασματική ανάλυση, η ακρίβεια των ανακτημένων μεταβλητών είναι συχνά περιορισμένη

Αντίθετα, η υπερφασματική απεικόνιση ανιχνεύει φασματικά σήματα σε μια σειρά συνεχών καναλιών με στενό εύρος ζώνης (π.χ. τυπικά κάτω από 10 nm). Ως εκ τούτου, μπορεί να συλλάβει φασματικά χαρακτηριστικά λεπτής κλίμακας (Sahoo et al, 2015). Οι υπερφασματικές εικόνες (π.χ. Hyperion, CASI και Headwall Micro-Hyperspec) με εκατοντάδες ζώνες μπορούν να καταγράψουν πιο λεπτομερείς φασματικές αποκρίσεις. Ως εκ τούτου, είναι πιο ικανό να ανιχνεύει ανεπαίσθητες παραλλαγές των καλυμμάτων εδάφους και τις αλλαγές τους με την πάροδο του χρόνου. Η υπερφασματική απεικόνιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διευκόλυνση της ακριβέστερης και έγκαιρης ανίχνευσης της φυσιολογικής κατάστασης της καλλιέργειας (Lu et al, 2020).

3.6 Περιοχή-Ζώνη Red Edge

Οι πολυφασματικοί αισθητήρες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο για την επίβλεψη της υγείας και τη διαχείριση για τα φυτά των καλλιεργειών. Συλλέγουν ορατά μήκη

κύματος φωτός καθώς και (NIR) και red edge μήκη κύματος. Αυτές οι στενές φασματικές ζώνες (40-60 nm η καθεμιά) παρουσιάζουν τον δομικό δείκτη ενός φυτού και εντοπίζουν ελάχιστες αλλαγές στην ανάκλαση.

Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, η ζώνη Red Edge εκτείνεται περίπου στα 670-760 nm, τοποθετώντας την μεταξύ της ορατής κόκκινης και την (NIR) κοντινής υπέρυθρης ζώνης. Η Red Edge είναι η ζώνη του φάσματος όπου η φασματική αντανάκλαση της πράσινης βλάστησης αλλάζει ραγδαία Αυτό εξηγείται από την ισχυρή απορρόφηση ενέργειας στο μήκος κύματος της ζώνης Red Edge από τη χλωροφύλλη στην πράσινη βλάστηση. Ένα υγιές φυτό έχει περισσότερη χλωροφύλλη και απορροφά περισσότερη ενέργεια φωτός στο κομμάτι 670-760 nm του φάσματος. Υψηλότερη απορρόφηση σημαίνει λιγότερη αντανάκλαση και χαμηλότερη φασματική τιμή σε αυτό το μήκος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι η στρεσαρισμένη βλάστηση έχει ισχυρότερη αντανάκλαση από τα υγιή φυτά του ίδιου είδους στη ζώνη Red Edge. Η φασματική «υπογραφή» στην Κόκκινη Άκρη είναι ένας εξαιρετικός δείκτης φυτικής υγείας.

Τα δεδομένα ζώνης Red Edge από πολυφασματικούς δορυφόρους παρατήρησης της Γης δίνουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν την ελάχιστη καταπόνηση στις καλλιεργίες πριν η κατάσταση είναι ανιχνεύσιμη με παραδοσιακές μεθόδους . Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν στους καλλιεργητές να αξιολογήσουν τη βαθύτερη αιτία του προβλήματος και να λάβουν διορθωτική δράση πριν από την εξάπλωση της πάθησης ή την απώλεια των φυτών. Για δεκαετίες, οι πολυφασματικές εικόνες έχουν βασιστεί για την ταυτοποίηση αυτών των ζητημάτων υγείας των καλλιεργειών, κυρίως συνδυάζοντας ορατής κόκκινης και (NIR) ζώνης δεδομένα σε τύπους που αναφέρονται ως βλαστικοί δείκτες. Εκτός από την αποκάλυψη της καταπόνησης των φυτών που σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, αυτοί οι δείκτες μπορούν να εκτιμήσουν τη βιομάζα και την πυκνότητα της κόμης. Η προσθήκη δεδομένων red edge ζώνης ενισχύει σημαντικά αυτούς τους δείκτες βλάστησης και τις εφαρμογές τους, επιτρέποντας στους χρήστες να ανιχνεύουν την διακυμαινόμενη υγεία των καλλιεργειών νωρίτερα στον κύκλο ανάπτυξης (Sun et al, 2020, <https://up42.com/blog/tech/red-edge-detects-vegetative-stress-earlier-in-plant-growth-cycle>).

4. ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Η πρώτη αναφορά σχετικά με τους φασματικούς δείκτες βλάστησης (VIs) χρονολογείται πίσω στα τέλη του 1960s και αρχές 1970s και περιλαμβάνει τους δείκτες SR, VRI και NDVI. Ένας από τους παλαιότερους, αλλά και σήμερα μεταξύ των πιο χρησιμοποιούμενων δεικτών παγκοσμίως είναι NDVI που δημιουργήθηκε από Rouse et al. in 1974. Η ανάγκη απόκτησης πληροφοριών για τη βλάστηση από την τηλεπισκόπηση οδήγησε στην έννοια των δεικτών βλάστησης (VI) (Solymosi et al, 2019, Romero et al, 2018). Οι (VIs) είναι από τα παλαιότερα εργαλεία σε μελέτες τηλεπισκόπησης. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει δημοσιευθεί πληθώρα VIs τηλεπισκόπησης (Pócas et al, 2020).

Ιδιαίτερα μετά την εμφάνιση δεδομένων φασματοραδιομετρίας τηλεπισκόπησης, από τα οποία ουσιαστικά ένας απεριόριστος αριθμός VIs μπορεί να σχεδιαστεί, έχει προταθεί μια συνεχώς αυξανόμενη ποικιλία VIs. Ενώ ιδανικά κάθε προτεινόμενο VI πρέπει να αναλυθεί σχετικά με την ευαισθησία του σε μια στοχευμένη μεταβλητή σε σχέση με τη διατήρηση της ευρωστίας σε συγκεχυμένους παράγοντες, Οι (VIs) έχουν σχεδιαστεί για να βρουν μια λειτουργική σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών των καλλιεργειών και της απομακρυσμένης χωρικής παρατήρησης (Morcillo-Pallarés et al, 2019).

Οι φασματικοί δείκτες βλάστησης μια ενιαία τιμή μαθηματικού ποσοτικού συνδυασμού της απορρόφησης και σκέδασης των φυτών μετασχηματίζοντας τις παρατηρήσεις από πολλαπλές φασματικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ανάλογα με τη μέθοδο μετασχηματισμού και τις φασματικές ζώνες που χρησιμοποιούνται, αξιολογούνται διάφορες πτυχές που σχετίζονται με τη βλάστηση και άλλες παραμέτρους στην εικόνα (Panda et al, 2010).

Οι (VIs) έχουν αναπτυχθεί έχοντας ένα μοναδικό συνδυασμός διαφόρων ζωνών κυμάτων και σχετίζονται με διάφορες παραμέτρους καλλιέργειας. Τα μοτίβα ανάκλασής καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου αποκαλύπτουν μεγάλο όγκο πληροφοριών σχετικά με τις ζώνες κυμάτων ορατού και (NIR). Η κατανόηση αυτών των προτύπων είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των εποχιακών προτύπων στους VIs (Hatfield et al 2010).

Οι VIs επηρεάζονται από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες, εξωτερικούς όπως η βαθμονόμηση των αισθητήρων, ο ήλιος και γωνία προβολής, ατμοσφαιρική κατάσταση, εσωτερικοί παράγοντες, αντ' αυτού, είναι η διακύμανση των οπτικών ιδιοτήτων κόμης, φύλλων και του υπόβαθρου της κόμης. Οι δείκτες βλάστησης αποτελούν σημαντική παράμετρο ανάλυσης της ανάπτυξης καλλιεργειών. Με την πρόοδο των αισθητήρων παρέχετε στους ενδιαφερόμενους νέα δεδομένα τηλεπισκόπησης για την βελτίωση της υπάρχουσας ανάλυσης (Basso et al, 2004).

Οι VI στοχεύουν στην ενίσχυση της ευαισθησίας των φασματικών χαρακτηριστικών που σχετίζεται με μια βιοφυσική μεταβλητή ενδιαφέροντος, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις συσχετικές επιδράσεις:

(i) εξωτερικές επιδράσεις, όπως η γωνία του ήλιου, η γωνία θέασης και η ατμοσφαιρική σύνθεση. και

(ii) εσωτερικές επιδράσεις που σχετίζονται με τη διακύμανση του υποβάθρου της κόμης, συμπεριλαμβανομένης της τοπογραφίας, των παραλλαγών του εδάφους και των διαφορών στη γερασμένη ή ξυλώδη βλάστηση (Solymosi et al, 2019).

Οι δείκτες βλάστησης ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

4.1 Δείκτες που προκύπτουν από λόγους των φασματικών καναλιών

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι δείκτες που σχηματίζονται από αριθμητικές πράξεις συνδυασμός (όπως οι λόγοι) μεταξύ των ραδιομετρικών τιμών των φασματικών καναλιών του κόκκινου Red και του κοντινού υπέρυθρου NIR τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΜΦ).

4.1.1 RS (RATIO INDEX)

Δείκτης Simple Ratio ή Ratio Vegetation Index (SR or RVI):

Ο δείκτης βλάστησης RATIO υπολογίζεται από απλή διαίρεση των ραδιομετρικών τιμών του υπέρυθρου καναλιού προς τις τιμές του κόκκινου (Birth et al. 1968). Τα pixels με παρουσία βλάστησης εντοπίζονται εύκολα εξαιτίας των διαφορών στην απορρόφηση στις δύο περιοχές του ΗΜΦ (υψηλή στο κόκκινο, χαμηλή στο υπέρυθρο). Επιπλέον ο δείκτης ελαχιστοποιεί τα προβλήματα φωτεινότητας που προκαλούνται από την τοπογραφία της περιοχής. Στα μειονεκτήματα του δείκτη ανήκει οι μη γραμμικότητα των τελικών τιμών του.

Ο δείκτης SR ή RVI υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$SR \text{ ή } RVI = \frac{NIR}{RED} \quad (1)$$

Εάν δεν υπάρχει ερυθρό φάσμα διαθέσιμο τότε:

$$SR \text{ ή } RVI = \frac{NIR}{VIS} \quad (2)$$

όπου NIR και RED είναι η απόκριση στις κοντά στο ερυθρό, ερυθρό ή ορατό φάσμα, αντίστοιχα. Στην ιδανική περίπτωση, χρησιμοποιούνται ανακλάσεις (διορθωμένες για ατμοσφαιρικά φαινόμενα). Σε περίπτωση που και οι δύο ζώνες έχουν τις ίδιες ή παρόμοιες ανακλάσεις, τότε η απλή αναλογία (SR) είναι 1 ή κοντά στο 1. Οι τιμές SR για γυμνά εδάφη είναι γενικά κοντά στο 1 (Silleos et al, 2006).

Ο δείκτης αυτός αποτελεί το απλούστερο δείκτη βλάστησης που καταγράφεται στις ζώνες (NIR) και Red. Αυτός είναι ένας γρήγορος τρόπος για να διακρίνει κανείς τα πράσινα φύλλα από άλλα αντικείμενα και να εκτιμήσει τη σχετική βιομάζα που υπάρχει μέσα στην συγκεκριμένη εικόνα. Επίσης, αυτή η τιμή μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για τη διάκριση της καταπονημένης βλάστησης από τη μη καταπονημένη.

Σύμφωνα με τη φασματική υπογραφή τους τα πράσινα φύλλα, παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ανάκλαση στις περιοχές του κόκκινου και του μπλε (τα φύλλα αντανακλούν περισσότερο στην πράσινη περιοχή και ως εκ τούτου εμφανίζονται πράσινα) (<https://www.hiphen-plant.com/vegetation-index/3582/>).

4.1.2 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Ο NDVI είναι ένας από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάστησης στην τηλεπισκόπηση από την δεκαετία του 1970 κι έπειτα. Με την αυξημένη διαθεσιμότητα εικόνων τηλεπισκόπησης από δορυφόρους και UAV, όλο και περισσότεροι άνθρωποι υιοθετούν το NDVI στη δραστηριότητά τους πέρα από το πεδίο της επιστήμης. Μεταξύ των τυπικών δεικτών φασματικής βλάστησης, ο NDVI είναι ένας από τους πιο κατάλληλους για την παρακολούθηση της δυναμικής ανάπτυξης των καλλιεργειών, καθώς μετρά τη φωτοσυνθετικά ενεργή βιομάζα στα φυτά. Ωστόσο, αυτός ο δείκτης βλάστησης είναι αρκετά ευαίσθητος στη φωτεινότητα του εδάφους και στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Ο NDVI είναι ο πιο κοινός δείκτης βλάστησης στην τηλεπισκόπηση. Αυτός ο δείκτης εκμεταλλεύεται την αντίθεση των χαρακτηριστικών μεταξύ δύο ζωνών από ένα πολυφασματικό σύνολο δεδομένων raster.

- Την απορρόφηση χρωστικών ουσιών χλωροφύλλης στην κόκκινη ζώνη και
- Την υψηλή ανακλαστικότητα του φυτικού υλικού στη (NIR).

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, εκτός από τις περιπτώσεις που η βλάστηση είναι πολύ σπάνια, επομένως η φασματική του ανάκλαση είναι πολύ χαμηλή. Οι τιμές NDVI είναι οι πιο ακριβείς στη μέση της σεζόν στο στάδιο της ενεργού ανάπτυξης των καλλιεργειών κατά συνέπεια προτείνεται κατά τα ενεργά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, για μέγιστη ακρίβεια (<https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/#vi>, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>).

Ο NDVI υπολογίζεται λαμβάνοντας μια αναλογία μεταξύ της διαφοράς ανάκλασης από τις ζώνες NIR και Ερυθρού και του αθροίσματος της ανάκλασης από τις ζώνες NIR και Ερυθρού,

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

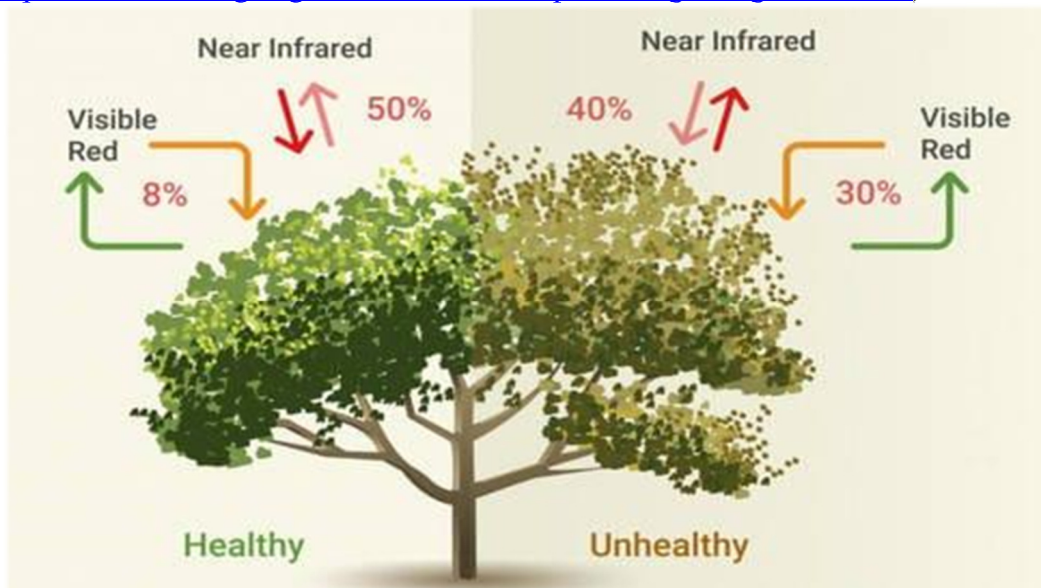
όπου το NIR είναι φως κοντά στο υπέρυθρο και RED) είναι η απόκριση στις εγγύς υπέρυθρες και κόκκινες (ή ορατές) ζώνες αντίστοιχα.

Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται από -1 έως 1. Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε περιοχές με υδάτινες επιφάνειες, ανθρωπογενείς κατασκευές, βράχους, σύννεφα ή χιόνι. Το γυμνό έδαφος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,1-0,2, και τα φυτά έχουν πάντα θετικές τιμές μεταξύ 0,2 και 1. Η υγιής, πυκνή κόμη βλάστησης θα πρέπει να είναι πάνω από 0,5 και η αραιή βλάστηση πιθανότατα θα είναι μεταξύ 0,2 και 0,5. Ωστόσο, οι τιμές είναι ενδεικτικές και θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη η εποχή, ο τύπος του φυτού και οι περιφερειακές ιδιαιτερότητες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι

τιμές NDVI μεταξύ 0,2 και 0,4 αντιστοιχούν σε περιοχές με αραιή βλάστηση. Η μέτρια βλάστηση τείνει να κυμαίνεται μεταξύ 0,4 και 0,6 και οτιδήποτε πάνω από 0,6 δείχνει την υψηλότερη δυνατή πυκνότητα πράσινων φύλλων. Υπάρχει πλέον ένας μεγάλος αριθμός δωρεάν διαδικτυακών εργαλείων GIS που επιτρέπουν τον άμεσο υπολογισμό του NDVI.

Μεταξύ των τυπικών δεικτών φασματικής βλάστησης, ο NDVI είναι ένας από τους πιο κατάλληλους για την παρακολούθηση της δυναμικής ανάπτυξης των καλλιεργειών, καθώς μετρά τη φωτοσυνθετικά ενεργή βιομάζα στα φυτά. Ωστόσο, αυτός ο δείκτης βλάστησης είναι αρκετά ευαίσθητος στη φωτεινότητα του εδάφους και στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Ο NDVI είναι ο πιο κοινός δείκτης βλάστησης στην τηλεπισκόπηση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, εκτός από τις περιπτώσεις που η βλάστηση είναι πολύ σπάνια, επομένως η φασματική του ανάκλαση είναι πολύ χαμηλή. Οι τιμές NDVI είναι οι πιο ακριβείς στη μέση της σεζόν στο στάδιο της ενεργού ανάπτυξης των καλλιεργειών κατά συνέπεια προτείνεται κατά τα ενεργά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, για μέγιστη ακρίβεια.

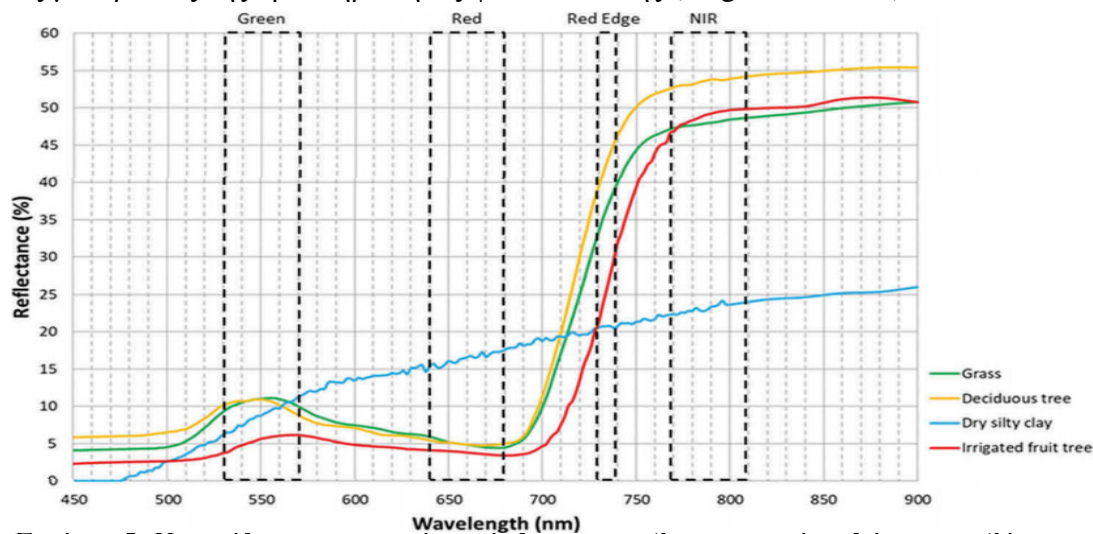
Ο NDVI είναι ένας απλός δείκτης της φωτοσυνθετικά ενεργής βιομάζας ή, με απλούς όρους, της υγιούς βλάστησης. Ο NDVI βοηθά στη διαφοροποίηση της βλάστησης από άλλους τύπους κάλυψης Γης (τεχνητή) και στον προσδιορισμό της συνολικής κατάστασής της. Επιτρέπει επίσης τον καθορισμό και την απεικόνιση περιοχών με βλάστηση στο χάρτη καθώς και τον εντοπισμό μη φυσιολογικών αλλαγών στη διαδικασία ανάπτυξης. Ο NDVI λειτουργεί συγκρίνοντας μαθηματικά την ποσότητα του απορροφούμενου ορατού κόκκινου φωτός και του ανακλώμενου κοντινού υπέρυθρου φωτός, διότι η χρωστική ουσία χλωροφύλλης σε ένα υγιές φυτό απορροφά το μεγαλύτερο μέρος του ορατού κόκκινου φωτός, ενώ η κυτταρική δομή ενός φυτού αντανακλά το μεγαλύτερο μέρος του εγγύς υπέρυθρου φωτός. Συνεπώς η υψηλή φωτοσυνθετική δραστηριότητα, που συνήθως συνδέεται με την πυκνή βλάστηση, θα έχει λιγότερη ανάκλαση στην κόκκινη ζώνη και μεγαλύτερη ανάκλαση στην εγγύς υπέρυθρη ζώνη (<https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>, <https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>).



Εικόνα. 4_ Διαφορά μεταξύ Υγιούς και Μη Βλάστησης.

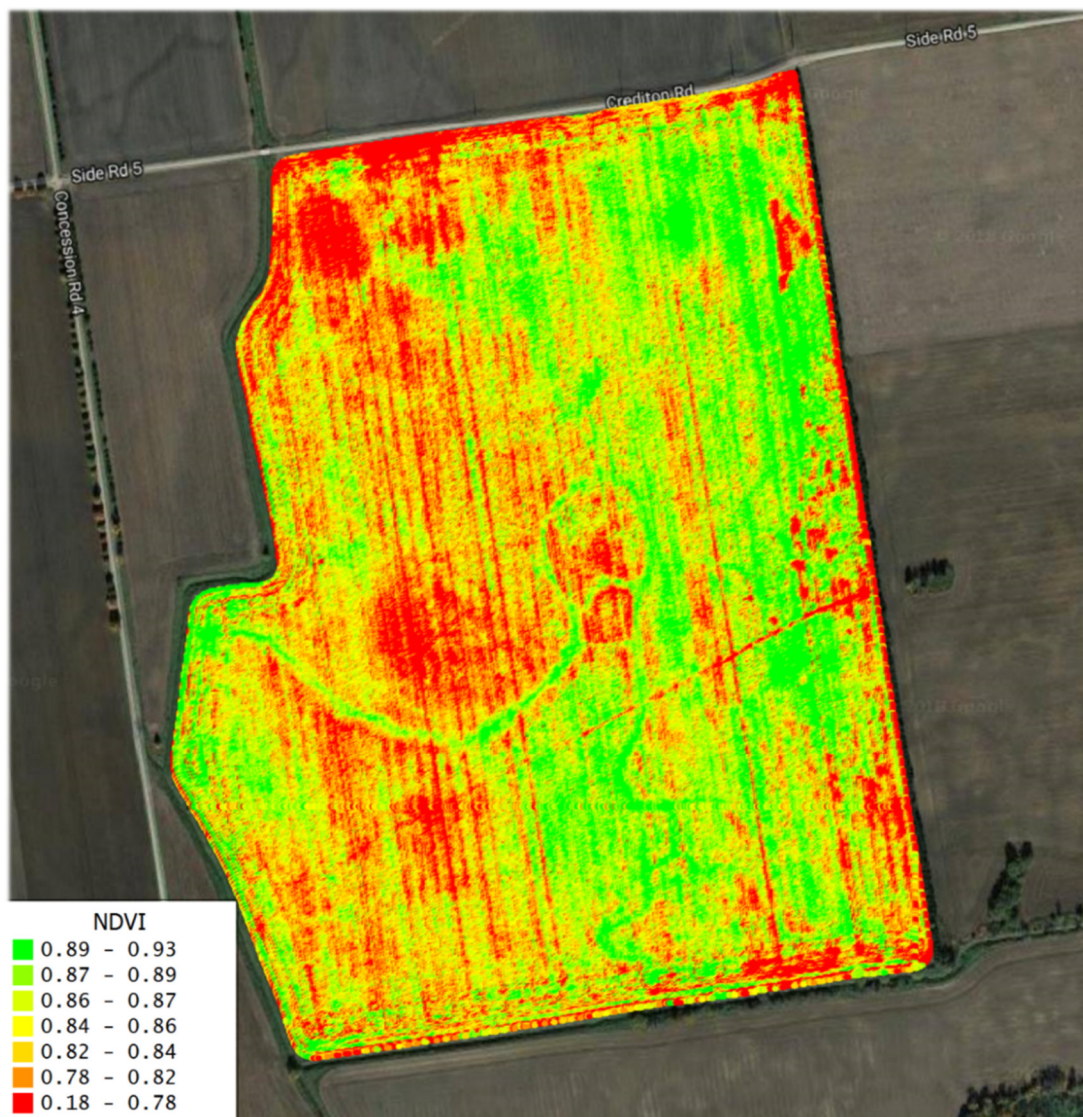
<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>

Όπως φαίνεται στη εικόνα 5., υπάρχει μια απότομη αλλαγή μεταξύ της κόκκινης και της ανάκλασης NIR της βλάστησης, σε αυτό που είναι γνωστό ως η κόκκινη ζώνη ακμής (RE). Αυτή η ζώνη σηματοδοτεί το όριο μεταξύ της απορρόφησης από χλωροφύλλη στην κόκκινη ζώνη και της διασποράς λόγω της εσωτερικής δομής του φύλλου στη ζώνη NIR. Όντας μια μεταβατική περιοχή, η θέση του κόκκινου άκρου είναι πολύ ευαίσθητη στις αλλαγές στις ιδιότητες της βλάστησης, οι οποίες μπορούν εύκολα να αξιοποιούνται από ερευνητές. Για παράδειγμα, το RE χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη όχι μόνο των φύλλων αλλά και στην επιφάνεια των υδάτων μιας δεξαμενής. Αυτά τα έργα οδήγησαν στη διαμόρφωση ενός νέου δείκτη βλάστησης που σχετίζεται με την ανάκλαση του κόκκινου άκρου, την κανονικοποιημένη διαφορά κόκκινη άκρη (NDRE), η οποία έχει αποδειχθεί πιο συμφέρουσα από το NDVI για τη βελτιστοποίηση των χρόνων συγκομιδής με βάση τις μεταβάσεις της δραστηριότητας φωτοσύνθεσης (Jorge et al, 2019).



Εικόνα. 5_ Καμπύλες φασματικής ανάκλασης για διαφορετικά καλύμματα εδάφους, με διαστήματα φασματικών ζωνών. (Jorge et al, 2019)

Το πρόβλημα με τον δείκτη NDVI ως εργαλείο για τη μέτρηση της πυκνότητας της βλάστησης είναι ότι μπορεί να κορεστεί σε υψηλές ποσότητες πράσινης βιομάζας. Με απλά λόγια, μπορεί να εμφανίζει ίδιες μετρήσεις NDVI για χαμηλή και πολύ υψηλή πυκνότητα βλάστησης. Παραδοσιακά, τα αποτελέσματα NDVI παρουσιάζονται ως χρωματικός χάρτης, όπου κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Δεν υπάρχει τυπική χρωματική παλέτα, αλλά τα περισσότερα λογισμικά χρησιμοποιούν την "κόκκινο-πράσινο", που σημαίνει ότι οι κόκκινες-πορτοκαλοκίτρινες αποχρώσεις δείχνουν γυμνό έδαφος ή νεκρή/αραιή βλάστηση και όλες οι αποχρώσεις του πράσινου είναι σημάδι κανονικής έως πυκνής βλάστησης.



Εικόνα. 6_Απεικόνιση τιμών NDVI σε καλλιέργεια.

Ο NDVI μετρά την κατάσταση και την υγεία των καλλιεργειών ή την ευρωστία τους. Έτσι ο NDVI είναι ένας δείκτης πρασίνου και έχει ισχυρή συσχέτιση με την πράσινη βιομάζα, η οποία είναι ενδεικτική της ανάπτυξης. Οι τιμές NDVI είναι επίσης γνωστό ότι έχουν υψηλή συσχέτιση με την απόδοση των καλλιεργειών, που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τη μέτρηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης.

Στην πραγματικότητα, οι τιμές NDVI που λαμβάνονται με δορυφορικά δεδομένα με υψηλή χρονική ανάλυση (π.χ., MODIS) έχουν ισχυρή συσχέτιση με τα φαινολογικά στάδια της καλλιέργειας (ανάδυση, ωριμότητα, συγκομιδή). Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί, όπως για παράδειγμα, κατά τα πρώιμα στάδια της ανάπτυξης των καλλιεργειών, όταν η πράσινη φυλλική επιφάνεια είναι μικρή, τα αποτελέσματα του NDVI είναι πολύ ευαίσθητα στις επιδράσεις του υποβάθρου του εδάφους. Το NDVI μπορεί επίσης να κορεστεί σε μεταγενέστερα στάδια, όταν οι καλλιέργειες φτάσουν στο κλείσιμο της κόμης, και να παράγει ανακριβή αποτελέσματα.

Κάθε τύπος καλλιέργειας έχει διαφορετική δομή κόμης, στάδια ανάπτυξης και απαιτεί συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες για να αναπτυχθεί σωστά. Όλοι αυτοί οι

παράγοντες επηρεάζουν τις ιδιότητες ανάκλασης της καλλιέργειας και, ως εκ τούτου, παράγουν διαφορετικές τιμές NDVI σε διάφορους τύπους καλλιεργειών.

Επίσης, ο υπολογισμός της τιμής NDVI αποδεικνύεται ότι είναι ευαίσθητος σε έναν αριθμό ενοχλητικών παραγόντων όπως:

- Ατμοσφαιρικές επιδράσεις: Η πραγματική σύνθεση της ατμόσφαιρας (ιδίως όσον αφορά τους υδρατμούς και τα αερολύματα) μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις μετρήσεις που γίνονται στο διάστημα.
- Σύννεφα: Τα οπτικά παχιά σύννεφα μπορεί να είναι αρκετά αισθητά στις δορυφορικές εικόνες. Ωστόσο, και τα λεπτά σύννεφα ή τα μικρά σύννεφα με τυπικές γραμμικές διαστάσεις μικρότερες από τη διάμετρο της περιοχής που πραγματικά δειγματολήφθηκε από τους αισθητήρες, μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τις μετρήσεις. Επίσης και οι σκιές του σύννεφου σε περιοχές που φαίνονται καθαρές μπορεί να επηρεάσουν τις τιμές NDVI και να οδηγήσουν σε παρερμηνείες. Αυτές οι σκέψεις ελαχιστοποιούνται με το σχηματισμό σύνθετων εικόνων από καθημερινές ή σχεδόν καθημερινές εικόνες (Holben, 1986).
- Επιδράσεις στο έδαφος: Τα εδάφη τείνουν να σκουραίνουν όταν είναι υγρά, έτσι ώστε η ανάκλασή τους να είναι άμεση συνάρτηση της περιεκτικότητας τους σε νερό. Εάν η φασματική απόκριση στην υγρασία δεν είναι ακριβώς η ίδια στις δύο φασματικές ζώνες, το NDVI μιας περιοχής μπορεί να φαίνεται ότι αλλάζει ως αποτέλεσμα των αλλαγών της υγρασίας του εδάφους (κατακρήμνιση ή εξάτμιση).
- Ανισότροπα φαινόμενα: Όλες οι επιφάνειες (φυσικές ή ανθρωπογενείς) αντανακλούν το φως διαφορετικά σε διαφορετικές κατευθύνσεις και αυτή η μορφή ανισοτροπίας είναι γενικά φασματικά εξαρτημένη, ακόμα κι αν η γενική τάση μπορεί να είναι παρόμοια σε αυτές τις δύο φασματικές ζώνες. Ως αποτέλεσμα, η τιμή του δείκτη NDVI μπορεί να εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ανισοτροπία του στόχου και από τη γωνιακή γεωμετρία του φωτισμού και της παρατήρησης τη στιγμή των μετρήσεων.

Παρά τους πολλούς πιθανούς ενοχλητικούς παράγοντες για το δείκτη NDVI, παραμένει ένα πολύτιμο εργαλείο ποσοτικής παρακολούθησης της βλάστησης όταν η φωτοσυνθετική ικανότητα της επιφάνειας του εδάφους πρέπει να μελετηθεί στην κατάλληλη χωρική κλίμακα για διάφορα φαινόμενα (Labib et al., 2020).

4.1.3 NDWI (Normalized Difference Water Index)

Το NDWI αρχικά αναπτύχθηκε για να περιγράψει τα υδάτινα σώματα ανοικτής επιφάνειας και να εκτιμήσει τη θολότητα τους, μετριάζοντας την ανάκλαση της κάλυψης του εδάφους και της βλάστησης της Γης. Το NDWI ανακτάται με τον συνδυασμό ζωνών NIR και Visible-green (<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>). Ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς νερού (NDWI) χρησιμοποιείται για την επισήμανση χαρακτηριστικών ανοικτού νερού σε μια δορυφορική εικόνα επιτρέποντας σε ένα υδάτινο σώμα να "ξεχωρίζει" ενάντια στο έδαφος και τη βλάστηση.

Δεδομένου ότι ο δείκτης NDWI μετρά αποτελεσματικά την περιεκτικότητα σε υγρασία, συχνά συγκρίνεται με τον δείκτη NDMI. Ουσιαστικά, υπάρχει μια σημαντική διαφορά στον τρόπο υπολογισμού και χρήσης των δύο. Ο δείκτης NDMI

κάνει χρήση του συνδυασμού ζωνών NIR και SWIR για την ενίσχυση της παρουσίας νερού στα φύλλα των φυτών. Ο δείκτης NDWI, από την άλλη πλευρά, υπολογίζεται με το συνδυασμό των ζωνών GREEN-NIR (ορατού green και NIR), που του επιτρέπει να ανιχνεύει διακριτικές αλλαγές στην περιεκτικότητα των υδάτινων σωμάτων σε νερό. Ο δείκτης NDWI προτάθηκε από McFeeters το 1996, η κύρια χρήση του σήμερα είναι η ανίχνευση και παρακολούθηση ελαφρών αλλαγών στην περιεκτικότητα των υδάτινων σωμάτων σε νερό.

Αξιοποιώντας τις φασματικές ζώνες NIR (near-infrared) and GREEN (visible green), Το NDWI έχει τη δυνατότητα να ενισχύει τα υδάτινα σώματα σε μια δορυφορική φωτογραφία. Μειονέκτημα του δείκτη είναι ότι είναι ευαίσθητο σε κατασκευαστικές δομές,

Το NDWI Ορίζεται από την εξίσωση

(McFeeters 1996):

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (4)$$

Το μήκος κύματος ορατό green μεγιστοποιεί την τυπική ανάκλαση της επιφάνειας του νερού. Το μήκος κύματος NIR μεγιστοποιεί την υψηλή ανάκλαση της επίγειας βλάστησης και των χαρακτηριστικών του εδάφους, ελαχιστοποιώντας τη χαμηλή ανάκλαση των χαρακτηριστικών του νερού. Το αποτέλεσμα της εξίσωσης NDWI είναι θετικές τιμές για τα χαρακτηριστικά του νερού και αρνητικές (ή μηδέν) για το έδαφος και την επίγεια βλάστηση.

Οι τιμές των υδάτινων σωμάτων είναι μεγαλύτερες από 0,5. Η βλάστηση έχει πολύ μικρότερες τιμές, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη διάκριση της βλάστησης από τα υδάτινα σώματα ευκολότερα. Τα ενσωματωμένα χαρακτηριστικά έχουν θετικές τιμές μεταξύ 0 και 0,2.

Οι τιμές NDWI αντιστοιχούν στο ακόλουθο εύρος:

0,2 – 1 Επιφάνεια νερού

0.0 – 0,2 Πλημμύρα, υγρασία

-0,3 – 0.0 Μέτρια ξηρασία, μη υδάτινες επιφάνειες

-1 – -0.3 Ξηρασία, μη υδάτινες επιφάνειες

Το NDWI, χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση του νερού από την ξηρά ή μάλλον το πιο κατάλληλο για χαρτογράφηση υδάτινων σωμάτων. Τα υδάτινα σώματα έχουν χαμηλή ακτινοβολία και ισχυρή απορροφησιμότητα στο ορατό υπέρυθρο εύρος μηκών κύματος. Το NDWI χρησιμοποιεί κοντά στο υπέρυθρο και πράσινες ζώνες εικόνων τηλεπισκόπησης με βάση τη περίπτωση (eos.com/make-an-analysis/ndwi/, <https://eos.com/make-an-analysis/index-stack/>).

Ο Δείκτης (NDWI) είναι μια νέα μέθοδος που έχει αναπτυχθεί για να οριοθετήσει τα χαρακτηριστικά ανοικτού νερού και να ενισχύσει την παρουσία τους σε ψηφιακές εικόνες τηλεπισκόπησης. Ο δείκτης NDWI κάνει χρήση στις ζώνες NIR και ορατό-green να ενισχυθεί η παρουσία τέτοιων χαρακτηριστικών, εξαλείφοντας παράλληλα την παρουσία εδάφους και χαρακτηριστικά επίγειας βλάστησης (McFEETERS, 1996).

4.1.4 NDMI (Normalized Difference Moisture Index)

Ο δείκτης υγρασίας κανονικοποιημένης διαφοράς (NDMI) ανιχνεύει τα επίπεδα υγρασίας στη βλάστηση χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό στις φασματικές ζώνες (NIR) και (SWIR). Είναι ένας αξιόπιστος δείκτης της καταπόνησης του νερού στις καλλιέργειες. Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση ξηρασίας και καύσιμου υλικού σε περιοχές υψηλού κινδύνου πυρκαγιάς (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/arcpy/spatial-analyst/ndmi.htm>).

Οι σοβαρές συνθήκες ξηρασίας όχι μόνο καταπονούν τις καλλιέργειες, αλλά μπορούν να καταστρέψουν ολόκληρη την παραγωγή. Το NDMI μπορεί να ανιχνεύσει την καταπόνηση του νερού σε πρώιμο στάδιο, πριν το πρόβλημα ξεφύγει από τον έλεγχο. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το NDMI για την παρακολούθηση της άρδευσης, ειδικά σε περιοχές όπου οι καλλιέργειες απαιτούν περισσότερο νερό από ό, τι μπορεί να τους παρέχει η φύση, συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της ανάπτυξης των καλλιεργειών, καθιστώντας το NDMI ένα εξαιρετικό εργαλείο. Μολονότι κοινώς το NDMI συχνά συγκρίνεται με το δείκτη NDWI, Οι δύο δείκτες θα πρέπει να θεωρούνται ουσιαστικά ως διαφορετικοί. Ενώ το NDMI χρησιμοποιεί το συνδυασμό των ζωνών NIR-SWIR για την ανίχνευση της περιεκτικότητας σε υγρασία στα φύλλα, το NDWI χρησιμοποιεί το συνδυασμό GREEN-NIR για να αναδείξει τα υδάτινα σώματα και να παρακολουθεί την θολότητά τους.

Έτσι, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε σύγχυση, το NDMI χρησιμοποιεί το συνδυασμό των ζωνών NIR-SWIR Πρέπει να μεταχειρίζεται σαν ξεχωριστός δείκτης από τον NDWI το οποίο μετράει περιεχόμενο νερού σε υδάτινα σώματα. Το NDMI υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ανάκλαση (NIR) και (SWIR) και

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (5)$$

Οι ζώνες NIR και SWIR επιλέχθηκαν για την εξίσωση NDMI για να μετριάσουν τις επιπτώσεις του φωτισμού και της ατμόσφαιρας. Το φασματικό κανάλι (SWIR) είναι ευαίσθητο στην περιεκτικότητα νερού στη βλάστηση και στο μεσόφυλλο σημείο δομής των φύλλων. Από την άλλη, η ζώνη (NIR) λαμβάνει τη φωτεινή ανάκλαση από την εσωτερική δομή των φύλλων και την περιεκτικότητα σε ξηρή ύλη των φύλλων. Όταν συνδυάζονται, η ακρίβεια των δεδομένων σχετικά με την περιεκτικότητα νερού της βλάστησης γίνεται πολύ υψηλότερη. Επιπρόσθετα, Το NDMI είναι ένας καλύτερος δείκτης αποψίλωσης των δασών από το NDVI χάρη σε μια λιγότερο απότομη μείωση των τιμών.

Όπως και οι περισσότεροι δείκτες, το NDMI έχει τιμές μόνο μεταξύ -1 και 1, πράγμα που καθιστά πολύ εύκολη την ερμηνεία των τιμών NDMI. Η καταπόνηση του νερού θα σηματοδοτηθεί από τις αρνητικές τιμές που πλησιάζουν το -1, ενώ το +1 ίσως υποδεικνύει περίσσεια νερού. Ως εκ τούτου, κάθε ενδιάμεση τιμή θα αντιστοιχεί σε μια ελαφρώς διαφορετική αγρονομική κατάσταση.

Ερμηνεία Τιμών NDMI

- 1 – -0.8 Γυμνό έδαφος,
- 0.8 – -0.6 Σχεδόν απουσία κάλυψης κόμης,
- 0.6 – -0.4 Πολύ χαμηλή κάλυψη κόμης,

- 0.4 – -0.2 Χαμηλή κάλυψη κόμης, ξηρή ή πολύ χαμηλή κάλυψη κόμης,
- 0.2 – 0 Μεσαία προς χαμηλή κάλυψη κόμης, υψηλή καταπόνηση νερού ή χαμηλή κάλυψη κόμης, χαμηλή υδατική καταπόνηση,
- 0 – 0.2 Μεσαία κάλυψη κόμης, υψηλή καταπόνηση νερού ή μεσαίο-χαμηλό κάλυψη κόμης, χαμηλή υδατική καταπόνηση,
- 0.2 – 0.4 Μεσαία προς Υψηλή κάλυψη κόμης, υψηλή καταπόνηση νερού ή μέτρια κάλυψη κόμης, χαμηλή υδατική καταπόνηση,
- 0.4 – 0.6 Υψηλή κάλυψη κόμης, χωρίς καταπόνηση νερού,
- 0.6 – 0.8 Πολύ υψηλή κάλυψη κόμης, χωρίς καταπόνηση νερού,
- 0.8 – 1 Πλήρης υψηλή κάλυψη κόμης, χωρίς καταπόνηση νερού /περίσσεια νερού

Είναι σημαντική η υπενθύμιση ότι οι τιμές NDMI μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της καλλιεργητική περιόδου, επειδή η ανάκλαση των φυτών είναι ελαφρώς διαφορετική για κάθε φαινολογικό στάδιο. Υπάρχει επίσης συσχέτιση μεταξύ NDMI και NDVI, η καταπόνηση του νερού που υποδεικνύεται από τις τιμές NDMI μπορεί να επιβεβαιωθεί από μια σημαντικά χαμηλότερη από το μέσο όρο τιμής NDVI (<https://eos.com/make-an-analysis/ndmi/>).

4.1.5 GNDVI (Green-Normalized Difference Vegetation Index)

Ο δείκτης GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation) είναι ένας δείκτης της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών μετρά την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη με μεγαλύτερη ακρίβεια από τη NDVI. Είναι δείκτης χλωροφύλλης και χρησιμοποιείται σε μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης. Θεωρείται ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάστησης για τον προσδιορισμό της πρόσληψης νερού και αζώτου της καλλιέργειας.

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \quad (6)$$

Όπως και με το NDVI, οι τιμές που δίνονται από αυτόν τον δείκτη κυμαίνονται επίσης από -1 έως 1. Οι τιμές μεταξύ -1 και 0 σχετίζονται με την παρουσία νερού ή γυμνού εδάφους. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται κυρίως στα ενδιάμεσα και τελικά στάδια του κύκλου της καλλιέργειας. Ο GNDVI είναι ο δείκτης πράσινης βλάστησης που χρησιμοποιεί την εγγύς υπέρυθρη (NIR) και την πράσινη ζώνη (GREEN) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο δείκτης GNDVI είναι πιο ευαίσθητο στη διακύμανση της χλωροφύλλης στην καλλιέργεια από το NDVI και έχει υψηλότερο σημείο κορεσμού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καλλιέργειες με πυκνές κόμης ή σε πιο προχωρημένα στάδια ανάπτυξης, ενώ το NDVI είναι κατάλληλο για την εκτίμηση της ευρωστίας των καλλιεργειών κατά τα πρώτα στάδια (eos.com/blog/vegetation-indices/#gndvi, <https://www.auravant.com/en/blog/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>).

4.1.6 RE-NDVI (Red Edge-Normalized Difference Vegetation Index)

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης κόκκινων άκρων διαφοράς (NDRE) συνδυάζει τις φασματικές ζώνες near-infrared (NIR) και μια συγκεκριμένη ζώνη για το στενό εύρος μεταξύ του ορατού κόκκινου και της ζώνης μετάβασης κόκκινου NIR (ονομαζόμενη περιοχή κόκκινης ακμής). Για την καλύτερη ακρίβεια δεδομένων, συνιστάται η χρήση του NDRE σε συνδυασμό με το NDVI (<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>).

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$NDRE = \frac{NIR - RED\ EDGE}{NIR + RED\ EDGE} \quad (7)$$

Η μέθοδος Red-Edge NDVI (NDVI-RE) είναι ένας δείκτης βλάστησης για την εκτίμηση της υγείας της βλάστησης χρησιμοποιώντας τη ζώνη κόκκινων άκρων. Είναι ειδικά χρήσιμο για την εκτίμηση της υγείας των καλλιεργειών στα μεσαία έως τα τελευταία στάδια ανάπτυξης, όταν η συγκέντρωση χλωροφύλλης είναι σχετικά υψηλότερη.

Επίσης, το NDVI-RE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρτογραφήσει τη μεταβλητότητα εντός του πεδίου του φυλλώματος αζώτου για να κατανοήσει τις απαιτήσεις λιπασμάτων των καλλιεργειών. Ο δεδομένος δείκτης βλάστησης εφαρμόζεται για κάλυψη κόμης υψηλής πυκνότητας και χρησιμοποιείται συνήθως για την παρακολούθηση καλλιεργειών που έχουν φθάσει στο στάδιο της ωριμότητας ([NDVIre—ArcGIS Pro | Documentation, https://eos.com/blog/vegetation-indices/#ndre](https://eos.com/blog/vegetation-indices/#ndre)).

4.1.7 SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)

Ο δείκτης SAVI εισήχθη για να μετριάσει τις επιπτώσεις της φωτεινότητας του εδάφους, καθώς το NDVI βρέθηκε να είναι πολύ ευαίσθητο στις επιπτώσεις του εδάφους (χρώμα εδάφους, υγρασία του εδάφους, μεταβλητότητα εδάφους μεταξύ των περιοχών, κ.λπ.) σε ελλιπείς συνθήκες κάλυψης της βλάστησης. Για τη μείωση του φαινομένου του εδάφους ο δημιουργός του Huete πρόσθεσε έναν συντελεστή προσαρμογής εδάφους L στην εξίσωση του NDVI για να διορθώσει τις επιπτώσεις που τείνουν να επηρεάζουν τα αποτελέσματα με συνέπεια έναν δείκτη βλάστησης προσαρμοσμένο στο έδαφος (SAVI).

Αποτελεί έναν δείκτη βλάστησης που προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την επίδραση της φωτεινότητας του εδάφους, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή διόρθωσης φωτεινότητας εδάφους. Αυτός χρησιμοποιείται συχνά σε ξηρές περιοχές όπου η φυτική κάλυψη είναι χαμηλή.

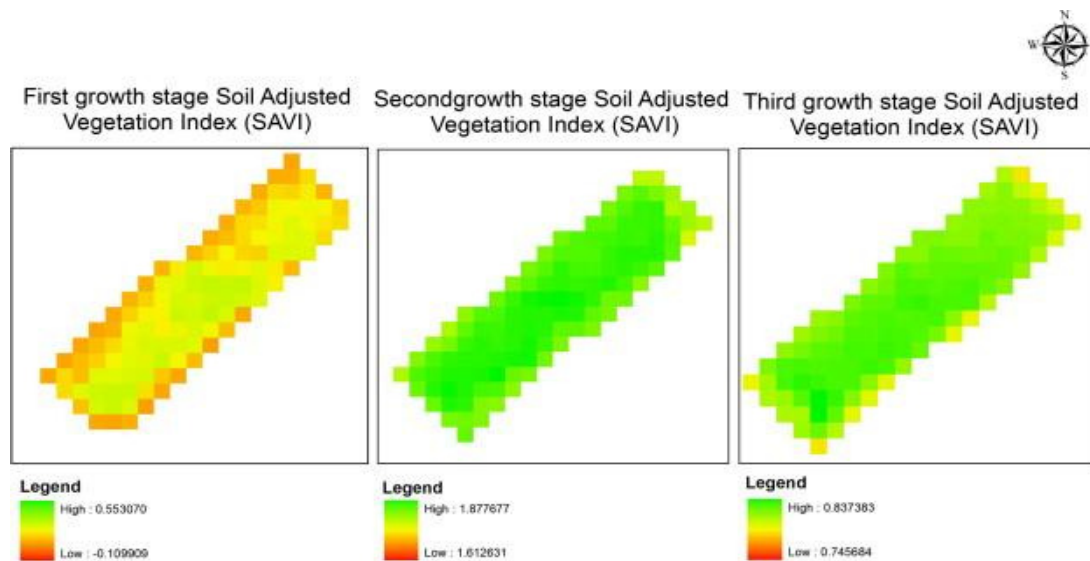
Ορίζεται από την εξίσωση:

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + Red + L) \times (1 + L)} \quad (8)$$

Συντελεστής L = ποσότητα πράσινης βλάστησης

Το NIR και το κόκκινο αναφέρονται στις ζώνες που σχετίζονται με αυτά τα μήκη κύματος. Η τιμή L ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα της πράσινης φυτικής κάλυψης. Γενικά, σε περιοχές χωρίς πράσινη βλάστηση, L=1 σε περιοχές μέτριας πράσινης φυτικής κάλυψης, L=0,5; και σε περιοχές με πολύ υψηλή βλάστηση, L=0 (που ισοδυναμεί με τη μέθοδο NDVI). Αυτός ο δείκτης εξάγει τιμές μεταξύ -1,0 και 1,0 (Huete, 1988, <https://eos.com/blog/vegetation-indices/#savi>).

Η μετατόπιση της προέλευσης προς το αρνητικό σημείο σύγκλισης ισοδυναμεί με προσθήκη μιας σταθεράς, L1 (> 0), στην κόκκινη ανάκλαση και L2 (> 0), στην ανάκλαση NIR. Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού (1 + L) χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των περιορισμένων συνθηκών. Έτσι, αν και συνιστάται ένας σταθερός συντελεστής προσαρμογής (L = 0,5) στο SAVI, ο Huete (1988) πρότεινε ότι ο βέλτιστος συντελεστής προσαρμογής κυμαινόταν (κυμαινόμενος από 0 έως 1) με την παρούσα βλάστηση και ο συντελεστής ρύθμισης του εδάφους έγινε χαμηλότερος σε αξία καθώς η βλάστηση έγινε πιο πυκνή (Hongrui et al, 2018).



Εικόνα. 7_Απεικόνιση δείκτη SAVI για διαφορετικά στάδια ανάπτυξης.

4.1.8 EVI (Enhanced Vegetation Index)

Ο δείκτης ενισχυμένης βλάστησης (EVI) είναι ένας «βελτιστοποιημένος» δείκτης βλάστησης που έχει σχεδιαστεί για να ενισχύει το σήμα βλάστησης με βελτιωμένη ευαισθησία σε περιοχές υψηλής βιομάζας και βελτιωμένη παρακολούθηση της βλάστησης μέσω αποσύνδεσης του σήματος φόντου της κόμης και μείωσης των επιρροών της ατμόσφαιρας. Ο δείκτης EVI προέρχεται από την εργασία που έγινε από τον Huete και μια ομάδα από τη Βραζιλία και το Πανεπιστήμιο της Αριζόνα των Ηνωμένων Πολιτειών, οι οποίοι ανέπτυξαν ένα εργαλείο που βασίζεται στο φασματοραδιόμετρο απεικόνισης μέτριας ανάλυσης (MODIS) για την αξιολόγηση των συνθηκών βλάστησης και ουσιαστικά αποτελεί τροποποίηση του NDVI με σκοπό να δώσει καλύτερα αποτελέσματα (Huete et al.1999).

Ορίζεται από την εξίσωση:

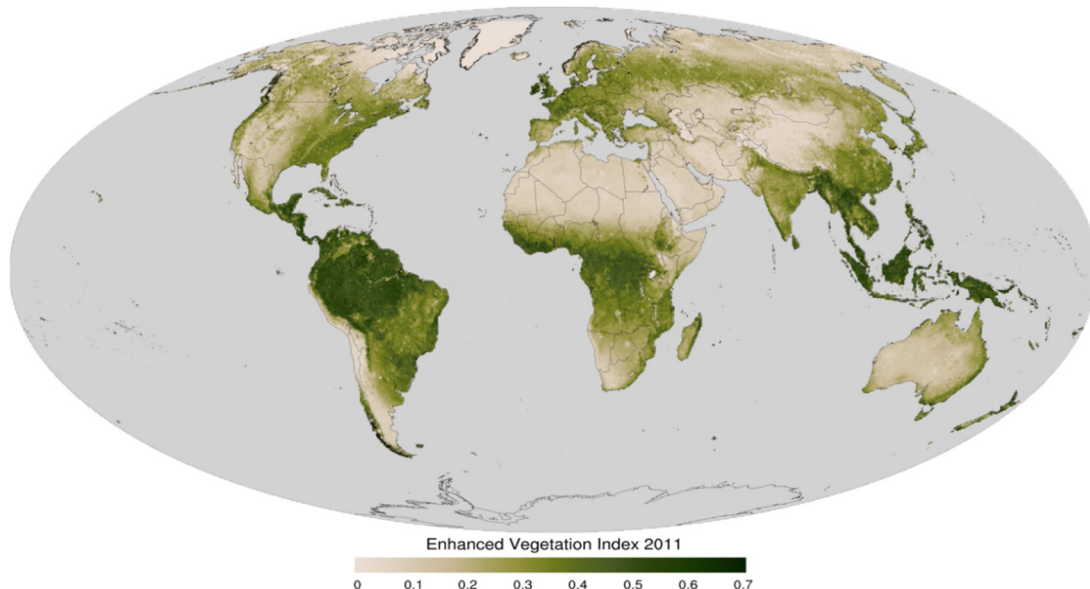
$$EVI = \frac{2,5 \times (NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)} \quad (9)$$

Το εύρος τιμών για το EVI είναι -1 έως $+1$, και για υγιή βλάστηση, κυμαίνεται μεταξύ $0,2$ και $0,8$.

Η εξίσωση περιέχει τους συντελεστές $C1$ και $C2$ για τη διόρθωση της διασποράς αεροζόλ που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και L για προσαρμογή για το έδαφος και το υπόβαθρο της κόμης. Οι συντελεστές που υιοθετήθηκαν στον αλγόριθμο MODIS-EVI είναι: $L=1$, $C1 = 6$, $C2 = 7,5$ και G (συντελεστής κέρδους) = $2,5$

(<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>)

Έτσι ο δείκτης EVI χρησιμοποιεί μερικές από τις ίδιες τεχνικές με το NDVI, αλλά με τα δεδομένα εισόδου από έναν δορυφόρο που βασίζεται στον αισθητήρα MODIS. Τόσο ο δείκτης EVI όσο και ο NDVI υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα MODIS και αναλύονται σχετικά με την απόδοση τους σε σύγκριση με τις πλατφόρμες AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).



Εικόνα. 8_Απεικόνιση EVI με βάση τα δεδομένα MODIS.

Ενώ ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI) είναι ευαίσθητος στη χλωροφύλλη, ο EVI ανταποκρίνεται περισσότερο στις δομικές παραλλαγές της κόμης, συμπεριλαμβανομένου του δείκτη επιφάνειας φύλλων (LAI), του τύπου κόμης, της φυσιογνωμίας των φυτών και της αρχιτεκτονικής της κόμης. Οι δύο δείκτες βλάστησης αλληλοσυμπληρώνονται σε παγκόσμιες μελέτες βλάστησης και βελτιώνουν την ανίχνευση των αλλαγών της βλάστησης και την εξαγωγή των βιοφυσικών παραμέτρων της κόμης (Huete et al., 2002).

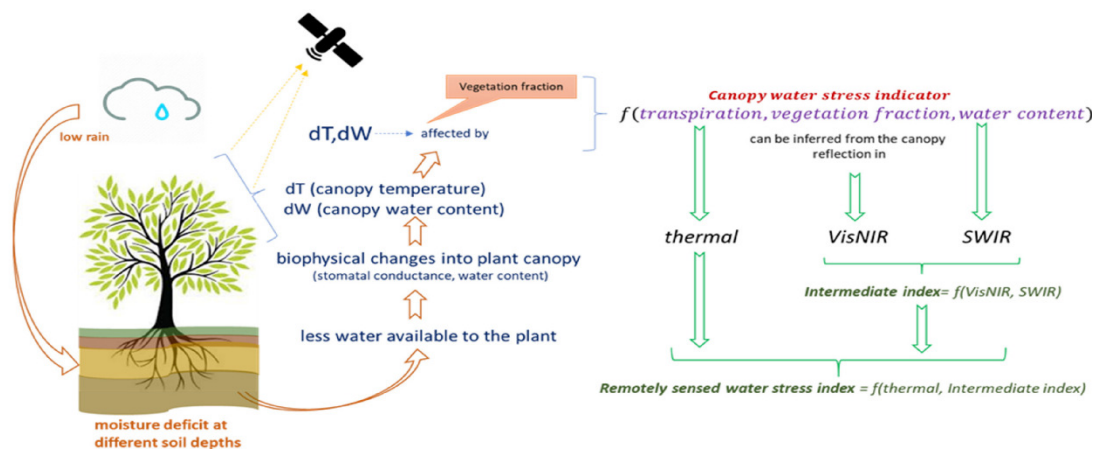
Μια άλλη διαφορά μεταξύ του δείκτη NDVI και του EVI είναι ότι με παρουσία χιονιού, ο δείκτης NDVI μειώνεται, ενώ ο δείκτης EVI αυξάνεται (Huete, 2002). Από το 2000 και μετά με την κυκλοφορία των δύο αισθητήρων MODIS σε Terra (δορυφόρος) και Aqua (δορυφόρος) από τη NASA, το EVI υιοθετήθηκε ως τυπικό προϊόν από τη NASA και έγινε εξαιρετικά δημοφιλές στους χρήστες λόγω της ικανότητάς του να εξαλείφει τους θορύβους του περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας, καθώς και ο μη κορεσμός του, που αποτελεί ένα τυπικό πρόβλημα του NDVI (Huete et al., 2006, Jiang et al., 2008).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τα εμπειρικά επιστημονικά δεδομένα ο δείκτης EVI ανταποκρίνεται περισσότερο στις παραλλαγές, τον τύπο και την αρχιτεκτονική

της κόμης καθώς και στη φυσιολογία των φυτών. Το EVI μπορεί να συσχετιστεί με το στρες και τις αλλαγές που σχετίζονται με την ξηρασία. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό του στρες που σχετίζεται με την ξηρασία σε διαφορετικά τοπία. Συνδέεται κυρίως με τις ξηρασίες που επηρεάζουν τη γεωργία και διαθέτει υψηλή ανάλυση και καλή χωρική κάλυψη σε όλους τους τύπους εδαφών. Βασική αδυναμία του δείκτη αυτού είναι το ότι η καταπόνηση που μπορεί να προκληθεί από άλλες επιπτώσεις εκτός από την ξηρασία είναι δύσκολο να διακριθούν χρησιμοποιώντας μόνο EVI. Επιπρόσθετα, η περίοδος καταγραφής δορυφορικών δεδομένων είναι σύντομη, με τις κλιματικές μελέτες να είναι δύσκολες (Huete et al., 2002).

4.1.9 TVWSI (Temperature Vegetation Water Stress Index)

Ο δείκτης (TVWSI) αποτελεί μια συνάρτηση της ανάκλασης της κόμης που μπορεί να συμπεράνει την κατάσταση διαπνοής, στο ορατό κοντά στο υπέρυθρο (για να συμπεράνει το κλάσμα βλάστησης/φωτοσυνθετική δραστηριότητα) και στο υπέρυθρο βραχέων κυμάτων (για να συμπεράνει την περιεκτικότητα της βλάστησης σε νερό). Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το εννοιολογικό διάγραμμα των ρόλων του Vis-NIR, του θερμικού και του SWIR στον εντοπισμό του υδατικού στρες στη βλάστηση.



Εικόνα. 9_Εννοιολογικό μοντέλο.

Εννοιολογικό μοντέλο και η ιδέα πίσω από την ανάπτυξη του προτεινόμενου δείκτη υδατικής καταπόνησης με τηλεπισκόπηση. dT: αλλαγή στη θερμοκρασία της κόμης, dW: αλλαγή στην περιεκτικότητα σε νερό της κόμης, Vis-NIR: Ορατό και κοντά στο υπέρυθρο (NIR), SWIR: Υπέρυθρο βραχέων κυμάτων

Πολυάριθμες μελέτες έχουν βρει ότι η δυναμική κλίση LST-NDVI είναι ευαίσθητη στη διαθέσιμη από τα φυτά εδαφική υγρασία και το υδατικό στρες τους (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2012), Ο κύριος περιορισμός στη χρήση του LST σε χωροχρονικά δεδομένα είναι η εξάρτησή του από τις συγκεκριμένες ιδιότητες της περιοχής, όπως η δομή της κόμης και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητα του ανέμου. Ωστόσο, μια μελέτη από τους Wu και Lu (2006) διαπίστωσε ότι το σχετικό LST, δηλαδή το LST σε πραγματικό χρόνο διαιρούμενο με το μακροπρόθεσμο μέσο όρο του LST που αντιστοιχεί σε εκείνη την ώρα και την περιοχή, μπορεί να λύσει αυτόν τον περιορισμό. Έτσι, το τυποποιημένο LST ή το σχετικό LST που συμβολίζεται με RLST είναι ο λόγος του LST με τον

μακροπρόθεσμο μέσο όρο του. Το TVWSI επινοήθηκε χρησιμοποιώντας $d(SWCI, NDVI)$ στη θέση του NDVI στο μοντέλο του MVWSI(Modified Vegetation Water Supply Index) και δίνεται από (Joshi et al, 2021).

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$TVWSI = \frac{d(SWCI, NDVI)}{RLST} \quad (10)$$

Ο SWCI (crop water stress index) βασισμένος στη θερμοκρασία της κόμης (Jackson et al, 1981) έχει γίνει ένας αποδεκτός δείκτης για την χαρτογράφηση μεταβλητότητας της κατάστασης του νερού καλλιέργειας με τη χρήση θερμικών εικόνων ο SWCI ορίζεται ως κλάσμα της θερμοκρασίας της κόμης μεταξύ ξηρού (upper) και υγρού (lower) της βασικής γραμμής υπό συνθήκες περιβάλλοντος.

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$SWCI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (11)$$

T_{canopy} είναι η θερμοκρασία της κόμης, T_{wet} είναι η θερμοκρασία από φύλλο με πλήρη διαπνοή και T_{dry} είναι η θερμοκρασία από φύλλο χωρίς διαπνοή.

Η ανάκτηση αλλαγών στην υγρασία του εδάφους χρησιμοποιώντας το TVWSI εξαρτάται από τη δυναμική των $d(SWCI, NDVI)$ και LST κατά τη διάρκεια ποικίλων συνθηκών υγρασίας του εδάφους. Υπό κανονικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, τόσο το $d(SWCI, NDVI)$ όσο και το LST αναμένεται να διαφέρουν σε κάποιο εύλογο εύρος. Το $d(SWCI, NDVI)$ θα πρέπει να έχει σχετικά υψηλότερες τιμές και το LST θα πρέπει να έχει σχετικά μικρότερες τιμές. Συνολικά, το TVWSI θα έχει σχετικά υψηλή τιμή για συνθήκες υψηλής εδαφικής υγρασίας. Αντίθετα, υπό συνθήκες περιορισμένου νερού, το LST αυξάνεται λόγω λιγότερης ψύξης με εξάτμιση και αντίστοιχα, το $d(SWCI, NDVI)$ μειώνεται λόγω μείωσης της περιεκτικότητας σε νερό και της ανάπτυξης της βλάστησης, με αποτέλεσμα τη μείωση της κλίσης του φάσματος SWCI-NDVI (Joshi et al,2021).

4.1.10 CVI (Chlorophyll Vegetation Index):

Οι Blackmer et al. (1994) βρήκαν υψηλή ευαισθησία της πράσινης ζώνης σε περιεκτικότητα φωτοσυνθετικής χρωστικής. Το «Πράσινο NDVI», που χρησιμοποιεί μια πράσινη ζώνη και όχι μια κόκκινη ζώνη όπως στο κλασικό NDVI, έχει προταθεί για την εκτίμηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φύλλων (Gitelson and Merzlyac 1996, Gitelson et al. 1996). Ομοίως, η «Πράσινη Απλή Αναλογία» (Green SR), η αναλογία των ανακλάσεων στο NIR και στα πράσινα μέρη του φάσματος, χρησιμοποιώντας μια πράσινη ζώνη και όχι μια κόκκινη ζώνη, όπως στο κλασικό SR, μπορεί να ληφθεί υπόψη για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χρωστική ουσία.

Οι Schepers et al. (1996) ανέφεραν μια πολύ υψηλή συσχέτιση μεταξύ της αναλογίας ανάκλασης στενής ζώνης 550/850 nm (δηλαδή, το αντίστροφο του Green SR) και της συγκέντρωσης χλωροφύλλης για τα φύλλα του καλαμποκιού που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές αζωτούχες λιπάνσεις. Προκειμένου να επιτευχθεί μια ευρεία ζώνη που θα ενσωματώνει τις φασματικές πληροφορίες της πράσινης ζώνης με ενισχυμένη ευαισθησία στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη φύλλων και μη ευαίσθητη στην

διακύμανση LAI, αναπτύχθηκε ο δείκτης βλάστησης χλωροφύλλης (CVI-Vincini et al. 2008).

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$CVI = \frac{NIR}{GREEN} \times \frac{RED}{GREEN} \quad (12)$$

Έτσι λοιπόν, το CVI λαμβάνεται από το Green SR εισάγοντας την αναλογία κόκκινο/πράσινο για να ελαχιστοποιηθεί η ευαισθησία στις διαφορές στο LAI της κόμης. Η αναλογία κόκκινου/πράσινου (Gamon and Surfus 1999) έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ανάπτυξης του φυλλώματος στις κόμεις. Γενικά, η ανάκλαση του εδάφους είναι σχετικά χαμηλή (15%) στο μπλε κανάλι, αλλά αυξάνεται μονότονα με το μήκος κύματος μέσω των ορατών περιοχών και των περιοχών NIR με φασματικά σχήματα ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, την τραχύτητα του εδάφους και την περιεκτικότητα σε νερό. Για ένα δεδομένο έδαφος, οι διακυμάνσεις ανάκλασης που προκαλούνται από την περιεκτικότητα σε νερό και την τραχύτητα του εδάφους επηρεάζουν αναλογικά το φασματικό σχήμα. Η ανάκλαση σε ένα μήκος κύματος σχετίζεται γραμμικά με την ανάκλαση σε ένα άλλο μήκος κύματος (Huete 1988).

Ως εκ τούτου, τα γυμνά εδάφη εμφανίζουν τιμές αναλογίας κόκκινου/πράσινου <1, ειδικά για το έδαφος, και απόλυτες τιμές ανάκλασης στις κόκκινες και πράσινες ζώνες ανάλογα, για ένα δεδομένο έδαφος, από την περιεκτικότητα σε νερό και την τραχύτητα. Αντίθετα, η φασματική συμπεριφορά της βλάστησης στην ορατή περιοχή χαρακτηρίζεται από τιμές αναλογίας κόκκινου/πράσινου >1 λόγω της παρουσίας μέγιστης και ελάχιστης απορρόφησης χρωστικής, αντίστοιχα στο κόκκινο και το πράσινο μέρος του φάσματος (Vincini et al. 2008).

4.1.11 RCI (Red Chlorophyll Index)

Αυτός ο δείκτης έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και είναι πιο σχετικός κατά τα ενεργά στάδια της ανάπτυξης.

Επειδή η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη εξαρτάται άμεσα από το επίπεδο αζώτου στα φυτά, αυτός ο δείκτης βλάστησης βοηθά στην ανίχνευση περιοχών με κίτρινο ή καταπονημένο φύλλωμα. Οι τιμές ReCI είναι πιο χρήσιμες στο στάδιο της ενεργού ανάπτυξης της βλάστησης, αλλά δεν είναι κατάλληλες για την εποχή της συγκομιδής.

Ο δείκτης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φύλλων στα φυτά με βάση τη NIR και της κόκκινης πολυφασματικής ζώνης. Γενικά, η τιμή της χλωροφύλλης αντανακλά άμεσα τη βλάστηση. (<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions,geopard.tech/blog/kc9y2x96kv-which-vegetation-index-is-better-to-use/>)

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$RCI = \frac{NIR}{Red} - 1 \quad (13)$$

4.1.12 GCI (Green Chlorophyll Index)

Ο δείκτης βλάστησης GCI χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φύλλων σε διάφορα είδη φυτών. Η περιεκτικότητα της χλωροφύλλης αντανακλά τη φυσιολογική κατάσταση της βλάστησης, ενώ μειώνεται στα καπονημένα φυτά και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρηση της υγείας της βλάστησης.

Ο δείκτης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φύλλων στα φυτά με βάση τη NIR και πολυφασματικής πράσινης ζώνης. Γενικά, η τιμή της χλωροφύλλης αντανακλά άμεσα τη βλάστηση.

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1 \quad (14)$$

Καλύτερη πρόβλεψη της ποσότητας χλωροφύλλης με τον δείκτη βλάστησης GCI μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας δορυφορικούς αισθητήρες που έχουν ευρύ μήκη κύματος και στη περιοχή. (<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>, geopard.tech/blog/kc9y2x96kv-which-vegetation-index-is-better-to-use/)

4.1.13 SIPI (Structure Intensive Pigment Vegetation Index)

Είναι ένας δείκτης μέτρησης ανάκλασης που έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιήσει την ευαισθησία του δείκτη προς την αναλογία του κύριου όγκου των καροτενοειδών (π.χ. a-Καροτένιο and b-Καροτένιο) προς χλωροφύλλη ενώ μειώνει την ευαισθησία διακύμανσης της δομής της κόμης. Αυξημένες τιμές δείκτη πιστεύεται ότι υποδεικνύουν αυξημένη καταπόνηση κόμης (υψηλά καροτενοειδή χρωστική και χαμηλή χλωροφύλλη) και μπορεί να σημαίνουν ασθένεια των καλλιεργειών.

Ο δείκτης βλάστησης SIPI είναι ωφέλιμος για την ανάλυση της βλάστησης και χρησιμοποιείται για παρακολούθηση της υγείας των φυτών σε περιοχές με υψηλή μεταβλητότητα (ή μεταβαλλόμενη) στη δομή της κόμης.

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$SIPI = \frac{NIR - BLUE}{NIR - RED} \quad (15)$$

Η τιμή αυτού του δείκτη κυμαίνεται από 0 έως 2. Το συνήθως εύρος για την πράσινη βλάστηση είναι 0,8 έως 1,8.

(<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>, Maleki et al, 2020)

4.1.14 ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)

ARVI είναι ο πρώτος δείκτης βλάστησης, σχετικά μη ευαίσθητος στους ατμοσφαιρικούς παράγοντες (π.χ Σταγονίδια και αιωρούμενα σωματίδια). Το ARVI είναι ένας βελτιωμένος δείκτης που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της επίδρασης της ατμόσφαιρας. Είναι πιο χρήσιμο σε περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε ατμοσφαιρικά σταγονίδια και αιωρούμενα σωματίδια, (π.χ. βροχή, ομίχλη, σκόνη, καπνός, ατμοσφαιρική ρύπανση). Εκτός από τη RED και NIR ζώνη, το πλεονέκτημα αυτού του δείκτη είναι ότι χρησιμοποιεί τη BLUE.

Σε σύγκριση με άλλους δείκτες, η αντίσταση του ARVI στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις επιτυγχάνεται με μια διαδικασία αυτοδιόρθωσης για την ατμοσφαιρική επίδραση στην RED ζώνη. Για την διόρθωση της ακτινοβολίας στο κόκκινο κανάλι, γίνεται διαφορά στην ακτινοβολία μεταξύ της μπλε και της κόκκινης ζώνης (<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>, (Kaufman and Tanre et al., 1992).

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$ARVI = \frac{(NIR - (2 \times RED) + BLUE)}{(NIR + (2 \times RED) + BLUE)} \quad (16)$$

4.1.15 TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index)

Ο δείκτης θερμοκρασίας βλάστησης ξηρότητας είναι ένας δείκτης που αναπτύχθηκε για να ερμηνεύσει εμπειρικά την καταπόνηση από νερό που σχετίζεται με τη θερμοκρασία της επιφάνειας και τη βλάστηση εντός του χώρου NDVI/LST, αυτή η αντιπροσωπευτική μέθοδος χρησιμοποιεί σχέσεις κλίσης εδάφους NDVI και LST. Συμπληρωματικά, το TVDI είναι ιδιαίτερα μεταβλητό σε ξηρές περιοχές ή ξηρές περιόδους σε σύγκριση με εκείνες σε υγρές περιοχές ή περιόδους (Ryu et al, 2021).

Κατόπιν αυτού, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές δορυφορικές εικόνες για την επίδειξη των δυνατοτήτων του δείκτη TVDI για την εκτίμηση της υγρασίας του εδάφους. Οι συγκρίσεις με επιτόπιες μετρήσεις υγρασίας εδάφους ή προσομοιώσεις μοντέλων δείχνουν ότι το TVDI είναι εφικτό μέσο για την παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους (Gao et al., 2011).

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$TVDI = \frac{LSTs,obs - LSTs,min}{LSTs,max - LSTs,min} \quad (17)$$

LST=land surface temperature

LSTs,obs είναι η παρατηρούμενη LST σε ένα συγκεκριμένο pixel.

LSTmax και LSTmin εκφράζονται ως εξής:

$$LST_{max} = a + b \times NDVI$$

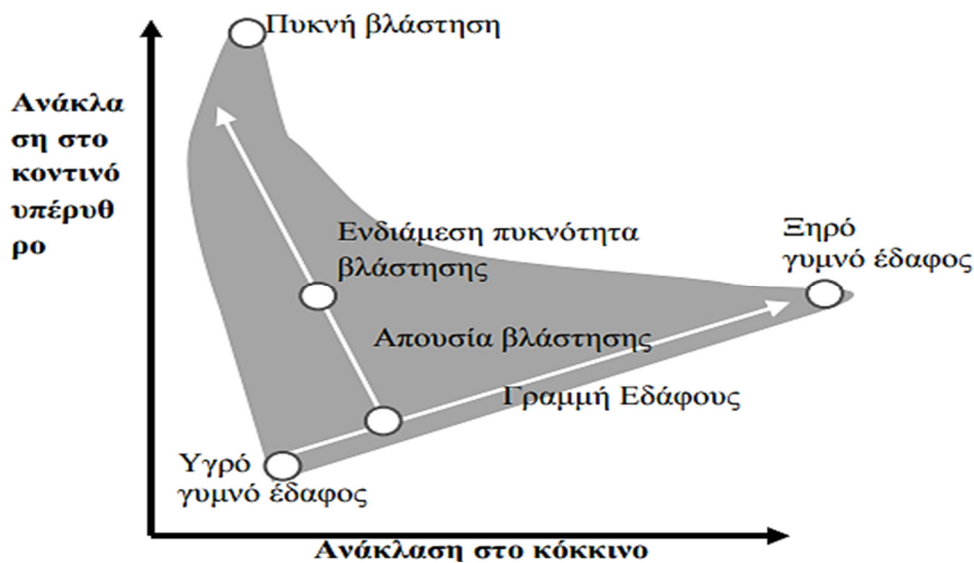
$$LST_{min} = c + d \times NDVI$$

Όπου a,b,c,d είναι οι συντελεστές που καθορίζονται για LSTmax και LSTmin χρησιμοποιώντας πραγματικές τιμές LST και δεδομένα NDVI.

4.2 Δείκτες που μετρούν την ραδιομετρική απόσταση από τη γραμμή εδάφους (distance-based).

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι δείκτες οι οποίοι μετράνε το ποσοστό της βλάστησης σε κάθε pixel λαμβάνοντας ως βάση την διαφορά που προκύπτει από την τιμή ανάκλασης κάθε pixel σε σχέση με την τιμή ανάκλασης του γυμνού εδάφους. Βασικό ρόλο διαδραματίζει η γραμμή του εδάφους (soil line). Καθώς αυξάνεται η βλάστηση και καλύπτει το έδαφος, τα αντίστοιχα pixels της βλάστησης αυξάνουν την κατακόρυφη απόστασή τους από την γραμμή του εδάφους (εικόνα 10). Αναφορικά με τους δείκτες αυτής της κατηγορίας απαιτείται η γνώση της κλίσης και του σημείου τομής της γραμμής του εδάφους για τη δορυφορική εικόνα που εξετάζεται (Silleos et al. 2006).

Σ' αυτή την κατηγορία οι δείκτες έχουν ως στόχο να ελαχιστοποιήσουν τις επιπτώσεις από την φωτεινότητα του εδάφους, η οποία παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διάσπαρτη βλάστηση και τα pixels περιέχουν ταυτόχρονα μικτή κάλυψη από βλάστηση και γυμνό έδαφος. Οι δείκτες αυτοί έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε άνυδρες και ημι-άνυδρες περιοχές. Η γραμμή εδάφους υπολογίζεται με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης του φασματικής ζώνης προς το κόκκινη ζώνη λαμβάνοντας δείγματα pixels εδάφους (Ren et al, 2018).



Εικόνα. 10_ Παράδειγμα γραμμής εδάφους μεταξύ της κόκκινης και κοντινής υπέρυθρης ανάκλασης

Απεικονίζει τον φασματικό χώρο NIR-Red, όπου η τριγωνική περιοχή αντιπροσωπεύει την αλλαγή της επιφανειακής βλάστησης από πλήρη κάλυψη (πάνω τρίγωνο) σε μερική κάλυψη σε γυμνό έδαφος (κάτω τρίγωνο). Η γραμμή βάσης του τριγώνου αναφέρεται στη γραμμή του εδάφους, η οποία δείχνει την ανάκλαση του γυμνού εδάφους από υγρές συνθήκες, σε ημίξηρες συνθήκες έως εξαιρετικά ξηρές συνθήκες (Silleos et al. 2006).

Το έδαφος έχει μια συγκεκριμένη φασματική υπογραφή που το διαφοροποιεί από τα άλλα είδη εδαφικής κάλυψης. Στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο φάσμα, η ανάκλαση αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του μήκους κύματος. Ωστόσο, ο ρυθμός αύξησης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Η υφή και η δομή του εδάφους καθορίζουν αν το έδαφος αντανακλά την ενέργεια ως ένα διάχυτο ή κατοπτρικό ανακλαστήρα. Η υγρασία του εδάφους και η οργανική ύλη αυξάνουν την απορρόφηση του εδάφους και οδηγούν σε χαμηλότερη συνολική ανάκλαση του εδάφους.

Ωστόσο, η σχέση μεταξύ ανάκλασης στο κόκκινο και κοντινό υπέρυθρο παραμένει σχετικά σταθερή για ένα συγκεκριμένο τύπο εδάφους με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αν πρόκειται να συλλέξουμε πολλές φασματικές μετρήσεις του ίδιου εδάφους, κάτω από διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, και στη συνέχεια χαράξουμε την κόκκινη ανάκλαση σε σχέση με αυτή στο κοντινό υπέρυθρο για κάθε μέτρηση, το αποτέλεσμα απεικονίζεται στην εικόνα 10:

Λόγω της ανάκλασης μεταξύ κόκκινου και κοντινού υπέρυθρου διακυμαίνονται αναλογικά, όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία αλλάζει, αυτές οι δύο αξίες συσχετίζονται και έχουν μια γραμμική σχέση. Αυτό σημαίνει ότι όταν η μία αλλάζει, η άλλη αλλάζει ανάλογα με την σχέση που συνδέει τις δύο. Η γραμμή που περιγράφει αυτή την σχέση αυτή είναι γνωστή ως η γραμμή εδάφους (soil line), η οποία είναι μοναδική για κάθε έδαφος. (Baret et al, 1993, Diek et al, 2017)

4.2.1 PVI (Perpendicular Vegetation Index)

Ο «κατακόρυφος δείκτης βλάστησης» (Perpendicular Vegetation Index, PVI) υπολογίζει την κατακόρυφη απόσταση της ραδιομετρικής τιμής κάθε pixel από τη γραμμή των ραδιομετρικών τιμών του εδάφους. Οι περιοχές με απουσία βλάστησης χαρακτηρίζονται όταν η κατακόρυφη απόσταση των pixels από τη γραμμή εδάφους είναι μικρότερη του 7, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει παρουσία βλάστησης. Ο Δείκτης PVI είναι ένας δείκτης ευαίσθητος στις ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος για τη σύγκριση διαφορετικών εικόνων, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε εικόνες που έχουν διορθωθεί ατμοσφαιρικά. (ESRI, 2018). Για τον υπολογισμό του PVI απαιτείται ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων γιατί είναι αρκετά ευαίσθητος στις ατμοσφαιρικές μεταβολές. Οι συντελεστές a και b αντιπροσωπεύουν την κλίση και το σημείο τομής αντίστοιχα της γραμμής του εδάφους (Richardson et al. 1977, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/arcpy/spatial-analyst/pvi.htm>).

Αυτός ο δείκτης εξάγει τιμές μεταξύ -1,0 και 1,0

Ο τύπος του είναι ο εξής:

$$PVI = \frac{NIR - a \times Red - b}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (18)$$

a = κλίση της γραμμής του εδάφους

b = βαθμίδα της γραμμής του εδάφους

4.2.2 OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)

OSAVI είναι ένας τροποποιημένος δείκτης SAVI και χρησιμοποιεί επίσης ανάκλαση στο φάσμα NIR και στο κόκκινο. Η διαφορά μεταξύ των δύο δεικτών είναι ότι ο OSAVI λαμβάνει υπόψη την τυπική τιμή του συντελεστή προσαρμογής φόντου κόμης (0,16). Ο συντελεστής προσαρμογής του εδάφους (0,16) επιλέχθηκε ως η βέλτιστη τιμή για την ελαχιστοποίηση της ευαισθησίας του NDVI στη διακύμανση του υποβάθρου του εδάφους κάτω από ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών.

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$OSAVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + Red + 0,16)} \quad (19)$$

Η προσαρμογή επιτρέπει μεγαλύτερη διακύμανση του εδάφους στο OSAVI σε σύγκριση με το SAVI όταν η κάλυψη της κόμης είναι χαμηλή. Το OSAVI έχει καλύτερη ευαισθησία σε κάλυψη κόμης που υπερβαίνει το 50%. Χρησιμοποιείται για παρακολούθηση περιοχών με χαμηλή πυκνότητα βλάστησης με γυμνό έδαφος μέσω της κόμης. (<https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>)

4.2.3 MSAVI-2 (Modified Soil-Adjusted vegetation index)

Ο τροποποιημένος δείκτης βλάστησης προσαρμοσμένος στο έδαφος (MSAVI) και η μεταγενέστερη αναθεώρησή του, MSAVI2, δημιουργήθηκε με στόχο τη διόρθωση της φωτεινότητας του εδάφους σε διαφορετικές συνθήκες κάλυψης της βλάστησης, είναι προσαρμοσμένοι δείκτες βλάστησης που έχουν σχεδιαστεί και επιδιώκουν να αντιμετωπίσουν ορισμένους από τους περιορισμούς για να υποκαταστήσει το NDVI και το NDRE όταν εφαρμόζονται σε περιοχές με υψηλό βαθμό εκτεθειμένης επιφάνειας εδάφους και αποτυγχάνουν να παρέχουν ακριβή δεδομένα λόγω χαμηλής βλάστησης ή έλλειψης χλωροφύλλης στα φυτά. Κατά τα στάδια της βλάστησης και της ανάπτυξης των φύλλων. Το NDVI και το NDRE το ερμηνεύουν αυτό ως φτωχή βλάστηση. Εδώ έρχεται να βοηθήσει το MSAVI. Το "SA" σημαίνει "προσαρμοσμένο στο έδαφος", αποκαλύπτοντας τη βασική πτυχή αυτού του δείκτη βλάστησης, που μειώνει την επίδραση του εδάφους στον υπολογισμό της πυκνότητας βλάστησης στο χωράφι. (<https://eos.com/industries/agriculture/msavi/>)

Το πρόβλημα με τον αρχικό δείκτη βλάστησης προσαρμοσμένου στο έδαφος (SAVI) είναι ότι απαιτεί τον καθορισμό του συντελεστή διόρθωσης φωτεινότητας εδάφους (L) μέσω δοκιμής και σφάλματος με βάση την ποσότητα βλάστησης στην περιοχή μελέτης. Με αποτέλεσμα να οδηγεί την πλειονότητα των χρηστών να χρησιμοποιούν απλώς την προεπιλεγμένη τιμή L του 0,5, αλλά δημιούργησε επίσης ένα κυκλικό λογικό πρόβλημα της ανάγκης να γνωρίζουν ποια ήταν η ποσότητα κάλυψης βλάστησης προτού μπορέσουν να εφαρμόσουν τον δείκτη SAVI (Qi et al., 1994) οδηγώντας στο MSAVI και αργότερα το MSAVI2 (Qi et al. 1994) για να υπολογίσει πιο αξιόπιστα και απλά έναν συντελεστή διόρθωσης φωτεινότητας εδάφους.

Ορίζεται από την εξίσωση:

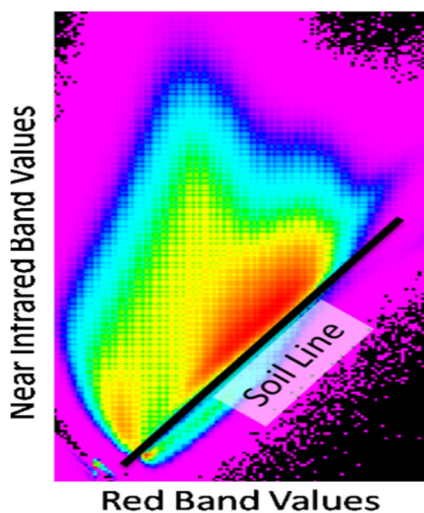
$$MSAVI = \frac{(NIR - Red) \times (1 + L)}{(NIR + Red + L)} \quad (20)$$

όπου το RED είναι η ανάκλαση της κόκκινης ζώνης από έναν αισθητήρα, το NIR είναι η ανάκλαση της εγγύς υπέρυθρης ζώνης και το L είναι ο συντελεστής διόρθωσης φωτεινότητας του εδάφους. Η διαφορά μεταξύ SAVI και MSAVI, ωστόσο, έγκειται στον τρόπο υπολογισμού του L. Στο SAVI, το L υπολογίζεται με βάση το πόση βλάστηση υπάρχει (αλλά γενικά μένει μόνο του σε συμβιβασμό 0,5). Από την άλλη πλευρά το MSAVI χρησιμοποιεί τον ακόλουθο τύπο για να υπολογίσει το L:

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$L = 1 - \frac{2 \times s \times (NIR - Red) \times (NIR - s \times Red)}{NIR + Red} \quad (21)$$

όπου s είναι η κλίση της γραμμής του εδάφους από μια γραφική παράσταση κόκκινου έναντι τιμών φωτεινότητας κοντά στο υπέρυθρο.



Εικόνα. 11_Γράφημα παράσταση γραμμής εδάφους μεταξύ NIR/RED

Οι εικόνες "Feature Space" όπως αυτή δημιουργούνται με τη γραφική παράσταση της τιμής ανάκλασης της κόκκινης ζώνης σε σχέση με τις τιμές της ζώνης σχεδόν υπέρυθρων για κάθε pixel σε μια εικόνα

Τα χρώματα στην εικόνα αντιπροσωπεύουν πόσα pixel έχουν μέσα από τον συνδυασμό τιμής RED: NIR - τα πιο ζεστά χρώματα σημαίνουν περισσότερα, τα πιο ψυχρά χρώματα σημαίνουν λιγότερα pixel. Όταν δημιουργείται μια γραφική παράσταση χώρου χαρακτηριστικών κόκκινου έναντι κοντινού υπέρυθρου, μια γραμμή εδάφους μπορεί να αναγνωριστεί από τους συνδυασμούς τιμών pixel κόκκινου και κοντά στο υπέρυθρο όπου δεν υπάρχει πλέον βλάστηση. Η κλίση αυτής της γραμμής εδάφους χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του L στην εξίσωση MSAVI. Qi et al. (1994), ξεκινώντας με την εξίσωση MSAVI, αντικατέστησε το 1-MSAVI(n) για μια περιοχή n και στη συνέχεια λύνοντας την εξίσωση αναδρομικά μέχρι το MSAVI(n)=MSAVI(n-1). Αυτό αποδίδει τον ακόλουθο τύπο, που συνήθως ονομάζεται MSAVI2, ο οποίος εξαλείφει την ανάγκη εύρεσης της γραμμής εδάφους από ένα οικοπέδο χώρου χαρακτηριστικών ή ακόμη και ρητά καθορισμού του συντελεστή διόρθωσης φωτεινότητας εδάφους:

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$MSAVI2 = \frac{(2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)})}{2} \quad (22)$$

Τα αποτελέσματα του δείκτη MSAVI και MSAVI2 κυμαίνονται από -1 έως +1, όπου:

- -1 έως 0,2 υποδηλώνουν γυμνό έδαφος
- 0,2 έως 0,4 είναι το στάδιο βλάστησης των σπόρων
- 0,4 έως 0,6 είναι το στάδιο ανάπτυξης των φύλλων

Όταν οι τιμές υπερβαίνουν το 0,6, είναι πλέον καιρός να εφαρμόσετε το NDVI. Με άλλα λόγια, η βλάστηση είναι αρκετά πυκνή ώστε να καλύπτει το έδαφος.

Επιπρόσθετα, το εύρος τιμών MSAVI εκτείνεται από το έντονο κόκκινο που αντιπροσωπεύει -1 έως το κορεσμένο πράσινο που αντιστοιχεί στο 1.

Το MSAVI βοηθά ακριβώς πριν από τη συγκομιδή, το τελευταίο στάδιο ανάπτυξης πολλών τύπων καλλιεργειών, είναι πολύ παρόμοιο όσον αφορά την αντανάκλαση του φωτός.

Καθώς τα φυτά ωριμάζουν, η περιεκτικότητά τους σε χλωροφύλλη μειώνεται, “μπερδεύοντας” το δείκτη NDRE. Ομοίως, οι τιμές NDVI γίνονται όλο και λιγότερο ακριβείς λόγω του ορατού μαρασμού των φυτών το οποίο, με τη σειρά του, εκθέτει το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση, το MSAVI θα παρέχει τα πιο ακριβή δεδομένα σχετικά με την υγεία των καλλιεργειών σας.

Ένας σημαντικός περιορισμός του MSAVI είναι ότι θυσιάζει κάποια συνολική ευαισθησία σε αλλαγές στην ποσότητα βλάστησης/κάλυψης για να διορθώσει τη φωτεινότητα της επιφάνειας του εδάφους. Ως εκ τούτου, το MSAVI μπορεί να μην είναι τόσο ευαίσθητο στην αλλαγή της βλάστησης όσο ένας άλλος δείκτης όπως ο NDVI. Το MSAVI είναι επίσης πιο ευαίσθητο στις διαφορές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταξύ περιοχών ή χρόνων. Το MSAVI απαιτεί μόνο μια κόκκινη και μια σχεδόν υπέρυθη ζώνη για τον υπολογισμό. Το MSAVI είναι σχετικά εύκολο να υπολογιστεί και μπορεί να γίνει με οποιοδήποτε πακέτο τηλεπισκόπησης ή με ένα πρόγραμμα GIS που μπορεί να χειριστεί την επεξεργασία ράστερ (π.χ. ArcGIS). (<https://blog.csdn.net/x5675602/article/details/90067251>, Piotr Fabijańczyk & Jarosław Zawadzki, 2022)

4.2.4 Δείκτης WDV (Weighted Difference Vegetation Index)

Ο «δείκτης βλάστησης σταθμισμένης διαφοράς» (Weighted Difference Vegetation Index, WDV) έχει χρησιμοποιηθεί για να ξεπεραστούν οι υψηλές τιμές PVI, λόγω του φωτεινότερου υποβάθρου του εδάφους και προϋποθέτει ότι η αναλογία μεταξύ NIR και κόκκινης αντανάκλασης του γυμνού εδάφους είναι σταθερός. Ο δείκτης είναι μαθηματικά απλούστερος από τον δείκτη PVI, αλλά έχει άπειρο εύρος. Όπως και ο δείκτης PVI, επηρεάζεται πολύ από τις ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις γι' αυτό και οι αρχικές εικόνες πρέπει να έχουν υποστεί ατμοσφαιρική διόρθωση. Ο δείκτης WDV αποτελεί ένα απλό σχετικά αλλά αρκετά αποδοτικό δείκτη. (Naji, 2018)

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$WDV = NIR - (g \times R) \quad (23)$$

Ο συντελεστής g εκφράζει την κλίση της γραμμής του εδάφους. Η στάθμιση του κόκκινου φασματικού καναλιού με τον συντελεστή κλίσης συμβάλει στην ενίσχυση του σήματος της βλάστησης στο κοντινό υπέρυθρο κανάλι και αντίστοιχα στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της φωτεινότητας του εδάφους. (Richardson et al. 1977; Clevers 1988).

4.3 LAI (Leaf Area Index)

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) είναι μια αδιάστατη ποσότητα που χαρακτηρίζει την πυκνότητα των φυτών και ορίζεται ως η ποσότητα (της άνω πλευράς) της

επιφάνειας φυλλώματος ανά μονάδα προβαλλόμενης επιφάνειας εδάφους, είναι μία από τις βιοφυσικές παραμέτρους των καλλιεργειών που μεταφέρουν τις πιο πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των φυτών. Το ποσό της LAI συνδέεται άμεσα με ποσοτικές πτυχές της φωτοσύνθεσης, αναπνοή και ανταλλαγή νερού κόμης και ως εκ τούτου, οποιαδήποτε αλλαγή στη LAI μπορεί να συσχετιστεί με αλλαγές στην παραγωγικότητα της βλάστησης που προκύπτουν από ζητήματα φυτοϋγείας ή διατροφικής κατάστασης η οποία με τη σειρά της καθιστά το LAI μια αποτελεσματική διαγνωστική παράμετρο της κατάστασης των καλλιεργειών.

Κατόπιν, οι γεωμετρικές πολυπλοκότητες διαφορετικών θόλων μειώνονται σε έναν απλό ποσοτικό προσδιορισμό του αθροίσματος όλων των στρώσεων φύλλων ως LAI. Η κάθετη κατανομή του LAI σε μικτά κόμης αντικατοπτρίζει τις λειτουργικές ικανότητες των ειδών ή των φύλλων (σκιά, υγρασία αέρα και ανοχή θερμοκρασίας). Το LAI είναι μια βασική μεταβλητή στη διαδικασία που βασίζονται τα μοντέλα ανάπτυξης καλλιεργειών επειδή αντιπροσωπεύει τη διεπαφή μεταξύ της ανάπτυξης των φυτών και της ακτινοβολίας, ανταλλαγής νερού και αερίων με το περιβάλλον.

Το LAI είναι μία από τις πιο κοινές παραμέτρους κόμης που έχουν εκτιμηθεί, μετρηθεί ή χαρτογραφηθεί με τηλεπισκόπηση, ο LAI ως κινητήρια δύναμη των ανταλλαγών της κόμης περιγράφει μια θεμελιώδη ιδιότητα της κόμης του φυτού στην αλληλεπίδρασή του με την ατμόσφαιρα, ειδικά όσον αφορά την ακτινοβολία, την ενέργεια, τη δυναμική και την ανταλλαγή αερίων.

Η λειτουργία βάσης περιλαμβάνει:

- το ποσοστό ροής βιολογικής ενέργειας μέσω του οικοσυστήματος, δηλαδή τα ποσοστά παραγωγής και αναπνοής·
- το ρυθμό ανακύκλωσης υλικών και θρεπτικών ουσιών, δηλαδή οι βιογεωχημικοί κύκλοι και
- τη βιολογική και οικολογική ρύθμιση, συμπεριλαμβανομένης της πρόληψης της διάβρωσης του εδάφους και της ρύθμισης της πρόσληψης νερού, ή της παρακολούθησης και μετατροπής της ακτινοβολίας.

LAI είναι η προτιμότερη μεταβλητή κόμης, επειδή απαιτείται για την εκτίμηση πολλών ποσοστών διεργασίας, από την ανταλλαγή αερίων κόμης έως του ανταγωνισμού για το φως, το νερό και τα ανόργανα θρεπτικά συστατικά. Ορίζεται ως η μονόπλευρη πράσινη φυλλική επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους. (Breda, 2008)

$LAI = \text{φυλλική επιφάνεια προς την επιφάνεια εδάφους, (m}^2 / \text{m}^2)$ (Watson, 1947).

Ορίζεται από την εξίσωση:

$$LAI = \frac{\text{leaf area (m}^2\text{)}}{\text{ground area (m}^2\text{)}} \quad (24)$$

Ο δείκτης LAI αποτελεί μια σύνθετη μεταβλητή που σχετίζεται όχι μόνο με το μέγεθος της βλάστησης, αλλά και με την πυκνότητά της, με τη γωνία στην οποία προσανατολίζονται τα φύλλα μεταξύ τους και με τις πηγές φωτός. Επιπλέον, ο δείκτης LAI ποικίλλει ανάλογα με τις εποχικές αλλαγές και τη δραστηριότητα των φυτών και είναι συνήθως υψηλότερος την άνοιξη όταν παράγονται νέα φύλλα και χαμηλότερος στα τέλη του καλοκαιριού ή στις αρχές του φθινοπώρου όταν τα φύλλα ξεραθούν και πέσουν.

Ο δείκτης αυτός μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα λαμβάνοντας ένα στατιστικά σημαντικό δείγμα φυλλώματος από την κόμη ενός φυτού, μετρώντας την επιφάνεια των φύλλων ανά δείγμα αγροτεμάχου και διαιρώντας το με την επιφάνεια του οικοπέδου. Οι έμμεσες μέθοδοι μετρούν τη γεωμετρία της κόμης ή την εξάλειψη του φωτός και το συσχετίζουν με το LAI (Breda, 2003).

Το LAI είναι μια κρίσιμη παράμετρος εισόδου για μοντέλα που σχετίζονται με την οικολογική και περιβαλλοντική παρακολούθηση, μοντελοποίηση καλλιεργειών και κλιματική αλλαγή. Επί του παρόντος, διάφοροι τομείς έχουν χρησιμοποιήσει ευρέως τα μακροπρόθεσμα παγκόσμια προϊόντα LAI, όπως οι αισθητήρες Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Το μέγεθος της διακύμανσης LAI σε όλο τον κόσμο παρουσιάζεται σχετικά για τη βιομάζα της επίγειας βλάστησης.(Wang et al, 2019)

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η γεωργική παραγωγή παρέχει στην ανθρωπότητα τρόφιμα και έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομική και περιβαλλοντική ευημερία μιας συγκεκριμένης χώρας. Οι κύριοι στόχοι των διαφόρων ενδιαφερόμενων στη παραγωγή των καλλιεργειών είναι η αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείριση και ανάπτυξης αυτού του ανανεώσιμου πόρου. Σε εθνικό μέχρι τοπικό επίπεδο, η γνώση διαχείρισης και των αλλαγών στην καλλιέργεια και την παραγωγή των καλλιεργειών αποτελεί τις βασικές παραμέτρους στον γεωργικό τομέα.

Η ραγδαία και συνεχής ανάπτυξη και εξέλιξη της τεχνολογίας έχει συμβάλει στη βελτίωση της διαχείρισης και των εφαρμογών στις καλλιέργειες βελτιώνοντας τόσο ποσοτικά όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. (<https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Satellite-radar-in-agriculture-Experience-with-ERS-1.pdf/9d1c2563-946e-449f-672a-4c59084ba983>)

Η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος τομέας χρήσης νερού στον κόσμο και έχει ισχυρή επίδραση στον κύκλο του νερού, ειδικά σε άνυδρες και ημίανυδρες περιοχές, μέσω της εξόρυξης υπόγειων υδάτων και της εκτροπής των επιφανειακών υδάτων. Το νερό φαίνεται άφθονο στον πλανήτη μας. Ωστόσο, λιγότερο από το 1% του υγρού γλυκού νερού στον κόσμο είναι διαθέσιμο για ανθρώπινη χρήση και περίπου το 70% χρησιμοποιείται για άρδευση της γεωργίας. Η ποσότητα νερού που αποσύρεται ετησίως για γεωργική χρήση είναι πάνω από 1.500 m³ ανά άτομο στο μεγαλύτερο μέρος της Κεντρικής Ασίας, ενώ είναι μικρότερη από 20 m³ ανά άτομο σε πολλές αφρικανικές χώρες. Σε άνυδρες και ημίανυδρες περιοχές όπως η Μέση Ανατολή και η Βόρεια Αφρική, η απόσυρση νερού ως ποσοστό του συνολικού ανανεώσιμου πόρου νερού υπερβαίνει το 50 % .(Bounoua et al, 2010)

Αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως η τηλεπισκόπηση, GIS και GPS, συνδυαστικά αποτελούν ελπιδοφόρα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των γεωργικών δραστηριοτήτων και των εισροών με στόχο την ενίσχυση της παραγωγής και τη μείωση των εισροών και των απωλειών απόδοσης (Ghosh et al, 2022). Ο γεωργικός τομέας συνεπάγεται στρατηγικής διαχείρισης που χρησιμοποιεί μια σειρά προηγμένων πληροφοριών, επικοινωνίας, και τεχνικές ανάλυσης δεδομένων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων των κύριων εφαρμογών όπως η παρακολούθηση των καλλιεργειών, η θρέψη/λίπανσης, ο προγραμματισμός κατάλληλης δόσης άρδευσης και φυτοφάρμακων που συμβάλλει στην βελτίωση και ενίσχυση της παραγωγής καλλιεργειών και στη μείωση των απωλειών νερού και θρεπτικών ουσιών και των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Khanal et al, 2020).

Η χρήση των VIs στον Αγροτικό Τομέα επεκτείνεται σε κύριες εφαρμογές για την εκτίμηση των παραμέτρων που περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών όπως μορφολογικό, βιοχημικό και φυσιολογικό, ιδιότητες εδάφους (π.χ., υγρασία του εδάφους, οργανική ύλη και πώς ποικίλλουν στο χώρο και το χρόνο. Διαφορετικά περιβάλλοντα και καλλιέργειες έχουν τα δικά τους μεταβλητά και σύνθετα χαρακτηριστικά, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση διαφορετικών VIs. Επομένως, κάθε VI έχει την ιδιαίτερη έκφραση για ένα χαρακτηριστικό, τη δική του καταλληλότητα για συγκεκριμένες χρήσεις και ορισμένους περιοριστικούς παράγοντες.

Συνεπώς, για πρακτικές εφαρμογές στον γεωργικό τομέα, η επιλογή ενός συγκεκριμένου VI πρέπει να γίνει με προσοχή εξετάζοντας και αναλύοντας διεξοδικά τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των υφιστάμενων VIs και στη συνέχεια να τα συνδυάσουμε για να εφαρμοστούν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και καλλιέργεια (Xue et al, 2017).

5.1 Παρακολούθηση καλλιέργειας και απόδοσης. (Crop Monitoring and Yield)

Η δορυφορική παρακολούθηση καλλιεργειών είναι η τεχνολογία για την παρατήρηση των αλλαγών στον δείκτη βλάστησης που λαμβάνονται με φασματική ανάλυση δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται σε διαφορετικούς αγρούς ή για μεμονωμένες καλλιέργειες και επιτρέπει την παρακολούθηση της θετικής και αρνητικής δυναμικής της ανάπτυξης των φυτών. Η διαφορά στη δυναμική του δείκτη βλάστησης υποδηλώνει δυσαναλογίες στην ανάπτυξη εντός της ίδιας καλλιέργειας ή πεδίου.

Από την πρώιμη ανάπτυξη μοντέλων καλλιεργειών, οι γεωπόνοι επιστήμονες έχουν επωφεληθεί από τις διαθέσιμες εικόνες τηλεπισκόπησης για να βελτιώσουν την απόδοση του μοντέλου, παρακολούθηση της βιομάζας των καλλιεργειών, της φαινολογίας και της απόδοσης των καλλιεργειών σε κλίμακες που μαίνονται από τον αγρό ή υποπεδίου σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του συνδυασμού δεδομένων τηλεπισκόπησης με μοντέλα καλλιεργειών είναι η ακριβής περιγραφή της κατάστασης των καλλιεργειών κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και η ενσωμάτωση των ελλειπόντων χωρικών πληροφοριών. Μεταξύ όλων των διαθέσιμων απομακρυσμένων παραμέτρων, LAI και NDVI χρησιμοποιούνται συχνότερα για την εκτίμηση της απόδοσης των καλλιεργειών (Mouazen et al, 2020). Μεταξύ των διαφορετικών δεικτών βλάστησης, οι NDVI και EVI συχνά χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών και την έρευνα που σχετίζεται με την απόδοση ως παράμετρος τηλεπισκόπησης. Σε σύγκριση με το NDVI, το EVI είναι λιγότερο ευαίσθητο σε διαφορετικά υπόβαθρα εδάφους (Lu et al., 2020).

Η καθαρή πρωτογενής παραγωγή μιας καλλιέργειας σχετίζεται με το NDVI αποτελεί ένα καλό δείκτη της απόδοσης των καλλιεργειών κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου, η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών βλάστησης των καλλιεργειών με τηλεπισκόπηση και της απόδοσης των καλλιεργειών ποικίλλει για διαφορετικό κύκλο καλλιέργειας.

Οι δορυφορικές εικόνες (MODIS) χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάλυση της απόδοσης των καλλιεργειών. Ωστόσο, οι μετρήσεις ανάπτυξης που προέρχονται από τους δείκτες NDVI ή EVI δεν έχουν μέχρι στιγμής διερευνηθεί και εφαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό στην απόδοση των καλλιεργειών. Σε αρκετές μελέτες οι μετρήσεις ανάπτυξης καλλιεργειών που βασίζονται σε NDVI και EVI, οι οποίες αποτυπώνουν βιομετρικά την κατάσταση και την τάση της ανάπτυξης των καλλιεργειών και επομένως θα μπορούσαν να είναι πιο ισχυρές για τη διαχείριση της απόδοσης ανάπτυξης, με σκοπό τη μοντελοποίηση της απόδοσης των καλλιεργειών. Σχεδιάζοντας νέους δείκτες ανάπτυξης καλλιεργειών με βάση τα φαινολογικά και οικολογικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, αυτή η μελέτη έδειξε περαιτέρω

μετρήσεις ανάπτυξης βασισμένες σε NDVI και EVI για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών και τη μοντελοποίηση της απόδοσης. Αυτές οι μετρήσεις ανάπτυξης μπορούν να εφαρμοστούν σε άλλους τύπους παρακολούθησης των καλλιεργειών σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες (Sadia et al, 2021).

5.2 Διαχείριση λίπανσης και θρεπτικών (Nutrient Management)

Η διαχείριση της λίπανσης και γενικότερα των θρεπτικών συστατικών αποτελεί ένα από τα πιο βασικά στοιχεία της γεωργίας ακριβείας που διέπει όλα τα σημαντικά προβλήματα βελτίωσης της παραγωγικότητας, της βιωσιμότητας, της κερδοφορίας και της κλιματικής αλλαγής. Η αξιολόγηση της ζήτησης θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά είναι πιο αποτελεσματική στρατηγική, καθώς η ανάπτυξη των φυτών σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή είναι μια συνιστάμενη της επίδρασης της προσφοράς θρεπτικών ουσιών από όλες τις πηγές και επομένως αποτελεί ένα αξιόπιστο μέτρο της διαθεσιμότητάς τους.

Η έγκαιρη και κατάλληλη εφαρμογή λιπασμάτων είναι ουσιώδεις για τη βέλτιστη ανάπτυξη και των απόδοσης των καλλιεργειών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές ζημιές μέσω απωλειών θρεπτικών ουσιών στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Συνήθως, ένας συνιστάμενος ρυθμός λιπάσματος εφαρμόζεται ομοιόμορφα κατά τη φύτευση και τα μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών.

Ωστόσο, η απαίτηση λιπασμάτων των καλλιεργειών ποικίλλει χωρικά και χρονικά, καθώς η ανάπτυξη των καλλιεργειών κατά τη διάρκεια και μεταξύ των εποχών είναι συνάρτηση πολλών βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων λόγω διαφορών που σχετίζονται με τα εδάφη, τη διαχείριση, την τοπογραφία, καιρικές συνθήκες, την υδρολογία και άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Ως εκ τούτου, οι δείκτες βλάστησης που προέρχονται από την τηλεπισκόπηση της ανάπτυξης/κατάστασης των καλλιεργειών αντικατοπτρίζουν τη συνδυασμένη μεταβλητότητα σε αυτούς τους παράγοντες ή καταπονήσεις.

Η χαρτογράφηση αυτής της μεταβλητότητας στην κατάσταση/απαίτηση θρεπτικών συστατικών των καλλιεργειών για εφαρμογές στις καλλιέργειες θα μπορούσε να είναι δύσκολη με τα συμβατικά χρησιμοποιούμενα εργαλεία (Rajendra et al, 2020)

Πολυφασματικές, υπερφασματικές και θερμικές εναέριες εικόνες που λαμβάνονται από δορυφορικούς και UAV είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση των αναγκών αζώτου της καλλιέργειας. Οι πολυφασματικοί αισθητήρες, που μπορούν να αποκτήσουν περιορισμένο αριθμό φασματικών ζωνών ταυτόχρονα στις περιοχές VIS-NIR, χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της πράσινης βιομάζας, της θρεπτικής κατάστασης, της αποδόμησης των χρωστικών ουσιών και της φωτοσυνθετικής απόδοσης.

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες συστημάτων απεικόνισης που προέρχονται από την τηλεπισκόπηση και χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή λιπασμάτων, επιτρέποντας την εκτίμηση της πράσινης βιομάζας και της κατάστασης επιπέδου του αζώτου (Yousfi et al, 2019).

Αρκετοί δείκτες βλάστησης όπως ο NDVI και ο SAVI προέρχονται από δεδομένα τηλεπισκόπησης, έχουν αποδειχθεί ότι συσχετίζονται σημαντικά με την

περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη των φυτών, τη φωτοσυνθετική δράση και την παραγωγικότητα των φυτών (Rajendra et al, 2020).

Η χλωροφύλλη που περιέχεται στο στρώμα του φύλλου διέπει μεγάλο μέρος της ανάκλασης του ορατού φωτός (400-720 nm), αν και η ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος NIR (720-1300 nm) εξαρτάται από τη δομή των ιστών της επιφάνειας του μεσόφυλλου. Φασματικοί δείκτες βλάστησης όπως ο δείκτης (NDVI) παρέχουν λεπτομέρειες σχετικά με το δυναμικό παραγωγικότητας της φωτοσυνθετικής αποδοτικότητας και την πιθανή απόδοση. Η χαρτογράφηση των δεικτών κατά συνέπεια βοηθάει στην κατανόηση της χωρικής μεταβλητότητας της κατάστασης των θρεπτικών συστατικών των καλλιεργειών (Kaur et al., 2010). Η τηλεπισκόπηση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της οργανικής ύλης του εδάφους και της περιεκτικότητας σε φώσφορο για την ανάπτυξη χωρικών χαρτών που μπορούν να βοηθήσουν στη εξειδικευμένη διαχείριση εντός του πεδίου.

Χρησιμοποιώντας τους δείκτες βλάστησης για τον προσδιορισμό της κατάστασης των θρεπτικών συστατικών των φυτών ή των ποσοστών εφαρμογής αζώτου, θα πρέπει επίσης να λάβετε υπόψη ενδεχομένως συγκεχυμένες επιπτώσεις που προκαλούνται λόγω άλλων στρεσογόνων παραγόντων όπως η καταπόνηση έλλειψης ή περίσσειας υγρασίας και οι ασθένειες ως η έλλειψη θρεπτικών ουσιών ή της περίσσειας λίπανσης κατά συνέπεια αποφεύγοντας τις απώλειες παραγωγής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης θεωρούνται βασικός συντελεστής για τη βιωσιμότητα της γεωργίας καθώς η υποβάθμιση του εδάφους και της γονιμότητας που προκαλείται από την εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων επηρεάζει την βιωσιμότητα, ισορροπία, τη ζωτικότητα, τη αειφορία των καλλιεργειών και του περιβάλλοντος.

Η εφαρμογή λίπανσης βασιζόμενη στις τεχνικές τηλεπισκόπησης έχει δείξει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως η βελτίωση της παραγωγικότητας και της ποιότητας των καλλιεργειών και η προστασία του αγροτικού περιβάλλοντος. Τα τελευταία χρόνια, το κόστος της εφαρμογής τηλεπισκόπησης στη διαχείριση του αζώτου έχει μειωθεί και έχει γίνει πιο συχνό στο γεωργικό τομέα. Ωστόσο, η οικονομική δυνατότητα των μικρών γεωργών και από αναπτυσσόμενες χώρες γεωργούς είναι περιορισμένη και δεν επιτρέπει τη χρήση τεχνολογιών τηλεπισκόπησης. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση νέων τεχνολογιών για την παρακολούθηση της εφαρμογής λίπανσης του αζώτου και των θρεπτικών στοιχείων θα πρέπει να ενισχυθεί με τη βοήθεια και τις επιχορηγήσεις του κράτους σε πολλές περιοχές του κόσμου. Η τεχνική και οικονομική στήριξη για τη βελτίωση του επιπέδου γνώσης των νέων τεχνολογιών μεταξύ των γεωργών επιτρέπει τη βιωσιμότητα της γεωργικού τομέα, τη βελτίωση της παγκόσμιας παραγωγής και την προστασία του περιβάλλοντος (Yousfi et al, 2019).

5.3 Διαχείριση άρδευσης και εξατμισοδιαπνοή (Irrigation Water Management & E.T.)

Η βιώσιμη γεωργική ανάπτυξη και διαχείριση βασίζονται στην επαρκή ποσότητα και ποιότητα των υδάτινων πόρων. Η ρύπανση και η παράλογη χρήση των υδάτων απειλούν την ανάπτυξη και απαιτούν την εφαρμογή μέτρων και πολιτικών που αφορούν τόσο τη διαχείριση της ποιότητας όσο και της ζήτησης, μαζί με την

αξιολόγηση της ποιότητας ανάλογα με την κάθε συγκεκριμένη χρήση νερού (Malamos & Koutsoyiannis 2018).

Εξατμισοδιαπνοή (ET), είναι η ροή υδρατμών από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα, είναι το δεύτερο μεγαλύτερο στοιχείο του ισολογισμού νερού μετά από βροχοπτώσεις.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της ET είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των ισολογισμών ενέργειας και νερού σε παγκόσμια κλίμακα έως πεδίου, και η δυνατότητα εκπόνησης λεπτομερούς υπολογισμού της χρήσης του νερού θα προωθήσει τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων γλυκών υδάτων μας.

Πληροφορίες της εξατμισοδιαπνοής σε κλίμακες που διακρίνουν τους διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του νερού και για τον προγραμματισμό εφαρμογών άρδευσης (Michael et al, 2019).

Οι μέθοδοι ελέγχου της χρήσης νερού και ο σχεδιασμός των υδάτινων πόρων είναι υψηλής προτεραιότητας. Στην γεωργία όπου χρησιμοποιείτε εφαρμογή άρδευσης, ο σωστός τρόπος εξοικονόμησης νερού είναι η αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του νερού μέσω καλύτερης διαχείρισης.

Ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1960, οι επιχειρησιακές μέθοδοι για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (ET) από την επιφάνεια της Γης άρχισαν να αποκλίνουν. Οι μετεωρολογικές προσεγγίσεις έδωσαν έμφαση στη μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών εδάφους-ατμόσφαιρας, ενώ η αγροτική κοινότητα ανέπτυξε μια πιο εμπειρική προσέγγιση με βάση τους συντελεστές καλλιέργειας (Kc). Ένας καλλιεργητικός συντελεστής συσχετίζει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας σε ένα δεδομένο στάδιο ανάπτυξης με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET₀) που υπολογίζεται από μετεωρολογικά δεδομένα μέσα από έναν αριθμό διαφορετικών εξισώσεων, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα δεδομένων. Εάν υπάρχουν διαθέσιμα επαρκή καιρικά δεδομένα, όπως από αυτοματοποιημένους μετεωρολογικούς σταθμούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος FAO Penman-Monteith για την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (Allen et al., 1998).

Οι δείκτες βλάστησης (Vegetation Indices - VI) αναπτύχθηκαν με την εκτόξευση των πρώτων δορυφόρων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της βλάστησης στις αρχές της δεκαετίας του 1970 (Bannari et al, 1995) Οι μέθοδοι δεικτών βλάστησης (VI) αντικαθιστούν (ή συμπληρώνουν) τους συντελεστές καλλιέργειας με ένα VI που αντικατοπτρίζει το πραγματικό στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας τη στιγμή της μέτρησης. Οι συντελεστές καλλιέργειας με βάση το VI (Kc-VI) έχουν αναπτυχθεί για μεμονωμένες και μικτές καλλιέργειες σε διάφορες γεωργικές περιοχές ξεκινώντας σχεδόν πριν από 30 χρόνια. Πιο πρόσφατα, η έννοια έχει εφαρμοστεί σε φυσικά οικοσυστήματα σε τοπικές, περιφερειακές και παγκόσμιες κλίμακες μέτρησης (Glenn et al., 2011).

Αυτοί οι συντελεστές καλλιέργειας αναπτύσσονται συνήθως για καλλιέργειες που καλλιεργούνται υπό βέλτιστες γεωπονικές συνθήκες και επομένως είναι χρήσιμες μόνο ως προσεγγίσεις των πραγματικών απαιτήσεων ET και νερού για μια δεδομένη καλλιέργεια. Ωστόσο, η πραγματική ET καλλιέργειας μπορεί να διαφέρει από την εκτιμώμενη ET με βάση το Kc για διάφορους λόγους, συμπεριλαμβανομένων των διαφορών στην ποικιλία των καλλιεργειών, της πυκνότητας φύτευσης, των κλιματικών παραγόντων, της κατάστασης θρεπτικών στοιχείων, της διαχείρισης της άρδευσης, της αλατότητας και άλλων συνθηκών. Συχνά, αυτοί οι παράγοντες μειώνουν την πραγματική ζήτηση νερού κάτω από την αναμενόμενη για μια

καλλιέργεια που καλλιεργείται υπό βέλτιστες συνθήκες. Ως εκ τούτου, η χρήση καλλιεργητικών συντελεστών για τον προγραμματισμό της άρδευσης μπορεί να οδηγήσει σε υπερ-άρδευση των καλλιεργειών. Κάτι τέτοιο αποτελεί μεγάλο πρόβλημα δεδομένου ότι το νερό άρδευσης είναι σε έλλειψη, τόσο σε περιφερειακό όσο και σε τοπικό επίπεδο διαχείρισης του νερού, ειδικά σε άνυδρες και ημιάνυδρες περιοχές του κόσμου (Santos et al., 2007).

Η πρόοδος που έχει επιτευχθεί τα τελευταία 30 χρόνια καταδεικνύει την ικανότητα των δεικτών βλάστησης που βασίζονται στην τηλεπισκόπηση για την αξιολόγηση της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών (ETc) και των απαιτήσεων άρδευσης με απλό και λειτουργικό τρόπο. Το θεμέλιο αυτών των μεθοδολογιών είναι η καλά εδραιωμένη σχέση μεταξύ των VIs και του βασικού συντελεστή καλλιέργειας (Kcb), που προκύπτει από την ικανότητα των VIs να μετρούν την ακτινοβολία που απορροφάτε από τη βλάστηση, ως κύριο μοχλό της διαδικασίας εξατμισοδιαπνοής. Επιπλέον, οι VI έχουν συσχετιστεί με τον συντελεστή μιας καλλιέργειας (Kc), υποθέτοντας σταθερούς ρυθμούς εξάτμισης. Η άμεση σχέση μεταξύ VI και ET είναι εννοιολογικά εσφαλμένη λόγω της επίδρασης της ατμοσφαιρικής ζήτησης σε αυτή τη σχέση.

Ο αυξανόμενος αριθμός δορυφόρων παρατήρησης Γης ενισχύει την αύξηση δεδομένων για να τροφοδοτήσει τις μεθοδολογίες που βασίζονται σε VI για την εκτίμηση και τη χαρτογράφηση είτε του Kc είτε του Kcb, με βελτιωμένη χρονική κάλυψη και χωρική ανάλυση. Η ανάπτυξη λειτουργικών πλατφορμών, συμπεριλαμβανομένων δορυφόρων και UAV, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του Kcb μέσω των VIs, ανοίγει νέες δυνατότητες αλλά και προκλήσεις, στον τομέα των δεικτών βλάστησης.

Η ακριβής εκτίμηση και ο χωρικός προσδιορισμός των πραγματικών απαιτήσεων σε νερό είναι πρωταρχικής σημασίας για τη διασφάλιση μιας αποτελεσματικής χρήσης της Γης και βιώσιμης διαχείρισης του νερού, όπως ορίζεται από την Ατζέντα για τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (United Nations, 2015). Η μέθοδος FAO56 έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και πολύ καιρό ως τυπική διαδικασία για την εκτίμηση της ETc μέσω ενός μόνο ή διπλού Kc και ενός ETo. Οι αξιοσημείωτες πρόοδοι στις τεχνολογίες τηλεπισκόπησης τις τελευταίες δεκαετίες δημιούργησαν την ευκαιρία για την αποτελεσματική χρήση φασματικών πληροφοριών, συχνά με τη μορφή VIs, για υποστήριξη γεωργικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την εκτίμηση των Kc και Kcb. Παρέχοντας χωρικά καταναμημένες πληροφορίες σε όλο τον κύκλο των καλλιεργειών, με έναν όλο και πιο σύντομο κύκλο επανεπισκόπησης που προκύπτει από το συνδυασμό δεδομένων από διάφορες δορυφορικές αποστολές και πλατφόρμες αισθητήρων, οι προσεγγίσεις Kc (b)-VI είναι χρήσιμες για τη διαχείριση της άρδευσης, μεταξύ άλλων σε ένα πλαίσιο ακρίβειας άρδευσης (Pocas et al., 2020, Célia et al, 2017).

Ωστόσο, για καλύτερη αντιστοίχιση του CWR και των ρυθμών άρδευσης, τα προϊόντα Kc(b)-VI θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μοντέλα εδαφικής υδατικής ισορροπίας ή θερμικά μοντέλα που στοχεύουν στην απόκτηση πληροφοριών σχετικά με την πραγματική Kc, Kcb και ETc. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει την καλή απόδοση των προσεγγίσεων Kc(b)-VI μέσω της σύγκρισης μεταξύ της εκτιμώμενης και της μετρούμενης ETc. Μετά την καλή τους απόδοση στην εκτίμηση της CWR μέσω (πραγματικής) ETc, οι μεθοδολογίες που συνδυάζουν τις προσεγγίσεις Kc(b)-VI παρουσιάζονται πλέον ως ώριμη τεχνολογία και έτσι αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως λειτουργικό εργαλείο για την υποστήριξη του προγραμματισμού άρδευσης. Επίσης, οι προσεγγίσεις Kc(b)-VI μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

ανάλυση των απαιτήσεων ETc μεταξύ των εκστρατειών άρδευσης με θετικό αντίκτυπο στον αρδευτικό σχεδιασμό.

Σήμερα, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία σχέσεων Kc(b)-VI που έχουν δοκιμαστεί και εφαρμοστεί για διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών, κλιματικές και αγρονομικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, εκτός από την τήρηση των καλών πρακτικών, θα πρέπει να καταβληθούν προσπάθειες για τον καθορισμό των καταλληλότερων προσεγγίσεων συγκρίνοντας τις διαφορετικές μεθοδολογίες κάτω από ένα μεγάλο σύνολο αγροτο-περιβαλλοντικών συνθηκών.

Θερμικά υπέρυθρα δεδομένα από διαθέσιμες επί του παρόντος δορυφορικές αποστολές και συστήματα, π.χ. πρόγραμμα Landsat και ISS-ECOSTRESS (ECOSYstem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station), καθώς και μελλοντικά συστήματα, π.χ. Υπερφασματική Υπέρυθρη Εικόνα, HyspIRI (2022) και αισθητήρας όπως Sentinel-LSTM (Copernicus Land Surface Temperature Monitoring 2024) και συστήματα που βασίζονται σε επανδρωμένη αερομεταφερόμενη τεχνολογία παρέχουν μια καλή βάση και νέες ευκαιρίες μελέτης σχέσης VI-ET. Επιπλέον, μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει τον συνδυασμό των σχέσεων Kc(b)-VI με προσεγγίσεις που βασίζονται σε ραντάρ που στοχεύουν στην ανάκτηση πρόσθετων δεδομένων από επιφανειακά εδαφικά στρώματα για την εκτίμηση του Kc. Η χρήση δεδομένων ραντάρ για την ανάκτηση της υγρασίας του εδάφους σε συνδυασμό με τα μοντέλα ισοζυγίου εδάφους νερού μπορεί να διερευνηθεί δοκιμάζοντας τις δυνατότητες νέων αποστολών ραντάρ (π.χ. Sentinel-1) για εφαρμογή τόσο σε κλίμακα πεδίου όσο και σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Επιπλέον, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να ασχοληθεί με την ανάπτυξη τυπικών και επιχειρησιακών διαδικασιών για τη διόρθωση δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων με στόχο την επαρκή εφαρμογή των σχέσεων Kc(b)-VI σε χρόνο, χώρο και αισθητήρες. (Pocas et al. 2020).

Οι τιμές NDVI πέφτουν μεταξύ -1,0 και +1,0, με το νερό να έχει αρνητικές τιμές, το έδαφος ελαφρώς θετικές τιμές και τη βλάστηση να έχει όλο και πιο υψηλές τιμές που πλησιάζουν το 0,95 για πολύ πυκνή βλάστηση (Bannari et al. 1995). Το NDVI συσχετίζεται επίσης ισχυρά με φυσιολογικές διεργασίες που εξαρτώνται από την απορρόφηση φωτός από την κόμη, συμπεριλαμβανομένου της ET, της απόδοσης και της καθαρής και ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγικότητας. Δύο άλλοι δείκτες που χρησιμοποιούνται στις μελέτες ET είναι το (SAVI) και το (EVI) (Huete & Glenn et al, 2011).

Οι Campos et al. (2011) αξιολόγησαν Kc-VI βασισμένους σε δορυφόρους για αρδευόμενα σταφύλια στην Ισπανία, χρησιμοποιώντας έναν πύργο ροής υγρασίας για να μετράει ανεξάρτητα την πραγματική ET και ETc. Τόσο το NDVI όσο και το SAVI μπόρεσαν να προβλέψουν την ET με απλές εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης, επικυρώνοντας τη χρήση τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση του ET στα οινοποιήσιμα σταφύλια.

5.4 Εδαφική υγρασία και υδατικό στρες. (Soil Moisture & Water Stress)

Η επιφανειακή υγρασία του εδάφους είναι μια σημαντική υδρολογική παράμετρος στο γεωργικό τομέα. Στον τομέα της γεωργίας, η περιεκτικότητα σε νερό της επιφάνειας

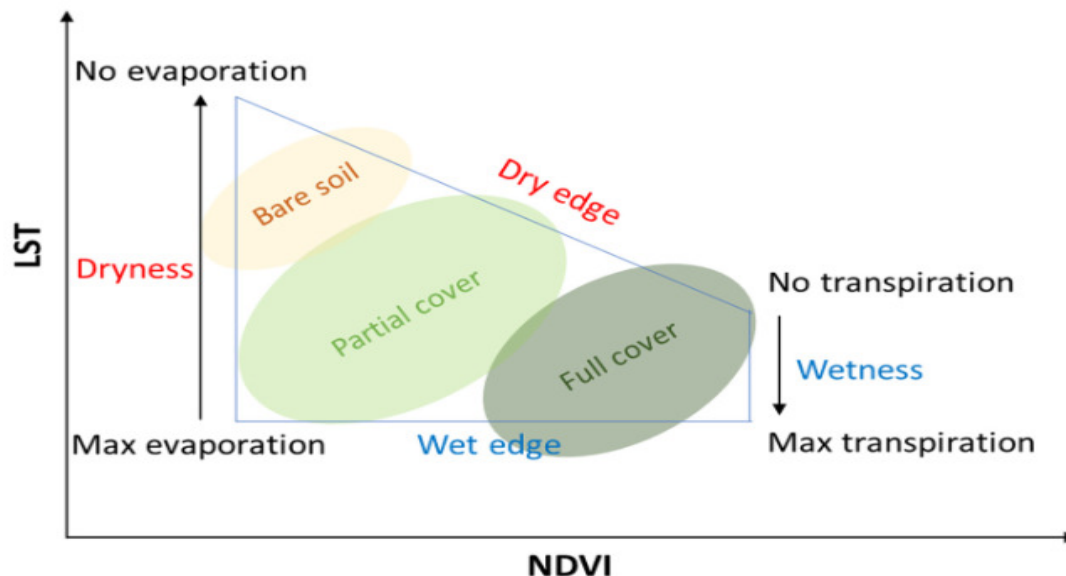
είναι γνωστή ως υγρασία του εδάφους και είναι μια σημαντική μεταβλητή που πρέπει να συνυπολογίζετε για τη βελτίωση των καλλιεργειών και της απόδοσης (Zhao et al 2021).

Ανάλογα με τα ποσοστά εδαφικής υγρασίας, η ανάπτυξη των φυτών θα βελτιστοποιηθεί, αυξάνοντας την απορρόφηση θρεπτικών ουσιών και την παρουσία μικροοργανισμών, ρυθμίζοντας την θερμοκρασία του εδάφους, και επηρεάζοντας την ταχύτητα αποδόμησης της ύλης και διαδικασίες αλλοίωσης. Από χημική άποψη, η εδαφική υγρασία είναι απαραίτητη για τα φυτά να υποβληθούν σε φωτοσύνθεση. Αναφορικά με τις φασματικές παραλλαγές της απορρόφησης του νερού, αρκετοί πολυφασματικοί δείκτες που χρησιμοποιούν τη ζώνη NIR και SWIR για την ανάλυση της περιεκτικότητας σε νερό και της υγρασίας του εδάφους μέσω οπτικών αισθητήρων από το διάστημα έχουν μελετηθεί κατά τα τελευταία έτη.

Η περιεκτικότητα εδαφικής υγρασίας των εδαφών που καλύπτονται από τη βλάστηση έχει μελετηθεί με τη χρήση δεικτών όπως TVDI, EVI, GCI και συνηθέστερα ο NDVI, ένας ενισχυμένος δείκτης βλάστησης για τον προσδιορισμό της κατάστασης της βλάστησης, χρησιμοποιώντας την ξηρασία ως δείκτη εδαφικής υγρασίας, και ο δείκτης NDWI χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό υδατικών σωμάτων και περιοχών όπου το έδαφος είναι κορεσμένο (Casamitjana et al, 2020). Ο προσαρμοσμένος στο έδαφος δείκτης βλάστησης (SAVI), χρησιμοποιείται για τη μείωση της επίδρασης του εδάφους, ελαχιστοποιώντας την σχετική φωτεινότητα λαμβάνοντας υπόψη κυρίως την αλληλεπίδραση βλάστησης/εδάφους με παραμέτρους ρύθμισης του εδάφους. Η χρήση αυτού του δείκτη για τη χαρτογράφηση της εδαφικής υγρασίας, είναι σημαντική στην πρόβλεψη της συγκράτησης της υγρασίας του εδάφους (Casamitjana et al, 2020).

Επιπλέον συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία μεταβλητές για να αξιολογήσουν την κατάσταση της εδαφικής υγρασίας μιας περιοχής. Σε μεγάλη χωρική κλίμακα, η εδαφική υγρασία μπορεί να υποδειχθεί χρησιμοποιώντας τον δείκτη TVDI, ο οποίος βασίζεται στην παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας. Ο δείκτης TVDI μπορεί να εκτιμηθεί είτε με τη χρήση του δείκτη NDVI ή του δείκτη (EVI) σε συνδυασμό με δεδομένα θερμοκρασίας επιφάνειας Γης (LST). Κατά συνέπεια, οι φασματικοί χώροι του NDVI και του LST έχουν εφαρμοστεί για τη βελτίωση της ακρίβειας του προσδιορισμού των συνθηκών του εδαφικού ύδατος. Κοινή μεθοδολογία για την εκτίμηση εδαφικής υγρασίας με τη χρήση τηλεπισκόπησης είναι η τραπεζοειδής μέθοδος, βασισμένη σε θερμικά και οπτικά δεδομένα (Joshi et al. 2021, Zhao et al. 2021). Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης μπορούν να χαρτογραφήσουν χωροχρονικές διακυμάνσεις στο υδατικό στρες. Συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπτικά και θερμικά δεδομένα δορυφορικών αισθητήρων τηλεπισκόπησης για την ανάπτυξη δεικτών υδατικής καταπόνησης.

Οι φασματικές σχέσεις χώρου που προκύπτουν από τον δείκτη θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους-βλάστησης (LST-VI) βασίζονται στους ονομαστικούς δεσμούς μεταξύ της υγρασίας του εδάφους και των βιοφυσικών χαρακτηριστικών των φυτών (Amani et al, 2016). Οι περισσότερες μελέτες διαπίστωσαν ότι το LST-VI έχει άμεσες και «έμμεσες» συνδέσεις με τα μέτρα καταπόνησης του νερού λόγω της σχετικά άμεσης απόκρισης των στομάτων στο στρες του νερού που ανιχνεύεται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της κόμης. Η βιβλιογραφία προτείνει ότι οι μέθοδοι που βασίζονται στο LST-VI μπορούν να συλλάβουν εύκολα σήματα υδατικής καταπόνησης χωρίς να απαιτούν βοηθητικά δεδομένα βροχοπτώσεων και υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους (Anderson et al., 2007).



Εικόνα. 12_ Τραπεζοειδής χώρος LST-NDVI

Ο υπολογισμός των LST-NDVI και TVDI με βάση τη διασπορά του LST και του NDVI έχει ως αποτέλεσμα έναν τραπεζοειδή χώρο. Όπως δείχνει η Εικόνα 12, κάθε μέρος αυτού του χώρου δείχνει πληροφορίες σχετικά με την υδατική κατάσταση της κόμης και την υγρασία του εδάφους δηλαδή οι ξηρές και υγρές άκρες μπορούν να εφαρμοστούν για να αποκτηθούν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του νερού του πεδίου. Στην ξηρή άκρη, μπορεί να παρατηρηθεί ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ NDVI και LST, η οποία δείχνει ότι η κατάσταση του υδατικού στρες έχει αντικατασταθεί, ενώ στην υγρή άκρη, το φυτό δεν είναι υπό συνθήκες στρες (Zare et al, 2020). Ισχυρές αρνητικές σχέσεις μεταξύ LST και VI αναφέρθηκαν από πολλές μελέτες, κυρίως στην περιορισμένη σε νερό καλοκαιρινή περίοδο (Moran et al. 1996). Η τραπεζοειδής σχέση του LST-NDVI αναπτύχθηκε αρχικά από τους Goward και Hope το 1989 (Amani et al, 2016).

5.5 Διαχείριση ασθενειών και εντόμων (Crop Disease Management & Insect detection)

Η μέγιστη απόδοση των φυτών, που καθορίζεται από το γενετικό τους δυναμικό, συνήθως δεν επιτυγχάνεται. Παράγοντες όπως οι δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες,

τα ανεπαρκή θρεπτικά συστατικά ή το νερό, οι ασθένειες των φυτών και οι βλάβες από έντομα εμποδίζουν την ανάπτυξη σε κάποιο βαθμό. Ειδικά οι ασθένειες των φυτών είναι ένας από τους βασικούς λόγους απώλειας ποιότητας και απόδοσης της παραγωγής. Σε ετήσια βάση, περίπου το 30% της παγκόσμιας συγκομιδής χάνεται λόγω βιοτικών παραγόντων στρες (Habermeyer & Gerhard, 2000).

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον έλεγχο εντόμων και ασθενειών σε καλλιεργήσιμες καλλιέργειες εξακολουθεί να είναι ο ψεκασμός φυτοφάρμακων ομοιόμορφα πάνω από χωράφια σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου καλλιέργειας. Ωστόσο, οι περισσότερες προσβολές από ασθένειες δεν κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το πεδίο, αλλά εμφανίζονται διάσπαρτα σε κηλίδες. Τα φυτοφάρμακα θα πρέπει να στοχεύουν μόνο σε αυτά τα μέρη του αγρού όπου χρειάζονται (Gröll et al. 2007). Η ανίχνευση βιοτικών καταπονήσεων λόγω προσβολής από έντομα και ασθένειες με τη χρήση φασματικών δεικτών που προέρχονται από εικόνες τηλεπισκόπησης δεν ήταν σε μεγάλο βαθμό εμπορικά βιώσιμη. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι ότι τα συμπτώματα μόλυνσης από έντομα ή ασθένειες συνήθως δεν είναι ανιχνεύσιμα με τη χρήση τηλεπισκόπησης στα αρχικά στάδια της μόλυνσης.

Στα πρώτα στάδια της αύξησης του πληθυσμού, τα έντομα μπορούν να κατοικούν στις κάτω πλευρές των φύλλων ή στις ρίζες των καλλιεργειών, όπου δεν είναι ορατά χρησιμοποιώντας εικόνες τηλεπισκόπησης. Ένα ευρύ φάσμα προσεγγίσεων τηλεπισκόπησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση εντόμων και ασθενειών σε μεταγενέστερα στάδια μόλυνσης υπό προσεκτικά ελεγχόμενες συνθήκες όταν υπάρχει μόνο ένας τύπος προσβολής από έντομο ή ασθένεια (Pinter et al. 2003, Mathyam et al. 2011).

Βλάβες των εντόμων και των ασθενειών υπό αυτές τις συνθήκες μπορούν να ανιχνευθούν με τη χρήση διαφόρων φασματικών δεικτών με βάση VIS-NIR ή υπερφασματικές αντανάκλασεις, σε συνδυασμό με ανάλυση μερικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων ή τεχνικές μηχανικής μάθησης. Οι βλάβες των εντόμων και των ασθενειών προκαλούν τυπικά υψηλότερη ανάκλαση (χαμηλότερη απορρόφηση) σε μπλε και κόκκινα μήκη κύματος λόγω των χαμηλότερων συγκεντρώσεων χρωστικών γλωροφύλλης, και χαμηλότερη ανάκλαση στα μήκη κύματος NIR λόγω της χαμηλότερης βιομάζας.

Τα παθογόνα τείνουν να έχουν ως αποτέλεσμα είτε απώλεια φύλλων ή/και περιοχή βλαστών είτε αλλαγές στο χρώμα των φύλλων λόγω μείωσης της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας. Οι αλλαγές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα διαφορές στη φασματική αντίδραση στις ζώνες VIS και NIR του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Khanal et al. 2020). Τα μήκη κύματος στο πράσινο και στη κόκκινη άκρη μπορούν επίσης να ανταποκριθούν σε ποικίλες βιοτικές καταπονήσεις καλλιεργειών. Κοινώς χρησιμοποιούμενοι φασματικοί δείκτες για βιοτική καταπόνηση περιλαμβάνει NDVI, G-NDVI, RE-NDVI- και προσαρμοσμένο στο έδαφος VI. Ωστόσο, αυτοί οι φασματικοί δείκτες δεν είναι διαγνωστικοί για οποιαδήποτε συγκεκριμένη προσβολή από έντομα ή ασθένειες και συχνά ανταποκρίνονται εξίσου καλά σε άλλες βιοτικές ή αβιοτικές καταπονήσεις, συμπεριλαμβανομένης της ανεπάρκειας αζώτου (N) (Pinter et al. 2003, Jackson, 1986).

Για τον προσδιορισμό των ασθενειών των φυτών, οι δείκτες βλάστησης αξιολογήθηκαν ως προς την καταλληλότητα τους για την ανίχνευση διαφορών άρρωστων και υγιών φυτών και χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών συστημάτων αισθητήρων. Οι δείκτες που

μπορούσαν να ανιχνεύσουν τις σχετικές ασθένειες των φυτών επιλέχθηκαν από μια πλειάδα υπαρχόντων δεικτών βλάστησης. (Habermeyer & Gerhard, 2000). Η μόλυνση από ασθένειες των καλλιεργειών είναι μία από τις κύριες μεταβλητές που υπονομεύουν την κερδοφορία και τη βιωσιμότητα των γεωργικών δραστηριοτήτων, κατά συνέπεια, η έγκαιρη παρακολούθηση των συνθηκών της υγείας των φυτών είναι σημαντική για την αποτελεσματική διαχείριση των γεωργικού τομέα (<https://eos.com/blog/crop-diseases/>).

Η τηλεπισκόπηση καθιστά δυνατή την ταχεία ανίχνευση της ασθένειας των καλλιεργειών σε μεγάλη κλίμακα, που έχει τα πλεονεκτήματα του να είναι έγκαιρη, εύκολη στη χρήση, εκτεταμένη, μη καταστροφικό και αντικειμενική. Η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση, τον έλεγχο και την αξιολόγηση ποικιλίας ασθενειών σε διάφορες καλλιέργειες. Διατίθενται εκτενείς αξιολογήσεις σχετικά με τη χρήση τηλεπισκόπησης για την ανίχνευση φυτικών ασθενειών. Μεταξύ των διαφορετικών τύπων τεχνικών τηλεπισκόπησης, η υπερφασματική τηλεπισκόπηση είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις για να διακρίνετε χαρακτηριστικά που είναι δύσκολο να ανιχνευθούν στο φάσμα, λόγω της υψηλής φασματικής του ανάλυσης. Η υπερφασματική τεχνολογία εφαρμόζεται ευρέως και αποτελεσματικά για την παρακολούθηση διαφόρων τύπων καταπονήσεων στις καλλιέργειες.

Δείκτες βλάστησης (VIs) επιτρέπουν την αξιολόγηση και την παρατήρηση αλλαγών στις βιοφυσικές ιδιότητες της κόμης, όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI), συγκέντρωση της χλωροφύλλης, και φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR). Έχει αποκαλυφθεί ότι οι ασθένειες των καλλιεργειών μπορεί να επηρεάσει σοβαρά τις τιμές της βιοφυσικής ιδιότητας, που μπορεί να εξηγήσει γιατί αυτό το επίπεδο σοβαρότητας συσχετίζεται σημαντικά με τις τιμές της καλλιέργειας VI. Ωστόσο, δεν έχει υπάρξει μελέτη που χρησιμοποιεί άμεσα VIs για την εκτέλεση του επιπέδου σοβαρότητας της ασθένειας χωρίς επίγεια έρευνα. Επιπλέον, οι περιοχές τιμών των VIs και οι συνθήκες ανάπτυξης των καλλιεργειών μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από αγρό σε αγρό.

Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η συσχέτιση μεταξύ των τιμών VI και των επιπέδων σοβαρότητας της ασθένειας των καλλιεργειών να μην είναι πάντοτε αξιόλογη, λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες. Η κανονικοποίηση ως απλή και αποτελεσματική μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων, έχει χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη των διαφορών υποβάθρου για τα φάσματα αντανάκλασης, και υπήρξε επίσης βασική λειτουργία για την κατασκευή των VIs. Ωστόσο, δεν έχει εφαρμοστεί για την εξάλειψη των παρεμβολών της διαχείρισης καλλιεργειών και του εύρους τιμών Vis (Zhao et al. 2020).

Έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες χρήσης πολυφασικών αισθητήρων και δορυφορικών εικόνων για την ανίχνευση ασθενειών καλλιεργειών. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, δείκτες βλάστησης με βάση απλούς συνδυασμούς VIS και NIR, όπως (NDVI) και (SR), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από την κοινότητα τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της βλάστησης από το διάστημα, τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα.

Επιπρόσθετα, άλλοι φασματικοί δείκτες βλάστησης για την ανίχνευση, παρακολούθηση τη διαχείριση των ασθενειών των φυτών είναι οι TCARI, MCARI, OSAVI και ο δείκτης βλάστησης NPCI (Haboutane et al. 2002, Laudien et al. 2003). Αρκετοί φασματικοί δείκτες ήταν κατάλληλοι να ανιχνεύσουν διαφορές στην

ανάκλαση μεταξύ μεταξύ υγιών και άρρωστων φυτών. Αλλά δεν υπήρχε συγκεκριμένος δείκτης μόνο για μία από τις ασθένειες (Gröll et al. 2007).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την συνεχή αύξηση του πληθυσμού και την ανάγκη κάλυψης επισιτισμού σε παγκόσμια κλίμακα, η αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και η βιωσιμότητα του αγροτικού τομέα αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Η ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη έχει συμβάλει καθοριστικά στον αγροτικό τομέα, ο συνδυασμός τεχνολογιών όπως η τηλεπισκόπηση, GIS και GPS αποτελούν σημαντικό παράγοντα και εργαλείο στην παραγωγή των καλλιεργειών και τις εφαρμογές (Basso et al. 2004).

Η τηλεπισκόπηση προσφέρει την ικανότητα απόκτησης δεδομένων σε υψηλές αναλύσεις (χωρικές, φασματικές, ραδιομετρικές και χρονικές), με πλήθος επιλογών σε πλατφόρμες (δορυφορικές, UAV και εδάφους) και αισθητήρες (πολυφασματικοί, υπερφασματικοί και θερμοικοί), ευρέως διαθέσιμα και σε προσιτό κόστος συλλέγοντας διάφορα δεδομένα που αφορούν τον γεωργικό τομέα. Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα εικόνων από απόσταση λόγω της ταχείας εξέλιξης της τεχνολογίας τηλεπισκόπησης διευρύνει τον ορίζοντα των επιλογών μας για πηγές εικόνων. Διαφορετικά περιβάλλοντα έχουν τα δικά τους μεταβλητά και σύνθετα χαρακτηριστικά, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αναφορικά με /που αφορούν τη χρήση των VIs.

Οι εφαρμογές των VIs στη γεωργία επεκτείνονται σε πολλά πεδία και είδη καλλιεργειών, από την αρχική προετοιμασία του εδάφους έως την συγκομιδή (Zhu et al. 2017, Xue et al. 2017). Η χρήση των VIs για τις εφαρμογές στα προβλήματα των καλλιεργειών μπορεί να προσαρμοστεί για να λάβει πληροφορίες σχετικά με την παραλλαγή εντός του πεδίου/αγρού σε ένα συγκεκριμένο τμήμα της καλλιεργητικής περιόδου και των χαρακτηριστικών στα διάφορα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών. Η χρήση διαφορετικών δεικτών ενισχύει την κατανόησή για τις επιπτώσεις των πρακτικών διαχείρισης (Hatfield et al. 2010). Ως εκ τούτου, για πρακτικές εφαρμογές, η επιλογή ενός συγκεκριμένου VI πρέπει να γίνει με προσοχή εξετάζοντας και αναλύοντας διεξοδικά τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των υφιστάμενων VIs και στη συνέχεια ο συνδυασμός για την εφαρμογή σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (Xue et al. 2017).

Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν πολλές προκλήσεις προτού οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης μπορέσουν ενδεχομένως να δουν μια μεγάλη κλίμακα υιοθέτηση στον τομέα της γεωργίας. Παρόλο της ευρείας διαθεσιμότητας των δεδομένων λόγω των διαφορετικών πλατφορμών, αισθητήρων και βαθμίδων ανάλυσης μπορεί να απαιτηθεί σημαντικός όγκος τεχνικών γνώσεων και εμπειρογνωσίας για την επεξεργασία τους για εφαρμογές, όπως η προ-επεξεργασία και η μετα-επεξεργασία της εικόνας απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις και λογισμικό. Επίσης υπάρχουν περιορισμοί όπως ημέρες με έντονη νέφωση και μεταβλητή ή ασυνεπής ακτινοβολία ή ηλιακό φως μπορεί να καταστήσει τις εικόνες ακατάλληλες για χρήση (Khanal et al. 2020).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Φασματικοί Δείκτες Βλάστησης & LAI

RATIO, (Ratio Vegetation Index)	SR ή RVI = NIR/RED ή SR ή RVI = NIR / VIS (Εάν δεν υπάρχει ερυθρό φάσμα διαθέσιμο)
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
NDVI-(RED) (Normalized Difference Vegetation Index- Red Edge)	$NDRE = \frac{NIR - RED\ EDGE}{NIR + RED\ EDGE}$
NDVI (GNDVI) (Normalized Difference Vegetation Index-Green)	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
NDWI (Normalized Difference Water index)	$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$
WDVI (Weighted Difference Vegetation Index)	$WDVI = NIR - (g \times R)$
ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$ARVI = \frac{(NIR - (2 \times RED) + BLUE)}{(NIR + (2 \times RED) + BLUE)}$
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$SAVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + Red + L) \times (1 + L)}$
OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$OSAVI = \frac{NIR - Red}{(NIR + Red + 0,16)}$
MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)	$MSAVI = \frac{(NIR - Red) \times (1 + L)}{(NIR + Red + L)}$
MSAVI-2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)	$MSAVI2 = \frac{(2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)})}{2}$
TVWSI (Temperature Vegetation Water Stress Index)	$TVWSI = \frac{d(SWCI, NDVI)}{RLST}$
TVDI (Temperature Vegetation Dryness index)	$TVDI = \frac{LSTs, obs - LSTs, min}{LSTs, max - LSTs, min}$
EVI	$EVI = \frac{2,5 \times (NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times BLUE + L)}$

(Enhanced Vegetation Index)	
PVI (Perpendicular Vegetation Index)	$PVI = \frac{NIR - a \times Red - b}{\sqrt{1 + a^2}}$
CVI (Chlorophyll Vegetation Index)	$CVI = \frac{NIR}{GREEN} \times \frac{RED}{GREEN}$
RCI (Red Chlorophyll Index)	$RCI = \frac{NIR}{Red} - 1$
GCI (Green Chlorophyll Index)	$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$
(SIPI) (Structure Intensive Pigment Vegetation Index)	$SIPI = \frac{NIR - BLUE}{NIR - RED}$
LAI (Leaf Area Index)	$LAI = \frac{\text{leaf area (m}^2\text{)}}{\text{ground area (m}^2\text{)}}$

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Sishodia, R.P.; Ray, R.L.; Singh, S.K. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sens.* 2020, 12, 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Giller, K.E., Delaune, T., Silva, J.V. et al. The future of farming: Who will produce our food?. *Food Sec.* 13, 1073–1099 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01184-6>
- Hatfield JL, Prueger JH. Value of Using Different Vegetative Indices to Quantify Agricultural Crop Characteristics at Different Growth Stages under Varying Management Practices. *Remote Sensing.* 2010; 2(2):562-578. <https://doi.org/10.3390/rs2020562>
- Panda, Sudhanshu & Ames, Daniel & Suranjan, Panigrahi. (2010). Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques. *Remote Sensing.* 2. 10.3390/rs2030673.
- Basso, Bruno & Cammarano, Davide & De Vita, Pasquale. (2004). Remotely sensed vegetation indices: theory and application for crop management. *Rivista Italiana di Agrometeorologia.* 1. 36-53.
- Ghosh, P., Kumpatla, S. P. , 2022, 'GIS Applications in Agriculture', in Y. Zhang, Q. Cheng (eds.), *Geographic Information System [Working Title]*, IntechOpen, London. 10.5772/intechopen.104786.
- Romano, G.; Ricci, G.F.; Gentile, F. Influence of Different Satellite Imagery on the Analysis of Riparian Leaf Density in a Mountain Stream. *Remote Sens.* 2020, 12, 3376. <https://doi.org/10.3390/rs12203376>
- Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Harri Kaartinen, H., & Haggren, H. (2017). A Review: Remote Sensing Sensors. In R. B. Rustamov, S. Hasanova, & M. H. Zeynalova (Eds.), *Multi-purposeful Application of Geospatial Data.* IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71049>
- Khanal S, KC K, Fulton JP, Shearer S, Ozkan E. Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. *Remote Sensing.* 2020; 12(22):3783. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>
- Liaghat, S. & Balasundram, S. K. (2010). A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences,* 5(1), 50-55. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.50.55>
- M. Weiss, F. Jacob, G. Duveiller, Remote sensing for agricultural applications: A meta-review, *Remote Sensing of Environment,* Volume 236, 2020, 111402, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>.

- Solymosi, Kristóf & Kövér, György & Romvári, Róbert. (2019). The Progression of Vegetation Indices: a Short Overview. *Acta Agraria Kaposváriensis*. 23. 10.31914/aak.2264.
- Maria Romero, Yuchen Luo, Baofeng Su, Sigfredo Fuentes, Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 147, 2018, Pages 109-117, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.013>.
- Pocas, I., Calera, A., Cambos, I., Cunha, M. (2020). Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches, *Agriculture water management*, 233 (2020) 106081.
- Morcillo-Pallarés P, Rivera-Caicedo JP, Belda S, De Grave C, Burriel H, Moreno J, Verrelst J. Quantifying the Robustness of Vegetation Indices through Global Sensitivity Analysis of Homogeneous and Forest Leaf-Canopy Radiative Transfer Models. *Remote Sensing*. 2019; 11(20):2418. <https://doi.org/10.3390/rs11202418>
- Silleos, Georgios & Alexandridis, Thomas & Gitas, Ioannis & Perakis, Konstantinos. (2006). Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International*. 21. 21-28. <https://www.researchgate.net/publication/233852746>
- F. Baret, S. Jacquemoud, J.F. Hanocq, About the soil line concept in remote sensing, *Advances in Space Research*, Volume 13, Issue 5, 1993, Pages 281-284, ISSN 0273-1177, [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90560-X](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90560-X). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027311779390560X>)
- Holben, B.N. (1986) Characteristics of Maximum-Value Composite Images from Temporal AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417-1434. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948945>
- S.M. Labib, Sarah Lindley, Jonny J. Huck, Scale effects in remotely sensed greenspace metrics and how to mitigate them for environmental health exposure assessment, *Computers, Environment and Urban Systems*, Volume 82, 2020, 101501, ISSN 0198-9715, <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2020.101501>
- A.R Huete, A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, Volume 25, Issue 3, 1988, Pages 295-309, ISSN 0034-4257, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- Hongrui Ren, Guangsheng Zhou, Feng Zhang, Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands, *Remote Sensing of Environment*, Volume 209, 2018, Pages 439-445, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.068>.
- S. K. McFEETERS (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714

- Joshi, Rakesh & Ryu, Dongryeol & Sheridan, Gary & Lane, Patrick. (2021). Modeling Vegetation Water Stress over the Forest from Space: Temperature Vegetation Water Stress Index (TVWSI). *Remote Sensing*. 13. 4635. 10.3390/rs13224635.
- Rahimzadeh-Bajgiran, P.; Omasa, K.; Shimizu, Y. Comparative evaluation of the vegetation dryness index (VDI), the temperature vegetation dryness index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2012, 68, 1–12.
- Vincini, M. & Frazzi, Ermes & D'Alessio, P.. (2008). A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*. 9. 303-319. 10.1007/s11119-008-9075-z.
- Y. J. Kaufman and D. Tanre, "Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 261-270, March 1992, doi: 10.1109/36.134076.
- N.J.J. Bréda, Leaf Area Index, Editor(s): Brian Fath, *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, Elsevier, 2008, Pages 457-462, ISBN 9780444641304, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63768-0.00849-0>.
- Breda, N (2003). "Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies". *Journal of Experimental Botany*. 54 (392): 2403–2417.
- Wang, J.; Wang, J.; Shi, Y.; Zhou, H.; Liao, L. A Recursive Update Model for Estimating High-Resolution LAI Based on the NARX Neural Network and MODIS Times Series. *Remote Sens.* 2019, 11, 219. <https://doi.org/10.3390/rs11030219>
- Gao, Zhiqiang & Gao, Wei & Chang, Ni-Bin. (2011). Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+images. *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 13. 495-503. 10.1016/j.jag.2010.10.005.
- Ryu S, Kwon Y-J, Kim G, Hong S. Temperature Vegetation Dryness Index-Based Soil Moisture Retrieval Algorithm Developed for Geo-KOMPSAT-2A. *Remote Sensing*. 2021; 13(15):2990. <https://doi.org/10.3390/rs13152990>
- Philippe M Teillet & Xiaomeng Ren (2008) Spectral band difference effects on vegetation indices derived from multiple satellite sensor data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34:3, 159-173, DOI: 10.5589/m08-025
- Anderson, J.H.; Weber, K.T.; Gokhale, B.; Chen, F. Intercalibration and Evaluation of ResourceSat-1 and Landsat-5 NDVI. *Can. J. Remote Sens.* 2011, 37, 213–219.
- Michael A. Wulder, Thomas R. Loveland, David P. Roy, Christopher J. Crawford, Jeffrey G. Masek, Curtis E. Woodcock, Richard G. Allen, Martha C. Anderson, Alan S. Belward, Warren B. Cohen, John Dwyer, Angela Erb, Feng Gao, Patrick Griffiths, Dennis Helder, Txomin Hermosilla, James D. Hipple, Patrick Hostert, M. Joseph Hughes, Justin Huntington, David M. Johnson, Robert Kennedy, Ayse Kilic,

- Zhan Li, Leo Lymburner, Joel McCorkel, Nima Pahlevan, Theodore A. Scambos, Crystal Schaaf, John R. Schott, Yongwei Sheng, James Storey, Eric Vermote, James Vogelmann, Joanne C. White, Randolph H. Wynne, Zhe Zhu, Current status of Landsat program, science, and applications, *Remote Sensing of Environment*, Volume 225, 2019, Pages 127-147, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>.
- Shunlin Liang, Jindi Wang, Chapter 4 - Atmospheric correction of optical imagery, *Advanced Remote Sensing (Second Edition)*, Academic Press, 2020, Pages 131-156, ISBN 9780128158265, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00004-0>
- Michael A. Wulder, Joanne C. White, Samuel N. Goward, Jeffrey G. Masek, James R. Irons, Martin Herold, Warren B. Cohen, Thomas R. Loveland, Curtis E. Woodcock, Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring, *Remote Sensing of Environment*, Volume 112, Issue 3, 2008, Pages 955-969, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.004>.
- D.P. Roy, M.A. Wulder, T.R. Loveland, Woodcock C.E., R.G. Allen, M.C. Anderson, D. Helder, J.R. Irons, D.M. Johnson, R. Kennedy, T.A. Scambos, C.B. Schaaf, J.R. Schott, Y. Sheng, E.F. Vermote, A.S. Belward, R. Bindenschadler, W.B. Cohen, F. Gao, J.D. Hipple, P. Hostert, J. Huntington, C.O. Justice, A. Kilic, V. Kovalskyy, Z.P. Lee, L. Lymburner, J.G. Masek, J. McCorkel, Y. Shuai, R. Trezza, J. Vogelmann, R.H. Wynne, Z. Zhu, Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research, *Remote Sensing of Environment*, Volume 145, 2014, Pages 154-172, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.
- J. Townshend, *Landsat Imagery in Geography*, Editor(s): Neil J. Smelser, Paul B. Baltes, *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Pergamon, 2001, Pages 8265-8270, ISBN 9780080430768, <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/02527-4>.
- Csillik, O., Kumar, P., & Asner, G. P. (2020). Challenges in Estimating Tropical Forest Canopy Height from Planet Dove Imagery. *Remote Sensing*, 12(7), 1160. doi:10.3390/rs12071160
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831.
- Jorge, J., Vallbé, M., & Soler, J. A. (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 169–177. doi:10.1080/22797254.2019.157245
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009
- Ray, A. S. (2016). Remote sensing in agriculture. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 1(3), 238540.

- Ren, H., Zhou, G., & Zhang, F. (2018). Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 209, 439–445. doi:10.1016/j.rse.2018.02.068
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36.
- Adolfo Lozano-Tello, Marcos Fernández-Sellers, Elia Quirós, Laura Fragoso-Campón, Abelardo García-Martín, José Antonio Gutiérrez Gallego, Carmen Mateos, Rubén Trenado & Pedro Muñoz (2021) Crop identification by massive processing of multiannual satellite imagery for EU common agriculture policy subsidy control, *European Journal of Remote Sensing*, 54:1, 1-12, DOI: 10.1080/22797254.2020.1858723
- C. Yang, J. H. Everitt, Q. Du, B. Luo and J. Chanussot, "Using High-Resolution Airborne and Satellite Imagery to Assess Crop Growth and Yield Variability for Precision Agriculture," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 582-592, March 2013, doi: 10.1109/JPROC.2012.2196249.
- Sha, Zongyao & Yu, Mei. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review. *Journal of Plant Ecology-uk - J PLANT ECOLO.* 1. 9-23. 10.1093/jpe/rtm005.
- Shen, Huanfeng & Li, Huifang & Qian, Yan & Zhang, Liangpei & Yuan, Qiangqiang. (2014). An effective thin cloud removal procedure for visible remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 96. 224–235. 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.011.
- Smirnov, A., Holben, B. N., Kaufman, Y. J., Dubovik, O., Eck, T. F., Slutsker, I., Pietras, C., & Halthore, R. N. (2002). Optical Properties of Atmospheric Aerosol in Maritime Environments, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3), 501-523. Retrieved May 13, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/59/3/1520-0469_2002_059_0501_opoaa_i_2.0.co_2.xml
- Thanh Tam Nguyen, Thanh Dat Hoang, Minh Tam Pham, Tuyet Trinh Vu, Thanh Hung Nguyen, Quyet-Thang Huynh, Jun Jo, Monitoring agriculture areas with satellite images and deep learning, *Applied Soft Computing*, Volume 95, 2020, 106565, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106565>.
- F. Zhang and N. Cao, "Application and Research Progress of Geographic Information System (GIS) in Agriculture," 2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820476.
- Φουντάς Σ. Γέμτος Θ. (2015). Γεωργία Ακριβείας, Εκδοσεις: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα

- Yang, Chenghai. (2018). High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 5. 10.15302/J-FASE-2018226.
- Clevers, J.P.G.W., 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, 25 (1), 53-69.
- Richardson, A.J. and Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetry of Engineering and Remote Sensing* 43, 1541–1552.
- Naji T.A: (2018): Study of vegetation cover distribution using DVI, PVI, WdVI indices with 2D-space plot. *Journal of Physics Conference Series*, 1003: 012083.
- Xue, Jinru; Su, Baofeng. 2017 Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. The Free Library (January, 1), [https://www.thefreelibrary.com/Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of...-a0543991007](https://www.thefreelibrary.com/Significant+Remote+Sensing+Vegetation+Indices:+A+Review+of...-a0543991007)
- A.M. Mouazen, Thomas Alexandridis, Henning Buddenbaum, Yafit Cohen, Dimitrios Moshou, David Mulla, Said Nawar, Kenneth A. Sudduth, Chapter 2 - Monitoring, Editor(s): Annamaria Castrignanò, Gabriele Buttafuoco, Raj Khosla, Abdul M. Mouazen, Dimitrios Moshou, Olivier Naud, *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming*, Academic Press, 2020, Pages 35-138, ISBN 9780128183731, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818373-1.00002-0>.
- Lu, Bing, Phuong D. Dao, Jianguo Liu, Yuhong He, and Jiali Shang. 2020. "Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture" *Remote Sensing* 12, no. 16: 2659. <https://doi.org/10.3390/rs12162659>
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E, Gao X, Ferreira L. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83: 195–213.
- Sadia Alam Shammi, Qingmin Meng, Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling, *Ecological Indicators*, Volume 121, 2021, 107124, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107124>.
- Kaur R, Mahey RK, Mukherjee J (2010) Optimum time span for distinguishing little canary grass (*Phalaris minor* L.) from wheat (*Triticum aestivum* L.) crop based on their spectral reflectance characteristics. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 80:616–620.
- Rajendra P. Sishodia , Ram L. Ray and Sudhir K. Singh. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review, *Remote sensing*, (2020), 12(19), 3136; <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

- Yousfi, S., Peira, J. F. M., De La Horra, G. R. , & Ablanque, P. V. M. (2019). Remote Sensing: Useful Approach for Crop Nitrogen Management and Sustainable Agriculture. In M. Hasanuzzaman, M. C. M. T. Filho, M. Fujita, & T. A. R. Nogueira (Eds.), *Sustainable Crop Production*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89422>
- Amani, Meisam & Parsian, Saeid & Mirmazloumi, S. Mohammad & Aieneh, Omid. (2016). Two new soil moisture indices based on the NIR-red triangle space of Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 50. 176-186. [10.1016/j.jag.2016.03.018](https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.018).
- Zare, M.; Drastig, K.; Zude-Sasse, M. Tree Water Status in Apple Orchards Measured by Means of Land Surface Temperature and Vegetation Index (LST–NDVI) Trapezoidal Space Derived from Landsat 8 Satellite Images. *Sustainability* 2020, 12, 70. <https://doi.org/10.3390/su12010070>
- Joshi, R.C.; Ryu, D.; Sheridan, G.J.; Lane, P.N.J. Modeling Vegetation Water Stress over the Forest from Space: Temperature Vegetation Water Stress Index (TVWSI). *Remote Sens.* 2021, 13, 4635. <https://doi.org/10.3390/rs13224635>
- Zhao, H., Li, Y., Chen, X. et al. Monitoring monthly soil moisture conditions in China with temperature vegetation dryness indexes based on an enhanced vegetation index and normalized difference vegetation index. *Theor Appl Climatol* 143, 159–176 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03422-x>
- Casamitjana M, Torres-Madroñero MC, Bernal-Riobo J, Varga D. Soil Moisture Analysis by Means of Multispectral Images According to Land Use and Spatial Resolution on Andosols in the Colombian Andes. *Applied Sciences*. 2020; 10(16):5540. <https://doi.org/10.3390/app10165540>
- Anderson, Martha & Norman, John & Mecikalski, John & Otkin, Jason & Kustas, William & Anderson, Citation & Norman, John & Mecikalski, J & Otkin, Jason & Kustas, William. (2007). A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *Journal of Geophysical Research*. 112. [10.1029/2006JD007506](https://doi.org/10.1029/2006JD007506).
- Bounoua, Lahouari & Imhoff, Marc & Franks, Shannon. (2010). Irrigation requirement estimation using vegetation indices and inverse biophysical modeling. 1823-1826. [10.1109/IGARSS.2010.5649325](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5649325).
- Glenn, E. P., Neale, C. M. U., Hunsaker, D. J., & Nagler, P. L. (2011). Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*, 25(26), 4050–4062. <https://doi.org/10.1002/HYP.8392>
- Santos C, Lorite II, Tasumi M, Allen RG, Fereres E. 2007. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrigation Science* 3: 277–288.

- Huete AR, Glenn EP. 2011. Remote sensing of ecosystem structure and function. In *Advances in Environmental Remote Sensing*, Weng Q (ed). CRC Press: Boca Raton, Florida; 291–320.
- Campos I, Neale CMU, Calera A. 2011. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.) *Agricultural Water Management* 98: 45–54
- Nikolaos Malamos & Demetris Koutsoyiannis (2018) Field survey and modelling of irrigation water quality indices in a Mediterranean island catchment: a comparison between spatial interpolation methods, *Hydrological Sciences Journal*, 63:10, 1447-1467, DOI: 10.1080/02626667.2018.1508874
- Célia Toureiro, Ricardo Serralheiro, Shakib Shahidian, Adélia Sousa, Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition, *Agricultural Water Management*, Volume 184, 2017, Pages 211-220, ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>.
- Habermeyer, J. and Gerhard, M. 2000. Pilzkrankheiten. BASF Landwirtschaft.
- Gröll, K., Graeff, S. & Claupein, W., (2007). Use of Vegetation indices to detect plant diseases. In: Böttinger, S., Theuvsen, L., Rank, S. & Morgenstern, M. (Hrsg.), *Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten – Referate der 27. GIL Jahrestagung*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V.. (S. 91-94).
- Laudien, R. & Bareth, G. & Doluschitz, Reiner. (2003). Analysis of hyperspectral field data for detection of sugar beet diseases. *EFITA 2003 Conference*. 375-381.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., and Dextraze, L. 2002. Integratuon of hyperspectral vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 81: 416-426.
- Hunsaker DJ, Pinter PJ, Barnes EM, Kimball BA. 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation Science* 22: 95–104.
- Mathyam, Prabhakar & Yen, Prasad & Rao, Mahesh. (2011). Remote Sensing of Biotic Stress in Crop Plants and Its Applications for Pest Management. 10.1007/978-94-007-2220-0_16.
- Jackson R.D. (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology* 24, 265–286, <https://doi.org/10.1146/annurev.py.24.090186.001405>
- Hunt Jr, E. R., & Daughtry, C. S. (2018). What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture. *International journal of remote sensing*, 39(15-16), 5345-5376.

- 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>
- Valinger, D., Benković, M., Jurina, T., Jurinjak-Tušek, A., Belščak-Cvitanović, A., Gajdoš-Kljusurić, J., & Bauman, I. (2017). Use of NIR spectroscopy and 3D principal component analysis for particle size control of dried medicinal plants. *Journal on processing and energy in agriculture*, 21(1), 17-22.
- Rouse JW, Hass RH, Schell JA, Deering DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351 1*: 309–317.
- Prem Chandra Pandey, Heiko Balzter, Prashant K. Srivastava, George P. Petropoulos, Bimal Bhattacharya, 21 - Future perspectives and challenges in hyperspectral remote sensing, In *Earth Observation, Hyperspectral Remote Sensing*, Elsevier, 2020, Pages 429-439, ISBN 9780081028940, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102894-0.00021-8>.
- Baluja, J., Diago, M. P., Goovaerts, P., & Tardaguila, J. (2012). Assessment of the spatial variability of anthocyanins in grapes using a fluorescence sensor: relationships with vine vigour and yield. *Precision Agriculture*, 13(4), 457–472. doi:10.1007/s11119-012-9261-x
- Lu, B., Dao, P., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. *Remote Sensing*, 12(16), 2659. doi:10.3390/rs12162659
- Y. Sun, Q. Qin, H. Ren, T. Zhang and S. Chen, "Red-Edge Band Vegetation Indices for Leaf Area Index Estimation From Sentinel-2/MSI Imagery," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 2, pp. 826-840, Feb. 2020, doi: 10.1109/TGRS.2019.2940826.
- Birth, G.S., and McVey, G. 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectroradiometer. *Agronomy Journal*, 60 640-643.
- Gamon, J. A., & Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *TheNew Phytologist*, 143(1), 105–117. doi:10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x.
https://www.researchgate.net/publication/225681715_A_broad_band_leaf_chlorophyll_vegetation_index_at_the_canopy_scale
- J.S. Schepers, T.M. Blackmer, W.W. Wilhelm, M. Resende, Transmittance and Reflectance Measurements of CornLeaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply, *Journal of Plant Physiology*, Volume 148, Issue 5, 1996, Pages 523-529, ISSN 0176-1617, [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80071-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80071-X).
- Anatoly A. Gitelson, Mark N. Merzlyak, Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll, *Journal of Plant Physiology*, Volume 148, Issues 3–4, 1996, Pages 494-500, ISSN 0176-1617, [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80284-7](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80284-7).

- Anatoly A. Gitelson, Mark N. Merzlyak, Hartmut K. Lichtenthaler, Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm, *Journal of Plant Physiology*, Volume 148, Issues 3–4, 1996, Pages 501-508, ISSN 0176-1617, [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80285-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80285-9).
- Anatoly A. Gitelson, Yoram J. Kaufman, Mark N. Merzlyak, Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, Volume 58, Issue 3, 1996, Pages 289-298, ISSN 0034-4257, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7).
- Maleki, M.; Arriga, N.; Barrios, J.M.; Wieneke, S.; Liu, Q.; Peñuelas, J.; Janssens, I.A.; Balzarolo, M. Estimation of Gross Primary Productivity (GPP) Phenology of a Short-Rotation Plantation Using Remotely Sensed Indices Derived from Sentinel-2 Images. *Remote Sens.* 2020, 12, 2104. <https://doi.org/10.3390/rs12132104>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. and Sorooshian, A., 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 48 (2) 119-126.
- Watson DJ. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. 1947, *Annals of Botany* 11, 41–76.
- Moran, J. V., S. E. Holmes, T. P. Naas, R. J. DeBerardinis, J. D. Boeke, and H. H. Kazazian. 1996. High frequency retrotransposition in cultured mammalian cells. *Cell* 87:917–927.
- Goward, S. N., and Hope, A. S. (1989), Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: preliminary FIFE results from AVHRR data, *Adv. Space Res.* 9(7):239-249.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2349-2391.
- Martin Claverie, Junchang Ju, Jeffrey G. Masek, Jennifer L. Dungan, Eric F. Vermote, Jean-Claude Roger, Sergii V. Skakun, Christopher Justice, The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set, *Remote Sensing of Environment*, Volume 219, 2018, Pages 145-161, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>.
- Diek S, Fornallaz F, Schaepman ME, De Jong R. Barest Pixel Composite for Agricultural Areas Using Landsat Time Series. *Remote Sensing*. 2017; 9(12):1245. <https://doi.org/10.3390/rs9121245>
- Piotr Fabijańczyk, Jarosław Zawadzki, Spatial correlations of NDVI and MSAVI2 indices of green and forested areas of urban agglomeration, case study Warsaw, Poland, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 26, 2022, 100721, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100721>.

Geopard.tech, Types Of Remote Sensing in Agriculture, Retrieved from Link:
<https://geopard.tech/blog/types-of-remote-sensing-in-agriculture/>
[access 31.05.2022]

Geopard.tech Which vegetation index is better to use in Precision Agriculture?,
Retrieved from Link: <https://geopard.tech/blog/kc9y2x96kv-which-vegetation-index-is-better-to-use/#>
[access 31.05.2022]

GISGeography, What is Remote Sensing? The Definitive Guide, Retrieved from
Link:<https://gisgeography.com/remote-sensing-earth-observation-guide/>, [access
31.05.2022]

GIS-Geography, REMOTE SENSING_Landsat Program: 50+ Years Archive of Earth,
Retrieved from Link: <https://gisgeography.com/landsat/>
[access 31.05.2022]

European Space Agency, Satellite Radar in Agriculture Experience with ERS-1 Link:
<https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Satellite-radar-in-agriculture-Experience-with-ERS-1.pdf/9d1c2563-946e-449f-672a-4c59084ba983>
[access 31.05.2022]

European Space Agency, How space data are transforming the global food system,
Retrieved from Link: <https://earth.esa.int/eogateway/news/how-space-data-are-transforming-the-global-food-system>
[access 31.05.2022]

European Space Agency, About Landsat-8, Retrieved from Link:
<https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-8>
[access 31.05.2022]

European Space Agency, Missions Sentinel-2, Retrieved from Link:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
[access 31.05.2022]

nasaharvest.org, NASA Agriculture Activities, Retrieved from Link:
<https://nasaharvest.org/nasa-agriculture-activities>
[access 31.05.2022]

landsat.gsfc.nasa.gov Landsat Science, AGRICULTURE_Landsat's Critical Role in
Agriculture, Retrieved from Link:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/benefits/agriculture/>
[access 31.05.2022]

landsat.gsfc.nasa.gov Landsat Science, More About Landsat 8, Retrieved from Link:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>
[access 31.05.2022]

Agriculture and Horticulture Development Board, Satellites for agriculture, Retrieved
from Link:

https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/SatellitesForAgriculture1825_181217_WEB.pdf
[access 31.05.2022]

usgs.gov, Landsat Overview, Retrieved from Link: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>
[access 31.05.2022]

usgs.gov, Landsat Overview, Retrieved from Link: https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html
[access 31.05.2022]

Satellite Imaging Corporation, Sentinel-2A (10m) Satellite Sensor , Retrieved from Link: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/>
[access 31.05.2022]

Geospatial Intelligence Pty Ltd., Product Description_Sentinel-2A/2B, Retrieved from Link: <https://geoint.com.au/productservice/satellite-imagery/sentinel-2a-2b/>
[access 31.05.2022]

eos.com, Sentinel-2, Retrieved from Link: <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>
[access 31.05.2022]

eos.com, Agriculture_MSAVI: Monitor Crops At Earliest Growth Stages Retrieved from Link: <https://eos.com/industries/agriculture/msavi/>
[access 31.05.2022]

eos.com, Agriculture_ Crop Diseases: Types, Control, And Prevention, 06.12.2021 Retrieved from Link: <https://eos.com/blog/crop-diseases/>
[access 31.05.2022]

NASA Earth Science Data Systems, ESDS Program_Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Retrieved from Link: <https://earthdata.nasa.gov/esds/harmonized-landsat-sentinel-2>
[access 31.05.2022]

Planet Labs PBC., PLANET IMAGERY PRODUCT SPECIFICATIONS_Combined Imagery Product Spec FINAL May 2022, Retrieved from Link: https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf /
[access 31.05.2022]

European Space Agency, PlanetScope Mission_PlanetScope Overview, Retrieved from Link: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope/description>
[access 31.05.2022]

nasa.gov, Space Station Research_Largest Flock of Earth-Imaging Satellites Launch into Orbit From Space Station, Retrieved from Link: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/flock_1

[access 31.05.2022]

earthdata.nasa.gov, What is Remote Sensing?, Retrieved from Link: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#sensors>
[access 31.05.2022]

EOS Data Analytics inc.,LANDVIEWER_Satellite Data: What Spatial Resolution Is Enough?, Retrieved from Link: <https://eos.com/blog/satellite-data-what-spatial-resolution-is-enough-for-you/>
[access 31.05.2022]

FarmTogether, Inc., Trends In AgTech_The Power of Satellite Imagery In Agriculture & Farming, Retrieved from Link: <https://farmtogether.com/learn/blog/the-power-of-satellite-imagery-in-agriculture>
[access 31.05.2022]

UP42 GmbH, TECH_Red Edge Detects Vegetative Stress Earlier in Plant Growth Cycle, John Ohlinger, Nov 17, 2021, Retrieved from Link: <https://up42.com/blog/tech/red-edge-detects-vegetative-stress-earlier-in-plant-growth-cycle>
[access 31.05.2022]

hiphen-plant.com, Crop science, Research and development_Vegetation Indices Basics (SR – NDVI – PRI), Retrieved from Link: <https://www.hiphen-plant.com/vegetation-index/3582/>
[access 31.05.2022]

EOS Data Analytics inc, AGRICULTURE_NDVI FAQ: All You Need To Know About Index, 30.08.2019, Retrieved from Link: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>
[access 31.05.2022]

pro.arcgis.com, Indices gallery, Retrieved from Link: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
[access 31.05.2022]

pro.arcgis.com, NDVI function, Overview, Retrieved from Link: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>
[access 31.05.2022]

pro.arcgis.com, PVI_function,, Retrieved from Link: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/arcpy/spatial-analyst/pvi.htm>
[access 31.05.2022]

AGRICULTURE, Vegetation Indices To Drive Digital Agri Solutions, 10.01.2022, Retrieved from Link: <https://eos.com/blog/vegetation-indices/#to-power-digital-agri-solutions>
[access 31.05.2022]

EOS Data Analytics inc, Make an Analysis_Normalized Difference Water Index,
Retrieved from Link: <https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/>
[access 31.05.2022]

EOS Data Analytics inc, Make an Analysis_ Index Stack (NDVI, NDWI, NDSI),
Retrieved from Link: <https://eos.com/make-an-analysis/index-stack/>
[access 31.05.2022]

EOS Data Analytics inc, Make an Analysis_NDMI (Normalized Difference Moisture
Index),
Retrieved from Link: <https://eos.com/make-an-analysis/ndmi/>
[access 31.05.2022]

pro.arcgis.com, Functions_NDMI, Retrieved from Link: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/arcpy/spatial-analyst/ndmi.htm>
[access 31.05.2022]

Auravant.com, Vegetation indices and their interpretation: NDVI, GNDVI, MSAVI2,
NDRE, and NDWI, Retrieved from Link:
<https://www.auravant.com/en/blog/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>
[access 31.05.2022]

pro.arcgis.com, Functions_ NDVIre, Retrieved from Link:
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/arcpy/image-analyst/ndvire.htm>
[access 31.05.2022]

Εικόνες

Εικόνα. 1_ <https://www.soilmetrix.com/>

Εικόνα. 2_ <https://physicsgg.files.wordpress.com/2012/02/electromagnetic-spectrum.jpg>

Εικόνα. 3_ [View of Εφαρμογές της υπέρυθρης φωτογραφίας στη Φυσική \(ekt.gr\)](#)

Εικόνα. 4_ [NDVI FAQs: Top 23 Frequently Asked Questions About NDVI \(eos.com\)](#)

Εικόνα. 5_ <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>

Εικόνα. 6_ <https://www.pix4d.com/blog/pix4dmapper-optimizing-the-ROI-of-fungicides-with-NDVI>

Εικόνα. 7_ <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.02.001>

Εικόνα. 8_ <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:EVI.png>

Εικόνα. 9_ <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4635>

Εικόνα. 10_ <https://www.researchgate.net/publication/233852746>

Εικόνα. 11_ <https://blog.csdn.net/x5675602/article/details/90067251>

Εικόνα. 12_ <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4635/htm>