



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ - ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
και ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Τεχνικές Τηλεπισκόπησης
για την ανάδειξη της δυναμικής και
των χαρακτηριστικών της Μεσογειακής βλάστησης

Διδακτορική Διατριβή

Ανδρώνης Βασίλειος

Αγρονόμος - Τοπογράφος Μηχανικός

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ
Ε.Μ.Π.

Επιβλέπουσα:

Καραθανάση Β., Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2022

National Technical University of Athens
School of Rural, Surveying & Geoinformatics Engineering
Remote Sensing Laboratory

Remote Sensing Techniques
for highlighting the dynamics and characteristics
of the Mediterranean vegetation

Doctoral Thesis

Andronis Vassilios

Rural and Survey Engineer NTUA

Supervisor

Karathanassi V., Professor of NTUA

Athens, December 2022

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καραθανάση Βασιλεία, Καθηγήτρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (επιβλέπουσα)

Αργιαλάς Δημήτριος, Ομότιμος Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καράντζαλος Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αργιαλάς Δημήτριος

Ομότιμος Καθηγητής

Σχολή Αγρονόμων – Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Βακαλοπούλου Μαρία

Assistant Professor

CentraleSupélec, Biomathematics

University of Paris-Saclay

Γήτας Ιωάννης

Καθηγητής

Σχολή Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος

Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσ/νίκης

Καραθανάση Βασιλεία

Καθηγήτρια

Σχολή Αγρονόμων – Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καράντζαλος Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής Καθηγητής

Σχολή Αγρονόμων – Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Πετρόπουλος Γεώργιος

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Γεωγραφίας

Χαροκόπειο Παν/μιο Αθηνών

Τρέβεζας Σάμης

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μαθηματικών

Εθνικό και Καποδιστριακό Παν/μιο Αθηνών

Copyright © Βασίλειος Ανδρώνης, 2022. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Αγρονόμων - Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή στις γνώμες του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).`

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που άμεσα ή έμμεσα καθόρισαν την πορεία μου, με υπέμειναν, μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν:

στους εκλιπόντες αγαπημένους που βιάστηκαν να φύγουν

και στον αείμνηστο Δάσκαλο Δημήτρη Ρόκο,

στην Επιβλέπουσα Καθηγήτρια κ. Καραθανάση Βασιλεία

για την εμπιστοσύνη, την υπομονή και την πολύτιμη καθοδήγηση της που συνόδευε κάθε στάδιο της έρευνας αυτής. Η βοήθειά της, συνεχίζει να είναι ανεκτίμητη...

στον Καθηγητή κ. Αργιαλά Δημήτρη, ομότιμο πλέον, και στον Αν. Καθηγητή κ. Καράντζαλο Κωνσταντίνο, μέλη της Συμβουλευτικής και Εξεταστικής Επιτροπής μου, για την εμπιστοσύνη τους και τη συνεχή στήριξη και πολυεπίπεδη βοήθεια που συνεχίζουν να μου προσφέρουν,

στον Καθηγητή κ. Γήτα Ιωάννη,

στην Επ. Καθηγήτρια κ. Βακαλοπούλου Μαρία,

στον Επ. Καθηγητή κ. Πετρόπουλο Γεώργιο και

στον Επ. Καθηγητή κ. Τρέβεζα Σάμη

για τις σημειώσεις, παρατηρήσεις, το χρόνο τους και την τιμή που μου έκαναν, ως μέλη της Εξεταστικής μου Επιτροπής,

στον Καθηγητή κ. Φουσκάκη Δημήτρη, για όσα με έμαθε στη Στατιστική,

στους Δασκάλους μου στη ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ, για όσα με έμαθαν όλα αυτά τα χρόνια και στους Συναδέλφους Μηχανικούς για την αμέριστη συμπαραστάση και την κατανόησή τους,

στους αδελφικούς φίλους μου Πολ Κολοκούση και Χρήστο Ιωσηφίδη, για την πορεία ζωής που χαράξαμε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης,

σε όλα ανεξαιρέτως τα μέλη του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης, παλαιά και νέα, για τη συμπαραστάση, τις συζητήσεις και την ενθάρρυνσή τους, ιδιαίτερα τον Κλεάνθη Καραμβάση για τις όμορφες συζητήσεις μας,

στους φοιτητές μας, για όσα με δίδαξαν με το παράδειγμά τους,

στους φίλους μου και όλους όσους με βοηθούν όλα τα χρόνια, γνωστούς και αγνώστους,

και περισσότερο, στην οικογένειά μου και τον επίγειο φύλακα άγγελό μας, την αγαπημένη Μίλλυ και τις αγαπημένες Νάντια και Δήμητρα. Χωρίς αυτές, το παρόν πόνημα δεν θα είχε το παραμικρό νόημα.

αφιερώνεται σε αυτούς που έφυγαν ...

Περίληψη

Η διατριβή διαπραγματεύεται την ανάδειξη των χαρακτηριστικών και της δυναμικής της Μεσογειακής βλάστησης με χρήση μεθόδων και τεχνικών Τηλεπισκόπησης. Τα χαρακτηριστικά της βλάστησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τις χρωστικές ουσίες και τις βιοφυσικές ιδιότητες της βλάστησης. Οι παράμετροι αυτοί δεν είναι εύκολο να καταγραφούν με πολύ υψηλή ακρίβεια ακόμη και από τους πλέον σύγχρονους δορυφορικούς τηλεπισκοπικούς δέκτες, επειδή αυτοί έχουν περιορισμούς ως προς τη χωρική και φασματική διακριτική ικανότητα. Η χρήση αερομεταφερόμενων υπερφασματικών δεκτών αποτελεί μια πηγή δεδομένων υψηλής ανάλυσης με καλή ισορροπία ως προς τις παραπάνω διακριτικές ικανότητες. Όμως οι υπερφασματικοί δέκτες παρουσιάζουν σφάλματα και θόρυβο, τα οποία γίνονται περισσότερο αισθητά στις απεικονίσεις με πολύ υψηλές χωρικές και φασματικές διακριτικές ικανότητες όπως αυτές που έχουν ληφθεί από αερομεταφερόμενα μέσα, με συνέπεια τη ραδιομετρική υποβάθμιση της ποιότητας των απεικονίσεων και σχετικό αντίκτυπο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων επεξεργασίας και ανάλυσης της υπερφασματικής απεικόνισης. Η ραδιομετρική διόρθωση των υπερφασματικών απεικονίσεων και η επεξεργασία τους για α) την ανίχνευση των χρωστικών μέσω συγκεκριμένων καναλιών καθώς και μέσω δεικτών βλάστησης και β) την αναγνώριση των διαφορετικών ειδών δασικής βλάστησης, ως μέτρο της βιοποικιλότητας, μέσω του φασματικού διαχωρισμού, είναι πεδία έρευνας που απασχολούν έντονα την επιστημονική κοινότητα.

Από την άλλη μεριά, η δυναμική της βλάστησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με παράγοντες όπως το κλίμα, το αβιοτικό περιβάλλον και οι βιοτικές αλληλεπιδράσεις. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες συσχετίζονται και επηρεάζουν τη συνύπαρξη και την παραγωγικότητα των ειδών είναι ένα σημαντικό αντικείμενο της σύγχρονης έρευνας, ιδιαίτερα σήμερα που αρχίζουν να γίνονται φανερές οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η ατμόσφαιρα, το έδαφος, το νερό και η βλάστηση αποτελούν βασικούς, δυναμικούς αβιοτικούς και βιοτικούς παράγοντες που πλέον με τους σύγχρονους δορυφορικούς τηλεπισκοπικούς δέκτες μπορεί να καταγραφεί η εξέλιξή τους στο χρόνο.

Σκοπός της διατριβής είναι να αναδείξει τη μεσογειακή βλάστηση, τα χαρακτηριστικά και τη δυναμική της, μέσα από σύγχρονες τεχνικές Τηλεπισκόπησης, όπως είναι :

- η ανίχνευση, ο ποσοτικός προσδιορισμός και η αποκατάσταση του φαινομένου της φασματικής καμπυλότητας (φασματικό χαμόγελο), ενός διαδεδομένου τύπου ραδιομετρικού σφάλματος των τηλεπισκοπικών δεκτών,
- η δημιουργία βιβλιοθήκης φασματικών υπογραφών με μετρήσεις πεδίου για τα πιο συνηθισμένα είδη μεσογειακής δασικής βλάστησης, η οποία είναι συμβατή με όλες τις γνωστές βιβλιοθήκες φασματικών υπογραφών υλικών, καθώς και η δημιουργία μιας λειτουργικής γραφικής διεπαφής που διευκολύνει την χρήση της,
- η αξιοποίηση κατάλληλων δεικτών βλάστησης και δεικτών χρωστικών (χλωροφύλλη, ξανθοφύλλη, καρροτενοειδή, ανθοκυανίνες και άλλες πλούσιες σε άζωτο ενώσεις) από φασματικές περιοχές (κανάλια) οι οποίες αποκαλύπτουν χαρακτηριστικές βιοφυσικές ιδιότητες μέσω διαφοροποιήσεων στην ανακλαστικότητα των διαφόρων ειδών βλάστησης,
- η υλοποίηση του φασματικού διαχωρισμού, μέσω τεχνικών μείωσης της διάστασης των υπερφασματικών δεδομένων, αξιοποιώντας τις πληροφορίες των φασματικών περιοχών απορρόφησης της βλάστησης και διερευνώντας τις επιπτώσεις της επιλογής καναλιών στην εξαγωγή καθαρών στόχων,

- η εκτίμηση της αφθονίας των υλικών -του τελευταίου βήματος του γραμμικού φασματικού διαχωρισμού- με Μπεϋζιανή συμπερασματολογία και η ποινικοποίησή τους, για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας και να παραχθούν χάρτες μέτρησης της βιοπικικότητας,
- η ανάλυση της εξέλιξης των χρονοτιμών, της μεταβλητότητας και των αυτοπαλίνδρομων της θερμοκρασίας εδάφους (LST) και του δείκτη βλάστησης (NDVI) ώστε να μελετηθεί ο τρόπος που επηρεάζεται η βλάστηση από την κλιματική αλλαγή και να ανιχνευθούν πιθανές διαταραχές (π.χ. φαινολογικές μεταβολές) λόγω εμφάνισης μεταβολών στις συνιστώσες της αποσύνθεσής τους, οι οποίες μπορούν να ερμηνευθούν από επιδράσεις βιοτικών με αβιοτικούς παράγοντες, στα είδη της μεσογειακής βλάστησης.

Abstract

This thesis intends to highlight the characteristics and dynamics of the Mediterranean vegetation using Remote Sensing methods and techniques. Vegetation characteristics are inextricably linked to the pigments and biochemical properties of the vegetation. These parameters cannot be precisely captured even by the most modern satellite remote sensing instruments, as these have certain limitations in terms of spatial and spectral resolution. Hyperspectral sensors mounted on aircraft or other monitoring platforms is a source of high-resolution data with a good balance of the above discriminative capabilities. Remote Sensing instruments present errors and noise which are more noticeable for images with very high spatial and spectral resolution such as those of airborne hyperspectral sensors, with a consequent degradation of the quality of the images and a relative impact on the accuracy of the image processing and the analysis results. Vegetation dynamics are inextricably linked to factors such as climate, abiotic environment and biotic interactions. Understanding how these factors interrelate and influence species coexistence and productivity is an important subject of contemporary research. Atmosphere, soil, water and vegetation are key, dynamic abiotic and biotic factors whose evolution over time can now be recorded with modern satellite remote sensing instruments.

The purpose of this thesis is to portray the Mediterranean vegetation, its characteristics and dynamics, through state-of-the-art Remote Sensing techniques, such as:

- the detection, quantification and restoration of the spectral curvature effect (spectral smile), a common type of radiometric distortion encountered in remote sensing data;
- the creation of a field-measured spectral library for the most common types of Mediterranean forest vegetation, that is compatible with all known spectral libraries of materials, as well as its integration in a graphical interface that facilitates its use.
- the use of appropriate vegetation indicators and pigment indicators (chlorophyll, xanthophyll, carotenoids, anthocyanins and other nitrogen-rich compounds) from spectral regions (channels) which reveal characteristic biophysical properties through the reflectance variations of the various vegetation species,
- the implementation of spectral unmixing, through techniques for reducing the dimension of hyperspectral data, exploiting the information of the spectral absorption zones of the vegetation and investigating the effects of band selection on endmember extraction.
- the estimation of the abundance of materials (the last step of the linear spectral unmixing) with Bayesian inference and their penalization, for dealing with multicollinearity and producing biodiversity measurement maps
- the analysis of time values evolution, variability and autoregressions of Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), in order to study how vegetation is affected by climate change and to identify potential disturbances (e.g. phenological changes) due to the occurrence of changes in their decomposition components, which can be interpreted by the effects of biotic and abiotic factors, in the species of Mediterranean vegetation.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 1 -
1.1	ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	- 2 -
1.2	ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΚΑΙ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ	- 5 -
1.3	ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	- 7 -
1.4	ΣΗΜΕΙΑ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	- 8 -
1.5	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	- 8 -
1.6	Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΜΟΥ ΕΠΙ ΤΩΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ	- 9 -
1.7	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	- 10 -
2	ΑΡΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΧΩΡΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΣΩ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΠΑΝΑΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ, ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ (ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΧΑΜΟΓΕΛΟ), ΣΕ ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ PUSHBROOM.	- 13 -
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 13 -
2.2	Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΗΨΗ ΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΧΑΜΟΓΕΛΟΥ	- 17 -
2.3	Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΧΑΜΟΓΕΛΟΥ	- 23 -
2.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	- 27 -
2.4.1	<i>Δεδομένα</i>	- 27 -
2.4.2	<i>Εφαρμογή και αποτελέσματα</i>	- 28 -
2.5	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	- 30 -
2.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 35 -
2.7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 35 -
3	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.....	- 38 -
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 38 -
3.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΥΠΟΓΡΑΦΩΝ	- 39 -
3.3	ΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΠΑΦΗ ΧΡΗΣΤΗ	- 46 -
3.4	ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ	- 49 -
3.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 50 -
4	ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ.....	- 51 -
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 51 -
4.2	Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	- 51 -
4.2.1	<i>Φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης</i>	- 53 -
4.2.2	<i>Χλωροφύλλη και άλλες χρωστικές</i>	- 58 -
4.3	ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	- 59 -
4.4	ΔΕΙΚΤΕΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ ΚΑΙ ΧΡΩΣΤΙΚΩΝ.....	- 61 -
4.5	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΡΟΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ	- 63 -
4.5.1	<i>Ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων</i>	- 63 -
4.6	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	- 69 -
4.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 70 -
4.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 71 -
5	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΓΙΑ ΔΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. .	- 74 -
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 74 -
5.2	Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.....	- 76 -
5.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	- 79 -
5.3.1	<i>Περιοχή μελέτης και δεδομένα</i>	- 79 -
5.3.2	<i>Υλοποίηση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων</i>	- 81 -
5.4	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 84 -
5.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 85 -

6	ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΝ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΠΕΥΪΖΙΑΝΗΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΠΟΡΑΔΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	- 88 -
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 88 -
6.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	- 90 -
6.2.1	Ποινικοποίηση <i>Elastic Net</i>	- 90 -
6.2.2	Περιγραφή του Μπεϋζιανού μοντέλου.....	- 92 -
6.2.2.1	Συνάρτηση πιθανοφάνειας του μοντέλου (Likelihood Function)	- 93 -
6.2.2.2	Πρότερη γνώση (συναρτήσεις priors) και ύστερη κατανομή (posterior).....	- 94 -
6.2.2.3	Δειγματολήπτης Gibbs	- 97 -
6.2.3	Ο δείκτης ποικιλομορφίας του <i>Shannon</i>	- 99 -
6.3	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ENLOST (ELASTIC NET LOCAL SIMULTANEOUSLY TUNING). ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	- 100 -
6.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	- 102 -
6.4.1	Περιοχή Μελέτης και Δεδομένα	- 102 -
6.4.2	Αποτελέσματα.....	- 104 -
6.4.2.1	Εφαρμογή Μπεϋζιανής συμπερασματολογίας.....	- 104 -
6.4.2.2	Ποινικοποίηση μεταβλητών.....	- 108 -
6.4.3	Αξιολόγηση.....	- 111 -
6.4.4	Συμπεράσματα	- 113 -
6.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 113 -
7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.....	- 116 -
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 116 -
7.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ LANDSAT ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟ ΔΑΣΟΣ ΠΑΦΟΥ, ΚΥΠΡΟΣ	- 119 -
7.2.1	Περιοχή μελέτης και δεδομένα.....	- 119 -
7.2.1.1	Περιοχή μελέτης.....	- 119 -
7.2.1.2	Δεδομένα	- 122 -
7.2.2	Μεθοδολογία.....	- 122 -
7.2.2.1	Αφαίρεση σύννεφων από τις δορυφορικές εικόνες	- 126 -
7.2.2.2	Δημιουργία χρονοσειρών και συμπλήρωση ελλειπών τιμών	- 126 -
7.2.2.3	Ανάλυση	- 126 -
7.2.2.4	Υπολογιστικές Απαιτήσεις και Περιορισμοί.....	- 141 -
7.2.3	Συζήτηση και συμπεράσματα	- 142 -
7.3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 144 -
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ – ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	- 149 -
8.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	- 149 -
8.2	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	- 152 -
8.3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 154 -

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1-1: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ (Α) ΤΟΥ ΚΥΒΟΥ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ ΕΝΑ ΤΥΧΑΙΟ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ (Β) ΤΟΥ ΚΥΒΟΥ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΧΕΔΟΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ ΕΝΑ ΤΥΧΑΙΟ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ. ΠΗΓΗ: EDMUNDORTICS.EU.....	- 4 -
ΕΙΚΟΝΑ 1-2: ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΑ ΒΕΛΗ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ ΜΕ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗ. ΕΚΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ ΛΕΚΑΝΗ (ΠΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΚΟΚΚΙΝΗ ΕΛΛΕΙΨΗ) ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΗΝ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΗ ΗΠΕΙΡΟ, ΜΙΑ ΣΤΗΝ ΑΦΡΙΚΑΝΙΚΗ ΗΠΕΙΡΟ, ΜΙΑ (ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΒΕΛΟΣ) ΣΤΗΝ ΩΚΕΑΝΙΑ (ΣΤΗΝ ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ).....	- 6 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΑΡΩΤΗ CASI-550 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ. ΠΗΓΗ: INSTRUMENT MANUAL ITRES CASI-550.....	- 18 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-2 : (Α) ΤΟ ΙΔΑΝΙΚΟ ΦΑΣΜΑ ΠΟΥ ΘΑ ΕΠΡΕΠΕ ΝΑ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΕΝΑ ΣΑΡΩΤΗ ΚΑΙ (Β) ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΧΑΜΟΓΕΛΟ, KEYSTONE ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ PSF.....	- 19 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-3: (Α) Η ΙΔΙΟΕΙΚΟΝΑ MNF-1 ΚΑΙ (Β) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ D-VALUES.....	- 20 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ (Α) ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΥΣ ΛΗΨΗΣ ΤΗΣ ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ, (Β) ΛΟΓΩ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	- 21 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ CASI-550 ΑΠΟ ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ. ΤΑ ΒΕΛΗ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΗΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΠΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ.....	- 22 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-6: ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΧΑΜΟΓΕΛΟΥ : Α) ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (F) ΚΑΙ Β) ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (C).....	- 22 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-7: Ο ΔΕΙΚΤΗΣ D-VALUES Α) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ F ΚΑΙ Β) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ C.....	- 23 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-8: ΠΛΗΡΕΣ ΠΛΑΤΟΣ ΣΤΟ ΜΙΣΟ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ.....	- 24 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-9: Ο ΔΕΙΚΤΗΣ D-VALUES ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ O ₂ -A, ΤΩΝ 760 NM.....	- 24 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-10: ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ MSC, Α) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ F, Η ΟΠΟΙΑ ΕΠΗΡΕΑΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΧΑΜΟΓΕΛΟ, ΚΑΙ Β) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ C, Η ΟΠΟΙΑ ΕΠΗΡΕΑΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΧΑΜΟΓΕΛΟ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.....	- 24 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΧΑΜΟΓΕΛΟΥ, ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΑΣΗΣ TL.....	- 27 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-12: ΣΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ MNF-1 ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΕΝΤΟΝΑ ΟΙ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΧΑΜΟΓΕΛΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ.....	- 27 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-13: Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΙΜΩΝ D-VALUES Α) ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ (Α), (C), (Ε) ΚΑΙ Β) ΤΙΣ (Β), (D) ΚΑΙ (F). ΌΠΩΣ ΗΤΑΝ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΟ, Η ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D-VALUES ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΠΤΗΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΠΡΟΦΑΝΗΣ. ΟΙ ΕΙΚΟΝΕΣ (Α) ΚΑΙ (C) ΠΟΥ ΕΛΗΦΘΗΣΑΝ ΜΕ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΠΤΗΣΗΣ ΝΟΤΟ - ΒΟΡΡΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΠΑΡΟΜΟΙΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (Ε), Η ΟΠΟΙΑ ΛΗΦΘΗΚΕ ΜΕ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΠΤΗΣΗΣ ΔΥΣΗ - ΑΝΑΤΟΛΗ. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΣΟ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΧΑΜΟΓΕΛΟΥ ΟΣΟ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ (ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ) ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΣΕ ΑΥΤΟΝ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ. ΑΝΤΙΘΕΤΑ, ΛΙΓΟΤΕΡΕΣ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ (Β), (D), ΚΑΙ (F).....	- 28 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-14: ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ MSC (MINIMUM SCALE COLUMN).....	- 29 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-15: Α) ΟΙ ΑΡΧΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΚΑΙ Β) ΟΙ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΧΑΜΟΓΕΛΟ. ΤΑ ΜΑΥΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΤΟ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΟΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.-	30 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-16: ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (Α) (ΚΑΝΑΛΙ 763.70 NM) ΠΡΙΝ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΜΕΤΑ (ΔΕΞΙΑ) ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ.....	- 31 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-17: ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (C) (ΚΑΝΑΛΙ 763.70 NM) ΠΡΙΝ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΜΕΤΑ (ΔΕΞΙΑ) ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ.....	- 31 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-18: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ Α) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (Α) ΚΑΙ Β) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (C).....	- 32 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-19: Ο ΔΕΙΚΤΗΣ D-VALUES ΓΙΑ Α) ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (Α) ΚΑΙ ΜΕΡΟΣ ΑΥΤΗΣ ΚΑΙ Β) ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ (C) ΚΑΙ ΜΕΡΟΣ ΑΥΤΗΣ.....	- 32 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-20: ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΙΔΙΟΕΙΚΟΝΑ (MNF-1) ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ (Α) AND (C).....	- 33 -
ΕΙΚΟΝΑ 2-21: Ο ΔΕΙΚΤΗΣ D-VALUES ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ. ΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ (A-F) ΠΑΡΑΠΕΜΠΟΥΝ ΣΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ.-	33 -
-	-
ΕΙΚΟΝΑ 2-22: Α) ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ, ΠΟΥ ΠΡΟΕΡΧΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΙΚΟΝΕΣ (C), (D) ΚΑΙ (Ε) ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΙ Β) ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΤΩΝ ΙΔΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ, ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΙΚΟΝΕΣ (C), (D) ΚΑΙ (Ε) ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ.....	- 34 -
ΕΙΚΟΝΑ 3-1: (Α) ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΤΟ ΦΥΛΛΩΜΑ, (Β) ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΦΥΛΛΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΔΕΝΔΡΟ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ.....	- 41 -
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΤΑ ΦΑΣΜΑΤΟΡΑΔΙΟΜΕΤΡΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ: (Α) GER-1500, (Β) HR-1024I.....	- 42 -

- ΕΙΚΟΝΑ 3-3: (Α) ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΠΡΙΝ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ, ΕΠΙ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΛΑΜΠΕΡΤΙΑΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΟΥ GER-1500, (Β) ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΟΧΟΥ (ΠΡΑΣΙΝΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΟΞΙΑΣ), (Γ) ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΟΞΙΑΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟΧΟΥ / ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ΠΗΓΗ: “ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ - ΜΙΑ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΓΙΑ ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ”, JOHN R. JENSEN, 2016 - 44 -
- ΕΙΚΟΝΑ 3-4: (Α) ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΚΑΚΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΦΤΕΡΗ, ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΠΡΟΚΥΨΕΙ ΩΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΟ GER-1500. ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ ΕΙΝΑΙ Η ΤΙΜΗ ΤΗΣ % ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (ΑΠΟ ΠΕΡΙΠΟΥ 280 ΕΩΣ 1000 ΝΜ). ΠΗΓΗ: Η ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΓΙΝΕ ΑΠΟ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΤΟΥ Ε.Μ.ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΤΟΥ Α.Π.Θ. ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΕ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ TELE-ΚΥΟΤΟ, «ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΣΗΣ ΤΩΝ ΗΝΩΜΕΝΩΝ ΕΘΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΤΟΥ ΚΥΟΤΟ»..... - 45 -
- ΕΙΚΟΝΑ 3-5: ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΠΕΥΚΟΕΙΔΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ : Α) ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ Η ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΕΙΑΣ ΠΕΥΚΗΣ (PINUS BRUTIA) ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΑΜΕ (ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ), Β) ΜΕ ΓΑΛΑΖΙΟ ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ Η ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΠΕΥΚΟΦΥΤΩΝ (PINORHYTA) ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΟΥ ASTER (ΑΠΟ ΎΨΟΣ 705 ΚΜ ΜΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ) ΚΑΙ Γ) ΜΕ ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ Η ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΥΚΟΥ ΡΙΝΥΟΝ (ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ) ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΗΣ USGS. ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ ΕΙΝΑΙ Η ΤΙΜΗ ΤΗΣ % ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (ΑΠΟ 400 ΕΩΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 1050 ΝΜ). - 46 -
- ΕΙΚΟΝΑ 3-6: ΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ. ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΕΔΙΑ ΑΝΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΟΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΜΕΤΡΗΣΗ. - 47 -
- ΕΙΚΟΝΑ 3-7: ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΑΤΟΜΟΥΡΙΑΣ (RUBUS). Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΙΝΑΙ ΚΑΤΕΥΘΕΙΑΝ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΦΥΛΛΑ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ, ΟΠΩΣ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ. - 48 -
- ΕΙΚΟΝΑ 3-8: ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΡΥΟΣ (QUERCUS FRAINETTO). Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΙΝΑΙ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΑΠΟΚΟΜΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΙΣΟ-ΜΑΡΑΜΕΝΑ ΦΥΛΛΑ ΤΟΥ ΔΕΝΔΡΟΥ, ΟΠΩΣ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ..... - 48 -
- ΕΙΚΟΝΑ 3-9: ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΡΥΟΣ (QUERCUS FRAINETTO). Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΙΝΑΙ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΑΠΟΚΟΜΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΣΙΝΑ ΦΥΛΛΑ ΤΟΥ ΔΕΝΔΡΟΥ, ΟΠΩΣ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ..... - 49 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-1: ΈΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ 321 (RGB) ΤΗΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ LANDSAT-8 ΤΗΣ 2/6/2013 (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΟΙ ΛΩΡΙΔΕΣ ΛΗΨΗΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΔΕΚΤΗ CASI-550 ΣΤΙΣ 25/7/2013 (ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ) ΚΑΙ ΟΡΙΟΘΕΤΗΜΕΝΟ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΤΟ ΔΑΣΟΣ ΤΟΥ ΤΑΞΙΑΡΧΗ ΣΕ ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΣΤΙΣ LANDSAT-8 ΚΑΙ CASI-550 (ΔΕΞΙΑ). - 52 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-2: ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ (ΗΜΑ). ΠΗΓΗ: IBARRA-CASTANEDO C., 2005..... - 54 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-3: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ, ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ (ΗΜΑ), ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ 0.4-2.6 ΜΜ. ΠΗΓΗ : [HTTP://WWW.HARRISGEOSPATIAL.COM](http://www.harrisgeospatial.com)..... - 55 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ ΤΗΣ ΜΑΓΝΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΓΑΝΘΟΥΣ (MAGNOLIA GRANDIFLORA). Όσο η ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΝΕΡΟ (ΥΓΡΑΣΙΑ) ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ, ΑΥΞΑΝΕΙ Η ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΩΝ 0.4 ΕΩΣ 2.5 ΜΜ. ΩΣΤΟΣΟ, Η ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΥΞΗΣΗ ΣΗΜΕΙΩΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΥΠΕΡΥΦΘΟΥ ΑΠΟ 1.3-2.5 ΜΜ. ΠΗΓΗ: [JENSEN R. J., 2015]. . - 56 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΡΕΙΣ ΤΥΠΟΥΣ ΦΥΛΛΩΝ ΜΕ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗ. Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ, Η ΠΛΑΤΙΑ ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΚΑΙ Η ΠΥΚΝΗ, ΛΕΠΤΗ ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΟΥΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ, ΘΑΜΝΟ ΚΑΙ ΔΕΝΤΡΟ, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ. Η ΜΑΥΡΗ ΚΑΙ Η ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΟΥΝ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗ, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ. ΠΗΓΗ [ΧΙΑΟJIN QIAN ET AL, DOI:10.1080/01431161.2019.1579940]. - 57 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ (ΗΜΑ) ΑΠΟ 0.4 ΕΩΣ 2.5 ΜΜ. ΠΗΓΗ: THENKAVAIL S. PRASAD ET AL, 2019. - 58 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-7: ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ ΣΤΟ ΗΜΑ ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ ΕΝΟΣ ΦΥΤΟΥ. ΠΗΓΗ LINCOLN TAIZ ET AL., 2014. - 59 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-8: ΨΕΥΔΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ RGB ΤΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ VNIR, RED ΚΑΙ GREEN ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ CASI-550, ΟΠΟΥ ΜΕ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Η ΒΛΑΣΤΗΣΗ (ΜΕ ΕΝΤΟΝΟ ΚΟΚΚΙΝΟ Η ΠΥΚΝΗ, ΥΓΙΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗ) ΕΝΩ ΤΑ ΕΔΑΦΗ, ΧΩΡΙΣ Η ΜΕ ΑΡΑΙΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΛΕΥΚΑ ΕΩΣ ΠΡΑΣΙΝΑ Η ΚΑΦΕ, ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΓΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ..... - 63 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-9: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ TCARI ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ TCARI / OSAVI..... - 64 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-10: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑ 4-9 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΗΣ GOOGLE EARTH (ΔΥΟ ΠΡΟΦΙΛΑ: ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΙ 3D). - 64 -
- ΕΙΚΟΝΑ 4-11: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDVI, ΣΤΟ (ΚΕΝΤΡΟ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ TRDVI ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ MSR. ΕΙΝΑΙ ΕΜΦΑΝΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ Η ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ TRDVI. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΕΜΦΑΝΗ ΣΗΜΑΔΙΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΟΡΙΟΘΕΤΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΚΙΤΡΙΝΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ..... - 65 -

ΕΙΚΟΝΑ 4-12: Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑ 4-11 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΗΣ GOOGLE EARTH (ΔΥΟ ΠΡΟΦΙΛ ΣΕ ΚΑΤΟΨΗ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ).	- 65 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-13: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ MCARI, ΣΤΟ (ΚΕΝΤΡΟ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ TCI-2 ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ TCARI. ΜΕ ΦΩΤΟΘΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΡΙΝΕΤΑΙ Ο ΔΕΙΚΤΗΣ TCI-2 ΩΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ, ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΥ ΟΡΙΟΘΕΤΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΚΙΤΡΙΝΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ.	- 66 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-14: ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ TRDVI ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ TCI-2. ΕΙΝΑΙ ΕΜΦΑΝΗΣ Η ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΕΥΑΣΘΗΣΙΑ ΠΟΥ ΚΑΤΑΔΕΙΚΝΥΕΙ Ο ΔΕΙΚΤΗΣ TCI-2 ΚΑΙ Η ΟΠΟΙΑ ΑΠΟΤΥΠΩΝΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΤΟΝΟΥ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ (ΒΛΕΠΕ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΑ 4-15).	- 66 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-16: ΣΜΙΚΡΥΝΣΗ, ΩΣΤΕ ΝΑ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΗ ΕΚΤΑΣΗ, ΤΗΣ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ. ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ TRDVI ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ TCI-2. Ο ΤΕΛΕΥΤΑΙΟΣ ΕΜΦΑΝΙΖΕΙ ΚΑΛΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ, ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗ, ΟΠΩΣ ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΤΙΣ ΚΙΤΡΙΝΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ.	- 67 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-17: (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΨΕΥΔΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ RGB ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΤΩΝ ΒΙΟΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ: MODIFIED “RED EDGE” NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (ΣΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ), NDVI (ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ), PHOTOCHEMICAL REFLECTANCE INDEX (ΣΤΟ ΜΠΛΕ). ΜΕ ΣΚΟΥΡΟ ΜΠΛΕ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΠΥΚΝΗ, ΜΗ ΓΕΡΑΣΜΕΝΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΜΕ ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΧΑΜΗΛΗ, ΠΟΩΔΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΕΧΟΥΜΕ ΠΛΗΡΗ ΑΠΟΥΣΙΑ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗΣ, ΕΠΟΜΕΝΩΣ ΚΑΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ. ΣΤΑ (ΔΕΞΙΑ) ΕΧΟΥΜΕ ΤΟ ΨΕΥΔΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ RGB ΤΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ NIR, RED ΚΑΙ GREEN ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ, ΟΠΟΥ Η ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΜΕ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΟΚΚΙΝΟΥ. ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΑΚΟΜΗ ΚΑΙ Η GOOGLE EARTH ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΟΠΟΥ ΜΕ ΤΑ ΒΕΛΗ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΥΚΝΗΣ ΚΑΙ ΠΟΩΔΟΥΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.	- 68 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-18: ΣΤΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΕΧΟΥΜΕ ΤΟ ΨΕΥΔΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ RGB ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ: MODIFIED “RED EDGE” NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (ΣΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ), NDVI (ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ), PHOTOCHEMICAL REFLECTANCE INDEX (ΣΤΟ ΜΠΛΕ). ΜΕ ΣΚΟΥΡΟ ΜΠΛΕ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΠΥΚΝΗ, ΜΗ ΓΗΡΑΣΜΕΝΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΜΕ ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΧΑΜΗΛΗ, ΠΟΩΔΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΕΧΟΥΜΕ ΠΛΗΡΗ ΑΠΟΥΣΙΑ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗΣ, ΕΠΟΜΕΝΩΣ ΚΑΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ. ΣΤΟ (ΚΕΝΤΡΟ) ΕΧΟΥΜΕ ΜΙΑ ΕΙΚΟΝΑ DENSITY SLICING ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ TCI-2, ΣΕ ΠΕΝΤΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ (ΤΟ ΣΚΟΥΡΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΕΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΥ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΟΥΝ ΕΝΤΟΝΑ, ΤΟ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΕΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΤΡΙΑΣ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗΣ, ΤΟ ΚΑΦΕΤΙ ΚΑΙ ΤΟ ΚΙΤΡΙΝΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΥΝ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΩΣ ΠΑΝΤΕΛΗ ΕΛΛΕΙΨΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ). ΣΤΑ (ΔΕΞΙΑ) ΕΧΟΥΜΕ ΤΟ ΨΕΥΔΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ RGB ΚΑΝΑΛΙΩΝ NIR, RED ΚΑΙ GREEN, ΟΠΟΥ Η ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΣΕ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΟΚΚΙΝΟΥ.	- 68 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-19: ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΜΕ ΓΚΡΙ Ο ΧΑΡΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΚΟΜΟΣΤΕΓΗΣ, ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ ΤΟΥ ΤΑΞΙΑΡΧΗ (ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΟ ΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ 321 (RGB) ΤΗΣ LANDSAT-8 ΤΗΣ 2/6/2013. ΣΤΑ (ΔΕΞΙΑ) ΕΧΕΙ ΓΙΝΕΙ ΕΠΙΘΕΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ CASI-550. ΜΕ ΚΙΤΡΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΟΡΙΟΘΕΤΕΙΤΑΙ Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΠΟΥ ΕΓΙΝΕ Η ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.	- 69 -
ΕΙΚΟΝΑ 4-20: ΣΤΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΕΧΟΥΜΕ ΜΙΑ ΕΙΚΟΝΑ DENSITY SLICING, ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ TCI-2, ΣΕ ΠΕΝΤΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ (ΤΟ ΣΚΟΥΡΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΕΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΥΚΝΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ, ΠΟΥ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΟΥΝ ΕΝΤΟΝΑ, ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΜΕΤΡΙΑΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ, ΤΟ ΚΑΦΕΤΙ ΚΑΙ ΤΟ ΚΙΤΡΙΝΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΥΝ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΩΣ ΠΑΝΤΕΛΗ ΕΛΛΕΙΨΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ) ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΕΙΚΟΝΑ DENSITY SLICING ΤΟΥ ΧΑΡΤΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΚΟΜΟΣΤΕΓΗΣ, (ΜΕ ΣΚΟΥΡΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΤΑ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΑ ΔΕΝΤΡΑ, ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΤΑ ΥΨΗΛΑ ΔΕΝΔΡΑ, ΜΕ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΨΗΛΑ, ΜΕ ΚΑΦΕ ΤΑ ΔΕΝΤΡΑ ΧΑΜΗΛΟΥ ΥΨΟΥΣ. ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΥ ΟΡΙΟΘΕΤΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΣΠΡΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΠΗΓΗ: [THALIS PROGRAM, 2012-2016].	- 70 -
ΕΙΚΟΝΑ 5-1: Α) ΈΓΧΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ 3,2,1(R,G,B) ΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ LANDSAT 7 ETM ΤΗΣ 27/07/2013 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟΥ ΔΑΣΟΥΣ ΤΟΥ ΤΑΞΙΑΡΧΗ (ΛΕΥΚΟ ΠΟΛΥΓΩΝΟ), ΚΑΙ Β) Η ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ 25/07/2013 ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ CASI-550	- 79 -
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΑΠΟ ΤΑ ΔΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ, ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑΣ. Η ΓΚΡΙΖΑ ΖΩΝΗ ΥΠΟΔΗΛΩΝΕΙ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ “RED-EDGE”	- 80 -
ΕΙΚΟΝΑ 5-3: ΟΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ (SCALED) ΩΣΤΕ ΝΑ ΤΑΙΡΙΑΖΟΥΝ ΤΟΥΣ ΚΑΘΑΡΟΥΣ ΣΤΟΧΟΥΣ, ΑΦΟΥ ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ ΤΟ ΣΥΝΕΧΕΣ (CONTINUUM) ΓΙΑ: Α) GRASS (ΓΡΑΣΙΔΙ), Β) QUERCUS FRAINETTO (ΠΛΑΤΥΦΥΛΛΗ ΒΕΛΑΝΙΔΙΑ) ΚΑΙ Γ) PINUS NIGRA (ΜΑΥΡΗ ΠΕΥΚΗ). Η ΠΙΟ ΣΚΟΥΡΑ ΓΡΑΜΜΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΕΝΩ Η ΑΝΟΙΧΤΟΧΡΩΜΗ, ΣΤΟΝ ΚΑΘΑΡΟ ΣΤΟΧΟ.	- 82 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-1: ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ 5x5 ΠΑΡΑΘΥΡΟ (ΜΕ ΚΙΤΡΙΝΟ ΧΡΩΜΑ, ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΔΕΞΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟ ΠΑΝΩ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ) ΕΠΙ ΤΗΣ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (ΜΕ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΧΡΩΜΑ). ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ 5*5*10=250 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΟΙ ΟΠΟΙΕΣ ΔΕΧΟΝΤΑΙ ΤΗΝ ELASTIC NET ΠΟΙΝΗ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΕΥΓΗ ΤΙΜΩΝ (Λ, ΒΕΤΑ) ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΟΥΝΤΑΙ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ MSE ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ, ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ‘10-FOLD CROSS VALIDATION’ ΧΩΡΙΖΟΜΕΝΑ ΣΕ 9 ΟΜΑΔΕΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ (TRAIN FOLDS) ΚΑΙ ΜΙΑ ΟΜΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (TEST FOLD).	- 101 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	- 102 -

ΕΙΚΟΝΑ 6-3 : (Α) ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ, ΣΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΤΕΤΡΑΠΛΕΥΡΟ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, (Β) ΦΩΤΟΜΩΣΑΪΚΟ ΤΩΝ ΛΗΦΘΕΝΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ CASI-550, ΕΓΧΡΩΜΟ ΣΥΝΘΕΤΟ 960NM, 714NM, 611NM (RGB), ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ) ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	- 103 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-4 : ΕΡΓΟΔΙΚΟΣ ΜΕΣΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ (Α) "ΑΒΙΕΣ" (ΕΛΑΤΗ) ΚΑΙ (Β) "ΑCΕR" (ΣΦΕΝΔΑΜΙ), ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ 20000 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ ΜΙΑΣ ΕΚ ΤΩΝ ΔΥΟ ΑΛΥΣΙΔΩΝ ΜCΜC, ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΒURN-IN ΠΕΡΙΟΔΟ ΠΕΡΙΠΟΥ ΣΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ 3800 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ	- 104 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-5 : TRACE PLOTS ΜΕΤΑ ΑΠΟ 20000 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ ΤΗΣ ΜΙΑΣ ΕΚ ΤΩΝ ΔΥΟ ΑΛΥΣΙΔΩΝ ΜCΜC, ΕΧΟΝΤΑΣ ΑΦΑΙΡΕΣΕΙ ΤΗΝ ΒURN-IN ΠΕΡΙΟΔΟ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ (Α) "ΑΒΙΕΣ" (ΕΛΑΤΗ) ΚΑΙ (Β) "ΑCΕR" (ΣΦΕΝΔΑΜΙ).	- 105 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-6: ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ GELMAN ΚΑΙ RUBIN ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΜCΜC ΑΛΥΣΙΔΕΣ, ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ: (Α) "ΑΒΙΕΣ, ΕΛΑΤΗ", (Β) "ΑCΕR, ΣΦΕΝΔΑΜΙ"	- 105 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-7: ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΤΩΝ ΔΕΚΑ ΚΑΘΑΡΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	- 106 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-8: ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΦΘΟΝΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΠΕΨΖΙΑΝΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΓΙΑ ΤΟ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ (#2465640) ΤΗΣ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ.	- 106 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-9: ΧΑΡΤΕΣ ΑΦΘΟΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΜΠΕΨΖΙΑΝΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ.....	- 107 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-10: (Α) ΓΡΑΦΗΜΑ ΓΙΑ ΝΑ ΦΑΝΕΙ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ ΤΙΜΩΝ (Λ,ΒΕΤΑ) ΓΙΑ ΤΟ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ ΜΕΣΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ (MSE). ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΚΙΝΟΥΝΤΑΙ ΠΙΟ ΜΑΚΡΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ MSE ΕΙΝΑΙ ΜΕ ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ, ΜΕΤΑ ΛΕΥΚΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΜΟΒ. Ο ΚΟΚΚΙΝΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΕΙ ΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΗΣ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ ΤΙΜΩΝ (Λ, ΒΕΤΑ). (Β) ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΗΣ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ (MSE) ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ LOG(Λ) –Ο ΕΠΑΝΩ ΑΞΟΝΑΣ Χ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΕΙ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΟΠΩΣ ΑΥΤΕΣ ΣΥΡΡΙΚΝΩΝΟΝΤΑΙ. (C) Η ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ Λ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ΠΟΙΝΗΣ ELASTIC NET.	- 109 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-11: ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΦΘΟΝΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ENLOST ΓΙΑ ΤΟ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ (#2465640) ΤΗΣ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ, ΟΠΟΥ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΝ ΜΟΝΟΝ ΟΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΙ ΚΑΘΑΡΟΙ ΣΤΟΧΟΙ.	- 109 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-12: ΧΑΡΤΕΣ ΑΦΘΟΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ENLOST.	- 110 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-13: (Α) ΧΑΡΤΗΣ ΠΛΗΘΟΥΣ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΝΑ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ, ΟΠΩΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΠΕΨΖΙΑΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ, (Β) ΧΑΡΤΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ SHANNON ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ (C) ΧΑΡΤΗΣ ΠΛΗΘΟΥΣ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΝΑ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ, ΟΠΩΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ENLOST.	- 111 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-14: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΦΘΟΝΙΩΝ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ (Α) ΠΡΙΝ ΚΑΙ (Β) ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ENLOST, ΟΠΟΥ ΕΞΑΛΕΙΦΕΤΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΟΛΥΣΥΓΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ, ΟΠΩΣ ΔΕΙΧΝΕΙ ΚΑΙ Ο ΔΕΙΚΤΗΣ VIF.	- 112 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-15: ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ (Α) ΠΡΙΝ ΚΑΙ (Β) ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ENLOST ΓΙΑ ΤΥΧΑΙΟ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ, ΟΠΟΥ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΝ ΜΟΝΟΝ ΟΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ (ΑΦΘΟΝΙΕΣ).	- 112 -
ΕΙΚΟΝΑ 6-16: ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ENLOST ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: (Α) ΠΛΗΘΟΣ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ, (Β) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΝΑ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΟ.	- 113 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-1: Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΕ: (Α) ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ ΤΗΣ ΠΑΦΟΥ. (Β) ΤΟ ΔΑΣΟΣ ΠΑΦΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΟ RGB ΜΕ ΦΥΣΙΚΑ ΧΡΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΕΙΚΟΝΕΣ GOOGLE EARTH. (C) PINUS BRUTIA ΤΟ ΚΥΡΙΑΡΧΟ ΕΙΔΟΣ ΔΕΝΔΡΟΥ (D) ΦΥΛΛΩΜΑ ΑΠΟ PINUS BRUTIA. (Ε) QUERCUS ALNIFOLIA, Ο ΘΑΜΝΟΣ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΤΟ ΚΥΡΙΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΣΤΟ ΔΑΣΟΣ ΤΗΣ ΠΑΦΟΥ.	- 121 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	- 123 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1993-2000: (Α) ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ COOK ΜΕ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΌΡΟΥ (MA), (Β) ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ COOK ΜΕ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN, (C) ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΓΡΑΦΗΜΑ ΟΠΟΥ ΜΕ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ MA ΚΑΙ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN. ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΠΟΥ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΒΕΛΗ ΕΙΝΑΙ ΑΥΤΑ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΟΠΩΣ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ COOK.	- 127 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-4: Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ COOK ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΛΗΡΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1993-2000, ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ 10 ΚΑΙ 22 ΚΑΙ ΤΗΝ (ΕΠΑΝΑ)ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΛΛΙΠΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN.....	- 128 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-5: ΕΤΗΣΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ: (Α) ΤΗΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 2014-2017, (Β) ΤΗΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ 2014-2015, (C) ΤΗΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 2014-2017, (D) ΤΗΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1994-1999, (Ε) ΤΗΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ 1994-1999 ΚΑΙ (F) ΤΗΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 1994-1999.....	- 129 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ 1992-2016: (Α) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΡΓΟΔΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΟΡΟΥ ΜΗΝΙΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ, (Β) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΟΧPLOT ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΚΟΚΚΙΝΗ ΚΟΥΚΙΔΑ) ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΜΑΥΡΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ (C) ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ.	- 131 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ: (Α) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ (ΜΕ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 1993-2000 ΜΕ ΕΞΙΣΩΣΗ $y = 24.818 - 0.0026929x$. ΤΑ ΒΕΛΗ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΚΑΙ (Β) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ (ΜΕ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 2013-2018 ΜΕ ΕΞΙΣΩΣΗ $y = 23.17 + 0.046534x$. ..	- 131 -
ΕΙΚΟΝΑ 7-8: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ BFAST ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1993-2000: (Α) Η ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ BFAST ΑΝΙΧΝΕΥΕΙ ΕΝΑ ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ, ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΣΤΟΝ ΜΠΛΕ ΚΥΚΛΟ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ	

(ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ), (Β) ΚΛΑΣΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ, (C) Η ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ (ΜΑΥΡΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΜΕ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ (ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΝΑ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΟΥ ΑΞΙΟΛΟΓΗΘΗΚΕ ΩΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΑΙ (D) Η ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΑΣΗΣ (ΜΑΥΡΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΣΕ ΕΠΙΘΕΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ BFAST (ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΜΕ ΤΟΝ ΜΠΛΕ ΚΥΚΛΟ ΝΑ ΥΠΟΔΗΛΩΝΕΙ ΤΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ.- 132

-
- ΕΙΚΟΝΑ 7-9: Η ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ, ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1993-2000 ΠΟΥ (ΕΠΑΝΑ)ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΑΝ ΟΙ ΕΛΛΙΠΕΙΣ ΤΙΜΕΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ (ΜΕ ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΣΕ ΕΠΙΘΕΣΗ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) Η ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΧΕΙ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΡΡΟΗΣ. - 133 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-10: Η ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΤΟΥ NDVI ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ: (Α) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ (ΜΕ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 1993-2000 ΜΕ ΕΞΙΣΩΣΗ $Y = 0.44164 + 0.00026747X$ ΚΑΙ (Β) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ (ΜΕ ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 2013-2018 ΜΕ ΕΞΙΣΩΣΗ $Y = 0.56516 - 0.00033242X$. ΤΑ ΒΕΛΗ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ, ΟΠΩΣ ΑΝΙΧΝΕΥΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ BFAST. - 134 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-11: (Α) ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 1993-2000 ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟΝ ΜΠΛΕ ΚΥΚΛΟ ΚΑΙ Η ΑΚΡΙΒΗΣ ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕ ΤΟ ΜΠΛΕ ΒΕΛΟΣ, (Β) ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 1993-2000 ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. ΤΟ ΜΠΛΕ ΒΕΛΟΣ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ, (C) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 1993-2000 (ΜΕ ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ) ΠΟΥ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΕΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΗΛΘΕ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ BFAST (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ). Ο ΜΠΛΕ ΚΥΚΛΟΣ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ, (D) ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ BFAST ΚΑΙ ΤΑ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 2013-2018, ΣΗΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΜΠΛΕ ΚΥΚΛΟΥΣ, (Ε) Η ΚΛΑΣΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 2013-2018 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. ΤΑ ΜΠΛΕ ΒΕΛΗ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ, ΟΠΩΣ ΑΥΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ BFAST ΣΤΟ (D) ΚΑΙ (F) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 2013-2018 (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΜΕ ΕΠΙΘΕΣΗ (ΜΕ ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ) Η ΓΡΑΜΜΗ ΤΑΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΗΛΘΕ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ BFAST. ΜΕ ΜΠΛΕ ΚΥΚΛΟΥΣ ΤΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ, ΤΟΝ ΜΑΪΟ ΤΟΥ 2014 ΚΑΙ ΤΟ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟ ΤΟΥ 2015..... - 135 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-12: ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ: (Α) LST 1993-2000, (Β) NDVI 1993-2000, (C) LST 2013-2018, (D) ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 2013-2018 ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (ΓΙΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗ (LAG) = 1 ΕΩΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗ (LAG) = 15): (Ε) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1993-2000 ΚΑΙ (F) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 1993-2000. - 136 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-13 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ (Α) LST 1993-2000 ΚΑΙ NDVI 1993-2000, (Β) LST 2013-2018 ΚΑΙ NDVI 2013-2018. (C) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ LST ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ 1993-2000, ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ NDVI ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 1993-2000. - 137 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-14: ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΟ ΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ (Α) LST ΚΑΙ NDVI 1993-2000, (Β) LST ΚΑΙ NDVI 2013-2018. . - 138 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-15: (Α) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ LST 1993-2000 ΜΕ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΡΓΟΔΙΚΟ ΜΕΣΟ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ), (Β) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΤΑΛΟΙΠΑ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ LST 1993-2000, (C) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 1993-2000 ΜΕ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΡΓΟΔΙΚΟ ΜΕΣΟ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ), (D) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΤΑΛΟΙΠΑ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 1993-2000, (Ε) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ LST 2013-2018 ΜΕ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΡΓΟΔΙΚΟ ΜΕΣΟ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ), (F) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΤΑΛΟΙΠΑ ΤΗΣ LST 2013-2018, (G) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 2013-2018 ΜΕ ΤΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΤΟΝ ΕΡΓΟΔΙΚΟ ΜΕΣΟ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ (H) ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΤΑΛΟΙΠΑ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ NDVI 2013-2018. - 138 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-16: ΟΙ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΓΙΑ: (Α) LST 1993-2000, (Β) NDVI 1993-2000, (C) LST 2013-2018, (D) NDVI 2013-2018. ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ, ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ: (1) RESIDUALS VS FITTED VALUES, (2) ΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ Q-Q PLOT, (3) ΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SCALE – LOCATION ΚΑΙ (4) ΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ RESIDUALS VS LEVERAGE..... - 140 -
- ΕΙΚΟΝΑ 7-17: ΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΟΥΜΕΝΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΓΡΑΦΙΚΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ LST ΚΑΙ NDVI ΑΝΑ ΜΗΝΑ: (Α) ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 1994-1999, (Β) ΣΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ 2014-2017. ΕΠΟΧΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ (12 ΜΗΝΩΝ) ΓΙΑ: (C) ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ LST 1994-1999, (D) ΤΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ NDVI 1994-1999, (Ε) ΓΙΑ ΤΗΝ LST 2014-2017 ΚΑΙ (F) ΓΙΑ ΤΗΝ NDVI 2014-2017. ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ (C-F), ΥΠΑΡΧΕΙ ΜΙΑ ΜΑΥΡΗ ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΠΟΥ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ ΤΟΝ ΜΗΝΑ ΑΠΡΙΛΙΟ, Ο ΟΠΟΙΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕ ΜΙΑ ΜΗ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ. ΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ 1,2,3,4,5,6 ΣΤΑ ΔΕΞΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ, ΥΠΟΔΕΙΚΝΟΥΝ ΤΑ ΕΤΗ 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ 1994-1999 ΚΑΙ ΤΑ ΕΤΗ 2014, 2015, 2017, ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΕΙΡΑ 2014-2017. - 141 -
- ΕΙΚΟΝΑ 8-1 : ΟΙ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ, ΚΑΤΑΝΑΛΩΝΟΥΝ ΔΥΣΑΝΑΛΟΓΟ ΧΡΟΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ. ΠΗΓΗ: STATE OF DATA SCIENCE REPORT, 2020. - 153 -

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ ΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΔΗΜΙΣΜΟΣ	- 5 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΛΗΣ MSC.....	- 29 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ	- 34 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ GER-1500.	- 42 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ HR-1024I.....	- 42 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	- 43 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΕΚΤΗ CASI-550.....	- 62 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: ΔΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.	- 80 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: ΤΑ ΔΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ, ΟΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ ΕΞΗΧΘΗΣΑΝ ΩΣ ΚΑΘΑΡΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	- 83 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: ΤΑ ΔΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ, ΟΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ ΕΞΗΧΘΗΣΑΝ ΩΣ ΚΑΘΑΡΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	- 84 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1 : ΨΕΥΔΟΚΩΔΙΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ GIBBS.....	- 98 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2 : ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΦΘΟΝΙΩΝ ΕΙΔΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ, ΜΕΤΑ ΤΟ ΜΠΕΪΖΙΑΝΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ.....	- 107 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 7-1: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ LST, NDVI ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ.....	- 130 -

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ΗΜΦ : ΗλεκτροΜαγνητικό Φάσμα

CASI: Compact Airborne Spectrographic Imager: Συμπαγής Αερομεταφερόμενος Φασματογράφος

FWHM: Full Width at Half Maximum, Πλήρες Πλάτος στο Μισό Μέγιστο

MSI: MultiSpectral Image, Πολυφασματική Απεικόνιση

HSI: HyperSpectral Image, Υπερφασματική Απεικόνιση

MNF: Minimum Noise Fraction, Ελάχιστο Κλάσμα Θορύβου

MNF-1: Minimum Noise Fraction First EigenImage, Πρώτη Ιδιο-εικόνα του μ/σ Ελάχιστου Κλάσματος Θορύβου

MSC: Minimum Scale Column, Στήλη Ελάχιστης Κλίμακας

NCC: Normalized Cross Correlation, Κανονικοποιημένη Διασταυρούμενη Συσχέτιση

PSF: Point Spread Function, Συνάρτηση Διασποράς Σημείου

SRF: Spatial Frequency Response, Συνάρτηση Χωρικής Απόκρισης

TL: Trend Line, Γραμμή Τάσης

TLSC: Trend Line Smile Correction, Διορθωμένη Γραμμή Τάσης λόγω Φασματικού Χαμόγελου

LST: Land Surface Temperature, Θερμοκρασία της Επιφάνειας του Εδάφους

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης

$(x)^T$: ανάστροφος του πίνακα x

$|x|$: ορίζουσα του πίνακα x

$\|x\|_2$: L_2 Ευκλείδεια νόρμα, με $\|x\|_2^2 = x^T x$

\mathbb{R}^N : N - διάστατος Ευκλείδειος χώρος

I_B : ο ταυτοτικός πίνακας $B \times B$

$\text{tr}(x)$: το ίχνος του πίνακα x

$\text{etr}\{.\}$: ο εκθέτης του ίχνους του πίνακα που περιγράφεται ανάμεσα στα $\{ \}$

$\exp[.]$: η εκθετική συνάρτηση, όπου $\exp[x] = e^x$

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ

(οι οποίες αναφέρονται στη διατριβή)

i) Κανονική κατανομή

Συμβολισμός : $x \sim N(\mu, \sigma^2)$

Παράμετροι : μ =μέση τιμή, σ^2 διασπορά

Πεδίο ορισμού : $x \in \mathbb{R}$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας : $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$

Μέση τιμή : μ

Διασπορά : σ^2

ii) Γάμμα κατανομή

Συμβολισμός : $x \sim \Gamma(a, b)$

Παράμετροι : $a > 0$ (shape), $b > 0$ (rate)

Πεδίο ορισμού : $x \in (0, +\infty)$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας : $f(x) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} x^{a-1} e^{-bx}$

Μέση τιμή : $\frac{a}{b}$

Διασπορά : $\frac{a}{b^2}$

iii) Βήτα κατανομή

Συμβολισμός : $x \sim B(a, b)$

Παράμετροι : $a > 0$ (shape), $b > 0$ (shape)

Πεδίο ορισμού : $x \in [0, 1]$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας : $f(x) = \frac{x^{a-1} (1-x)^{b-1}}{B(a,b)}$ όπου $B(a,b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)}$

Μέση τιμή : $\frac{a}{a+b}$

Διασπορά : $\frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)}$

iv) Αντίστροφη Wishart κατανομή

Συμβολισμός : $x \sim W^{-1}(D, \nu)$

Παράμετροι : $D > 0$, $(B \times B)$ θετικά ορισμένος πίνακας και $\nu > B-1$, με B οι βαθμοί ελευθερίας

Πεδίο ορισμού : x είναι πίνακας $(B \times B)$ θετικά ορισμένος

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας : $f(x) = \frac{|D|^{\frac{\nu}{2}}}{2^{\nu B/2} \Gamma_B(\frac{\nu}{2})} |x|^{-(\nu+B+1)/2} e^{-\frac{1}{2}tr(Dx^{-1})}$

όπου $|\cdot|$ είναι η ορίζουσα του πίνακα (\cdot) , Γ_B είναι η πολυμεταβλητή $\Gamma(\cdot)$ κατανομή και $tr(\cdot)$ είναι το ίχνος του τετραγωνικού πίνακα (\cdot)

Μέση τιμή : $\frac{D}{\nu-B-1}$ για $\nu \neq 0$

Διασπορά : $\frac{(\nu-B+1)D_{ij}^2 + (\nu-B-1)D_{ii}D_{jj}}{(\nu-B)(\nu-B-1)^2(\nu-B-3)}$

v) Dirichlet κατανομή

Συμβολισμός : $x \sim \text{Dir}(\alpha)$

Παράμετροι : $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ με $k \geq 2$ (ακέραιος) και $\alpha_i > 0$

Πεδίο ορισμού : $x \in [0, 1]$ και $\sum_{i=1}^k x_i = 1$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας : $f(x) = \frac{1}{B(a)} \prod_{i=1}^k x_i^{\alpha_i-1}$ όπου $B(a) = \frac{\prod_1^k \Gamma(\alpha_i)}{\Gamma(\sum_1^k \alpha_i)}$

Μέση τιμή : $\frac{\alpha_i}{\sum_1^k \alpha_i}$

Διασπορά : $\frac{\tilde{\alpha}_i(1-\tilde{\alpha}_i)}{(\alpha_0+1)}$ όπου $\tilde{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_0}$ και $\alpha_0 = \sum_{i=1}^k \alpha_i$

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τη μακρινή εποχή των Προσωκρατικών φιλοσόφων (πριν από περίπου 2500 χρόνια) διαφαίνεται η προσπάθεια της ανθρώπινης σκέψης να αποδώσει τις αιτίες των φαινομένων σε φυσικούς νόμους. Η φιλοσοφική σκέψη χαρακτηρίζεται από την σχέση αιτίου - αιτιατού, όπου κάθε παρατηρούμενη φυσική μεταβολή σχετίζεται με ένα αίτιο που την προκαλεί, θέτοντας τα θεμέλια της επιστημονικής σκέψης, συνδέοντας την παρατήρηση της φύσης με γνωσιολογικά ζητήματα (θέματα γνώσης της εποχής, που μεταδόθηκαν σε μεταγενέστερες γενεές).

Τα τελευταία 150 χρόνια οι επιστήμονες στηριζόμενοι στις ίδιες αρχές της παρατήρησης και της επιστημονικής σκέψης, αναπτύσσουν διαδικασίες συλλογής και ανάλυσης τηλεπισκοπικών δεδομένων (η πρώτη φωτογραφία από εναέρια πλατφόρμα -ένα αερόστατο στερεωμένο στη γη- τραβήχτηκε το 1858) [Jensen J., 2015]. Από τότε δημιουργείται μια ολοένα αυξανόμενη ανάγκη -η οποία τα τελευταία 10 χρόνια έχει γιγαντωθεί- για τηλεπισκοπικά προϊόντα με καλύτερη χωρική, φασματική και χρονική ανάλυση, μια ανάγκη που οδήγησε στην παραγωγή πολυφασματικών και υπερφασματικών απεικονίσεων από αρκετούς και διαφορετικούς τηλεπισκοπικούς δέκτες, ιδίως όμως από αερομεταφερόμενες πλατφόρμες όπως τα αεροσκάφη ή/και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicle, UAV). Η απαίτηση για δεδομένα μεγαλύτερης ακρίβειας οδηγεί στην ανάγκη για πληρέστερη ραδιομετρική διόρθωση των απεικονίσεων, ιδιαίτερα των υπερφασματικών, για τις οποίες απαιτείται φασματική διακρίβωση των αισθητήρων τους ώστε να επικαιροποιηθεί η βαθμονόμηση στα φασματικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν στο εργαστήριο πριν από τη λειτουργία του δέκτη και για την άρση φασματικών και χωρικών εσφαλμένων καταχωρίσεων, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο φασματικής καμπυλότητας (φασματικό χαμόγελο ή spectral smile).

Η ραδιομετρική βελτίωση των απεικονίσεων οδήγησε με τη σειρά της, στην καλύτερη ερμηνεία αντικειμένων / φαινομένων / συμβάντων που καταγράφονται κυρίως στην περιοχή του ορατού καθώς και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΜΦ) και ειδικότερα για την παρούσα έρευνα στην καλύτερη ανίχνευση των βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης, μέσω της αξιοποίησης της ακτινοβολίας που καταγράφεται στην απεικόνιση από τον αισθητήρα, δηλαδή της ακτινοβολίας που επιστρέφει στο δέκτη από τον υπό μελέτη στόχο στην επιφάνεια της γης. Συνυφασμένοι με τα βιοφυσικά χαρακτηριστικά της βλάστησης (όπως π.χ. την απορρόφηση της χλωροφύλλης, την πυκνότητα του πράσινου της κόμης των φυτών κλπ) είναι οι δείκτες βλάστησης, οι οποίοι αποτελούν αδιάστατες ραδιομετρικές μετρήσεις της σχετικής αφθονίας της βλάστησης, κατάλληλοι να ανιχνεύσουν και να εξάγουν τις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης ή και υβριδικών τους μεταβλητών (όπως π.χ. η καταπόνηση ή η απόδοση της βλάστησης κλπ).

Η δυνατότητα ανίχνευσης των βιοφυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης οδηγεί στη βέλτιστη αναγνώριση του τύπου βλάστησης. Τα βιοφυσικά χαρακτηριστικά ανιχνεύονται μέσω φασματικών υπογραφών, οι οποίες περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τις τιμές ανακλαστικότητας σε διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με τις ζώνες απορρόφησης της χλωροφύλλης και των άλλων χρωστικών καθώς και την περιεκτικότητα σε νερό του φυτού. Στην προσπάθεια να διακριθούν και να αξιοποιηθούν τα διαφορετικά είδη βλάστησης βάσει των χαρακτηριστικών της φασματικής τους ανακλαστικότητας και

απορρόφησης, δημιουργούνται βιβλιοθήκες φασματικών υπογραφών από είδη βλάστησης που ενδιαφέρουν την επιστημονική κοινότητα.

Η ανάγκη για τηλεπισκοπικά προϊόντα με καλύτερη φασματική ανάλυση, δημιούργησε επίσης την απαίτηση για υπερφασματικά δεδομένα, κατακερματίζοντας το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε πολύ μικρά τμήματα κυρίως στο εγγύς και μέσο υπέρυθρο (700 nm έως περίπου 2500 nm) αλλά και στο θερμικό υπέρυθρο (που φτάνει περίπου έως τα 14.000 nm), καταγράφοντας και αξιοποιώντας με αυτόν τον τρόπο πληροφορίες οι οποίες δεν είναι ορατές στον άνθρωπο. Η αξιοποίηση όμως εικόνων υψηλής φασματικής διάστασης απαιτεί προσεκτική προεπεξεργασία των δεδομένων, μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και δύσκολη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η μείωση της διάστασης του υπερφασματικού κύβου έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο φασματικό διαχωρισμό, προκειμένου να αναλυθούν περισσότερο αποτελεσματικά τα υπερφασματικά δεδομένα και επηρεάζει άμεσα την απόδοση του φασματικού διαχωρισμού ή/και των ταξινομήσεων.

Αλλά η μείωση αυτή όταν πρόκειται για μεθόδους επιλογής καναλιών, πρέπει να γίνεται με βάση τις οπτικές και βιοφυσικές ιδιότητες της βλάστησης ώστε να μη χαθεί πληροφορία (ή να χαθεί η ελάχιστη δυνατή), προσδοκώντας σε μια αποδοτική στρατηγική για την ανίχνευση των ειδών της βλάστησης.

Μέθοδοι αιχμής όπως η Μπεϋζιανή συμπερασματολογία χρησιμοποιούνται για το φασματικό διαχωρισμό. Η ποινικοποίηση των αφθονιών όταν πρόκειται για είδη βλάστησης, μπορεί να οδηγήσει στην κατανομή των ειδών βλάστησης, συμβάλλοντας στην εκτίμηση και παρακολούθηση της βιοποικιλότητας. Μιας παρακολούθησης που για να είναι συνεπής με το δυναμικό χαρακτήρα της βλάστησης, είναι απαραίτητο να διεξάγεται στο χρόνο, προσδιορίζοντας τις μεταβολές στον αριθμό των στατιστικά σημαντικών ειδών βλάστησης.

Η παρακολούθηση της πυκνότητας της βλάστησης αποτελεί μια άλλη έκφραση παρακολούθησης της δυναμικής της βλάστησης, η οποία συνδέεται άρρηκτα και με την κλιματική αλλαγή. Η πυκνότητα βλάστησης παρουσιάζει βραχυπρόθεσμες, εποχιακές και μακροπρόθεσμες μεταβολές, ως σημεία στατιστικής σημαντικότητας ανάλυσης χρονοτιμών, σε δεδομένα χρονοσειρών. Οι μεταβολές αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τη φαινολογία της βλάστησης (απορρόφηση χλωροφύλλης, πυκνότητας βλάστησης κλπ) και επιβεβαιώνουν τη σημασία των παρατηρούμενων τάσεων, μετά την αποσύνθεση των χρονοσειρών και την ερμηνεία των πιθανών συσχετίσεων που παρουσιάζουν, στον εντοπισμό εκείνων των μεταβολών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή.

Σύμφωνα με το παραπάνω πλαίσιο διαμορφώθηκε το κίνητρο εκπόνησης αυτής της διατριβής, και οριοθετήθηκαν οι στόχοι της που αναλύονται στην παράγραφο 1.3.

1.1 Πολυφασματική και Υπερφασματική Τηλεπισκόπηση

Η Τηλεπισκόπηση ως επιστήμη και τέχνη απόκτησης πληροφοριών για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή ένα φαινόμενο, δια μέσου της ανάλυσης δεδομένων, τα οποία έχουν ανακτηθεί από μια συσκευή που δεν είναι είναι σε επαφή με το υπό έρευνα αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο

[Αργιαλάς Δ., 1999], συμβάλλει άμεσα στην παρατήρηση της επιφάνειας της γης ή και της ατμόσφαιρας από το διάστημα χρησιμοποιώντας δορυφόρους ή από τον αέρα χρησιμοποιώντας αερομεταφερόμενες πλατφόρμες. Χρησιμοποιεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (ΗΜΦ), καταγράφοντας την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται ή/και εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και τα αντικείμενά της. Η ποσότητα της ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο επηρεάζεται τόσο από τις ιδιότητες του αντικειμένου όσο και από την ενέργεια που δέχεται το αντικείμενο (κυρίως από τον ήλιο). Τηλεπισκοπικοί αισθητήρες καταγράφουν απεικονιστικά την ακτινοβολία που ανακλάται από αυτά τα αντικείμενα και αργότερα μελετώντας τις απεικονίσεις αυτές, ο εγκέφαλός μας ερμηνεύει τα χρώματα, τους τόνους και τις διακυμάνσεις της έντασής τους, βγάζοντας σχετικά συμπεράσματα. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά μιας εικόνας Τηλεπισκόπησης είναι η περιοχή μήκους κύματος που αντιπροσωπεύει στο ΗΜΦ. Κάποιες από τις εικόνες αυτές, αντιπροσωπεύουν την ανακλώμενη/εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία στην ορατή και τις υπέρυθρες περιοχές του ΗΜΦ, ενώ άλλες στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου ή και των μικροκυμάτων. Τα συστήματα όπου οι μετρήσεις Τηλεπισκόπησης εξαρτώνται από μια εξωτερική πηγή ενέργειας, όπως ο ήλιος, αναφέρονται ως συστήματα παθητικής Τηλεπισκόπησης, σε αντίθεση με τα ενεργητικά συστήματα όπου η πλατφόρμα Τηλεπισκόπησης παρέχει την ενέργεια η οποία συνήθως εκπέμπεται προς την επιφάνεια της γης και επιστρέφει σε αυτήν καταγράφοντας το μέτρο της σχετικής επιστροφής.

Η Πολυφασματική (Multispectral) και η Υπερφασματική (Hyperspectral) Τηλεπισκόπηση είναι δύο παρόμοιες τεχνολογίες, η σημαντικότητα και η χρησιμότητα των οποίων έχει αυξηθεί εκθετικά τις τελευταίες δεκαετίες.

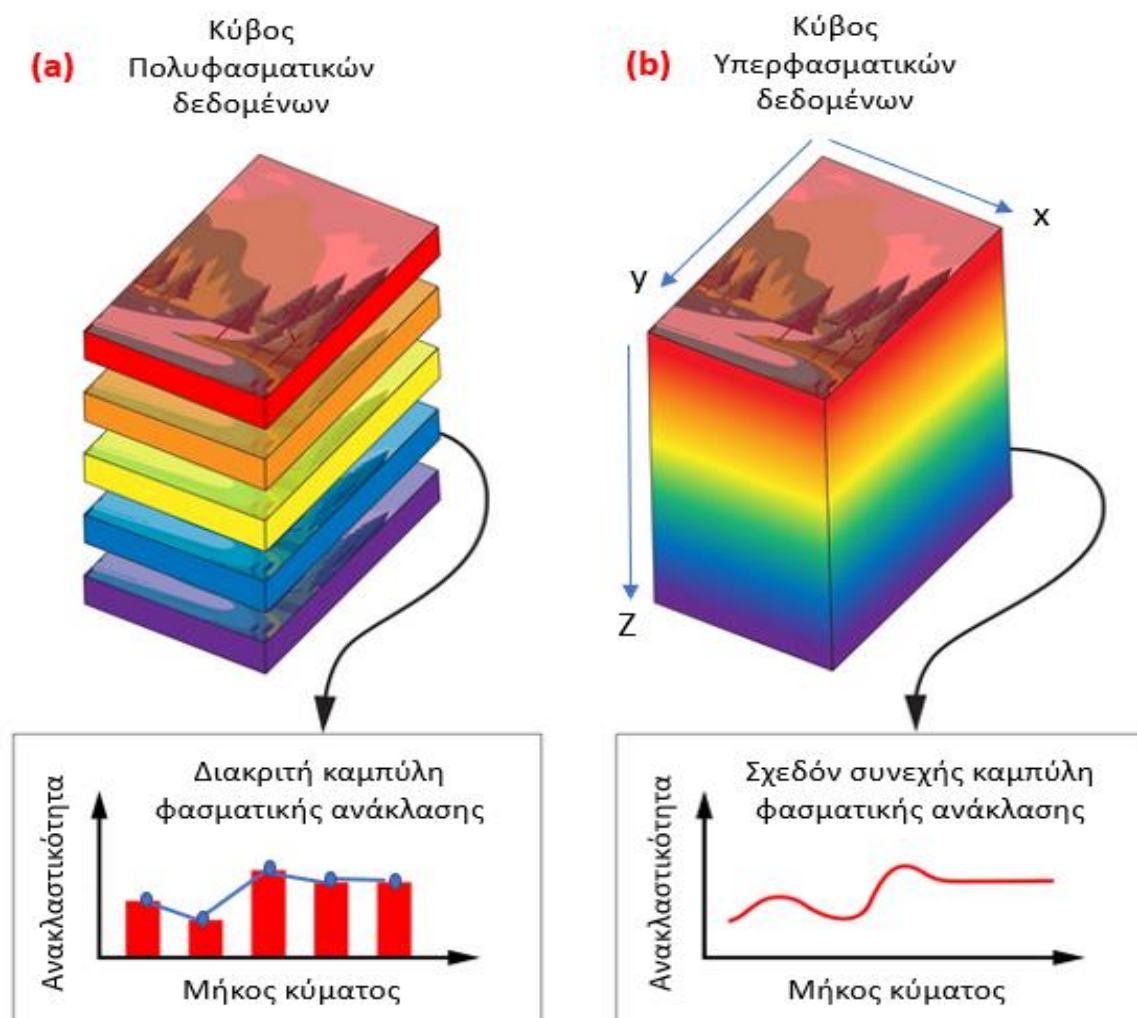
Η Πολυφασματική Τηλεπισκόπηση ανιχνεύει με πολυφασματικούς αισθητήρες και καταγράφει δεδομένα εντός συγκεκριμένων και ολίγων περιοχών μηκών κύματος (φασματικών ζωνών) στο ΗΜΦ (συνήθως 3 έως 15) αλλά σχετικά μεγάλου εύρους (70-400 nm) και δημιουργεί πολυφασματικές απεικονίσεις (MultiSpectral Imagery, MSI). Ένα πολυφασματικό σύστημα Τηλεπισκόπησης συνήθως παρέχει έναν συνδυασμό ορατών (Visible, 400 έως 700 nm), εγγύς υπέρυθρων¹ (NIR, 700 έως 1000 nm), μέσων και μακρυνών υπέρυθρων κυμάτων¹ (SWIR, 1000 έως 2500 nm) ή θερμικών υπέρυθρων κυμάτων¹ (LWIR, 8000 έως 12000 nm) σε ένα ενιαίο σύστημα [Coffey, Valerie C., 2012].

Η Υπερφασματική Τηλεπισκόπηση, γνωστή και ως Φασματοσκοπία Απεικόνισης (Imaging Spectroscopy), είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία που διερευνάται επί του παρόντος από ερευνητές και επιστήμονες όσον αφορά την ανίχνευση και την αναγνώριση χερσαίας βλάστησης, ορυκτών και ανθρωπογενών υλικών και υποβάθρων. Η φασματοσκοπία απεικόνισης χρησιμοποιείται στο εργαστήριο από επιστήμονες (κυρίως φυσικούς και χημικούς) για περισσότερα από 100 χρόνια, για την αναγνώριση των υλικών και της σύνθεσής τους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μεμονωμένων χαρακτηριστικών απορρόφησης, λόγω συγκεκριμένων χημικών δεσμών σε στερεό, υγρό ή αέριο. Σχετικά πρόσφατα, με την προηγμένη τεχνολογία, η φασματοσκοπία απεικόνισης έχει αρχίσει να εστιάζει στη Γη. Η έννοια

¹ Αυτό το μήκος κύματος δεν είναι ορατό στα ανθρώπινα μάτια αλλά μπορεί συχνά να προσφέρει πολύ χρήσιμες απεικονίσεις σε οθόνες H/Y, σε σχέση με αυτές που μπορεί να επιτευχθούν με την απεικόνιση ορατού φωτός.

της Υπερφασματικής Τηλεπισκόπησης ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '80 και μέχρι σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτερα από επιστήμονες για τη χαρτογράφηση ορυκτών, βλάστησης και γενικότερα υλικών. Η ανίχνευση υλικών εξαρτάται από τη φασματική κάλυψη, τη φασματική ανάλυση και το σήμα προς το θόρυβο του φασματομέτρου, την αφθονία και την ισχύ των χαρακτηριστικών απορρόφησης του υλικού που μας ενδιαφέρει, στην περιοχή μήκους κύματος που μετρήθηκε. Η Υπερφασματική Τηλεπισκόπηση συνδυάζει την απεικόνιση και τη φασματοσκοπία σε ένα ενιαίο σύστημα, που συχνά περιλαμβάνει μεγάλα σύνολα δεδομένων και απαιτεί υπολογιστικά κοστοβόρες και πάντως σύγχρονες μεθόδους επεξεργασίας. Τα υπερφασματικά σύνολα δεδομένων (HyperSpectral Imagery, HSI) αποτελούνται γενικά από περίπου 30 έως 200+ φασματικές ζώνες (και συχνά περισσότερες) σχετικά στενού εύρους ζώνης (5-10 nm). Αυτό το στενό εύρος μήκους κύματος, μπορεί να αποκαλύψει ιδιότητες της σύνθεσης του υλικού που διαφορετικά δεν είναι εμφανείς.

Τόσο οι πολυφασματικές όσο και οι υπερφασματικές απεικονίσεις συνήθως αναπαρίστανται ως κύβος δεδομένων, με χωρικές πληροφορίες που συλλέγονται στο επίπεδο XY και φασματικές πληροφορίες που αναπαρίστανται στην διεύθυνση Z (Εικόνα 1-1).



Εικόνα 1-1: Αναπαράσταση (α) του κύβου πολυφασματικών δεδομένων και της διακριτής καμπύλης φασματικής ανάκλασης που παράγει ένα τυχαίο εικονοστοιχείο (β) του κύβου υπερφασματικών

δεδομένων και της σχεδόν συνεχούς καμπύλης φασματικής ανάκλασης που παράγει ένα τυχαίο εικονοστοιχείο. Πηγή: edmundoptics.eu

1.2 Μεσογειακή βλάστηση και βιοποικιλότητα

Λέγοντας Μεσογειακή, εννοούμε τη βλάστηση που εμφανίζεται στη λεκάνη της Μεσογείου, η οποία παρουσιάζει πολύ μεγάλη βιοποικιλότητα και υψηλό ενδημισμό². Καταλαμβάνει λιγότερο από το 5% της επιφάνειας της Γης αλλά περιλαμβάνει περίπου το 20% της παγκόσμιας χλωρίδας. Το κλίμα παρουσιάζει εποχικότητα με ζεστά και ξηρά (άνυδρα) καλοκαίρια και ήπιους υγρούς χειμώνες. Τα καλοκαίρια χαρακτηρίζονται από έντονη ηλιακή ακτινοβολία και οι χειμώνες από σχετικά ήπιες βροχοπτώσεις αν και εμφανίζονται απρόβλεπτα απεριοδικά φαινόμενα παρατεταμένης ξηρασίας και έντονων βροχοπτώσεων. Στα ανατολικά

Τα φυτά της Μεσογειακής βλάστησης μοιάζουν μεταξύ τους και σχετίζονται στενά από τόπο σε τόπο αν και ορισμένες από τις χερσαίες περιοχές της Μεσογείου, κυρίως οι βόρειες, παρότι απομονωμένες αρκετά, έχουν επιδείξει πολλαπλές ευκαιρίες για ανταλλαγή ειδών βλάστησης και συγκλίνουσα εξέλιξη των φυτών τους. Έχουν υπολογιστεί περισσότερα από 25.000 είδη φυτών, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 10% όλων των γνωστών φυτών του πλανήτη, χαρακτηριστικό της μεγάλης ποικιλότητας της μεσογειακής βλάστησης, από τα οποία περίπου 5.500 είναι ενδημικά [Javier Lopez-Alvarado J. L. and Farris E., 2022] με μια κατά προσέγγιση κατανομή όπως δείχνει ο Πίνακας 1-1.

Πίνακας 1-1: Μεσογειακή Ποικιλότητα και Ενδημισμός

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΜΒΑΔΟ (Km ²)	ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ	ΕΝΔΗΜΙΚΑ ΕΙΔΗ	% ΕΝΔΗΜΙΚΑ
Ελλάδα	131.957	5855	913	15.60
Κύπρος	9.251	1612	110	6.80
Βουλγαρία	111.000	3600	320	8.90
Ιταλία	301.049	5300	712	13.40
Γαλλία	551.700	4650	133	2.90
Ιβηρική χερσόνησος	501.000	7920	550	6.90
Κανάρια νησιά	14.879	1800	550	30.60
Ηνωμένο Βασίλειο	244.754	1800	16	0.90
Τουρκία	779.500	8650	2675	30.90
Μαρόκο	710.850	3675	625	17.00

Πηγή : Biogeography of the Mediterranean, 2018

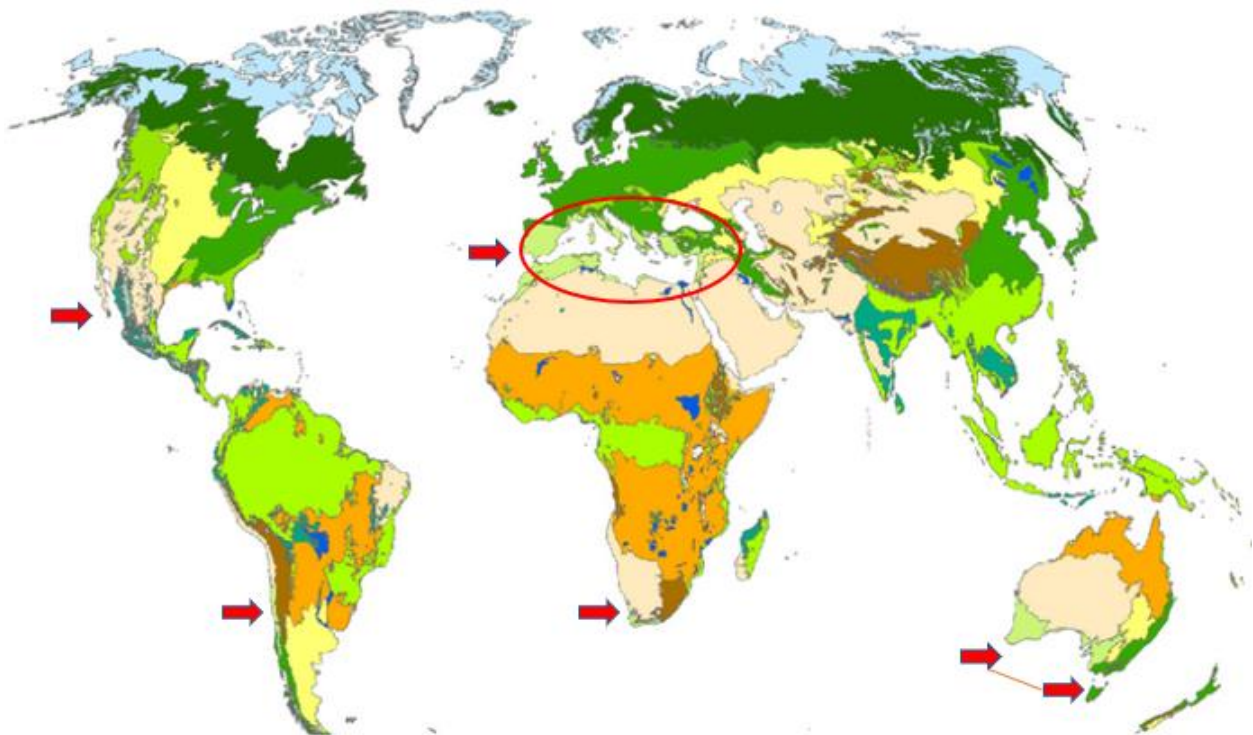
Τυπικά είδη βλάστησης [3.2] αποτελούν η υβριδογενής Έλατη, η κεφαλληνιακή Ελάτη, η Ερυθρελάτη, το Σφενδάμι, ο Πλάτανος, το Ρόμπολο, η Ελιά και η Αγριελιά, η Δασική Πεύκη, η Μαύρη Πεύκη, η Τραχεία Πεύκη, η Παραθαλασσία Πεύκη, η Χαλέπιος Πεύκη, η Οξιά, η Δρυς, η Πλατύφυλλη Δρυς, η Χνωώδης Δρυς, η Ιτιά, η Καστανιά, η Σημύδα, ο Κέδρος, ο Ευκάλυπτος, η Ακακία, η Καρυδιά, η Οστριά, το Κυπαρίσσι, ο Άρκευθος, η Κουμαριά, η Φλαμουριά, η Φτέρη, η Χαρουπιά, η Μυρτιά, η Κουτσουπιά και πολλά άλλα.

² Στη βιολογία, ενδημικό ονομάζεται ένα είδος, είτε του φυτικού βασιλείου είτε του ζωικού, που ζει σε έναν οριοθετημένο (ή και απομονωμένο) γεωγραφικό χώρο. Για να είναι ενδημικό ένα είδος πρέπει να έχει δημιουργηθεί και να έχει εξελιχθεί σε εκείνον τον χώρο.

Η εξέλιξη της κυρίαρχης βλάστησης είναι ίσως το πιο θεμελιώδες για την ιστορία ενός οικοσυστήματος. Το κλίμα ασκεί πρωταρχική επίδραση στα φυτά και καθορίζει (μέσω της εξέλιξης) τα φυσιογνωμικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά τους. Έχει επίσης αποδειχθεί [Hutchinson, G. E. And MacArthur, R. J.,1959] ότι η βλάστηση θέτει τα όρια στο τι είναι δυνατό να συμβεί στην εξέλιξη της πανίδας, τονίζοντας τη σημασία της ποικιλότητας των φυτών στη συμβολή για την ποικιλότητα των ζώων. Θα πρέπει να περιμένει κανείς, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ποικιλία των φυτών, τόσο περισσότερα διαφορετικά είδη ζώων θα υπάρχουν.

Με βάση το κλίμα, υπάρχουν ακόμη τέσσερις περιοχές του πλανήτη (Εικόνα 1-2) με παρόμοια βλάστηση (λόγω παρόμοιου μεσογειακού κλίματος), ένα μεγάλο τμήμα της Καλιφόρνια, η κεντρική Χιλή, μέρος της δυτικής και νοτιοδυτικής Αυστραλίας και η νοτιοδυτική Αφρική. Αλλά ορισμένα είδη φυτών που είναι κοινά σε ένα οικοσύστημα μπορεί να απουσιάζουν εντελώς από το κλιματικό ομόλογό του. Οι μεσογειακές αυτές περιοχές εμφανίστηκαν ανεξάρτητα και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, η βλάστηση θεωρείται ότι προέρχεται από προγενέστερα είδη βλάστησης των περιοχών αυτών και από μετανάστευση βλάστησης από τις γύρω ή και από πιο μακρινές περιοχές, λόγω των καιρικών συνθηκών.

Περιοχές του πλανήτη με Μεσογειακό κλίμα και βλάστηση



Εικόνα 1-2: Με κόκκινα βέλη φαίνονται οι περιοχές του πλανήτη με Μεσογειακό κλίμα και βλάστηση. Εκτός από τη Μεσογειακή λεκάνη (που φαίνεται με την κόκκινη έλλειψη) υπάρχουν δύο περιοχές στην αμερικάνικη ήπειρο, μία στην αφρικανική ήπειρο, μία (με διπλό βέλος) στην Ωκεανία (στην Αυστραλία).

Η διατήρηση της βιοποικιλότητας σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα μέσα από την παρακολούθηση των δασών, όπως εκφράζεται και από τη νέα δασική στρατηγική της ΕΕ για το 2030 [Tiainen S., 2021] επισημαίνοντας τον κεντρικό ρόλο των δασών, των βιομηχανιών και των εργαζομένων στη βιώσιμη διαχείριση των δασών και στη δασική βιοοικονομία, αποτελεί πρόκληση για τις επόμενες δεκαετίες, τόσο για την προστασία των ειδών και των οικοτόπων όσο και για την ενίσχυση των υπηρεσιών που παρέχουν τα οικοσυστήματα στον ανθρώπινο πληθυσμό.

1.3 Στόχοι διδακτορικής διατριβής

- Ανάπτυξη μεθόδου αποκατάστασης από το φασματικό χαμόγελο ή διόρθωση της φασματικής καμπυλότητας που παρουσιάζουν τα κανάλια των υπερφασματικών απεικονίσεων. Η φασματική καμπυλότητα συνήθως παρουσιάζεται σε δεδομένα που συλλέγονται από υπερφασματικούς σαρωτές (pushbroom sensors) λόγω λανθασμένων ευθυγραμμίσεων στη διάταξη των ανιχνευτών του δέκτη. Λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας των τηλεπισκοπικών απεικονίσεων, προκειμένου να εξαλειφθούν οι φασματικές παραμορφώσεις στα τηλεπισκοπικά δεδομένα.
- Δημιουργία Φασματικής Βιβλιοθήκης Μεσογειακής βλάστησης από μετρήσεις πεδίου, για φασματικές περιοχές από 0.3 μm έως 1.05 μm , και σχετικής γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI - Graphical User Interface), για να είναι φιλική στο χρήστη και να επιταχύνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ χρήστη και φασματικής βιβλιοθήκης. Η βιβλιοθήκη μπορεί να αξιοποιηθεί από τα λογισμικά Τηλεπισκόπησης και ακόμη σε συνδυασμό με την USGS spectral library, η οποία είναι η μεγαλύτερη ανοιχτή βιβλιοθήκη φασματικών υπογραφών.
- Μελέτη των φασματικών ιδιοτήτων της βλάστησης και αξιοποίηση κατάλληλων δεικτών χρωστικών (όπως χλωροφύλλη, ξανθοφύλλη, καροτενοειδή, ανθοκυανίνες και άλλες πλούσιες σε άζωτο ενώσεις) και πυκνότητας της βλάστησης.
- Αξιοποίηση τεχνικών μείωσης της διάστασης των υπερφασματικών δεδομένων χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες των φασματικών περιοχών απορρόφησης της βλάστησης. Ανάπτυξη μιας προσέγγισης για την επιλογή καναλιών και την εύρεση καθαρών στόχων (endmembers) κατά το Φασματικό Διαχωρισμό, σε περιοχές με κάλυψη βλάστησης, κατά την οποία αξιοποιείται η ιδιότητα των καθαρών στόχων να βρίσκονται στις άκρες του διαγράμματος διασποράς μιας εικόνας, με αριθμό καναλιών ίσο με τη διάσταση του υποχώρου του σήματος.
- Αξιοποίηση της Μπεϋζιανής συμπερασματολογίας, για την εύρεση των συντελεστών αφθονίας κατά το φασματικό διαχωρισμό και ανάπτυξη μεθόδου τοπικής ποινικοποίησης των συντελεστών αφθονίας για να δημιουργηθεί αραιό, εκλογικευμένο μοντέλο φασματικού διαχωρισμού, το οποίο θα μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχή βλάστησης ή/και μικτής κάλυψης, αναδεικνύοντας την βιοποικιλότητα μιας περιοχής.
- Μελέτη των επιπτώσεων των μεταβολών των αβιοτικών παραμέτρων (θερμοκρασία, βροχόπτωση) και των βιοτικών παραμέτρων (προσβολή από έντομα) στη δυναμική της βλάστησης. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίον αυτοί οι παράμετροι επηρεάζουν τη μεσογειακή βλάστηση αποκωδικοποιείται, με την εμφάνιση αλλαγών στις συνιστώσες της

αποσύνθεσης των αντίστοιχων χρονοσειρών τηλεπισκοπικών δεδομένων, οι οποίες αναδεικνύουν και πιθανές ανωμαλίες στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αβιοτικών και βιοτικών παραμέτρων. Θερμοκρασία και βλάστηση, αποτελούν βασικές συνιστώσες της κλιματικής αλλαγής και ο έλεγχος της μεταξύ τους δυναμικής αιτιότητας διευρύνει τις δυνατότητες της έρευνας για την κατανόηση της δυναμικής της βλάστησης.

1.4 Σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και πρωτοτυπίας της διατριβής

- Αναπτύσσεται μια πρωτότυπη μέθοδος η οποία λαμβάνει υπόψη της τις επιπτώσεις του φωτισμού κατά την ώρα της πτήσης στην φασματική καμπυλότητα και διορθώνει αποτελεσματικά το φασματικό χαμόγελο σε εναέριες απεικονίσεις υπερφασματικών σαρωτών
- Αξιολογούνται δείκτες χρωστικών και πυκνότητας βλάστησης σε υπερφασματικές εικόνες, αξιοποιώντας τις οπτικές και βιοφυσικές ιδιότητες των φύλλων.
- Δημιουργείται βιβλιοθήκη φασματικών υπογραφών που οπτικοποιεί με φιλικό τρόπο τις φασματικές υπογραφές των πιο συνηθισμένων ειδών μεσογειακής βλάστησης και συνεργάζεται με άλλες ανοιχτές βιβλιοθήκες φασματικών υπογραφών.
- Εφαρμόζεται μοντέλο Μπεϋζιανού φασματικού διαχωρισμού και ποινικοποίηση των συντελεστών αφθονίας μέσω της Elastic Net ποινής για πρώτη φορά στο πεδίο του φασματικού διαχωρισμού. Αναπτύσσεται πρωτότυπη μέθοδος εφαρμογής της Elastic Net ποινής για την ανάπτυξη αραιών μοντέλων που σχετίζονται με τη βιοποικιλότητα.
- Εξετάζεται η δυναμική της βλάστησης μέσα από χρονοσειρές τηλεπισκοπικών απεικονίσεων για τις αβιοτικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία και η βροχόπτωση, αναλύοντας τις εκτιμήσεις των τυχαίων σφαλμάτων (κατάλοιπα) που προκύπτουν κατά τον έλεγχο της μεταβολής της τάσης έπειτα από την αποσύνθεση των σχετικών χρονοσειρών και υποβάλλοντάς τις σε κατάλληλους ελέγχους υποθέσεων.

1.5 Δημοσιεύσεις

Σε διεθνή περιοδικά:

- **Andronis V.**, Karathanassi V., “Biodiversity maps produced by the local shrinkage of abundances”, International Journal on Computational Ecology and Ecological Data Science, 2023 (to be submitted).
- **Andronis V.**, Karathanassi V., Tsalapati V., Kolokoussis P., Miltiadou M., Danezis C. “Time Series Analysis of Landsat Data for Investigating the Relationship between Land Surface Temperature and Forest Changes in Paphos Forest, Cyprus”, MDPI Remote Sensing, 14, 1010. DOI: doi.org/10.3390/rs14041010.

Σε κεφάλαια βιβλίων:

- Koloniatis K., **Andronis V.**, Karathanassi V., «Spectral Smile correction for airborne imaging», chapter 2 in the book: Hyperspectral Remote Sensing: Theory and Applications,

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102894-0.00001-2> Earth Observation Series, Elsevier, 2020, Amsterdam, Netherlands.

Σε πρακτικά συνεδρίων με κρίση:

- **Ανδρώνης, Β.**, Κολοκούσης Π., Βασίλη-Βασιλείου Κ., Καραθανάση Β., "Ποινικοποιημένη επιλογή μεταβλητών σε Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό ειδών βλάστησης" Πρακτικά 10ου Διεπιστημονικού-Διαπανεπιστημιακού Συνεδρίου: Έρευνα και δράσεις για τις ορεινές και τις απομονωμένες περιοχές, Μέτσοβο, 22-24 Σεπτεμβρίου, Ε.Μ.Π., 2022.
- **Ανδρώνης Β.**, Καραθανάση Β., «Χαρτογράφηση Πυκνότητας Βλάστησης με χρήση υπερφασματικών απεικονίσεων», 8ο Διεπιστημονικό Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο του ΕΜΠ, Μέτσοβο, 22-24 Σεπτεμβρίου 2016
- Karathanassi V., Andreou C., **Andronis V.**, Kolokoussis P., 2014. "Effects of band selection on endmember extraction for forestry applications", Proc. SPIE 9245, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V, 92451O (23 October 2014), DOI: 10.1117/12.2067293.

1.6 Η Συνεισφορά μου επί των δημοσιεύσεων

Το περιεχόμενο αυτής της διατριβής έχει δημοσιευθεί σε έξι εργασίες όπως αυτές αναγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο.

Το **Κεφάλαιο 2** δημοσιεύεται με την εργασία :

Koloniatis K., Andronis V., Karathanassi V., 2020. "Spectral Smile correction for airborne imaging", chapter 2 in the book: Hyperspectral Remote Sensing: Theory and Applications, doi.org/10.1016/B978-0-08-102894-0.00001-2, Earth Observation Series, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. Η συνεισφορά μου στην εργασία αυτή ήταν η συμμετοχή μου στο σχεδιασμό της μεθόδου, στην υλοποίηση του πηγαίου κώδικα καθώς και στην υλοποίηση μέρους των πειραμάτων.

Το **Κεφάλαιο 3** δημιουργεί τη βασική υποδομή για τα κεφάλαια 4 και 5.

Το **Κεφάλαιο** Error! Reference source not found. δημοσιεύεται με την εργασία:

Ανδρώνης Β., Καραθανάση Β., 2016 "Χαρτογράφηση Πυκνότητας Βλάστησης με χρήση υπερφασματικών απεικονίσεων", 8ο Διεπιστημονικό Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο του ΕΜΠ, Μέτσοβο, 22-24 Σεπτεμβρίου 2016. Η συνεισφορά μου στην εργασία αυτή ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της βασικής ιδέας και όλων των πειραμάτων.

Το **Κεφάλαιο 5** δημοσιεύεται με την εργασία:

Karathanassi V., Andreou C., Andronis V., Kolokoussis P., 2014. "Effects of band selection on endmember extraction for forestry applications", Proc. SPIE 9245, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V, 92451O (23 October 2014), DOI: 10.1117/12.2067293». Η συνεισφορά μου στην εργασία αυτή ήταν η τροφοδότηση πληροφορίας από τη βιβλιοθήκη καθώς και η συμμετοχή μου στο σχεδιασμό και την υλοποίηση των πειραμάτων.

Το **Κεφάλαιο 6** δημοσιεύεται με τις εργασίες :

Andronis V., Karathanassi V., 2023. "Biodiversity maps produced by the local shrinkage of abundances", *International Journal on Computational Ecology and Ecological Data Science*, (to be submitted). Η συνεισφορά μου στην εργασία αυτή ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της βασικής μεθοδολογίας, των στατιστικών αναλύσεων και των πειραμάτων.

Ανδρώνης, Β., Κολοκούσης Π., Βασίλη-Βασιλείου Κ., Καραθανάση Β., 2022. "Ποινικοποιημένη επιλογή μεταβλητών σε Μπεύζιανό φασματικό διαχωρισμό ειδών βλάστησης" Πρακτικά 10ου Διεπιστημονικού-Διαπανεπιστημιακού Συνεδρίου: Έρευνα και δράσεις για τις ορεινές και τις απομονωμένες περιοχές, Μέτσοβο, 22-24 Σεπτεμβρίου, Ε.Μ.Π., 2022. Η συνεισφορά μου στην εργασία αυτή ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της βασικής μεθοδολογίας, των στατιστικών αναλύσεων και των πειραμάτων. Υλοποίησα τον πηγαίο κώδικα και τη μεθοδολογία ENLoST για την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων.

Το **Κεφάλαιο 7** δημοσιεύεται με την εργασία :

Andronis V., Karathanassi V., Tsalapati V., Kolokoussis P., Miltiadou M., Danezis C., 2022. "Time Series Analysis of Landsat Data for Investigating the Relationship between Land Surface Temperature and Forest Changes in Paphos Forest, Cyprus", *MDPI Remote Sensing*, 14, 1010. DOI: doi.org/ 10.3390 /rs14041010». Η συνεισφορά μου στην εργασία αυτή ήταν η υλοποίηση και η ερμηνεία των στατιστικών αναλύσεων.

Το **Κεφάλαιο 8** περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της έρευνας και προοπτικές που αναπτύσσονται από αυτήν.

1.7 Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής

Στο **Κεφάλαιο 0**, επισημαίνονται οι στόχοι της διατριβής και η συνεισφορά της στην επιστημονική κοινότητα, οι δημοσιεύσεις που πήγασαν από αυτήν και η προσωπική μου συνεισφορά στις δημοσιεύσεις. Επίσης περιγράφεται η διάρθρωσή της.

Στο **Κεφάλαιο 2**, παρατίθενται η μεθοδολογία αποκατάστασης από το φασματικό χαμόγελο, που είναι μια φασματική παραμόρφωση που συνήθως επηρεάζει τα δεδομένα που συλλέγονται από εναέριους υπερφασματικούς σαρωτές λόγω λανθασμένων ευθυγραμμίσεων στη διάταξη των ανιχνευτών της συσκευής απεικόνισης. Λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας των τηλεπισκοπικών απεικονίσεων, προκειμένου να εξαλειφθούν οι φασματικές παραμορφώσεις στα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

Στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάζεται η δημιουργία βιβλιοθήκης φασματικών υπογραφών από μετρήσεις πεδίου (in situ) με τα πιο συνηθισμένα είδη μεσογειακής βλάστησης, καθώς και μιας φιλικής, γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI). Η φασματική βιβλιοθήκη μέσα από τον αναπτυχθέντα κώδικα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε σύνθετες λογιστικό φύλλο (spreadsheet) όπως τα calc, excel κλπ. Η βιβλιοθήκη μπορεί να ενσωματωθεί στα πιο συνηθισμένα λογισμικά Τηλεπισκόπησης (envi, esa snar, orfeo toolbox) και μπορεί να αξιοποιηθεί σε συνδυασμό με γνωστές βιβλιοθήκες όπως αυτή της USGS που είναι η

δημοφιλέστερη ανοιχτή βιβλιοθήκη φασματικών υπογραφών από μετρήσεις στο εργαστήριο, στις φασματικές περιοχές από το υπεριώδες έως και το μακρινό υπέρυθρο.

Στο **Κεφάλαιο** Error! Reference source not found., παρατίθενται οι φασματικές ιδιότητες της βλάστησης, οι φασματικές υπογραφές των κυριότερων ειδών μεσογειακής βλάστησης και τονίζεται η μετάβαση από την πολυφασματική Τηλεπισκόπηση σε εκείνη με τη χρήση αισθητήρων που συνήθως έχουν εκατοντάδες στενές, συνεχείς φασματικές ζώνες (κανάλια) συνήθως μεταξύ των 350 nm έως 2500 nm, δηλαδή την υπερφασματική Τηλεπισκόπηση. Γίνεται αξιοποίηση δεικτών βλάστησης και δεικτών χρωστικών (χλωροφύλλη, ξανθοφύλλη, καροτενοειδή, ανθοκυανίνες και άλλες πλούσιες σε άζωτο ενώσεις) από κανάλια τα οποία αποκαλύπτουν χαρακτηριστικές βιοφυσικές ιδιότητες των αντι-κειμένων και δημιουργούνται και ερμηνεύονται ενδιαφέροντα ψευδέχρωμα σύνθετα RGB από τους δείκτες.

Στο **Κεφάλαιο 5**, μελετάται η διαδικασία του φασματικού διαχωρισμού μέσω τεχνικών επιλογής καναλιών για τη μείωση της διάστασης των υπερφασματικών δεδομένων. Η πλειονότητα των υφιστάμενων μεθόδων μείωσης διαστάσεων εφαρμόζουν μετασχηματισμούς σε όλα τα κανάλια, προκειμένου να οριστεί ο βέλτιστος υπόχωρος του σήματος. Ωστόσο, κάθε εφαρμογή συνδέεται με συγκεκριμένα υλικά επιφανειακής κάλυψης, των οποίων τα φασματικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Για παράδειγμα, πολλές εφαρμογές εστιάζουν στα φύλλα των δέντρων, στα οποία συγκεκριμένες χρωστικές ουσίες όπως η χλωροφύλλη, η ξανθοφύλλη κλπ. καθορίζουν τα μήκη κύματος όπου μπορούν να ανιχνευθούν είδη δέντρων, ασθένειες κλπ. Το κεφάλαιο αυτό, εστιάζει στη βέλτιστη επιλογή καναλιών για την εξαγωγή καθαρών στόχων, αξιοποιώντας τις πληροφορίες των φασματικών περιοχών απορρόφησης και σκέδασης της βλάστησης. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται εάν η εξαγωγή καθαρών στόχων μπορεί να βελτιωθεί, όταν επιλέγονται συγκεκριμένα υποσύνολα των αρχικών καναλιών των υπερφασματικών δεδομένων, που σχετίζονται με τα φασματικά χαρακτηριστικά των φύλλων.

Στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται εκτίμηση της αφθονίας των καθαρών στόχων στο εικονοστοιχείο μιας υπερφασματικής απεικόνισης με την Μπεϋζιανή μεθοδολογία, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της μη αρνητικότητας και του αθροίσματος στη μονάδα. Οι συντελεστές αφθονίας και ο πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας του θορύβου υπολογίζονται από τις περιθώριες ύστερες κατανομές τους, χρησιμοποιώντας τον δειγματολήπτη Gibbs με κατάλληλες πρότερες. Προκειμένου να δημιουργηθεί λιγότερο περίπλοκο (φειδωλό) μοντέλο, όταν έχουμε μεγάλο αριθμό καθαρών στόχων και για να αποφύγουμε την πολυσυγγραμμικότητα (multicollinearity) και την υπερβολική προσαρμογή (overfitting) στην επιλογή τους, εφαρμόζεται τοπικά στην εικόνα, σε ένα μεταβλητό κινούμενο παράθυρο, η ποινή συρρίκνωσης Elastic Net για τις αφθονίες. Η μέθοδος αυτή οδηγεί έμμεσα σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα για την εκτίμηση της βιοποικιλότητας.

Στο **Κεφάλαιο 7**, εξετάζεται η δυναμική της βλάστησης σε σχέση με τις μεταβολές αβιοτικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η βροχόπτωση καθώς και με βιοτικές παραμέτρους (π.χ. προσβολή από έντομα). Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτοί οι παράμετροι αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν τη μεσογειακή βλάστηση είναι ένας σημαντικός τομέας έρευνας

στην οικολογία. Αυτού του είδους οι μελέτες περιπλέκονται, ωστόσο, από τις διαφορετικές χρονικές κλίμακες κατά τις οποίες ενδέχεται να συμβούν αλλαγές και από την πολυμεταβλητή, τυχαία φύση των δεδομένων. Παρουσιάζονται επεκτάσεις στο σχεδιασμό και την υλοποίηση στοχαστικών μοντέλων μέσω χρονολογικών σειρών τηλεπισκοπικών δεδομένων, αναλύοντας την εξέλιξη των χρονοτιμών, της μεταβλητότητας και των αυτοπαλίνδρομων της θερμοκρασίας εδάφους και του δείκτη βλάστησης και μελετάται ο τρόπος που επηρεάζουν οι διάφοροι παράμετροι τη συμπεριφορά των χρονοσειρών. Αναλύεται ακόμη ο τρόπος που γίνεται η αποκατάσταση των ελλιπών τιμών των χρονοσειρών μέσω της ανάλυσης της επίδρασης της μόχλευσης που φέρνει κάθε τιμή απόκρισης σε κάθε προσαρμοσμένη τιμή του μοντέλου και ανιχνεύονται διαταραχές (π.χ. φαινολογικές μεταβολές) εντός των χρονοσειρών, λόγω εμφάνισης αλλαγών στις συνιστώσες της αποσύνθεσής τους, οι οποίες δείχνουν πιθανές ανωμαλίες που προκαλούνται από αβιοτικούς παράγοντες.

Στο **Κεφάλαιο 8**, περιλαμβάνονται γενικά συμπεράσματα και προοπτικές που προκύπτουν από τη διατριβή.

2 ΑΡΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΧΩΡΙΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΣΩ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΠΑΝΑΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ, ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ (ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΧΑΜΟΓΕΛΟ), ΣΕ ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ PUSHBROOM.

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η ζήτηση για δεδομένα υψηλής φασματικής και χωρικής ανάλυσης από υπερφασματικούς αισθητήρες αυξάνεται σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και επαγγελματικών πεδίων. Αυτό έχει ως συνέπεια να αυξάνεται και η ανάγκη για υψηλής ποιότητας και αξιοπιστίας υπερφασματικά δεδομένα (HSI, HyperSpectral imagery). Για να εξασφαλιστεί η καλή ποιότητα των δεδομένων, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια σειρά διορθώσεων κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας τους, προκειμένου να εξαλειφθούν οι φασματικές και χωρικές παραμορφώσεις στα δεδομένα. Αυτές οι διορθώσεις περιλαμβάνουν ραδιομετρικές, ατμοσφαιρικές και γεωμετρικές διορθώσεις και την εφαρμογή τεχνικών απομάκρυνσης και φασματικής επαναδειγματοληψίας για δυσλειτουργικά και "χαλασμένα" εικονοστοιχεία. Οι ραδιομετρικές διορθώσεις είναι απαραίτητες για τη δημιουργία δεδομένων απόλυτης ανάκλασης και εκπομπής, τα οποία θα οδηγήσουν σε αξιόπιστες αντιστοιχίσεις / συσχετίσεις με τις φυσικές ιδιότητες της μετρούμενης επιφάνειας. Περιλαμβάνουν βαθμονόμηση του αισθητήρα, μεθόδους διόρθωσης της γωνίας του ήλιου που χρησιμοποιούν κυρίως το ημίτονο της ζενίθειας γωνίας του, καθώς και μεθόδους για την αφαίρεση των επιδράσεων του ηλιακού φωτισμού [Zhaoming Z. et al, 2017] που προκαλούνται από την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους (εμπειρική μέθοδος, μέθοδος Minnaert κλπ).

Η ατμοσφαιρική διόρθωση επικεντρώνεται στην εκτίμηση της ακτινοβολίας που φεύγει από το έδαφος. Αφαιρεί την επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που καταγράφεται στον αισθητήρα, η οποία κυρίως οφείλεται σε αερολύματα, υδρατμούς και σκόνη. Πολλά ευρέως χρησιμοποιούμενα πακέτα λογισμικού, όπως τα ATREM, ACORN, FLAASH, ATCOR κλπ, έχουν αναπτυχθεί για την ατμοσφαιρική διόρθωση υπερφασματικών δεδομένων. Ορισμένα από αυτά περιλαμβάνουν διορθώσεις για θολερότητα και αμφίδρομη ανάκλαση.

Κατά την καταγραφή μιας απεικόνισης προκαλούνται πάντοτε θόρυβοι (Stripe noises) οι οποίοι οφείλονται σε αισθητήρες που παρουσιάζουν ανωμαλίες στις τεχνικές καταγραφής. Με τον ίδιο τρόπο και η ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία πολλαπλών κυκλωμάτων CCD (Charge-Coupled Device) στους υπερφασματικούς αισθητήρες, οδηγεί σε σοβαρούς θορύβους λωρίδων, ιδιαίτερα με τη γήρανση των αισθητήρων. Για την απομάκρυνση των θορύβων αυτών χρησιμοποιούνται μέθοδοι βαθμονόμησης και έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες στατιστικές μέθοδοι [Duan et al., 2013]. Μεμονωμένες γραμμές που λείπουν από την εικόνα καταγραφής, προκαλούνται από σφάλματα είτε στη δειγματοληψία ή τον εξοπλισμό σάρωσης, στη μετάδοση ή την εγγραφή δεδομένων εικόνας ή/και στην αναπαραγωγή του μέσου που περιέχει τα δεδομένα. Για τη φασματική επαναδειγματοληψία χρησιμοποιούνται μέθοδοι παρεμβολής. Κάθε τηλεπισκοπική απεικόνιση υποφέρει από κάποιο βαθμό γεωμετρικής παραμόρφωσης. Αυτές οι παραμορφώσεις οφείλονται ως επί το πλείστον σε αλλαγές στη θέση του αισθητήρα, στην περιστροφή της γης, ακόμη και στο ανάγλυφο του εδάφους. Οι γεωμετρικές διορθώσεις στοχεύουν στην άρση αυτών των σφαλμάτων.

Απαιτείται ακριβής γνώση της φασματικής βαθμονόμησης των υπερφασματικών αισθητήρων για τη βέλτιστη επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων. Η φασματική βαθμονόμηση απαιτεί σύγκριση μεταξύ του οργάνου μέτρησης και ενός «απόλυτου» προτύπου αναφοράς γνωστής ακρίβειας. Παρέχει πληροφορίες για το κεντρικό μήκος κύματος των καναλιών και τις αντίστοιχες συναρτήσεις φασματικής απόκρισης των οργάνων. Ωστόσο, οι πληροφορίες βαθμονόμησης των φασματικών χαρακτηριστικών που παρέχονται από τον κατασκευαστή, ενδέχεται να διαφέρουν από τα πραγματικά φασματικά χαρακτηριστικά του οργάνου, κυρίως λόγω της γήρανσης των εξαρτημάτων του οργάνου ή/και των άσχημων ευθυγραμμίσεων μεταξύ της διάταξης των ανιχνευτών και της σχισμής διέλευσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία βρίσκεται εντός του δέκτη. Το τελευταίο προκαλείται από μηχανικές διαταραχές κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δέκτη [Guanter et al., 2006]. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, απαιτείται τακτική φασματική επαναβαθμονόμηση. Πολλές φορές αυτό μπορεί να μην είναι δυνατό λόγω του υψηλού κόστους ή του χρόνου που απαιτείται, ενώ για διαστημικά υπερφασματικά φασματόμετρα αυτό μπορεί να είναι πρακτικά αδύνατο.

Ως εκ τούτου, η φασματική διακρίβωση των υπερφασματικών αισθητήρων είναι συχνά απαραίτητη για την ενημέρωση των φασματικών χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν στο εργαστήριο πριν από τη λειτουργία του δέκτη, και για την άρση φασματικών και χωρικών εσφαλμένων καταχωρίσεων, όπως το φασματικό χαμόγελο (spectral smile) και το φαινόμενο keystone. Το φασματικό χαμόγελο ή το φαινόμενο φασματικής καμπυλότητας είναι μια φασματική παραμόρφωση που συνήθως επηρεάζει τα υπερφασματικά δεδομένα που συλλέγονται από υπερφασματικούς αισθητήρες λόγω λανθασμένων ευθυγραμμίσεων στη διάταξη των ανιχνευτών και της σχισμής διέλευσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, είναι μια μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος της φασματικής περιοχής και μπορεί να περιγραφεί (δείτε βοηθητικά και την Εικόνα 2-2) ως μια συνάρτηση του αριθμού της στήλης της εγκάρσιας στην κατεύθυνση λήψης (Yokoya et al., 2010). Εμφανίζεται ως μια βαθμιαία μεταβαλλόμενη φωτεινότητα στην πρώτη συνιστώσα του μετασχηματισμού ελάχιστου θορύβου (MNF) [Green et al., 1988] και σε ακραίες περιπτώσεις, η διακύμανση της φωτεινότητας που προκαλείται, είναι ορατή ακόμη και στην αρχική απεικόνιση. Το φασματικό χαμόγελο μπορεί να οδηγήσει σε στρεβλά αποτελέσματα, ιδιαίτερα μετά την εφαρμογή στην απεικόνιση, μεθόδων προεπεξεργασίας και επεξεργασίας, όπως π.χ. να επηρεάσει αρνητικά τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης [Saenz et al., 2002], να μειώσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων ταξινόμησης [Dadon A. et al., 2010], να επηρεάσει τα αποτελέσματα των δεικτών βλάστησης, όπως του δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ή άλλων υπερφασματικών δεικτών βλάστησης ή χρωστικών [Aktaruzzaman, 2008; Meroni et al., 2010]. Επομένως, απαιτείται η ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων διόρθωσης των απεικονίσεων αυτών.

Οι περισσότερες μέθοδοι διόρθωσης του φασματικού χαμόγελου έως σήμερα, αποτελούνται από δύο διακριτά στάδια α) το στάδιο ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης του φαινομένου και β) το στάδιο διόρθωσής του [Busetto et al., 2011; Richter et al., 2011; Dadon A. et al., 2010; Guanter et al., 2009; Yokoya et al., 2010; Aktaruzzaman, 2008]. Γενικά, για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό του φασματικού χαμόγελου, οι περισσότερες προσεγγίσεις αξιοποιούν τα χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικής απορρόφησης, στη ζώνη “A” απορρόφησης του οξυγόνου

(ζώνη O₂-A) περίπου στα 759-770 nm, για αισθητήρες που λειτουργούν στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο (VNIR). Η σύγκριση των μετρούμενων φασματικών δεδομένων, με δεδομένα προσομοίωσης ακτινοβολίας στον αισθητήρα που προέρχονται από ένα μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας (π.χ. MODTRAN4, 6S) οδηγεί στην ποσοτικοποίηση του φασματικού χαμόγελου. Αν και το χαμόγελο υπολογίζεται σε ένα μόνο μήκος κύματος, σε αυτό που αναμένεται η υψηλότερη ακρίβεια, θεωρείται ότι περιγράφει το πλήρες φασματικό εύρος που καλύπτεται από τον αισθητήρα.

Ο [Aktaruzzaman Md., 2008] πρότεινε μια μέθοδο διόρθωσης χαμόγελου, που βασίζεται στην απεικόνιση (scene-based). Σε αυτή την προσέγγιση, προκειμένου να ανιχνευθεί και να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια το φασματικό χαμόγελο, υπολογίστηκαν τα μέσα φάσματα στηλών των φασματικών ζωνών που αντιστοιχούν στη ζώνη O₂-A, σε μια ομοιογενή περιοχή μιας απεικόνισης Hyperion και συγκρίθηκαν με ένα σύνολο φασμάτων αναφοράς, με γνωστές μετατοπίσεις, που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας MODTRAN4. Η ελάχιστη φασματική γωνία ανιχνεύει εκείνο το συγκεκριμένο φάσμα αναφοράς, το οποίο σε σύγκριση με τα δεδομένα της απεικόνισης, θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος της φασματικής μετατόπισης ανά στήλη της απεικόνισης. Η διόρθωση του φασματικού χαμόγελου υλοποιήθηκε με τον υπολογισμό νέας επαναδειγματοληψίας συχνοτήτων χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις φασματικής απόκρισης του αισθητήρα, οι οποίες αφορούν μετατοπίσεις κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας του αισθητήρα.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα μέθοδος για τη φασματική διακρίβωση με βάση την απεικόνιση, παρουσιάστηκε από τους [Guanter et al., 2009]. Αυτή η μέθοδος αξιοποιεί όπως και η προηγούμενη μέθοδος, τη ζώνη "A" απορρόφησης του οξυγόνου O₂-A, προκειμένου να ανακτήσει τη μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος και το πλήρες εύρος του κάθε καναλιού για κάθε στήλη της απεικόνισης. Υπολογίζεται η μέση τιμή ακτινοβολίας στον αισθητήρα κάθε στήλης και οι αντίστοιχες τιμές ανακλαστικότητας της επιφάνειας υπολογίζονται μετά από ατμοσφαιρική διόρθωση, χρησιμοποιώντας την ονομαστική φασματική βαθμονόμηση του οργάνου. Θεωρήθηκε ότι μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση, η επιφανειακή ανακλαστικότητα των φυσικών στόχων αναμένεται να είναι ομαλή (να ακολουθεί κανονική κατανομή) και τυχόν σημεία καμπής όπως αιχμές ή βυθίσεις στις ζώνες ατμοσφαιρικής απορρόφησης, οφείλονται σε φασματικές ατέλειες που προκαλούνται από φασματική μετατόπιση και μεταβολή του εύρους του φάσματος. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν σωστά αυτές οι ατέλειες, οι συχνότητες (φάσματα) ανάκλασης για κάθε στήλη εξομαλύνονται, χρησιμοποιώντας ένα χαμηλοπερατό φίλτρο και τεχνικές παρεμβολής. Στη συνέχεια, το φάσμα εξομάλυνσης της ανάκλασης λαμβάνεται ως αναφορά για τον υπολογισμό της φασματικής μετατόπισης και της φασματικής διεύρυνσης του εύρους του καναλιού. Ο υπολογισμός χρησιμοποιεί μια συνάρτησης κόστους την οποία ελαχιστοποιεί.

Με βάση την παραπάνω μέθοδο, οι [Richter et al., 2011] υπολογίζουν τη μετατόπιση του φασματικού χαμόγελου κατά μήκος μιας συστοιχίας ανιχνευτών, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά στοιχεία, όπως το μοντέλο σχεδιασμού του οργάνου ή αποτελέσματα από εργαστηριακές μετρήσεις. Πρότειναν μια πολυωνυμική προσέγγιση τετάρτης τάξεως, των συντελεστών προσαρμογής του μοντέλου διόρθωσης του φασματικού χαμόγελου, για κατάλληλα κανάλια σε

περιοχές ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Αυτοί οι συντελεστές περιγράφουν τη φασματική μετατόπιση των συναρτήσεων φασματικής απόκρισης στις ζώνες ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Όταν εκτιμηθούν, οι συντελεστές αυτοί παρεμβάλλονται και χρησιμοποιούνται σε όλες τις άλλες φασματικές ζώνες του ίδιου ανιχνευτή ή φασματομέτρου. Όπως και με την μέθοδο των [Guanter et al., 2009], η μέθοδος των [Richter et al., 2011] χρησιμοποιεί βαθμονομημένα δεδομένα απεικόνισης, στατιστικά στοιχεία της απεικόνισης, υπολογισμό ενός συνόλου φασματικά μετατοπισμένων φασμάτων αναφοράς και μια διαδικασία βελτιστοποίησης (στατιστικής) για τον υπολογισμό της φασματικής μετατόπισης με βάση το συντελεστή συσχέτισης του Pearson.

Οι [Yokoya et al., 2010] χρησιμοποίησαν μεθόδους που αναφέρονται μέσα στο εικονοστοιχείο (subpixel) για να ανιχνεύσουν ιδιότητες του φασματικού χαμόγελου. Το χαμόγελο ανιχνεύεται με την εκτίμηση της παραμόρφωσης, της γραμμής ατμοσφαιρικής απορρόφησης, στην απεικόνιση του φάσματος. Εφάρμοσαν δύο στατιστικές μεθόδους εκτίμησης μέσα στο εικονοστοιχείο, τη μέθοδο κανονικοποιημένης διασταυρούμενης συσχέτισης (NCC, Normalized Cross Correlation) και τη μέθοδο συσχέτισης φάσης και χρησιμοποίησαν κυβική παρεμβολή spline, προκειμένου να διορθώσουν φασματικές υπογραφές από την παραμόρφωσή τους.

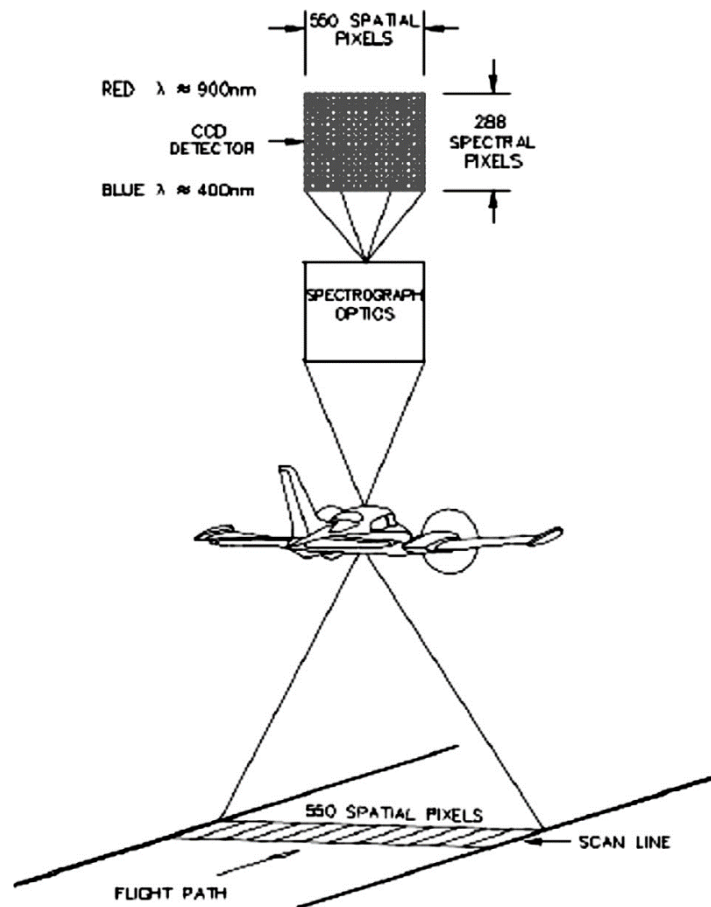
Μια άλλη μέθοδος, η μέθοδος διόρθωσης με τη βοήθεια της γραμμής τάσης (Trend Line Smile Correction, TLSC), προτάθηκε από τους [Dadon A. et al., 2010] για τη διόρθωση των παραμορφώσεων του χαμόγελου σε απεικονίσεις Hyperion. Η προσέγγισή τους υποθέτει ότι, μετά από την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού Minimum Noise Fraction (MNF), η πρώτη ιδιοεικόνα MNF-1 (eigenimage) ενσωματώνει την εγκάρσιως βαθμιαία μεταβαλλόμενη φωτεινότητα όλων των φασματικών καναλιών που επηρεάζονται από το φαινόμενο του χαμόγελου. Η ιδιοτιμή του χαμόγελου στη μετασχηματισμένη MNF ιδιοεικόνα, μπορεί στη συνέχεια να θεωρηθεί ως ένα μέτρο του θορύβου, λόγω της σχέσης του με την αναλογία σήματος προς θόρυβο. Προκειμένου να ανιχνευθεί και να ποσοτικοποιηθεί το φασματικό χαμόγελο στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται ένας δείκτης που προέρχεται από την ζώνη "A" απορρόφησης του οξυγόνου (την O₂-A), η οποία βρίσκεται περίπου στα 759-770 nm. Συγκεκριμένα, για κάθε στήλη μιας μετασχηματισμένης συνιστώσας MNF, υπολογίζεται η μέση παράγωγος που προκύπτει από τις τιμές της φασματικής ζώνης δεξιά της ζώνης O₂-A (βλέπε και Εικόνα 2-9). Το προκύπτον γράφημα των μέσων τιμών των παραγώγων, χρησιμοποιείται ως ενδεικτικός δείκτης προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι φασματικές παραμορφώσεις του χαμόγελου στην απεικόνιση. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας επιτόπιες μετρήσεις, ένα μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας MODTRAN4 και τις τιμές ανάκλασης που έχουν καταγραφεί στον αισθητήρα, στην περιοχή O₂-A, υπολογίζονται τιμές αναφοράς και συγκρίνονται με τις τιμές για την ανάκτηση της στήλης, η οποία επηρεάζεται λιγότερο από τις παραμορφώσεις του φασματικού χαμόγελου (στήλη ελάχιστης κλίμακας, Minimum Scale Column, MSC). Στη συνέχεια, μια γραμμή τάσης (Trend Line, TL) προσαρμόζεται στο γράφημα των τιμών των παραγώγων. Αυτή η τάση TL μετακινείται έως ότου μηδενιστεί η τιμή παραγώγου της MSC και στη συνέχεια κανονικοποιείται στο εύρος των μετασχηματισμένων τιμών. Κάθε εικονοστοιχείο της μετασχηματισμένης MNF-1 διορθώνεται ανάλογα με την απόστασή του από τη στήλη MSC. Η διορθωμένη απεικόνιση λαμβάνεται μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού MNF. Η μέθοδος TLSC για τη ζώνη MNF-1 παρέχει γρήγορη και αποτελεσματική επεξεργασία αλλά παρουσιάζει δυο βασικά μειονεκτήματα: α) Συνήθως οι επιτόπιες (in situ) μετρήσεις δεν είναι

διαθέσιμες και β) η μετατροπή της ακτινοβολίας (radiance) σε τιμές ανακλαστικότητας (reflectance) στον αισθητήρα απαιτεί τη διαθεσιμότητα του μοντέλου MODTRAN, το οποίο υπολογίζει την ατμοσφαιρική μετάδοση και ακτινοβολία, για συχνότητες από 0 έως 50000 cm^{-1} (μήκη κύματος από 200 nm έως θεωρητικά το άπειρο) [Xu et al., 2008] αλλά και άλλων ατμοσφαιρικών παραμέτρων οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται τιμές ανακλαστικότητας για την ανάκτηση της στήλης MSC, αν και η μέθοδος εφαρμόζεται σε καταγεγραμμένα δεδομένα ακτινοβολίας.

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα αναφερθέντα μειονεκτήματα, προτείνεται μια τροποποιημένη μέθοδος TLSC. Η προτεινόμενη μέθοδος διόρθωσης του φασματικού χαμόγελου, χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής απορρόφησης της O_2-A για να ανακτήσει πληροφορίες σχετικές με τη φασματική ανομοιομορφία των ανιχνευτών για την παραγωγή εικόνας υψηλής φασματικής ανάλυσης, και εφαρμόζει δύο κριτήρια στο γράφημα των μέσων τιμών των παραγώγων, οι οποίες προκύπτουν από τις αντίστοιχες φασματικές ζώνες δεξιά της ζώνης απορρόφησης O_2-A , προκειμένου να προσδιορίσει τη στήλη MSC. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των διακυμάνσεων φωτισμού κατά τη διάρκεια της πτήσης (τεχνουργήματα φωτισμού) στον υπολογισμό των δεικτών ποσοτικοποίησης του φασματικού χαμόγελου και διατυπώνονται κάποια συμπεράσματα, σχετικά με την επίδραση που έχει η κάλυψη γης, στις διορθωμένες απεικονίσεις.

2.2 Η επιρροή του φωτισμού κατά τη λήψη των εναέριων υπερφασματικών απεικονίσεων στη διόρθωση του φασματικού χαμόγελου.

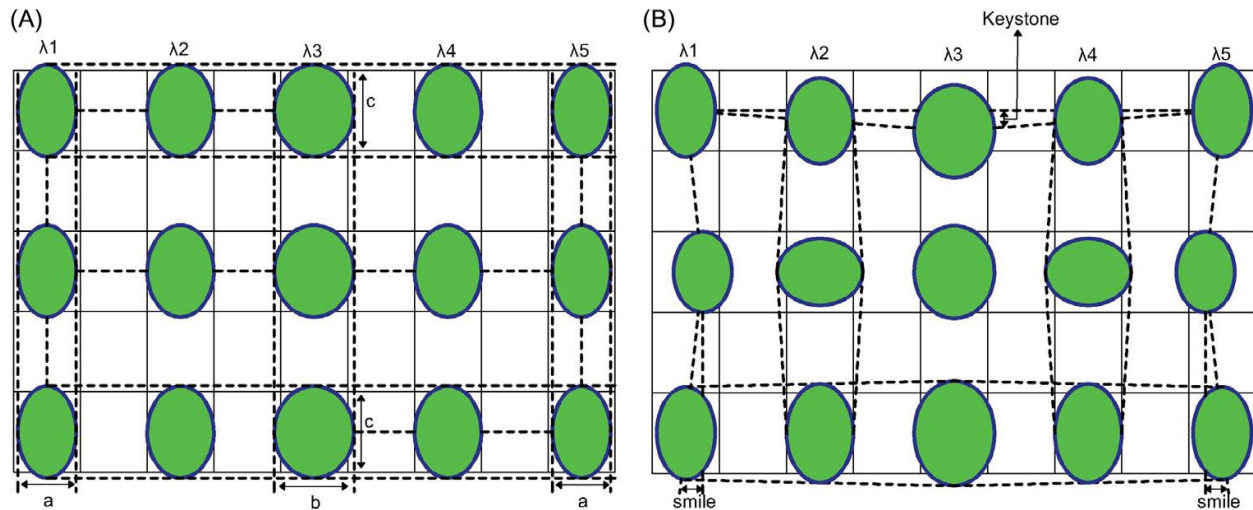
Για τη συλλογή υπερφασματικών απεικονίσεων χρησιμοποιούνται συνήθως υπερφασματικοί σαρωτές (pushbroom scanners). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί έναν ανιχνευτή δύο κατευθύνσεων όπου στη μία (πρώτη) κατεύθυνση συλλέγει τιμές έντασης της ακτινοβολίας για εικονοστοιχεία που βρίσκονται κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας του αισθητήρα (επομένως κατά μήκος της λωρίδας της απεικόνισης), ενώ ταυτόχρονα στη δεύτερη κατεύθυνση του ανιχνευτή, συγκεντρώνει για αυτά τα εικονοστοιχεία, όλες τις διαθέσιμες φασματικές τους πληροφορίες. Η σάρωση στη χωρική διάσταση κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας πραγματοποιείται μέσω της κίνησης της ίδιας της πλατφόρμας (Εικόνα 2-1). Το δισδιάστατο πλαίσιο τοποθέτησης των ανιχνευτών παρουσιάζει ατέλειες στο φασματικό και στο χωρικό πεδίο, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε οπτικές εκτροπές και ασυνέπειες δειγματοληψίας, στο φασματικό και στο χωρικό πεδίο. Το αποτέλεσμα είναι μια ανομοιομορφία της συνάρτησης διασποράς σημείου (PSF, Point Spread Function) λόγω εσφαλμένων φασματικών και χωρικών εσφαλμένων καταχωρίσεων, η οποία αποδίδεται με το φασματικό χαμόγελο και το φαινόμενο keystone [Nieke et al., 2008].



Εικόνα 2-1: Τα χαρακτηριστικά του σαρωτή CASI-550 απεικόνισης. Πηγή:Instrument Manual ITRES CASI-550

Ως συνέπεια των ανωτέρων παραμορφώσεων, έχει γίνει προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση της συνάρτησης PSF ή ισοδύναμα, να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση της συνάρτησης χωρικής απόκρισης (SRF, Spatial Frequency Response) του ανιχνευτή. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο να παραχθούν πανομοιότυπες συναρτήσεις PSF σε όλο το τμήμα του ηλεκτομαγνητικού φάσματος, στο οποίο ευαισθητοποιείται ο αισθητήρας, αλλά και στο χωρικό πεδίο, το ιδανικό φάσμα που παράγεται από έναν υπερφασματικό σαρωτή, θα παρουσιάζει παραλλαγές στις συναρτήσεις PSF, σε όλες τις πιθανές φασματικές και χωρικές κατευθύνσεις, οι οποίες θα εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά [Mouroulis P., 1999]. Ιδεατά, όλα τα σημεία της απεικόνισης θα βρίσκονται μέσα σε τέλεια ορθογώνια και θα ευθυγραμμίζονται με τα στοιχεία του (φωτο)ανιχνευτή, καθώς επίσης το πλάτος της συνάρτησης PSF, για οποιοδήποτε μήκος κύματος, θα είναι σταθερό, ανεξάρτητα από το πεδίο (Εικόνα 2-2A). Για τα μικρότερα και μεγαλύτερα μήκη κύματος, όλη η ενέργεια (ακτινοβολία) θα καταλήγει στο αντίστοιχο ορθογώνιο, ενώ για τα μεσαία μήκη κύματος, μέρος της ενέργειας θα καταλήγει στο γειτονικό ορθογώνιο [Høye et al., 2015]. Το ύψος της PSF είναι σταθερό, ανεξάρτητο από το μήκος κύματος και το πεδίο [Mouroulis P., 1999]. Ωστόσο, σε ένα ρεαλιστικό σενάριο, το φάσμα παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα (Εικόνα 2-2B). Κατά μήκος των σηλών λ1 και λ5, τα κεντροειδή των PSF δεν είναι ευθυγραμμισμένα και αυτό καταδεικνύει την παρουσία του φασματικού χαμόγελου. Επίσης, το φάσμα της πρώτης σειράς των ανιχνευτών δεν είναι

ευθυγραμμισμένο, αν και το φάσμα της μεσαίας σειράς είναι, και αυτό καταδεικνύει το λεγόμενο keystone. Στην Εικόνα 2-2B, οι στήλες λ1 και λ5 δείχνουν τη διακύμανση στο πλάτος της συνάρτησης PSF σε σχέση με τη θέση του στόχου στο πεδίο.

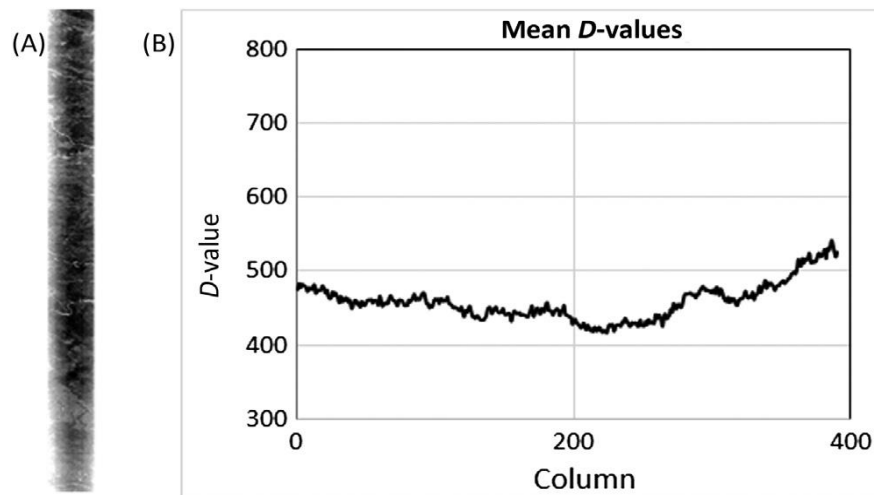


Εικόνα 2-2 : (A) Το ιδανικό φάσμα που θα έπρεπε να παράγεται από ένα σαρωτή και (B) φασματικό χαμόγελο, keystone και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις της συνάρτησης PSF.

Η παραμόρφωση από το φασματικό χαμόγελο μπορεί να προσεγγιστεί με μια πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού, η οποία παρουσιάζει ένα σημείο καμπής. Η τιμή της συνάρτησης είναι η φασματική πληροφορία, η οποία ποικίλλει ανάλογα με τη θέση του εικονοστοιχείου που βρίσκεται κατά πλάτος (swath) της διαδρομής της απεικόνισης. Το σημείο καμπής μπορεί να οριοθετηθεί είτε εντός της περιοχής, που ορίζεται από το πρώτο και το τελευταίο εικονοστοιχείο της διαδρομής, είτε εκτός αυτής της περιοχής (Hong et al., 2017). Το χαμόγελο μπορεί να περιγραφεί ως η μέγιστη φασματική εκτροπή (μετατόπιση) μεταξύ του σημείου καμπής και των εικονοστοιχείων κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας. Για εικόνες Hyperion, για παράδειγμα, με φασματική ανάλυση 10 nm, το φασματικό χαμόγελο έχει υπολογιστεί ότι ποικίλλει από 2.6 έως 3.6 nm στο κανάλι VNIR (Visible to Near Infrared, κοντινό -στο ορατό- υπέρυθρο κανάλι) και περίπου 1 nm στην περιοχή των υπέρυθρων βραχέων κυμάτων (Short Wave InfraRed, SWIR) [Oskoueï and Babakan, 2016]. Όσο υψηλότερη είναι η φασματική ανάλυση της υπερφασματικής απεικόνισης, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του χαμόγελου στην απεικόνιση. Ωστόσο, ακόμη και για υπερφασματικές απεικονίσεις με υψηλή φασματική ανάλυση, το χαμόγελο δεν είναι εμφανές σε μία μόνο φασματική περιοχή (κανάλι). Έτσι χρησιμοποιούνται δύο δείκτες για την ανίχνευση και την ποσοτικοποίηση του φασματικού χαμόγελου: α) η διαβάθμιση φωτεινότητας στην πρώτη συνιστώσα του μετασχηματισμού MNF (MNF-1 ιδιοεικόνα) και β) η διαβάθμιση φωτεινότητας των μέσων τιμών της κάθε στήλης εκείνης της απεικόνισης, η οποία προκύπτει από την αφαίρεση της φασματικής ζώνης (κανάλι) που επηρεάζεται από την απορρόφηση αερίων (O_2 ή CO_2) και μιας γειτονικής φασματικής ζώνης, γύρω από την περιοχή απορρόφησης, σχηματίζοντας το δείκτη τιμών D (δείκτης D-values). Στην

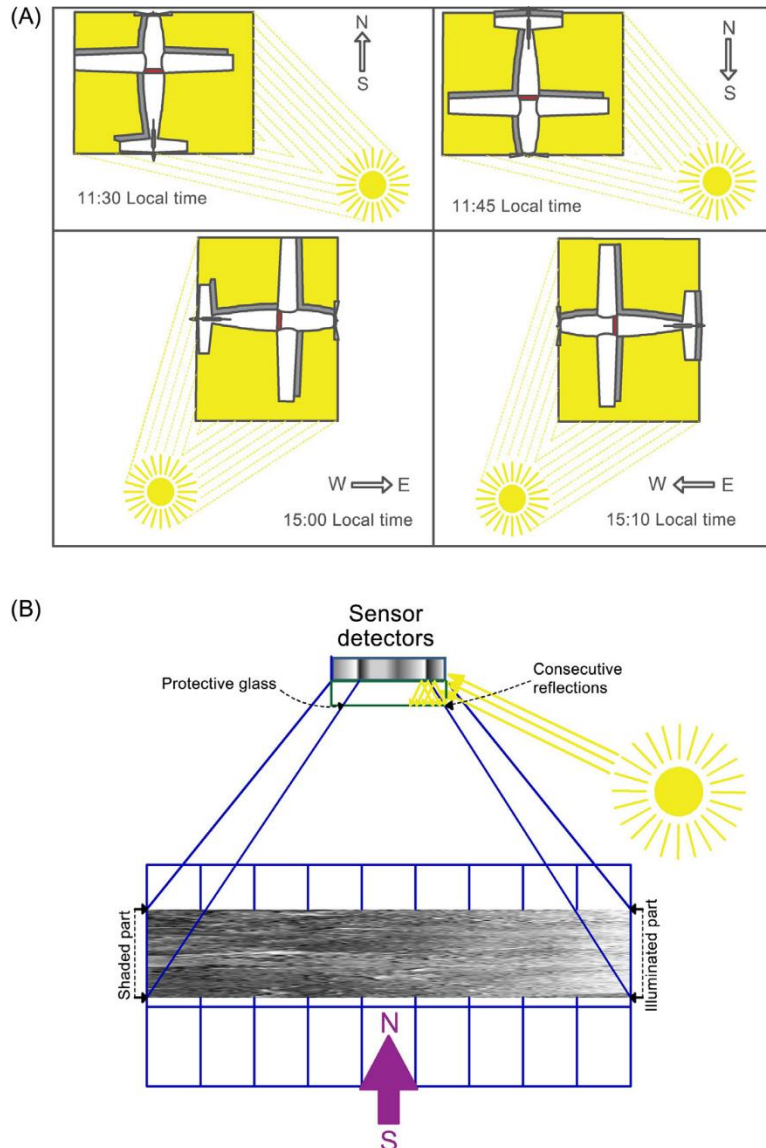
έρευνα αυτή, χρησιμοποιείται η ζώνη “A” απορρόφησης του οξυγόνου (περίπου στα 759-770 nm).

Η πρώτη ιδιοεικόνα MNF-1 του μετασχηματισμού MNF στην οποία παρουσιάζεται το φασματικό χαμόγελο, διακρίνεται στην Εικόνα 2-3A. Οι διαβαθμίσεις της φωτεινότητας της ιδιοεικόνας MNF-1 και το προφίλ τους, κατά μήκος της απεικόνισης, ποικίλλουν ανάλογα με την τιμή της φασματικής παραμόρφωσης που προκαλείται από το χαμόγελο. Αυτές οι διαβαθμίσεις λέγονται και τεχνουργήματα του φασματικού χαμόγελο και χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση του χαμόγελο και τη μεταβαθμονόμηση του αισθητήρα.



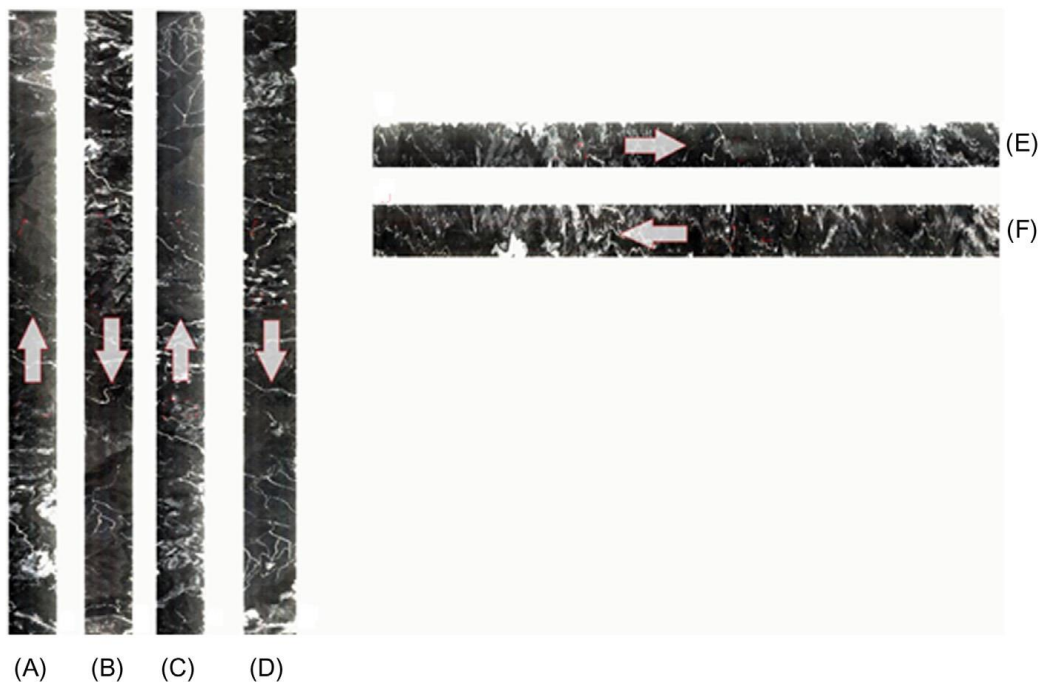
Εικόνα 2-3: (A) Η ιδιοεικόνα MNF-1 και (B) ο δείκτης D-values.

Ωστόσο, πειράματα που πραγματοποιήσαμε, έδειξαν ότι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν επίσης να επηρεάσουν τα τεχνουργήματα του φασματικού χαμόγελο. Η Εικόνα 2-4A δείχνει τέσσερις πιθανούς προσανατολισμούς της εναέριας πλατφόρμας κατά τη λήψη υπερφασματικών δεδομένων, συγκεκριμένα i) Νότος - Βορράς, ii) Βορράς - Νότος, iii) Δύση - Ανατολή και iv) Ανατολή - Δύση. Η θέση του υπερφασματικού αισθητήρα σημειώνεται με κόκκινο χρώμα. Οι κίτρινες περιοχές είναι αυτές που φωτίζονται από τον ήλιο, ενώ οι γκριζες είναι οι σκιασμένες περιοχές. Είναι προφανές ότι η κάτω πλευρά της ατράκτου (στην οποία έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας περιβαλλόμενος από προστατευτικό γυαλί) δεν φωτίζεται ομοιόμορφα και εξαρτάται από τον προσανατολισμό της πλατφόρμας.



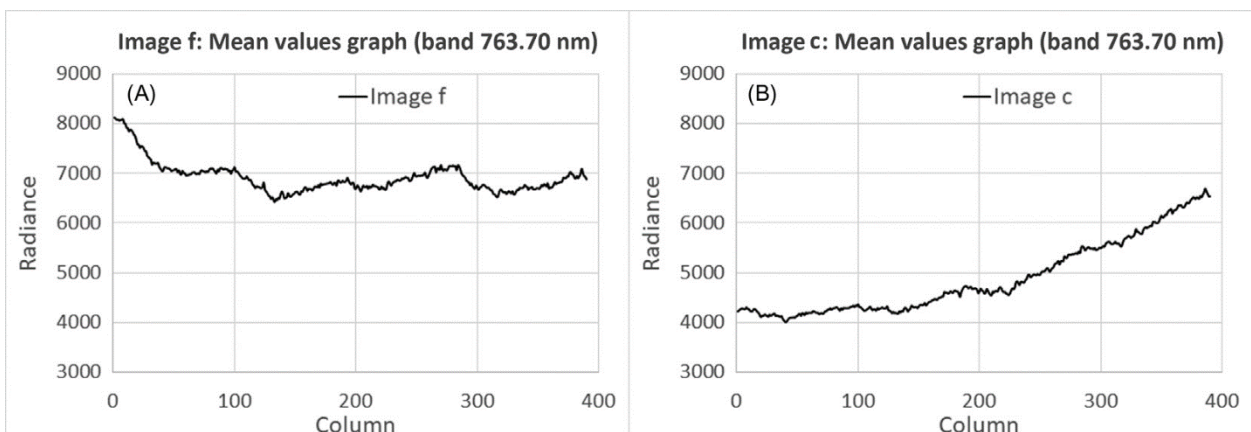
Εικόνα 2-4: Παραδείγματα των τεχνουργημάτων φωτισμού του ήλιου (A) για διαφορετικούς προσανατολισμούς και χρόνους λήψης της αερομεταφερόμενης πλατφόρμας, (B) λόγω ανομοιόμορφου φωτισμού του προστατευτικού γυαλιού του αισθητήρα και η επίδρασή του στην ποιότητα της εικόνας.

Εφόσον οι παραπάνω αναφερθείσες ραδιομετρικές παραμορφώσεις παρουσιάζονται συστηματικές σε όλες τις ληφθείσες απεικονίσεις, πρέπει να είναι το αποτέλεσμα ενός φαινομένου περίθλασης που προκαλείται από την έκθεση του προστατευτικού γυαλιού του αισθητήρα, στο κάτω μέρος της αερομεταφερόμενης πλατφόρμας (του αεροσκάφους), από το ηλιακό φως (Εικόνα 2-4B). Αυτό το φαινόμενο περίθλασης, φαίνεται να λαμβάνει χώρα μόνο όταν ο ήλιος βρίσκεται στο πίσω μέρος της αερομεταφερόμενης πλατφόρμας [περιπτώσεις (i) και (iii)]. Στις περιπτώσεις (ii) και (iv), το γυαλί σκιάζεται από την άτρακτο ή τα φτερά, αποτρέποντας έτσι το φαινόμενο της περίθλασης. Με βάση αυτό, συνήχθη το συμπέρασμα ότι για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση του αισθητήρα, η λήψη της υπερφασματικής απεικόνισης θα πρέπει να γίνει με την αερομεταφερόμενη πλατφόρμα να κατευθύνεται προς τον ήλιο, ώστε να μειωθούν οι διακυμάνσεις φωτισμού της εισερχόμενης ακτινοβολίας.



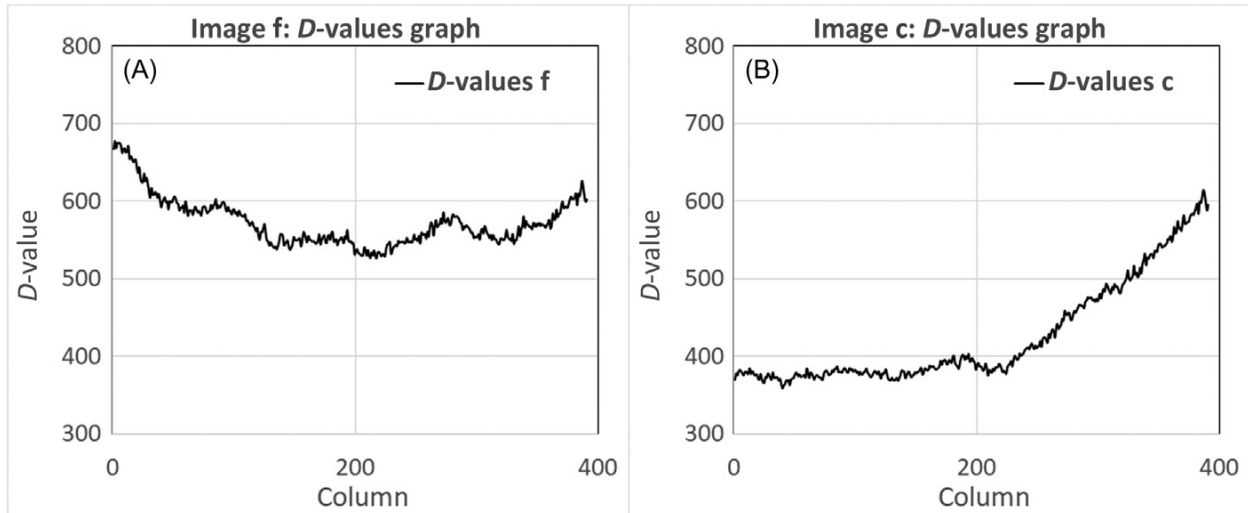
Εικόνα 2-5: Υπερφασματικές απεικονίσεις CASI-550 από αερομεταφερόμενη πλατφόρμα. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση πτήσης της πλατφόρμας.

Οι επιπτώσεις στην καταγεγραμμένη ακτινοβολία είναι εμφανείς στις υπερφασματικές απεικονίσεις του αερομεταφερόμενου δέκτη CASI-550 (απεικονίσεις (a),(b),(c),(d),(e) και (f)). Οι εικόνες (a), (c) με κατεύθυνση πτήσης Νότο - Βορρά και η (e) με κατεύθυνση Δύση - Ανατολή, παρουσιάζουν μια διαβάθμιση φωτεινότητας κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας (Εικόνα 2-5). Το γράφημα των μέσων τιμών της κάθε στήλης στο κανάλι των 763.7 nm, για την ζώνη "A" απορρόφησης του οξυγόνου της απεικόνισης (c), δείχνει τη διακύμανση φωτεινότητας αυτής της απεικόνισης που προκαλείται από τις συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού κατά τη λήψη της απεικόνισης (Εικόνα 2-6B). Αντίθετα αυτό δεν παρατηρείται στο γράφημα της εικόνας (f) (Εικόνα 2-6A).



Εικόνα 2-6: Τεχνουργήματα φωτισμού και φασματικού χαμόγελου : α) στην εικόνα (f) και β) στην εικόνα (c).

Οι τιμές του δείκτη D-values του φασματικού χαμόγελου για τις εικόνες (f) και (c) φαίνονται στην Εικόνα 2-7.



Εικόνα 2-7: Ο δείκτης D-values α) για την εικόνα f και β) για την εικόνα c.

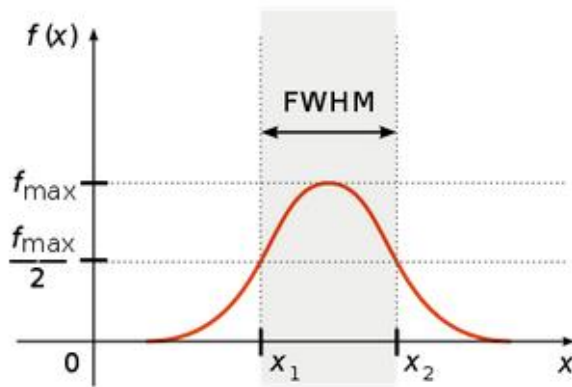
2.3 Η τροποποιημένη μέθοδος γραμμής τάσης για τη διόρθωση του φασματικού χαμόγελου.

Η προτεινόμενη τροποποιημένη μέθοδος περιλαμβάνει δύο κύρια στάδια, α) το στάδιο ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης του φασματικού χαμόγελου και β) το στάδιο διόρθωσής (αναγωγής) του. Κατά το πρώτο στάδιο, ανιχνεύεται και ποσοτικοποιείται η επίδραση του φασματικού χαμόγελου στην απεικόνιση. Για το σκοπό αυτό, υπολογίζεται ο δείκτης D-values για κάθε εικονοστοιχείο της απεικόνισης, χρησιμοποιώντας τις τιμές των καναλιών που βρίσκονται κοντά στη φασματική ζώνη O₂-A. Οι τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν την κλίση της ευθείας που σχηματίζεται από τη μέση τιμή ακτινοβολίας στη φασματική ζώνη απορρόφησης και την αντίστοιχη τιμή στη γειτονική δεξιά φασματική ζώνη, για κάθε στήλη εικονοστοιχείων (Εικόνα 2-9). Υποθέτοντας ότι το οξυγόνο είναι σχετικά ομοιόμορφα κατανομημένο στην ατμόσφαιρα κατά τη λήψη, τότε η κλίση μεταξύ της ζώνης "A" απορρόφησης του οξυγόνου και του αμέσως επόμενου καναλιού της απεικόνισης, θα πρέπει να είναι σχετικά ίδια για κάθε εικονοστοιχείο.

Οι τιμές για τον δείκτη D-values υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.1):

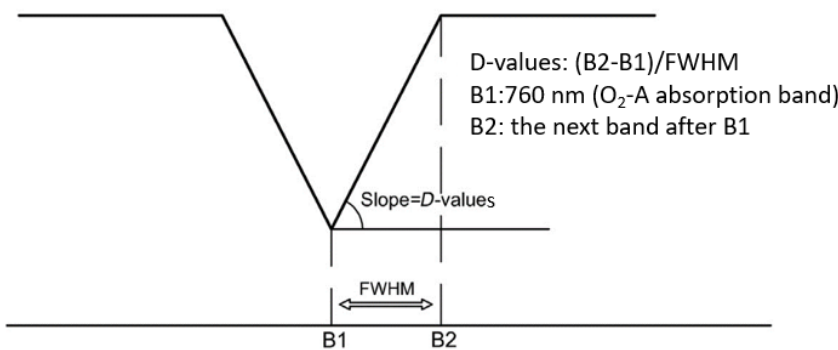
$$D - Values = (B2 - B1) / \overline{FWHM} \quad (2.1)$$

όπου το B2 είναι το κανάλι στα δεξιά της περιοχής απορρόφησης του οξυγόνου, το B1 είναι το κανάλι που είναι εγγύτερο από αριστερά του φάσματος, προς την περιοχή απορρόφησης του οξυγόνου και το FWHM (Εικόνα 2-8) αναφέρεται στο πλήρες πλάτος στο μισό της μέγιστης έντασης και χαρακτηρίζει τη φασματική διακριτική ικανότητα του κάθε καναλιού.

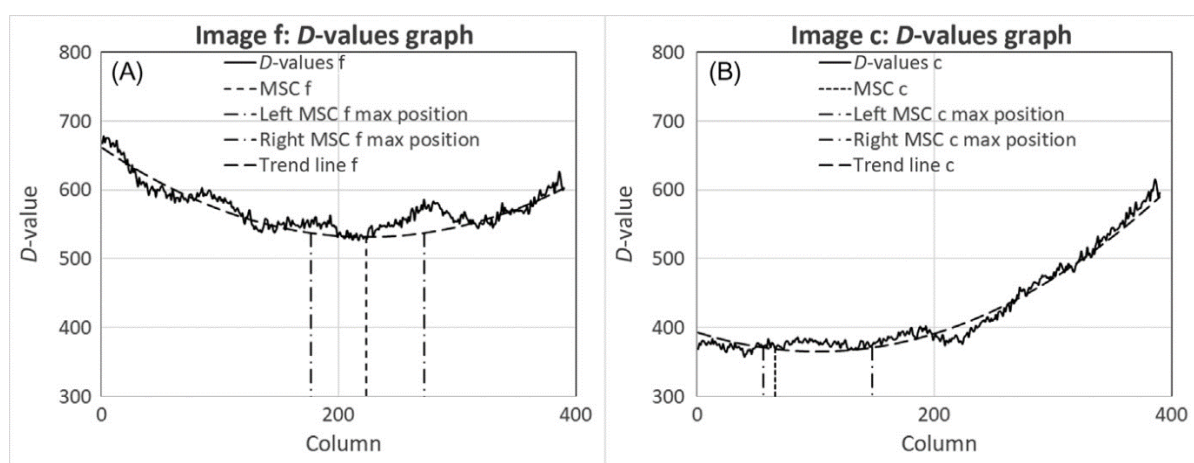


Εικόνα 2-8: Πλήρες πλάτος στο μισό της μέγιστης έντασης.

O₂-A absorption feature(760 nm)



Εικόνα 2-9: Ο δείκτης D-values στην περιοχή απορρόφησης του O₂-A, των 760 nm



Εικόνα 2-10: Ορισμός της στήλης ελάχιστης κλίμακας MSC, α) για την εικόνα f, η οποία επηρεάζεται από το φασματικό χαμόγελο, και β) για την εικόνα c, η οποία επηρεάζεται από το φασματικό χαμόγελο και τη διακύμανση του φωτισμού κατά μήκος της τροχιάς του αισθητήρα.

Προκειμένου να εντοπιστεί η στήλη ελάχιστης κλίμακας (MSC), δηλαδή αυτή που επηρεάζεται λιγότερο από το φασματικό χαμόγελο, πρώτα προσαρμόζεται ένα πολυώνυμο δεύτερης τάξης (TL) στις μέσες τιμές του δείκτη D-values. Το φασματικό χαμόγελο θα πρέπει να περιγράφεται κατά προσέγγιση από τη συνάρτηση TL. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται δύο κριτήρια για την ανάκτηση της MSC:

1. Η στήλη MSC θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στο σημείο καμπής της καμπύλης του φασματικού χαμόγελου (Εικόνα 2-10). Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις τιμές της γραμμής TL, το σημείο καμπής της TL, το TL_{infl} , είναι η στήλη που επηρεάζεται λιγότερο από το χαμόγελο και οι στήλες στις άκρες του σημείου καμπής είναι αυτές που επηρεάζονται περισσότερο. Τότε η μετατόπιση, ΔSx , για κάθε στήλη x μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Delta Sx = |TLx - TL_{infl}| \quad (2.2)$$

Το ΔSx μεγιστοποιείται για μία από τις ακραίες στήλες. Για κάθε στήλη x , ο λόγος Dx της μετατόπισής της προς τη μέγιστη μετατόπιση, ΔS_{max} , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (2.3):

$$Dx = (\Delta Sx / \Delta S_{max}) \quad (2.3)$$

Επιλέχθηκε μια τιμή αναλογίας 1% προκειμένου να προσδιοριστεί η μέγιστη αποδεκτή απόσταση από την MSC έως το σημείο καμπής. Αντικαθιστώντας αυτή την τιμή στην εξίσωση (2.3), η μέγιστη αριστερά και δεξιά θέση από το σημείο καμπής ορίζονται στο TL με βάση την εξίσωση 2.4. Μόνο στήλες με τιμές TL μικρότερες από ($MNF-1 - TL_{\Delta Sxmd}$) είναι υποψήφιες για την MSC.

$$\Delta Sxmd = \Delta S_{max} / 100 \quad (2.4)$$

2. Στο διάστημα όπως προσδιορίζεται ανωτέρω, η MSC είναι η στήλη για την οποία η TL και το γράφημα της μέσης τιμής του δείκτη D-values, επιτυγχάνουν βέλτιστη μεταξύ τους προσαρμογή (Εικόνα 2-10). Αυτό το κριτήριο είναι σημαντικό, για να μην επιλεγεί ως στήλη MSC μια οποιαδήποτε άλλη στήλη, η οποία μπορεί να επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από άλλες παραμέτρους.

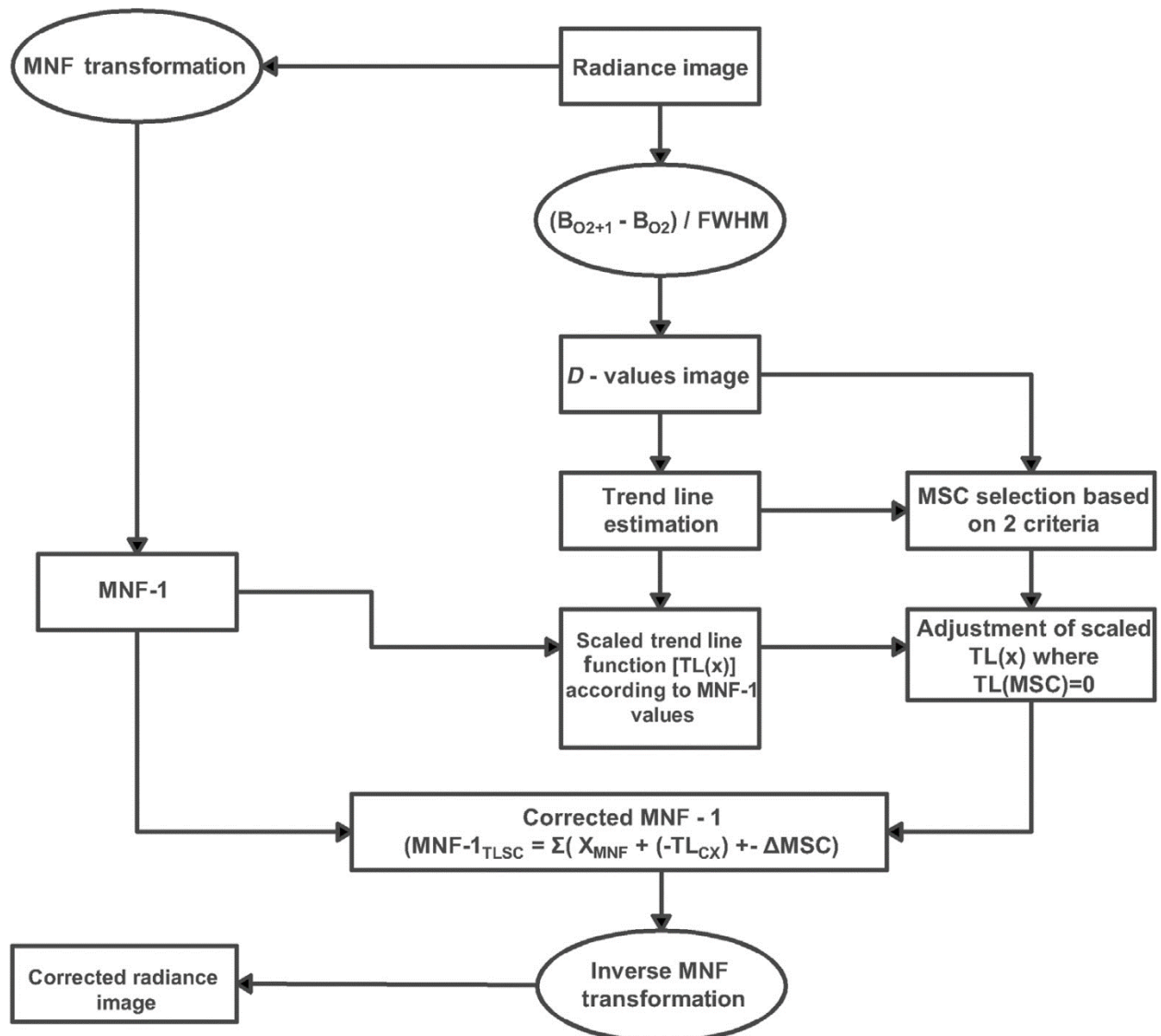
Κατά το δεύτερο αυτό στάδιο, το γράφημα και η γραμμή TL μετατοπίζονται κατακόρυφα, έως ότου εκχωρηθεί η τιμή μηδέν στο TL_{MSC} και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές διόρθωσης για την απεικόνιση, αφού κανονικοποιηθούν οι τιμές της TL στο εύρος των τιμών της μέσης στήλης

της MNF-1. Στη συνέχεια, η διόρθωση εφαρμόζεται στις τιμές όλων των εικονοστοιχείων MNF-1, μέσω της εξίσωσης:

$$MNF-1_{TLSC} = \Sigma(X_{MNF} + (-TL_{CX}) \pm \Delta MSC) \tag{2.5}$$

όπου $MNF-1_{TLSC}$ εκφράζει την τιμή για το κάθε διορθωμένο εικονοστοιχείο της ιδιοεικόνας MNF-1, X_{MNF} εκφράζει την τιμή για το κάθε αρχικό εικονοστοιχείο της ιδιοεικόνας MNF-1, TL_{CX} είναι η τιμή της στήλης της κανονικοποιημένης γραμμής TL για τη στήλη στην οποία ανήκει το εκάστοτε εικονοστοιχείο X_{MNF} και ΔMSC είναι η διαφορά μεταξύ των τιμή του TL στο MSC και της τιμής του δείκτη D-values του MSC, και τα δύο κανονικοποιημένα στο εύρος τιμών της MNF-1.

Στο τελικό στάδιο, ανακατασκευάζεται η διορθωμένη απεικόνιση χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη συνιστώσα MNF-1 και τις υπόλοιπες αρχικές ιδιοεικόνες (eigenimages) MNF. Η Εικόνα 2-11 δείχνει το διάγραμμα ροής για την προτεινόμενη μεθοδολογία TLSC.



Εικόνα 2-11: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης, τροποποιημένης μεθόδου διόρθωσης του φασματικού χαμόγελου, μέσω της γραμμής τάσης TL.

2.4 Εφαρμογή και αποτελέσματα

2.4.1 Δεδομένα

Για την έρευνα αυτή, χρησιμοποιήθηκαν έξι υπερφασματικές απεικονίσεις από αερομεταφερόμενη πλατφόρμα, χρησιμοποιώντας τον υπερφασματικό δέκτη CASI-550, πάνω από το δάσος του Ταξιάρχη, Χαλκιδική, Ελλάδα (Εικόνα 2-5). Η περιοχή παρουσιάζει τραχύ ανάγλυφο, ενώ ο ουρανός ήταν καθαρός κατά τη διάρκεια της λήψης. Οι απεικονίσεις ελήφθησαν με διαφορετικούς προσανατολισμούς της πλατφόρμας (Νότος - Βορράς, Βορράς - Νότος, Δύση - Ανατολή και Ανατολή - Δύση) ώστε να μελετηθεί και η αμφίδρομη επίδραση της ανακλαστικότητας στα τεχνουργήματα του φασματικού χαμόγελου και κατά συνέπεια στους διάφορους τύπους βλάστησης. Οι απεικονίσεις με κατεύθυνση Νότος - Βορράς και Βορράς - Νότος, ελήφθησαν το πρωί (περίπου στις 11:30 π.μ.), ενώ οι απεικονίσεις με κατευθύνσεις Δύση - Ανατολή και Ανατολή - Δύση, το απόγευμα (περίπου στις 15:00 μ.μ.). Όλες οι υπερφασματικές απεικονίσεις έχουν 72 φασματικά κανάλια, με χωρική ανάλυση 2m και φασματική ανάλυση 3.8 nm. Τα κανάλια καλύπτουν στο φάσμα, εύρος από 421.8 nm έως 975.7 nm. Κάθε απεικόνιση παρουσιάζει μια περιοχή με μήκος 10 km στην κατεύθυνση κατά μήκος της διαδρομής πτήσης, και πλάτος (μήκος λωρίδας) 810 m στην κάθετη κατεύθυνση προς τη διαδρομή πτήσης. Η διαβάθμιση του φωτισμού που προκαλείται από τον προσανατολισμό ως προς τον ήλιο, της αερομεταφερόμενης πλατφόρμας, παρατηρείται στις απεικονίσεις (A), (C) και (E) (Εικόνα 2-5). Η πρώτη ιδιοεικόνα MNF (δηλαδή η συνιστώσα MNF-1), μετά το μετασχηματισμό MNF για κάθε απεικόνιση, παρουσιάζει τις ραδιομετρικές παραμορφώσεις που προκαλούνται κυρίως από τα φαινόμενα του φασματικού χαμόγελου και της περίθλασης, κατά τη διάρκεια της λήψης (Εικόνα 2-12).



Εικόνα 2-12: Στην πρώτη συνιστώσα MNF-1 εμφανίζονται έντονα οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις του φασματικού χαμόγελου και της περίθλασης.

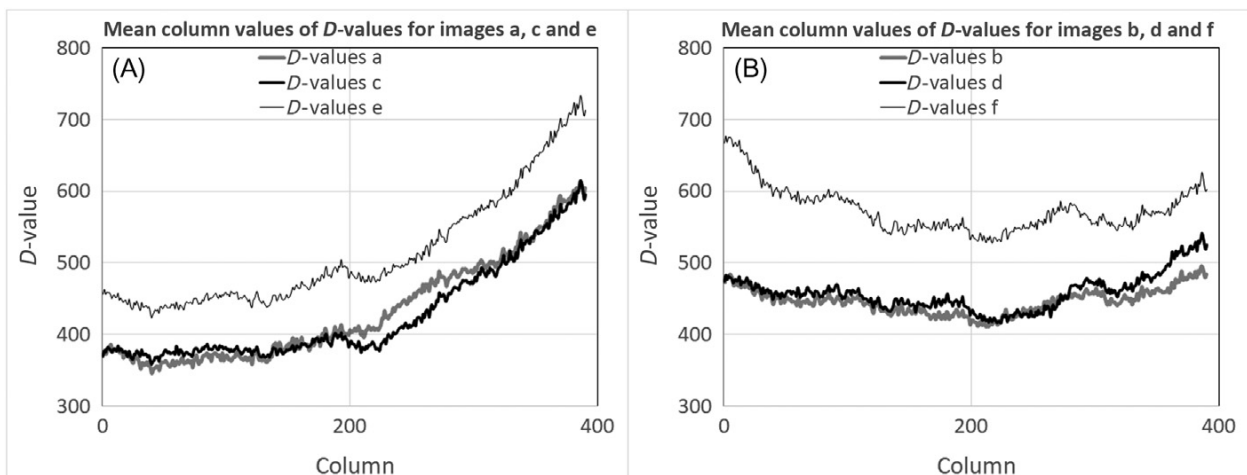
2.4.2 Εφαρμογή και αποτελέσματα

Η τροποποιημένη μέθοδος TLCS εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό ENVI, κάποια προγράμματα σε ANSI C και R που αναπτύχθηκαν και εργαλεία υπολογιστικών φύλλων. Η διαδικασία διόρθωσης, όπως προαναφέρθηκε, επιμερίστηκε σε δύο στάδια, α) το στάδιο ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης του φασματικού χαμόγελου και β) το στάδιο διόρθωσης (αναγωγής) του. Η ανίχνευσή του γίνεται εμφανής στην κάθε ιδιοεικόνα MNF-1 όπως αναφέρθηκε στην 2.4.1. Η ποσοτικοποίηση του φασματικού χαμόγελου μέσω του υπολογισμού των δεικτών D-values, εφαρμόζεται για κάθε εικονοστοιχείο των ιδιοεικόνων (a), (b), (c), (d), (e) και (f) χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.1):

$$D - \text{Values} = \frac{(B2 - B1)}{\overline{FWHM}}$$

όπου το \overline{FWHM} είναι 3.8 nm, το B2 είναι το κανάλι 47 (771.3 nm) και το B1 είναι το κανάλι 46 (763.7 nm) της κάθε απεικόνισης CASI-550, το οποίο είναι το πλησιέστερο στην περιοχή O₂-A. Για κάθε απεικόνιση, έχει δημιουργηθεί ο κατάλληλος δείκτης D-values.

Στο δεύτερο βήμα, υπολογίστηκε η μέση τιμή για κάθε στήλη των αντίστοιχων γραφημάτων που προκύπτουν από κάθε απεικόνιση, δηλαδή υπολογίστηκε ο κάθε δείκτης D-values ανά απεικόνιση (Εικόνα 2-13).



Εικόνα 2-13: Ο δείκτης τιμών D-values A) για τις απεικονίσεις (a), (c), (e) και B) τις (b), (d) και (f). Όπως ήταν αναμενόμενο, η συσχέτιση μεταξύ του σχήματος του δείκτη D-values και της κατεύθυνσης πτήσης είναι προφανής. Οι εικόνες (a) και (c) που ελήφθησαν με κατεύθυνση πτήσης Νότο - Βορρά παρουσιάζουν παρόμοια γραφήματα με την εικόνα (e), η οποία λήφθηκε με κατεύθυνση πτήσης Δύση - Ανατολή. Η επίδραση τόσο του φασματικού χαμόγελου όσο και των συνθηκών φωτισμού (φαινόμενο περίθλασης προστατευτικού γυαλιού) παρατηρείται σε αυτόν τον δείκτη. Αντίθετα, λιγότερες ραδιομετρικές παραμορφώσεις παρατηρούνται στις απεικονίσεις (b), (d), και (f).

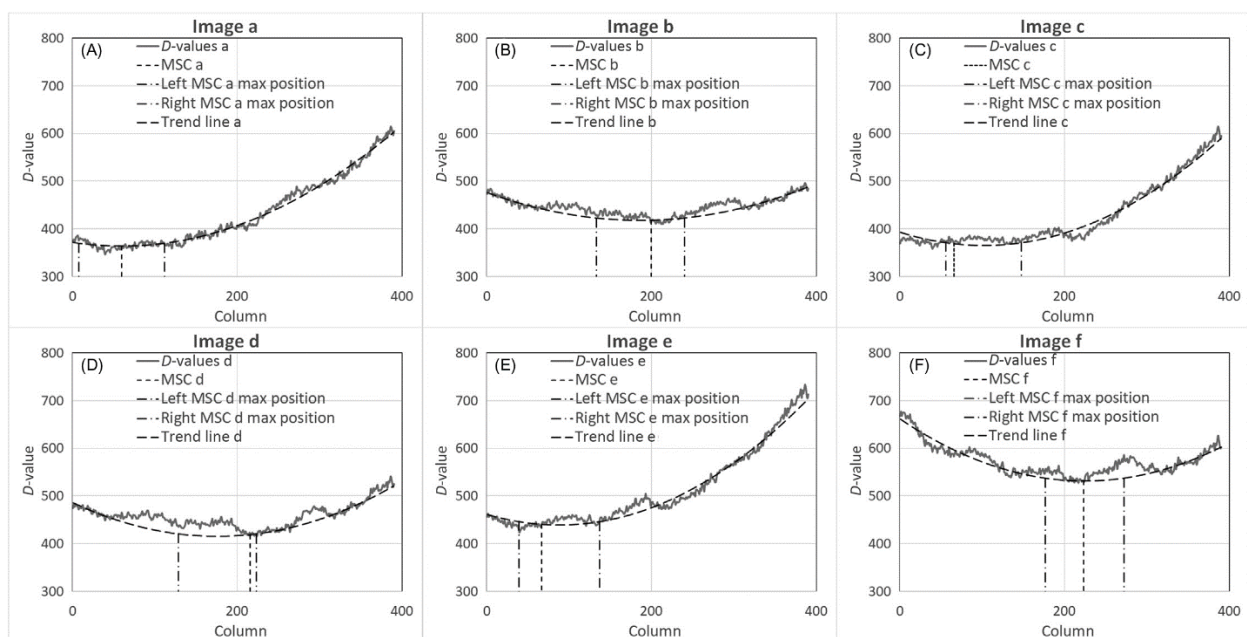
Το τελευταίο στάδιο στη διαδικασία ποσοτικοποίησης ήταν η προσαρμογή μιας γραμμής τάσης TL σε κάθε γράφημα του δείκτη D-values. Αυτό το βήμα είναι σημαντικό, επειδή οι τιμές διόρθωσης για κάθε στήλη υπολογίζονται με βάση τις τιμές TL. Οι τάσεις TL υπολογίστηκαν ως πολυώνυμα δεύτερης τάξης, τα οποία προσαρμόζονται βέλτιστα στα δεδομένα. Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πολυώνυμα προσαρμογής υψηλότερης τάξης, εάν παρατηρούνταν πιο πολύπλοκα γραμμικά μοτίβα στα γραφήματα. Το τελευταίο βήμα αυτού

του δεύτερου σταδίου, ήταν η ανάκτηση της στήλης MSC, που αποτελεί τη στήλη η οποία επηρεάζεται λιγότερο από τις παραμορφώσεις του φασματικού χαμόγελου (στήλη ελάχιστης κλίμακας, MSC). Για κάθε απεικόνιση εφαρμόστηκαν τα δύο κριτήρια που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3 προκειμένου να προσδιοριστεί η κατάλληλη στήλη MSC. Οι πιθανές στήλες και η πλέον κατάλληλη ως στήλη MSC, υπολογίστηκαν και εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-1):

Πίνακας 2-1: Ανάκτηση της στήλης MSC

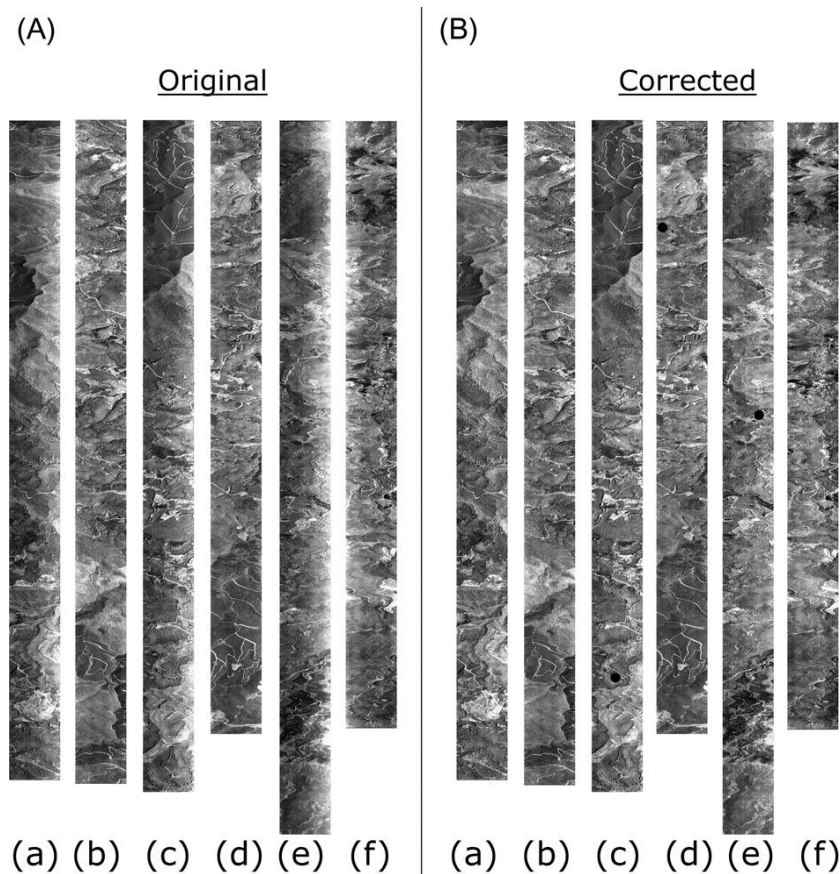
Image	Potential columns for MSC location	MSC
a	8-112	60
b	133-240	200
c	56-148	66
d	129-223	216
e	39-137	67
f	177-272	223

Για τις απεικονίσεις (a), (c) και (e), οι θέσεις της MSC κατά μήκος του άξονα της στήλης είναι αρκετά όμοιες. Η ίδια παρατήρηση μπορεί να γίνει για τη θέση της MSC των απεικονίσεων (b), (d) και (f). Χρησιμοποιώντας τη στήλη MSC, προσδιορίζεται ποσοτικά η ραδιομετρική παραμόρφωση του δείκτη TL και των δεικτών D-values για κάθε απεικόνιση. Το αποτέλεσμα είναι μια τιμή διόρθωσης, για κάθε στήλη, ίση με τη διακύμανση της αντίστοιχης τιμής TL από την τιμή TL της MSC (Εικόνα 2-14).



Εικόνα 2-14: Ανάκτηση της στήλης MSC (Minimum Scale Column).

Το γράφημα και η γραμμή TL μετατοπίζονται ως προς τον άξονα γ , έως ότου εκχωρηθεί η τιμή μηδέν στο TL_{MSC} και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές διόρθωσης για την ιδιοεικόνα MNF-1, αφού κανονικοποιηθούν οι τιμές της TL στο εύρος των τιμών της μέσης στήλης της MNF-1. Στη συνέχεια, η διόρθωση εφαρμόζεται στις τιμές όλων των εικονοστοιχείων MNF-1, μέσω της εξίσωσης (2.5). Ακολούθως, ανακατασκευάζεται η απαλλαγμένη από το φασματικό χαμόγελο υπερφασματική απεικόνιση, χρησιμοποιώντας τη διορθωμένη συνιστώσα MNF-1 και τις υπόλοιπες αρχικές ιδιοεικόνες MNF.

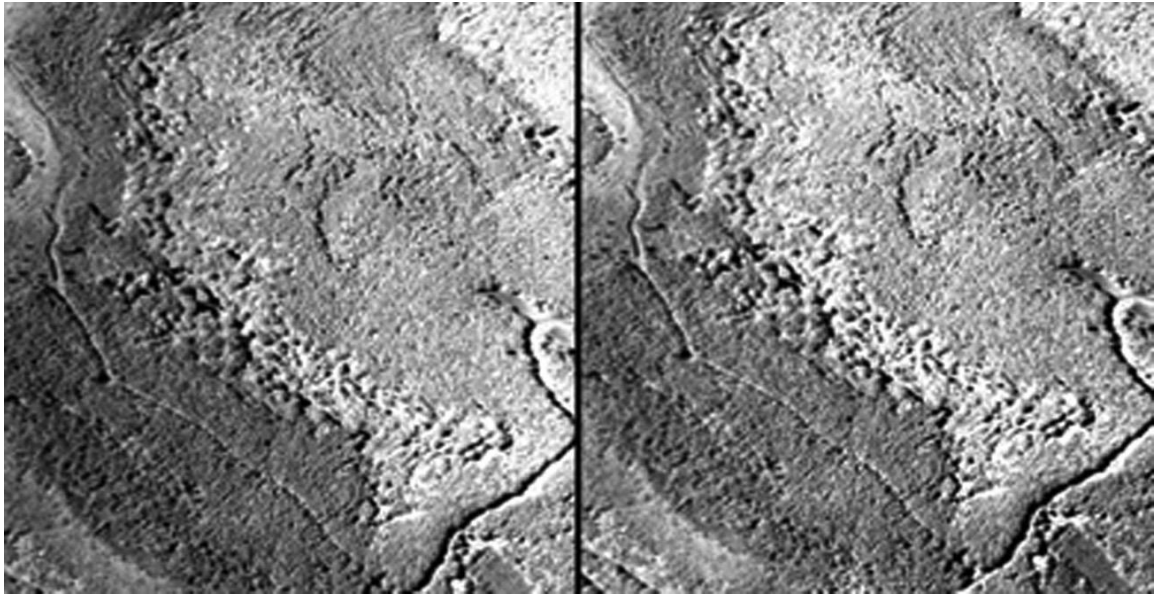


Εικόνα 2-15: Α) Οι αρχικές απεικονίσεις και Β) οι διορθωμένες από το φασματικό χαμόγελο. Τα μαύρα σημεία επί των εικόνων, παρουσιάζουν το εικονοστοιχείο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της φασματικής υπογραφής του εδάφους.

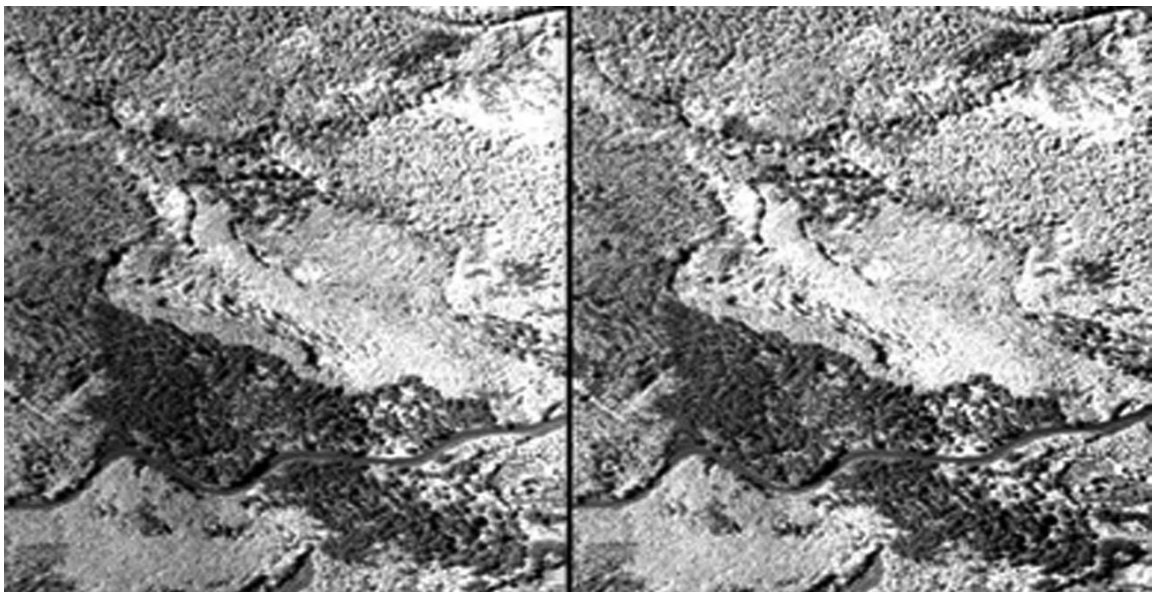
2.5 Αξιολόγηση της μεθόδου και συζήτηση

Μετά την εφαρμογή της τροποποιημένης μεθόδου TLSC, το φασματικό χαμόγελο και οι ραδιομετρικές διακυμάνσεις που προκαλούνται από τις συνθήκες φωτισμού κατά τη διάρκεια της πτήσης, εξαλείφθηκαν από τις αρχικές απεικονίσεις (Εικόνα 2-15). Οι εικόνες (a),(c),(e), με κατεύθυνση Νότος - Βορράς και Δύση - Ανατολή που χαρακτηρίστηκαν από ανομοιόμορφη φωτεινότητα, δεν εμφανίζουν τέτοια διαβάθμιση φωτεινότητας μετά την διόρθωση.

Χαρακτηριστικά μέρη των απεικονίσεων (a) και (c) πριν και μετά τη διόρθωση, για το κανάλι με κέντρο στα 763.70 nm φαίνονται στην Εικόνα 2-16 και στην Εικόνα 2-17.

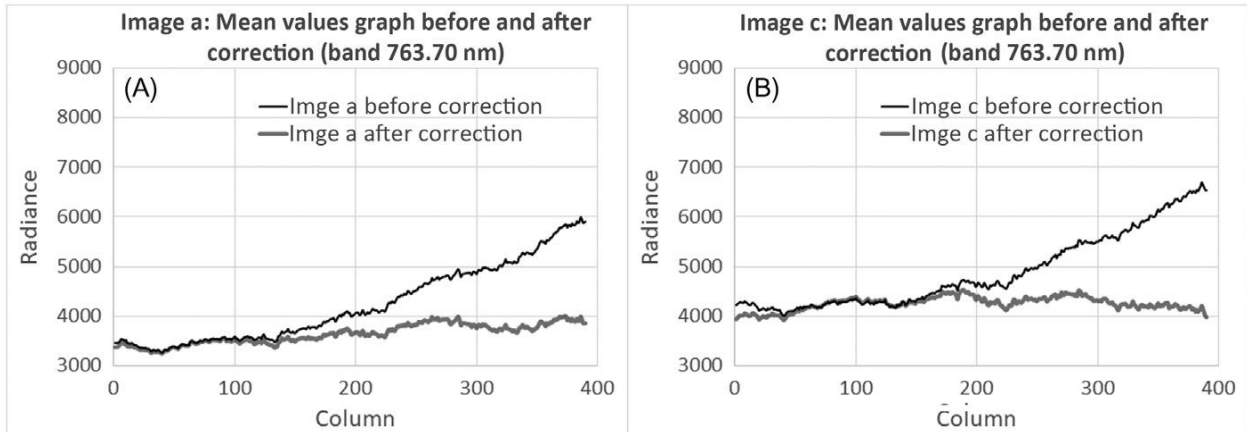


Εικόνα 2-16: Τμήμα της εικόνας (a) (κανάλι 763.70 nm) πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της προτεινόμενης διόρθωσης.



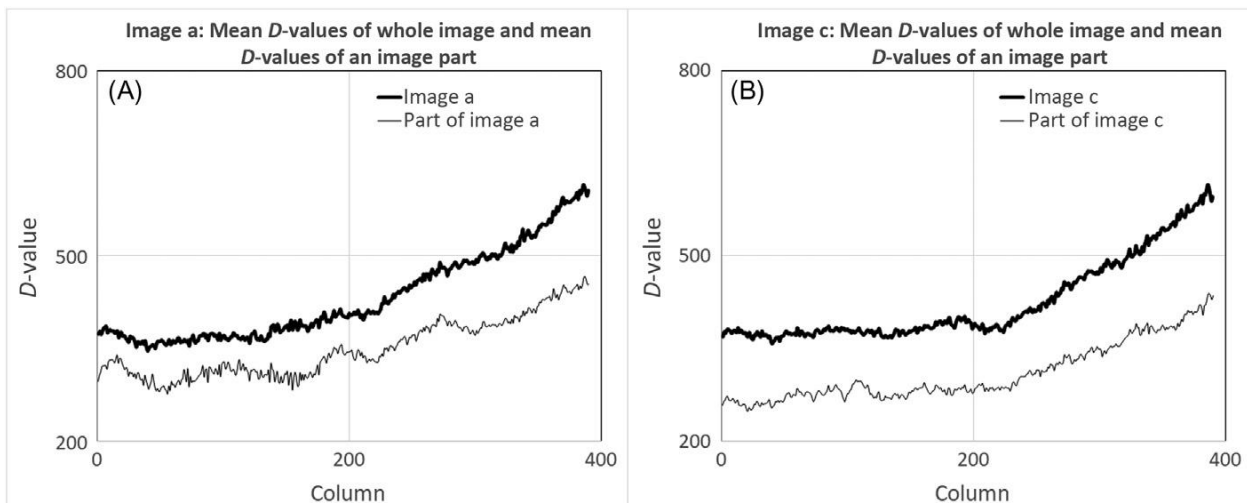
Εικόνα 2-17: Τμήμα της εικόνας (c) (κανάλι 763.70 nm) πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή της προτεινόμενης διόρθωσης.

Τα γραφήματα της μέσης τιμής της στήλης για το ίδιο κανάλι, για τις εικόνες (a) και (c) φαίνονται στην Εικόνα 2-18. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διορθωμένη εικόνα (a) παρουσιάζει μια κλίση φωτεινότητας μετά τη διόρθωση, πιθανότατα λόγω μεταβολής της κάλυψης του εδάφους και της αντίστοιχης καταγραφόμενης ενέργειας ακτινοβολίας.



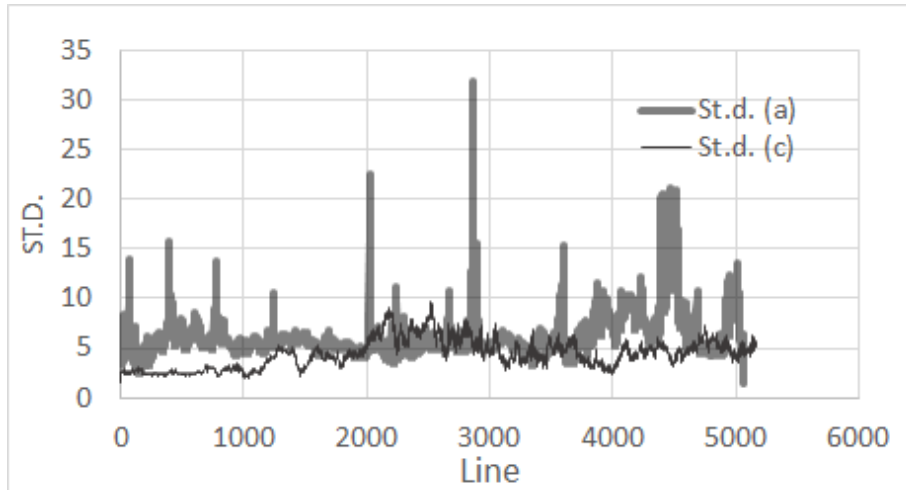
Εικόνα 2-18: Μέση τιμή της στήλης α) για την εικόνα (α) και β) για την εικόνα (c).

Η μεγάλη διαφορά στις τιμές ακτινοβολίας των διαφορετικών κατηγοριών κάλυψης γης για την εικόνα (α) επηρεάζει τον δείκτη D-values. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 2-19Α, όπου οι μέσες τιμές D υπολογίζονται για ολόκληρη την εικόνα (α) καθώς και για ένα μικρότερο τμήμα της ίδιας εικόνας, το οποίο απεικονίζει έντονες αποκλίσεις στην κάλυψη γης. Αν και ο δείκτης D-values θεωρείται ότι επηρεάζεται κυρίως από παραμορφώσεις του φασματικού χαμόγελου και τις διακυμάνσεις του φωτισμού, αυτό συμβαίνει μόνο όταν εμφανίζεται μια ομοιογενής περιοχή στην εικόνα. Διαφορετικά, ο δείκτης επηρεάζεται και από την κάλυψη γης και παρουσιάζει ανωμαλίες (Εικόνα 2-19Α, ανοιχτόχρωμη γραμμή).



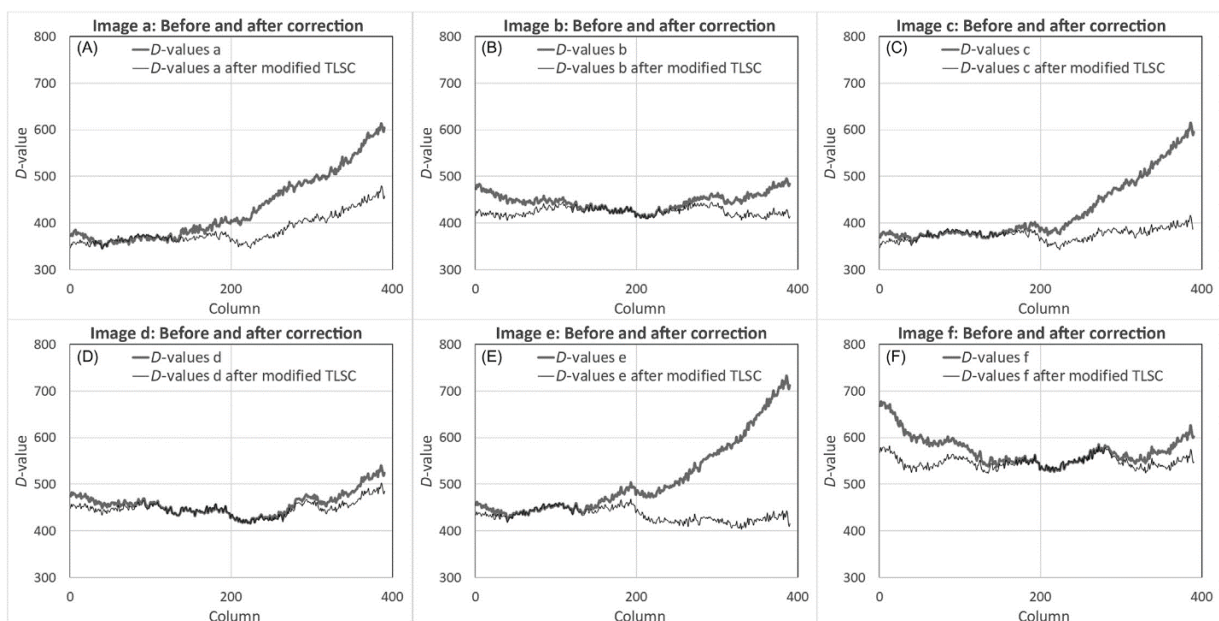
Εικόνα 2-19: Ο δείκτης D-values για α) την εικόνα (α) και μέρος αυτής και β) την εικόνα (c) και μέρος αυτής.

Επιπλέον, οι τιμές της ιδιοεικόνας MNF-1 επηρεάζονται επίσης από διακυμάνσεις ακτινοβολίας με συνέπεια να επηρεάζονται οι τιμές του παράγοντα κανονικοποίησης, ο οποίος εφαρμόζεται στις τιμές TL πριν από τον υπολογισμό της τιμής διόρθωσης κάθε στήλης. Στην Εικόνα 2-20 φαίνεται η τυπική απόκλιση για κάθε γραμμή της ιδιοεικόνας MNF-1:



Εικόνα 2-20: Τιμές της τυπικής απόκλισης για την πρώτη ιδιοεικόνα (MNF-1) των εικόνων (a) and (c).

Η παρουσία υψηλών τιμών τυπικής απόκλισης σε ορισμένες γραμμές της MNF-1, συνεπάγεται ανομοιομορφή κάλυψη γης. Για λόγους σύγκρισης, η ένδειξη D-values υπολογίζεται επίσης για μέρος της εικόνας (c) (Εικόνα 2-19B). Αν και αυτή η εικόνα υποφέρει από παρόμοιες ραδιομετρικές παραμορφώσεις με την εικόνα (a), λόγω του γεγονότος ότι η κάλυψη του εδάφους είναι πιο ομοιομορφή στην απεικονιζόμενη περιοχή, ο δείκτης D-values δεν παρουσιάζει ανωμαλίες κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας (Εικόνα 2-19B, ανοιχτόχρωμη γραμμή). Επιπλέον, οι τυπικές αποκλίσεις για αυτήν την εικόνα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές για κάθε γραμμή (Εικόνα 2-20). Συγκρίνοντας τον δείκτη D-values για όλες τις εικόνες πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου διόρθωσης (Εικόνα 2-21), καθίσταται ασφαλές να συμπεράνουμε ότι η γενική ραδιομετρία των απεικονίσεων δεν μεταβλήθηκε. Επιπλέον, η καμπύλη του φασματικού χαμόγελου καθώς και οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις έχουν μειωθεί σημαντικά σε κάθε απεικόνιση.



Εικόνα 2-21: Ο δείκτης D-values πριν και μετά τη διόρθωση. Τα γραφήματα (A-F) παραπέμπουν στις αντίστοιχες εικόνες.

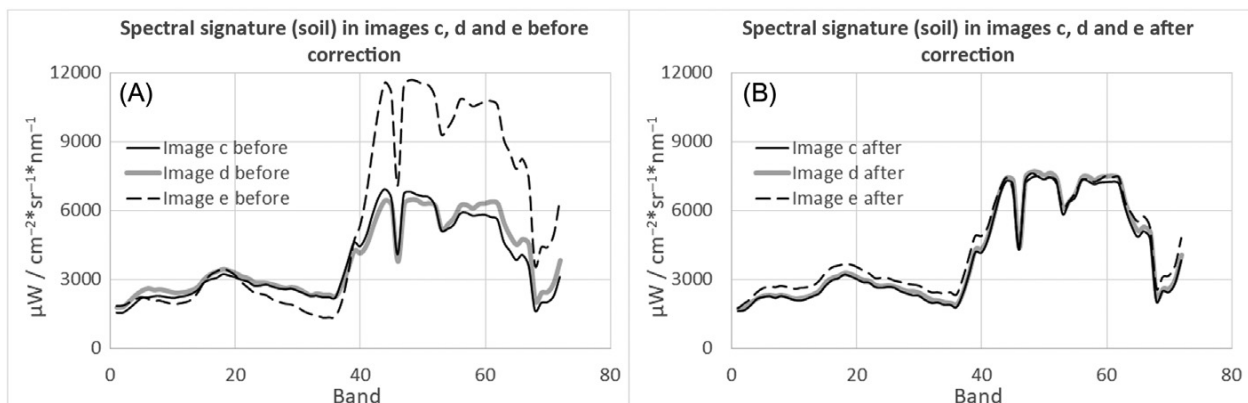
Το ανωτέρω συμπέρασμα ενισχύεται περαιτέρω από τη μείωση της τυπικής απόκλισης των μέσων τιμών D (Πίνακας 2-2).

Πίνακας 2-2: Τυπική απόκλιση των τιμών του δείκτη D πριν και μετά τη διόρθωση

Image	St.D. of Mean D-Values before correction	St.D. of Mean D-Values after correction	% reduction
a	72.8	30.8	57.69
b	17.7	8.7	50.57
c	67.5	12.6	81.37
d	24.8	15.8	36.28
e	80.4	13.6	80.29
f	31.5	12.8	59.37

Ωστόσο, ο δείκτης D-values εξακολουθεί να παρουσιάζει μια κλίση μετά τη διόρθωση για την εικόνα (a), η οποία παρουσιάζει μεγάλη ανομοιογένεια στις κατηγορίες κάλυψης γης και κατά συνέπεια, διακυμάνσεις στην ενέργεια ακτινοβολίας, στη διεύθυνση κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, συνιστάται να γίνει μια μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση πριν από τη φασματική διόρθωση του χαμόγελου, ώστε να εντοπιστούν οι διαφορετικές φασματικές κατηγορίες κάλυψης γης και στη συνέχεια, η διόρθωση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ξεχωριστά για κάθε κατηγορία κάλυψης γης, δημιουργώντας κατάλληλες μάσκες των αρχικών απεικονίσεων. Για το θέμα αυτό, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, προκειμένου να δημιουργηθεί μια πιο ισχυρή μεθοδολογία.

Τα γραφήματα στην Εικόνα 2-22 δείχνουν τις φασματικές υπογραφές για έδαφος με χαμηλή βλάστηση (στα σημεία της Εικόνα 2-15 με μαύρο χρώμα), για το οποίο η αντίστοιχη περιοχή εδάφους απεικονίστηκε στα επικαλυπτόμενα μέρη των εικόνων (c), (d) και (e).



Εικόνα 2-22: α) Φασματικές υπογραφές σημείων εδάφους χαμηλής βλάστησης, που προέρχονται από τις εικόνες (c), (d) και (e) πριν από τη διόρθωση και β) Φασματικές υπογραφές των ίδιων σημείων, από τις εικόνες (c), (d) και (e) μετά τη διόρθωση.

Αν και οι υπερφασματικές απεικονίσεις έχουν ληφθεί κάτω από τις ίδιες σχετικά ατμοσφαιρικές συνθήκες, παρατηρούνται ραδιομετρικές διαταραχές σε αυτές, ειδικά για την εικόνα (e), που

προκαλούνται από διακυμάνσεις του φωτισμού όπως λαμβάνεται από τον αισθητήρα. Μετά τη διόρθωση του φασματικού χαμόγελου, οι φασματικές υπογραφές σχεδόν συμπίπτουν.

2.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, προτάθηκε μια πρωτότυπη τροποποιημένη μέθοδος TLSC, για τη διόρθωση του φασματικού χαμόγελου σε υπερφασματικές απεικονίσεις από αερομεταφερόμενους δέκτες. Διαπιστώθηκε ότι τρεις παράγοντες επηρεάζουν το δείκτη D-values του φασματικού χαμόγελου, α) η έλλειψη βαθμονόμησης του αισθητήρα, β) οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από διακυμάνσεις του φωτισμού, ιδιαίτερα κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας και γ) οι έντονες διακυμάνσεις στην κάλυψη γης, κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε τιμές ακτινοβολίας (radiance) και δεν απαιτεί τη χρήση κανενός μοντέλου μεταφοράς ακτινοβολίας. Εφαρμόζει δύο κριτήρια στη γραμμή τάσης TL για την εύρεση της στήλης ελάχιστης κλίμακας MSC, στο γράφημα του δείκτη D-values. Επιπλέον, χρησιμοποιεί την πρώτη ιδιοεικόνα MNF-1, για τη φασματική διόρθωση του χαμόγελου. Η μέθοδος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλες τις υπερφασματικές απεικονίσεις. Μετά τη διόρθωση, το φασματικό χαμόγελο και οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις εξαλείφθηκαν αποτελεσματικά. Ωστόσο, οι έντονες αποκλίσεις στην ανακλαστικότητα που προκύπτουν από διαφορετικούς τύπους κάλυψης γης, στην κάθετη προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας, επηρέασαν την ποιότητα των διορθωμένων απεικονίσεων. Ως αποτέλεσμα, σε απεικονίσεις με έντονες αλλαγές κάλυψης γης, το διάγραμμα των μέσων τιμών στήλης και η ένδειξη του δείκτη D-values, εξακολουθούν να παρουσιάζουν κάποια κλίση μετά τη διόρθωση. Αυτό το μειονέκτημα είναι πιο έντονο στις αερομεταφερόμενες υπερφασματικές απεικονίσεις με υψηλή χωρική ανάλυση και μπορεί να ξεπεραστεί με εφαρμογή (διαφορική) της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανά ομοιογενείς περιοχές. Η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση κάλυψης γης και το μασκάρισμα της απεικόνισης πριν από τη διόρθωση του φασματικού χαμόγελου, θα μπορούσαν να συμβάλουν προς αυτή την κατεύθυνση. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα, προκειμένου να δημιουργηθεί μια πιο ισχυρή μεθοδολογία διόρθωσης του φασματικού χαμόγελου σε σχέση με την κάλυψη γης.

2.7 Βιβλιογραφία

Aktaruzzaman Md. "Simulation and Correction of Spectral Smile Effect and its Influence on Hyperspectral Mapping". MSc Thesis. Enschede (the Netherlands): International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation;2008, Available from: ([https:// webapps.itc.utwente.nl/ librarywww/papers_2008/msc/gem/aktaruzzaman.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2008/msc/gem/aktaruzzaman.pdf)).

Busetto L, Meroni M, Crosta GF, Guanter L, Colombo R. SpecCal: Novel software for in-field spectral characterization of high-resolution spectrometers. *Computers & Geosciences* 2011;37:1685-91. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.12.005.

Dadon A, Ben-Dor E, Karnieli A. Use of Derivative Calculations and Minimum Noise Fraction Transform for Detecting and Correcting the Spectral Curvature Effect (Smile) in Hyperion Images.

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2010 Mar;48(6):2603-12. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2040391.

Duan Y, Yan L, Jing X. A novel method of destriping for airborne hyperspectral image. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, Melbourne, VIC, Australia, 2013. p. 4447-50

Green A, Berman M, P. Switzer P, Craig MD. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988 Feb;26(1):65-74. DOI: 10.1109/36.3001.

Guanter L, Richter R, Moreno J, "Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features," Appl. Opt. 2006;45:2360-70. DOI: 10.1364/AO.45.002360.

Guanter L, Segl K, Sang B, Alonso L, Kaufmann H, Moreno J. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers. Optics Express 2009;17:11594-606. DOI: 10.1364/OE.17.011594

Høyve G, Løke T, Fridman A. Method for quantifying image quality in push-broom hyperspectral cameras. Optical Engineering 2015 May 5;54(5), 053102. DOI: 10.1117/1.OE.54.5.053102.

Jinsuk H, Youngsoo K, Byungin C, Seongryung H, Dohwan J, Jun Ho L, et al. Efficient method to measure the spectral distortions using periodically distributed slit in hyperspectral imager. Optics Express 2017;25(17):20340-51. DOI: 10.1364/OE.25.020340.

Meroni M, Busetto L, Guanter L, Cogliati S, Crosta GF, Migliavacca M., et al. Characterization of fine resolution field spectrometers using solar Fraunhofer lines and atmospheric absorption features. Applied Optics 2010 May;49(15), 2858-71. DOI: 10.1364/AO.49.002858.

Mouroulis P. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers. SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, Denver, CO, United States, Proceedings Vol. 3753, Imaging Spectrometry V, 1999 Oct 27. DOI: 10.1117/12.366313.

Nieke J, Schläpfer D, Dell'Endice F, Brazile J, Itten KI. Uniformity of Imaging Spectrometry Data Products. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008 Oct;46(10):3326-36. DOI: 10.1109/TGRS.2008.918764

Oskouei MM, Babakan S. "Role of smile correction in mineral detection on hyperion data", Journal of Mining & Environment. 2016;7(2):261-272. DOI: 10.22044/jme.2016.567.

Richter R, Schlapfer D, Muller A. Operational Atmospheric Correction for Imaging Spectrometers Accounting for the Smile Effect. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011 May;49(5):1772-80. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2089799.

Saenz K, Secker J, Gao BC, Davis C, Nadeau C. Radiative transfer codes applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2002 Dec;57(3):194-203. DOI: 10.1016/S0924-2716(02)00121-1.

Yokoya N, Miyamura N, Iwasaki A. Detection and correction of spectral and spatial misregistrations for hyperspectral data using phase correlation method. *Appl. Opt.* 2010;49:4568-75. DOI:10.1364/AO.49.004568.

Yuanliua X, Runsheng W, Shengwei L, Suming Y, Bokun Y. Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model. *Remote Sensing of the Environment: 16th National Symposium on Remote Sensing of China. Proceedings of SPIE, Vol. 7123, 712306-1. China:2010.*

Zhaoming Z. et al, "A coupled atmospheric and topographic correction algorithm for remotely sensed satellite imagery over mountainous", *GIScience & Remote Sensing*, pages 400-416, 2017, doi.org /10.1080/ 15481603.2017.1382066.

3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.

3.1 Εισαγωγή

Τα φασματοραδιόμετρα (με σημειακές μετρήσεις) και οι τηλεπισκοπικές δορυφορικές απεικονίσεις, είναι ιδανικά εργαλεία προκειμένου να αναγνωριστούν και να χαρτογραφηθούν επιφανειακά υλικά, για παράδειγμα, συγκεκριμένοι τύποι βλάστησης. Συλλογές φασματικών καμπυλών (φασματικών υπογραφών) τόσο για τα υλικά όσο και για τα αντικείμενα, που μετρούνται συνήθως σε συνθήκες εργαστηρίου ή πεδίου, αποθηκεύονται σε φασματικές βιβλιοθήκες [Thenkabail S. Prasad et al, 2019]. Αυτές οι φασματικές υπογραφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ταξινόμηση και αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων και υλικών [Mather P. and Koch M., 2011]. Ειδικότερα, η φασματική υπογραφή ενός υλικού (π.χ. ενός είδους βλάστησης) είναι η καταγραφή της διακύμανσης της ανάκλασης ή/και της εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα διαφορετικά μήκη κύματος. Είναι συνάρτηση του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της αλληλεπίδρασης του υλικού με αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, οπότε αποτελεί τη χαρακτηριστική του καμπύλη γι' αυτό και καθορίζει τη φασματική του ταυτότητα. Εάν σκοπός της ανάλυσής μας είναι να προσδιορίσουμε την κατάσταση στην οποία βρίσκονται διαφορετικά αντικείμενα του ίδιου είδους (π.χ. εάν κάποιο φυτό είναι υπό καταπόνηση λόγω έλλειψης νερού σε σχέση με κάποιο άλλο φυτό του ίδιου είδους), τότε θα πρέπει να μελετήσουμε τη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν οι φασματικές υπογραφές των αντικειμένων αυτών [Lillesand T. et al, 2004]. Έπειτα από εκατοντάδες μετρήσεις πεδίου που έχουν πραγματοποιηθεί στην ύπαιθρο με φασματοραδιόμετρο στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης και αφορούν στη φασματική ανακλαστικότητα ειδών μεσογειακής βλάστησης, έχει αναπτυχθεί μια φασματική βιβλιοθήκη ταυτοποίησης ειδών μεσογειακής βλάστησης με περισσότερες από 1300 εγγραφές που αντιστοιχούν σε περισσότερα από 90 διαφορετικά είδη μεσογειακής βλάστησης. Από αυτές τις εγγραφές σχεδόν το σύνολο, καλύπτουν ένα εύρος του φάσματος από το ορατό έως το κοντινό υπέρυθρο (περίπου από 350-1050 nm) ενώ λίγες εμπεριέχουν μία συνεχή αναπαράσταση του διαγράμματος ανακλαστικότητας καλύπτοντας ένα εύρος του φάσματος από το ορατό έως το μέσο υπέρυθρο (από 350-2500 nm).

Οι επίγειες (*in situ*) μετρήσεις φασματικής ανακλαστικότητας που λαμβάνονται στο πεδίο με φορητό φασματοραδιόμετρο συνήθως βοηθούν :

- στην εξακρίβωση των χαρακτηριστικών φασματικής ανακλαστικότητας των υλικών [Ong C. et al, 2019]
- στην παροχή σημαντικών φασματικών πληροφοριών αναφοράς για αποτελεσματικότερη εξαγωγή πληροφοριών με τη βοήθεια οποιουδήποτε δέκτη παθητικής Τηλεπισκόπησης, πολυφασματικό ή υπερφασματικό [Reynolds R. L. et al, 2020].
- στη βαθμονόμηση τηλεπισκοπικών δεδομένων [Scholl V. M, Ku A. M., 2022].
- στην εξαγωγή των καθαρών στόχων από μια υπερφασματική απεικόνιση, όταν οι μετρήσεις προέρχονται από σχεδόν αμιγή υλικά της επιφάνειας του εδάφους (π.χ.

δασικά είδη με ανεπτυγμένη φυτική κόμη, γυμνό έδαφος, βαθιά και καθαρά ύδατα) [Xiaorui Song and Lingda Wu, 2019].

Τα συστήματα παθητικής Τηλεπισκόπησης συλλέγουν δεδομένα φασματικής ανακλαστικότητας του εδάφους στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο VNIR (Visible to Near Infrared, VNIR) και στο μέσο υπέρυθρο (Short Wave InfraRed, SWIR) τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (περίπου από τα 350 έως τα 2500 nm). Η ατμοσφαιρική σκέδαση, η απορρόφηση και η ανακλαστικότητα στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν την ενέργεια που ανακλάται από το έδαφος και καταγράφεται από το σύστημα Τηλεπισκόπησης [Jensen R. John, 2015]. Τις περισσότερες φορές μπορεί να γίνει συσχέτιση των τηλεπισκοπικών δεδομένων φασματικής ανακλαστικότητας με επίγεια δεδομένα ανακλαστικότητας, για τα ίδια φαινόμενα, ώστε να διορθωθούν οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις [Teillet P. M. et al., 2012]. Παραδείγματος χάριν, μια φασματική υπογραφή ενός δασικού είδους (π.χ. της μαύρης πεύκης) μπορεί να μετρηθεί α) με αερομεταφερόμενο υπερφασματικό σαρωτή υψηλής διακριτικής ικανότητας όπως ο CASI-550, και β) με φορητό φασματοραδιόμετρο, όπως το GER-1500. Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα συλλέγονται πολύ πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (από εκατοντάδες μέτρα έως πολλές φορές, εκατοντάδες χιλιόμετρα) ενώ οι επίγειες μετρήσεις με φασματοραδιόμετρο λαμβάνονται συνήθως περίπου 1 μέτρο πάνω από τη φυτική κόμη. Μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει ένα ισχυρό δείγμα (>30) από ζεύγη τιμών φασματικής ανακλαστικότητας που προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν με αερομεταφερόμενα μέσα, μαζί με επίγειες μετρήσεις, για τη βαθμονόμηση (προσαρμογή) των δορυφορικών, τηλεπισκοπικών μετρήσεων φασματικής ανακλαστικότητας, προκειμένου να μειωθούν οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής σκέδασης, της απορρόφησης και της ανακλαστικότητας [Schowengerdt A. R., 2007]. Το αποτέλεσμα είναι *βαθμονομημένα* τηλεπισκοπικά δεδομένα τα οποία συνήθως παρέχουν πιο ακριβείς πληροφορίες για την κάλυψη γης ή τις βιοφυσικές πληροφορίες (όπως π.χ. η βιομάζα, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας) από μη βαθμονομημένα δεδομένα.

3.2 Συλλογή Φασματικών Υπογραφών

Έπειτα από μετρήσεις πεδίου που έχουν πραγματοποιηθεί σε ένα βάθος 8 περίπου ετών (2014-2022) με χρήση του φασματοραδιομέτρου GER-1500 του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης αλλά και του φασματοραδιομέτρου HR-1024i του Εργαστηρίου Δασικής Διαχειριστικής και Τηλεπισκόπησης του Α.Π.Θ, έχει αναπτυχθεί μια φασματική βιβλιοθήκη μεσογειακών ειδών βλάστησης, με είδη, όπως για παράδειγμα : Έλατη υβριδογενής (*Abies borisii regis*), Ελάτη η κεφαλληνιακή (*Abies cephalonica*), Ερυθρελάτη (*Picea abies*), Σφενδάμι (*Acer*), Ψευδοπλάτανος (*Acer pseudoplatanus*), Ρόμπολο (*Pinus leucodermis*), Άλνος ο κολλώδης (*Alnus glutinosa*), Λαβούρνο (*Laburnum*), Ελιά (*Olea*), Αγριελιά (*Olea oleaster*), Δασική Πεύκη (*Pinus sylvestris*), Μαύρη Πεύκη (*Pinus Nigra*), Τραχεία Πεύκη (*Pinus brutia*), Παραθαλασσία Πεύκη (*Pinus pinaster*), Χαλέπιος Πεύκη (*Pinus halepensis*), Κουκουναριά (*Pinus pinea*), Οξιά ή Φηγός (*Fagus, Beech*), Δρυς (*Quercus*), Πλατύφυλλη Δρυς (*Quercus frainetto*), Χνωώδης Δρυς (*Quercus pubescens*), Πλάτανος (*Platanus*), Ιτιά (*Salix*), Καστανιά (*Castanea*), Σημύδα (*Betula*), Κέδρος (*Cedrus*), Ευκάλυπτος (*Eucalyptus*), Ακακία (*Acacia*), Καρυδιά (*Juglans*), Οστριά (*Ostrya carpinifolia*), Κυπαρίσσι (*Cupressus*), Πουρνάρι (*Quercus coccifera*), Άρκευθος (*Juniperus*),

Κουμαριά (*Arbutus unedo*), Φλαμουριά (*Tilia tomentosa*), Φτέρη (*Pteridium aquilinum*), Χαρουπιά (*Ceratonia siliqua*), Αγριοτριανταφυλλιά (*Rosa canina*), Μυρτιά (*Myrtus communis*), Κουτσουπιά (*Cercis siliquastrum*), Σχίνος (*Pistacia lentiscus*), Ασπάλαθος (*Calicotome villosa*), Λαδανιά (*Cistus Creticus*), Δενδρολίβανο (*Rosmarinus*), Ασφάκα (*Phlomis fruticosa*), Θυμάρι (*Thymus vulgaris*), Λεβάντα (*Lavandula*), Πικροδάφνη (*Nerium oleander*), Σπάρτο (*Spartium junceum*), Βάτος (*Rubus*) κλπ.

Πρόκειται για μια βιβλιοθήκη αμιγώς μεσογειακών ειδών βλάστησης, που έχει δημιουργηθεί αποκλειστικά από μετρήσεις πεδίου και αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημά της, επειδή μπορεί (και έχει) χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μελέτες, παρέχοντας αξιόπιστες φασματικές υπογραφές αναφοράς για ταυτοποίηση καθαρών στόχων, αλλά και για άλλους λόγους όπως αυτοί περιγράφονται στο 3.1.

Ως πλεονεκτήματα της φασματικής βιβλιοθήκης που δημιουργήσαμε, μπορούμε να αναφέρουμε τα ακόλουθα:

- Είναι απολύτως εξειδικευμένη, περιλαμβάνοντας φασματικές υπογραφές από είδη μεσογειακής βλάστησης, τα οποία δεν έχουν καταγραφεί σε γνωστές, μεγάλες βιβλιοθήκες, όπως π.χ. της USGS.
- Περιέχει φασματικές υπογραφές που έχουν μετρηθεί στο πεδίο (*in situ*), σε πραγματικές συνθήκες, και όχι στο εργαστήριο (*ad hoc*).
- Περιέχει φασματικές υπογραφές που έχουν μετρηθεί σε απόσταση το πολύ ενός μέτρου από το στόχο, και όχι από τηλεπισκοπικούς δέκτες μεγάλης απόστασης (όπως του Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer (ASTER) στην πλατφόρμα Terra της NASA, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές επιστημονικές μελέτες, συλλέγοντας χιλιάδες μικτές φασματικές υπογραφές από περίπου 700 Km ύψος).
- Λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της ανακλαστικότητας της βλάστησης λόγω της συμμετοχής του εδάφους, δεδομένου ότι αυτή η μεταβλητότητα εμφανίζεται και στις απεικονίσεις.
- Η αναζήτηση φασματικών υπογραφών σε μια ευέλικτη λόγω μεγέθους, εξειδικευμένη φασματική βιβλιοθήκη, έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική αναζήτηση σε πολύ μεγάλες, ευρύτερες βιβλιοθήκες. Είναι γενικά πολύ πιο γρήγορη και έχει μεγαλύτερη ευαισθησία εντοπισμού μιας φασματικής υπογραφής. Η αύξηση της ταχύτητας αναζήτησης και προσπέλασης, οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη ενός μικρότερου, πλήρως ευρετηριάσιμου (*indexable*) χώρου αναζήτησης πραγματικών φασμάτων, με αποτέλεσμα οποιοδήποτε αίτημα αναζήτησης από έναν αλγόριθμο να ικανοποιείται πολύ γρήγορα.
- Εμφανίζεται και η φωτογραφία του μετρημένου αντικείμενου, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να αξιολογήσει άμεσα εάν το μετρημένο αντικείμενο είναι συγκρίσιμο με αυτό που ερευνά και θέλει να ταυτοποιήσει.

Ένα προφανές μειονέκτημα της φασματικής βιβλιοθήκης αποτελεί το γεγονός ότι δεν έχουν χρησιμοποιηθεί αυστηρά και σταθερά πρότυπα βαθμονόμησης κατά τις διαδικασίες της φασματοσκοπικής απεικόνισης, κυρίως επειδή οι μετρήσεις έγιναν στο πεδίο κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες, οπότε αποτελεί μια χρηστική, βοηθητική βάση γνώσεως για την ανίχνευση δασικών ειδών μεσογειακής βλάστησης και την ανάλυση και

ταυτοποίηση παρόμοιων υλικών από αερομεταφερόμενα φασματοριαδιόμετρα όπως το CASI-550, το VIMS της NASA (Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer) και άλλα.

Η διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Ε.Μ.Πολυτεχνείου και από το Εργαστήριο Δασικής Διαχειριστικής και Τηλεπισκόπησης του Α.Π.Θ. και αποτέλεσε μέρος από το ερευνητικό πρόγραμμα TELE-KYOTO, «Χαρτογράφηση βλάστησης και εκτίμηση βιομάζας με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης στο πλαίσιο της σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή και του Πρωτοκόλλου του Kyoto» αλλά έγιναν μετρήσεις και στο πλαίσιο διπλωματικών εργασιών.

Κατά κύριο λόγο στο σύνολό τους, οι δειγματοληψίες στα δασικά είδη έγιναν με έναν από τους δύο τρόπους:

1. απευθείας στο φύλλωμα του δέντρου ή του φυτού (Εικόνα 3-1a)
2. με αφαίρεση φύλλων (χλωρών ή ξεραμένων) από το δέντρο ή το φυτό και εναπόθεση τους στο έδαφος (Εικόνα 3-1b).



(a)



(b)

Εικόνα 3-1: (a) Μέτρηση απευθείας στο φύλλωμα, (b) Αφαίρεση φύλλων από το δένδρο για μέτρηση μετά την εναπόθεσή τους στο έδαφος.

Η κάθε φασματική υπογραφή, όπως μετρήθηκε από το ραδιόμετρο GER-1500 ή/και το HR-1024i, προέκυψε από το μέσο όρο περισσότερων μετρήσεων στον ίδιο στόχο (συνήθως τριών), ενώ ανά δύο ή τρεις μετρήσεις φασματικών υπογραφών γινόταν και μια μέτρηση αναφοράς στη λαμπερτιανή επιφάνεια του ραδιομέτρου, με σκοπό να μετατραπούν οι τιμές ακτινοβολίας (radiance) του στόχου, σε τιμές συντελεστή ανάκλασης (Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-2: Τα φασματοραδιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις πεδίου για τη φασματική βιβλιοθήκη: (a) GER-1500, (b) HR-1024i

Φασματικά Χαρακτηριστικά ραδιομέτρου GER-1500

Το φασματοραδιόμετρο GER-1500 είναι ένα φορητό φασματοραδιόμετρο πεδίου, το οποίο καλύπτει την περιοχή του Η/Μ φάσματος από τα 350 έως τα 1050 nm σε 512 φασματικά κανάλια. Το διάστημα αυτό αντιστοιχεί σε μήκη κύματος στην υπεριώδη (UV), στην ορατή και στην εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (VNIR).

Πίνακας 3-1: Φασματικά χαρακτηριστικά του GER-1500.

Φασματική περιοχή	350 – 1050 nm
Αριθμός καναλιών	512
Bandwidth Sampling / FWHM	1.5 nm / 3.2 nm
FOV*	4°, 8°, 25°

*Ανάλογα με το φακό.

Φασματικά Χαρακτηριστικά ραδιομέτρου HR-1024i

Το φασματοραδιόμετρο HR-1024i είναι ένα φορητό φασματοραδιόμετρο πεδίου, συγκρίσιμων δυνατοτήτων με το PSR+3500, το οποίο καλύπτει την περιοχή του Η/Μ φάσματος από τα 350 έως τα 2500 nm σε 1024 φασματικά κανάλια. Και εδώ, το διάστημα αυτό αντιστοιχεί σε μήκη κύματος στην υπεριώδη (UV), στην ορατή, την εγγύς υπέρυθρη (VNIR) και την μέση υπέρυθρη ακτινοβολία (SWIR).

Η φασματική ανάλυσή του είναι:

- 3.5 nm @700 nm
- 9.5 nm @1500 nm
- 6.5 nm @2100 nm

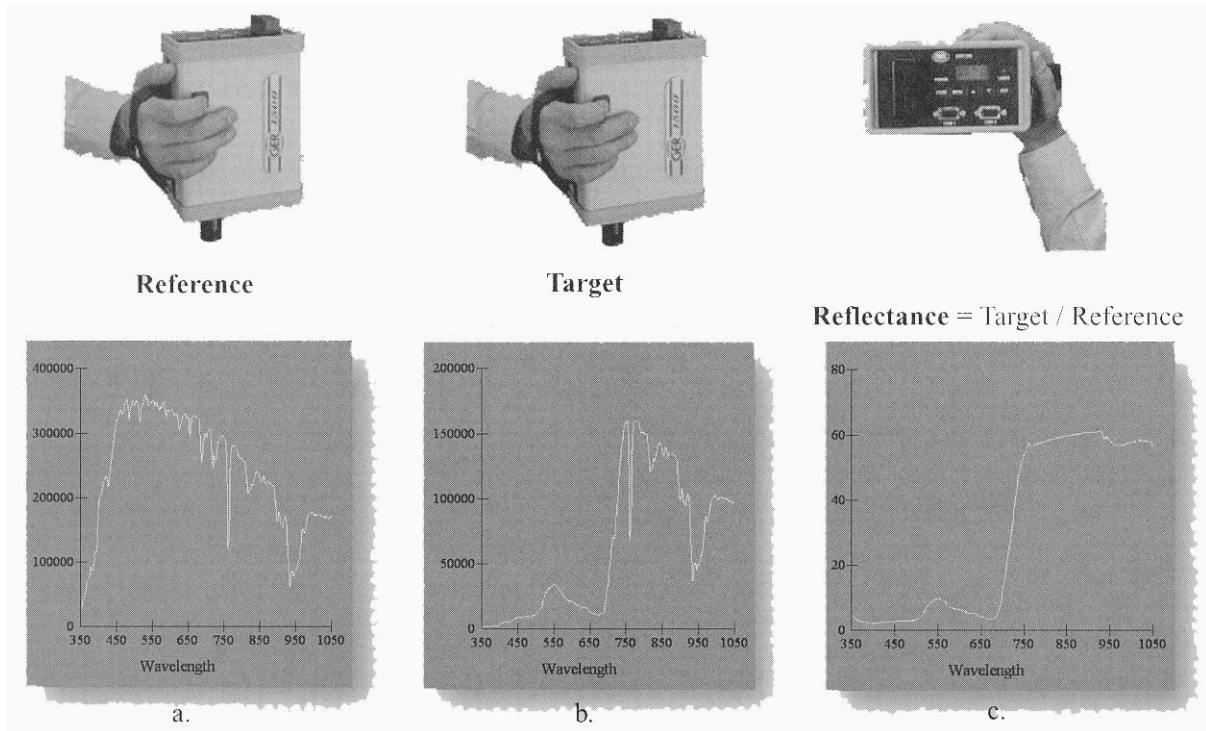
Πίνακας 3-2: Φασματικά χαρακτηριστικά του HR-1024i.

Φασματική περιοχή	350 – 2500 nm
Αριθμός καναλιών	1024
Bandwidth Sampling	1.5 nm 350 – 1000nm 3.8 nm 1000 – 1885nm 2.5 nm 1885 – 2500nm
FOV*	4°, 8°, 14°, 25°

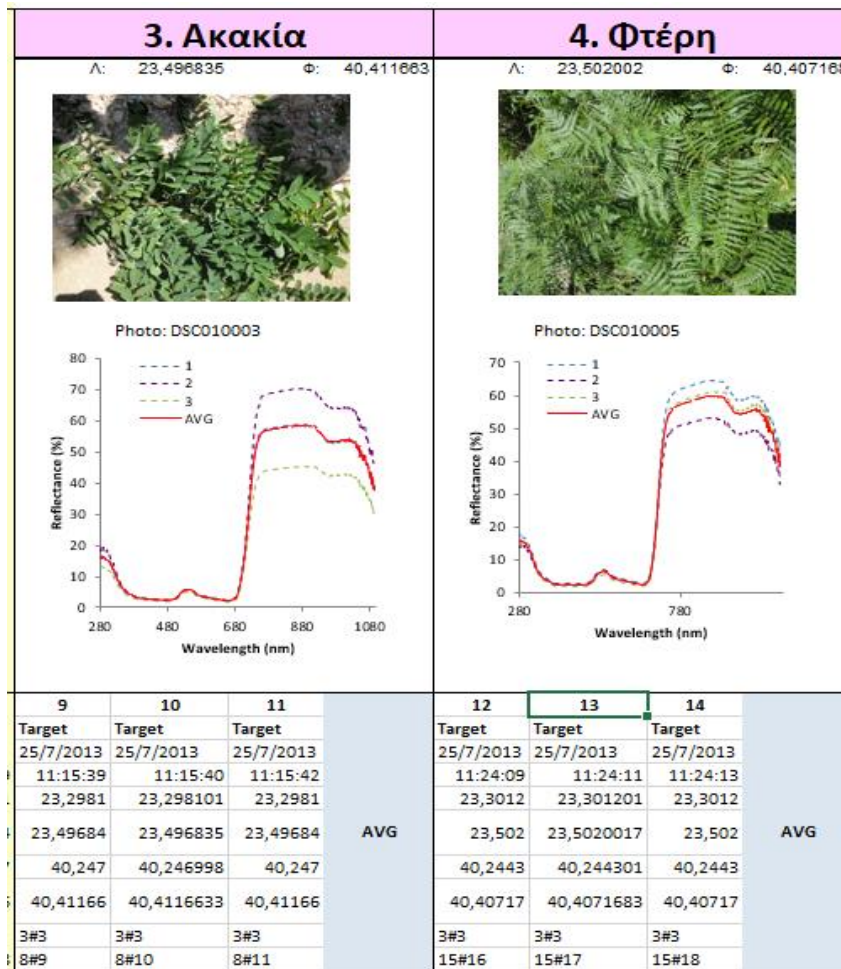
*Ανάλογα με το φακό.

Πίνακας 3-3: Παράδειγμα δασικών δειγμάτων

	α/α	Δείγμα	Φασματικές Υπογραφές
Δέντρα – Δενδρύλλια	1	Pinus Brutia / Τραχεία Πεύκη / Αυστριακή Πεύκη	35, 43, 44, 45, 46, 47
	2	Pinus Pinaster / Χαλέπιος Πεύκη	49, 50, 51
	3	Pinus Nigra / Μαύρη Πεύκη	4, 53, 54, 55, 56
	4	Fagus sylvatica / Δασική οξιά	58, 59, 60, 61
	5	Juglans / Καρυδιά	2
	6	Acacia / Ακακία	3, 36
	7	Abies / Ελάτη	20, 21, 22
	8	Ostrya / Οστριά	25, 27, 28
	9	Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς	1, 7, 11, 19, 23, 24, 34
	10	Juniperus / Άρκευθος	10, 14, 18, 31, 32
	11	Quercus Coccifera / Δρυς η κοκκοφόρος / Πουρνάρι	15, 16, 17, 26
	12	Cupressus Sempervirens / Κυπάρισσος η αειθαλής	37, 38, 39, 40
	13	Pinus Strobus / Λευκό Πεύκο	29, 30, 33
Θάμνοι	14	Rubus / Βάτος	9
	15	Fern / Φτέρη	5, 6, 12, 13
	16	Salvia Officinalis / Φασκόμηλο	48, 52



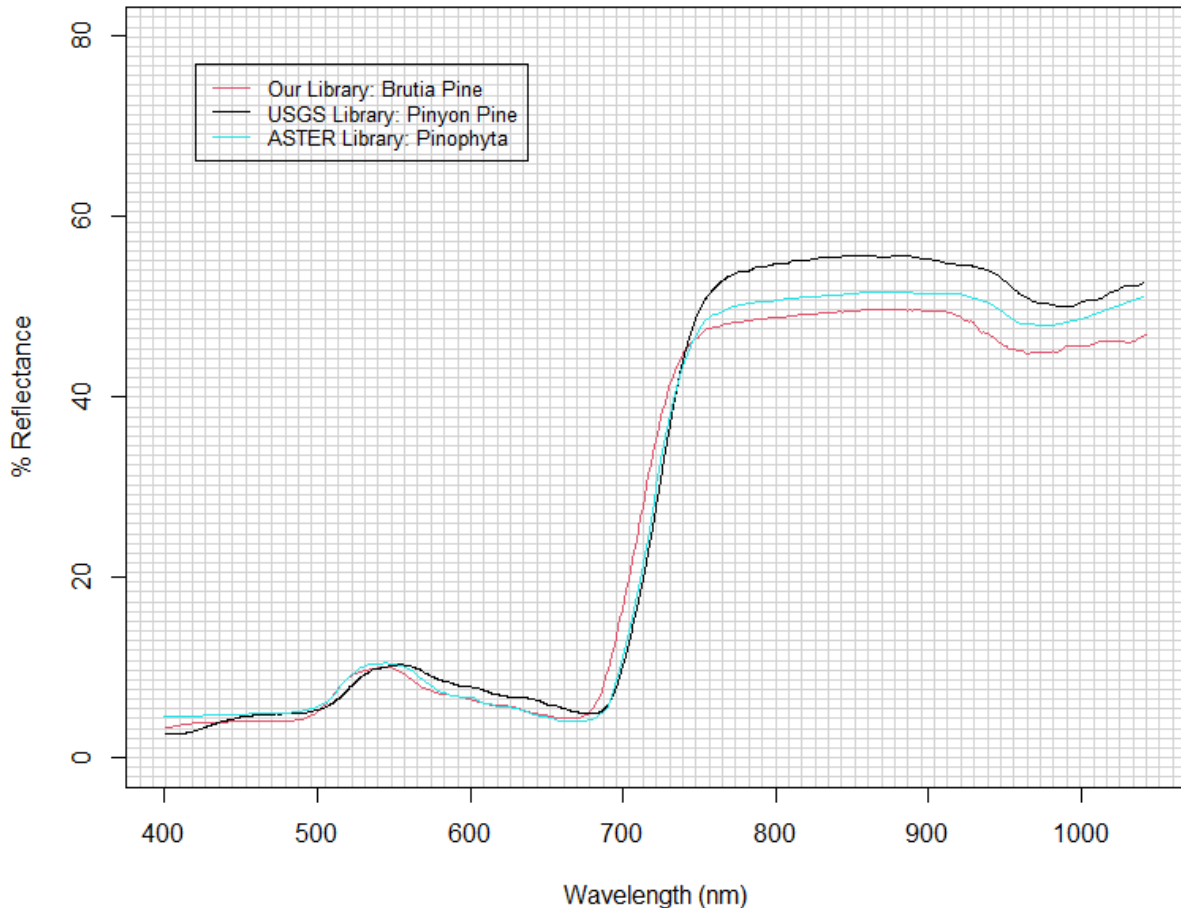
Εικόνα 3-3: (α) Καμπύλη αναφοράς πριν τη μέτρηση στο πεδίο, επί της ειδικής λαμπερτιανής επιφάνειας αναφοράς του ραδιομέτρου GER-1500, (β) καμπύλη φασματικής ανάκλασης του στόχου (πράσινων φύλλων Οξιάς), (γ) καμπύλη φασματικής ανάκλασης της Οξιάς έπειτα από διαίρεση των φασμάτων στόχου / αναφοράς. Πηγή: “Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος - Μια προοπτική για τα φυσικά διαθέσιμα”, John R. Jensen, 2016



Εικόνα 3-4: (α) Φασματικές υπογραφές για την Ακακία και τη Φτέρη, που έχουν προκύψει ως μέσος όρος τριών διαδοχικών μετρήσεων από το ραδιόμετρο GER-1500. Στον άξονα y είναι η τιμή της % ανακλαστικότητας και στον άξονα x το μήκος κύματος (από περίπου 280 έως 1000 nm). Πηγή: Η διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Ε.Μ.Πολυτεχνείου σε συνεργασία με το Εργαστήριο Δασικής Διαχειριστικής και Τηλεπισκόπησης του Α.Π.Θ. και αποτέλεσε μέρος του ερευνητικού προγράμματος TELE-KYOTO, «Χαρτογράφηση βλάστησης και εκτίμηση βιομάζας με σύγχρονες μεθόδους Τηλεπισκόπησης στο πλαίσιο της σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή και του Πρωτοκόλλου του Κγγοτο».

Στην Εικόνα 3-5 φαίνονται σε επίθεση, στο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 400 nm έως περίπου 1050 nm, οι φασματικές υπογραφές ειδών πεύκης (πευκοειδών) από τρεις διαφορετικές φασματικές βιβλιοθήκες: α) από τη βιβλιοθήκη μεσογειακών ειδών βλάστησης που αναπτύξαμε με μετρήσεις αποκλειστικά στο πεδίο, όπου περιέχεται η φασματική υπογραφή της Τραχείας Πεύκης (καθαρός στόχος), β) από τη βιβλιοθήκη του δορυφορικού ραδιομέτρου ASTER (από ύψος 705 km με ατμοσφαιρική διόρθωση), όπου περιέχεται η φασματική υπογραφή ομοιογενούς έκτασης “Πευκοειδών”, η οποία είναι η πιο “συγγενής” με το είδος της Τραχείας Πεύκης (μικτός στόχος) και γ) από τη βιβλιοθήκη της USGS με μέτρηση στο εργαστήριο, όπου περιέχεται η φασματική υπογραφή (καθαρός στόχος) του πεύκου Pinjon (είναι είδος πεύκου το οποίο αναπτύσσεται στη νοτιοδυτική Βόρεια Αμερική, ειδικά στο Νέο Μεξικό, την Αριζόνα και τη Γιούτα) που αποτελεί το πιο συγγενές είδος πεύκης που περιέχεται στη βιβλιοθήκη, σε σχέση με την Τραχεία Πεύκη.

Spectral Signatures from different Spectral Libraries



Εικόνα 3-5: Φασματικές υπογραφές πευκοειδών από διαφορετικές φασματικές βιβλιοθήκες : α) με κόκκινο χρώμα είναι η φασματική υπογραφή της Τραχείας Πεύκης (*Pinus Brutia*) από τη βιβλιοθήκη μεσογειακών ειδών βλάστησης που αναπτύξαμε (μέτρηση στο πεδίο), β) με γαλάζιο χρώμα είναι η φασματική υπογραφή Πευκόφυτων (*Pinophyta*) από τη βιβλιοθήκη του δορυφορικού ραδιομέτρου ASTER (από ύψος 705 km με ατμοσφαιρική διόρθωση) και γ) με μαύρο χρώμα είναι η φασματική υπογραφή του πεύκου *Pinyon* (μέτρηση στο εργαστήριο) από τη βιβλιοθήκη της USGS. Στον άξονα γ είναι η τιμή της % ανακλαστικότητα και στον άξονα x το μήκος κύματος (από 400 έως περίπου 1050 nm).

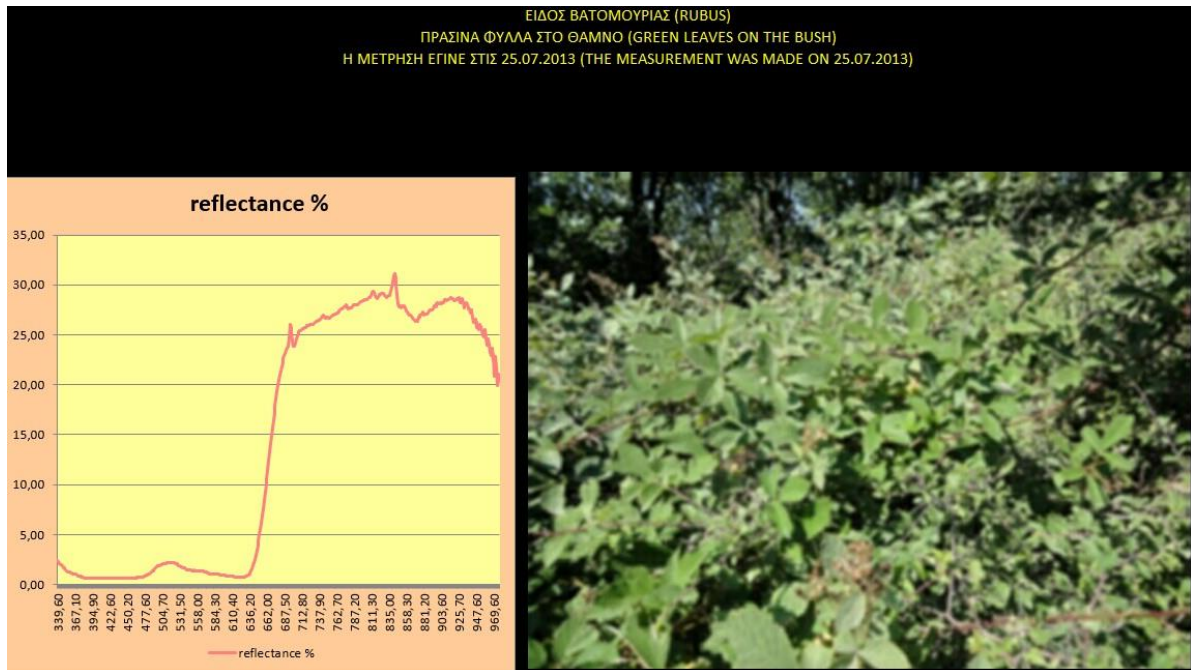
3.3 Γραφική διεπαφή χρήστη

Λέγοντας Γραφική διεπαφή ή διασύνδεση χρήστη (ο αγγλικός όρος είναι GUI, συντομογραφία των λέξεων Graphical User Interface) εννοούμε κάποια εικονικά στοιχεία, τα οποία εμφανίζονται στην οθόνη και χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν αλλά και να επιταχύνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του τελικού χρήστη και του προγράμματος. Παρέχουν στο χρήστη, μέσω εικονικών στοιχείων, ενδείξεις και εργαλεία προκειμένου αυτός, με πολύ απλές ενέργειες, να εκτελέσει εύκολα και απλά, συνδυαστικές εργασίες.

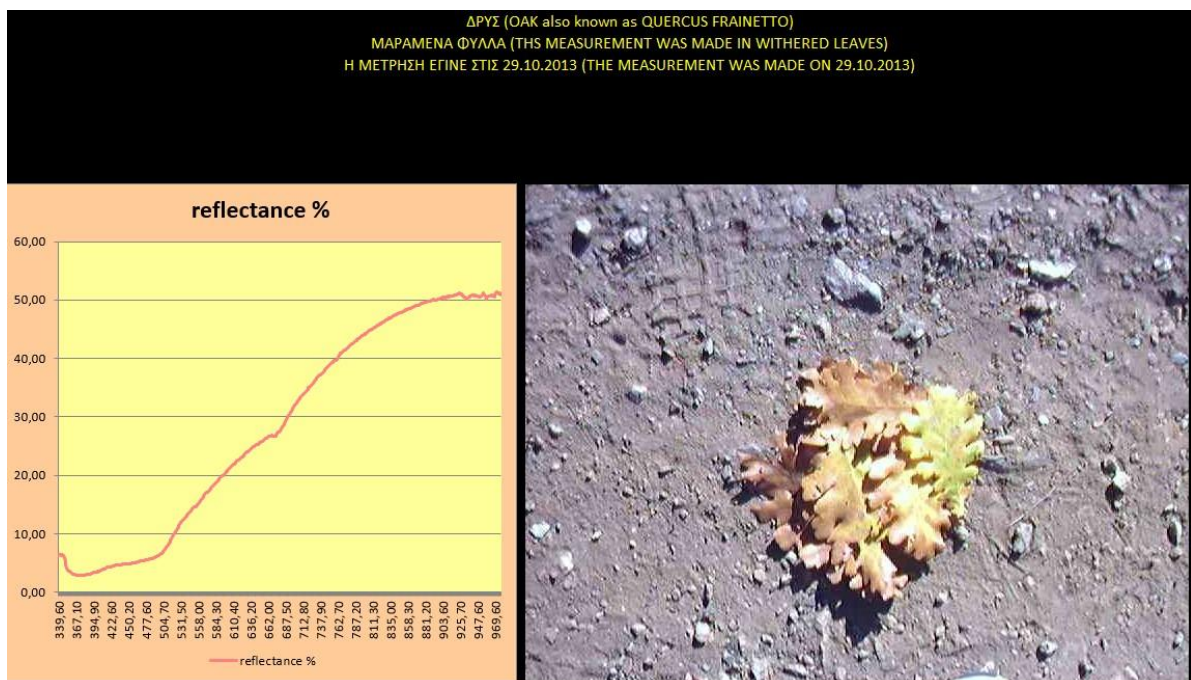
Η διεπαφή αναπτύχθηκε μέσω του Microsoft Excel σε Visual Basic, ώστε να επιτρέπει στον χρήστη να εστιάσει στην πληροφορία καθαυτή και όχι στους μηχανισμούς που παρουσιάζουν την πληροφορία. Υπάρχει ένα κύριο menu με τα είδη βλάστησης και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να δει τη φασματική τους υπογραφή. Μαζί με τη φασματική υπογραφή, εμφανίζεται και η φωτογραφία του στόχου, οπότε μπορούμε να καταλάβουμε εάν η μέτρηση έγινε απευθείας στο φύλλωμα του δέντρου ή του φυτού (Εικόνα 3-7) ή με αφαίρεση φύλλων (χλωρών ή ξεραμένων) από το δέντρο ή το φυτό και εναπόθεση τους στο έδαφος (Εικόνα 3-8). Επίσης εμφανίζονται πληροφορίες για το είδος της βλάστησης στο οποίο αντιστοιχεί η φασματική υπογραφή και για την ημερομηνία λήψης της στο πεδίο. Η απλούστερη διεπαφή εμφανίζει εγγραφές στη βάση, όπως φαίνονται στην Εικόνα 3-6 ενώ περαιτέρω πληροφορίες εμφανίζονται πατώντας το κουμπί 'info' από κάθε εγγραφή (Εικόνα 3-7 έως Εικόνα 3-9).

Target	Name	Info	Mode	Date	Time	GPS Lon. Rec	GPS Lat. Rec.
1			Reference	25/7/2013	11:10	23,298101	40,246998
2	Oak	info	Target	25/7/2013	11:10	23,298101	40,246998
3	Oak	info	Target	25/7/2013	11:10	23,298101	40,246998
4	Oak	info	Target	25/7/2013	11:10	23,298101	40,246998
5	Oak	info	AVG	25/7/2013			
6	Walnut	info	Target	25/7/2013	11:13	23,298101	40,246998
7	Walnut	info	Target	25/7/2013	11:13	23,298101	40,246998
8	Walnut	info	Target	25/7/2013	11:13	23,298101	40,246998
9	Walnut	info	AVG	25/7/2013			
10			Reference	25/7/2013	11:15	23,298101	40,246998
11	Acacia	info	Target	25/7/2013	11:15	23,298101	40,246998
12	Acacia	info	Target	25/7/2013	11:15	23,298101	40,246998
13	Acacia	info	Target	25/7/2013	11:15	23,298101	40,246998
14	Acacia	info	AVG	25/7/2013			
15	Pinus	info	Target	25/7/2013	11:18	23,298101	40,246998
16	Pinus	info	Target	25/7/2013	11:18	23,298101	40,246998
17	Pinus	info	Target	25/7/2013	11:18	23,298101	40,246998
18	Pinus	info	AVG	25/7/2013			
19			Reference	25/7/2013	11:24	23,301201	40,244301
20	Fern	info	Target	25/7/2013	11:24	23,301201	40,244301
21	Fern	info	Target	25/7/2013	11:24	23,301201	40,244301
22	Fern	info	Target	25/7/2013	11:24	23,301201	40,244301
23	Fern	info	AVG	25/7/2013			
24	Fern	info	Target	25/7/2013	11:25	23,301298	40,244198
25	Fern	info	Target	25/7/2013	11:25	23,301298	40,244198
26	Fern	info	Target	25/7/2013	11:25	23,301298	40,244198

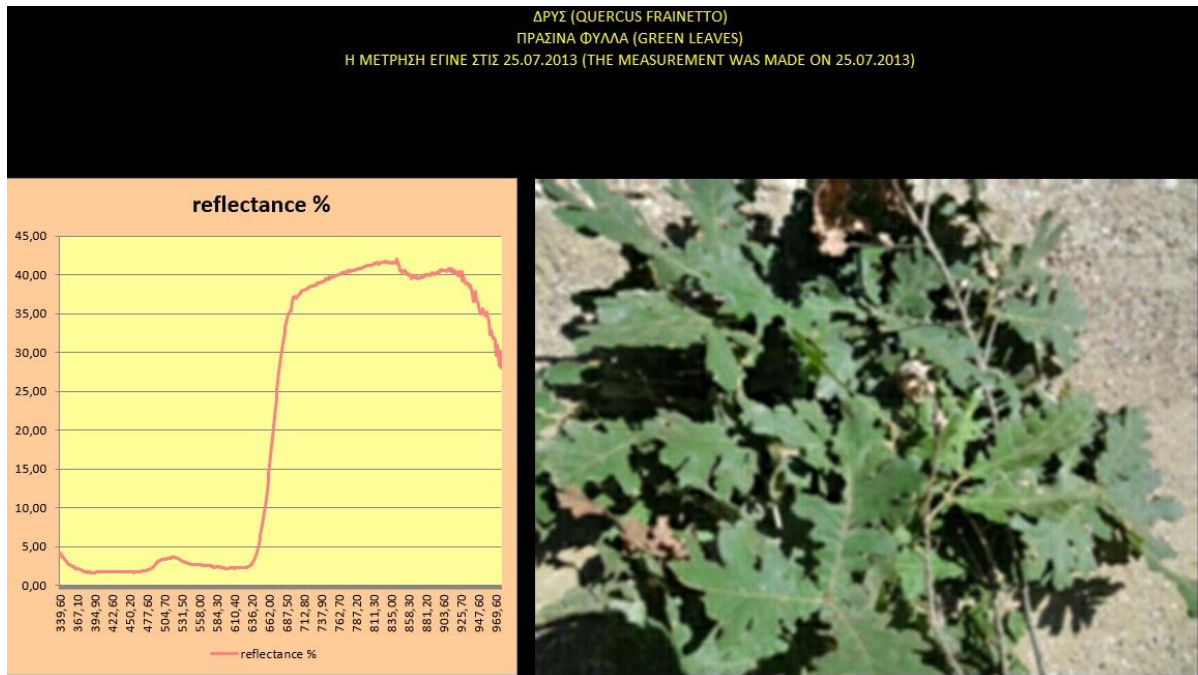
Εικόνα 3-6: Μια από τις βασικές εικόνες διεπαφής της φασματικής βιβλιοθήκης. Στα διάφορα πεδία αναγράφονται πληροφορίες σχετικές με το είδος της φασματικής υπογραφής και τη συγκεκριμένη μέτρηση.



Εικόνα 3-7: Επεξηγηματική πληροφορία της βιβλιοθήκης για την φασματική υπογραφή της Βατομουριάς (Rubus). Η μέτρηση είναι κατευθείαν πάνω στα φύλλα του φυτού, όπως φαίνεται και από τη συνοδευτική φωτογραφία.



Εικόνα 3-8: Επεξηγηματική πληροφορία της βιβλιοθήκης για την φασματική υπογραφή της Δρυός (Quercus Frainetto). Η μέτρηση είναι πάνω στα αποκομμένα και μισο-μαραμένα φύλλα του δένδρου, όπως φαίνεται και από τη συνοδευτική φωτογραφία.



Εικόνα 3-9: Επεξηγηματική πληροφορία της βιβλιοθήκης για την φασματική υπογραφή της Δρυός (*Quercus Frainetto*). Η μέτρηση είναι πάνω στα αποκομμένα και πράσινα φύλλα του δένδρου, όπως φαίνεται και από τη συνοδευτική φωτογραφία.

3.4 Σύνδεση με άλλες φασματικές βιβλιοθήκες

Η βιβλιοθήκη μπορεί να συνδεθεί μέσω οποιουδήποτε λογισμικού ανοιχτού κώδικα είτε οποιουδήποτε από τα συνήθη εμπορικά λογισμικά Τηλεπισκόπησης, με τις γνωστότερες φασματικές βιβλιοθήκες (οι οποίες δεν περιέχουν μόνο καταγραφές βλάστησης), όπως π.χ. με:

- Την πλέον δημοφιλή φασματική βιβλιοθήκη, η οποία είναι αυτή του Γεωλογικού Ινστιτούτου των ΗΠΑ (U.S. Geological Survey, USGS). Έχει προκύψει από μετρήσεις ερευνητών του Εργαστηρίου Φασματοσκοπίας της USGS οι οποίοι μέτρησαν τη φασματική ανάκλαση χιλιάδων υλικών στο Εργαστήριο και τα ενσωμάτωσαν στη φασματική βιβλιοθήκη της USGS. Περιέχει φασματικές υπογραφές πολλών ειδών, συμπεριλαμβανομένων φυσικών δειγμάτων ορυκτών, πετρωμάτων, εδαφών καθώς και μαθηματικά υπολογισμένων μιγμάτων, φυτών, ειδών βλάστησης, μικροοργανισμών και τεχνητών υλικών. Η τελευταία έκδοσή της είναι μια ενημέρωση της προηγούμενης (2007) δημοσιευμένης έκδοσης, που είναι η πληρέστερη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα για την ταυτοποίηση υλικών από τις φασματικές τους υπογραφές.
- Τη μεγαλύτερη σε μέγεθος φασματική βιβλιοθήκη από το Εργαστήριο Jet Propulsion του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Καλιφόρνια και την JPL ASTER Spectral Library 2.0 (η οποία περιλαμβάνει και την ECOSTRESS Spectral Library).
- Τις ENVI Spectral Libraries, τις GNPS (Global Natural Products Social Molecular Networking) Spectral Libraries κλπ,

ενώ εκτός του λογισμικού ανοιχτού κώδικα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω του EnMAP-Box σε περιβάλλον QGIS και να είναι πλήρως λειτουργική (με λειτουργίες μεταξύ των φασματικών

υπογραφών όπως add, import, select, add new, delete, zoom, save, export) σε συνδυασμό με άλλες βιβλιοθήκες.

3.5 Βιβλιογραφία

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. and Chipman, J.W., "Remote Sensing and Image Interpretation", 5th Edition, Geographical Journal 146(3), ISBN: 0471152277, DOI:10.2307/634969, John Wiley, New York, 2004.

Mather P. and Koch M., "Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction", Fourth Edition, ISBN:9780470742389, DOI:10.1002/9780470666517, 2011.

Ong C., Carrere V., Chabrilat S., Clark R. N., Hoefen T. M., Kokaly R., Marion R., Carlos Roberto de Souza Filho, Swayze G. A., Thompson D., "Imaging spectroscopy for the detection, assessment and monitoring of natural and anthropogenic hazards", Surveys in Geophysics, DOI: 10.1007/s10712-019-09523-1. Crustal Geophysics and Geochemistry Science Center, 2019.

Reynolds R. L., Goldstein H., Moskowitz B., Kokaly R., Munson S., Solheid P., Breit G., Lawrence C., Derry J., "Dust deposited on snow cover in the San Juan Mountains, Colorado, 2011-2016: Compositional variability bearing on snow-melt effects", Journal of Geological Research, DOI: 10.1029/2019JD032210. Geosciences and Environmental Change Science Center, 2020.

Scholl V. M, Ku A. M., "Spectral reflectance measurements of radiometric calibration panels for UAS image calibration", USGS Digital Object Identifier Catalog, DOI: 10.5066/ P9XL6WTO, Geosciences and Environmental Change Science Center, 2022.

Schowengerdt A. R., "Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing", Third Edition, ISBN: 978-0-12-369407-2, DOI: 10.1016/B978-0-12-369407-2.X5000-1, Elsevier, 2007.

Teillet P. M., Gauthier P. R., Chichagov A., "Towards Integrated Earth Sensing: The Role of In Situ Sensing", Canada Centre for Remote Sensing, First International Workshop on Future Intelligent Earth Observing Satellites (FIEOS), 2012.

Thenkabail S. Prasad, Lyon G. J., Huete A., "Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation", Second Edition, ISBN 9781138066250, 2019.

Xiaorui Song and Lingda Wu, "A Novel Hyperspectral Endmember Extraction Algorithm Based on Online Robust Dictionary Learning", Remote Sensing 11(15):1792, DOI: 10.3390/rs11151792, 2019.

4 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

4.1 Εισαγωγή

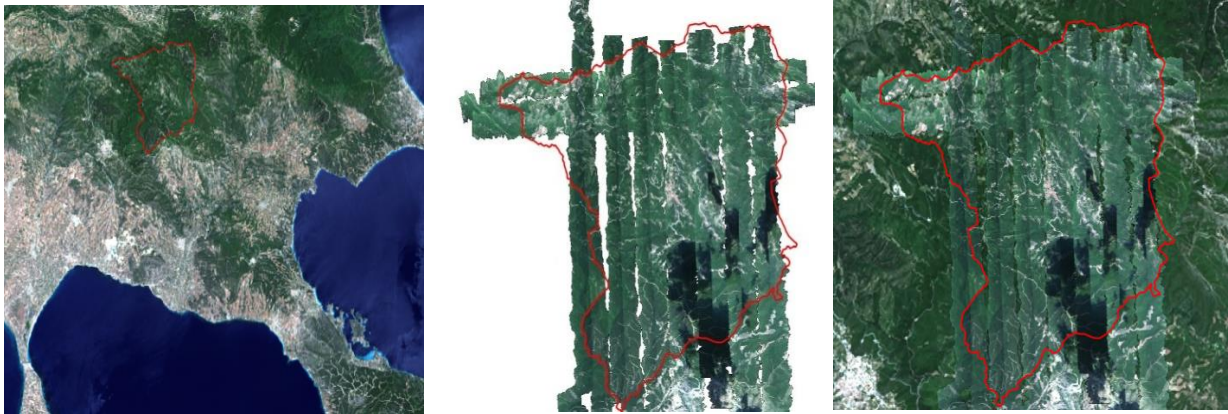
Τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερα μετά το 1990, έχουν διαμορφωθεί συνθήκες για την χαρτογράφηση της βλάστησης, αξιοποιώντας τηλεπισκοπικές μεθόδους και λαμβάνοντας υπόψιν τις βιοφυσικές μεταβλητές της βλάστησης [Jensen R. John, 2015]. Σε πολλές έρευνες χρησιμοποιούνται δείκτες βλάστησης και χλωροφύλλης [Vina A. et al, 2011; Baret, F. and Guyot, G., 1991] οι οποίοι ορίζονται ως αδιάστατα, ραδιομετρικά μεγέθη της σχετικής αφθονίας και της δραστηριότητας της πράσινης βλάστησης, του ποσοστού φυτικής κάλυψης, του περιεχόμενου της βλάστησης σε χλωροφύλλη και της ποσότητας πράσινης βιομάζας. Κάθε δείκτης βλάστησης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας διαφορετικές φασματικές ζώνες (κανάλια) που είναι ευαίσθητες κυρίως στη φυτική βιομάζα.

Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει ενοποιημένη μαθηματική έκφραση που να καθορίζει όλους τους δείκτες βλάστησης, λόγω της πολυπλοκότητας των διαφορετικών συνδυασμών από περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και των διαφορετικών δεκτών που συλλέγουν δεδομένα από διάφορες πλατφόρμες και με διαφορετικές αναλύσεις. Ως εκ τούτου, εξατομικευμένοι αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί για να εκτιμήσουν ποσοτικοποιήσεις παραμέτρων της βλάστησης [Adeyeye Y. et al, 2019] σύμφωνα με συγκεκριμένες μαθηματικές εκφράσεις που συνδυάζουν την ακτινοβολία του ορατού φωτός, η οποία αποτελείται από τις μπλε (450-495 nm), τις πράσινες (495-570 nm) και τις κόκκινες (620-750 nm) περιοχές του φάσματος, με φασματικές περιοχές μη ορατού φωτός, όπως την υπεριώδη περιοχή (UV), η οποία κυμαίνεται από 10 έως 380 nm και την εγγύς (NIR) και μέση υπέρυθρη περιοχή (SWIR), οι οποίες κυμαίνονται αντίστοιχα από περίπου 850 έως 1700 nm [Cruden B. et al, 2012 ; Rahim B. A. et al, 2016].

Υπάρχουν αρκετοί δείκτες που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία [Todd et al, 1998] και είναι ισοδύναμοι ως προς το περιεχόμενο των πληροφοριών που παράγουν [Perry, C. R. and Lautenschlager L. F., 1984], ενώ ορισμένοι προσφέρουν μοναδικές βιοφυσικές πληροφορίες [Qi et al, 1995]. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δείκτες βλάστησης και χρωστικών σε υπερφασματικά [Haboudane et al, 2004] και πολυφασματικά δεδομένα [Hanson et al, 1987] για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης μιας δασικής έκτασης [Gianguzzi L. et al, 2015; Reyes G. Et al, 2020].

4.2 Η περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι το πανεπιστημιακό δάσος του Ταξιάρχη - Βραστάμων. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 5800 εκταρίων (ha), δηλαδή 58000 στρεμμάτων, στις νότιες και νοτιοδυτικές πλαγιές του όρους Χολομώντα Χαλκιδικής με υψόμετρο από 320 m έως 1165 m και σε απόσταση 70 Km από τη Θεσσαλονίκη [Thalis Program, 2012-2016].



Εικόνα 4-1: Έγχρωμο σύνθετο 321 (RGB) της πολυφασματικής απεικόνισης Landsat-8 της 2/6/2013 (αριστερά), οι λωρίδες λήψης του υπερφασματικού δέκτη CASI-550 στις 25/7/2013 (στο κέντρο) και οριοθετημένο με κόκκινη γραμμή το δάσος του Ταξιάρχη σε υπέρθεση στις Landsat-8 και CASI-550 (δεξιά).

Η συνολική έκταση των 5800 ha κατηγοριοποιείται σε δασοσκεπή έκταση (περίπου 3895 ha), 264 ha είναι μερικώς δασοσκεπής έκταση, 1592 ha είναι γεωργικώς καλλιεργούμενη έκταση και 85 ha είναι άγονη έκταση. Το κλίμα είναι Μεσογειακό-Ηπειρωτικό. Η μέση θερμοκρασία αέρος είναι 10.7 °C, ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος είναι οι ψυχρότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία αέρος 1.7 °C και οι Ιούλιος και Αύγουστος οι θερμότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία αέρος 20.2 °C. Η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα που έχει καταγραφεί είναι 35.5 °C και η χαμηλότερη -15 °C. Η μέση ετήσια υγρασία είναι 73.1%. Στο δάσος παρατηρείται μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 748 mm. Από φυτοκοινωνικής άποψης το δάσος ανήκει στη ζώνη Quercetalia (δρύες). Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εμφανίζεται η ένωση Quercetum Confertae, ενώ μικρά τμήματα της ένωσης Querceto Fagetum εμφανίζονται τοπικά καθώς επίσης η ένωση Quercetum Ilícis στα ρεύματα. Η περιοχή του δάσους του Ταξιάρχη αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δάσος πλατύφυλλων ειδών της ελληνικής επικράτειας. Το δάσος αναγεννάται με φυσικό τρόπο και μόνο σε ακραίες δυσμενείς συνθήκες γίνεται επέμβαση με τεχνητή αναγέννηση.

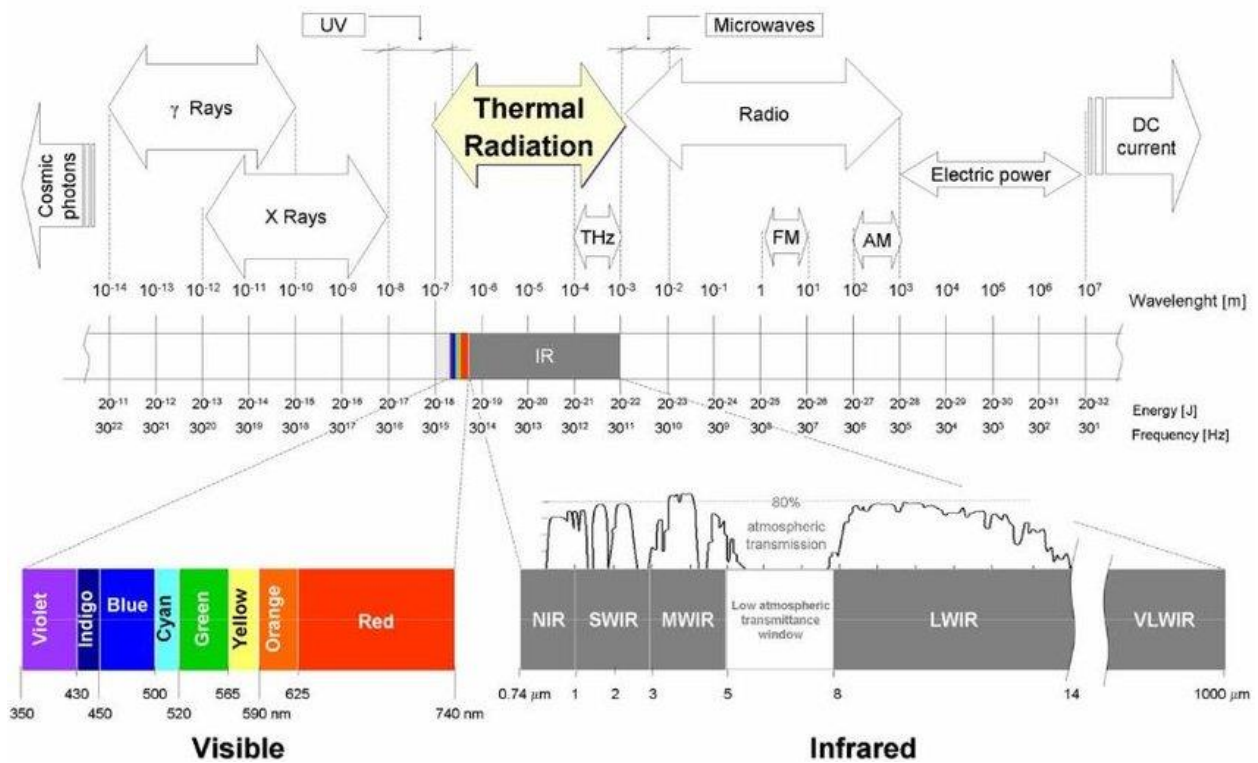
Η βλάστηση της περιοχής κυριαρχείται από φυλλοβόλα δέντρα και διαρθρώνεται σε τρεις ζώνες: την Ευμεσογειακή ζώνη, την Παραμεσογειακή ζώνη και τη ζώνη των δασών Οξιάς (τα ορεινά δάση στη χώρα μας δημιουργούν ομοειδείς ομάδες, οι οποίες διαμορφώνονται κατά υψομετρικές ζώνες - τις ζώνες βλάστησης). Αυτές διακρίνονται ανάλογα με τη χλωριδική σύνθεση, το υψόμετρό τους, τις πετρολογικές και εδαφικές συνθήκες, την έκθεση και κλίση του τοπίου, τη θερμοκρασία αέρος και τη βροχόπτωση. Το μεγαλύτερο μέρος του δάσους καταλαμβάνει η πλατύφυλλος Δρυς. Άλλα σπουδαία είδη είναι η Οξιά, η Μαύρη Πεύκη, η Χαλέπειος Πεύκη, ενώ υπάρχουν και άλλα ξυλώδη είδη όπως το Ρείκι, η Αριά, ο Φράξος, ο Πλάτανος, η Ιτιά κλπ. Ιδιαίτερη σημασία για την περιοχή αποτελεί το Έλατο, φυτεμένο από τους κατοίκους στα δικά τους κτήματα, με σκοπό να κοπούν και να πουληθούν ως Χριστουγεννιάτικα δένδρα. Με την καλλιέργεια των Χριστουγεννιάτικων δενδρυλλίων ασχολούνται πολλές δεκαετίες στην περιοχή, με περίπου 2 εκατομμύρια δενδρύλλια, να προσφέρουν εισόδημα, προστασία των εδαφών και καταφύγιο της πανίδας. Από άποψης χλωρίδας υπάρχουν περισσότερα από 50 περίπου ξυλώδη και σχεδόν 200 ποώδη είδη. Το όρος Χολομώντας με

οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης προστατεύεται, έχοντας ως επίκεντρο ενδιαφέροντος τα αρπακτικά πουλιά, ενώ υπάρχουν αρκετά καταφύγια άγριας ζωής, όπου απαγορεύεται κάθε μορφής κυνήγι. Πρέπει να αναφερθούν (για λόγους όπου η χαρτογράφηση θα γίνει ευκολότερα κατανοητή) τα βασικότερα χαρακτηριστικά των δένδρων που σχετίζονται με τη μεταβλητή του δασικού ύψους (ύψος της κομοστέγης των δένδρων). Αυτά είναι :

- Ο δασικός τύπος μια περιοχής. Συγκεκριμένα, η δασική περιοχή του Ταξιάρχη αποτελείται κυρίως από δρύες και οξιές που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 27 μέτρα αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη περιοχή συναντάται επίσης μαύρη πεύκη, τραχεία πεύκη και έλατα που είναι φυτεμένα από το δασαρχείο ή από ιδιώτες και έχουν μέγιστο ύψος περίπου 6 μέτρα.
- Η ηλικία των δέντρων. Ο τρόπος διαχείρισης του δάσους είναι πρεμνοφυής. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρόνο υλοτομείται ένα κομμάτι του δάσους, στη συγκεκριμένη περίπτωση 40 ha το χρόνο, με στόχο την ανανέωσή του. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο τρόπο της διαχείρισης θεωρείται ότι κάθε 25 χρόνια το δάσος ανανεώνεται πλήρως. Όμως στο συγκεκριμένο δάσος συναντώνται δέντρα ηλικίας 10 έως 70 ετών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές ομάδες ηλικιών στη συγκεκριμένη δασική περιοχή ενδιαφέροντος και μια μέση προσέγγιση αύξησης του δασικού ύψους στα 10 χρόνια είναι περίπου 6 μέτρα [Karamnvasis K. and Karathanassi V., 2015]. Το δασικό ύψος εξετάζεται συνήθως όταν ένα δέντρο έχει ηλικία 40 ετών (ύψος αναφοράς) γιατί τότε θεωρείται ότι οι μεταβολές στο ύψος του είναι πολύ μικρές.
- Η ποιότητα του τόπου, είναι ένας ακόμη παράγοντας που σχετίζεται με το δασικό ύψος [Molina-Valero A. J. et al, 2019]. Για την περιοχή μελέτης η χειρότερη ποιότητα του τόπου είναι η 5η όπου συναντάται συνήθως σε βραχώδεις περιοχές με το μέγιστο δασικό ύψος να φτάνει περίπου τα 8 μέτρα. Οι καλύτερες ποιότητες του τόπου στην περιοχή μας είναι η 1η σε ελάχιστα σημεία και η 2η (περίπου 20% της συνολικής περιοχής) με το μέγιστο δασικό ύψος να είναι 27 και 23 μέτρα αντίστοιχα.

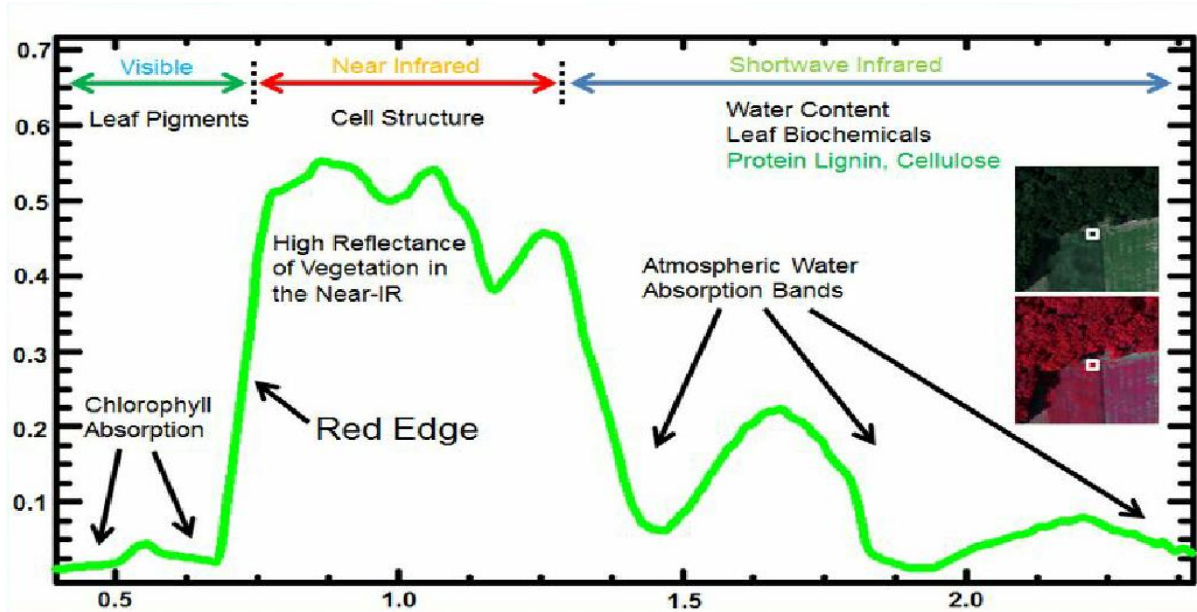
4.2.1 Φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τα φύλλα των φυτών είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των εφαρμογών της Φασματοσκοπίας και της Τηλεπισκόπησης στη μελέτη και την ανάλυση της βλάστησης [Jensen R. J., 2015]. Οι βιολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες της βλάστησης επιδρούν στο συντελεστή ανακλαστικότητας, στη μετάδοση και στην απορροφητικότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που προέρχεται από διάφορες φασματικές περιοχές, στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αν και τα συστατικά των φυτών (π.χ. κλαδιά, άνθη) έχουν μια επίδραση στη φασματική απόκριση, η συμβολή τους είναι μικρή όταν συγκρίνεται με αυτή των φύλλων [Karathanassi V., 2014].



Εικόνα 4-2: Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (ΗΜΑ). Πηγή: Ibarra-Castanedo C., 2005

Το ορατό και το κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορούν να διαχωριστούν ποιοτικά σε δύο φασματικές ζώνες προκειμένου να αξιολογήσουμε τις βασικές ιδιότητες των φύλλων: α) στη ζώνη 0.4-0.75 μ m όπου οι χρωστικές της βλάστησης όπως οι χλωροφύλλες a και b, οι καροτίνες a και b και οι ξανθοφύλλες, διαμορφώνουν την φασματική υπογραφή του φυτού και β) στη ζώνη 0.75-1.35 μ m όπου η εσωτερική δομή των φύλλων είναι υπεύθυνη για την υπογραφή. Τα περισσότερα φυτά εμφανίζονται πράσινα λόγω της μεγάλης (70-90%) απορρόφησης του φωτός από τη χλωροφύλλη στα 0.45 μ m (μπλε) και 0.68 μ m (κόκκινο) και της σχετικά λιγότερης απορρόφησης στα πράσινα μήκη κύματος (0.55 μ m), (Εικόνα 4-3). Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της ανάπτυξης των φυτών, η συγκέντρωση χλωροφύλλης είναι σχετικά χαμηλή έναντι των καροτενοειδών και η οπτική εμφάνιση ενός φύλλου είναι ανοιχτή πράσινη. Το μπλε και κόκκινο φως απορροφάται και χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση και τις φωτοχημικές αντιδράσεις. Δεδομένου ότι τα φυτά ωριμάζουν, η αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης είναι ανάλογη με άλλες χρωστικές και το φυτό εμφανίζεται από πράσινο έως σκούρο πράσινο. Κατά τη γήρανση, η σύνθεση της χλωροφύλλης παύει, με συνέπεια τη λιγότερη απορρόφηση φωτός στα μπλε και κόκκινα μήκη κύματος (Roy, 1989). Στο γερασμένο φυτό κυριαρχούν άλλες χρωστικές ουσίες (εκτός της χλωροφύλλης), με συνέπεια να εμφανίζεται με ένα κίτρινο έως καφετί χρώμα.

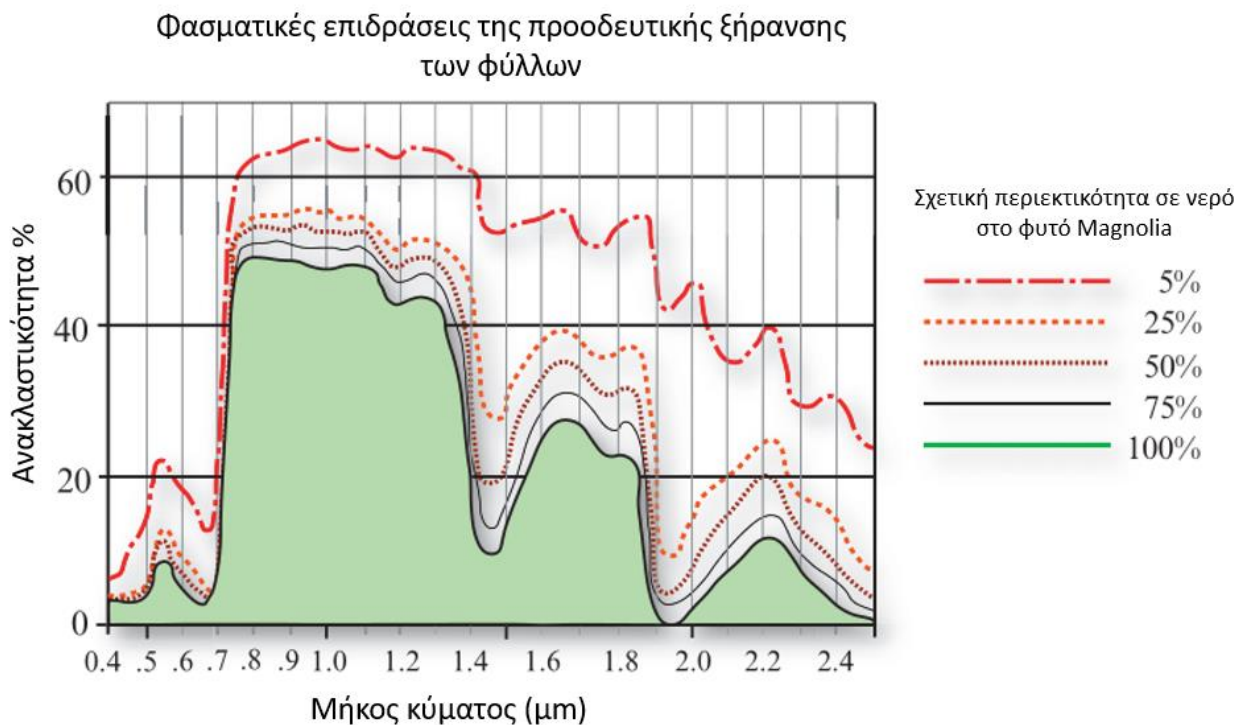


Εικόνα 4-3: Φασματική υπογραφή της βλάστησης και φασματικά χαρακτηριστικά της, στο Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (ΗΜΑ), στην περιοχή 0.4-2.6 μm . Πηγή : <http://www.harrisgeospatial.com>

Στην φασματική ζώνη από 0.75 έως 1.35 μm , ο συντελεστής ανακλαστικότητας επηρεάζεται κυρίως από την εσωτερική δομή των φύλλων. Σε αυτήν την φασματική ζώνη, εμφανίζεται σχετικά υψηλότερος συντελεστής ανακλαστικότητας, όταν συγκρίνεται με το ορατό φως, με πάνω από 50% της εισερχόμενης ακτινοβολίας να ανακλάται από τα ώριμα φύλλα.

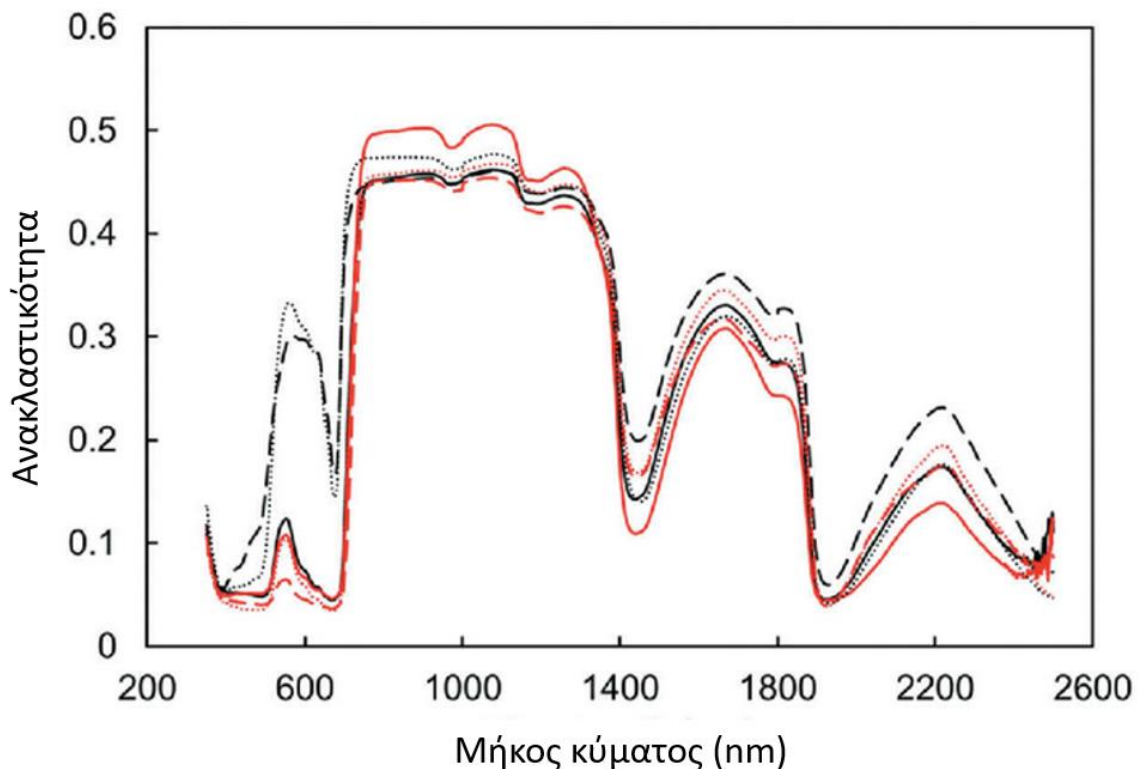
Επιπρόσθετα έχουμε και την υγρασία στην ατμόσφαιρα, η οποία δημιουργεί πέντε κύριες ζώνες απορρόφησης, από το εγγύς υπέρυθρο έως το μέσο υπέρυθρο τμήμα του ΗΜΑ στα 0.97, 1.19 μm , 1.45 μm , 1.94 μm και 2.7 μm (Εικόνα 4-4). Η ζώνη απορρόφησης του νερού στα 2.7 μm είναι η ισχυρότερη, σε αυτό το τμήμα του φάσματος (υπάρχει επίσης μία στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου στα 6.27 μm). Ωστόσο, υπάρχει επίσης μια ισχυρή σχέση μεταξύ της ανακλαστικότητας στο μέσο υπέρυθρο από 1.3-2.5 μm και της ποσότητας νερού (υγρασίας) που υπάρχει στα φύλλα ενός φυτικού θόλου. Το νερό στα φυτά απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία μεταξύ των ζωνών απορρόφησης, με αυξανόμενη κλίμακα όσο μεγαλώνει το μήκος κύματος. Σε αυτά τα μήκη κύματος του μέσου υπέρυθρου, οι κορυφές στην ανακλαστικότητα της βλάστησης εμφανίζονται περίπου στα 1.6 μm και 2.2 μm , μεταξύ των κύριων ατμοσφαιρικών ζωνών απορρόφησης νερού (Εικόνα 4-4). Το νερό και γενικότερα η υγρασία, είναι ένας πολύ καλός απορροφητής της μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας, επομένως γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διόγκωση των φύλλων, τόσο χαμηλότερη είναι η ανακλαστικότητα του φύλλου στο μέσο υπέρυθρο. Αντίθετα, καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία των φύλλων μειώνεται, η ανακλαστικότητα στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου αυξάνεται σημαντικά. Καθώς η ποσότητα του νερού των φυτών στους μεσοκυττάριους χώρους μειώνεται, αυτό αναγκάζει την προσπίπτουσα μέση υπέρυθρη ακτινοβολία να διασκορπίζεται εντονότερα στη διεπιφάνεια των μεσοκυττάριων τοιχωμάτων, με αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από το φύλλο, στο μέσο υπέρυθρο. Στην εικόνα 4-4 παρουσιάζεται η

ανακλαστικότητα από φύλλα του φυτού Μαγνόλια η μεγανθής, σε πέντε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, που εμφανίζονται στην περιοχή από 0.4-2.5 μm .



Εικόνα 4-4: Διαγράμματα ανακλαστικότητας του φύλλου της μαγνόλιας της μεγανθούς (*Magnolia grandiflora*). Όσο η περιεκτικότητα σε νερό (υγρασία) μειώνεται, αυξάνει η ανακλαστικότητα στην περιοχή των 0.4 έως 2.5 μm . Ωστόσο, η μεγαλύτερη αύξηση σημειώθηκε στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου από 1.3-2.5 μm . Πηγή: [Jensen R. J., 2015].

Συσχετίζοντας το συντελεστή ανακλαστικότητας με την ηλικία ενός φυτού, θα λέγαμε ότι είναι στο υψηλότερό του σημείο στην πλήρη ωριμότητα και μειώνεται με την κατάρρευση του κυτταρικού τοιχώματος κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Έχει παρατηρηθεί, ότι η έλλειψη ισχυρής ανακλαστικότητας από τα φύλλα στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος μπορεί να αποδοθεί στις χρωστικές ουσίες των φύλλων, που απορροφούν το ορατό φως [Asner, 1998]. Η Εικόνα 4-5 επιβεβαιώνει ότι φύλλα που στερούνται χλωροφύλλης ανακλούν μεγάλο ποσό του ορατού φωτός ακριβώς αρκετά παρόμοια, όπως ανακλούν και στο υπέρυθρο. Η Εικόνα 4-5 επίσης επιβεβαιώνει ότι ο συντελεστής ανακλαστικότητας ενός φύλλου γενικά δεν είναι εξαρτώμενος (τουλάχιστον έντονα) από το πάχος των φύλλων αλλά από τις περιεχόμενες χρωστικές, μέσα σε συνηθισμένο εύρος πάχους. Η ανακλαστικότητα επηρεάζεται εντονότερα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπου οι χρωστικές ουσίες των φύλλων, ιδιαίτερα η χλωροφύλλη, απορροφούν την ακτινοβολία (ενέργεια).

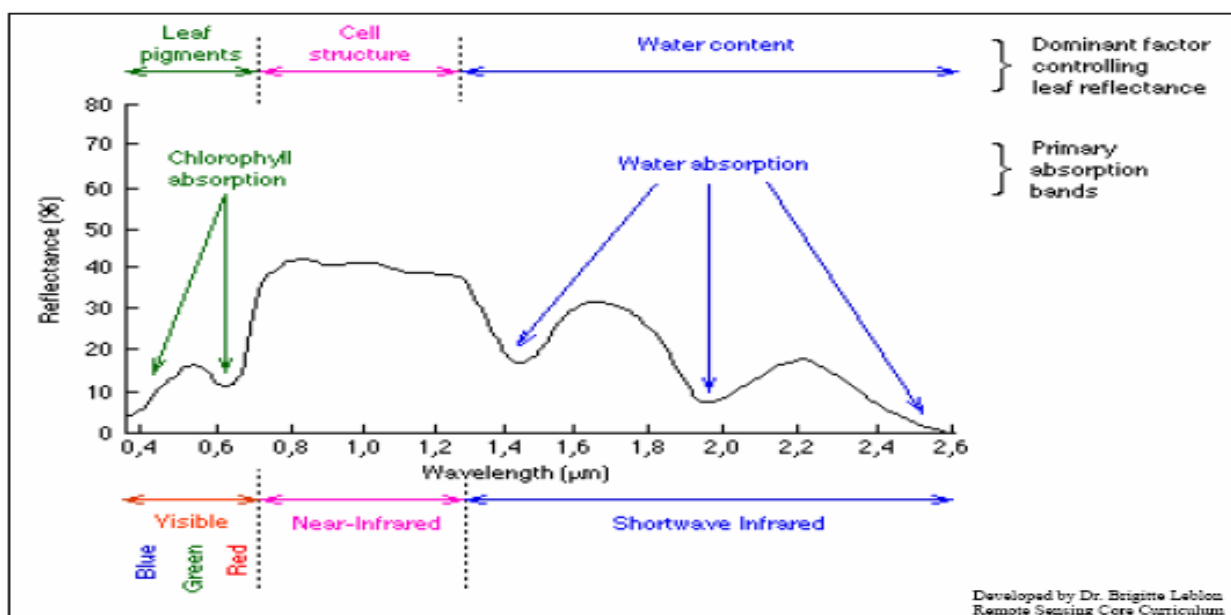


Εικόνα 4-5: Διάγραμμα ανακλαστικότητας για τρεις τύπους φύλλων με ελάχιστη και μέγιστη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη. Η συμπαγής, η πλατιά διακεκομμένη και η πυκνή, λεπτή διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύουν καλλιέργεια, θάμνο και δέντρο, αντίστοιχα. Η μαύρη και η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύουν ελάχιστη και μέγιστη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, αντίστοιχα. Πηγή [Xiaojin Qian et al, doi:10.1080/01431161.2019.1579940].

Έχει επίσης αποδειχθεί ότι οι οπτικές ιδιότητες των φύλλων συσχετίζονται με τη φωτοσυνθετική απόδοσή τους [Gates D.M., 1976], και με τα αποθέματα θερμικής ενέργειας τους [Ehleringer and Mooney, 1978]. Επιπλέον, η κατανόηση των δομικών τμημάτων των φύλλων που επηρεάζουν τον συντελεστή ανακλαστικότητας του φύλλου, είναι σημαντική για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των φασματοσκοπικών μετρήσεων. Ο συντελεστής ανακλαστικότητας των φύλλων στη κοντινή υπέρυθρη περιοχή (NIR, 0.75-1.35 μm) επηρεάζεται πρωτίστως από τη δομή των φύλλων, ενώ ο συντελεστής ανακλαστικότητας στη μέση υπέρυθρη περιοχή (1.35-2.5 μm) από την περιεκτικότητα σε νερό (Gates et al, 1965). Στη μετάβαση από το κόκκινο στο κοντινό υπέρυθρο, ο συντελεστής ανακλαστικότητας των φύλλων αυξάνεται απότομα, δημιουργώντας ένα ευδιάκριτο, φασματικό, χαρακτηριστικό γνώρισμα, το οποίο ονομάζεται "κόκκινη άκρη" ("Red Edge"). Ο προσδιορισμός με ακρίβεια της θέσης αυτής (του "Red Edge") έχει συσχετιστεί με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, με τα στάδια ανάπτυξης του φυτού [Vogelmann, 1993] αλλά και με την καταπόνηση του φυτού [Gitelson, Lang and Lichtenthaler, 1996]. Η ανάλυση του συντελεστή ανακλαστικότητας των φύλλων στο κοντινό υπέρυθρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσουμε την επίδραση των δομικών ιδιοτήτων των φύλλων στο συντελεστή ανακλαστικότητας [Gates D.M., 1970], σε αντιδιαστολή με τα χημικά συστατικά του φύλλου όπως η χλωροφύλλη και το νερό [Curran et al, 1992].

4.2.2 Χλωροφύλλη και άλλες χρωστικές

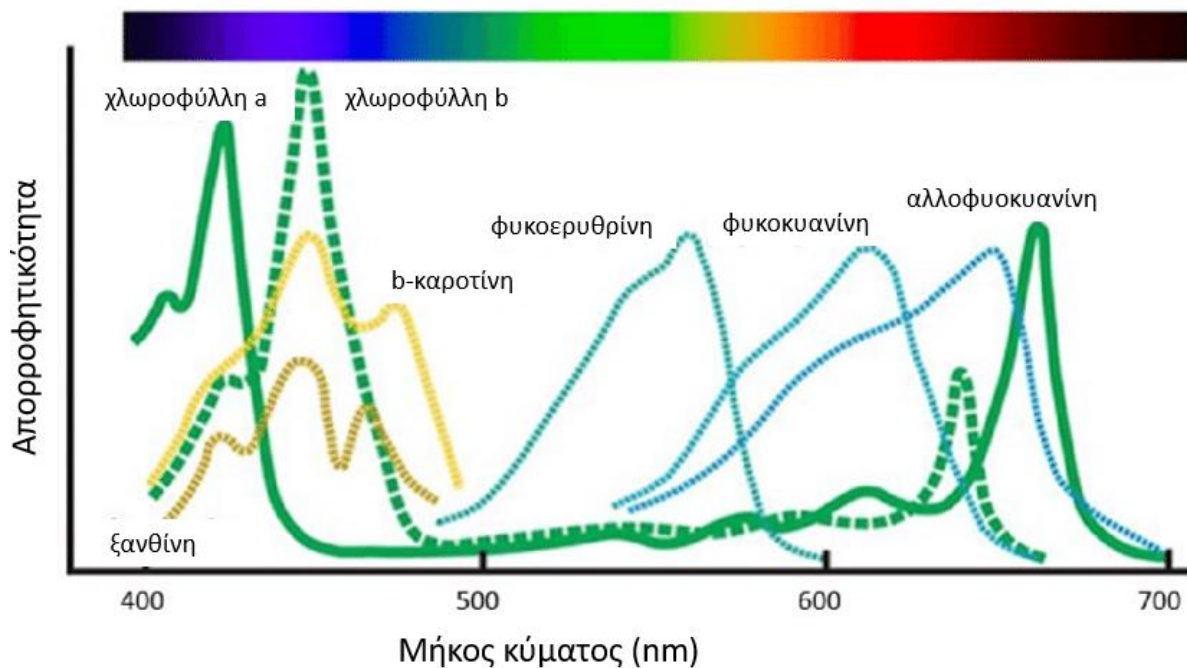
Με τον όρο χλωροφύλλη χαρακτηρίζεται μια ομάδα χρωστικών ουσιών, που προσδίδουν το πράσινο χρώμα σχεδόν σε όλα τα φυτά. Εντοπίζεται σε οποιοδήποτε σημείο του φυτού που βρίσκεται εκτεθειμένο στο ηλιακό φως ή και σε τεχνητό φωτισμό. Οι χρωστικές αυτές ουσίες περιέχονται στα κύτταρα των φυτών, στα μέρη που ονομάζονται χλωροπλάστες. Κύρια μέλη της ομάδας αποτελούν η χλωροφύλλη α και η χλωροφύλλη β, υπεύθυνες για την απορρόφηση του φωτός στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Η χλωροφύλλη απορροφά ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος στην περιοχή του ορατού φωτός, ενώ αντανακλά άλλα μήκη κύματος (Εικόνα 4-7). Οι χλωροφύλλες α και β έχουν τα μέγιστα σημεία απορροφητικότητας τους στην κόκκινη και στην μπλε περιοχή του φάσματος. Ατυχώς στην μπλε περιοχή, έχουμε μέγιστες επικαλύψεις με την απορροφητικότητα των καροτενοειδών, οπότε δεν χρησιμοποιείται γενικά αυτή η φασματική ζώνη για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη (Εικόνα 4-6 και Εικόνα 4-7). Η μέγιστη απορροφητικότητα στην κόκκινη περιοχή εμφανίζεται μεταξύ 0.66-0.68 μm αλλά ο συντελεστής ανακλαστικότητας σε αυτά τα μήκη κύματος δεν έχει αποδειχθεί χρήσιμος για την πρόβλεψη της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, όσο σε ελαφρώς μεγαλύτερα ή μικρότερα μήκη κύματος. Αυτό συμβαίνει επειδή η σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη είναι επαρκής για να προκαλέσει κορεσμό στην απορρόφηση της ακτινοβολίας στην περιοχή 0.66 έως 0.68 μm , μειώνοντας κατά με τον τρόπο αυτόν την ευαισθησία των φασματικών δεικτών στην υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης, που είναι βασισμένοι (οι δείκτες) σε αυτά τα μήκη κύματος. Συνεπώς, εμπειρικά μοντέλα για την πρόβλεψη της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, από την ανακλαστικότητα της βλάστησης, είναι κατά ένα μεγάλο μέρος βασισμένα στην ανακλαστικότητα στις περιοχές των 0.55 μm ή 0.7 μm , όπου προκειμένου να κορεστεί η απορρόφηση, απαιτείται μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη [Penuelas et al, 1995; Qian X. et al, 2019, Thalys Program, 2012-2016].



Εικόνα 4-6: Διάγραμμα απορροφητικότητας της βλάστησης στην περιοχή του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος (ΗΜΑ) από 0.4 έως 2.5 μm . Πηγή: Thenkabail S. Prasad et al, 2019.

Η εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε καροτενοειδή με βάση τις τιμές ανακλαστικότητας, είναι πολύ δυσκολότερη από την εκτίμηση της χλωροφύλλης. Αυτό συμβαίνει λόγω α) της επικάλυψης των μέγιστων τμημάτων απορρόφησης μεταξύ της χλωροφύλλης και του καροτενοειδούς (Εικόνα 4-7) και β) της υψηλότερης συγκέντρωσης της χλωροφύλλης από τα καροτενοειδή στα περισσότερα φύλλα. Κατά συνέπεια, οι εμπειρικοί δείκτες που έχουν δημιουργηθεί έχουν αποδειχθεί επιτυχέστεροι για την εκτίμηση της αναλογίας των καροτενοειδών προς τη χλωροφύλλη, απ' ό,τι για την εκτίμηση της απόλυτης συγκέντρωσης καροτενοειδών [Merzlyak et al, 1999, Xianfeng Zhou, 2019]. Οι περισσότεροι δείκτες για την εκτίμηση της αναλογίας καροτενοειδή/χλωροφύλλη είναι με βάση τη σύγκριση του συντελεστή ανακλαστικότητας στην περιοχή της μέγιστης απορρόφησης των καροτενοειδών (0.4-0.5 μm) ως προς τον συντελεστή ανακλαστικότητας στην περιοχή του κόκκινου, ο οποίος επηρεάζεται μόνο από τη χλωροφύλλη.

Φάσματα απορρόφησης χρωστικών σε ένα φυτό



Εικόνα 4-7: Φασματικά παράθυρα στο HMA που δείχνουν τα σημεία απορροφητικότητας για τις συνηθισμένες χρωστικές ενός φυτού. Πηγή Lincoln Taiz et al., 2014.

4.3 Δείκτες βλάστησης

Στην προσπάθεια οι επιστήμονες να μοντελοποιήσουν τις διάφορες βιοφυσικές μεταβλητές της βλάστησης από δεδομένα Τηλεπισκόπησης, έκαναν χρήση των δεικτών βλάστησης, που περιγράφονται από έναν αριθμό και είναι αδιάστατα μεγέθη, ενδεικτικά α) για τη μεγιστοποίηση της ευαισθησίας στις βιοφυσικές παραμέτρους των φυτών, κατά προτίμηση με γραμμική απόκριση, προκειμένου η ευαισθησία να είναι διαθέσιμη για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών βλάστησης και να διευκολυνθεί η επικύρωση και η βαθμονόμηση του δείκτη, β) τη μοντελοποίηση εξωτερικών επιδράσεων όπως η γωνία του ήλιου, η γωνία θέασης και η

ατμόσφαιρα, γ) την ομαλοποίηση εξωτερικών παραμέτρων στην υπογραφή του φυτού, όπως οι παραλλαγές του φόντου του θόλου, συμπεριλαμβανομένης της τοπογραφίας (κλίση και όψη), οι παραλλαγές του εδάφους και οι διαφορές στη γηρασμένη ή ξυλώδη βλάστηση οι οποίες αποτελούν μη φωτοσυνθετικά στοιχεία θόλου και δ) για συγκεκριμένη μετρήσιμη βιοφυσική παράμετρο, όπως η βιομάζα, ο φυλλικός δείκτης LAI ή η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (APAR) [Huete and Justice, 1999; Cheng et al., 2008; Vina et al. 2011; Wang et al., 2013].

Οι δείκτες που ακολουθούν επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλοι για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης [Thalis Program, 2012-2016]. Ο ακριβής αλγόριθμός τους περιγράφεται στον πίνακα 1 :

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): ο πλέον γνωστός και ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης βλάστησης είναι ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (NDVI) ο οποίος βασίζεται στην αντίθεση λόγω χρωστικών ουσιών της βλάστησης μεταξύ της μέγιστης απορρόφησης της χλωροφύλλης στο κόκκινο και της μέγιστης ανακλαστικότητας στο υπέρυθρο που προκαλείται από την κυτταρική δομή των φύλλων [Rouse et al, 1974].

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

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

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

OSAVI (Optimized Soil - Adjusted Vegetation): Πρόκειται για έναν δείκτη βλάστησης, βέλτιστα προσαρμοσμένο στην φασματική συμπεριφορά των υποκείμενων εδαφικών εικονοστοιχείων. Στην πραγματικότητα πρόκειται για έναν δείκτη SAVI με $L = 0.16$, τιμή για την οποία έδειξαν οι [Rondeaux et al, 1996] ότι ελαχιστοποιείται η τυπική απόκλιση στην ανάμειξη εδάφους και βλάστησης.

RENDVI (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index): Πρόκειται για έναν τροποποιημένο δείκτη βλάστησης, οποίος χρησιμοποιεί κυρίως περιοχές στο "Red Edge" αντί για τις «κλασικές» κορυφές ανακλαστικότητας και απορρόφησης (στα κανάλια Red και NIR).

MRENDVI (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index): Πρόκειται για έναν τροποποιημένο δείκτη RENDVI βλάστησης, βέλτιστα προσαρμοσμένο για την ανακλαστικότητα των φύλλων.

4.4 Δείκτες χλωροφύλλης και χρωστικών

Οι δείκτες χλωροφύλλης και γενικότερα χρωστικών της βλάστησης που ακολουθούν [Thalis Program, 2012-2016], αξιολογήθηκαν έπειτα από δοκιμές και φωτοερμηνεία, ως οι πλέον κατάλληλοι για την χαρτογράφηση της βιομάζας. Κάποιοι από αυτούς αναφέρονται στην φασματική περιοχή "Red Edge" (περίπου από 0.68 μm έως 0.73 μm) η οποία αποτελεί περιοχή ταχείας μεταβολής της ανακλαστικότητας της βλάστησης, όπου η χλωροφύλλη από σχεδόν πλήρη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ορατό μέρος του φάσματος, καταλήγει να ανακλά πολύ έντονα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα των 0.7 μm . Ο αλγόριθμός τους περιγράφεται στον πίνακα 1:

MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index) : Αποτελεί παραλλαγή του δείκτη CARI ο οποίος αναπτύχθηκε για τη μέτρηση της απορρόφησης του φωτός από τη χλωροφύλλη στο κόκκινο (670 μm), [Kim et al, 1994]. Συγκεκριμένα μετρά το βαθμό απορρόφησης της χλωροφύλλης στα 670 μm (στο κόκκινο) σε σχέση με την μέγιστη απορρόφηση στα 0.55 μm (στο πράσινο) και με την ανακλαστικότητα στα 0.7 μm (ή 0.705 μm). Η παραλλαγή του MCARI σχεδιάστηκε για να αποδώσει καλύτερα την μείωση της μεταβλητότητας της φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας λόγω μη φωτοσυνθετικών υλικών (π.χ. του ξυλώδους τμήματος).

TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index): Αποτελεί και αυτός παραλλαγή του δείκτη CARI με στόχο να αντισταθμίσει τις διακυμάνσεις στην ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας από τις επιδράσεις των κοντινών εικονοστοιχείων που απεικονίζουν έδαφος αλλά και των μη φωτοσυνθετικών υλικών και να αυξήσει την ευαισθησία σε χαμηλές τιμές χλωροφύλλης [Haboudane et al, 2002].

MCARI / OSAVI: Αναπτύχθηκε με στόχο να μειωθεί δραστικά η ευαισθησία που εμφανίζεται εξαιτίας της ανακλαστικότητας του υποκείμενου του φυτού εδάφους [Daughtry et al, 2000].

TCARI / OSAVI: Ανάλογος δείκτης με τον προηγούμενο, με στόχο να αυξήσει την ευαισθησία σε πολύ χαμηλές τιμές της μεταβολής που εμφανίζεται εξαιτίας της ανακλαστικότητας του υποκείμενου του φυτού εδάφους [Daughtry et al, 2000].

TVI (Triangular Vegetation Index): Έχει ως στόχο να χαρακτηρίσει την ακτινοβολούμενη ενέργεια που απορροφάται από τις χρωστικές των φύλλων σε συνδυασμό με το μέγεθος της ανακλαστικότητας στο πράσινο, από την άποψη της σχετικής διαφοράς της ανακλαστικότητας μεταξύ κόκκινου και εγγύς υπέρυθρου [Broge and Leblanc, 2000].

MCARI-1 : Αποτελεί παραλλαγή του MCARI με σκοπό την διατήρηση της ευαισθησίας της χλωροφύλλης στις επιδράσεις των γειτονικών εικονοστοιχείων που απεικονίζουν έδαφος [Haboudane et al, 2004].

MCARI-2 : Αποτελεί και αυτός παραλλαγή του MCARI με σκοπό την ελάττωση των επιδράσεων του εδάφους και της ατμόσφαιρας στην χλωροφύλλη [Haboudane et al, 2004].

TCI (Triangular Chlorophyll Index) : Παρόμοιος του δείκτη TVI με βασική ιδέα ότι η μεταβολή στη συγκέντρωση της χλωροφύλλης προκαλεί μια μετατόπιση στο κόκκινο, η οποία αντικατοπτρίζεται σε αλλαγή στην ανακλαστικότητα στα 0.702 μm [Haboudane et al, 2007].

TCI-1 : Αποτελεί παραλλαγή του TCI.

TCI-2 : Αποτελεί παραλλαγή του TCI με βάση την παρατήρηση ότι οι μεταβολές στο κόκκινο και στην περιοχή αμέσως μετά το “Red Edge”, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες.

TCI-3 : Αποτελεί παραλλαγή του TCI-1.

R750 / R710 : Ο λόγος ανιχνεύει ικανοποιητικά τις χρωστικές της βλάστησης [Zarco-Tejada et al, 2001].

VoG-2 (Vogelmann Red Edge Index 2): Ευαίσθητος στις μεταβολές των χρωστικών, υπολογίζει τις χλωροφύλλες a και b της κομοστέγης [Vogelmann, 1993].

PRI (Photochemical Reflectance Index) : Πρόκειται για έναν δείκτη ευαίσθητο στις μεταβολές των καροτινοειδών χρωστικών (π.χ. χρωστικές ξανθοφύλλης και χλωροφύλλης) σε ζωντανό φύλλωμα [Gamon et al, 1992].

RGRI (Red Green Ratio Index): Πρόκειται για ένα δείκτη της ερυθρότητας των φύλλων, ο οποίος ανιχνεύει την χλωροφύλλη σε σχέση με την χρωστική ανθοκυαμίνη και χρησιμοποιείται ως ενδεικτικός δείκτης για την ανάπτυξη του φυλλώματος.

Πίνακας 4-1: Οι δείκτες που εφαρμόστηκαν στις απεικονίσεις του δέκτη CASI-550

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	ΦΟΡΜΟΥΛΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ
NDVI (CASI)	$([\text{Band}770:\text{Band}780] + [\text{Band}784:\text{Band}790]) - ([\text{Band}655:\text{Band}665] + [\text{Band}676:\text{Band}685]) / ([\text{Band}770:\text{Band}780] + [\text{Band}784:\text{Band}790]) + ([\text{Band}655:\text{Band}665] + [\text{Band}676:\text{Band}685])$
RDVI	$(\text{Band}802 - \text{Band}672) / \text{SQRT}([\text{Band}802 + \text{Band}672])$
TRDVI	$1.50 * (\text{Band}802 - \text{Band}672) / \text{SQRT}([\text{Band}802 + \text{Band}672] + 0.50)$
MSR	$[(\text{Band}802 / \text{Band}672) - 1] / \text{SQRT}([\text{Band}802 / \text{Band}672] + 1)$
OSAVI	$[(1 + 0.16) * (\text{Band}802 - \text{Band}672)] / (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.16)$
NDVI (GER 1500)	$([\text{Band}770:\text{Band}780] + [\text{Band}784:\text{Band}790]) - ([\text{Band}655:\text{Band}665] + [\text{Band}676:\text{Band}685]) / ([\text{Band}770:\text{Band}780] + [\text{Band}784:\text{Band}790]) + ([\text{Band}655:\text{Band}665] + [\text{Band}676:\text{Band}685])$
ΔΕΙΚΤΕΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ	
MCARI	$[(\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)$
TCARI	$3 * [((\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551))] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)]$
[TCARI / OSAVI]	$3 * [((\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551))] * (\text{Band}702 / \text{Band}672)] / (((1 + 0.16) * (\text{Band}802 - \text{Band}672)) / (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.16))$
[MCARI / OSAVI]	$[(\text{Band}702 - \text{Band}672) - 0.2 * (\text{Band}702 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}672) / (((1 + 0.16) * (\text{Band}802 - \text{Band}672)) / (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.16))$
TVI	$0.50 * [120 * (\text{Band}748 - \text{Band}551) - 200 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)]$
MCARI-1	$1.20 * [2.50 * (\text{Band}802 - \text{Band}672) - 1.30 * (\text{Band}802 - \text{Band}551)]$
MCARI-2	$1.50 * [2.50 * (\text{Band}802 - \text{Band}672) - 1.30 * (\text{Band}802 - \text{Band}551)] / \text{SQRT}([2 * \text{Band}802 + 1]^2 - (6 * \text{Band}802 - 5 * \text{SQRT}(\text{Band}672)) - 0.50)$
TCI	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * \text{SQRT}(\text{Band}702 / \text{Band}552)$
TCI-1	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * \text{SQRT}(\text{Band}702 / \text{Band}552)$
TCI-2	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * (\text{Band}802 + \text{Band}672 + 0.50) / \text{SQRT}(\text{Band}702)$
TCI-3	$[1.20 * (\text{Band}702 - \text{Band}551) - 1.50 * (\text{Band}672 - \text{Band}551)] * (\text{Band}702 / \text{Band}552)$
ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΟ RED EDGE	
R750/R710	$\text{Band}748 / \text{Band}710$
VOG-2	$(\text{Band}733 - \text{Band}748) / (\text{Band}717 + \text{Band}725)$
RENDVI	$(\text{Band}750 - \text{Band}705) / (\text{Band}750 + \text{Band}705)$
MRENDVI	$(\text{Band}750 - \text{Band}705) / (\text{Band}750 + \text{Band}705 - 2 * \text{Band}445)$
PRI	$(\text{Band}531 - \text{Band}570) / (\text{Band}531 + \text{Band}570)$
RGRI	$(\text{Band}600 + \text{Band}601 + \text{Band}602 + \dots + \text{Band}699) / (\text{Band}500 + \text{Band}501 + \text{Band}502 + \dots + \text{Band}599)$

4.5 Δεδομένα και Προεπεξεργασίες

Για την περιοχή μελέτης λήφθηκαν υπερφασματικές απεικονίσεις με τον αερομεταφερόμενο υπερφασματικό δέκτη CASI-550 (στις 25/7/2013) και βοηθητικά χρησιμοποιήθηκε η απεικόνιση Lansat 8 της 2/6/2013 και ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR (L band) και ένα συμβολομετρικό ζευγάρι Cosmo Skymed (X band) για την εκτίμηση του δασικού ύψους του δάσους (στις 22/01/2010 και 9/3/2010). Η υπερφασματική απεικόνιση CASI-550 της περιοχής μελέτης έχει χωρική διακριτική δυνατότητα 2 m και διαθέτει 71 φασματικά κανάλια τα οποία καλύπτουν την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 421.8 nm έως 967.7 nm με βήμα περίπου 7 nm. Στην απεικόνιση, έγινε αρχικά ατμοσφαιρική διόρθωση με το λογισμικό ATCOR και γεωμετρική διόρθωση στο Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS 84 / UTM zone 34N. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια μάσκα με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI ώστε να απομακρυνθούν χαρακτηριστικά πολύγωνα μη βλάστησης (όπως δρόμοι και σπίτια). Το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green αντίστοιχα της απεικόνισης CASI χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο για την φωτοερμηνεία της περιοχής. Σε αυτό διακρίνεται με έντονο κόκκινο χρώμα η πυκνή, υγιής βλάστηση, ενώ τα εδάφη χωρίς ή με αραιή βλάστηση, εμφανίζονται από λευκά έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.

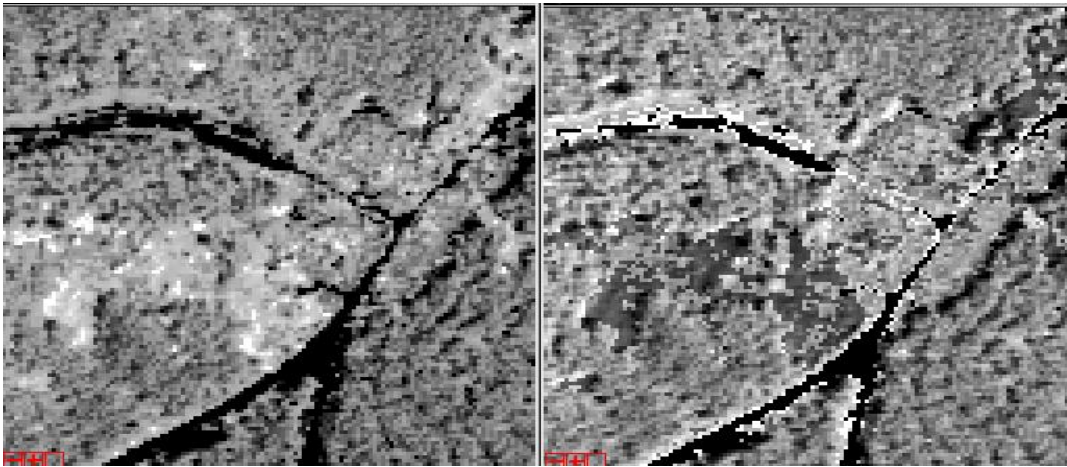


Εικόνα 4-8: Ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών VNIR, Red και Green αντίστοιχα της απεικόνισης του δέκτη CASI-550, όπου με διαβαθμίσεις του κόκκινου χρώματος διακρίνεται η βλάστηση (με έντονο κόκκινο η πυκνή, υγιής βλάστηση) ενώ τα εδάφη, χωρίς ή με αραιή βλάστηση, εμφανίζονται από λευκά έως πράσινα ή καφέ, ανάλογα με την υγρασία και την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη

4.5.1 Ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων

Οι ψηφιακές επεξεργασίες έγιναν με τα λογισμικά ENVI και QGIS και τη γλώσσα προγραμματισμού R. Δημιουργήθηκαν και δοκιμάστηκαν πολλοί δείκτες και με φωτοερμηνεία αξιολογήθηκαν ως καταλληλότεροι συνολικά 22 δείκτες βλάστησης και χρωστικών (χλωροφύλλης, ξανθοφύλλης κ.α.). Δημιουργήθηκαν τα καταλληλότερα ψευδέγχρωμα σύνθετα για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης. Ως προς τους δείκτες βλάστησης, προκρίθηκαν έπειτα από φωτοερμηνεία στην περιοχή μελέτης, οι δείκτες NDVI, RDVI, TRDVI, MSR, OSAVI, RENDVI και MRENDVI. Αυτοί χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τους δείκτες χλωροφύλλης TCARI, MCARI και TCI-2 οι οποίοι εμφανίστηκαν ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις μεταβολές της χλωροφύλλης στην περιοχή μελέτης. Ο δείκτης TCARI αποδείχτηκε περισσότερο ευαίσθητος στην ύπαρξη συγκεντρώσεων χλωροφύλλης και με μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις φωτεινότητας σε σχέση με τον TCARI / OSAVI ο οποίος ανιχνεύει και διαχωρίζει καλύτερα

εικονοστοιχεία βλάστησης τα οποία επηρεάζονται από τους γειτονικούς στόχους (π.χ. βλάστηση δίπλα σε δρόμο). Ακολουθούν εικόνες από την εφαρμογή των επιλεγμένων δεικτών:

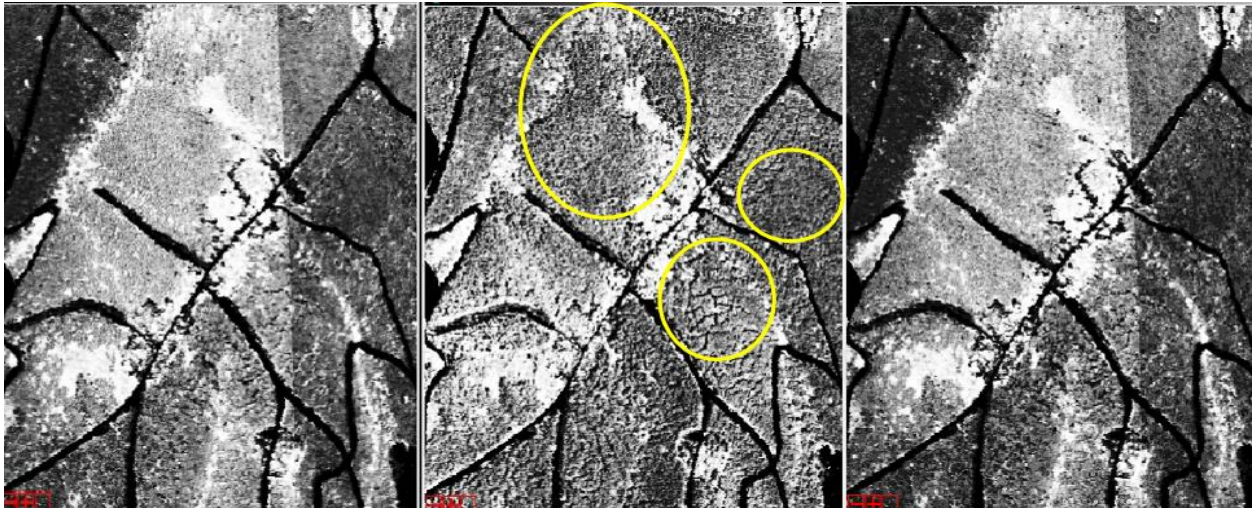


Εικόνα 4-9: (αριστερά) Απεικονίζεται ο δείκτης χλωροφύλλης TCARI και (δεξιά) ο δείκτης TCARI / OSAVI.



Εικόνα 4-10: Απεικόνιση της περιοχής της Εικόνα 4-9 με βάση τις εικόνες της Google Earth (δύο προφίλ: κάτοψη και 3D).

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι δείκτες βλάστησης NDVI, TRDVI και MSR, οι οποίοι έδειξαν (με φωτοερμηνεία) να ανταποκρίνονται καλύτερα στο ανάγλυφο της περιοχής :

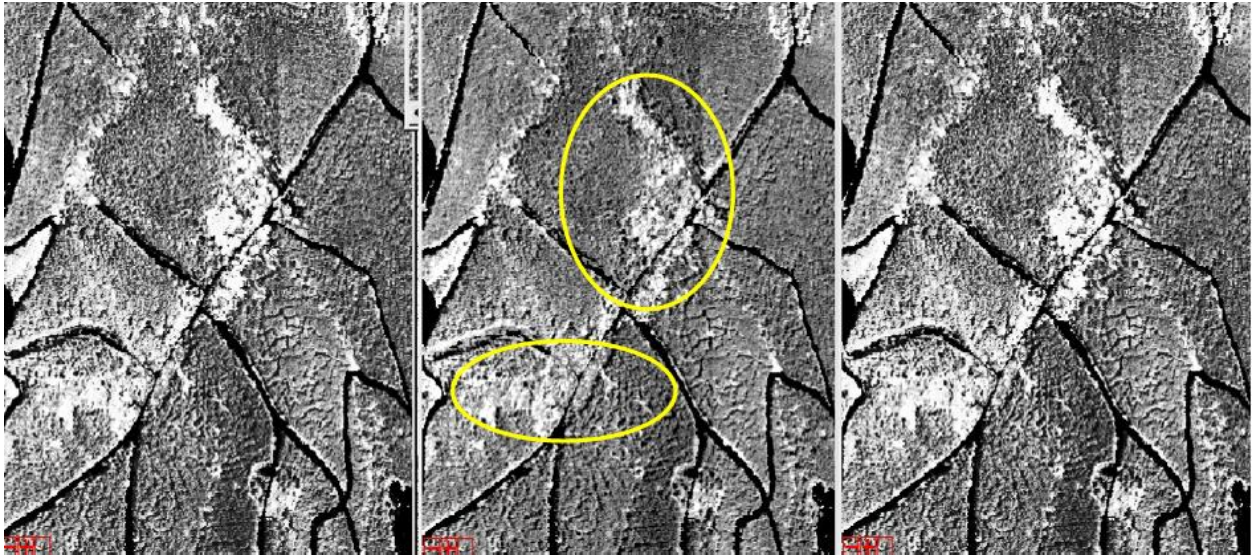


Εικόνα 4-11: (αριστερά) Απεικονίζεται ο δείκτης βλάστησης NDVI, στο (κέντρο) ο δείκτης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης MSR. Είναι εμφανής στην περιοχή η καλύτερη φασματική απόκριση και ευαισθησία του δείκτη TRDVI. Περιοχές με εμφανή σημάδια φασματικής απόκρισης οριοθετούνται από τις κίτρινες γραμμές.



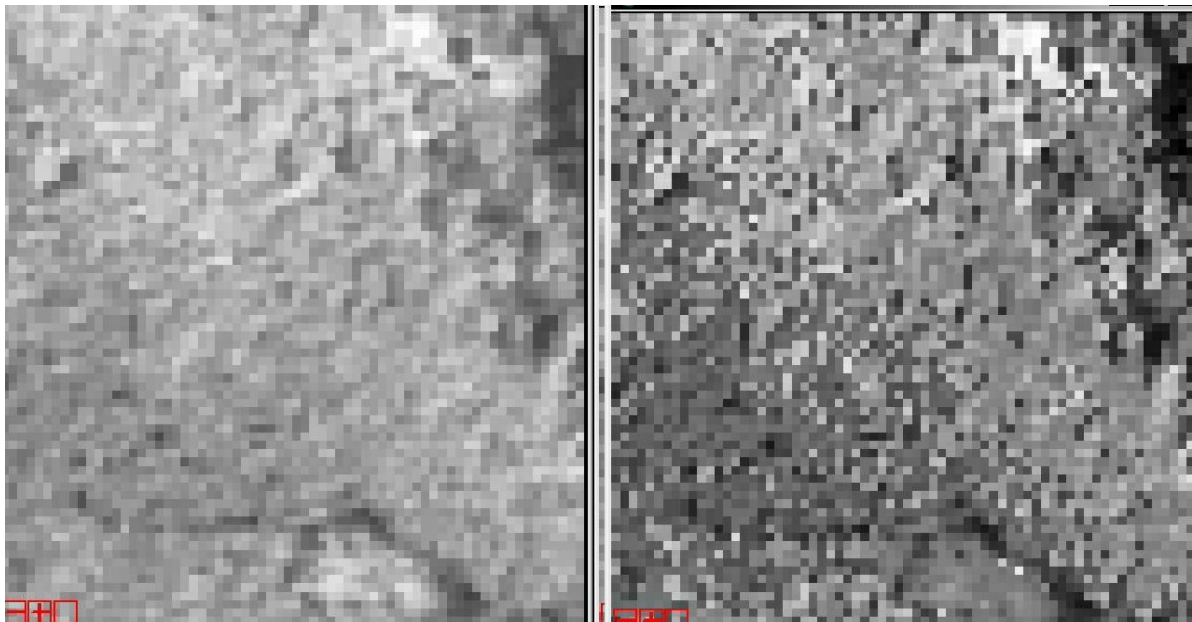
Εικόνα 4-12: Η περιοχή της Εικόνα 4-11 με βάση τις εικόνες της Google Earth (δύο προφίλ σε κάτοψη με διαφορετική μεγέθυνση).

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

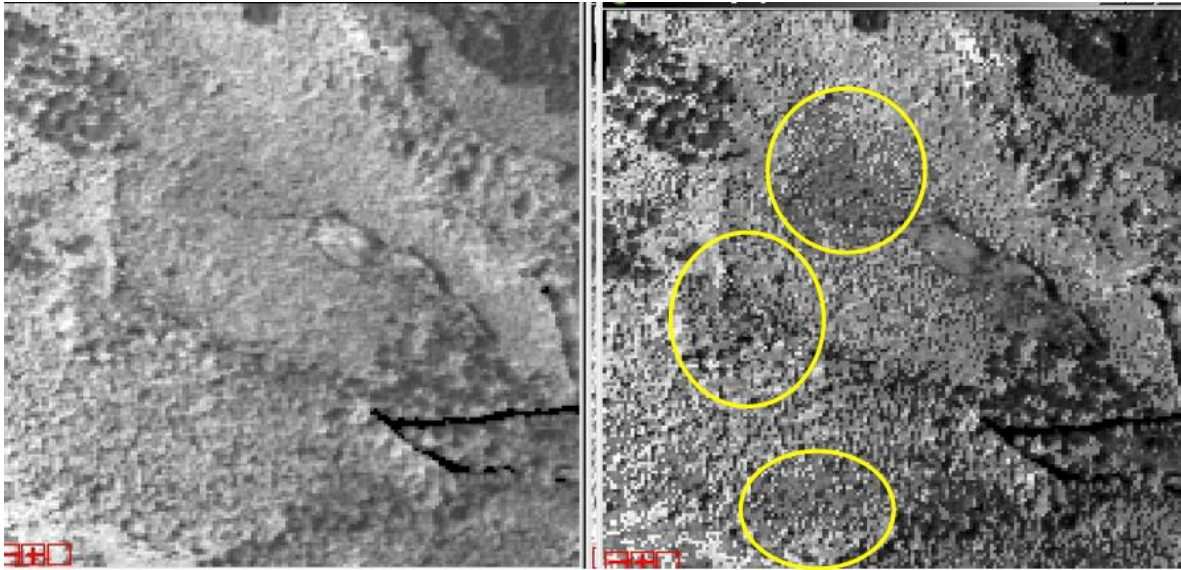


Εικόνα 4-13: (αριστερά) Απεικονίζεται ο δείκτης χλωροφύλλης MCARI, στο (κέντρο) ο δείκτης TCI-2 και (δεξιά) ο δείκτης TCARI. Με φωτοερμηνεία κρίνεται ο δείκτης TCI-2 ως ικανοποιητικά ευαίσθητος στις μεταβολές των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης, ιδιαίτερα στις περιοχές που οριοθετούνται από τις κίτρινες γραμμές.

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

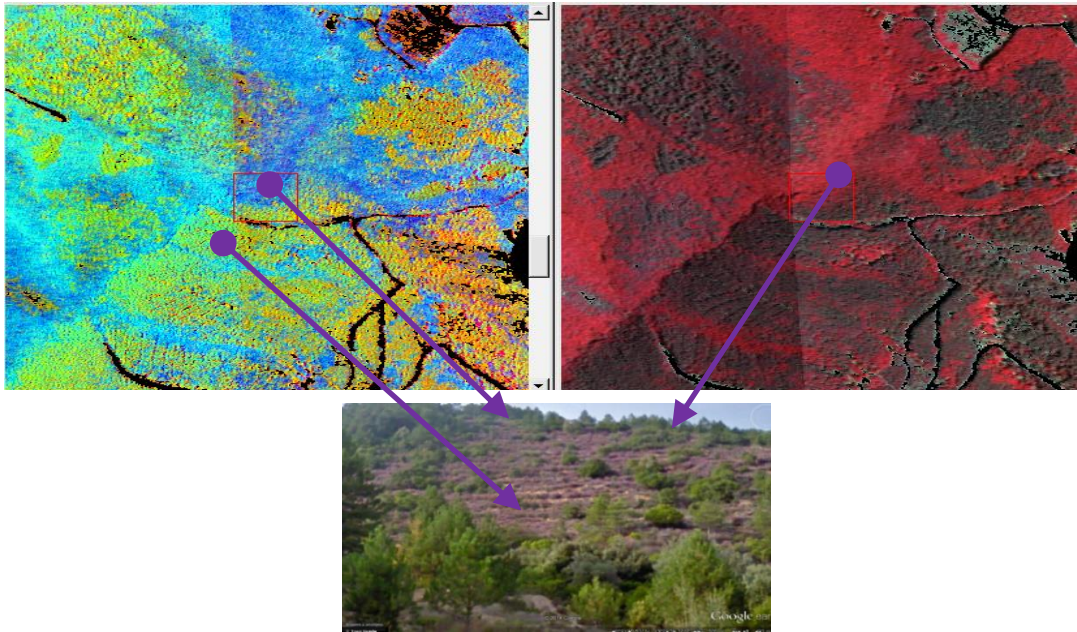


Εικόνα 4-14: Απεικονίζεται (αριστερά) ο δείκτης βλάστησης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2. Είναι εμφανής η μεγαλύτερη ευασθησία που καταδεικνύει ο δείκτης TCI-2 και η οποία αποτυπώνεται στην διαφοροποίηση του τόνου του δείκτη (βλέπε συγκριτικά και Εικόνα 4-15).

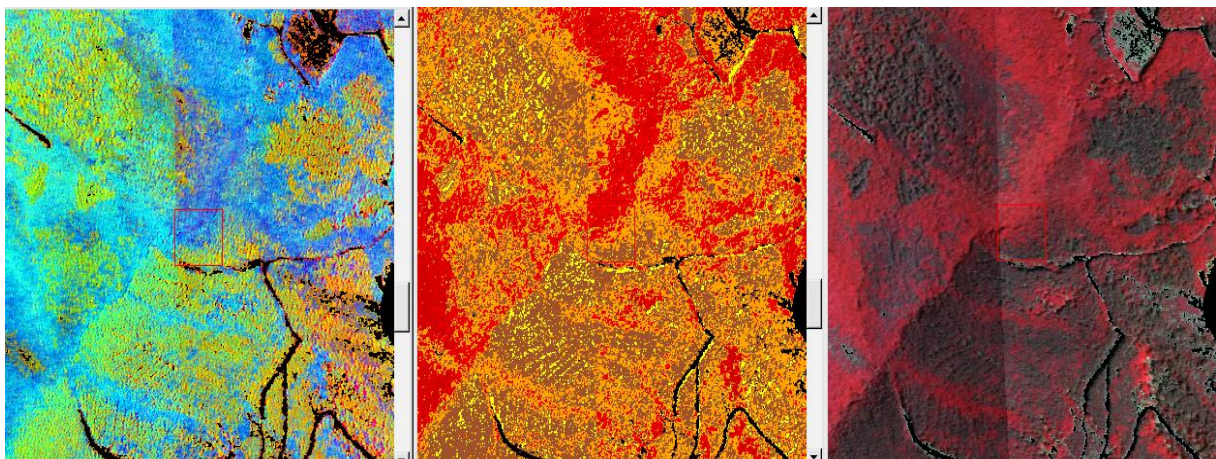


Εικόνα 4-16: Σμίκρυνση, ώστε να περιλαμβάνεται περισσότερη έκταση, της προηγούμενης εικόνας. Απεικονίζεται (αριστερά) ο δείκτης βλάστησης TRDVI και (δεξιά) ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2. Ο τελευταίος εμφανίζει καλή απόκριση στη χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σε χλωροφύλλη, όπως παρατηρείται στις περιοχές με τις κίτρινες γραμμές.

Το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των Modified “Red Edge” Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο) και Photochemical Reflectance Index (στο μπλε) είναι αρκετά ενδεικτικό για την πυκνότητα βλάστησης προσδιορίζοντας καλά ποσοτικά τις χρωστικές και τις μεταβολές που παρουσιάζουν στα φωτοσυνθετικά κύτταρα των φυτών [Thalis Program, 2012-2016]. Με σκούρο μπλε εμφανίζεται βλάστηση με πλούσια φωτοσυνθετική ικανότητα ενώ με πρασινωπό χρώμα πώδης βλάστηση (Εικόνα 4-17). Το RGB σύνθετο αυτό, ως δείκτης της πυκνότητας βλάστησης λειτούργησε ικανοποιητικά, συγκρίθηκε με τον δείκτη TCI-2 (Εικόνα 4-13 έως Εικόνα 4-16) και από την σύγκριση αυτή έγινε η τελική αξιολόγηση της πυκνότητας βλάστησης (όπως περιγράφεται στο 4.6). Για να γίνει ευκολότερη η οπτική σύγκριση του δείκτη TCI-2 χρησιμοποιήθηκε η τεχνική “Density Slicing” (τεμαχιοποίηση ή διαστρωμάτωση της πυκνότητας). Πρόκειται για μια τεχνική που ενισχύει τις πληροφορίες που συλλέγονται από την φωτεινότητα ενός φασματικού καναλιού, διαιρώντας τις ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων σε διαστήματα (ίσα ή και άνισα) και στη συνέχεια, αντιστοιχίζοντας σε κάθε διάστημα, ένα χρώμα. Με τον τρόπο αυτόν οι πληροφορίες του δείκτη TCI-2 (ο οποίος απεικονίζεται ως μια grayscale εικόνα), μπορούν να ερμηνευθούν και να αναλυθούν πιο εύκολα, επειδή οι διαφορές μεταξύ των χρωμάτων είναι ενδεικτικότερες από τις διαβαθμίσεις του τόνου του γκρι (εικόνα 4-16).



Εικόνα 4-17: (αριστερά), ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών των βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης: Modified “Red Edge” Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε). Με σκούρο μπλε εμφανίζεται πυκνή, μη γερασμένη βλάστηση, με ανοιχτό πράσινο εμφανίζεται η χαμηλή, πώδης βλάστηση, με κόκκινο έχουμε πλήρη απουσία φωτοσύνθεσης, επομένως και βλάστησης. Στα (δεξιά) έχουμε το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των καναλιών NIR, Red και Green αντίστοιχα, όπου η βλάστηση εμφανίζεται με διαβαθμίσεις του κόκκινου. Εμφανίζεται ακόμη και η Google Earth φωτογραφία της περιοχής όπου με τα βέλη φαίνονται περιοχές πυκνής και πώδους βλάστησης.

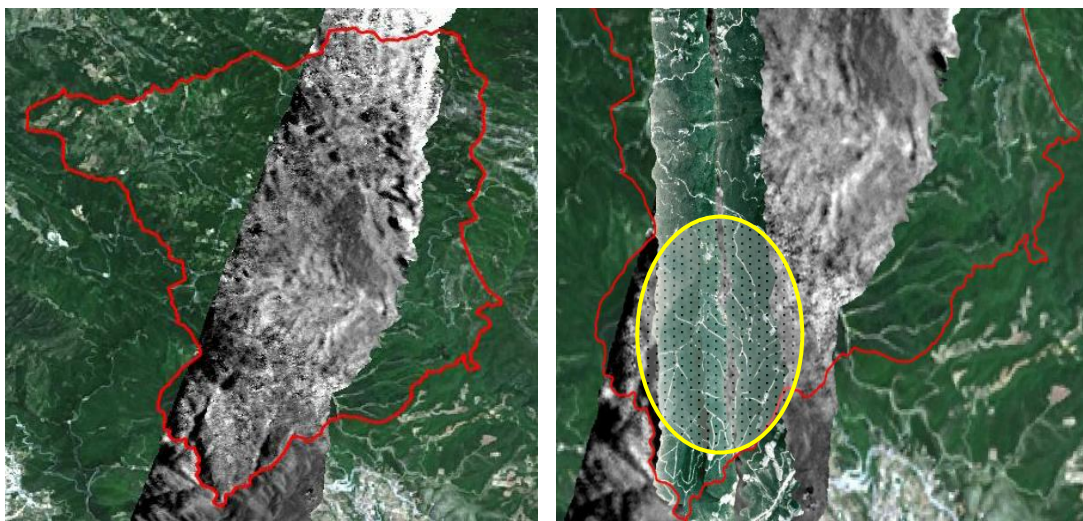


Εικόνα 4-18: Στα (αριστερά), έχουμε το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών βλάστησης και χλωροφύλλης: Modified “Red Edge” Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε). Με σκούρο μπλε εμφανίζεται πυκνή, μη γερασμένη βλάστηση, με ανοιχτό πράσινο εμφανίζεται η χαμηλή, πώδης βλάστηση, με κόκκινο έχουμε πλήρη απουσία φωτοσύνθεσης, επομένως και βλάστησης. Στο (κέντρο) έχουμε μια εικόνα Density Slicing του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές που φωτοσυνθέτουν έντονα, το πορτοκαλί χαρτογραφεί περιοχές μέτριας φωτοσύνθεσης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας). Στα (δεξιά)

έχουμε το ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB καναλιών NIR, Red και Green, όπου η βλάστηση εμφανίζεται σε διαβαθμίσεις του κόκκινου.

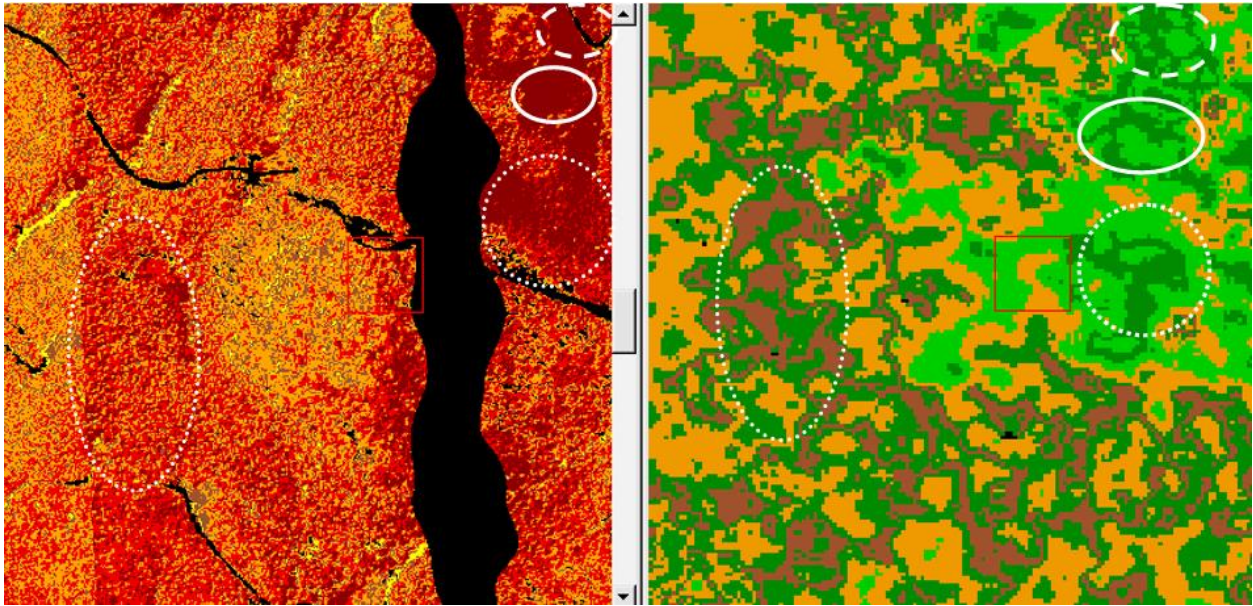
4.6 Αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση της χαρτογράφησης της πυκνότητας της βλάστησης, χρησιμοποιήθηκε ένας χάρτης εκτίμησης του δασικού ύψους της περιοχής, από την εργασία των Karamnasis K., Karathanassi V., (2015), ο οποίος προέκυψε με χρήση συμβολομετρίας διπλής συχνότητας (η τεχνική της συμβολομετρίας απεικονίσεων SAR χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία ως μια τεχνική υπολογισμού και εκτίμησης των δασικών παραμέτρων. Στην περιοχή του δάσους του Ταξιάρχη χρησιμοποιήθηκε ένα συμβολομετρικό ζευγάρι απεικονίσεων SAR από το δορυφορικό σύστημα ALOS PALSAR (L band) και ένα συμβολομετρικό ζευγάρι Cosmo Skymed (Xband) για την εκτίμηση του δασικού ύψους και παρήχθη χάρτης εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης (Εικόνα 4-19) από την αφαίρεσή τους, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση, με την υπόθεση ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της δασικής κομοστέγης, τόσο πυκνότερη είναι η βλάστηση στο σημείο αυτό. Για τη συσχέτιση έγινε αναδόμηση της εικόνας του χάρτη εκτίμησης σε 2 m (από 5 m), όπου είναι η χωρική ακρίβεια των απεικονίσεων του δέκτη CASI-550. Η αξιολόγηση έγινε στο κοινό επικαλυπτόμενο τμήμα των δεδομένων (Εικόνα 4-19, δεξιά) και δείχνει ότι ο δείκτης TCI-2, ο οποίος προκρίθηκε από τους άλλους δείκτες, δίνει αποτελέσματα τα οποία κρίνονται ικανοποιητικά για την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 4-19: Απεικονίζεται (αριστερά) με γκρι ο χάρτης εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, με το περίγραμμα του δάσους του Ταξιάρχη (κόκκινη γραμμή) και υπόβαθρο το έγχρωμο σύνθετο 321 (RGB) της Landsat-8 της 2/6/2013. Στα (δεξιά) έχει γίνει επίθεση των απεικονίσεων του δέκτη CASI-550. Με κίτρινο χρώμα οριοθετείται η περιοχή όπου έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στην Εικόνα 4-20 γίνεται οπτική σύγκριση του δείκτη TCI-2 και του χάρτη εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης (στον οποίο επίσης έχει γίνει Density Slicing). Παρατηρούμε, αν και υπάρχει μια μικρή αλλά εμφανής διαφορά κλίμακας μεταξύ των δύο εικόνων, μια καλή συμφωνία στην εκτίμηση του δασικού ύψους, με τα αποτελέσματα του δείκτη TCI-2 :



Εικόνα 4-20: Στα (αριστερά) έχουμε μια εικόνα Density Slicing, τμήματος της περιοχής μελέτης, του δείκτη TCI-2, σε πέντε κατηγορίες (το σκούρο κόκκινο χαρτογραφεί περιοχές πυκνής βλάστησης, που φωτοσυνθέτουν έντονα, το κόκκινο και το πορτοκαλί περιοχές διαβάθμισης μέτριας πυκνότητας βλάστησης, το καφετί και το κίτρινο απεικονίζουν ελάχιστη παρουσία έως παντελή έλλειψη φωτοσυνθετικής διαδικασίας) και (δεξιά) απεικονίζεται εικόνα Density Slicing του χάρτη εκτίμησης του ύψους δασικής κομοστέγης, (με σκούρο πράσινο τα πολύ υψηλά δέντρα, με πράσινο τα υψηλά δένδρα, με πορτοκαλί τα σχετικά υψηλά, με καφέ τα δέντρα χαμηλού ύψους. Στις περιοχές που οριοθετούνται από τις άσπρες γραμμές εμφανίζεται η συνάφεια στη σύγκριση των αποτελεσμάτων, πηγή: [Thalis Program, 2012-2016].

4.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, έγινε προσπάθεια να χαρτογραφηθεί η πυκνότητα βλάστησης με τη βοήθεια κατάλληλων δεικτών βλάστησης και χρωστικών. Επειδή η διαφοροποίηση μεταξύ των δεικτών, δεν είναι πάντα οπτικά εμφανής και η ευαισθησία που δείχνουν οι δείκτες στη βλάστηση και ιδιαίτερα στις χρωστικές, όπως η χλωροφύλλη, παρουσιάζει μικρές (αλλά ουσιαστικές) βελτιστοποιήσεις από δείκτη σε δείκτη, συγκρίθηκαν οι δείκτες του πίνακα 1 και επιλέχθηκαν οι πλέον ευαίσθητοι για την περιοχή μελέτης. Ο δείκτης βλάστησης TRDVI έδειξε ότι χαρτογραφεί ικανοποιητικά την βλάστηση, ενώ παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία στις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης, ελαχιστοποιώντας τις επιδράσεις του εδάφους, δρώντας συμπληρωματικά με το δείκτη OSAVI.

Ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2 βρέθηκε περισσότερο ευαίσθητος στην μεταβολή των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης, έδειξε ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η απορρόφησή της διευρύνεται και προκαλεί μετατόπιση της ανάκλασης προς υψηλότερες τιμές, περίπου στο μήκος κύματος από 0.62-0.75 μm . Ως αποτέλεσμα έχουμε την ανακλαστικότητα της κομοστέγης των φυτών να επηρεάζεται από την περιεκτικότητα της χλωροφύλλης και τελικά να αποτελεί έναν αξιόπιστο εκτιμητή της πυκνότητας βλάστησης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνος του για να χαρτογραφήσει την πυκνότητα βλάστησης της περιοχής. Και άλλοι δείκτες εμφανίστηκαν ενδιαφέροντες, όπως ο δείκτης TCARI

/ OSAVI, ως λόγος ενός δείκτη ευαίσθητου στις ιδιότητες ανακλαστικότητας του εδάφους, ειδικά για βλάστηση με χαμηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας προς έναν κλασικό δείκτη βλάστησης για τις επιδράσεις του εδάφους, ο οποίος ποσοτικοποιεί την περιεκτικότητα της βλάστησης σε χλωροφύλλη, χρησιμοποιώντας κανάλια που αντιστοιχούν στην ελάχιστη απορρόφηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών ουσιών, που επικεντρώνεται στα 550 και 700 nm, σε συνδυασμό με το κανάλι μέγιστης απορρόφησης της χλωροφύλλης α, περίπου στα 670 nm. Ο δείκτης TVI ο οποίος με βάση τη διαφορά μεταξύ της ανακλαστικότητας στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο και λαμβάνοντας υπόψη την ανακλαστικότητα στην περιοχή του πράσινου, περιγράφει το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από τις χρωστικές ως συνάρτηση της παραπάνω διαφοράς. Οι υπόλοιποι δείκτες (**Πίνακας 4-1**) έδειξαν ότι μπορούν ανάλογα την περιοχή και την περιεχόμενη βλάστηση να χρησιμοποιηθούν, καθώς παρουσίασαν σχετική ευαισθησία ως προς την περιεχόμενη χλωροφύλλη και την πυκνότητα βλάστησης, ιδιαίτερα στην περιοχή "Red Edge" των φασμάτων ανακλαστικότητας ιδιαίτερα των φύλλων των φυτών, που προκαλείται από τις ταυτόχρονες επιδράσεις της ισχυρής απορρόφησης χλωροφύλλης και της εσωτερικής σκέδασης των φύλλων. Τέλος, δείκτες όπως ο MSR, εμφάνισαν γρήγορα φαινόμενα κορεσμού και δεν θα τους επιλέγαμε για την χαρτογράφηση της πυκνότητας της βλάστησης. Πρέπει επίσης να αναφερθεί το πολύ ενδιαφέρον ψευδέγχρωμο σύνθετο RGB των δεικτών των βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης: Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (στο κόκκινο), NDVI (στο πράσινο), Photochemical Reflectance Index (στο μπλε) το οποίο έδειξε πως αποτελεί έναν πολύ αξιόλογο εκτιμητή της πυκνότητας βλάστησης, ιδιαίτερα για μέση και χαμηλή μεσογειακή βλάστηση.

4.8 Βιβλιογραφία

- Asner G. P., "Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance", *Remote Sensing of Environment*, 64:234-253, 1998.
- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. environ.* 35, pp. 161-173.
- Blackmer, T. M., and Schepers, J. S. "Use of a chlorophylling Remote Sensing Estimation of Fractionally Absorbed Phometerto monitor N status and schedule fertigation of corn", *J. Production Agriculture* 8:56-60, 1995.
- Broge N. H. and Leblanc E., "Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density", *Remote Sensing of Environment*, 76, pp. 156-172.
- Chen, J., " Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications", *Can. J. Remote Sens.* 22, 229-242., 1996.
- Curran, P.J., Duncan, J.L., Macler, BA, Plummer, S.E., and Peterson D.L., "Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration". *Remote Sensing of Environment*, 39: 153-166, 1992.

Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M. S., Brown de Colstoun E., McMurtrey J. E., "Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance", *Remote Sensing of Environment*, 74: 229-239, 2000.

Ehleringer, J., Mooney H., A., "Leaf hairs: effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub". *Oecologia* 37:183-200, 1978.

Gamon, J.A., Penuelas, J. and Field, C.B., "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency", *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44, 1992

Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J., C., Weidner V., R., "Spectral Properties of Plants," *Appl. Opt.*4, 11-20, 1965.

Gates, D. M., "Physical and physiological properties of plants". In National Research Council, Committee on Remote Sensing for Agricultural Purposes, *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*, 224-252. National Academy of Sciences, Washington D.C., USA, 1970.

Gitelson, A., and Merzlyak M., "Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus Hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. Leaves." *Journal of Plant Physiology* 143, 286-292, 1994.

Haboudane D., Miller J., Pattey E., Strachan I. B., "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture", 2003.

Haboudane D., Tremblay N., Miller J., Vigneault P., "Remote Estimation of Crop Chlorophyll Content Using Spectral Indices Derived From Hyperspectral Data", 2008.

Hanson H.C., Dahl E., "The use of basic principles in the classification of range vegetation", *J Range Manage*;10:26-33, 1987.

Huete, A. R., "A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Relationships between chlorophyll meter readings and leaf", *Remote Sens. Environ.* 25:295-309, 1988.

Ibarra-Castanedo C., "Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase", 2005.

Jackson R.D. and Huete, A.R., "Interpreting vegetation indices", Univ. of Arizona, Tuscon, 1991.

Karamvasis K., Karathanassi V., "Forest Canopy Height Estimation Using Double-Frequency Repeat Pass Interferometry", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, June 2015.

Karathanassi V., "Special Topics in Remote Sensing", Associate Professor, School of Rural and Surveying Engineering, N.T.U.A., Athens, 2014.

Kim, M. S., Daughtry, C. S. T., Chappelle, E. W., McMurtrey III, J. E., and Walthall, C. L., "The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation", *Proceedings of the 6th Symp. on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Jan. 17-21, 1994, Val D'Iserre, France, (pp. 299-306), 1994.

- Le Maire G. et al, "Towards universal broadleaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements," *Remote Sens. Environ.*, vol.89, pp. 1 - 28, 2004.
- Merzlyak M., Gitelson A., Chivkunova O. and Rakitin V., "Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening", *Physiologia Plantarum*", Volume 106, Issue 1, pages: 135-141, May 1999.
- Penuelas J., Baret F., Filella I. "Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance". 1995.
- Perry, C. R., Jr. and Lautenschlager L., F., "Functional equivalence of spectral vegetation indices", *Remote Sensing of Environment* vol. 14, 169-182, 1984.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F., "Optimisation of the Soil-Adjusted Vegetation Indices", *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p.95-107, 1996.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. and Deering D.W. "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS-1" *Third Earth Resources Technology Satellite Symposium 1*: 309-317, 1974.
- Roujean, J.-L. and Breon, F. M., "Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements", *Remote Sens. Environment* 51: 375-384, 1995.
- Roy P. S., "Spectral reflectance characteristics of vegetation and their use in estimating productive potential", *Proceedings: Plant Sciences*, Volume 99, Issue 1, pp 59-81, 1989
- Qi X., Tai CY., Wasserman BP., "Plasma membrane intrinsic proteins of *Beta vulgaris*", *L. Plant Physiol.* 108:387-392, 1995.
- Thalis Program 2012-2016, «Χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης και χλωροφύλλης βάσει ανάλυσης υπερφασματικών εικόνων CASI» για το έργο «TeleKyoto - Χαρτογράφηση Βλάστησης και Εκτίμηση Βιομάζας με Σύγχρονες Μεθόδους Τηλεπισκόπησης στο Πλαίσιο της Σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή και του Πρωτοκόλλου του Κιότο», 2012 – 2016, Πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ-ΑΠΘ (85492), Επιστ. Υπεύθυνος Καθηγητής Ιω. Ζ. Γήτας, Τεχνική Έκθεση - παραδοτέο 4γ, Θεσ/νίκη 2014.
- Vogelmann Thomas C., "Plant Tissue Optics", *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Vol. 44 : 231-251, 1993.
- Xiao Yueting et al, "The temporal changing information extraction on spectral reflectance and growth parameters of typical crops", Beijing, China, 2008.
- Zarco-Tejada, P.J., Miller J. R., Morales A., Berjon A. and Aguera J., "Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops", *RSE*, 90(4), 463-476, 2004.

5 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΓΙΑ ΔΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.

5.1 Εισαγωγή

Στη θεωρία του φασματικού διαχωρισμού, οι τεχνικές μείωσης της διάστασης (Dimensionality Reduction, DR) του υπερφασματικού χώρου διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς οι υπερφασματικές απεικονίσεις περιέχουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων, θέτοντας πολλές προκλήσεις όπως είναι η αποθήκευσή και η επεξεργασία τους. Η οργάνωση και η επεξεργασία των υπερφασματικών δεδομένων σε όσο το δυνατόν μικρότερο υπολογιστικό χρόνο, συνθέτει ένα σύγχρονο πρόβλημα που πρώτος ο Richard E. Bellman εξετάζοντας προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού, γύρω στο 1960, ονόμασε ως «κατάρτα της διαστατικότητας». Η εξαγωγή χαρακτηριστικών και η επιλογή χαρακτηριστικών είναι οι δύο κύριες προσεγγίσεις για τη μείωση της φασματικής διάστασης. Οι τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών χρησιμοποιούνται για τη μείωση της διάστασης των υπερφασματικών δεδομένων, εφαρμόζοντας μετασχηματισμούς στα δεδομένα. Οι τεχνικές επιλογής χαρακτηριστικών διατηρούν τη φυσική σημασία των δεδομένων, επιλέγοντας ένα υποσύνολο καναλιών από το υπερφασματικό σύνολο δεδομένων εισόδου (συνήθως είναι μια υπερφασματική απεικόνιση), τα οποία περιέχουν κυρίως τις πληροφορίες που θεωρούνται ως οι πλέον χαρακτηριστικές, για το φασματικό διαχωρισμό. Αν και οι τεχνικές επιλογής χαρακτηριστικών, θεωρητικά είναι γνωστές για τη δυνατότητά τους στη μείωση των διαστάσεων των δεδομένων, σπάνια χρησιμοποιούνται στη διαδικασία του φασματικού διαχωρισμού. Η πλειονότητα των υφιστάμενων μεθόδων μείωσης διαστάσεων, με αλγόριθμους αιχμής (state-of-the-art), θέτουν κριτήρια για τη φασματική πληροφορία, η οποία προέρχεται από μια μεγάλη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, προκειμένου να οριστεί ο βέλτιστος φασματικός υπόχωρος. Αυτά τα κριτήρια δεν σχετίζονται με κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή Τηλεπισκόπησης στον πραγματικό κόσμο, αλλά με τα στατιστικά στοιχεία των απεικονίσεων, όπως είναι οι τιμές συσχέτισης των καναλιών και οι τιμές εντροπίας της συνολικής τους πληροφορίας. Ωστόσο, κάθε τέτοια εφαρμογή, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με συγκεκριμένα αντικείμενα (υλικά) κάλυψης γης, των οποίων τα φασματικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Στη δασοκομία, για παράδειγμα, πολλές εφαρμογές εστιάζονται στα φύλλα δέντρων, στα οποία συγκεκριμένες χρωστικές ουσίες όπως η χλωροφύλλη, η ξανθοφύλλη κλπ καθορίζουν τα μήκη κύματος όπου μπορούν να ανιχνευθούν τα είδη των δέντρων, το σημείο του φαινολογικού τους κύκλου, η κατάσταση στρες λόγω ξηρασίας ή υπερβολικής τους υγρασίας, οι ασθένειές τους κλπ. Για τέτοιες εφαρμογές, όταν εφαρμόζεται η διαδικασία του φασματικού διαχωρισμού, οι φασματικές υπογραφές των υπό εξέταση υλικών / καλύψεων που απεικονίζονται σε μια εικόνα μπορούν να θεωρηθούν ως καθαροί στόχοι και αποτελούν σημαντικότερο πεδίο ενδιαφέροντος για τους επιστήμονες. Η έρευνα αυτού του κεφαλαίου, εστιάζει στη διερεύνηση των επιπτώσεων της επιλογής καναλιών στην εξαγωγή καθαρών στόχων για τη βλάστηση, αξιοποιώντας τις πληροφορίες των φασματικών περιοχών απορρόφησης της βλάστησης. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται εάν η εξαγωγή καθαρών στόχων μπορεί να βελτιστοποιηθεί, όταν επιλέγονται συγκεκριμένα υποσύνολα καναλιών από υπερφασματικά δεδομένα, τα οποία σχετίζονται με τα φασματικά χαρακτηριστικά των φύλλων. Τα πειράματα περιλαμβάνουν την εφαρμογή γνωστών μεθόδων

εκτίμησης του υποχώρου του σήματος και εξαγωγής καθαρών στόχων, σε μια υπερφασματική απεικόνιση που περιλαμβάνει δασική περιοχή. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, έδειξε ότι τα περισσότερα δασικά είδη μπορούν να αναγνωριστούν και να εξαχθούν ως καθαροί στόχοι, χρησιμοποιώντας επιλεγμένα κανάλια και όχι το σύνολο των καναλιών μιας υπερφασματικής απεικόνισης.

Η μείωση της φασματικής διάστασης έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως τεχνική προεπεξεργασίας προκειμένου να αναλυθούν περισσότερο αποτελεσματικά τα υπερφασματικά δεδομένα, διότι αυτή επηρεάζει άμεσα την απόδοση της διαδικασίας του φασματικού διαχωρισμού ή των ταξινομήσεων.

Αναλυτικότερα, οι προσεγγίσεις μείωσης της διάστασης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει μεθόδους εξαγωγής χαρακτηριστικών (Feature Extraction, FE) και η δεύτερη περιλαμβάνει μεθόδους επιλογής χαρακτηριστικών (Feature Selection, FS). Οι μέθοδοι FE εκτελούν μετασχηματισμούς για να αναπαραστήσουν το δείγμα δεδομένων σε χώρο χαμηλότερης διάστασης, εκμεταλλευόμενες τις πληροφορίες που δίνονται από το σύνολο δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι FS αναζητούν ένα υποσύνολο των φασματικών καναλιών, το οποίο περιλαμβάνει τα πιο χαρακτηριστικά κανάλια, με βάση ορισμένα κριτήρια ως προς τα συστατικά / υλικά για τα οποία θα γίνει ο φασματικός διαχωρισμός ή/και η ταξινόμηση. Η πλειονότητα των προσεγγίσεων FS έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των εργασιών ταξινόμησης και περιλαμβάνουν έναν αλγόριθμο αναζήτησης και μια συνάρτηση κόστους (κριτηρίων) [Chang C.-I., 2003; Keshava N., 2004; Ifarraguerri A. et al, 2004; Huang R. and He M., 2005; De Backer S. et al, 2005; Huang R. and Li X., 2008; Chang Y.-L., 2009; Yang H. et al, 2011]. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αναζήτησης δημιουργεί και συγκρίνει τις λύσεις που προκύπτουν από διαφορετικά υποσύνολα καναλιών, εφαρμόζοντας μια συνάρτηση κόστους ως μέτρο της αποτελεσματικότητας κάθε υποσυνόλου των καναλιών που εξετάζονται. Οι συναρτήσεις κόστους που χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνουν κριτήρια που βασίζονται στη διαχωριστικότητα της φασματικής κατηγορίας (τάξης), όπως οι αποστάσεις Bhattacharyya, Jeffries-Matusita και Mahalanobis [Ifarraguerri A. et al, 2004; Huang R. and He M., 2005; De Backer S. et al, 2005], οι οποίες σύμφωνα με τους H. Yang, Q. Du, H. Su, and Y. Sheng [2011], απαιτούν αρκετά δείγματα κλάσεων για την εξέταση των στατιστικών στοιχείων κάθε τάξης και κριτήρια που βασίζονται στην ομοιότητα (similarity), όπως της φασματικής γωνίας (spectral angle mapper, SAM) [Kruse F., 1993], σε μέτρα ευκλείδειας ελάχιστης απόστασης (euclidean minimum distance, EMD) και στην απόκλιση ορθογώνιας προβολής (orthogonal projection divergence, OPD) [Chang C.-I., 2003; Keshava N., 2004]. Τα προαναφερθέντα κριτήρια, λαμβάνουν υπόψη ανά ζεύγη, όλες τις πιθανές αποστάσεις των κλάσεων, με αποτέλεσμα βαρύ υπολογιστικό κόστος. Για να αποφευχθεί ο έλεγχος όλων των πιθανών συνδυασμών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές αναζήτησης υποσυνόλων, π.χ., διαδοχική προς τα εμπρός επιλογή (sequential forward selection, SFS) και διαδοχική προς τα εμπρός κινούμενη επιλογή (sequential forward floating selection, SFFS), [Pudil P. Et al, 1993]. Η μέθοδος ελάχιστης εκτιμώμενης συνδιακύμανσης αφθονίας (minimum estimated abundance Covariance, MEAC) είναι μια επιβλεπόμενη μέθοδος επιλογής χαρακτηριστικών (FS) που προτείνεται από τον Yang H. [2011], η οποία επιλέγει κανάλια, μόνο με βάση τις φασματικές υπογραφές κάθε κλάσης. Οι μέθοδοι FS που χρησιμοποιούνται για

ταξινόμηση, μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν γενετικούς αλγόριθμους και μεθόδους βελτιστοποίηση νέφους σημείων [Huang R. and Li X, 2008; Chang Y.-L. Et al, 2009], που δεν απαιτούν εκ των προτέρων γνώση των κλάσεων. Ένα σχετικά μικρό ποσοστό των υφιστάμενων μεθόδων επιλογής χαρακτηριστικών, μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας φασματικού διαχωρισμού. Μεταξύ των τεχνικών αιχμής, ορισμένες περιλαμβάνουν την ιεράρχηση των καναλιών (band ranking), χρησιμοποιώντας κριτήρια όπως τη συσχέτιση [Chang C.-I. and Wang S., 2006] ή/και την εντροπία πληροφοριών αλλά και την αμοιβαία πληροφόρηση, με βάση την οποία μετράται η μείωση της αβεβαιότητας για μια μεταβλητή, δεδομένης μιας γνωστής τιμής μιας άλλης μεταβλητής [Guo B. Et al, 2006; Baijie W. Et al, 2012]. Ο αλγόριθμος επιλογής καναλιού B-SPICE (Band selecting Sparsity Promoting Iterated Constrained Endmember, B-SPICE) [Zare A. and Gader P., 2008] έχει αναπτυχθεί για ταυτόχρονη εξαγωγή FS και καθαρών στόχων, χρησιμοποιώντας τη στάθμιση καναλιών και την αραιότητα, που προτείνεται από τους Chang Y.-L. et al, (2009). Η πλειονότητα των υφιστάμενων μεθόδων FS, θέτουν τα βασικά κριτήρια για τις φασματικές πληροφορίες για ολόκληρη την περιοχή του φάσματος των υπερφασματικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να βρεθεί και να οριστεί ο βέλτιστος φασματικός υπόχωρος. Ως συνέπεια, αφαιρούνται οι περιττές ή επικαλυπτόμενες φασματικές πληροφορίες γειτονικών καναλιών (χαρακτηριστικών) και συνήθως συσχετισμένων καναλιών. Αν και αυτός είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του τεράστιου όγκου πληροφοριών δεδομένων, είναι μια γενικευμένη προσέγγιση που αγνοεί τα φασματικά χαρακτηριστικά συγκεκριμένων υλικών κάλυψης γης, που ενδιαφέρουν. Η επιλογή χαρακτηριστικών FS, θα πρέπει να διατηρεί την αρχική φυσική σημασία του συνόλου των δεδομένων [Guo B. et al, 2006], μια ιδιότητα που μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε περίπτωση ανάλυσης ενός συγκεκριμένου υλικού κάλυψης γης, όπως είναι ο εντοπισμός και ο προσδιορισμός διαφορετικών δασικών ειδών, ασθενειών δέντρων κλπ. Σε αυτό το κεφάλαιο, προτείνεται μια προσέγγιση επιλογής χαρακτηριστικών, με στόχο τη βελτιστοποίηση του φασματικού διαχωρισμού για δασικές εφαρμογές, αξιοποιώντας τη γνώση υποβάθρου που δίνεται από τη φασματοσκοπική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται φασματικά κανάλια με βάση τα χαρακτηριστικά απορρόφησης των φασματικών υπογραφών των φύλλων και εφαρμόζεται φασματικός διαχωρισμός στον εκτιμώμενο αλλά καθορισμένο υπόχωρο, χαμηλότερης διάστασης. Ο αριθμός των καθαρών στόχων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το σύνολο των φασματικών καναλιών, ενώ η εξαγωγή τους εφαρμόζεται στα επιλεγμένα φασματικά κανάλια, προκειμένου να αυξηθεί η ευαισθησία του αλγόριθμου εξαγωγής καθαρού στόχου, με βάση τα χαρακτηριστικά απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα φύλλα, συγκεκριμένων δασικών ειδών.

5.2 Η προτεινόμενη μέθοδος επιλογής χαρακτηριστικών

Η προτεινόμενη προσέγγιση, αξιοποιεί τη γνώση, τη σχετική με τις οπτικές ιδιότητες της βλάστησης, προκειμένου να επιλέξει ένα υποσύνολο καναλιών για να χρησιμοποιηθεί στο φασματικό διαχωρισμό. Με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, το ορατό και το εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μπορούν να διαχωριστούν σε δύο φασματικές υποκατηγορίες, προκειμένου να αξιολογηθούν οι βασικές ιδιότητες της φυλλικής βλάστησης: i) 400-750 nm, μια φασματική περιοχή συνδεδεμένη με συγκεκριμένες χρωστικές

της βλάστησης, όπως η χλωροφύλλη-a και η χλωροφύλλη-b, οι β-καροτίνες και οι ξανθοφύλλες, και ii) 750-1350 nm, μια άλλη φασματική περιοχή συνδεδεμένη με την εσωτερική δομή των φύλλων. Τα περισσότερα φυτά φαίνονται πράσινα α) λόγω της υψηλής απορρόφησης της ακτινοβολίας του ήλιου από τη χλωροφύλλη (a και b) στα 450 nm (μπλε φάσμα) και στα 680 nm (κόκκινο φάσμα) και β) της σχετικά μικρότερης απορρόφησης στα μήκη κύματος της πράσινης ακτινοβολίας (γύρω στα 550 nm). Κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης των φυτών, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης είναι σχετικά χαμηλή, σε σύγκριση με τα καροτενοειδή και η οπτική εμφάνιση ενός φύλλου έχει πολύ ανοιχτό πράσινο [Jensen J. R., 2015]. Επομένως η φασματική ανάλυση στην περιοχή των 550 nm, αναμένεται να παρέχει πληροφορίες για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης των φυτών. Επιπρόσθετα, η μπλε και κόκκινη συνιστώσα της ακτινοβολίας του ηλιακού φωτός, απορροφάται και χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας για φωτοσύνθεση και φωτοχημικές αντιδράσεις. Καθώς τα φυτά ωριμάζουν (γερνούν), η αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης είναι ανάλογη με άλλες χρωστικές και τα φυτά εμφανίζονται από πράσινο χρώμα, με σκούρο πράσινο. Με τη γήρανση, η σύνθεση της χλωροφύλλης μειώνεται, με αποτέλεσμα λιγότερη απορρόφηση ακτινοβολίας στη μπλε και κόκκινη περιοχή του οπτικού φάσματος (δείτε σχετικά και στο 4.2.2). Στο ώριμο/γηράσκον φυτό, κυριαρχούν άλλες φυτικές χρωστικές εκτός της χλωροφύλλης, με αποτέλεσμα ένα κίτρινο έως καφέ χρώμα. Η φασματική περιοχή όπου βρίσκεται η “μπλε μετατόπιση της κόκκινης ακμής” (Blue shift of the “Red Edge”), από 650 nm έως 780 nm, περίπου, αποτελεί μια περιοχή ραγδαίας αυξητικής μεταβολής της ανακλαστικότητας της βλάστησης, όπου η χλωροφύλλη από σχεδόν πλήρη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αντανακλά πολύ έντονα σε γειτονικά μήκη κύματος που βρίσκονται κοντά στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου τμήματος του φάσματος (700 nm). Εστιάζοντας σε αυτή τη φασματική περιοχή, που έχει επικρατήσει καθολικά με τον όρο “Red Edge”, η φασματική ανάλυση παρέχει πληροφορίες κυρίως για τις συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης και μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με τη γήρανση και την καταπόνηση των φύλλων.

Ωστόσο, εκτός από τη χλωροφύλλη (ιδίως τη χλωροφύλλη-b), η ανακλαστικότητα σε αυτή τη φασματική περιοχή, επηρεάζεται έντονα και από την εσωτερική δομή των φύλλων. Θα ήταν επομένως ενδιαφέρον να μελετηθούν οι σχέσεις μεταξύ της ανακλαστικότητας σε αυτή τη φασματική περιοχή και των διαφόρων δασικών ειδών. Αρχικά, η προτεινόμενη προσέγγιση απαιτεί την εκτίμηση του αριθμού των καθαρών στόχων. Συνεπώς, η διάσταση του υποχώρου του σήματος εκτιμάται, χρησιμοποιώντας το σύνολο των καναλιών μιας υπερφασματικής εικόνας. Στη συνέχεια, οι καθαροί στόχοι εξαγονται, χρησιμοποιώντας μόνο τα κανάλια που εμπίπτουν στη φασματική περιοχή “Red Edge” (650-780nm). Οι εξαγόμενοι καθαροί στόχοι συσχετίζονται με τις φασματικές υπογραφές αναφοράς και ταυτοποιούνται. Δεδομένου ότι οι ακραίες τιμές που βρίσκονται στις κορυφές ενός απλού simplex³ που περικλείει τα υπερφασματικά δεδομένα θεωρείται ότι ανήκουν σε καθαρούς στόχους, και γι’ αυτό όσοι από αυτούς εμφανίζουν υψηλή φασματική αντίθεση είναι ευκολότερο να ανιχνευθούν ως καθαροί

³ Ένα απλό simplex σε ένα n-διάστατο Ευκλείδειο χώρο, είναι ένα κυρτό στερεό με n+1 κορυφές. Γενικά αποτελεί μια γενίκευση της έννοιας ενός τριγώνου ή ενός τετραέδρου σε πολλές διαστάσεις και αντιπροσωπεύει τον απλούστερο δυνατό γεωμετρικό τόπο, κατασκευασμένο με γραμμικά τμήματα σε οποιαδήποτε δεδομένη διάσταση.

στόχοι -σε αντίθεση με όσους εμφανίζουν χαμηλή φασματική αντίθεση σε σχέση με την υπερφασματική απεικόνιση. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να εφαρμόζεται μια μάσκα απομάκρυνσης των εικονοστοιχείων που δεν έχουν βλάστηση, πριν από το φασματικό διαχωρισμό.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε αυτή την έρευνα είναι οι ακόλουθοι:

ODM: Η μέθοδος ανίχνευσης ακραίων τιμών (Outlier Detection Method, ODM) είναι μια αυτόματη, μη παραμετρική μέθοδος, που εκτιμά τη διάσταση του υποχώρου του σήματος μιας υπερφασματικής απεικόνισης, διερευνώντας τις γεωμετρικές ιδιότητες που παρουσιάζει ο θόρυβος σε ένα μετασχηματισμένο χώρο Κυρίων Συνιστωσών. Σε μια μετασχηματισμένη υπερφασματική απεικόνιση στην οποία έχει λευκοποιηθεί⁴ ο θόρυβος, αντιμετωπίζει τα σήματα ως ακραία σημεία θορύβου, εκμεταλλευόμενη το γεγονός ότι τα διανύσματα του θορύβου βρίσκονται σε μια υπερσφαίρα, ενώ τα διανύσματα των σημάτων παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες ακτίνες, διαμορφώνοντας ένα υπερελλειψοειδές [Andreou C. and Karathanassi V., 2014].

SEE: Η μέθοδος της απλής εξαγωγής καθαρού στόχου (Simple Endmember Extraction, SEE) είναι μια γεωμετρική μέθοδος που εφαρμόζεται σε κυρτά⁵ σχήματα και αναζητά τις πλέον ευδιάκριτες φασματικές τιμές, στις κορυφές ενός απλού simplex που οριοθετήθηκε από τον φασματικό υπόχωρο του σήματος. Αναζητά τις ακραίες τιμές από τα τελικά σημεία στους μετασχηματισμένους άξονες, χωρίς να απαιτούνται έλεγχοι από περαιτέρω προβολές σημείων, που συνεπάγονται πρόσθετες επαναληπτικές διαδικασίες. Επιπλέον, έχει το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης εξαγωγής καθαρών στόχων, οπότε μειώνεται σημαντικά το υπολογιστικό κόστος [Andreou C. and Karathanassi V., 2011].

SAM, SFF, BE: Τρεις γνωστοί από τη βιβλιογραφία αλγόριθμοι, ο Spectral Angle Mapper (SAM), ο Spectral Feature Fitting (SFF) και ο Binary Encoding (BE), έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιστοίχιση και την ταυτοποίηση των φασματικών υπογραφών, χρησιμοποιώντας το module "Spectral Analyst" του λογισμικού ENVI [Exelis - ENVI]. Ο αλγόριθμος SAM χρησιμοποιεί φασματικές γωνίες⁶ που σχηματίζονται από κάθε φασματική υπογραφή στον υπόχωρο n-D, με φασματικές υπογραφές αναφοράς, για να ταυτοποιήσει τα εικονοστοιχεία. Ο αλγόριθμος SFF συγκρίνει για κάθε εικονοστοιχείο, πόσο καλά προσαρμόζονται οι φασματικές του υπογραφές στις φασματικές υπογραφές αναφοράς, χρησιμοποιώντας μια ελαχιστοτετραγωνική προσέγγιση. Χρησιμοποιεί μια μέθοδο βασισμένη στα χαρακτηριστικά απορρόφησης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπου οι φασματικές υπογραφές αναφοράς κανονικοποιούνται (scaled), ώστε να συγκρίνονται με τις φασματικές υπογραφές της εικόνας αφού αφαιρεθεί το

⁴ Ως διαταρακτικός όρος, ο λευκός θόρυβος είναι μια τυχαία μεταβλητή, που έχει μέσο όρο το μηδέν και σταθερή διακύμανση για όλες τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής του μοντέλου που θεωρούμε. Δηλαδή, κατανέμεται κανονικά, οπότε και τα κατάλοιπά του κατανέμονται κανονικά.

⁵ Κυρτό σχήμα στη γεωμετρία, ονομάζεται κάθε σχήμα το οποίο δεν διαθέτει ευθύγραμμο τμήμα που να έχει και τα δύο του άκρα μέσα στο σχήμα, και κάποια σημεία του εκτός σχήματος.

⁶ Είναι η γωνία μεταξύ ενός διανύσματος καθαρού στόχου (endmember) στο φασματικό χώρο και κάθε διανύσματος τυχαίου εικονοστοιχείου στον φασματικό (υπό)χώρο n-D.

συνεχές⁷ (continuum) και από τα δύο σύνολα δεδομένων. Τέλος, ο αλγόριθμος BF (δυναμικής κωδικοποίησης) κωδικοποιεί δυαδικά (με 0 και 1) τις φασματικές υπογραφές των καθαρών στόχων, με βάση εάν σε ένα κανάλι η τιμή είναι κάτω ή πάνω αντίστοιχα, από τη μέση τιμή του καναλιού και στο τέλος ο αλγόριθμος συγκρίνει κάθε κωδικοποιημένη φασματική υπογραφή αναφοράς με την κωδικοποιημένο φασματική υπογραφή του κάθε καθαρού στόχου.

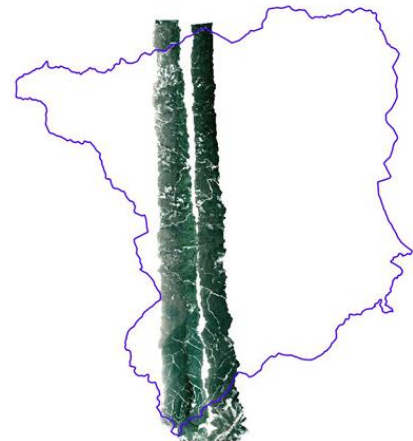
5.3 Εφαρμογή και αποτελέσματα

5.3.1 Περιοχή μελέτης και δεδομένα

Η περιοχή μελέτης είναι το πανεπιστημιακό δάσος του Ταξιάρχη, στη Χαλκιδική. Συνηθισμένα δασικά είδη που συναντώνται στην περιοχή είναι: η πλατύφυλλη βελανιδιά (*Quercus frainetto*), η περονόσπορη (*Quercus rubescence*), η μαύρη πεύκη (*Pinus Nigra*), η οξιά (*Fagus Sylvania*) και η νορβηγική ελάτη (*Abies Pice*). Επίσης, στο δάσος του Ταξιάρχη συναντώνται συστάδες πεύκων (*Pinus Pinaster*) και μακκί (*Quercus ilex*, *Quercus coccifera*, *Erica arborea* κλπ), χαμηλή ποώδης βλάστηση και διάσπαρτα δέντρα, κυρίως βελανιδιές (*Quercus aegilops*). Μια υπερφασματική απεικόνιση του δέκτη CASI-550 με 71 ζώνες (κανάλια), κατανεμημένες από 421.8 nm έως 967.7 nm, με χωρική ανάλυση 2 m, έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτή την έρευνα. Η λήψη έγινε στις 25 Ιουλίου 2013 από αερομεταφερόμενη πλατφόρμα (αεροπλάνο). Η απεικόνιση έχει διορθωθεί ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ATCOR4 και έχει γίνει γεωαναφορά στο γεωδαιτικό σύστημα WGS 84 / UTM ζώνη 34.



(a)

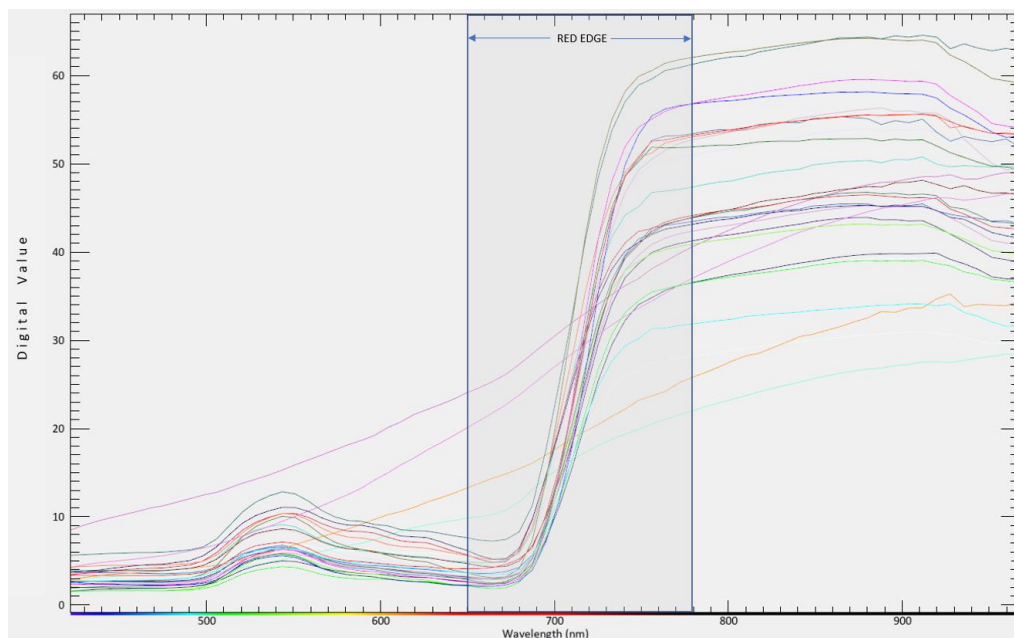


(b)

Εικόνα 5-1: α) Έγχρωμο σύνθετο 3,2,1(R,G,B) της απεικόνισης Landsat 7 ETM της 27/07/2013 για την ευρύτερη περιοχή του πανεπιστημιακού δάσους του Ταξιάρχη (λευκό πολύγωνο), και β) η υπερφασματική απεικόνιση της 25/07/2013 του δέκτη CASI-550

⁷ Ένα συνεχές, είναι μια μαθηματική συνάρτηση, που χρησιμοποιείται στην ανάλυση, για την απομόνωση ορισμένων χαρακτηριστικών ανάκλασης, και αντιστοιχεί σε ένα σήμα υποβάθρου που δεν σχετίζεται με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ανάκλασης που μας ενδιαφέρουν. Το γραφικό εύρος της συνάρτησης, όταν αυτή αποδίδεται γραφικά, μειώνεται, χρησιμοποιώντας μια μορφή συνεχούς καμπύλης. Αυτό γίνεται με τον εντοπισμό των τοπικών μέγιστων του διαγράμματος της φασματικής υπογραφής και την ένωση (προσαρμογή) των τμημάτων, μεταξύ αυτών των σημείων.

Πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές φασματικές μετρήσεις εδάφους, με το φασματοραδιόμετρο GER-1500, στις 25/07, 25/09, 29/10 του 2013 και 24/06/2014. Οι μετρήσεις έγιναν σε 11 κατηγορίες βλάστησης, αυτές που συναντώνται συχνότερα (κυριαρχούν) στην περιοχή που απεικονίζει η Εικόνα 5-1. Ο Πίνακας 5-1 δείχνει τα 11 διαφορετικά είδη βλάστησης, καθώς και τις υποκατηγορίες των δασικών ειδών για τις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις στο έδαφος. Έχει επιτευχθεί ένα λεπτομερές φάσμα μετρήσεων τόσο για τα δασικά είδη όσο και για τις υποκατηγορίες τους, συμπεριλαμβανομένων των φύλλων των ειδών, σε διαφορετικό στάδιο ωριμότητας. Οι τιμές, ακτινοβολίας (radiance) για πράσινα φύλλα (g, green), ανοιχτοπράσινα φύλλα (lg, light green) και μαραμένα φύλλα (wl, withered) έχουν καταγραφεί μέσω αυτών των μετρήσεων (Πίνακας 5-1). Έχουν συλλεχθεί συνολικά 28 φασματικές υπογραφές αναφοράς. Η Εικόνα 5-2 δείχνει τις φασματικές υπογραφές που προέρχονται από αυτές τις μετρήσεις.



Εικόνα 5-2: Φασματικές υπογραφές από τα δασικά είδη, σε διαφορετικά στάδια ωριμότητας. Η γκριζα ζώνη υποδηλώνει τη φασματική περιοχή “Red-Edge”.

Πίνακας 5-1: Δασικά είδη και υποκατηγορίες βλάστησης.

ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	
ΔΑΣΙΚΟ ΕΙΔΟΣ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ
QUERCUS or OAK / ΒΕΛΑΝΙΔΙΑ, ΔΡΥΣ	Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς (lg), (g), (wl)
	Quercus Coccifera / Δρυς η κοκκοφόρος / Πουρνάρι (g), (wl)

	Quercus rubescence / Χνοώδης Βελανιδιά (lg), (g)
	Quercus aegilops or macrolepis / Ήμερη βελανιδιά (lg), (g)
PINE / ΠΕΥΚΗ	Pinus Nigra/Μαύρη Πεύκη (lg), (g)
	Juniperus / Άρκευθος (g)
	Pine Siwesh or Halperensis / Χαλέπιος Πεύκη (g)
	Pinus Brutia / Τραχεία Πεύκη (g)
	Pinus Pinaster / Παραθαλάσσια Πεύκη (g)
BEECH or FAGUS / ΟΞΙΑ	Fagus Sylvatica / Δασική οξιά (lg), (g), (wl)
ABIES or FIR / ΕΛΑΤΗ	Abies / Ελάτη (g)
	Abies Hybrid / Υβριδική Ελάτη (g)
JUGLANS	Juglans Regia /Καρυδιά η βασιλική (g)
ACACIA	Acacia / Ακακία (g)
PRUNUS AVIA / ΚΕΡΑΣΙΑ	Prunus avia / Κερασιά (g)
GRASS / ΓΡΑΣΙΔΙ	Grass / Γρασίδι (lg), (wl)
RUBUS / ΒΑΤΟΣ	Rubus / Βάτος (g)
SALVIA OFFICINALIS / ΦΑΣΚΟΜΗΛΟ	Salvia Officinalis / Φασκόμηλο (g)
FERN / ΦΤΕΡΗ	Leptosporangiate / Φτέρη πολυποδιίδα (g)

5.3.2 Υλοποίηση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Οι μη δασικές εκτάσεις παρουσιάζουν συνήθως υψηλότερη αντίθεση στην υπερφασματική απεικόνιση, από αυτή που λαμβάνεται από δασικές περιοχές με ποικιλία στα είδη βλάστησης. Προκειμένου να αποφύγουμε τον κίνδυνο να χαρακτηρίσουμε τις φασματικές υπογραφές αυτών των περιοχών ως καθαρούς στόχους, επειδή αυτές θα βρίσκονται στα άκρα του simplex (βλέπε και 5.2), εφαρμόστηκε μια χωρική μάσκα στην υπερφασματική απεικόνιση. Η μάσκα προήλθε από κατωφλίωση των τιμών του δείκτη NDVI για την αφαίρεση περιοχών χωρίς

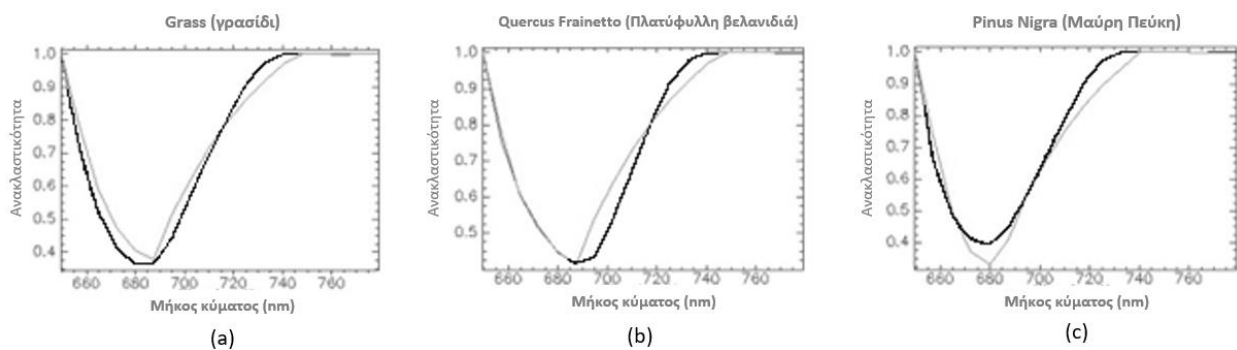
βλάστηση, όπως δρόμοι και σπίτια. Ο δείκτης NDVI έχει υπολογιστεί για τα μήκη κύματος και τα κανάλια της υπερφασματικής απεικόνισης CASI-550 ως εξής:

$$NDVI = \frac{([Band777.4] + [Band779.1] + [Band786.8])/3 - ([Band657.0] + [Band664.6] + [Band679.8])/3}{([Band777.4] + [Band779.1] + [Band786.8])/3 + ([Band657.0] + [Band664.6] + [Band679.8])/3}$$

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος ODM στην υπερφασματική απεικόνιση για την εκτίμηση της διάστασης του υποχώρου του σήματος. Η διάσταση βρέθηκε ίση με 13, συνεπώς, ο αλγόριθμος εξαγωγής καθαρών στόχων SEE θα πρέπει να αναζητήσει 14 καθαρούς στόχους. Η εφαρμογή του αλγόριθμου SEE έγινε για τη φασματική περιοχή του "Red Edge" που περιλαμβάνει 18 κανάλια της απεικόνισης CASI-550 (από 649.5 nm έως 779.1 nm).








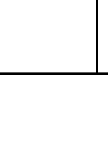
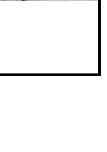


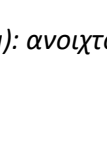
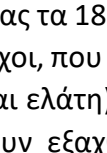
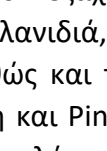
Ο αλγόριθμος SEE επέλεξε 14 καθαρούς στόχους από 25 υποψήφιους, οι οποίοι ταυτοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το module "Spectral Analyst" του λογισμικού ENVI (με τους αλγόριθμους SAM, SFF και BE) και τη φασματική βιβλιοθήκη που αναπτύχθηκε και αναφέρεται με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής. Η Εικόνα 5-3 παρουσιάζει τις φασματικές υπογραφές αναφοράς, κανονικοποιημένες αφού αφαιρεθεί το συνεχές (continuum), για να συγκρίνονται με τους καθαρούς στόχους, για α) το γρασίδι (grass), β) την πλατύφυλλη βελανιδιά (*Quercus Frainetto*) και το γ) τη μαύρη πεύκη (*Pinus Nigra*).

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται πινακοποιημένα (Πίνακας 5-2). Για αξιολόγηση των συμπερασμάτων, ο αλγόριθμος SEE εφαρμόστηκε στα 71 κανάλια της "μασκαρισμένης" υπερφασματικής απεικόνισης του δέκτη CASI-550. Τα αποτελέσματα από τα 71 κανάλια, επίσης δίνονται πινακοποιημένα (Πίνακας 5-3).



Εικόνα 5-3: Οι φασματικές υπογραφές αναφοράς κανονικοποιήθηκαν (scaled) ώστε να ταιριάζουν τους καθαρούς στόχους, αφού αφαιρέθηκε το συνεχές (continuum) για: α) Grass (γρασίδι), β) *Quercus Frainetto* (Πλατύφυλλη βελανιδιά) και γ) *Pinus Nigra* (Μαύρη Πεύκη). Η πιο σκούρα γραμμή αντιστοιχεί στη φασματική υπογραφή αναφοράς ενώ η ανοιχτόχρωμη, στον καθαρό στόχο.

Πίνακας 5-2: Τα δασικά είδη, οι φασματικές υπογραφές των οποίων εξήχθησαν ως καθαροί στόχοι με την προτεινόμενη μεθοδολογία.















QUERCUS or OAK / ΒΕΛΑΝΙΔΙΑ, ΔΡΥΣ		PINE / ΠΕΥΚΗ		BEECH or FAGUS / ΟΞΙΑ		GRASS / ΓΡΑΣΙΔΙ		ABIES or FIR / ΕΛΑΤΗ	
Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς (lg)		Pinus Nigra/Μαύρη Πεύκη (g)		Fagus Sylvatica / Δασική οξιά (lg)		Grass / Γρασίδι (lg)		Abies Alba/ Λευκόδερμος Ελάτη (g)	
Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς (g)		Pine Siwesh or Halepensis / Χαλέπιος Πεύκη (g)				Grass / Γρασίδι (wl)		Abies Hybrid / Υβριδική Ελάτη (g)	
Quercus Pubescence / Χνωώδης Βελανιδιά (g)		Pinus Pinaster/ Παραθαλάσσια Πεύκη (g)							
Quercus Coccifera / Δρυς η κοκκοφόρος / Πουρνάρι (lg)									
Quercus Coccifera / Δρυς η κοκκοφόρος / Πουρνάρι (wl)									
Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς (wl)									

(g): πράσινα, (lg): ανοιχτοπράσινα, (wl): μαραμμένα

Χρησιμοποιώντας τα 18 κανάλια που περιλαμβάνονται στην περιοχή “Red Edge”, έχουν εξαχθεί 14 καθαροί στόχοι, που αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικά γένη βλάστησης (βελανιδιά, πεύκη, οξιά, γρασίδι και ελάτη) από τα 11 που συναντώνται στην περιοχή μελέτης (Πίνακας 5-1). Πιο αναλυτικά, έχουν εξαχθεί τρεις καθαροί στόχοι από το γένος της βελανιδιάς (Frainetto ή πλατύφυλλη βελανιδιά, Pubescence ή χνωώδης βελανιδιά και Coccifera περισσότερο γνωστό ως πουρνάρι), καθώς και τρεις από το γένος της πεύκης (Nigra ή μαύρη πεύκη, Halepensis ή χαλέπιος πεύκη και Pinaster, γνωστό ως παραθαλάσσιο πεύκο), η οξιά (Fagus Sylvatica), δύο από το γένος της ελάτης (Alba ή λευκόδερμος ελάτη και Hybrid ή υβριδική ελάτη) και το γρασίδι. Συνολικά, φασματικές υπογραφές 10 δασικών ειδών, έχουν εξαχθεί ως καθαροί στόχοι. Επίσης, τρεις φασματικές υπογραφές από μαραμμένα φύλλα βελανιδιάς (Coccifera και Frainetto) και γρασιδιού έχουν επίσης εξαχθεί ως καθαροί στόχοι, ενώ τα πράσινα και ανοιχτοπράσινα φύλλα μόνο για την πλατύφυλλη βελανιδιά (Quercus Frainetto) έχουν επίσης συμπεριληφθεί στους καθαρούς στόχους.

Χρησιμοποιώντας τα 71 κανάλια του αερομεταφερόμενου δέκτη CASI-550, εξήχθησαν 14 καθαροί στόχοι από τέσσερα διαφορετικά γένη βλάστησης (βελανιδιά, πεύκη, οξιά και γρασίδι), από τα 11 που συναντώνται στην περιοχή. Πιο αναλυτικά, έχουν εξαχθεί τέσσερα από τα πέντε είδη βελανιδιάς (Frainetto, Coccifera, Pubescence και Aegilops), ένα από τα πέντε είδη πεύκης (P.Nigra), η οξιά (Fagus Sylvatica) και το γρασίδι. Συνολικά, φασματικές υπογραφές επτά δασικών ειδών έχουν εξαχθεί ως καθαροί στόχοι. Με το πλήρες σετ δεδομένων (71 κανάλια) ο αλγόριθμος πρόκρινε την πρασινάδα των φύλλων, αφού για πέντε είδη (Frainetto, Pubescence, Aegilops, Fagus Sylvatica και Pinus Nigra), οι φασματικές υπογραφές πράσινων και ανοιχτοπράσινων φύλλων εξήχθησαν ως καθαροί στόχοι.

Πίνακας 5-3: Τα δασικά είδη, οι φασματικές υπογραφές των οποίων εξήχθησαν ως καθαροί στόχοι χρησιμοποιώντας το σύνολο των δεδομένων.

QUERCUS or OAK / ΒΕΛΑΝΙΔΙΑ, ΔΡΥΣ		PINE / ΠΕΥΚΗ		BEECH or FAGUS / ΟΞΙΑ		GRASS / ΓΡΑΣΙΔΙ	
Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς (lg)		Pinus Nigra/Μαύρη Πεύκη (lg)		Fagus Sylvatica / Δασική οξιά (lg)		Grass / Γρασίδι (lg)	
Quercus Frainetto / Πλατύφυλλη δρυς (g)		Pinus Nigra/Μαύρη Πεύκη (g)		Fagus Sylvatica / Δασική οξιά (g)			
Quercus rubescence / Χνωώδης Βελανιδιά (lg)				Fagus Sylvatica / Δασική οξιά (wl)			
Quercus rubescence / Χνωώδης Βελανιδιά (g)							
Quercus aegilops or macrolepis / Ήμερη βελανιδιά (lg)							
Quercus aegilops or macrolepis / Ήμερη βελανιδιά (g)							
Quercus Coccifera / Δρυς η κοκκοφόρος / Πουρνάρι (lg)							
Quercus Coccifera / Δρυς η κοκκοφόρος / Πουρνάρι (wl)							

(g): πράσινα, (lg): ανοιχτοπράσινα, (wl): μαραμμένα

5.4 Συζήτηση και Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, προτείνεται μια νέα προσέγγιση επιλογής χαρακτηριστικών, με στόχο τη βελτιστοποίηση του φασματικού διαχωρισμού για δασικές εφαρμογές, αξιοποιώντας τη γνώση της πληροφορίας που δίνεται από τη φασματοσκοπική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, στη φασματική περιοχή του “Red Edge” (650-780nm) όπου παρατηρείται η απότομη αύξηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τα φύλλα των φυτών, δηλαδή στον υπόχωρο των 18 καναλιών της υπερφασματικής απεικόνισης που διαθέταμε, πραγματοποιήθηκε ο φασματικός διαχωρισμός. Ο αριθμός των καθαρών στόχων υπολογίστηκε, χρησιμοποιώντας το σύνολο των φασματικών καναλιών (71) της απεικόνισης ενώ η εξαγωγή των καθαρών στόχων εφαρμόστηκε στην επιλεγμένη φασματική περιοχή του “Red Edge”. Η αντιστοίχιση και η ταυτοποίηση των φασματικών υπογραφών, μέσω αλγορίθμων, εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας την φασματική βιβλιοθήκη που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίθηκαν με αυτά που παρέχονται από την εφαρμογή της διαδικασίας φασματικού διαχωρισμού χρησιμοποιώντας το πλήρες σύνολο καναλιών (71 κανάλια, από 421.8 nm έως 967.7 nm) της υπερφασματικής εικόνας. Η αξιολόγηση έδειξε ότι κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου εξαγωγής καθαρών στόχων στην επιλεγμένη φασματική περιοχή “Red Edge” (18 κανάλια, στο εύρος 650 έως 780nm), η οποία καταλαμβάνει το 25% του διατιθέμενου υπερφασματικού κύβου της απεικόνισης που διαθέταμε, δέκα δασικά είδη έχουν ανιχνευθεί και εξαχθεί ως καθαροί στόχοι. Η εφαρμογή του ίδιου αλγορίθμου εξαγωγής

καθαρών στόχων, με χρήση ολόκληρου του υπερφασματικού κύβου (71 κανάλια), εξήγαγε επτά δασικά είδη ως καθαρούς στόχους. Δύο λόγοι μπορεί να εξηγήσουν γιατί περισσότερα δασικά είδη εξάγονται ως καθαροί στόχοι, όταν χρησιμοποιείται η φασματική περιοχή του “Red Edge”, παρά ολόκληρο το φάσμα στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο. Ο πρώτος λόγος είναι ότι οι μικρές διακυμάνσεις α) στις συγκεντρώσεις κυρίως της χλωροφύλλης αλλά και των άλλων χρωστικών στην περιοχή του “Red Edge” και β) στην εσωτερική δομή των φύλλων (η οποία συμβάλλει σημαντικά στην ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο), σχετίζονται περισσότερο με τα διαφορετικά δασικά υγιή είδη. Ο δεύτερος λόγος, είναι ότι η ανακλαστικότητα της χλωροφύλλης στην πράσινη περιοχή του φάσματος, κυριαρχεί με τέτοιο τρόπο που καταστέλλει την ανακλαστικότητα των άλλων χρωστικών και καταλήγει σε καθαρούς στόχους που αντιστοιχούν σε αποχρώσεις του πράσινου και αντιπροσωπεύουν περισσότερο την κατάσταση υγείας του φυτού, παρά την ποικιλία δασικών ειδών. Το τελευταίο, επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της διαδικασίας του φασματικού διαχωρισμού, όταν εφαρμόστηκε στο σύνολο των φασματικών καναλιών, όπου πέντε είδη δένδρων εξήχθησαν ως καθαροί στόχοι λόγω των αποχρώσεων του πράσινου (μεταξύ των πράσινων (g) και ανοιχτοπράσινων (lg) φύλλων). Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο, τα επιλεγμένα 18 κανάλια της περιοχής του “Red Edge” δεν ήταν το ίδιο ευαίσθητα στις αποχρώσεις των πρασίνων - ανοιχτοπράσινων φύλλων, αλλά σε μικρο-διακυμάνσεις της χλωροφύλλης καθώς και στην παντελή έλλειψή της (κίτρινα φύλλα). Τρεις καθαροί στόχοι κίτρινων φύλλων συσχετίστηκαν με τρία δασικά είδη, αντίστοιχα, αλλά οι φασματικές υπογραφές που έδειχναν αποχρώσεις του πράσινου για το ίδιο δασικό είδος δεν προκρίθηκαν σχεδόν καθόλου από τον αλγόριθμο ως καθαροί στόχοι.

Ως προοπτική, το βέλτιστο υποσύνολο καναλιών στο οποίο καταλήγει η μέθοδος μπορεί να εισαχθεί σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks, CNN) βοηθώντας στη συνάθροιση χαρακτηριστικών και τη σημασιολογική συμπύκνωσή τους, καθιστώντας τη διαδικασία της μάθησης πολύ πιο γρήγορη.

5.5 Βιβλιογραφία

Andreou C. and Karathanassi V., “Estimation of the number of endmembers using robust outlier detection method,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, pp. 247-256, Jan 2014.

Andreou C. and Karathanassi V., “Using principal component analysis for endmember extraction,” in *Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, 2011 3rd Workshop on, June 2011, pp. 1-4.

Baijie W., Xin W., and Zhangxin C., “Spatial entropy based mutual information in hyperspectral band selection for supervised classification,” *International Journal of Numerical Analysis & Modeling*, vol. 9, no. 2, pp. 181-192, May 2012.

Chang Chein-I., *Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification*. Dordrecht; London: Kluwer Academic/Plenum, 2003, gBA2U3890 bnb 2753 Chein-I Chang. One CD-ROM in pocket attached to inside back cover. Includes bibliographical references and index.

Chang Chein-I. and Wang S., "Constrained band selection for hyperspectral imagery," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 6, pp. 1575-1585, June 2006.

Chang Y., L., Fang J., P., Benediktsson J., Chang L., Ren H., and Chen K., S., "Band selection for hyperspectral images based on parallel particle swarm optimization schemes," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, vol. 5, July 2009, pp. V-84-V-87.

De Backer S., Kempeneers P., Debruyn W., and Scheunders P., "A band selection technique for spectral classification," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 2, no. 3, pp. 319-323, July 2005.

Exelis - ENVI - Documentation Center

Guo B., Gunn S., Damper R., I., and Nelson J. D. B., "Band selection for hyperspectral image classification using mutual information," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 3, no. 4, pp. 522-526, Oct 2006.

Huang R. and He M., "Band selection based on feature weighting for classification of hyperspectral data," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 2, no. 2, pp. 156-159, April 2005.

Huang R. and Li X., "Band selection based on evolution algorithm and sequential search for hyperspectral classification," in *Audio, Language and Image Processing, 2008. ICALIP 2008. International Conference on*, July 2008, pp. 1270-1273.

Ifarraguerri A. and Prairie M., "Visual method for spectral band selection," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 1, no. 2, pp. 101-106, April 2004.

Jensen J. R., "Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective". Upper Saddle River, NJ, Pearson Prentice Hall 2007.

Keshava N., "Distance metrics and band selection in hyperspectral processing with applications to material identification and spectral libraries," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 7, pp. 1552-1565, July 2004.

Kruse F., Lefkoff A., Boardman J., Heidebrecht K., Shapiro A., Barloon P., and Goetz A., "The spectral image processing system (sips) interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 44, no. 2-3, pp. 145 - 163, 1993, *airborne Imaging Spectrometry*. [Online]. Available: [http:// www.sciencedirect.com/science/article/pii/ 003442579390013N](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579390013N)

Pudil P., Novovicova J., and Kittler J., "Floating search methods in feature selection," *Pattern Recognition Letters*, vol. 15, no. 11, pp. 1119 - 1125, 1994. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167865594901279>

Yang H., Du Q., Su H., and Sheng Y., "An efficient method for supervised hyperspectral band selection," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 138-142, Jan 2011.

Zare A. and Gader P., "Hyperspectral band selection and endmember detection using sparsity promoting priors," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 5, no. 2, pp. 256-260, April 2008.

6 ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΝ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΠΕΥΪΖΙΑΝΗΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΠΟΡΑΔΙΚΟΤΗΤΑΣ.

6.1 Εισαγωγή

Το ζήτημα του γραμμικού φασματικού διαχωρισμού με Μπεϋζιανή συμπερασματολογία σε υπερφασματικές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις, έχει αντιμετωπιστεί από τα τέλη της δεκαετίας του 2000 έως σήμερα, είτε αποκλειστικά με χρήση του αλγορίθμου Metropolis - Hastings [Du, X. Et al, 2014; Schmon, S. M. et al, 2022] είτε με τον δειγματολήπτη Gibbs [Simmons, J. et al, 2014; Se Yoon Lee, 2021] ή και με συνδυασμό αυτών [Dobigeon et al, 2008; Dobigeon et al, 2009; Eches O. et al, 2010; Tadesse Gh., 2016]. Ενδιαφέρουσες παραλλαγές αυτών των μεθόδων, προκύπτουν εξαιτίας του τρόπου αντιμετώπισης των δύο φυσικών περιορισμών ενός φασματικού διαχωρισμού, α) της μη αρνητικότητας των εκτιμώμενων αφθονιών και β) του αθροίσματος όλων των αφθονιών ενός εικονοστοιχείου, στη μονάδα, γνωστός και ως περιορισμός πλήρους προσθετικότητας (full additivity constraint) [Chen, P.; Tourneret, J.Y., 2017]. Από αυτή την άποψη, προκειμένου να δηλώσουμε την πρότερη γνώση μας για τις εξηγηματικές μεταβλητές του μοντέλου που χρησιμοποιούμε ή πολλές φορές για να δηλώσουμε την απουσία οποιασδήποτε γνώσης γι' αυτές, δοκιμάστηκαν ιστορικά μια ποικιλία κατανομών, από την ομοιόμορφη κατανομή [Dobigeon N. et al, 2009], την περικομμένη (truncated) κατανομή Gauss [Themelis, K.E., 2012] ή την κατανομή Dirichlet [Nascimento, J.M.P and Bioucas-Dias J.M., 2012] ακόμη και με κατηγορικά⁸ δεδομένα [Fouskakis D. et al, 2015]. Το αποτέλεσμα του φασματικού διαχωρισμού σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, είναι χάρτες αφθονίας, που δείχνουν την αφθονία κάθε καθαρού φασματικού στόχου (endmember) στα μικτά εικονοστοιχεία της τηλεπισκοπικής απεικόνισης. Στην πράξη, ο αριθμός των στατιστικά σημαντικών αφθονιών είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με το αρχικό σύνολό τους, μια ιδιότητα γνωστή ως «αρχή της σποραδικότητας των επιδράσεων», [Bickel, 1975] ενώ και το πρόβλημα της επιλογής μεταβλητών (καθαρών στόχων) είναι αρκετά σύνηθες στο πλαίσιο των γραμμικών και των γενικευμένων γραμμικών μοντέλων [Mc Cullagh & Nelder, 1989]. Επιπλέον είναι πολύ συνηθισμένο, αυτοί οι συντελεστές να εμφανίζουν το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας⁹, οπότε οι αριθμητικές συνέπειες από την μη αντιμετώπισή του, δυσχεραίνουν τον προσδιορισμό του βαθμού της επίδρασης κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη, δημιουργώντας προβλήματα στην εκτίμηση και την αξιοπιστία των συμπερασμάτων διαφοροποιώντας το γραμμικό συνδυασμό των συντελεστών ανά εικονοστοιχείο [Chen Xuehong et al, 2010]. Η εξάλειψη του φαινομένου της πολυσυγγραμμικότητας, μπορεί να εκλογικεύσει το αποτέλεσμα του φασματικού διαχωρισμού ανά εικονοστοιχείο της απεικόνισης [Smith G., 2015], παρέχοντας αξιόπιστες εκτιμήσεις με λελογισμένη¹⁰ διασπορά, για τα ποσοστά αφθονίας. Για το σκοπό αυτό, έχουν γίνει προσπάθειες

⁸ Είναι δεδομένα που προέρχονται από μεταβλητές οι τιμές των οποίων εκφράζουν τάξεις ή κατηγορίες.

⁹ Η πολυσυγγραμμικότητα παραπέμπει σε μια κατάσταση όπου δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές, σχετίζονται με υψηλή γραμμική σχέση.

¹⁰ Εάν η τιμή της διακύμανσης του διαταρακτικού όρου (θορύβου) είναι υψηλή και εμφανίζεται πολυσυγγραμμικότητα στο μοντέλο, τότε οι διακυμάνσεις των εκτιμήσεων των ποσοστών αφθονίας (των

να συρρικνωθούν οι συντελεστές αυτοί, ώστε να εξαλειφθεί και το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι για δεδομένα μεγάλων διαστάσεων που υποφέρουν από πολυσυγγραμμικότητα, για τη συρρίκνωση των συντελεστών συμμετοχής, επιβάλλουν ποινές, όπως αυτές που ποινικοποιούν τις νόρμες L_2 και L_1 . Παράδειγμα τέτοιων μεθόδων είναι η μέθοδος Ridge (κορυφογραμμήςψ η μέθοδος Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) [Tibshirani, R., 1996; Jiang Y., 2016] και η μέθοδος Elastic Net [Zou H. et al, 2005, Zou Q. et al, 2014, Hastie, T. et al, 2017], η οποία συνδυάζει τις δύο προηγούμενες και παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι αυτών. Η εφαρμογή μιας ποινικοποιημένης μεθόδου στο πρόβλημα της επιλογής των καταλληλότερων μεταβλητών έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία κυρίως στη γενετική [Helbling, D.E. and Johnson, D.R, 2014], στη βιοϊατρική [Mallik, H. et al, 2019], στη βιολογία [Wang, M. et al, 2020], όπου τις περισσότερες φορές ο αριθμός των μεταβλητών υπερβαίνει τον αριθμό των παρατηρήσεων και επίσης σε εφαρμογές Τηλεπισκόπησης για τη βελτίωση της απόδοσης ταξινόμησης [Li, H. et al, 2021], ενώ ο τοπικός συντονισμός των παραμέτρων¹¹ για την εφαρμογή της ποινής Elastic Net έχει αναφερθεί στη στατιστική θεωρία [Posch K, 2021], αλλά δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα από όσο γνωρίζουμε στο χώρο της Τηλεπισκόπησης.

Ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας είναι η δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου επιλογής καθαρών στόχων, το οποίο χρησιμοποιεί τις μεταβλητές που έχουν την πιο σημαντική επίδραση στην εξαρτημένη μεταβλητή (στην τιμή του εικονοστοιχείου της υπερφασματικής τηλεπισκοπικής απεικόνισης). Απόρροια του μοντέλου αποτελεί η συμπερασματολογία αναφορικά με τη βιοποικιλότητα της δασικής βλάστησης, όπως προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Αναπτύχθηκε η μέθοδος ENLoST (Elastic Net Local Simultaneously Tuning), η οποία βασίζεται στην ποινικοποίηση Elastic Net και δίνει έμφαση στη μετρίαση των επιδράσεων της μεθόδου Lasso στους συντελεστές συμμετοχής, δηλαδή στις αφθονίες, χωρίς να χαθούν όμως τα πλεονεκτήματα της τελευταίας. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ENLoST επιβάλλεται ο τοπικός συντονισμός των παραμέτρων με σκοπό να συρρικνωθούν οι μη στατιστικά σημαντικοί συντελεστές και λαμβάνονται ταυτόχρονα υπόψη οι γείτονες, οι οποίοι περιέχονται σε ένα κινούμενο 5x5 παράθυρο της υπερφασματικής απεικόνισης. Οι αφθονίες προέκυψαν από ένα γραμμικό, Μπεϋζιανό μοντέλο φασματικού διαχωρισμού, το οποίο παρουσιάζει χρωματικό θόρυβο με άγνωστη συνδιακύμανση, ο οποίος σηματοδοτεί την πολυπλοκότητα του Μπεϋζιανού μοντέλου¹² και τον τύπο της ύστερης (a posteriori) κατανομής, καθώς απαιτεί τον ορισμό μιας ή περισσότερων υπερπαραμέτρων.

ανεξαρτήτων μεταβλητών του μοντέλου) θα είναι υψηλές. Επομένως και τα τυπικά σφάλματά τους θα είναι υψηλά, οπότε και οι εκτιμητές για τα ποσοστά αφθονίας, δεν θα είναι ποτέ στατιστικά σημαντικοί.

¹¹ Αφορά τις παραμέτρους (λ) και (β), όπως εμφανίζονται στην εξίσωση $\hat{\alpha} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^p \alpha_j \mathcal{D}_{ij})^2 + \lambda \left[(1 - \beta) \frac{\|\alpha_j\|_2^2}{2} + \beta \sum_j |\alpha_j| \right] \right\}$ που θα αναλύσουμε στην παράγραφο 6.3

¹² Στα περισσότερα γραμμικά μοντέλα, γίνεται η υπόθεση πως ο θόρυβος ακολουθεί κανονική κατανομή (Gaussian), επομένως το διάνυσμα του θορύβου είναι ένα σύνολο από τυχαίες, ανεξάρτητες και ομοιόμορφα κατανομημένες τιμές (i.i.d, independent and identically distributed), οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και σταθερή (γνωστή ή άγνωστη) μεταβλητότητα σ^2 . Με άλλα λόγια ο πίνακας συμμεταβλητότητας του θορύβου

6.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

6.2.1 Ποινικοποίηση Elastic Net

Οι συντελεστές αφθονίας a όπως υπολογίστηκαν με Μπεϋζιανή συμπερασματολογία, δείχνουν στην πλειοψηφία τους ότι κάθε εικονοστοιχείο της απεικόνισης αποτελεί γραμμικό συνδυασμό όλων των καθαρών στόχων (Εικόνα 6-8). Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να βελτιστοποιηθεί ελέγχοντας τη συμπεριφορά ως προς τη συσχέτιση των συντελεστών αφθονίας. Συρρικνώνοντάς τους με βάση τη στατιστική τους σημαντικότητα επιτυγχάνεται διπλό όφελος, αφενός να μειωθεί το φαινόμενο της μεταξύ τους πολυσυγγραμμικότητας και αφετέρου να ελεγχθεί η διασπορά των συντελεστών θέτοντας ένα όριο για το πόσο μικροί μπορεί να γίνουν. Η συρρίκνωση αυτή επιτυγχάνεται ποινικοποιώντας τους συντελεστές αφθονίας, με κάποια ποινή. Όπως ήδη αναφέρθηκε, όταν σε ένα σύνολο δεδομένων παρουσιάζεται υψηλή συσχέτιση μεταξύ των εξηγηματικών μεταβλητών, εμφανίζεται το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας. Στο μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης η ύπαρξη πολυσυγγραμμικότητας οδηγεί σε υψηλά τυπικά σφάλματα για τις εκτιμήτριες των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών (στη δική μας περίπτωση αυτές είναι τα ποσοστά αφθονίας) και γι' αυτό το λόγο είναι δύσκολο να εκτιμηθούν αξιόπιστα οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές που θα συμμετέχουν στο μοντέλο. Υπάρχουν δυο σοβαροί λόγοι που δεν θα θέλαμε εκτιμήσεις από ένα μοντέλο που πάσχει από πολυσυγγραμμικότητα. Ο πρώτος λόγος έχει να κάνει με την ακρίβεια της εκτίμησης, η οποία σχεδόν πάντα μπορεί να βελτιωθεί επειδή πιθανότατα θα υποφέρει από μεγάλη διασπορά, οπότε και από πολύ μεγάλα και αναξιόπιστα διαστήματα εμπιστοσύνης [Tibshirani R., 1996]. Ένας άλλος βασικός λόγος είναι η ερμηνεία ενός μοντέλου με πολλές εξηγηματικές μεταβλητές (με πολλά είδη βλάστησης ως ποσοστά αφθονίας ανά εικονοστοιχείο της απεικόνισης). Θα προτιμούσαμε να ερμηνεύουμε ένα υποσύνολο αυτών, που να επιδρά όμως σημαντικά στην πραγματικότητα. Ιστορικά οι μέθοδοι που προτείνονταν για την ανάλυση τέτοιων συνόλων δεδομένων είναι οι παλινδρομήσεις τύπου Ridge (Hoerl & Kennard, 1970) και Lasso με βάση τις οποίες συρρικνώνονται κάποιοι συντελεστές παλινδρόμησης.

Η μέθοδος Ridge (κορυφογραμμής), ποινικοποιεί το τετράγωνο της L_2 -νόρμας, το οποίο εκφράζεται από το άθροισμα των τετραγώνων των συντελεστών αφθονίας (a) (τα ποσοστά αφθονίας που δεν είναι στατιστικά σημαντικά) αλλά δεν τους μηδενίζει [Van Wieringen, W.N., 2015], επιλύοντας το πρόβλημα ελαχιστοποίησης για τους συντελεστές αφθονίας:

$$\hat{a} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \alpha_j S_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \alpha_j^2 \right\} \text{ subject to } \sum_{j=1}^p \alpha_j^2 \leq t$$

είναι διαγώνιος και κάθε τιμή της διαγωνίου ισούται με σ^2 . Στην περίπτωση του χρωματικού θορύβου αυτό δεν ισχύει, η τιμή της μεταβλητότητας δεν είναι σταθερή και εμφανίζονται επιπλέον άγνωστες συμμεταβλητότητες εκατέρωθεν της κυρίας διαγωνίου, κάνοντας τον πίνακα συμμεταβλητότητας να αποτελεί μία από τις προς εκτίμηση μεταβλητές του μοντέλου.

όπου $\lambda \geq 0$ μια ρυθμιστική παράμετρος πολυπλοκότητας (complexity) και t είναι μια κατάλληλη ρυθμιστική παράμετρος ποινής.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζοταν με τη χρήση της μεθόδου Ridge, είναι ότι δεν γινόταν επιλογή των μεταβλητών που συμμετείχαν στο μοντέλο, επειδή οι συντελεστές απλά συρρικνώνονταν χωρίς να θέτει κάποιον συντελεστή ίσο με το μηδέν οπότε δεν μας παρείχε και λογικά ερμηνεύσιμο μοντέλο, ούτε κάποια αυτοματοποιημένη μέθοδο συρρίκνωσης. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator – Tibshirani, 1996) η οποία αποτελεί μια βελτιωμένη για το πρόβλημά μας, μέθοδο συρρίκνωσης των ποσοστών αφθονίας (συντελεστές α) του φασματικού διαχωρισμού, θέτοντας ορισμένους συντελεστές ακριβώς ίσους με το μηδέν, αυτοματοποιώντας την επιλογή τους και επιβεβαιώνοντας το όνομά της μεθόδου (selection), λειτουργώντας ως μέθοδος επιλογής μεταβλητών. Αυτό γίνεται ποινικοποιώντας την L_1 -νόρμα, δηλαδή το άθροισμα των απολύτων τιμών, των συντελεστών αφθονίας του φασματικού διαχωρισμού. Επιλύει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης ως εξής:

$$\hat{\alpha} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \alpha_j S_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\alpha_j| \right\} \text{ subject to } \sum_{j=1}^p |\alpha_j| \leq t$$

Η ποινή τύπου L_1 νόρμας (Lasso) μηδενίζει τους συντελεστές αφθονίας που δεν είναι στατιστικά σημαντικοί [Tibshirani, R., 2011], με αποτέλεσμα να επιτελεί και επιλογή μεταβλητών (των ποσοστών αφθονίας (α)), κάτι που μόνο έμμεσα μπορεί να κάνει η ποινή νόρμα τύπου L_2 [Yusbasi B. et al, 2015; Kobak, D. et al, 2020]. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα της μεθόδου Lasso και των παραλλαγών της είναι ότι όταν έχουμε μια ομάδα συσχετιζόμενων μεταβλητών, η Lasso τείνει να επιλέγει μόνο μία μεταβλητή από την ομάδα τυχαία, αδιαφορώντας για το ποια [Signorino, C.S. et al, 2018], ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, η Lasso μπορεί να μην είναι συνεπής [Suzuki, J., 2006; Zou, H., 2006]. Στο θέμα της σύνθεσης ενός εικονοστοιχείου, ως γραμμικός συνδυασμός ποσοστών αφθονίας, αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει πηγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων, π.χ. επιλογής μη αντιπροσωπευτικών καθαρών στόχων. Για τους παραπάνω λόγους, έχει προταθεί μια μέθοδος ποινής, η Elastic Net [Zou H. and Hastie T., 2005], την οποία εφαρμόσαμε στα ποσοστά αφθονίας του φασματικού διαχωρισμού σε αυτή την έρευνα, η οποία προσπαθεί να μετριάσει τις επιπτώσεις της Lasso στους συντελεστές αφθονίας, χωρίς να χαθούν τα πλεονεκτήματά της. Κάτι σαν μια υβριδική ποινή [Andreis, F., 2017]. Επιλύει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης για τους συντελεστές αφθονίας ως εξής:

$$\hat{\alpha} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \alpha_j S_{ij} \right)^2 + \lambda \left[(1 - \text{beta}) \frac{\|\alpha_j\|_2^2}{2} + \text{beta} |\alpha_j| \right] \right\} \quad (6.1)$$

Συνδυάζοντας μια ποινή L_1 με μια L_2 , έχουμε τα πλεονεκτήματα και των δύο: η L_1 δημιουργεί ένα αραιό μοντέλο και η L_2 επεμβαίνει στον αριθμό των επιλεγμένων μεταβλητών, ενθαρρύνει την ομαδοποίηση και σταθεροποιεί τη διαδρομή κανονικοποίησης L_1 .

Στην εξίσωση (6.1) το $\|\cdot\|$ συμβολίζει τη νόρμα¹³, το $\|\cdot\|_2$ συμβολίζει την L_2 Ευκλείδεια νόρμα, το $|\cdot|$ την απόλυτη τιμή.

6.2.2 Περιγραφή του Μπεϋζιανού μοντέλου

Ας υποθέσουμε ότι το B είναι ο αριθμός των φασματικών καναλιών της υπερφασματικής απεικόνισης CASI-550 και τα $S_{B1}, S_{B2}, \dots, S_{Bp}$ υποδηλώνουν τους p καθαρούς στόχους (endmembers) που υπάρχουν στην απεικόνιση. Τότε ένα τυχαίο εικονοστοιχείο της απεικόνισης, είναι ένας γραμμικός συνδυασμός του διάνυσματος $(S_{B1}, S_{B2}, \dots, S_{Bp})$ με διάσταση $(B \times p)$ με τα κλάσματα αφθονίας που καθορίζονται από το διάνυσμα στήλη $(a_1, a_2, \dots, a_p)^T$ διάστασης $(p \times 1)$.

Μοντελοποιούμε γραμμικά τη φασματική υπογραφή y ενός τυχαίου εικονοστοιχείου ως:

$$y_B = \sum_1^p S_{Bp} a_p + t_B \quad (6.2)$$

όπου y_B είναι ένα διάνυσμα στήλης $(y_1, y_2, \dots, y_B)^T$ με διάσταση $(B \times 1)$ και t_B είναι ένα διάνυσμα στήλης $(t_1, t_2, \dots, t_B)^T$ με διάσταση $(B \times 1)$ που αντιπροσωπεύει ένα χρωματικό, προσθετικό, κανονικό θόρυβο, με μηδενική μέση τιμή και άγνωστο πίνακα συμμεταβλητότητας Σ , που ακολουθεί κανονική κατανομή:

$$t \sim N(0, \Sigma) \quad (6.3)$$

όπου Σ ο τετραγωνικός πίνακας συμμεταβλητότητας του θορύβου t , ο οποίος παρουσιάζει μη μηδενικά στοιχεία εκατέρωθεν της κυρίας διαγωνίου του, έχει δηλαδή μη μηδενικές συμμεταβλητότητες (περίπτωση χρωματικού θορύβου) και έχει διαστάσεις $B \times B$, όπου B ο αριθμός των καναλιών της υπερφασματικής απεικόνισης.

Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο (6.2) περιγράφεται ως πολυδιάστατο, γραμμικό που ακολουθεί μια πολυμεταβλητή κανονική κατανομή N . Για να έχουμε κάποιες φυσικές εκτιμήσεις και για να μπορούμε να τις ερμηνεύσουμε, οι συντελεστές αφθονίας πρέπει να ικανοποιούν τους λογικούς, φυσικούς περιορισμούς

- (i) της μη αρνητικότητας με $a_i \geq 0$ με $i \in [1, p]$ και
- (ii) της άθροισης στη μονάδα με $\sum_1^p a_p = 1$ (6.4)

¹³ Μια απεικόνιση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ λέγεται νόρμα αν έχει τις ιδιότητες:

$$f(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0 : x \in \mathbb{R}^n$$

$$f(x + y) \leq f(x) + f(y) : x, y \in \mathbb{R}^n$$

$$f(\alpha x) = |\alpha| f(x) : \alpha \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}^n$$

Συνήθως γράφουμε $f(x) = \|x\|$

Η νόρμα σε ένα διανυσματικό χώρο είναι το ανάλογο της απόλυτης τιμής στο χώρο \mathbb{R} .

Οπότε, στο μοντέλο, όπως εκφράζεται από την (6.2) έχουμε ως άγνωστες παραμέτρους:

- τους συντελεστές αφθονίας α_p κάτω από τους περιορισμούς όπως καθορίζονται στην (6.4)
- τον πίνακα συμμεταβλητότητας Σ του θορύβου όπως καθορίζεται στην (6.3)

Υπάρχουν τέσσερα βασικά βήματα για την Μπεϋζιανή προσέγγιση ενός πιθανοθεωρητικού προβλήματος [Allenby G. M. et al, 2015; Nyberg S. O., 2019]:

1. Καθορισμός της συνάρτησης πιθανοφάνειας (likelihood function) των δεδομένων.
2. Καθορισμός της πρότερης γνώσης που πιθανώς να έχουμε, μέσω των πρότερων συναρτήσεων κατανομής (prior distributions) των μεταβλητών, των παραμέτρων και των υπερπαραμέτρων του μοντέλου.
3. Υπολογισμός της ύστερης (posterior) κατανομής πιθανότητας (ή διατύπωση μιας μαθηματικής έκφρασής της, εάν δεν γίνεται αναλυτικός υπολογισμός) για τις μεταβλητές, τις παραμέτρους και τις υπερπαραμέτρους του μοντέλου και ταυτόχρονα υπολογισμός των υπό συνθήκη δεσμευμένων¹⁴ ύστερων κατανομών για τις μεταβλητές, τις παραμέτρους και τις υπερπαραμέτρους του μοντέλου.
4. Εξαγωγή συμπερασμάτων από την εκ των υστέρων κατανομή.

6.2.2.1 Συνάρτηση πιθανοφάνειας του μοντέλου (Likelihood Function)

Η συνάρτηση πιθανοφάνειας είναι μια συνάρτηση των αγνώστων μεταβλητών του μοντέλου και περιέχει όλες τις δυνατές πληροφορίες που περιέχουν τα δεδομένα (το δείγμα), [Fouskakis, 2021]. Μας βοηθά να βγάλουμε συμπεράσματα για το διάνυσμα $\theta = (\alpha, t\{\Sigma\}) \propto (\alpha, \Sigma)$ των αγνώστων μεταβλητών α και Σ από τις πληροφορίες που περιέχονται στο δείγμα. Πρώτο και βασικό βήμα στη Μπεϋζιανή συμπερασματολογία είναι να υπολογιστεί η πιθανοφάνεια για τα δεδομένα y , δηλαδή η :

$$y \sim f(y|\alpha, \Sigma) \quad (6.5)$$

και λαμβάνοντας υπόψη τις (6.2) και (6.3), η (6.4) γράφεται $y \sim N(S\alpha, \Sigma)$ και λαμβάνοντας υπόψη τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής, παίρνει τη μορφή:

$$f(y|\alpha, \Sigma) \propto (\Sigma)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\|y - S\alpha\|^2 \Sigma^{-1}\right] \quad (6.6)$$

Όπου $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]^T$ το διάνυσμα της μεταβλητής των αφθονιών, $S = (S_{B1}, S_{B2}, \dots, S_{Bp})$ το διάνυσμα των p καθαρών στόχων (endmembers) και Σ ο τετραγωνικός πίνακας συμμεταβλητότητας του θορύβου t .

¹⁴ Υπό συνθήκη ή δεσμευμένη πιθανότητα (conditional probability) των A και B είναι η πιθανότητα ότι θα συμβεί το A δεδομένου ότι συνέβη το B : $P(A|B) = P(A,B) / P(B)$

6.2.2.2 Πρότερη γνώση (συναρτήσεις priors) και ύστερη κατανομή (posterior)

Η έκφραση των πρότερων συναρτήσεων των αγνώστων μεταβλητών γίνεται βάσει πρότερων γνώσεων (εάν υπάρχουν) για τις άγνωστες μεταβλητές.

Η πρότερη αυτή γνώση, επιτρέπει την έκφραση των αγνώστων μεταβλητών α και t με τις πρότερες συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας (prior distributions) σε γενική μορφή:

$$a \sim f(a) \quad \text{και} \quad t \sim f(t|\Sigma),$$

Για να επιτυγχάνονται οι φυσικοί περιορισμοί που θέσαμε στην (6.4), θεωρούμε ότι οι συντελεστές αφθονίας a ακολουθούν κατανομή Dirichlet: $a \sim \text{Dir}(a)$ [Fouskakis D., 2015].

Τότε συμβολίζουμε με $a = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]^T$ το διάνυσμα της μεταβλητής των αφθονιών a . Η κατανομή Dirichlet ορίζει μια συνάρτηση πυκνότητας :

$$f(a_1, a_2, \dots, a_p) = \frac{1}{B(a)} \prod_{i=1}^p a_i^{p-1} \tag{6.7}$$

όπου $\{a_i\}_1^p$ ανήκει στο $(p-1)$ simplex με άλλα λόγια $\sum_1^p a_i = 1$ με $a > 0$ και $a \in [0,1]$.

Η σταθερά κανονικοποίησης B είναι η πολυμεταβλητή κατανομή Beta η οποία εκφράζεται με όρους της Γάμα κατανομής :

$$B(a) = \frac{\prod_1^p \Gamma(a_i)}{\Gamma(\sum_1^p a_i)}$$

Ο πίνακας συμμεταβλητότητας Σ ακολουθεί αντίστροφη Wishart κατανομή πιθανότητας, με μέση τιμή D και ν βαθμούς ελευθερίας, σε ένα χώρο B διαστάσεων:

$$\Sigma|\nu, D \sim W_B^{-1}((\nu - B - 1)D, \nu) \tag{6.8}$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αντίστροφης Wishart κατανομής, εξαρτημένη από το D εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} f(\Sigma|\nu, D) &= \frac{(\nu - B + 1)^{\nu/2} |D|^{\nu/2}}{2^{B\nu/2} \Gamma_B\left(\frac{\nu}{2}\right) |\Sigma|^{(\nu+B+1)/2}} \text{etr}\left\{-\frac{1}{2}(\nu - B - 1)\Sigma^{-1}D\right\} \propto \\ &\propto \frac{|D|^{\nu/2}}{|\Sigma|^{(\nu+B+1)/2}} \text{etr}\left\{-\frac{1}{2}(\nu - B - 1)\Sigma^{-1}D\right\} \end{aligned} \tag{6.9}$$

Όπου ο συμβολισμός $|\cdot|$ αφορά την ορίζουσα και ο συμβολισμός $\text{etr}\{ \cdot \}$ είναι για τον εκθέτη του ίχνους του πίνακα που περιγράφεται ανάμεσα στα $\{ \}$.

Η συνάρτηση $\Gamma_B\left(\frac{\nu}{2}\right)$ είναι η πολυμεταβλητή συνάρτηση Γάμμα, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της οποίας είναι:

$$\Gamma_B\left(\frac{\nu}{2}\right) = \pi^{\frac{B(B-1)}{4}} \prod_{i=1}^B \Gamma\left(\frac{\nu - B + i}{2}\right)$$

Η αντίστροφη Wishart κατανομή αποτελεί συζυγή¹⁵ πρότερη κατανομή για τη μεταβλητή Σ (τον πίνακα συμμεταβλητότητας) η παράμετρος ν της οποίας μπορεί από τη βιβλιογραφία να θεωρηθεί σταθερά που θα ικανοποιεί την (6.11), ανάλογα τη φύση του θορύβου [Dobigeon N. et al, 2008]. Η διασπορά της συνάρτησης (6.9) ισούται με :

$$\text{var}[\Sigma|\nu, D] = \frac{(\nu-B+1)D^2 + (\nu-B-1)\text{tr}\{D\}D}{(\nu-B-3)(\nu-B-1)^2(\nu-B)} \quad (6.10)$$

οπότε από τον παρονομαστή βλέπουμε πως η παράμετρος ν πρέπει να ικανοποιεί την προϋπόθεση $\nu > B + 3$ (6.11) για να εξασφαλίζεται η ύπαρξη μέσου και διασποράς της αντίστροφης Wishart κατανομής. Επίσης διαπιστώνουμε ότι όσο αυξάνει το ν η (6.10) τείνει στο μηδέν, οπότε η απόσταση μεταξύ της μεταβλητής Σ και της παραμέτρου D , συσχετίζεται με την τιμή της παραμέτρου ν .

Η δεύτερη άγνωστη παράμετρος D είναι ένας συμμετρικός πίνακας διαστάσεων $B \times B$, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί διαγώνιος πίνακας [Dobigeon N. et al, 2008]:

$$D = \gamma I_B$$

όπου η γ είναι μία θετική ρυθμιζόμενη υπερπαράμετρος για την οποία δεν υπάρχει κάποια πρότερη γνώση, που ακολουθεί μια μη πληροφοριακή¹⁶, επίπεδη (flat) ή ασαφή (diffuse) πρότερη κατανομή. Μια κατάλληλη κατανομή για την περίπτωση αυτή, αποτελεί η κατανομή του Jeffrey [Jeffreys H., 1946], η οποία έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$f(\gamma) \propto \frac{1}{\gamma} I_{\mathbf{R}^+}(\gamma) \quad (6.11)$$

εκφράζοντας την έλλειψη πρότερης γνώσης μας για την υπερπαράμετρο αυτήν .

Βάσει των (6.9) και (6.11) η συνάρτηση της πρότερης κατανομής του πίνακα συμμεταβλητότητας Σ μπορεί να γραφτεί ως :

$$f(\Sigma|\nu, \gamma) \propto \frac{\gamma^{\nu B/2}}{|\Sigma|^{(\nu+B+1)/2}} \text{etr} \left\{ -\frac{\gamma}{2} (\nu - B - 1) \Sigma^{-1} \right\} \quad (6.12)$$

Εάν για διευκόλυνση αλλάξουμε τη σημειογραφία (notation) θεωρώντας το διάνυσμα παραμέτρων $\theta = \{\alpha, \Sigma\}$, τότε η συνάρτηση πιθανοφάνειας $f(\mathbf{y}|\theta)$ όπως διατυπώνεται στην (6.6) και η συνάρτηση της παραμέτρου $f(\gamma)$, όπως διατυπώνεται στην (6.11) σχηματίζουν ένα ιεραρχικό Μπεϋζιανό μοντέλο βάσει του οποίου, η εκ των υστέρων συνάρτηση πιθανότητας (η

¹⁵ Εάν η ύστερη κατανομή ανήκει στην ίδια οικογένεια κατανομών με την πρότερη κατανομή πιθανότητας, τότε οι δυο κατανομές ονομάζονται συζυγείς. Το πλεονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι απλοποιούνται πολύ οι αλγεβρικοί υπολογισμοί για τον υπολογισμό της ύστερης κατανομής και αυτή υπολογίζεται αλγεβρικά σε κλειστή μορφή οπότε αποφεύγουμε τις μεθόδους αριθμητικής ή στοχαστικής ολοκλήρωσης.

¹⁶ Εκφράζει ασαφείς ή γενικές πληροφορίες σχετικά με μια μεταβλητή. Ονομάζεται και «όχι πολύ ενημερωτική» ή «αντικειμενική» πρότερη σε αντιδιαστολή με το ότι δεν αποτελεί υποκειμενική γνώση [wikipedia, prior probability].

posterior των δεδομένων) $f(\theta|y)$ από τις περιθώριες κατανομές (marginal distributions) των α και Σ με βάση τον νόμο του Bayes και με εφαρμογή του νόμου της αλυσίδας των πιθανοτήτων (chain rule of probability), δίνει :

$$\begin{aligned} f(\Sigma, \alpha, \gamma|y) &= \frac{f(y, \Sigma, \alpha, \gamma)}{\iiint f(y, \Sigma, \alpha, \gamma) d\Sigma d\alpha d\gamma} = \frac{f(y|\Sigma, \alpha) f(\Sigma, \alpha, \gamma)}{\iiint f(y, \Sigma, \alpha, \gamma) d\Sigma d\alpha d\gamma} = \\ &= \frac{f(y|\Sigma, \alpha) f(\Sigma, \alpha|\gamma) f(\gamma)}{\iiint f(y|\Sigma, \alpha) f(\Sigma, \alpha|\gamma) f(\gamma) d\Sigma d\alpha d\gamma} \propto f(y|\Sigma, \alpha) f(\alpha) f(\Sigma|\gamma) f(\gamma) \end{aligned} \quad (6.13)$$

με την προϋπόθεση ότι οι μεταβλητές α και Σ είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες και η συνάρτηση της από κοινού κατανομής πιθανότητας $f(\theta|\gamma) = f(\alpha, \Sigma|\gamma)$ ισούται με το γινόμενο των κατανομών των επιμέρους μεταβλητών $f(\alpha)$ και $f(\Sigma|\gamma)$.

Θα πρέπει να προσέξουμε το γεγονός ότι στο θεώρημα του Bayes, όπως διατυπώνεται ανωτέρω, ο παρανομαστής είναι συνάρτηση μόνο ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, οπότε από την στιγμή που θα ολοκληρώσουμε τον παρονομαστή, ως προς τις παραμέτρους αυτές, το αποτέλεσμα είναι συνάρτηση μόνο ως προς γ . Συνεπώς, για δεδομένες παρατηρήσεις γ , ο παρανομαστής είναι μια σταθερά και ονομάζεται σταθερά κανονικοποίησης.

Από τις (6.7) και (6.12), η $f(\theta|\gamma)$ παίρνει τη μορφή :

$$\begin{aligned} f(\theta|\gamma) &= f(\alpha, \Sigma|\gamma) = f(\alpha) f(\Sigma|\gamma) \propto \\ &\propto \frac{\gamma^{vL/2}}{|\Sigma|^{(v+B+1)/2}} \text{etr} \left\{ -\frac{\gamma}{2} (v - B - 1) \Sigma^{-1} \right\} I_S(\alpha) \end{aligned} \quad (6.14)$$

Με την $f(y|\theta)$ όπως δίνεται από την εξίσωση (6.6) και την $f(\theta|\gamma)$ όπως δίνεται από την (6.14), η εκ των υστέρων συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του θ που φαίνεται στην (6.13) παίρνει την μορφή:

$$f(\theta|y) = f(\alpha, \Sigma|y) \propto (\text{tr}\{\Sigma^{-1}\})^{-\frac{vB}{2}} |\Sigma|^{-\frac{v+B+1}{2}} \times \frac{1}{\prod_{i=1}^B \Gamma(a_i)} \prod_{i=1}^B a_i^{p-1} \quad (6.15)$$

Η ολοκλήρωση της παραπάνω συνάρτησης είναι αρκετά περίπλοκη και δεν μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά, επειδή δεν δυνατός ο υπολογισμός του ολοκληρώματός της σε κλειστή μορφή. Για τον λόγο αυτό θα μας απασχολήσουν ειδικοί τρόποι δειγματοληψίας που στηρίζονται στην παραγωγή εξαρτημένων¹⁷ δειγμάτων με τη βοήθεια κατάλληλων

¹⁷ Η συνέπεια των Monte Carlo εκτιμητών βασίστηκε σε i.i.d. (Independent and identically distributed) δείγμα. Το κρίσιμο ερώτημα που τίθεται είναι: Όταν τα παραγόμενα δείγματα είναι εξαρτημένα, έχω σύγκλιση των εκτιμητών; Στο ερώτημα αυτό έδωσε απάντηση ο N. Metropolis και η ομάδα του (1953) με την τεχνική των MCMC, όπου απαιτήσαν η εξάρτηση να μην είναι οποιαδήποτε, αλλά από τα δείγματα να δημιουργηθεί μια αλυσίδα Markov,

μαρκοβιανών αλυσίδων, εκμεταλλευόμενοι και τις μεθόδους Monte Carlo [Trevezas S., 2020], που έχουν ως βασικό στόχο την προσέγγιση πολύπλοκων ολοκληρωμάτων και την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης με τη βοήθεια προσομοιώσεων. Η πιο δημοφιλής μέθοδος αιχμής γι' αυτό το σκοπό, είναι ο δειγματολήπτης Gibbs, για την παραγωγή τυχαίων δειγμάτων των άγνωστων μεταβλητών α και Σ από την εκ των υστέρων συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (6.15).

6.2.2.3 Δειγματολήπτης Gibbs

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση ενός Μπεϋζιανού μοντέλου συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό αναλυτικών τύπων, η επίλυση των οποίων γίνεται εξαιρετικά δύσκολη σε μοντέλα μεγάλης πολυπλοκότητας [Lynch S.M., 2007]. Για τον λόγο αυτό, αλγόριθμοι εφαρμογής τέτοιων μοντέλων βασίζονται σε στοχαστικές MCMC (Monte Carlo Markov Chain) μεθόδους δειγματοληψίας. Η δειγματοληψία Gibbs ή ένας δειγματολήπτης Gibbs είναι ένας Monte Carlo αλγόριθμος αλυσίδας Markov (MCMC) για τη λήψη μιας ακολουθίας δειγμάτων που προσεγγίζονται από μια καθορισμένη πολυμεταβλητή κατανομή πιθανότητας, όταν η άμεση δειγματοληψία είναι πολύ δύσκολη. Αυτή η ακολουθία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρκετές περιπτώσεις, για να προσεγγίσει την κατανομή μιας από τις μεταβλητές ή κάποιου υποσυνόλου των μεταβλητών (για παράδειγμα, οι άγνωστες παράμετροι ή εάν υπάρχουν οι λανθάνουσες μεταβλητές κλπ) ή και για να υπολογίσει ένα ολοκλήρωμα (όπως την αναμενόμενη τιμή μιας από τις μεταβλητές). Η δειγματοληψία Gibbs χρησιμοποιείται συνήθως ως μέσο στατιστικής εξαγωγής συμπερασμάτων. Όπως αναφέρθηκε, είναι ένας Monte Carlo αλγόριθμος, επομένως τυχαιοποιημένος (δηλαδή ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί τους τυχαίους αριθμούς (στην ουσία ψευδοτυχαίους αριθμούς) που παράγονται από κώδικα που εκτελείται σε υπολογιστή) και είναι μια εναλλακτική λύση σε ντετερμινιστικούς αλγόριθμους για στατιστικά συμπεράσματα όπως ο αλγόριθμος μεγιστοποίησης προσδοκιών (Expectation Maximization, EM). Όπως και με άλλους αλγόριθμους MCMC, η δειγματοληψία Gibbs δημιουργεί μια αλυσίδα δειγμάτων Markov όπου γενικά, τα δείγματα από την αρχή της αλυσίδας (περίοδος burn-in) μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια την επιθυμητή κατανομή και συνήθως απορρίπτονται. Οι αλυσίδες Markov αποτελούν στοχαστικά μοντέλα που περιγράφουν την αλληλουχία γεγονότων, με την πιθανότητα κάθε γεγονός να εξαρτάται αποκλειστικά από την κατάσταση που επήλθε από το αμέσως προηγούμενο γεγονός της αλυσίδας [Gagnic P. A., 2017]. Η βασική θεώρηση των MCMC αλγορίθμων είναι πως η εκτίμηση οποιουδήποτε στατιστικού, μιας εκ των υστέρων κατανομής, είναι εφικτή εάν διαθέτουμε έναν ικανοποιητικό αριθμό προσομοιωμένων δειγμάτων της κατανομής αυτής. Επειδή ο υπολογισμός των εκ των υστέρων περιθώριων¹⁸ πιθανοτήτων, όπως ελέγχθη παραπάνω, είναι σχετικά εύκολο να γίνει, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο δειγματοληψίας Gibbs [Geman S. and Geman D., 1989; Shibata, M.

για την οποία ισχύει το Εργοδικό θεώρημα που αντικαθιστά στην περίπτωση αυτή τον ασθενή Νόμο των Μεγάλων Αριθμών (που αφορά i.i.d. δείγμα).

¹⁸ Περιθώρια πιθανότητα (marginal probability) του A , δεδομένης μιας μεταβλητής Y είναι η πιθανότητα $P_Y(A)$ θεωρώντας την Y γνωστή (δεδομένη).

et al, 2005], η οποία ξεπερνά τις δυσκολίες που συνήθως θέτει ο ακριβής υπολογισμός της εκ των υστέρων πιθανότητας (posterior) του μοντέλου (6.5).

Με ολοκλήρωση της (6.5), υπολογίζονται άμεσα οι υπό συνθήκη¹⁹ εκ των υστέρων περιθώριες κατανομές πιθανότητας (conditional marginal distribution) της μεταβλητής $\alpha \sim f(\alpha|\gamma, \Sigma, \gamma)$, της παραμέτρου $\Sigma \sim f(\Sigma|\gamma, \alpha, \gamma)$ και της υπερπαραμέτρου $\gamma \sim f(\gamma|\Sigma, \alpha, \gamma)$ η οποία με βάση τη βιβλιογραφία [Dobigeon N. et al, 2008] θα λάβει τιμές σε συγκεκριμένο εύρος, για τον δειγματολήπτη Gibbs. Η δειγματοληψία από τις υπό συνθήκη εκ των υστέρων κατανομές αυτές, προσφέρει μία σχεδόν αμερόληπτη εκτίμηση των μεταβλητών του μοντέλου [Kuk A. Y. C., 1995]. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Monte Carlo Markov Chain με τον δειγματολήπτη Gibbs για να λάβουμε δείγματα των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου (6.2) από την ύστερη κατανομή:

Πίνακας 6-1 : Ψευδοκώδικας για τον δειγματολήπτη Gibbs

Δειγματολήπτης Gibbs: Παράδειγμα ψευδοκώδικα

initialization $\alpha^{(0)}$, $\Sigma^{(0)}$ και $\gamma^{(0)}$

for $i=1,2,\dots$ MaxIteration *do*

sample $\alpha^{(i)} \sim f(\alpha | \Sigma^{(i-1)}, \gamma^{(i-1)})$

sample $\gamma^{(i)} \sim f(\gamma | \alpha^{(i)}, \Sigma^{(i-1)})$

sample $\Sigma^{(i)} \sim f(\Sigma | \alpha^{(i)}, \gamma^{(i)})$

end for

return the values $\{\alpha^{(i)}, \gamma^{(i)}, \Sigma^{(i)}\}$

Ο αλγόριθμος αυτός αρχικοποιείται με τυχαίες αρχικές τιμές του πίνακα Σ , της παραμέτρου ν που εκφράζει το βαθμό ελευθερίας της αντίστροφης Wishart κατανομής, και της παραμέτρου γ . Ως αρχική τιμή της παραμέτρου γ ορίζεται $\gamma_0=4.8 \times 10^{-3}$, όπως προτείνεται στην [Dobigeon, J.Y. et al, 2008]. Η αρχικοποίηση της μεταβλητής Σ γίνεται με τυχαία δειγματοληψία από την αντίστροφη Wishart κατανομή $IW_L^{-1}((\nu-L-1)D, \nu)$. Ο βαθμός ελευθερίας ν της κατανομής αυτής προτείνεται από την [Dobigeon, J.Y. et al, 2008] ως ίσος με $\nu=B+3+\eta$, $\eta \in \mathbb{N}$ και $\eta \gg 1$. Για πολύ μεγάλες τιμές της παραμέτρου η ($\eta > 50$) η διακύμανση της αντίστροφης Wishart κατανομής, προσεγγίζει το 0 με αποτέλεσμα ο θόρυβος να παίρνει την μορφή i.i.d. κανονικού θορύβου. Για την παρούσα έρευνα ορίζεται $\eta=26$.

Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου συγκλίνει η κάθε μαρκοβιανή αλυσίδα. Η σύγκλιση ελέγχεται από τον εργοδικό²⁰ μέσο [Yosida K. and Kakutani S., 1939] της παραμέτρου που μας ενδιαφέρει. Ως αποτέλεσμα, από το δειγματολήπτη Gibbs λαμβάνουμε συνεπείς²¹ και σχεδόν

¹⁹ Υπό συνθήκη ή δεσμευμένη πιθανότητα (conditional probability) των A και B είναι η πιθανότητα ότι θα συμβεί το A δεδομένου ότι συνέβη το B : $P(A|B) = P(A,B) / P(B)$

²⁰ Μαθηματικά, η εργοδικότητα εκφράζει την ιδέα ότι ένα σημείο ενός κινούμενου συστήματος (είτε ένα δυναμικό σύστημα είτε μια стоχαστική διαδικασία), θα επισκεφθεί τελικά όλα τα μέρη του χώρου στον οποίο κινείται το σύστημα, με ομοιόμορφη και τυχαία έννοια. Αυτό σημαίνει ότι η μέση συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να συναχθεί από την τροχιά ενός «τυπικού» σημείου. Ισοδύναμα, μια αρκετά μεγάλη συλλογή τυχαίων δειγμάτων από μια διαδικασία μπορεί να αντιπροσωπεύει τις μέσες στατιστικές ιδιότητες ολόκληρης της διαδικασίας.

²¹ Ως συνέπεια του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος.

αμερόληπτες εκτιμήσεις²² για τις άγνωστες παραμέτρους αφθονίας α του φασματικού διαχωρισμού και για τον άγνωστο πίνακα συμμεταβλητότητας Σ του θορύβου.

6.2.2.3.1 Δειγματοληψία της μεταβλητής α των αφθονιών

Συμβολίζουμε με $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]^T$ το διάνυσμα της μεταβλητής των αφθονιών α

Για να πάρουμε δείγματα από την Dirichlet, πρώτα πρέπει να πάρουμε τυχαία ανεξάρτητα δείγματα y_i από την Γάμμα κατανομή με πυκνότητα πιθανότητας :

$$\Gamma(\alpha_i, 1) = \frac{y_i^{\alpha_i-1} e^{-y_i}}{\Gamma(\alpha_i)} \quad (6.16)$$

Θέτοντας :

$$\alpha_i = \frac{y_i}{\sum_{j=1}^p y_j}$$

τα α_i ακολουθούν κατανομή Dirichlet [wikipedia, Dirichlet distribution] και ικανοποιούν τους περιορισμούς της προσθετικότητας και της μη αρνητικότητας από τις ιδιότητες της κατανομής.

6.2.2.3.2 Δειγματοληψία του πίνακα συμμεταβλητότητας Σ του θορύβου

Η παραγωγή δειγμάτων για την μεταβλητή Σ γίνεται σε δύο βήματα:

Βήμα 1^ο: παραγωγή δειγμάτων της μεταβλητής γ από την συνδυαστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $f(\Sigma, \gamma | \alpha, y)$ εξαρτημένη από το Σ , η συνάρτηση αυτή έχει την μορφή κατανομής Γάμμα:

$$\gamma | \alpha, \Sigma, y \sim \Gamma\left(\frac{\nu B}{2}, \frac{\nu - B - 1}{2} \text{tr}\{\Sigma^{-1}\}\right) \quad (6.17)$$

Βήμα 2^ο: παραγωγή δειγμάτων της μεταβλητής Σ από την συνδυαστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $f(\Sigma, \gamma | \alpha, y)$ εξαρτημένη από το γ , η συνάρτηση αυτή έχει την μορφή αντίστροφης κατανομής Wishart [wikipedia, Wishart distribution] :

$$\Sigma | \nu, D \sim W_B^{-1}(\gamma(\nu - B - 1)\mathbf{I}_B + \mathbf{z}\mathbf{z}^T, \nu + 1) \quad (6.18)$$

όπου $\mathbf{z} = \mathbf{y} - \mathbf{S}\mathbf{a}$ (βλέπε και εξίσωση 6.2)

6.2.3 Ο δείκτης ποικιλομορφίας του Shannon

Ο δείκτης Shannon είναι ένας βασικός δείκτης ποικιλομορφίας, αποτελώντας εφαρμογή της θεωρίας της πληροφορίας και βασίζεται στην ιδέα, ότι η μεγαλύτερη ποικιλία, αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα για την επιλογή ενός συγκεκριμένου τυχαίου είδους [Pla, L., 2006]. Αποτελεί ένα στατιστικό δείκτη, που προϋποθέτει ότι όλα τα είδη αντιπροσωπεύονται σε ένα

²² Είναι ασυμπτωτικά αμερόληπτες εκτιμήσεις, η μεροληψία των οποίων τείνει στο μηδέν, όσο αυξάνει ο αριθμός των επαναλήψεων στον αλγόριθμο Gibbs.

δείγμα και ότι δειγματοληπτούνται τυχαία. Χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της βιοποικιλότητας πολλές φορές σε συνδυασμό με άλλους δείκτες [Kamrouri M. et al 2019]. Θα υπολογίσουμε και θα χρησιμοποιήσουμε το δείκτη Shannon για να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κεφαλαίου αυτού, μετά την εφαρμογή της μεθόδου ENLoST.

Ο υπολογισμός του δείκτη ποικιλομορφίας Shannon, έγινε στην γλώσσα R με χρήση της βιβλιοθήκης `vegan`, σύμφωνα με τον τύπο:

$$H = - \sum_{i=1}^Q p_i \log_b p_i \quad (6.19)$$

όπου p_i είναι η αφθονία του είδους i που υπολογίστηκε από ένα συνήθη OLS (Ordinary Least Squares, OLS) φασματικό διαχωρισμό [Heinz C. D., Chang Chein-I., 2001] στην υπερφασματική απεικόνιση, Q είναι ο αριθμός των ειδών στο δείγμα και b η βάση του λογάριθμου. Συνήθως στην εξίσωση (6.19) χρησιμοποιείται ο φυσικός λογάριθμος που έχει ως βάση το νεπέριο αριθμό (e) και αυτός χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα έρευνα. Ο δείκτης Shannon έχει αρκετά πλεονεκτήματα, έναντι άλλων δεικτών ποικιλομορφίας, αφού δεν επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του δείγματος και η εφαρμογή του οδηγεί στην αξιοποίηση ενός μεγάλου αριθμού πληροφοριών μέσω μίας μόνο μαθηματικής έκφρασης, καθιστώντας τον απλό και κατανοητό.

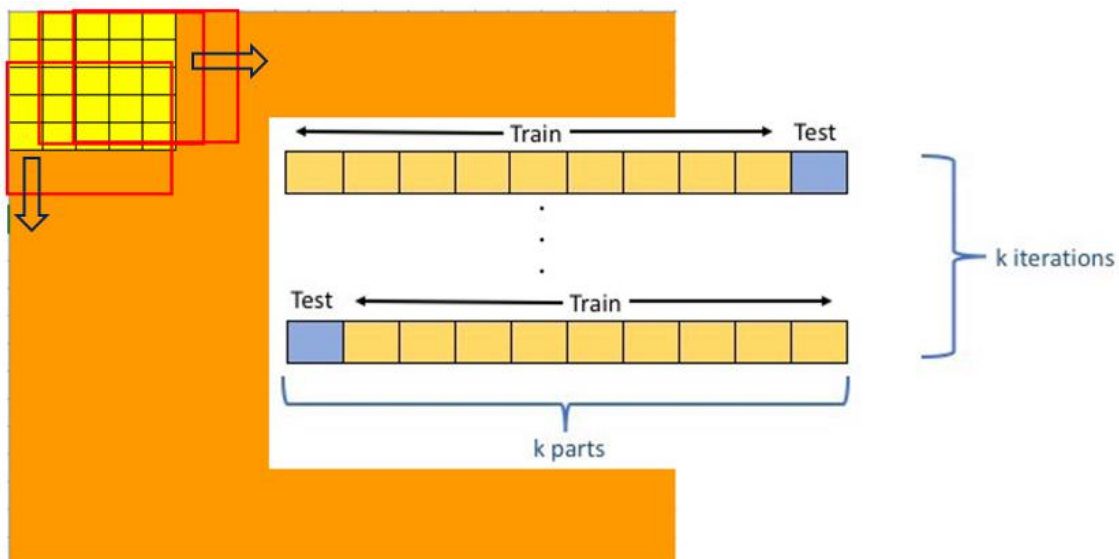
6.3 Η μέθοδος ENLoST (Elastic Net Local Simultaneously Tuning). Προτεινόμενη μεθοδολογία

Η μέθοδος ENLoST την οποία αναπτύξαμε, εφαρμόζεται μετά τον Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό, λαμβάνει υπόψη της και τα γειτονικά εικονοστοιχεία και υλοποιεί τοπικό συντονισμό (βελτιστοποίηση) με τη βοήθεια κινούμενου παράθυρου 5×5 , επί της υπερφασματικής απεικόνισης (Εικόνα 6-1), συνολικού εμβαδού 100 m^2 στο έδαφος. Η έκταση αυτή θεωρήθηκε ως μοναδιαία επιφάνεια, αντιπροσωπευτική για τη μελέτη της βιοποικιλότητας δασικών εκτάσεων που παρουσιάζουν δασικά είδη με μεγάλη στατιστική (και φυσική) επιρροή μεταξύ τους [Miquel De Caceres et al, 2018]. Με αυτόν τον τρόπο εκλογικεύεται το μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντικότητα των ειδών βλάστησης των γειτόνων και βελτιστοποιείται η παραμέτρος (λ) και η παραμέτρος (β) μεταξύ των ποινών L_1 και L_2 . Συνδυάζοντας μια ποινή L_1 και μια L_2 , έχουμε τα πλεονεκτήματα και των δύο: Η L_1 δημιουργεί ένα αραιό μοντέλο και η L_2 καταργεί οποιονδήποτε περιορισμό στον αριθμό των επιλεγμένων μεταβλητών, σταθεροποιεί τη διαδρομή κανονικοποίησης L_1 και ενθαρρύνει την ομαδοποίησή τους, η οποία σε κάποιες εφαρμογές μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη. Η παράμετρος (β) λαμβάνει τιμές στο κλειστό διάστημα $[0,1]$. Όταν η β είναι 0 έχουμε μια καθαρή Ridge παλινδρόμηση ενώ για τιμή 1 έχουμε μια καθαρή εφαρμογή της Lasso. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων (λ , β) γίνεται τροφοδοτώντας την εξίσωση (6.1) η οποία εφαρμόζεται στο κινούμενο παράθυρο, με ένα πολύ μεγάλο εύρος από ζεύγη τιμών των παραμέτρων αυτών (π.χ. 200.000 τιμές) εφαρμόζοντας την τεχνική επικύρωσης K-Fold Cross Validation²³ για την εύρεση του βέλτιστου ζεύγους τιμών [Efron B., 1983] ώστε να επιτευχθεί

²³ Ο στόχος της διασταυρούμενης επικύρωσης (CV) είναι η άμεση αξιολόγηση της απόδοσης ενός μοντέλου. Για το σκοπό αυτό, τα δεδομένα χωρίζονται (με επαναληπτική διαδικασία) σε ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης (train)

ελαχιστοποίηση²⁴ του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (απόκλιση) εκτίμησης (Mean Squared Error, MSE), όπως προέρχεται από την εξίσωση (6.1) (βλέπε Εικόνα 6-8). Οπότε την ώρα που το παράθυρο σαρώνει την εικόνα, εξελίσσονται τα εξής για την περιοχή 5x5 : α) τροφοδοτείται με ένα grid τιμών (λ, β) η ποινή Elastic Net, β) με Cross Validation υπολογίζεται το βέλτιστο ζεύγος τιμών (λ, β), οπότε και οι βέλτιστες εκτιμήσεις α_i των ποινικοποιημένων αφθονιών και γ) ταυτόχρονα ελέγχονται (τα α_i) στατιστικά για τη σημαντικότητά τους.

Το grid τιμών που τροφοδοτεί την (6.1) χωρίζεται σε $K=10$ (υπο)ομάδες (Folds) με τυχαίο τρόπο, που κάθε μία περιέχει τον ίδιο αριθμό παρατηρήσεων (κατά το δυνατόν). Σε κάθε επανάληψη οι εννέα ομάδες χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Elastic Net και των εκτιμήσεων (λ, β) και η δέκατη ομάδα χρησιμεύει για την αξιολόγησή τους. Αυτή η διαδικασία είναι επαναληπτική και υλοποιείται τουλάχιστον 10 φορές, οπότε προκύπτει βέλτιστη εκτίμηση των παραμέτρων (λ, β) για τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή που προκαλεί στο μοντέλο το ελάχιστο²⁵ μέσο τετραγωνικό σφάλμα, μέσω της διασταυρούμενης επικύρωσης (Cross Validation, CV)



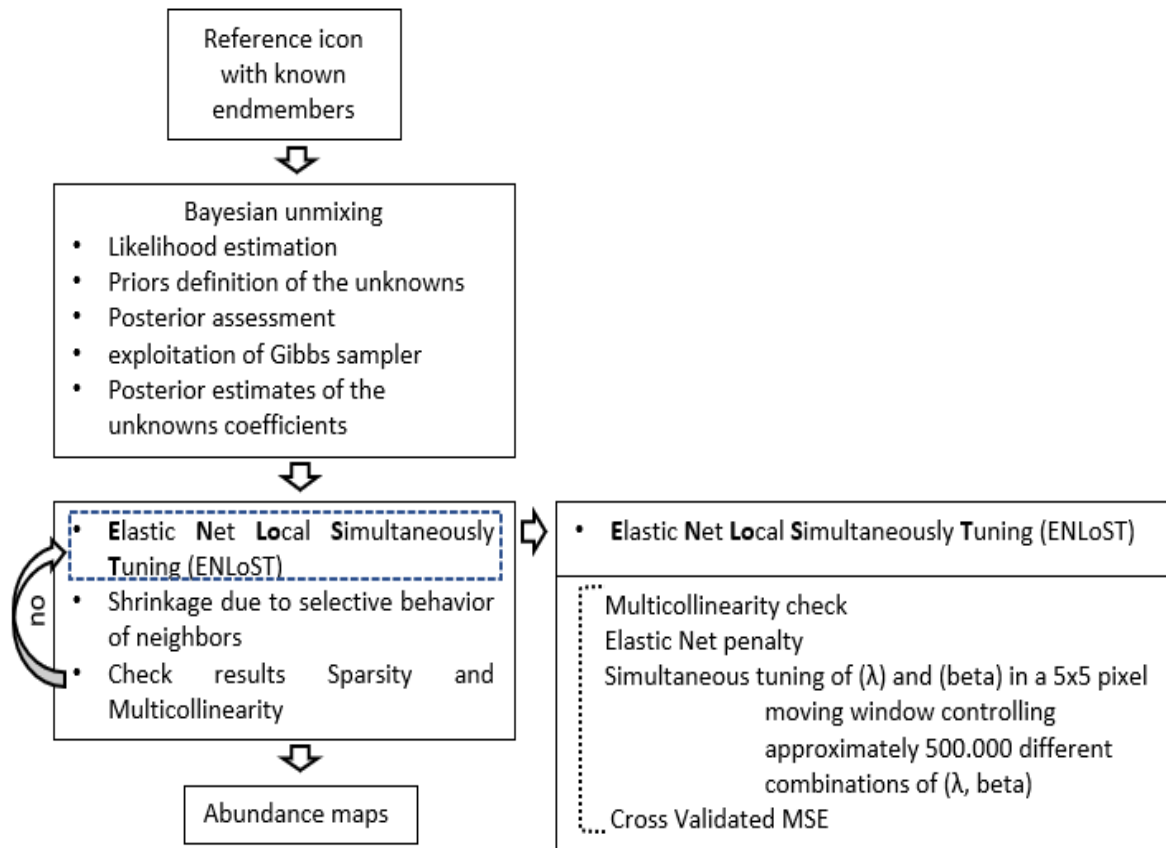
Εικόνα 6-1: Κινούμενο 5x5 παράθυρο (με κίτρινο χρώμα, κινούμενο από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω) επί της υπερφασματικής απεικόνισης (με πορτοκαλί χρώμα). Περιλαμβάνει $5 \times 5 \times 10 = 250$ μεταβλητές οι οποίες δέχονται την Elastic Net ποινή που τροφοδοτείται με μεγάλης εύρους ζεύγη τιμών (λ, β) τα οποία αξιολογούνται ως προς το MSE του μοντέλου, με την επαναληπτική τεχνική επικύρωσης '10-Fold Cross Validation' χωριζόμενα σε 9 ομάδες εκπαίδευσης (train folds) και μια ομάδα ελέγχου (test fold).

και επικύρωσης (test). Τα μοντέλα προσαρμόζονται στα δεδομένα εκπαίδευσης και τα δεδομένα επικύρωσης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της προγνωστικής απόδοσης. Στο πλαίσιο της ποινικοποιημένης μεθόδου Elastic Net, η διασταυρούμενη επικύρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των παραμέτρων συντονισμού (λ, β) που αποδίδουν την βέλτιστη απόδοση, π.χ., το καλύτερο (ελάχιστο) μέσο τετράγωνο σφάλμα του μοντέλου.

²⁴

²⁵ Το ελάχιστο σφάλμα MSE ή αυτό που είναι εντός ενός τυπικού σφάλματος από το ελάχιστο.

Η υλοποίηση της ENLoST μεθόδου σε σχέση με το φασματικό διαχωρισμό βάση της Μπεϋζιανής μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των συντελεστών αφθονίας, φαίνεται μεθοδολογικά στην Εικόνα 6-2:

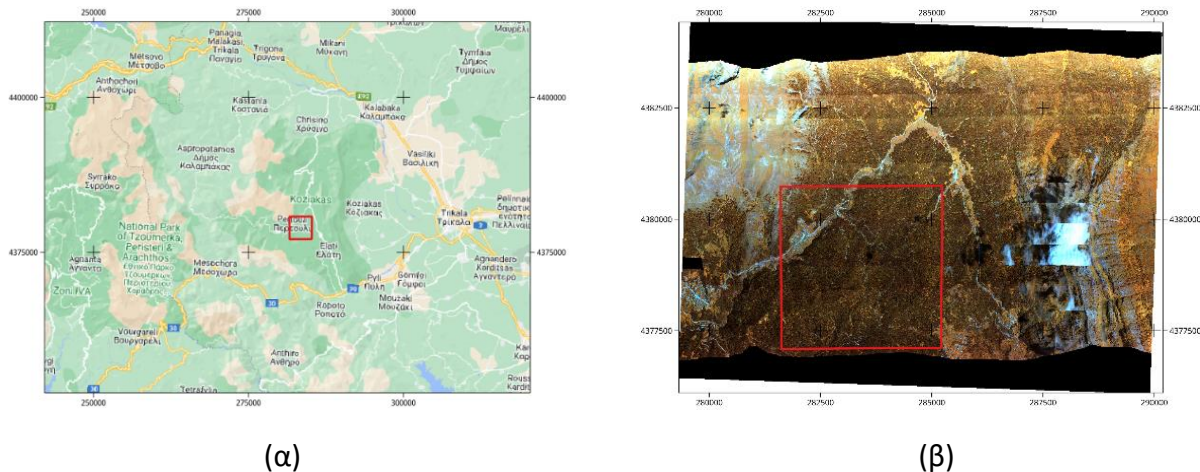


Εικόνα 6-2: Διάγραμμα Ροής της μεθοδολογίας

6.4 Εφαρμογή και αποτελέσματα.

6.4.1 Περιοχή Μελέτης και Δεδομένα

Το Πανεπιστημιακό Δάσος Περτουλίου Τρικάλων, βρίσκεται στην Κεντρική Πίνδο και εκτείνεται μεταξύ των ορεινών όγκων Κόζιακα και Μπουντούρα. Αντικείμενο της έρευνας αποτελεί ένα τμήμα του δάσους αυτού, περίπου 1263.52 ha (από τα 3296.59 ha του Πανεπιστημιακού δάσους, ποσοστό περίπου 38%) σε υψόμετρο που κυμαίνεται από 1100-1600 μ. περίπου. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης καλύπτεται από υβριδογενή ελάτη (αυτοφυές είδος), πεύκη (μαύρη και δασική, που έχουν εγκατασταθεί τεχνητά), σφενδάμι, δρυς, οξιά κ.α. είδη βλάστησης που απαντώνται σε συστάδες, μικρές κατά κύριο λόγο. Το κλίμα είναι ψυχρό, με βροχερό χειμώνα και ήπια θερμό καλοκαίρι. Το ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται σε περίπου 1.200 χιλιοστά και το ύψος χιονιού σε περίπου 330 χιλιοστά κατά μέσο όρο, ενώ η ξηρή και άνυδρη περίοδος διαρκεί μόλις έναν μήνα.



Εικόνα 6-3 : (α) Χάρτης της ευρύτερης περιοχής, στο κόκκινο τετράπλευρο διακρίνεται η περιοχή μελέτης, (β) Φωτομωσαϊκό των ληφθέντων λωρίδων υπερφασματικών εικόνων CASI-550, έγχρωμο σύνθετο 960nm, 714nm, 611nm (RGB), και το περίγραμμα (με κόκκινο) της περιοχής μελέτης.

Στις 20 Ιουλίου 2020, πραγματοποιήθηκε από αέρος λήψη με τον υπερφασματικό δέκτη CASI-550 του Εργ. Τηλεπισκόπησης του ΕΜΠ πάνω από την ευρύτερη περιοχή του πανεπιστημιακού δάσους του Περγουλίου. Η χωρική ανάλυση των απεικονίσεων ήταν περίπου 2 μέτρα, και πραγματοποιήθηκε καταγραφή σε 72 φασματικά κανάλια στο εύρος του ορατού ως και το εγγύς υπέρυθρο (460-960 nm) με παραπάνω από 40% πλαϊνή επικάλυψη μεταξύ γειτονικών γραμμών πτήσης. Κατά τη λήψη υπήρχε περιορισμένη νεφοκάλυψη κυρίως εκτός της περιοχής μελέτης. Στις υπερφασματικές εικόνες πραγματοποιήθηκε ορθοαναγωγή, έγινε ατμοσφαιρική διόρθωση με χρήση του μοντέλου ATCOR4 και δημιουργήθηκε ένα υπερφασματικό μωσαϊκό (Εικόνα 6-3b).

Στις 30 Ιουλίου 2020, πολύ κοντά στην ημέρα της λήψης των υπερφασματικών απεικονίσεων πραγματοποιήθηκαν επίγειοι έλεγχοι στην περιοχή, κατά τη διάρκεια των οποίων μετρήθηκαν με φασματοραδιόμετρο HR-1024i (βλέπε παράγραφο 3.2) δέκα καθαροί στόχοι για τα επικρατέστερα είδη δασικής βλάστησης της περιοχής: Ιτέα η λευκή (*Salix Alba*), Υβριδογενή Ελάτη (*Abies Borisi Regis*), Ψευδοπλάτανος ή πλάτανος σφενδάμι (*Acer pseudoplatanus*), Σφενδάμι (*acer Obtusatum*), Μαύρη Πεύκη (*Pinus Nigra*), Τσέρο ή Αυστριακή Βελανιδιά (*Quercus Cerris*), δασικό Πεύκο (*Pinus Silvestris*), Οξιά η Βαλκανική (*Fargus Moesiaca*), Άλνος ο κολλώδης ή Σκλήθρο (*Alnus Glutinosa*) και Λαβούρνο (*Laburnum Anargiroides*). Το συγκεκριμένο φασματοραδιόμετρο καταγράφει 1024 φασματικά κανάλια από το ορατό έως και το μέσο υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (350-2500 nm).

Οι καθαροί στόχοι επισημάνθηκαν στην ατμοσφαιρικά διορθωμένη υπερφασματική απεικόνιση (η οποία έχει ανάλυση 2m x 2m), εντοπίστηκε ακριβώς το εικονοστοιχείο για κάθε στόχο, ελέγχθηκε οπτικά κάθε υπογραφή από την υπερφασματική απεικόνιση, ως προς την απόκλισή της από τη φασματική υπογραφή του ραδιομέτρου (υπογραφή αναφοράς) και χρησιμοποιήθηκαν στο φασματικό διαχωρισμό.

6.4.2 Αποτελέσματα

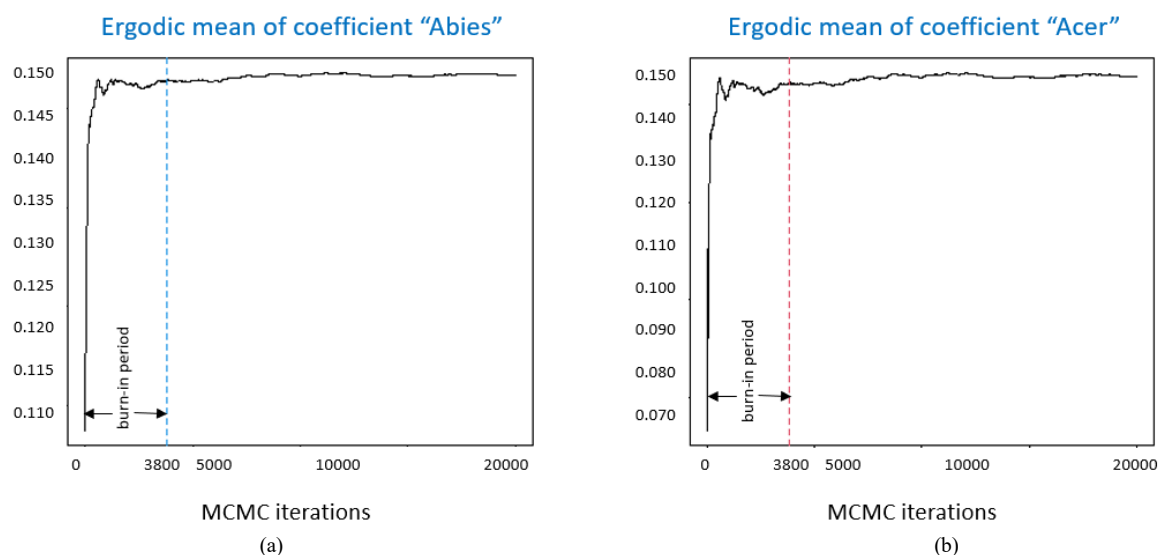
6.4.2.1 Εφαρμογή Μπεϋζιανής συμπερασματολογίας

Στην έρευνα αυτή, χρησιμοποιήθηκε το R Studio και γράφτηκε κώδικας με κατάλληλες βιβλιοθήκες της R [Friedman J. et al, 2010; DeWitt P. and Bennett T., 2022]. Το Μπεϋζιανό μοντέλο δομήθηκε σύμφωνα με τη δημοσίευση [Dobigeon N., 2008] η οποία περιγράφεται και στην [Chlorokostas S., Karathanassi V., 2020]. Έχουν γίνει κάποιες αλλαγές στις πρότερες κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν στις δημοσιεύσεις που προαναφέρονται, ενώ για την υλοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε μαζί με την R και η γλώσσα JAGS.

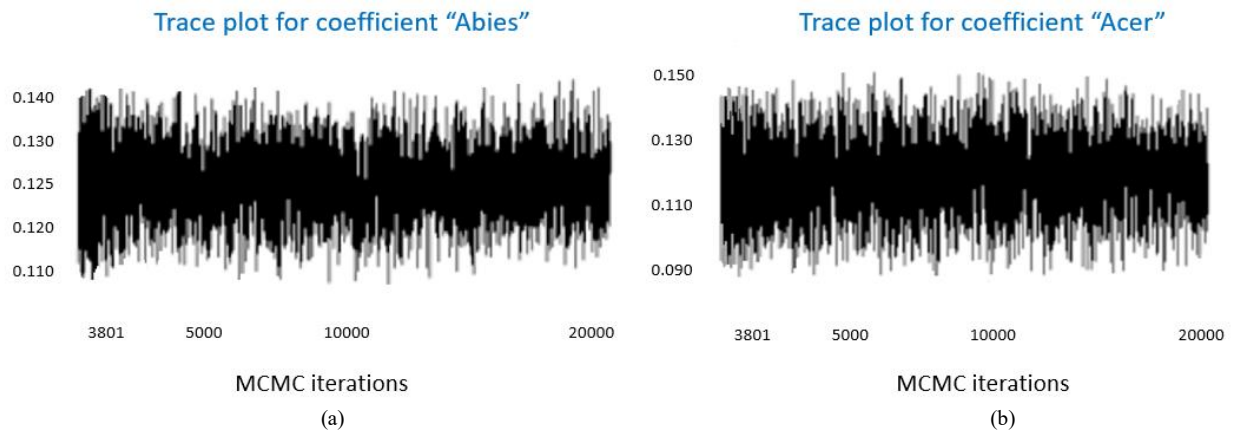
Για να ελέγξουμε μέσω διαγνωστικών δοκιμών τη σύγκλιση του δειγματολήπτη Gibbs (βλέπε παράγραφο 6.2.2.3) χρησιμοποιήσαμε δύο MCMC αλυσίδες παράλληλα για κάθε άγνωστη μεταβλητή του μοντέλου, για να συγκρίνουμε την απόδοσή τους. Τα χαρακτηριστικά σύγκλισης για κάθε μια αλυσίδα ήταν παρόμοια και ελέγχθηκαν με τον εργοδοτικό μέσο όρο της κάθε αλυσίδας, όπου n είναι ο αριθμός των επαναλήψεων:

$$ergodic\ mean = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{p=0}^{n-1} \alpha_p \quad (6.20)$$

που φαίνεται να συγκλίνει ικανοποιητικά μετά τις πρώτες 3800 επαναλήψεις για κάθε αλυσίδα.

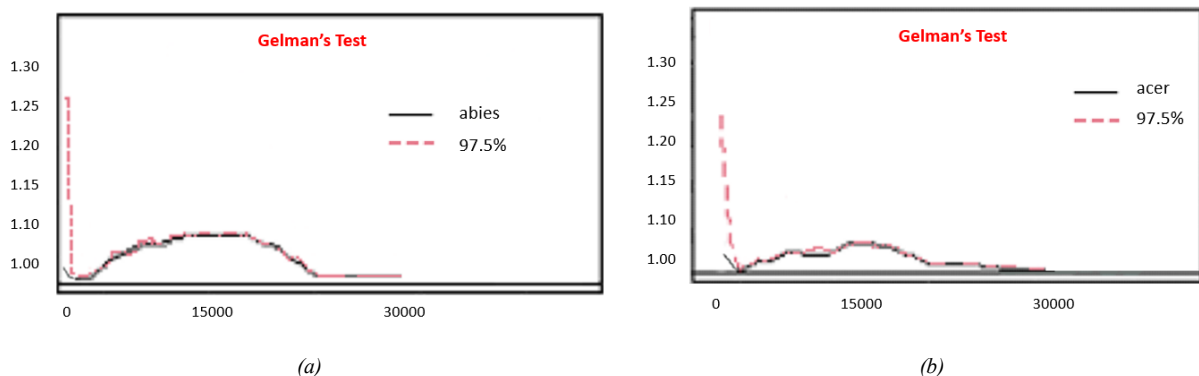


Εικόνα 6-4 : Εργοδικός μέσος για τη μεταβλητή (a) “Abies” (ελάτη) και (b) “Acer” (Σφενδάμι), έπειτα από 20000 επαναλήψεις μιας εκ των δύο αλυσίδων MCMC, προσδιορίζοντας την burn-in περίοδο περίπου στις πρώτες 3800 επαναλήψεις



Εικόνα 6-5 : Trace plots μετά από 20000 επαναλήψεις της μιας εκ των δύο αλυσίδων MCMC, έχοντας αφαιρέσει την Burn-in περίοδο για τη μεταβλητή (a) "Abies" (ελάτη) και (b) "Acer" (Σφενδάμι).

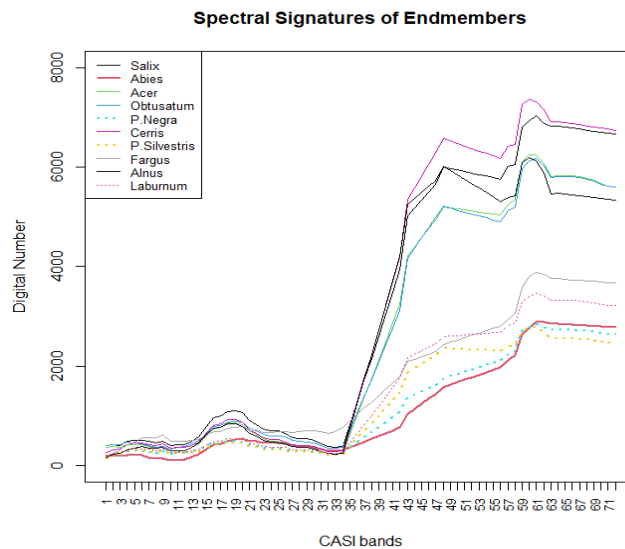
Η διαγνωστική δοκιμή Gelman και Rubin²⁶ επιβεβαιώνει τη σύγκλιση MCMC (Εικόνα 6-6). Αυτή η σύγκριση γίνεται για να εκτιμηθεί ο παράγοντας με τον οποίο η παράμετρος μεταβλητότητας της ύστερης κατανομής για κάθε άγνωστη παράμετρο μπορεί να μειωθεί (συντελεστής συρρίκνωσης) εάν η αλυσίδα λειτουργούσε απεριόριστα. Ως αποτέλεσμα παρατηρούμε το γράφημα που αντιστοιχεί στις 97.5% ποσοστιαίες μονάδες της κατανομής των παραγόντων συρρίκνωσης. Τιμές μικρότερες από 1.10 και κοντά στο 1 δείχνουν ελάχιστη ένδειξη διαφοροποίησης μεταξύ των κατανομών στις οποίες συγκλίνουν οι αλυσίδες.



Εικόνα 6-6: Διαγνωστική δοκιμή Gelman και Rubin για τις δυο MCMC αλυσίδες, αναφορικά με τις μεταβλητές: (a) "Abies, ελάτη", (b) "acer, σφενδάμι"

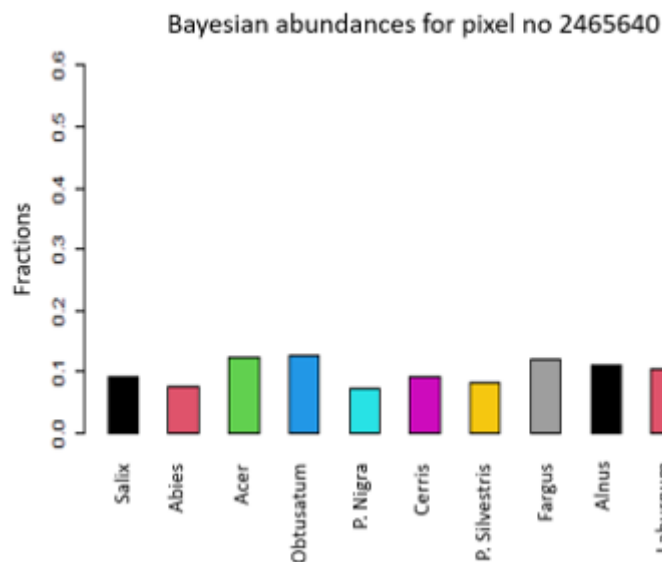
²⁶ Οι Gelman and Rubin (1992), πρότειναν έναν έλεγχο που ερευνά για πολυ-κόρυφη εκ των υστέρων κατανομή. Αν η εκ των υστέρων κατανομή έχει δυο κορυφές, την μία μακριά από την άλλη και αρχικοποιήσεις (ξεκινήσεις) την αλυσίδα MCMC από τιμές κοντά στην μία μόνο κορυφή, μπορεί να μην επισκεφτεί ποτέ την άλλη. Η ιδέα λοιπόν είναι να τρέξεις την αλυσίδα δύο ή περισσότερες φορές από διαφορετικές αρχικές τιμές και να ελέγξεις αν οι αλυσίδες συγκλίνουν στο ίδιο σημείο. Η μέθοδος των Gelman and Rubin βασίζεται στην σύγκριση των ανάμεσα των αλυσίδων (within) και μεταξύ των αλυσίδων (between) διασπορών (ANOVA) για κάθε άγνωστη μεταβλητή. Η σύγκριση αυτή γίνεται για να εκτιμήσουμε τον παράγοντα συρρίκνωσης, κατά τον οποίο η παράμετρος μεταβλητότητας της περιθώριας εκ των υστέρων κατανομής για την κάθε μεταβλητή, μπορεί να μειωθεί (να συρρικνωθεί) εάν η αλυσίδα έτρεχε για άπειρο χρόνο. Ως αποτέλεσμα, παίρνουμε τα 50% και 97.5% ποσοστιαία σημεία της κατανομής των παραγόντων συρρίκνωσης. Τιμές κοντά στη μονάδα (και πάντως μικρότερες από 1.10) δηλώνουν μικρή ένδειξη διαφοροποίησης μεταξύ των κατανομών στις οποίες οι αλυσίδες συγκλίνουν.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο (6.4.1) χρησιμοποιήθηκαν δέκα καθαροί στόχοι ειδών βλάστησης, οι φασματικές υπογραφές των οποίων ήταν αρκετά όμοιες (Εικόνα 6-7), λόγω μεγάλης συγγένειας κάποιων ειδών βλάστησης (Ψευδοπλάτανος και Σφενδάμι ή Δασικό και Μαύρο Πεύκο κλπ).



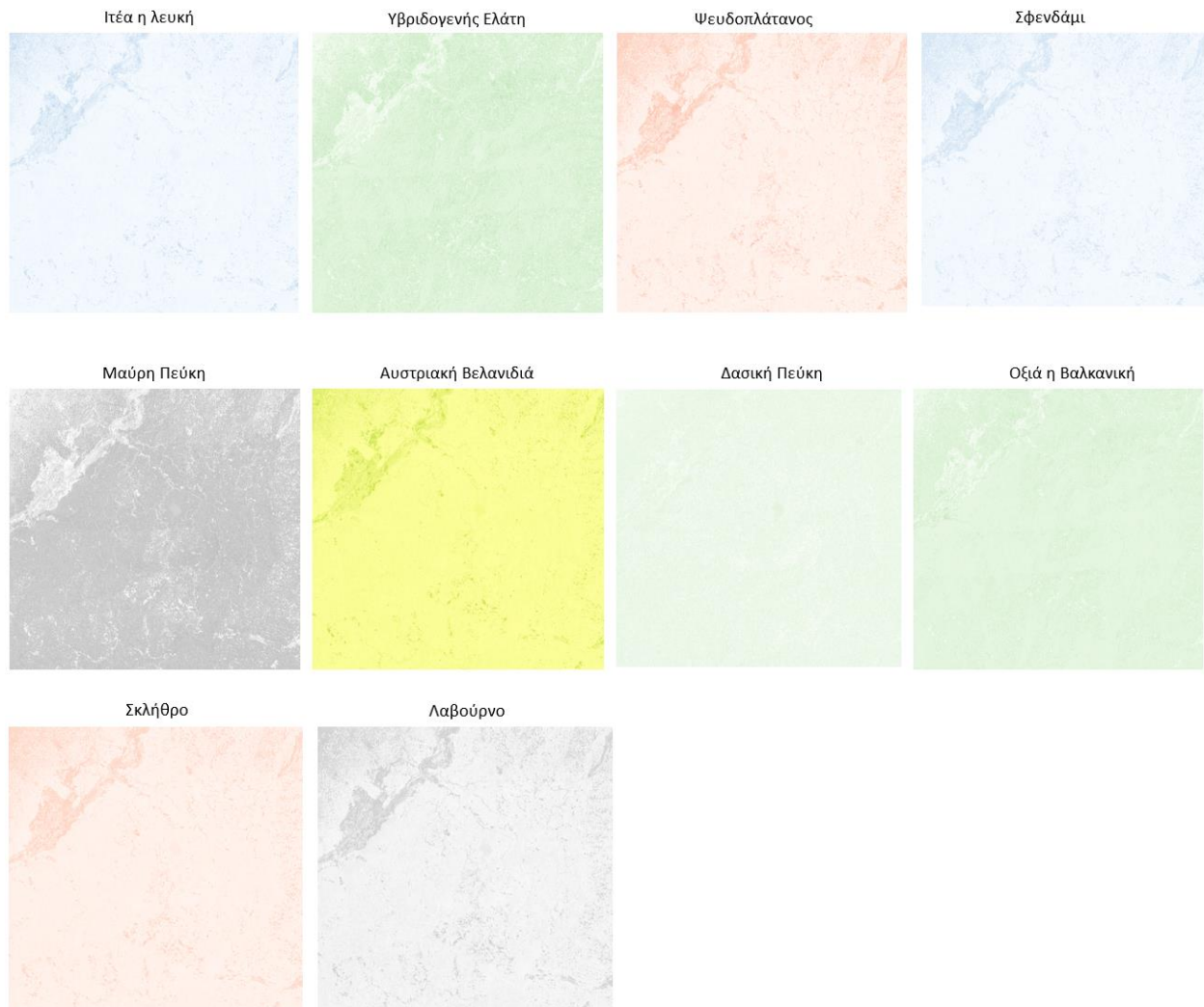
Εικόνα 6-7: Φασματικές υπογραφές των δέκα καθαρών στόχων στην περιοχή μελέτης.

Μετά την εφαρμογή της Μπεϋζιανής μεθοδολογίας στο φασματικό διαχωρισμό, μια τυπική εικόνα των αφθονιών, ενός τυχαίου εικονοστοιχείου (π.χ. του #2465640) της υπερφασματικής απεικόνισης το οποίο εμφανίζεται ως γραμμικός συνδυασμός των δέκα καθαρών στόχων, φαίνεται στην Εικόνα 6-8.



Εικόνα 6-8: Ποσοστά αφθονίας από το Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό για το εικονοστοιχείο (#2465640) της υπερφασματικής απεικόνισης.

Παρήχθησαν οι παρακάτω χάρτες αφθονίας :



Εικόνα 6-9: Χάρτες αφθονίας για την περιοχή μελέτης, μετά από το Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό.

Οι χάρτες αφθονίας που προέκυψαν δεν δείχνουν ξεκάθαρα τη βιοποικιλότητα στην περιοχή μελέτης. Πολλά δασικά είδη εμπλέκονται σε περίπου ισοδύναμες μικρές συσσωρεύσεις που δεν ξεχωρίζουν ευκρινώς (Εικόνα 6-9), όπως η υβριδογενής ελάτη, η μαύρη και η δασική πεύκη, το αιθαλές σφενδάμι, η ιτιά, η βελανιδιά και οξιά.

Εξετάζοντας τον πίνακα συσχέτισης μεταξύ των αφθονιών των ειδών βλάστησης, παρατηρήθηκε μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους (Πίνακας 6-2), οπότε έγινε έλεγχος πολυσυγγραμμικότητας.

Πίνακας 6-2 : Πίνακας συσχέτισης μεταξύ των αφθονιών ειδών βλάστησης, μετά το Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό.

	Salix	Abies	Acer	Obtusatum	P.Negra	Cerris	P.Silvestris	Fargus	Alnus	Laburnum
Salix	1.00	-0.77	0.90	0.89	-0.82	0.99	-0.86	-0.52	0.94	-0.70
Abies	-0.77	1.00	-0.84	-0.84	0.97	-0.73	0.75	0.03	-0.83	0.20
Acer	0.90	-0.84	1.00	0.91	-0.88	0.86	-0.88	-0.42	0.97	-0.63
Obtusatum	0.89	-0.84	0.91	1.00	-0.88	0.85	-0.88	-0.40	0.96	-0.62
P.Negra	-0.82	0.97	-0.88	-0.88	1.00	-0.80	0.85	0.05	-0.88	0.27

Cerris	0.99	-0.73	0.86	0.85	-0.80	1.00	-0.84	-0.51	0.92	-0.70
P.Silvestris	-0.86	0.75	-0.88	-0.88	0.85	-0.84	1.00	0.19	-0.89	0.47
Fargus	-0.52	0.03	-0.42	-0.40	0.05	-0.51	0.19	1.00	-0.44	0.84
Alnus	0.94	-0.83	0.97	0.96	-0.88	0.92	-0.89	-0.44	1.00	-0.65
Laburnum	-0.70	0.20	-0.63	-0.62	0.27	-0.70	0.47	0.84	-0.65	1.00

Ο έλεγχος της πολυσυγγραμμικότητας έγινε με το δείκτη διόγκωσης της διακύμανσης (Variance Inflation Factor, VIF). Ο VIF δείχνει την ταχύτητα αύξησης της διακύμανσης ενός εκτιμητή, όταν υπάρχει το πρόβλημα της πολυσυγγραμμικότητας και ορίζεται ως εξής:

$$VIF(a_j) = \frac{Var(a_j)}{Var(a_j)^*} = \frac{1}{1-R_j^2} \quad (6.21)$$

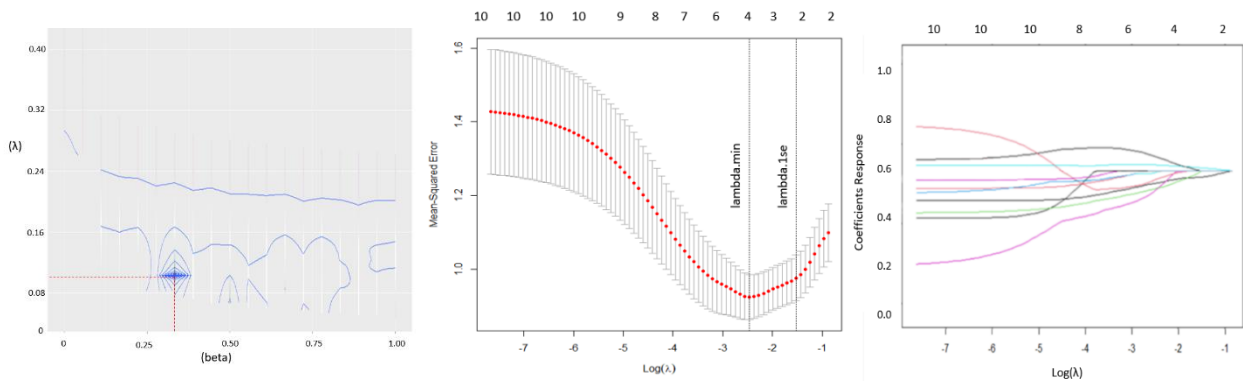
όπου $Var(a_j)$ είναι η διακύμανση του εκτιμητή (a_j), $Var(a_j)^*$ είναι η δυνητική (ιδανική) διακύμανση του εκτιμητή (a_j) εάν ίσχυε $R_j^2 = 0$ και R_j^2 είναι ο συντελεστής προσδιορισμού που προέρχεται από την παλινδρόμηση των μεταβλητών του μοντέλου, με εξαρτημένη την ερμηνευτική μεταβλητή (a_j) πάνω στις υπόλοιπες ερμηνευτικές μεταβλητές [Papan A., 2018]. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του VIF τόσο μεγαλύτερο είναι το πρόβλημα της πολυσυγγραμμικότητας. Στο σύνολο των αφθονιών ειδών βλάστησης, μετά το Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό, το VIF υπολογίστηκε στην R ίσο με 17.216 οπότε το πρόβλημα της πολυσυγγραμμικότητας είναι ενεργό στις αφθονίες που υπολογίστηκαν.

6.4.2.2 Ποινικοποίηση μεταβλητών

Από την εξίσωση (6.1) μπορούμε να εκτιμήσουμε το βέλτιστο ζεύγος τιμών για τις παραμέτρους (λ , $beta$) δοκιμάζοντας τιμές, μέσα από ένα πολύ μεγάλο εύρος ζευγών από τιμές (λ , $beta$), λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα διασταυρούμενης επικύρωσης (CV) (Εικόνα 6-10a).

Για εποπτικούς λόγους δίνονται ακόμη:

- i) το διάγραμμα διασταυρούμενης επικύρωσης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) που αντιστοιχεί στην παράμετρο εξομάλυνσης $\log(\lambda)$. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή είναι η καμπύλη CV και οι γραμμές σφάλματος κατά μήκος της ακολουθίας είναι οι άνω και κάτω καμπύλες τυπικής απόκλισης (για 95% διάστημα εμπιστοσύνης). Ο άξονας y αντιπροσωπεύει το MSE του μοντέλου για μεταβολές του $\log(\lambda)$ ενώ ο επάνω άξονας x αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μεταβλητών όπως αυτές συρρικνώνονται. Οι δύο κάθετες διακεκομμένες γραμμές είναι δύο επιλογές, που και οι δύο θεωρούνται βέλτιστες, η πρώτη αντιστοιχεί στο ελάχιστο διασταυρούμενο σφάλμα που παράγει το μοντέλο και η δεύτερη δίνει το πιο φειδωλό μοντέλο όπου το σφάλμα είναι εντός ενός τυπικού σφάλματος από το ελάχιστο σφάλμα (Εικόνα 6-10b) και
- ii) η διαδρομή του λ έναντι της ποινής Elastic Net (Εικόνα 6-10c).



(a)

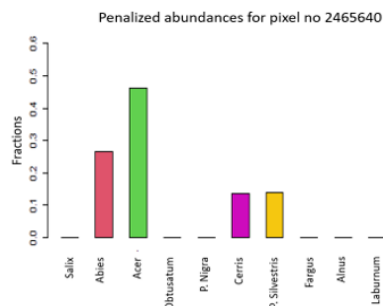
(b)

(c)

Εικόνα 6-10: (a) Γράφημα για να φανεί το αποτέλεσμα της βέλτιστης εκτίμησης του ζεύγους τιμών (λ, β) για το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE). Οι τιμές που κινούνται πιο μακριά από το ελάχιστο MSE είναι με ανοιχτό πράσινο, μετά λευκό και μετά μοβ. Ο κόκκινος σταυρός προσδιορίζει το ελάχιστο σφάλμα διασταυρούμενης επικύρωσης του ζεύγους τιμών (λ, β). (b) Το διάγραμμα διασταυρούμενης επικύρωσης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) που αντιστοιχεί στην παράμετρο εξομάλυνσης $\log(\lambda)$ -ο επάνω άξονας x αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μεταβλητών όπως αυτές συρρικνώνονται. (c) Η διαδρομή του λ έναντι της ποινής Elastic Net.

Σχεδιάζοντας την καμπύλη διασταυρούμενης επικύρωσης (Εικόνα 6-10b) μαζί με τις καμπύλες μεγίστων και ελαχίστων τιμών τυπικής απόκλισης, κατά μήκος της ακολουθίας λ , δύο ειδικές τιμές υποδεικνύονται από τις κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές. Το λ_{\min} είναι η τιμή του λ που δίνει το ελάχιστο μέσο διασταυρούμενο επικυρωμένο σφάλμα, ενώ το λ_{1se} , είναι η τιμή του λ έτσι ώστε το διασταυρούμενο επικυρωμένο σφάλμα να είναι εντός ενός τυπικού σφάλματος, από το ελάχιστο μέσο διασταυρούμενο επικυρωμένο σφάλμα. Συνήθως επιλέγουμε αυτήν την τιμή του λ (και βλέπουμε σε ποια τιμή του β αντιστοιχεί), που δίνει πιο φειδωλό μοντέλο, όπως φαίνεται στον επάνω άξονα x, που δείχνει τη συρρίκνωση των συντελεστών αφθονίας που τελικά μετέχουν ως στατιστικά σημαντικοί. Κάθε καμπύλη (Εικόνα 6-10c) αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή αφθονίας. Διακρίνεται η διαδρομή συρρίκνωσης κάθε συντελεστή, έναντι της ποινής Elastic Net καθώς μεταβάλλεται το λ .

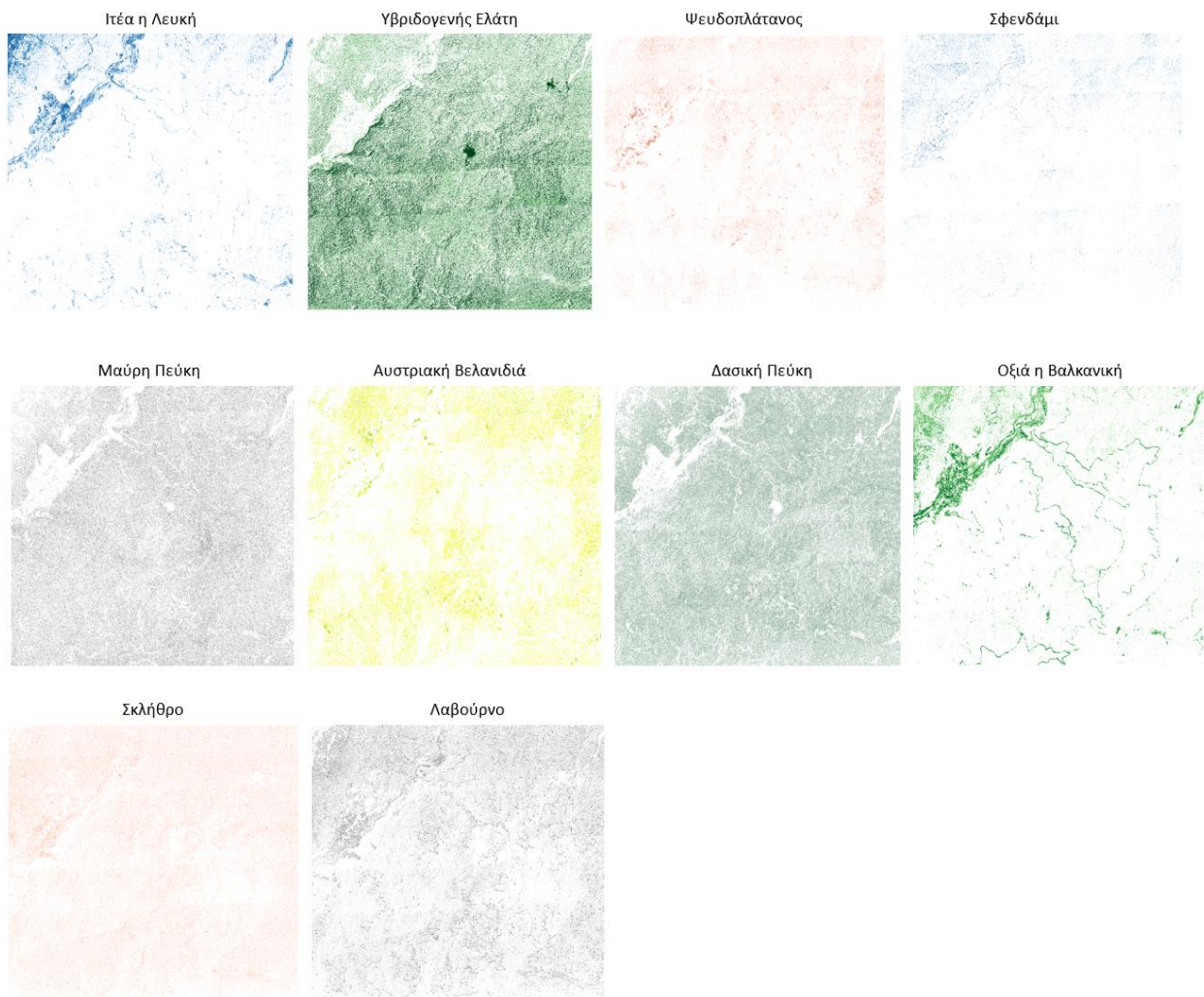
Μετά την εφαρμογή της μεθόδου ENLoST επικρατούν μόνον οι στατιστικά σημαντικοί καθαροί στόχοι, σε γειτονιά 5x5 της υπερφασματικής απεικόνισης. Μια τυπική εικόνα των αφθονιών ενός τυχαίου εικονοστοιχείου (π.χ. του #2465640) το οποίο εμφανίζεται ως γραμμικός συνδυασμός των στατιστικά σημαντικών καθαρών στόχων, φαίνεται στην Εικόνα 6-11.



Εικόνα 6-11: Ποσοστά αφθονίας μετά τη συρρίκνωση με τη μέθοδο ENLoST για το εικονοστοιχείο (#2465640) της υπερφασματικής απεικόνισης, όπου επικρατούν μόνον οι στατιστικά σημαντικοί καθαροί στόχοι.

Ο δείκτης VIF υπολογίστηκε (από την 6.21) για το σύνολο των αφθονιών ειδών βλάστησης, μετά την ποινικοποίηση, ίσος με 3.627, γεγονός που αποτελεί ισχυρή ένδειξη μη ύπαρξης φαινομένου πολυσυγγραμμικότητας.

Η εφαρμογή της μεθόδου ENLoST, ποινικοποίησε τοπικά τις αφθονίες που προέκυψαν από τον Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό και παρήχθησαν οι παρακάτω χάρτες αφθονίας :



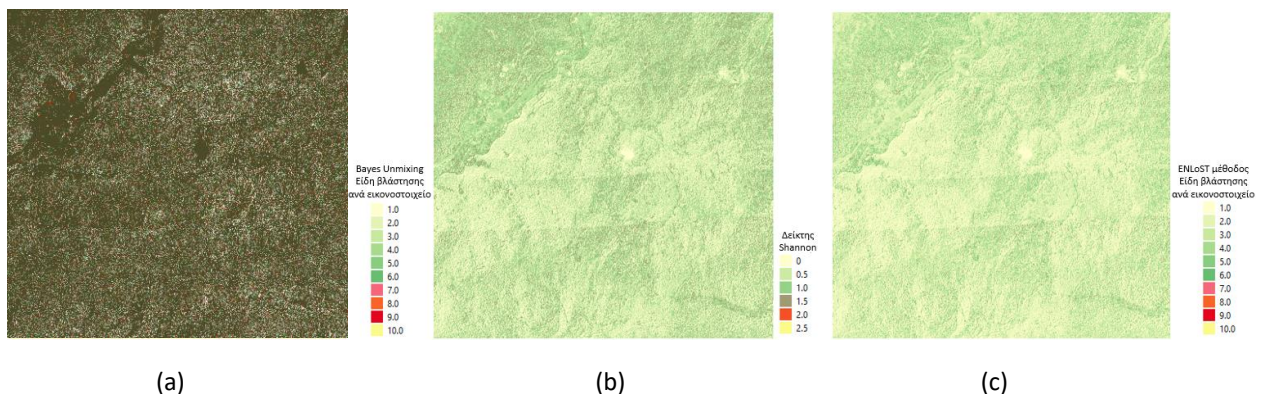
Εικόνα 6-12: Χάρτες αφθονίας για την περιοχή μελέτης μετά την εφαρμογή της μεθόδου ENLoST.

Τα είδη βλάστησης, μετά την ποινικοποίηση των αφθονιών, ξεχωρίζουν στους χάρτες αφθονίας αναδεικνύοντας τη σχετικά μικρή βιοποικιλότητα της περιοχής. Η υβριδογενής ελάτη κυριαρχεί στην περιοχή ενώ η μαύρη και η δασική πεύκη έχουν μεγάλη παρουσία. Εάν θέλαμε να χαρακτηρίσουμε τη δασική έκταση της περιοχής μελέτης, θα την εντάσσαμε στα ορεινά δάση κωνοφόρων με κυρίαρχο είδος την ελάτη, που συναντώνται πάνω από τα 1.000 μ. υψόμετρο και έχουν πλούσια αποθέματα ξυλείας. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μικρή βιοποικιλότητα και ως εκ τούτου καθίσταται πιο δύσκολη η ορθή εκτίμησή της.

6.4.3 Αξιολόγηση

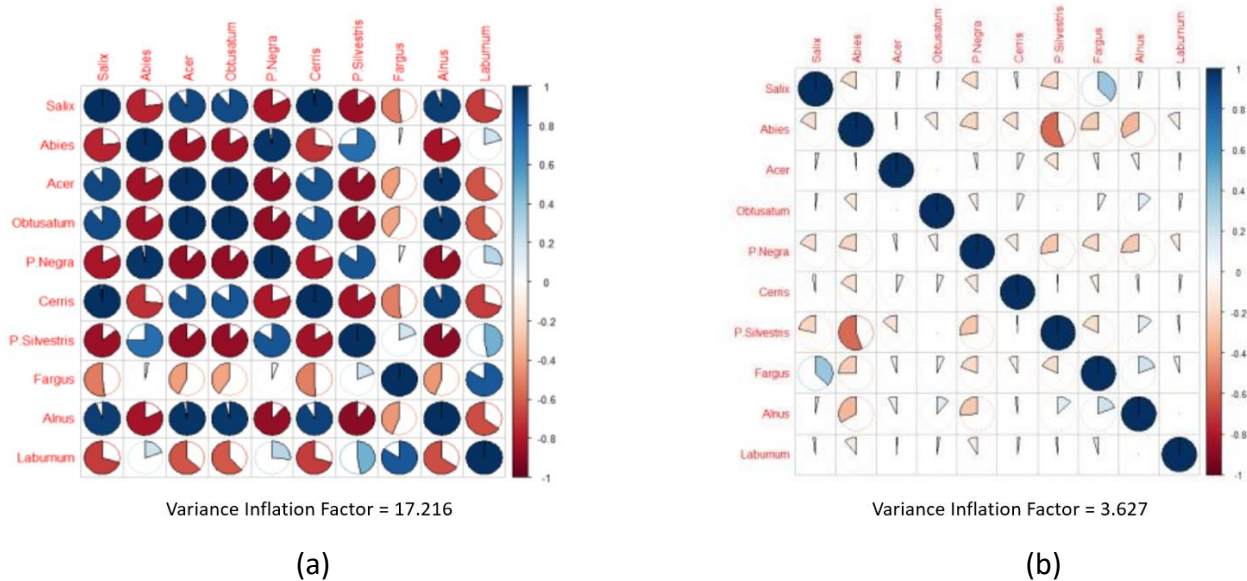
Οι τιμές του δείκτη Shannon θεωρητικά κυμαίνονται μεταξύ μικρών θετικών αριθμών, τις περισσότερες φορές μεταξύ 1, 2, 3 και 4. Στο δάσος Περτουλίου, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0 και 2.5. Ο δείκτης λαμβάνει υπόψη την ποσότητα των ειδών που υπάρχουν στο δείγμα και τη σχετική ποσότητα μεμονωμένων ατόμων που υπάρχουν για κάθε είδος. Δηλαδή, λαμβάνει υπόψη τον πλούτο και την αφθονία του είδους. Δεδομένου ότι ο τύπος που αφορά τον υπολογισμό του, περιλαμβάνει λογάριθμο, δεν υπάρχει μέγιστη τιμή για τον δείκτη. Ωστόσο, η ελάχιστη τιμή είναι μηδέν, υποδεικνύοντας την απουσία διαφοροποίησης - την κατάσταση όπου υπάρχει μόνο ένα είδος. Οι τιμές μικρότερες από 2 ερμηνεύονται ως οικοσυστήματα με μικρή ποικιλία ειδών, ενώ τιμές μεγαλύτερες από 3 αντιπροσωπεύουν οικοσυστήματα με μεγάλη ποικιλία ειδών.

Σύμφωνα με το δείκτη ποικιλομορφίας Shannon (Εικόνα 6-13b), στην περιοχή μελέτης, η υπάρχουσα κατάσταση δείχνει οικοσύστημα με μικρή ποικιλομορφία. Παρόμοια αποτελέσματα δείχνει και ο χάρτης πλήθους ειδών βλάστησης (καθαρών στόχων) ανά εικονοστοιχείο, όπως προκύπτει από τη μέθοδο ENLoST (Εικόνα 6-13c), όπου υπάρχει κυρίαρχο είδος η υβριδογενής ελάτη [Kokkalis Th. et al, 2015]. Αντίθετα, ο χάρτης πλήθους ειδών βλάστησης ανά εικονοστοιχείο, όπως προκύπτει από την Μπεϋζιανή μεθοδολογία είναι περισσότερο συγκεχυμένος, δείχνοντας μια αναλογία πολλών ειδών ανά εικονοστοιχείο της υπερφασματικής απεικόνισης.



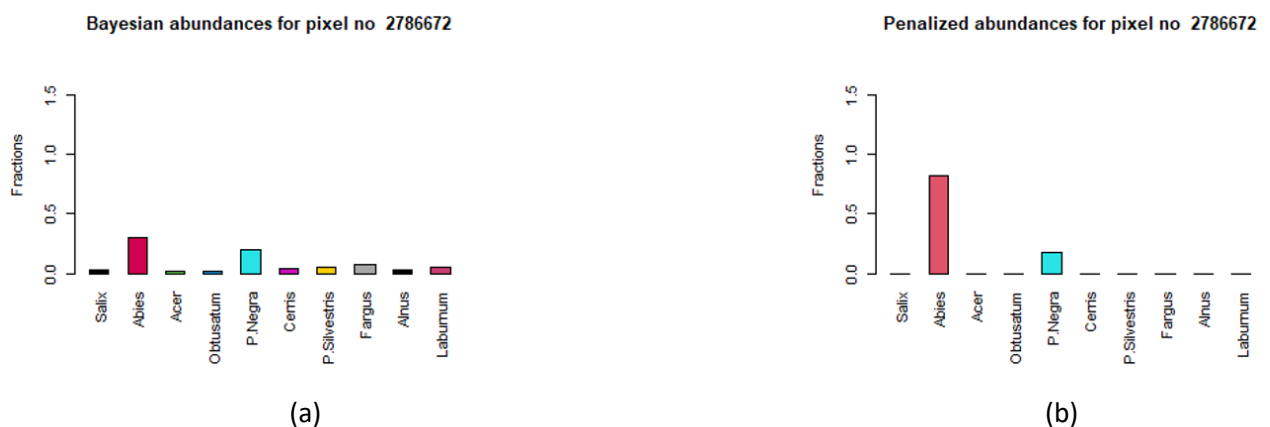
Εικόνα 6-13: (a) Χάρτης πλήθους ειδών βλάστησης ανά εικονοστοιχείο, όπως προκύπτει από τη Μπεϋζιανή μεθοδολογία, (b) Χάρτης του δείκτη Shannon για την περιοχή μελέτης (c) Χάρτης πλήθους ειδών βλάστησης ανά εικονοστοιχείο, όπως προκύπτει από τη μέθοδο ENLoST.

Η συρρίκνωση των συντελεστών αφθονίας διόρθωσε το πρόβλημα της πολυσυγγραμμικότητας που παρουσιάστηκε μετά την εφαρμογή της Μπεϋζιανής συμπερασματολογίας για τα είδη βλάστησης στην περιοχή μελέτης, όπου είχαν αναδειχτεί υψηλές συσχετίσεις μεταξύ των ειδών αφθονίας ανά εικονοστοιχείο. Στην Εικόνα 6-14a βλέπουμε τις υψηλές συσχετίσεις που παρουσιάζονται αμέσως μετά τον Μπεϋζιανό φασματικό διαχωρισμό και αποτελούν τη βασική αιτία για να μην μπορεί να αξιολογηθεί ουσιαστικά η συνεισφορά κάθε συντελεστή αφθονίας στη σύνθεση του εικονοστοιχείου.



Εικόνα 6-14: Συσχέτιση μεταξύ των αφθονιών των ειδών βλάστησης (a) πριν και (b) μετά τη συρρίκνωσή τους με τη μέθοδο ENLoST, όπου εξαλείφεται το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας, όπως δείχνει και ο δείκτης VIF.

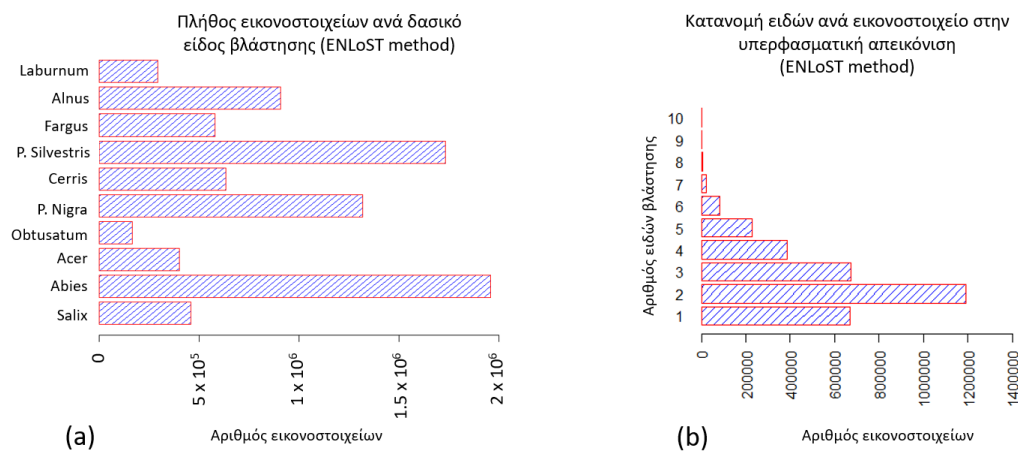
Μετά τη συρρίκνωση των συντελεστών, παρουσιάζεται μια μεγάλη βελτίωση στις συσχετίσεις των ειδών αφθονίας (Εικόνα 6-14b), γεγονός που καθιστά χρήσιμη τη διαδικασία της ποινικοποίησης τοπικά με τη μέθοδο ENLoST, με τη βοήθεια του κινούμενου παράθυρου 5x5 ώστε να λαμβάνονται υπόψη για τη στατιστική σημαντικότητα των αφθονιών για κάθε εικονοστοιχείο, τα γειτονικά είδη βλάστησης. Παράδειγμα της συρρίκνωσης των συντελεστών αφθονίας για τυχαίο εικονοστοιχείο, παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-15:



Εικόνα 6-15: Αφθονίες των ειδών βλάστησης (a) πριν και (b) μετά τη συρρίκνωση με τη μέθοδο ENLoST για τυχαίο εικονοστοιχείο, όπου επικρατούν μόνον οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές συμμετοχής (αφθονίες).

Τα είδη που κυριαρχούν στην περιοχή είναι η υβριδογενής ελάτη (Abies), το δασικό πεύκο (Pinus Silvestris) και η μαύρη πεύκη (Pinus Nigra), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-16a και επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία [Kokkalis Th. et al, 2015] τη σχετική με τα επικρατούντα είδη στην περιοχή.

Η βιοποικιλότητα της περιοχής αναδεικνύεται στην Εικόνα 6-16b και επιβεβαιώνεται ποιοτικά από τον δείκτη ποικιλομορφίας Shannon (Εικόνα 6-13b).



Εικόνα 6-16: Μετά την εφαρμογή της μεθόδου ENLoST στην περιοχή μελέτης: (a) Πλήθος εικονοστοιχείων ανά είδος βλάστησης, (b) κατανομή ειδών βλάστησης ανά εικονοστοιχείο.

6.4.4 Συμπεράσματα

Η Μπεϋζιανή συμπερασματολογία κατά το φασματικό διαχωρισμό, έδωσε αποτελέσματα που υποφέρουν από πολυσυγγραμμικότητα. Η επιβολή της Elastic Net ποινής μέσω της μεθόδου ENLoST, εκλογίκευσε τους συντελεστές (τα ποσοστά) αφθονίας, συρρικνώνοντάς τους και εξαλείφοντας το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας, που οδηγούσε σε ασταθείς συντελεστές και μη συνεπείς στατιστικές αξιολογήσεις. Ταυτόχρονα μειώθηκε το μέγεθος των τυπικών σφαλμάτων των εκτιμήσεων για τους συντελεστές αφθονίας και αυξήθηκε η πιθανότητα οι εκτιμήσεις αυτές να είναι στατιστικά σημαντικές. Η βέλτιστος συντονισμός των παραμέτρων ποινής (λ , $beta$) σε συνδυασμό με τον έλεγχο σημαντικότητας των αφθονιών στα γειτονικά εικονοστοιχεία επιφάνειας 100 m^2 (κινούμενο παράθυρο 5×5), ανέδειξε τα υπάρχοντα είδη βλάστησης, σε συμφωνία με τον δείκτη ποικιλομορφίας Shannon. Αν και η βιοποικιλότητα της περιοχής είναι μικρή, αναδείχτηκαν ικανοποιητικά και άλλα είδη βλάστησης, εκτός από τα κυρίαρχα (έλατα και πεύκα), όπως η ιτιά, η βελανιδιά, η οξιά, τα σκλήθρα, κλπ. Ένα πεδίο περαιτέρω έρευνας, θα μπορούσε να είναι προς την κατεύθυνση να βρεθούν (ή να δημιουργηθούν) κατάλληλες πρότερες, οι οποίες θα μπορούσαν να ποινικοποιούν τις αφθονίες την ώρα του Μπεϋζιανού φασματικού διαχωρισμού.

Η μεθοδολογία, ως στοχαστική, μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή, δασική ή μη, αναδεικνύοντας τη βιοποικιλότητα, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη Νέα Δασική Στρατηγική της ΕΕ για το 2030 [Tiainen S., 2021].

6.5 Βιβλιογραφία

Allenby G.M., Rossi P.E. and McCulloch R.E., "Hierarchical Bayes Model: A Practitioner's Guide". Journal of Bayesian Applications in Marketing, January 2005.

- Chlorokostas S., Karathanassi V., 2020. “Εφαρμογή μοντέλου επιβλεπόμενου φασματικού διαχωρισμού με συμπερασμό Bayes και υπόθεση χρωματικού θορύβου”, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης ΕΜΠ.
- DeWitt P., Tell Bennett T., 2022. “Elastic Net Searcher”, Repository CRAN
- Dobigeon N., Tourneret J.-Y., Hero A. O., 2008, Bayesian linear unmixing of hyperspectral images corrupted by colored Gaussian noise with unknown covariance matrix, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, doi:10.1109/ICASSP.2008.4518389.
- Efron B., 1983, Estimating the Error Rate of a Prediction Rule: Improvement on Cross-Validation, Journal of the American Statistical Association, volume 78, number 382, pages 316 - 331, doi: 10.1080/01621459.1983.10477973.
- Fouskakis D., 2021, Ανάλυση Δεδομένων με χρήση της R, 2^η έκδοση, εκδόσεις Τσότρας, ISBN:978-618-5495-31-2, Αθήνα.
- Fouskakis D., Petrakos G., Vavouras I., 2015, A Bayesian hierarchical model for comparative evaluation of teaching quality indicators in higher education, Journal of Applied Statistics, Taylor & Francis, doi: 10.1080/02664763.2015.1054793.
- Friedman J., Hastie T., Tibshirani R., 2010. “Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent.” Journal of Statistical Software, 33(1), 1–22. doi:10.18637/jss.v033.i01, <https://www.jstatsoft.org/v33/i01/>
- Gruber, M., 1998, Improving Efficiency by Shrinkage: The James--Stein and Ridge Regression Estimators, CRC Press. p. 2. ISBN 978-0-8247-0156-7.
- Hastie, T., Tibshirani R, Friedman J., 2017, Shrinkage Methods. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction (2nd ed) New York: Springer. pp. 61-79. ISBN 978-0-387-84857-0
- Heinz C. D., Chang Chein-I., 2001, Fully Constrained Least Squares Linear Spectral Mixture Analysis Method for Material Quantification in Hyperspectral Imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 3, March 2001
- Jiang, Yuan, 2016, Variable selection with prior information for generalized linear models via the prior lasso method, Journal of the American Statistical Association, 111 (513): 355-376, doi:10.1080/01621459.2015.1008363. PMC 4874534.
- Kampouri M., Kolokoussis P., Argialas D., Karathanassi V., 2019. "Mapping of Forest Tree Distribution and Estimation of Forest Biodiversity using Sentinel-2 Imagery in the University Research Forest Taxiarchis in Chalkidiki, Greece", Geocarto International, Vol 34, Issue 12, DOI: 10.1080/10106049.2018.1489424.
- Kokkalis Th., Kotroni M.-T., Koutsonis Ev., Papavasiliou Ch., Tzeliou E. «Αειφόρο ελατόδασος Περγουλίου», Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Περγουλίου – Τρικκαίων, 2015.
- Kuk A. Y. C., “Asymptotically Unbiased Estimation in Generalized Linear Models with Random Effects”, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02035.x, 1995.
- Miquel De Cáceres, Santiago Martín-Alcón, Jose Ramón González-Olabarria, Lluís Coll, 2018, A general method for the classification of forest stands using species composition and vertical and horizontal structure. Annals of Forest Science (2019) 76: 40, doi.org/10.1007/s13595-019-0824-0.
- Myung I., “Tutorial on Maximum Likelihood Estimation,” Journal of Mathematical Psychology, 47: 90-100, February 2003.
- Papana A., 2018. «Σημειώσεις Οικονομετρίας», Πολυτεχνική σχολή, Α.Π.Θ. & Οικονομικό Τμήμα, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.
- Pla, L., 2006, Biodiversity inference about richness and Shannon index, Interciencia 31(8): 583-590, ISSN/ISBN: 0378-1844.
- Posch K., Arbeiter M., Pleschberger, Juergen Pilz J., 2021, Variable Selection Using Nearest Neighbor Gaussian Processes, arXiv:2103.14315, doi.org/10.48550/arXiv.2103.14315.
- Se Yoon Lee, 2021, Gibbs sampler and coordinate ascent variational inference: a set-theoretical review, arXiv:2008.01006, doi.org/10.48550/arXiv.2008.01006.

-
- Schmon, Sebastian M.; Gagnon, Philippe, 2022, "Optimal scaling of random walk Metropolis algorithms using Bayesian large-sample asymptotics". *Statistics and Computing*. 32 (2): 28. doi:10.1007/s11222-022-10080-8. ISSN 0960-3174. PMC 8924149.
- Tadesse Ghirmai, 2016, Applying Metropolis-Hastings-within-Gibbs algorithms for data detection in relay-based communication systems, *IEEE Signal Processing and Signal Processing Education Workshop (SP/SPE)*, Salt Lake City, UT, USA, doi:10.1109/DSP-SPE.2015.7369547.
- Tiainen S., Δεκέμβριος 2021., Νέα δασική στρατηγική της ΕΕ για το 2030. In *Proceedings of the European Economic and Social Committee*.
- Trevezas S., 2020. "Monte Carlo Statistical Methods", Lecture notes, Department of Mathematics, University of Athens.
- Wikipedia, Dirichlet distribution, [https://en.wikipedia.org/wiki/Dirichlet_distribution], last access November 2022.
- Yosida K. and Kakutani S., 1939. "Operator-Theoretical Treatment of Markoff's Process and Mean Ergodic Theorem", *Annals of Mathematics, Second Series*, Vol. 42, No. 1 (Jan., 1941), pp. 188-228 (41 pages), published by: Mathematics Department, Princeton University, doi.org /10.2307 /1968993.
- Zou Hui and Hastie Trevor, 2005, Regularization and Variable Selection via the Elastic Net, *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 67, No. 2 (2005), pp. 301-320, published by Wiley.

7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

7.1 Εισαγωγή

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους LST²⁷ (Land Surface Temperature, LST) είναι μια σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με το κλίμα και επηρεάζει τη βλάστηση και τη βιοποικιλότητα σε ένα οικοσύστημα. Ως εκ τούτου, έχει αναγνωριστεί ως ουσιαστικός περιβαλλοντικός παράγοντας για την παρακολούθηση των διαθεσίμων του πλανήτη μας [Solanky V. et al, 2018]. Μετρείται συστηματικά από δορυφορικούς αισθητήρες και εκτιμάται από τις τιμές φωτεινότητας της ακτινοβολίας TOA (Top Of Atmosphere, TOA) των υπέρυθρων φασματικών καναλιών [Dash, P., 2005; Solanky V. et al, 2018]. Η LST επηρεάζει την κατανομή της ενέργειας μεταξύ του εδάφους και της φωτοσυνθετικής χλωροφύλλης και καθορίζει τη θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα [Yang J. et al, 2021; Ali S.B. et al, 2017]. Επηρεάζει επίσης το θερμικό περιβάλλον τοπικά σε μια περιοχή [Rajendran P., 2015; Han H. et al, 2020]. Έχει παρατηρηθεί ότι οι μεταβολές της LST είναι μη φυσιολογικές (ακραίες, μη αναμενόμενες) σε ορισμένες περιοχές [Yan Y. et al, 2020], με αποτέλεσμα ξηρασίες, αυξημένη συχνότητα πυρκαγιών, αλλά ταυτόχρονα περισσότερες βροχοπτώσεις και ισχυρές καταιγίδες. Η LST και κάποιες ακόμη παράμετροι, όπως ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ή ο δείκτης γυμνού εδάφους (Bare Soil Index, BSI) έχουν μελετηθεί κυρίως σε σχέση με την τάση των ανθρώπων να συγκεντρώνονται στις πόλεις (αστικοποίηση) [Akinyemi F.O. et al, 2019, Dang T. et al, 2020]. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι αλλαγές στην LST επηρεάζουν τη μεταβλητότητα του μικροκλίματος μιας περιοχής και τον φαινολογικό κύκλο της βλάστησης [Rajendran P., 2015; Han H. et al, 2020], τη γεωργική παραγωγή [Heinemann S. et al. 2020] και τις αλλαγές στην κάλυψη γης [How D., 2020], χρησιμοποιώντας και αναλύοντας σχετικά δεδομένα χρονοσειρών. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι η LST σε κλίματα υποτροπικών και μέσου γεωγραφικού πλάτους (μεταξύ 30° και 45° γεωγραφικού πλάτους) είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ποσότητα βλάστησης (όπως αυτή ποσοτικοποιείται από τους δείκτες βλάστησης) ή την κάλυψη των δέντρων μιας περιοχής [Lambin E.F. and Ehrlich, D., 1996; Mohd Jaafar W.S.W. et al, 2020; Rodrigues C. and Teodoro A.C.M., 2020; Guha S. and Govil H., 2021]. Σχετική έρευνα έδειξε ότι η LST και η θερμοκρασία του αέρα μειώνονται από την ύπαρξη δασών στην Ευρώπη και μάλιστα όσο το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής, αυξάνονται. Αυτό επηρεάζει σε κάποιο βαθμό το γενικότερο κλίμα στη βορειοανατολική Ευρώπη [Tang B., 2018]. Επίσης, μελέτες έχουν γίνει, για την αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ διαφορετικών δεικτών βλάστησης και LST [Macarof, P. et al, 2018; Guha, S. and Govil, H., 2021], επισημαίνοντας την αρνητική συσχέτιση μεταξύ LST και NDVI.

Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη, ακόμη από τη δεκαετία του '70, για τηλεπισκοπικά προϊόντα με καλύτερη χωρική ανάλυση, οδήγησε στην παραγωγή απεικονίσεων από αρκετούς και διαφορετικούς τηλεπισκοπικούς δέκτες. Από αυτές, οι απεικονίσεις των δορυφόρων Landsat, έχουν μακρά και συνεπή παρουσία στον τομέα της Τηλεπισκόπησης, με χωρική ανάλυση ανάλογα τον εκάστοτε δέκτη, συνήθως 60-120 m στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου

²⁷ Μετρά την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης, όπου η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια επιδρά και θερμαίνει το έδαφος ή την επιφάνεια του θόλου σε περιοχές με βλάστηση.

(Thermal Infrared, TIR) και χρόνο κάλυψης 16 ημερών [Liu Y. et al, 2007; Meng X. et al, 2019]. Μελέτες με δεδομένα Landsat έδειξαν ότι οι ορεινές περιοχές είναι ευαίσθητες στην άνοδο της θερμοκρασίας, καθιστώντας τις ευάλωτες στην κλιματική αλλαγή [Lambin E.F. and Ehrlich D., 1996; How D., 2020]. Επιπλέον, δεδομένα Landsat έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ LST και δεικτών βλάστησης κατά την θερμή καλοκαιρινή περίοδο του έτους για τη μελέτη των επιπτώσεων των μεταβολών της LST στη βλάστηση. Για παράδειγμα, αναφορικά με τα αφρικανικά δάση, η έρευνα των Abdul Athick A.S.M. et al, (2020) έδειξε ότι περιοχές υψηλής θερμοκρασίας είναι ως επί το πλείστον άγονες, σε αντίθεση με τις περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας, επιβεβαιώνοντας την αρνητική συσχέτιση μεταξύ των τιμών NDVI και LST.

Δυστυχώς οι χρονοσειρές που παράγονται από δορυφορικά δεδομένα με υψηλή χωρική ανάλυση, έχουν σχεδόν πάντα ελλιπείς τιμές. Παράγοντες διαταραχής, όπως η ύπαρξη σύννεφων, τα αερολύματα και τα συστηματικά σφάλματα των αισθητήρων, επιδεινώνουν το πρόβλημα έλλειψης διαδοχικών τιμών στο χρόνο, που είναι κρίσιμο για την ανάλυση χρονοσειρών [Quan J. et al 1955; Qiu S. et al, 2019]. Επομένως, απαιτείται η παρεμβολή και η εξομάλυνση των τιμών των χρονοσειρών, για την κάλυψη των κενών των τιμών που λείπουν. Προηγούμενες εργασίες έχουν δείξει ότι το φίλτρο Kalman παράγει κατάλληλες και αποτελεσματικές τιμές, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παρεμβολής [Welch G. and Bishop G., 2001; Muflihah R. et al, 2017 Saputra M.D. et al, 2021].

Επιπλέον, για να μελετηθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα δάση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι και έχουν διεξαχθεί αναλύσεις χρονοσειρών δεδομένων για i) την εκτίμηση των μεταβολών στην τάση μιας χρονοσειράς LST και ii) τον εντοπισμό σημείων συσχέτισης με την παράμετρο της τάσης της χρονοσειράς NDVI [Kumar D. and Shekhar S., 2015; Potter C., et al, 2019].

Η τάση των δεδομένων μιας χρονοσειράς LST ή μιας χρονοσειράς NDVI, μπορεί να παραχθεί με την αποσύνθεση της χρονοσειράς στο πεδίο του χρόνου, μια σχετικά κλασική και πολύ ικανή τεχνική να αναλύει τα δεδομένα της χρονοσειράς σε συνιστώσες τάσης, εποχικότητας²⁸ και τυχαίου θορύβου, για να ανιχνεύσει, να απομονώσει και να αφαιρέσει τη συμβολή καθεμιάς συνιστώσας από τα δεδομένα, εντοπίζοντας τυχόν επαναλαμβανόμενα, εποχιακά μοτίβα βάσει των οποίων μπορούμε να αφαιρέσουμε ή/και να περιορίσουμε τον παράγοντα διαταραχής [Lambert J. et al, 2013]. Η αποσύνθεση χρησιμοποιείται επίσης για την εξαγωγή μιας αριθμητικής σχέσης που περιγράφει μια μακροπρόθεσμη (συνήθως) αλλαγή για κυρίως έως δύο μεταβλητές [Quan J. et al, 1955], π.χ. για καλλιεργήσιμη γη και αστικές περιοχές. Η ανάλυση της αποσύνθεσης των χρονοσειρών άπτεται της Στατιστικής και των Μαθηματικών, οπότε έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση της αποσύνθεσης χρονοσειρών [Schelter B. and Winterhalder, M., 2006; Ben Abbes A. et al, 2018]. Για παράδειγμα, η κλασική

²⁸ Σε αρκετά βιβλία θεωρούν την εποχικότητα (αναφέρεται και ως εποχιακότητα) και την περιοδικότητα (αναφέρεται και ως κυκλικότητα) ως δύο διαφορετικές συνιστώσες. Η περιοδικότητα (κυκλικότητα) αντιπροσωπεύει εκείνες τις επαναλαμβανόμενες κυμάνσεις γύρω από την τάση που η διάρκειά τους είναι μεγαλύτερη του έτους και μπορεί να φτάσει 15 με 20 έτη, ενώ η εποχικότητα είναι μια περιοδική κύμανση με διάρκεια το έτος ή μικρότερη. Επειδή αυτό που τα ξεχωρίζει είναι η διάρκεια της περιόδου, τα περισσότερα βιβλία τις θεωρούν ως μία συνιστώσα στη χρονοσειρά και αυτό έχει υιοθετηθεί και στην παρούσα έρευνα.

αποσύνθεση δεδομένων χρονοσειρών, χρησιμοποιεί ένα προσθετικό είτε ένα πολλαπλασιαστικό μοντέλο, αναφορικά με τον τρόπο που συμμετέχουν οι συνιστώσες μιας χρονοσειράς (τάση, εποχικότητα, θόρυβος) στη δημιουργία των δεδομένων [Dagum E.B., 2010]. Οι εναλλακτικές στην κλασική προσέγγιση, περιλαμβάνουν την αποσύνθεση X11 [Sutcliffe A., 1993], η οποία δημιουργεί έναν κύκλο τάσης για όλες τις παρατηρήσεις και επιτρέπει στην εποχιακή συνιστώσα να μεταβάλλεται αργά αλλά δεν είναι ανθεκτική σε ακραίες τιμές (outliers). Αναπόφευκτα οι ερευνητές εισήγαγαν άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα τη μέθοδο LOESS (LOcally wEighted regreSSion, LOESS) για την εκτίμηση γραμμικών αλλά και μη γραμμικών σχέσεων [Cleveland W.R., 1990]. Αλγόριθμοι αιχμής για χρονοσειρές, περιλαμβάνουν ανάλυση τάσης και ανίχνευση αλλαγών στις μεταβλητές τους στο πεδίο του χρόνου, που βασίζονται στον αλγόριθμο BFAST (Break detection For Additive Season and Trend, BFAST) [Verbesselt J. et al, 2010], ακόμη και ανάλυση με μετασχηματισμό κυματιδίων (MRA-WT) [Rhif M., 2020]. Το τελευταίο ενσωματώνει την αποσύνθεση των χρονοσειρών με άλλες μεθόδους (ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων) για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό μεταβολών σε μια χρονοσειρά.

Ο κύριος στόχος της έρευνας σε αυτό το κεφάλαιο, είναι η καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων των μεταβολών της LST σε ένα μεσογειακό δάσος, χρησιμοποιώντας δεδομένα και στοιχεία από το δάσος της Πάφου, στην Κύπρο, και αξιοποιώντας τον NDVI ως δείκτη υποβάθμισης (ή αναβάθμισης) των δασών, στην προσπάθεια να λάβουμε ενδείξεις για τη δυναμική της βλάστησης. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση χρονοσειρών δεδομένων Landsat για την περίοδο 1993-2018. Λόγω της διαθεσιμότητας των δεδομένων αυτών, η χρονική περίοδος της ανάλυσης χωρίστηκε σε δύο χρονικές (υπο)περιόδους. Αυτή η διαίρεση είχε κάποια πλεονεκτήματα, αφού η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο (υπο)περιόδων αποκάλυψε λεπτομέρειες κάθε χρονικής περιόδου και τόνισε μικρο-αλλαγές, οι οποίες πιθανότατα δεν θα ήταν ανιχνεύσιμες, εάν αφορούσαν μια μεγάλη και συνεχή χρονοσειρά. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για κάθε χρονική περίοδο, ο αριθμός των δειγμάτων της LST και του NDVI ήταν στατιστικά επαρκής (μεγαλύτερος του 30, [Anouris N. et al, 2015]). Η ερμηνεία των παρατηρούμενων μεταβολών στην LST υποβοηθήθηκε με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων, όπως της θερμοκρασίας του αέρα και βροχόπτωσης, επιβεβαιώνοντας ότι, γενικά, οι θερμοκρασίες του αέρα πάνω από μια επιφάνεια, παρουσιάζουν ανάλογη τάση με τις θερμοκρασίες του εδάφους, και στο έδαφος οι θερμοκρασίες εμφανίζουν αρκετά μεγάλο εύρος τιμών (min=8.40°C, mean=24.89°C, max=36.80°C). Η ερμηνεία της απόκρισης του δείκτη NDVI στις μεταβολές της LST, υποστηρίχθηκε επίσης από μετεωρολογικά δεδομένα. Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η εισβολή εντόμων και οι επιθέσεις παρασίτων (όπως οι κάμπιες *Thaumetoroea pityocampa*), μπορούν να εντοπιστούν, μέσω ασυνήθιστων και στατιστικά σημαντικών μεταβολών του NDVI στην περιοχή μελέτης.

Για τη συμπλήρωση των ελλিপών τιμών στις χρονοσειρές, χρησιμοποιήθηκε όπου χρειάστηκε, το φίλτρο εξομάλυνσης Kalman [Saputra M.D. et al, 2021], και οι τιμές που παρήγαγε συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ όλων των τιμών της συμπληρωμένης χρονοσειράς, χρησιμοποιώντας την απόσταση Cook και τον πίνακα Hat. Τα ετήσια διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας των ολοκληρωμένων (μετά τη συμπλήρωση των ελλিপών τιμών) χρονοσειρών LST και NDVI, βοήθησαν στην ερμηνεία των αρχικών παρατηρήσεων, ενώ το προσθετικό μοντέλο αποσύνθεσης και ο αλγόριθμος BFAST

χρησίμευσαν ως εργαλεία για την ανάλυση και τον εντοπισμό σημείων μεταβολών (ανωμαλιών) στις τάσεις των χρονοσειρών. Επίσης, εξετάστηκε, μέσω της απόστασης Cook και της ανάλυσης των καταλοίπων (υπολειμμάτων), η επίδραση παρατηρήσεων με σημαντική επιρροή στη συνιστώσα της τάσης. Η ερμηνεία των σημαντικών μεταβολών στις τάσεις της LST και του NDVI, εντόπισε πιθανές αιτίες που προκάλεσαν ερμηνεύσιμες μεταβολές στη βλάστηση του δάσους της Πάφου, ενώ η ανάλυση συσχέτισης και η διασταυρούμενη επικύρωση έδειξαν τις συγκλίσεις και τις αποκλίσεις των μεταβλητών της LST και του NDVI προϊόντος του χρόνου. Η ανάλυση των καταλοίπων τεκμηρίωσε την επιλογή του μοντέλου αποσύνθεσης και έδωσε πρόσθετες πληροφορίες για τις πιθανές μεταβολές στη δασική βλάστηση. Περαιτέρω, συγκρίνεται η δυνατότητα που έχουν τα αποτελέσματα από τη διασταυρούμενη συσχέτιση των τιμών LST και NDVI, και τα αποτελέσματα της επικύρωσης από τα βαριογράμματα, καθώς και από τον αλγόριθμο BFAST, στο να παράξουν συγκρίσιμα και αξιόπιστα συμπεράσματα, αναφορικά με τις μεταβολές στη βλάστηση και την απόκρισή της στις εναλλαγές της LST και του NDVI αλλά και την επίδραση των άλλων κλιματικών παραγόντων (όπως η θερμοκρασία αέρα και η βροχόπτωση), τις τελευταίες δεκαετίες. Συνδυάζονται τηλεπισκοπικά, μετεωρολογικά και περιβαλλοντικά δεδομένα (πληροφορίες για τα είδη βλάστησης που απαρτίζουν το τοπικό οικοσύστημα), για να ερμηνευθούν οι μεταβολές σε ένα μεσογειακό δάσος που απειλείται λόγω της κλιματικής αλλαγής, καθώς τα μεσογειακά δάση αναμένεται να επηρεαστούν πιο σοβαρά από την κλιματική αλλαγή σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές περιοχές [Zachariadis, T., 2012].

7.2 Ανάλυση χρονοσειρών δεδομένων Landsat για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους και των δασικών αλλαγών στο Δάσος Πάφου, Κύπρος

7.2.1 Περιοχή μελέτης και δεδομένα

7.2.1.1 Περιοχή μελέτης

Περιοχή μελέτης αποτέλεσε το δάσος της Πάφου στην Κύπρο (Εικόνα 7-1), που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της οροσειράς Τρόδος, η οποία αποτελεί την κύρια οροσειρά της Κύπρου, με κορυφές που προσεγγίζουν σε υψόμετρο τα 1950 m. Πρόκειται για ένα δάσος κωνοφόρων 600 km² που περιλαμβάνει δύο φυσικές περιοχές και επιλέχθηκε επειδή αντιπροσωπεύει ένα οικοσύστημα μεγάλης σημασίας. Επιπλέον, σύμφωνα με πρόσφατη επιστημονική έρευνα που διεξήχθη στην Κύπρο [Miltiadou, M. et al, 2021], το 38.7% των συμμετεχόντων σε ερωτηματολόγια, παρατήρησε πολύ έως πάρα πολύ μεγάλη υποβάθμιση και το 26.9% μέτρια υποβάθμιση στα κωνοφόρα δάση στην Κύπρο, ενώ το 44% πιστεύει ότι τα κωνοφόρα, είναι τα είδη φυτών που επηρεάζονται περισσότερο από την κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με τεχνική έκθεση του Υπουργείου Γεωργίας της Κύπρου [Republic of Cyprus, Ministry of Agriculture, 2011] το κυρίαρχο είδος βλάστησης στο δάσος της Πάφου είναι η *Pinus Brutia* (η τραχεία πεύκη). Επιπλέον, ορισμένα είδη μικρότερων δέντρων και θάμνων αποτελούν σημαντικό μέρος του δάσους όπως οι *Quercus Alnifolia* (κοινή ονομασία Λατζιά, είναι ένα είδος αειφυλλης σκληρόφυλλης δρυός, όπου η εξάπλωσή της περιορίζεται στα πυριγενή πετρώματα της οροσειράς του Τρόδος. Η λατινική της ονομασία οφείλεται στο σχήμα των φύλλων που μοιάζει με το αντίστοιχο της σκλήθρας), η *Arbutus Andrachne* (Άρβουτος, με κοινή ονομασία αγριοκουμαριά. Ανήκει στην οικογένεια των Ερικοειδών και κατανέμεται κυρίως στη Νότια

Βαλκανική, Κύπρο, Τουρκία. Ζει σχεδόν σ' ολόκληρη την Ελλάδα και αποτελεί κοινό συστατικό στοιχείο της μακκίας βλάστησης). Συναντάται επίσης η *Olea europaea* (η Ελιά, ένα ιδιαίτερα γνωστό και αγαπητό δέντρο στις χώρες της Μεσογείου), η *Cistus creticus* (με κοινή ονομασία Λαδανιά, είναι ένα είδος μεσογειακού θαμνώδους φυτού της οικογένειας Cistaceae, ονομάζεται συχνά και "Cistus incanus), η *Rhamnus alaternus* (κοινή ονομασία Κιτρινόξυλο) που είναι ένα είδος ανθοφόρου φυτού της οικογένειας buckthorn Rhamnaceae, γνωστό επίσης με τα κοινά ονόματα ιταλικό buckthorn ή μεσογειακό buckthorn. Είναι ένας ανθεκτικός, μεσαίου μεγέθους, αιθαλής θάμνος, με αρωματικά λουλούδια. Τέλος συναντάται η *Quercus coccifera* (κοινή ονομασία Πουρνάρι ή Πρίνος), που είναι ένα είδος αείφυλλης σκληρόφυλλης δρυός με ευρεία εξάπλωση γύρω από τη Μεσόγειο. Οφείλει την ονομασία της στους κόκκους ερυθρού χρώματος που σχηματίζουν οι προνύμφες του κοκκοειδούς ημίπτερου εντόμου *Kermes vermilio* μέσα στα φύλλα, όπου φωλιάζουν. Αξιοσημείωτη είναι και η πλατύφυλλη, παρόχθια βλάστηση, όπως τα: *Platanus orientalis* (ο Ανατολικός Πλάτανος, είναι ένα πολύ μεγάλο, ταχέως αναπτυσσόμενο και μακρόβιο είδος φυλλοβόλου δέντρου, που ανήκει στην οικογένεια των Πλατανοειδών), η *Alnus orientalis* (κοινή ονομασία Σκλήθρο), που είναι φυλλοβόλο και αναπτύσσεται έως και τα 50 m ύψος, είναι ανθεκτικό στην ατμοσφαιρική ρύπανση και είναι σε θέση να δεσμεύσει το ατμοσφαιρικό άζωτο με τις ρίζες του), η *Laurus nobilis* (η γνωστή σε όλους μας Δάφνη, αρωματικό φυτό της οικογένειας των δαφνοειδών), η *Myrtus communis* (κοινή ονομασία Μυρτιά), που είναι είδος φυτού που ανήκει στο γένος Μύρτος και στην οικογένεια των Μυρτιδών. Το γένος Μύρτος περιλαμβάνει γύρω στα 75 είδη, τα οποία ευδοκούν σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Στη Μεσόγειο, την Ελλάδα και την Κύπρο, το πιο διαδεδομένο είδος είναι η Μύρτος η κοινή, αυτοφυής ή διακοσμητική και ο θάμνος *Rubus sanctus* (κοινή ονομασία Βάτος, ένα πολύ μακρόβιο μεσογειακό φυτό, που εμφανίζεται ανεξάρτητα από το υψόμετρο). Επιπλέον, ειδικά σε χαμηλά υψόμετρα, εντοπίζονται λιγότερα υψηλά δέντρα και περισσότεροι μικροί θάμνοι, φρύγανα και ποώδη φυτά. Τέλος, ο κυπριακός κέδρος (*Cedrus brevifolia*) βρίσκεται στις πλαγιές από 600 m έως 1350 m, μαζί με είδη βλάστησης όπως: το *Origanum cordifolium* (ένα είδος Ορίγανου, είναι γένος αγγειόσπερμων φυτών που ανήκει στην οικογένεια των χειλανθέων και είναι πολυετή φυτά, ποώδη ή μικροί θάμνοι), το *Ranunculus kykkoensis* (Ρανούγκουλος του Κύκκου, πολυετής πόα με ύψος μέχρι 50 cm), η *Onosma mitis* (Ονόσμα η ήπια, πολυετής θάμνος με ξυλώδη βάση και ύψος μέχρι 50cm), το *Arum rupicola* (πολυετής πόα, φτάνει σε ύψος το 1 m) και το *Erysimum kykkoiticum* (ένα είδος ανθοφόρου φυτού της οικογένειας Brassicaceae που είναι ενδημικό στο νησί της Κύπρου). Οι φυσικοί βιότοποι του *Erysimum kykkoiticum* είναι θάμνοι μεσογειακού τύπου και βραχώδεις περιοχές.

Ανάλυση που βασίζεται σε εικόνες χρονοσειράς Landsat, που χαρακτηρίζουν την έκταση και την αλλαγή των δασών παγκοσμίως [Hansen M.C. et al, 2013], έδειξε μικρή απώλεια δάσους στην περιοχή μελέτης το 2016. Συγκεκριμένα, στον διαδραστικό παγκόσμιο χάρτη δασών και δεδομένων αλλαγής κάλυψης του Global Forest Watch (GFW) [<https://glad.umd.edu/projects/global-forest-watch>, τελευταία επίσκεψη 31 Ιανουαρίου 2022], χαρτογραφήθηκε απώλεια κάλυψης δέντρων στο δάσος της Πάφου, που ήταν μεγαλύτερη από το 30% της πυκνότητας του θόλου, για μια περιοχή που καλύπτει περίπου το 0.7% της περιοχής μελέτης. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο σύνολό του το νησί, συμπεριλαμβανομένου του δάσους της Πάφου, αντιμετωπίζει πρόβλημα με τις ακρίδες [Jennings, R.C., 1988]. Τα σμήνη ακρίδων έχουν γίνει

ενδημικά από τα μέσα του 16ου αιώνα. Για λόγους που δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητοί, οι ακρίδες εμφανίζονται στην Κύπρο σε μεγαλύτερη αφθονία κάποια χρόνια, από κάποια άλλα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι επιθέσεις από κάμπιες *Thaumetoroea pityocampa* (pine processionary) έχουν αυξηθεί σημαντικά στη Μεσόγειο [Hódar J.A., 2003] λόγω της κλιματικής αλλαγής, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση στην ανάπτυξη των πεύκων. Το φαινόμενο με τις κάμπιες *Thaumetoroea pityocampa* εξασθενεί σε περιπτώσεις που παρατηρούνται χαμηλές θερμοκρασίες κατά τους φθινοπωρινούς μήνες [Invasive Species, online, 2022].



Εικόνα 7-1: Η περιοχή μελέτης με: (a) όρια του δάσους της Πάφου. (b) Το δάσος Πάφου σε σύνθετο RGB με φυσικά χρώματα από εικόνες Google Earth. (c) *Pinus Brutia* το κυρίαρχο είδος δένδρου (d) Φύλλωμα από *Pinus Brutia*. (e) *Quercus Alnifolia*, ο θάμνος που αποτελεί το κύριο υπόστρωμα στο δάσος της Πάφου.

Το κλίμα στην περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται μεσογειακό, με βασικά χαρακτηριστικά τα θερμά και ξηρά καλοκαίρια και τους βροχερούς αλλά ήπιους χειμώνες. Οι γενικές κλιματικές συνθήκες, επηρεάζονται το καλοκαίρι από το εποχικό βαρομετρικό χαμηλό, το οποίο προκαλεί υψηλές θερμοκρασίες και καθαρό καιρό, ενώ το χειμώνα, οι συνθήκες επηρεάζονται από μικρές διαδοχικές υφέσεις, από τα δυτικά προς τα ανατολικά, που ευθύνονται για μεγάλο ποσοστό της ετήσιας βροχόπτωσης. Συνοπτικά, τα κύρια κλιματικά χαρακτηριστικά της Κύπρου είναι τα ακόλουθα: η “κανονική”²⁹ μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 503 mm και οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 22°C έως 29°C τους καλοκαιρινούς μήνες, και από 3°C έως 10°C το χειμώνα [Republic of Cyprus, Ministry of Agriculture, 2011]. Τα έτη 1992, 1993 και 1997 ήταν τα ψυχρότερα της δεκαετίας 1990-2000 στη δασική περιοχή, με μέση θερμοκρασία αέρος 16.97 °C,

²⁹ Με τον όρο «κανονική βροχόπτωση» αναφέρεται η μέση τιμή βροχόπτωσης των ιστορικών δεδομένων (από το 1901 έως σήμερα).

18.16 °C και 17.79 °C, αντίστοιχα. Επιπλέον, σύμφωνα με στοιχεία που δόθηκαν από το Τμήμα Μετεωρολογίας της Κύπρου, το 1992 η βροχόπτωση ήταν 637 mm, αυξημένη κατά 27% από την “κανονική” στην περιοχή μελέτης. Το 1993 ήταν 509 mm που επίσης αυξήθηκε κατά ένα μικρό ποσοστό 1.8% της «κανονικής» βροχόπτωσης. Αυξημένες ετήσιες βροχοπτώσεις παρατηρούνται και για το έτος 2014 (562 mm) σε σύγκριση με το 2013 (315 mm) και το 2015 (309 mm), αντίστοιχα. Τα φθινόπωρα των ετών 2013 και 2014 ήταν από τα πλέον κρύα (14.70 °C και 13.35 °C, αντίστοιχα) σε σχέση με τη συνηθισμένη μέση θερμοκρασία των 15 °C. Σύμφωνα με την ανάλυση του Τμήματος Μετεωρολογίας της Κύπρου, η θερμοκρασία στην ευρύτερη περιοχή της Κύπρου έχει χαρακτηριστεί ιστορικά, από σημαντικές διακυμάνσεις και τάσεις. Όσον αφορά τη θερμοκρασία, κατά τον 20ο αιώνα η τάση της ήταν ανοδική και ο μέσος ρυθμός ανάπτυξής της ήταν 0.01 °C/έτος [SOER Country profile, 2022]. Συγκεκριμένα, για την περίοδο 1976-1998 αποδείχθηκε ότι ο μέσος ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας ήταν 0.035 °C/έτος στις αστικές περιοχές και 0.015 °C/έτος στην ύπαιθρο. Η πρόσθετη επεξεργασία των μετεωρολογικών δεδομένων για την περίοδο 1991-2007 έδειξε ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία ήταν 17.7 °C, η οποία υπερέβη την αντίστοιχη θερμοκρασία (17.2 °C) της περιόδου 1961-1990 κατά 0.5 °C. Από τα περιφερειακά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models, RCM) έχει προβλεφθεί ότι κατά την περίοδο 2021-2050 στην περιοχή της οροσειράς του Τρόδος, η μέγιστη θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί κατά 1.9 °C [SOER Country profile, 2022].

7.2.1.2 Δεδομένα

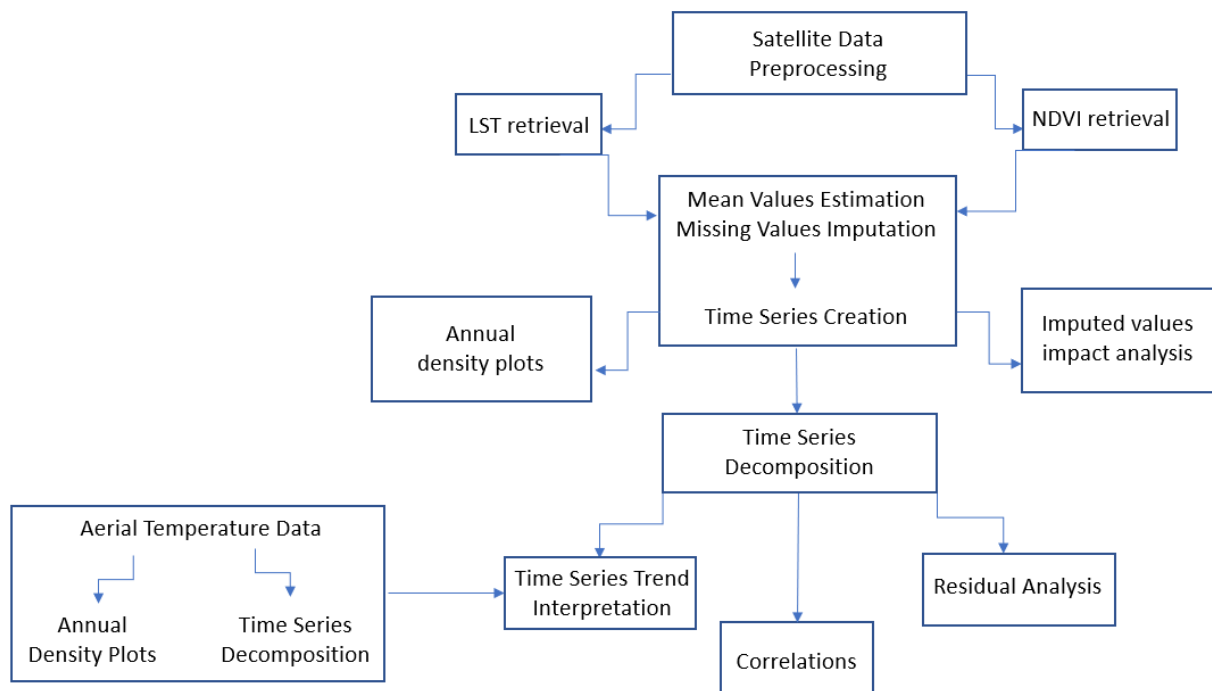
Ελήφθησαν 186 δορυφορικές εικόνες Landsat-5 για την περίοδο 1993-2011 και 76 δορυφορικές εικόνες Landsat-8 για την περίοδο 2013-2018. Οι απεικονίσεις Landsat προβλήθηκαν στο σύστημα αναφοράς WGS 84/UTM³⁰ zone 36N. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας αέρος προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Τμήματος Μετεωρολογίας στη Λευκωσία της Κύπρου. Τα δεδομένα αυτά καταγράφηκαν στις 10 π.μ. (τοπική ώρα) σε βαθμούς Κελσίου στον κλιματικό σταθμό με το όνομα «Σταυρός της Ψόκας», ο οποίος έχει γεωγραφικό πλάτος 35° 01' 29.52" Β, γεωγραφικό μήκος 32° 37' 50.78" Α. και υψόμετρο 824 m. Η μέση μηνιαία τιμή από αυτά τα δεδομένα, χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση της παρούσας έρευνας, για τη χρονική περίοδο από τον Ιανουαρίο 1992 έως τον Απρίλιο 2016. Τα ημερήσια και μέσα ετήσια δεδομένα των βροχοπτώσεων, προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Τμήματος Μετεωρολογίας Λευκωσίας Κύπρου, και αφορούν την περίοδο 1990-2020

7.2.2 Μεθοδολογία

Η γλώσσα προγραμματισμού Python και GDAL scripts χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη και την προεπεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων, ενώ η γλώσσα R χρησιμοποιήθηκε για την

³⁰ Το σύστημα αναφοράς του SABE είναι το WGS84 (World Geodetic System). Το SABE ή Seamless Administrative Boundaries of Europe, αποτελεί μία πανευρωπαϊκή βάση δεδομένων η οποία περιέχει τη γεωμετρία και τη σημειολογία των διοικητικών ορίων των 29 χωρών της Ευρώπης

ανάλυση των χρονοσειρών LST, NDVI, θερμοκρασίας αέρα και της βροχόπτωσης. Η Εικόνα 7-2 παρουσιάζει τα βήματα της μεθοδολογίας:



Εικόνα 7-2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας.

Τα ετήσια διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Graphs) των χρονοσειρών LST και NDVI, χρησιμοποιήθηκαν για την ποιοτική ερμηνεία της επίδρασης των ελλειπών τιμών στις χρονοσειρές. Η ποσοτική μελέτη των επιπτώσεων των τιμών, που προέκυψαν μετά τη συμπλήρωση των χρονοσειρών με το φίλτρο Kalman, έγινε με την απόσταση Cook, η οποία αποτελεί ένα πολύ γνωστό μέτρο, το οποίο χρησιμοποιείται για να εντοπίσουμε σημεία επιρροής σε ένα μοντέλο. Αριθμητικά προκύπτει από τον πίνακα Hat του μοντέλου αποσύνθεσης της κάθε χρονοσειράς, και μέσω αυτού ελέγχθηκε η συμμετοχή κάθε σημείου (παρατήρησης), με βάση τη μεταβολή των καταλοίπων. Ο πίνακας Hat (H), δείχνει την επίδραση κάθε τιμής y (τιμή απόκρισης) της χρονοσειράς σε κάθε προσαρμοσμένη τιμή \hat{y} που παράγεται από το φίλτρο Kalman, λαμβάνοντας υπόψη ότι $\hat{y} = H * y$, όπου τα στοιχεία του H προέρχονται από το συνδιακύμανση μεταξύ της τιμής απόκρισης και της προσαρμοσμένης τιμής, διαιρούμενης με τη διακύμανση της πρώτης. Από το ίχνος του πίνακα H, υπολογίζονται οι τιμές μόχλευσης, που περιγράφουν την επίδραση κάθε τιμής απόκρισης για κάθε προσαρμοσμένη τιμή, για την ίδια παρατήρηση, επομένως ανιχνεύονται και τα σημεία υψηλής μόχλευσης, τα οποία επηρεάζουν τους συντελεστές παλινδρόμησης κατά την προσαρμογή της κάθε χρονοσειράς, με βάση το προσθετικό μοντέλο αποσύνθεσής της. Η απόσταση Cook (D_i) ως μέτρηση μας βοηθά να προσδιορίσουμε την επίδραση που έχει κάθε τιμή της χρονοσειράς, σε κάθε προσαρμοσμένη τιμή που δημιουργείται μετά την εφαρμογή του φίλτρου Kalman, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παρατηρήσεις. Η D_i απόσταση Cook της παρατήρησης i (για $i = 1, \dots, n$) ορίζεται ως το άθροισμα όλων των αλλαγών που παράγονται από το φίλτρο Kalman όταν η παρατήρηση i αφαιρεθεί από αυτό, οπότε $j = 1, \dots, k - i, k + i, \dots, n$.

$$Di = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \hat{y}_j(i))^2}{ps^2} \quad (7.1)$$

όπου p είναι ο αριθμός των συμμεταβλητών για κάθε παρατήρηση και s^2 είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των εκτιμώμενων τιμών. Η απόσταση Cook χρησιμοποιείται επίσης για να εκτιμηθεί πόσο θα άλλαζαν οι τιμές των καταλοίπων, μεταξύ των αρχικών παρατηρήσεων και των εκτιμώμενων τιμών από το φίλτρο Kalman, εάν δεν λαμβάνονταν υπόψη, η συγκεκριμένη τιμή παρατήρησης που υποδεικνύεται από την απόσταση Cook [Cook Dennis, S.W., 1982]. Οι τιμές μεταξύ των παρατηρήσεων, που παρουσιάζουν πολύ υψηλή επιρροή, δεν αποτελούν πάντα πρόβλημα. Εξαρτάται από το είδος της ανάλυσης που κάνουμε και από τις μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν. Στην παρούσα έρευνα, οι τιμές με σημαντικά μεγάλη απόσταση Cook, αφαιρέθηκαν από τη χρονοσειρά και (επανα)υπολογίστηκαν οι ελλειπείς πλέον τιμές της χρονοσειράς, χρησιμοποιώντας το φίλτρο Kalman.

Το προσθετικό μοντέλο αποσύνθεσης και ο αλγόριθμος BFAST (βλέπε και 7.2.2.3.3) εφαρμόστηκαν στη συνέχεια, για να ελεγχθεί εάν οι τιμές επιρροής μετέβαλλαν σημαντικά τα αποτελέσματα. Η εποχιακή αποσύνθεση με κινητούς μέσους όρους [Hilas C.S. et al, 2006; Schelter, B. et al, 2006] είναι ένας γρήγορος, σταθερός και συνεπής τρόπος για την αποσύνθεση των χρονοσειρών στα συστατικά τους: τάση, εποχικότητα και τυχαιότητα. Η τυχαιότητα αντιστοιχεί στις κατάλοιπες τιμές (υπολείμματα) της χρονοσειράς, αφού αφαιρεθούν οι επιδράσεις από τις άλλες συνιστώσες. Η προσέγγιση αναλύει τις τιμές της χρονοσειράς σύμφωνα με την εξίσωση του μοντέλου αποσύνθεσης:

$$X_t = T_t + S_t + R_t \quad (7.2)$$

όπου t είναι ένα σύνολο διαδοχικών χρονικών σημείων, (X_t) είναι τα δεδομένα, (T_t) είναι η συνιστώσα του κύκλου τάσης, (S_t) είναι η εποχιακή συνιστώσα και (R_t) είναι η συνιστώσα του διαταρακτικού παράγοντα (θορύβου), στην περίοδο (t). Σε αυτή την έρευνα, η αποσύνθεση εφαρμόζεται στη χρονοσειρά των θερμοκρασιών του αέρα, στις δύο χρονοσειρές LST και τις δύο χρονοσειρές NDVI. Η αποσύνθεση της χρονοσειράς της θερμοκρασίας του αέρα οριοθετεί τη «μεγάλη εικόνα» των μεταβολών της θερμοκρασίας στην περιοχή, που καλύπτει την περίοδο από τον Ιανουάριο του 1992 έως τον Απρίλιο του 2016 και υποβοηθά την ερμηνεία των μεταβολών της LST. Η αποσύνθεση των χρονοσειρών LST και NDVI χρησιμοποιήθηκε για την κατανόηση της απόκρισης του NDVI στις μεταβολές της LST κατά τη διάρκεια των δύο χρονικών περιόδων (1993-2000 και 2013-2018). Οι τάσεις της LST και του NDVI έδειξαν τη μεταβολή των δύο μεταβλητών δια μέσου του χρόνου. Οι σχέσεις μεταξύ των γραμμών τάσης LST και NDVI φανέρωσαν επίσης τη συστηματική επίδραση των μεταβολών της LST στη βλάστηση. Για να ανιχνευθούν και να ελεγχθούν οι στατιστικά σημαντικές μεταβολές στις γραμμές τάσης των LST και NDVI, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος BFAST [Verbesselt, J. et al, 2010]. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει μία επαναληπτική διαδικασία αποσύνθεσης, η οποία βασίζεται στην τοπικά σταθμισμένη παλινδρόμηση (locally weighted regression ή LOESS) για να ανιχνεύσει σημαντικές (στατιστικά) πιθανές μεταβολές στις τάσεις των χρονοσειρών. Οι αυξομειώσεις στη θερμοκρασία LST δεν αρκούν από μόνες τους να ερμηνεύσουν τις σημαντικές μεταβολές στην τάση των χρονοσειρών του δείκτη NDVI. Σημαντικό ρόλο παίζει και ο λόγος σήματος προς θόρυβο των χρονοσειρών σε συνδυασμό με την τάση, για να ανιχνεύσει δυνητικά και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν,

όπως κλιματολογικοί παράγοντες (π.χ. η βροχόπτωση) και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες, (π.χ. εισβολή εντόμων), που μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στη βλάστηση, οι οποίες επισημαίνονται με στατιστικά σημαντικές μεταβολές στη γραμμή τάσης του NDVI. Για την επικύρωση των υποθέσεων του προσθετικού μοντέλου αποσύνθεσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση καταλοίπων και ελέγχθηκε η συμπεριφορά τους. Η ανάλυση των καταλοίπων (λέγεται και υπολειμματική ανάλυση) υποδεικνύει την καταλληλότητα του προσθετικού μοντέλου, την πιθανή προκατάληψη (bias) στις εκτιμήσεις και πιθανές βελτιώσεις στην ποιότητα προσαρμογής του μοντέλου. Καμία από τις εξηγηματικές πληροφορίες δεν πρέπει να περιέχεται στα κατάλοιπα, εκτός από ότι επιβάλλει η τυχαιότητα. Επιπλέον, τα κατάλοιπα θα πρέπει να κατανέμονται τυχαία γύρω από την τιμή 0. Η υπολειμματική ανάλυση που διεξήχθη, περιελάμβανε (βλέπε και Εικόνα 7-16): (α) Γραφικό έλεγχο διαγραμμάτων διασποράς “Residuals vs Fitted” των καταλοίπων από την αποσύνθεση των χρονοσειρών, σε σχέση με τις προσαρμοσμένες τιμές της χρονοσειράς, για τον έλεγχο της γραμμικής σχέσης των τιμών του προσθετικού μοντέλου και έμμεσα της ομοσκεδαστικότητάς του. (β) Γραφικό έλεγχο κανονικότητας της κατανομής των καταλοίπων, με γραφήματα “Q-Q Plots”, για να ελεγχθούν πιθανές αποκλίσεις από την κανονικότητα. (γ) Έλεγχο των διαγραμμάτων “Scale-Location” (είναι ένας τύπος γραφήματος που εμφανίζει τις προσαρμοσμένες τιμές ενός μοντέλου παλινδρόμησης κατά μήκος του άξονα x και την τετραγωνική ρίζα των τυποποιημένων καταλοίπων κατά μήκος του άξονα y), τα οποία ελέγχουν την ομοιογένεια της μεταβλητότητας των σφαλμάτων, αναζητώντας αποκλίσεις από την υπόθεση σταθερής διασποράς των καταλοίπων, και (δ) έλεγχο των διαγραμμάτων “Residual vs Leverage”, τα οποία αποτελούν έναν τύπο διαγνωστικού γραφήματος, που μας επιτρέπει να εντοπίσουμε παρατηρήσεις με σημαντική επιρροή (όπως αυτές που παρουσιάζουν υψηλές τιμές μόχλευσης) σε ένα μοντέλο.

Επιπλέον, για κάθε τιμή της χρονοσειράς (η οποία αποτελεί μηνιαία παρατήρηση), οι συντελεστές διασταυρούμενης συσχέτισης (cross-correlation) υπολογίστηκαν μεταξύ των καταλοίπων των μοντέλων της LST και του NDVI, για τις χρονοσειρές 1993-2000 και 2013-2018, με στόχο να αποκαλυφθούν και να ερμηνευθούν μεταβολές στη σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών, που δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμες παρατηρώντας τα εποχιακά γραφήματα. Η ανάλυση των χρονοσειρών LST και NDVI ολοκληρώθηκε με τη μελέτη των αυτοσυσχετίσεων και της διασταυρούμενης συσχέτισης μεταξύ των τιμών των μεταβλητών LST και NDVI. Η συνάρτηση αυτοσυσχετίσης³¹ (ACF) χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της (γραμμικής) σχέσης μεταξύ μιας παρατήρησης LST (ή NDVI) τη στιγμή t και των παρατηρήσεων σε προηγούμενους χρόνους. Οι ομοιότητες των συναρτήσεων αυτοσυσχετίσης για τις δύο μεταβλητές, έδειξαν ότι οι χρονοσειρές LST και NDVI παρουσιάζουν παρόμοια γραφικά μοτίβα (πρότυπα). Διασταυρούμενες συσχετίσεις για καθυστερήσεις (lags) από έναν έως δώδεκα μήνες, καθώς και το διασταυρούμενο βαριόγραμμα των παραμέτρων LST και NDVI εφαρμόστηκαν στην ανάλυση, για να ανιχνεύσουν τις δυνητικές σχέσεις του NDVI με την LST σε διάφορες χρονικές περιόδους (καθυστερήσεων). Οι περίοδοι αυτές, είναι χρήσιμες για να καταλάβουμε τη συμπεριφορά της μεταβλητής του δείκτη NDVI, ως προς την μεταβλητή της LST, η οποία μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο προγνωστικό παράγοντα για την εξέλιξη του δείκτη NDVI σε μεταγενέστερες χρονικές

³¹ Ως αυτοσυσχέτιση εννοούμε τη συσχέτιση μιας μεταβλητής με τον εαυτό της, με καθυστέρηση μίας ή περισσότερων χρονικών περιόδων (lags).

περιόδους. Η ερμηνεία της ανάλυσης των χρονοσειρών, υποστηρίχθηκε από δεδομένα θερμοκρασίας αέρα. Υπολογίστηκαν στατιστικά πρώτης τάξης και εργοδικοί μέσοι μηνιαίων τιμών, δημιουργήθηκαν ετήσιες γραφικές παραστάσεις πυκνότητας πιθανότητας και εφαρμόστηκε ένα προσθετικό μοντέλο αποσύνθεσης στις χρονοσειρές αυτές.

7.2.2.1 Αφαίρεση σύννεφων από τις δορυφορικές εικόνες

Οι δορυφορικές εικόνες που λαμβάνονται από οπτικούς αισθητήρες συνήθως περιέχουν θόρυβο (τα σύννεφα αποτελούν την πιο συνηθισμένη διαταραχή). Έτσι, ο αλγόριθμος fmask [Qiu S. et al, 2019] χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεση των περιοχών κάλυψης σύννεφων (cloud) από τις εικόνες Landsat. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το v3 ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) και τα δεδομένα που παρέχονται από το Global Surface Water Occurrence (GSWO), για να ομαλοποιήσει τα θερμικά κανάλια των απεικονίσεων Landsat.

Μετά από αυτή τη διαδικασία, δημιουργείται η τελική μάσκα «cloud» για κάθε εικόνα. Ακολουθεί οπτικός, ποιοτικός έλεγχος κατά τον οποίο κάποιες απεικονίσεις απορρίφθηκαν, με αποτέλεσμα ένα τελικό σύνολο δεδομένων από 125 απεικονίσεις Landsat-5 και 60 απεικονίσεις Landsat-8 (Level-1 για τα θερμικά κανάλια και Level-2 για τα πολυφασματικά κανάλια).

7.2.2.2 Δημιουργία χρονοσειρών και συμπλήρωση ελλιπών τιμών

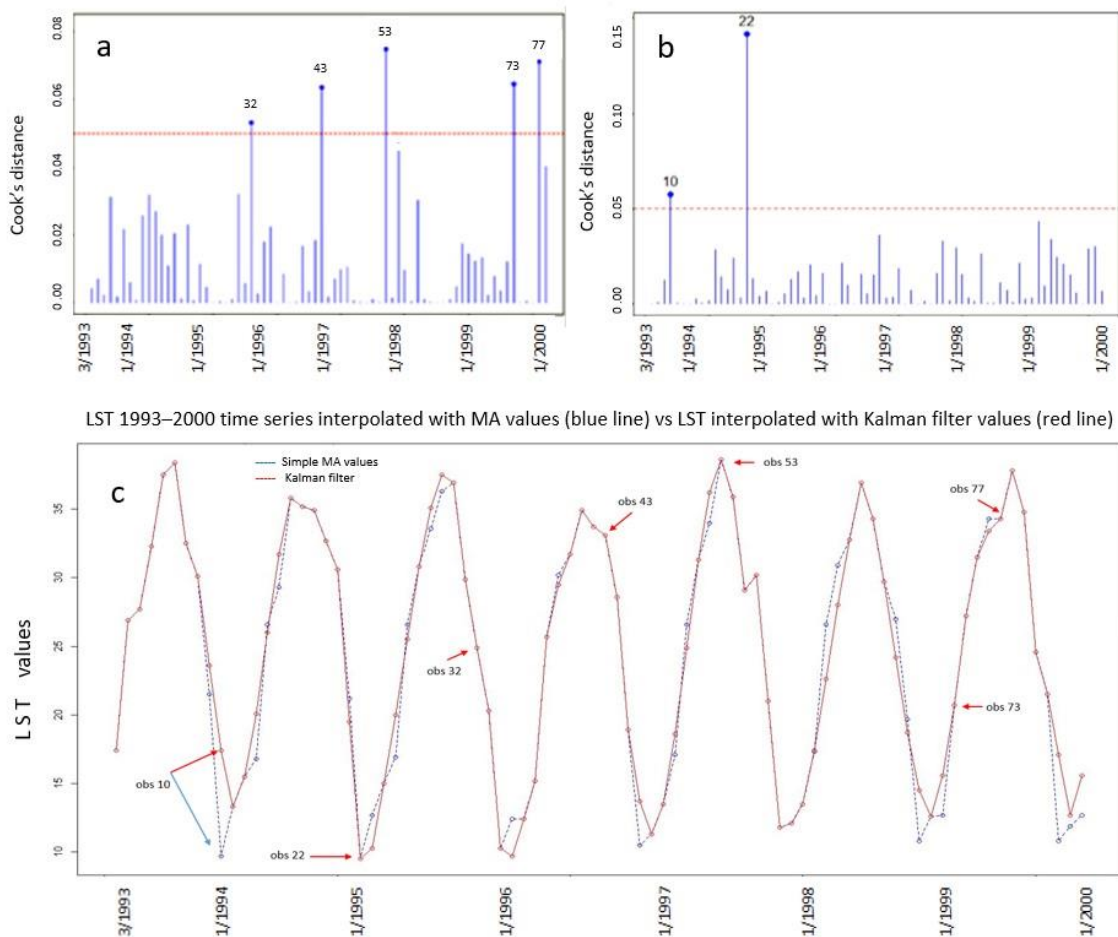
Οι απεικονίσεις όπως προέκυψαν από την 7.2.2.1 κάλυψαν δύο χρονικές περιόδους, (α) 1993-2000 (με αρχή της χρονοσειράς τον Μάρτιο 1993 και πέρας της χρονοσειράς τον Φεβρουάριο 2000) και (β) 2013-2018 (με αρχή τον Απρίλιο 2013 και πέρας της χρονοσειράς, τον Μάρτιο 2018). Για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους LST από τα θερμικά υπέρυθρα κανάλια του Landsat, ακολουθήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται στη δημοσίευση των Macarof P. et al, (2018). Η μέθοδος απαιτεί την εκτίμηση του NDVI χρησιμοποιώντας τα κανάλια RED και NIR (εγγύς υπέρυθρο) των πολυφασματικών απεικονίσεων. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας ήταν εικόνες LST και NDVI για τις δύο χρονικές περιόδους: 1993-2000 και 2013-2018. Για κάθε εικόνα LST και NDVI, υπολογίστηκε η μέση τιμή των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης. Σε περίπτωση δύο δορυφορικών διελεύσεων ανά μήνα, υπολογίστηκε μία τιμή ανά μήνα, χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή LST ή NDVI. Στις χρονοσειρές παρατηρήθηκαν ελλιπείς τιμές λόγω των απεικονίσεων που απορρίφθηκαν κατά τον ποιοτικό έλεγχο. Για τη συμπλήρωση των ελλιπών τιμών, εφαρμόστηκαν δυο μέθοδοι: i) η κλασική παρεμβολή του κινητού μέσου όρου και ii) το φίλτρο εξομάλυνσης Kalman [Moritz S. and Bartz-Beielstein T., 2017] και έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, με βάση την οποία προκρίθηκε η μέθοδος παρεμβολής με το φίλτρο Kalman, για τη συμπλήρωση των ελλιπών τιμών και την ενημέρωση των τιμών των χρονοσειρών.

7.2.2.3 Ανάλυση

7.2.2.3.1 Η επίδραση των ελλιπών τιμών στη χρονοσειρά

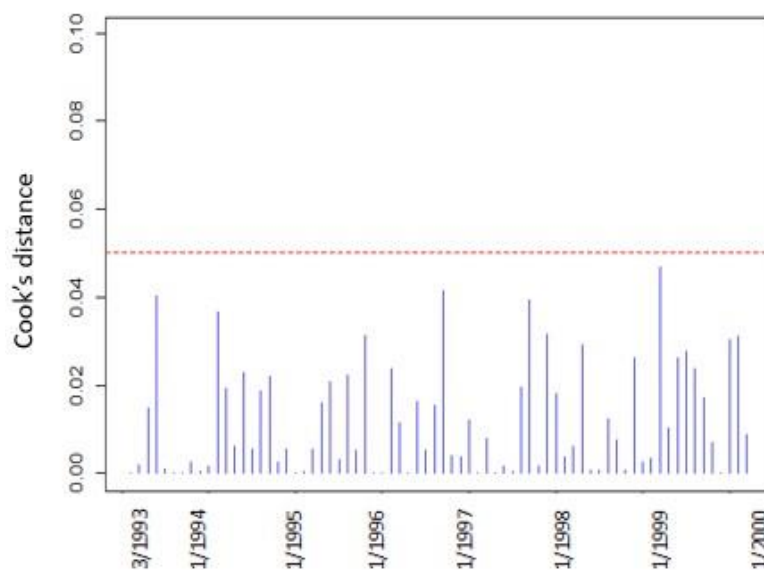
Το ποσοστό των ελλιπών τιμών ήταν 33% για τις χρονοσειρές LST και NDVI για την περίοδο 1993-2000 και 25% για τις χρονοσειρές LST και NDVI για την περίοδο 2013-2018. Ιδιαίτερα για τα έτη 1998 και 1995, οι ελλιπείς τιμές έφτασαν στο 58.3% και 41.67%, αντίστοιχα, ενώ για τα έτη 2016

και 2015 έφτασαν στο 41,7% και 33,4% αντίστοιχα. Το φίλτρο Kalman δημιούργησε πολύ λιγότερα σημεία επιρροής (Εικόνα 7-3b) έναντι της παρεμβολής του κινητού μέσου όρου ((Εικόνα 7-3a) και παρήγαγε πιο ομαλά γραφήματα (Εικόνα 7-3c). Στην (Εικόνα 7-3b) το σημείο 22 που αντιστοιχεί στην παρατήρηση του Δεκεμβρίου 1994 (βλέπε Εικόνα 7-3c), εμφανίζεται ως σημείο επιρροής, με απόσταση Cook περίπου 0.16 που είναι πολύ υψηλότερη από το ανώτερο όριο του επιπέδου εμπιστοσύνης 0.05 που αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη γραμμή στο διάγραμμα. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι παρατηρήσεις 21 και 23, που βρίσκονται εκατέρωθεν της 22, αντιπροσωπεύουν ελλιπείς τιμές στη χρονοσειρά, οι οποίες έχουν συμπληρωθεί από το φίλτρο Kalman. Είναι πολύ πιθανό, η επιρροή της παρατήρησης 22 στον πίνακα Hat να αυξήθηκε από την ασυνέχεια και την αστάθεια των γειτονικών τιμών 21 και 23. Επιπλέον, η παρατήρηση 10 αντιστοιχεί στην τιμή LST του Δεκεμβρίου 1993 και αποτελεί επίσης ελλιπή τιμή στα δεδομένα της αρχικής χρονοσειράς. Εδώ, η επίδραση της παρατήρησης 10, είναι γραφικά εμφανής στην (Εικόνα 7-3c), όπου υπάρχει μια αξιοσημείωτη μετακίνηση του σημείου 10, μετά την εφαρμογή του φίλτρου Kalman σε σχέση με την παρεμβολή MA.



Εικόνα 7-3: Διαγράμματα σχετικά με τη χρονοσειρά LST 1993-2000: (a) της απόστασης Cook με τιμές παρεμβολής από την μέθοδο του Κινητού Μέσου Όρου (MA), (b) της απόστασης Cook με τιμές παρεμβολής από το φίλτρο Kalman, (c) συγκριτικό γράφημα όπου με μπλε χρώμα είναι οι τιμές από την μέθοδο MA και με κόκκινο χρώμα οι τιμές μετά την παρεμβολή του φίλτρου Kalman. Τα σημεία που φαίνονται με βέλη είναι αυτά με μεγάλη επιρροή όπως υποδεικνύεται από την απόσταση Cook.

Στην Εικόνα 7-3α, τα σημεία 32, 43, 53, 73 και 77 που αντιστοιχούν στις παρατηρήσεις LST για τον Οκτώβριο του 1995, τον Σεπτέμβριο 1996, τον Ιούλιο 1997, τον Μάρτιο 1999 και τον Ιούλιο 1999, αντίστοιχα, εμφανίζονται ως σημεία επιρροής και είναι σημαντικά υψηλότερα από το επίπεδο εμπιστοσύνης 0.05. Αυτά τα σημεία σημειώνονται επίσης με βέλη στην Εικόνα 7-3c και δεν φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντική αλλαγή στη γραφική αναπαράσταση της χρονοσειράς, επομένως δεν φαίνεται να έχουν ενδιαφέρον σε αντίθεση με τα σημεία 10 και 22 που επηρεάζουν τα γειτονικά σημεία τους. Τα σημεία 10 και 22 αφαιρέθηκαν από την αρχική χρονοσειρά και (επανα)εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας το φίλτρο Kalman. Η απόσταση Cook η οποία προήλθε από την ενημερωμένη χρονοσειρά (Εικόνα 7-4), δεν έδειξε σημεία επιρροής.

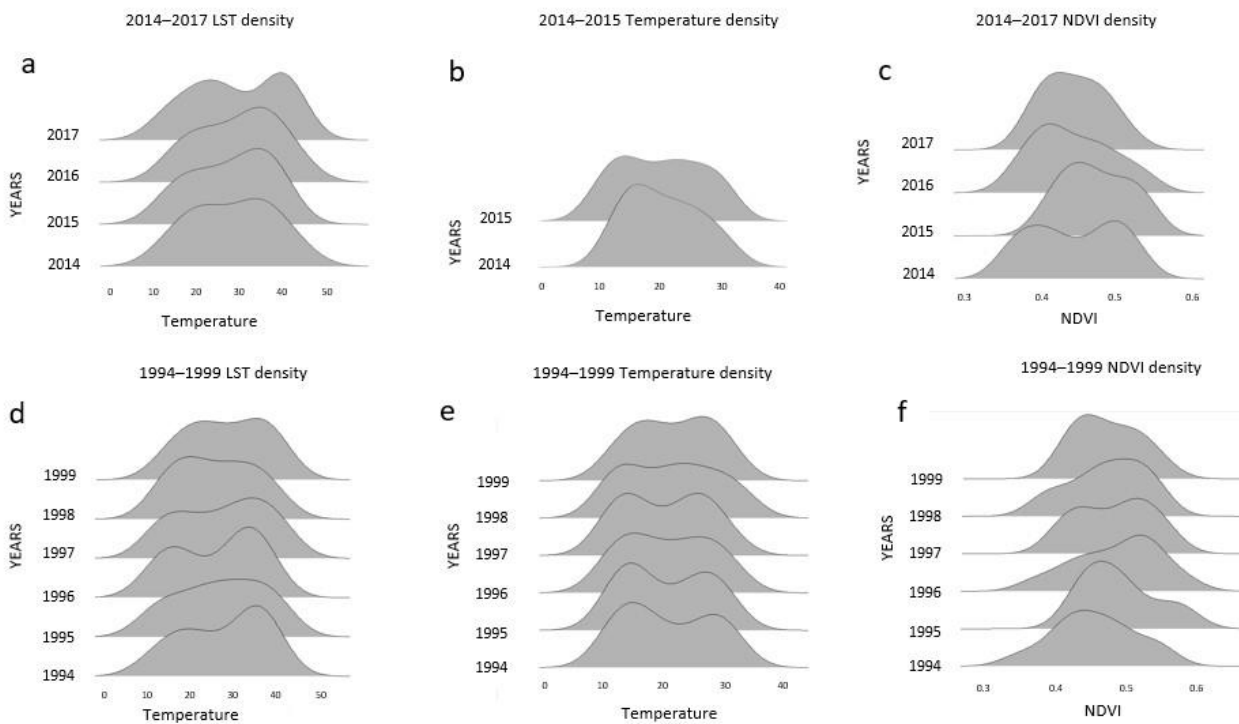


Εικόνα 7-4: Η απόσταση Cook για την πλήρη χρονοσειρά LST 1993-2000, έπειτα από την αφαίρεση των σημείων 10 και 22 και την (επανα)εκτίμηση μετά την πλήρωση των ελλυπών τιμών με το φίλτρο Kalman.

7.2.2.3.2 Ετήσια διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας και βασικά στατιστικά στοιχεία για τις χρονοσειρές

Για την παρατήρηση και ερμηνεία της ετήσιας κατανομής των χρονοσειρών LST, NDVI και θερμοκρασίας αέρα, δημιουργήθηκαν (Εικόνα 7-5) ετήσιες γραφικές παραστάσεις πυκνότητας³² πιθανότητας (Probability Density Function, PDF). Τα διαγράμματα πυκνότητας δημιουργήθηκαν για τα έτη 1994-1999 για τις χρονοσειρές LST, NDVI και θερμοκρασία αέρα, για τα έτη 2014-2017 για τις LST και NDVI και για τα έτη 2014-2015 για τη χρονοσειρά της θερμοκρασίας αέρα, αφού μόνο για αυτές τις χρονικές περιόδους, ήταν διαθέσιμα κοινά δεδομένα για όλους τους μήνες.

³² Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) ή πυκνότητα (όπως ονομάζεται εναλλακτικά) μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής, είναι μια συνάρτηση της οποίας η τιμή σε οποιοδήποτε δεδομένο δείγμα (ή σημείο) στο χώρο του δείγματος, μπορεί να ερμηνευθεί ότι παρέχει μια σχετική πιθανότητα ότι η τιμή της τυχαίας μεταβλητής θα είναι κοντά σε αυτό το δείγμα.



Εικόνα 7-5: Ετήσια διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας για: (a) την χρονοσειρά LST 2014-2017, (b) την χρονοσειρά θερμοκρασίας αέρα 2014-2015, (c) την χρονοσειρά NDVI 2014-2017, (d) την χρονοσειρά LST 1994-1999, (e) την χρονοσειρά θερμοκρασίας αέρα 1994-1999 και (f) την χρονοσειρά NDVI 1994-1999.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-5b,e, οι ετήσιες κατανομές των θερμοκρασιών του αέρα είναι μίξη κανονικών κατανομών (mixture of normal distributions). Οι κατανομές των περισσότερων ετών παρουσίασαν δύο κορυφές με σχεδόν ίσες συσσωρεύσεις, μία στις χαμηλές και μία στις υψηλές θερμοκρασίες. Το δασικό οικοσύστημα φαίνεται να συμβάλλει σε αυτή την ισορροπία των θερμοκρασιών. Μόνο για τα έτη 1996 (με τυπική απόκλιση 7.76, που αποτελεί την ελάχιστη τυπική απόκλιση για την περίοδο 1994-1999) και 2014 (με τυπική απόκλιση 6.58, που επίσης είναι η ελάχιστη για την περίοδο 2013-2016), οι κατανομές των θερμοκρασιών παρουσιάστηκαν με μία κορυφή.

Τα διαγράμματα πυκνότητας της χρονοσειρών LST 1994-1999 (Εικόνα 7-5d) παρουσιάζουν κάποια ενδιαφέροντα σημεία. Το έτος 1995 (Εικόνα 7-5d) παρουσιάζει ένα γράφημα σχεδόν κανονικής κατανομής με μεγάλη διασπορά, ενώ για τα άλλα έτη το γράφημα δείχνει ένα μείγμα δύο κατανομών με μετατόπιση προς τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Για το έτος 1998, η μίξη των κατανομών φαίνεται σχεδόν ισορροπημένη, προσπαθώντας να αποκτήσει ενιαία κορυφή. Η μορφή αυτών των διαγραμμάτων αντικατοπτρίζει πιθανότατα την επίδραση της (συμ)πλήρωσης των πολλών ελλειπών τιμών από το φίλτρο Kalman στις χρονικές σειρές, επειδή για τα έτη 1995 και 1998, υπήρχαν ελλειπείς τιμές σε πολύ υψηλά ποσοστά στα αρχικά δεδομένα, της τάξεως του 58.3% και 41.67%, αντίστοιχα, και οι τιμές από το φίλτρο Kalman ανατροφοδοτούν τις χρονοσειρές από βέλτιστα σημεία τα οποία ενσωματώνονται ομαλά με τις υπόλοιπες τιμές.

Ανάλογη παρατήρηση επιβεβαιώνεται και στα διαγράμματα της χρονοσειράς LST 2014-2017 (Εικόνα 7-5a), όπου στα έτη με τις περισσότερες ελλειπείς τιμές (41.7% το 2016 και 33.4% το

2015) τα διαγράμματα πυκνότητας παρουσίασαν μεγαλύτερη εξομάλυνση στη μορφή της καμπύλης τους. Τα περισσότερα (για τα έτη 2014, 2015 και 2016) από τα διαγράμματα πυκνότητας του NDVI, έδειξαν μια μίξη κατανομών που τείνει να αποκτήσει ενιαία κορυφή και γράφημα λοξής κανονικής κατανομής. Εξάιρεση στα ανωτέρω, αποτελούν τα γραφήματα πυκνότητας των ετών 1996 και 2017 που παρουσιάζουν δύο κορυφές.

Στατιστικά πρώτης τάξης των χρονοσειρών, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7-1**. Για την άμεση σύγκρισή τους, το συνολικό δείγμα των 292 μετεωρολογικών παρατηρήσεων προσαρμόστηκε στη χρονική κλίμακα των χρονοσειρών LST. Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες του αέρα στη δασική περιοχή, έδειξαν σχεδόν σταθερή μέση αρνητική απόκλιση περίπου 6.50 βαθμών από την αντίστοιχη μέση τιμή LST. Μια παρόμοιας τάξης απόκλιση, αναφέρεται επίσης στην εργασία [Mutibwa, D. et al, 2015].

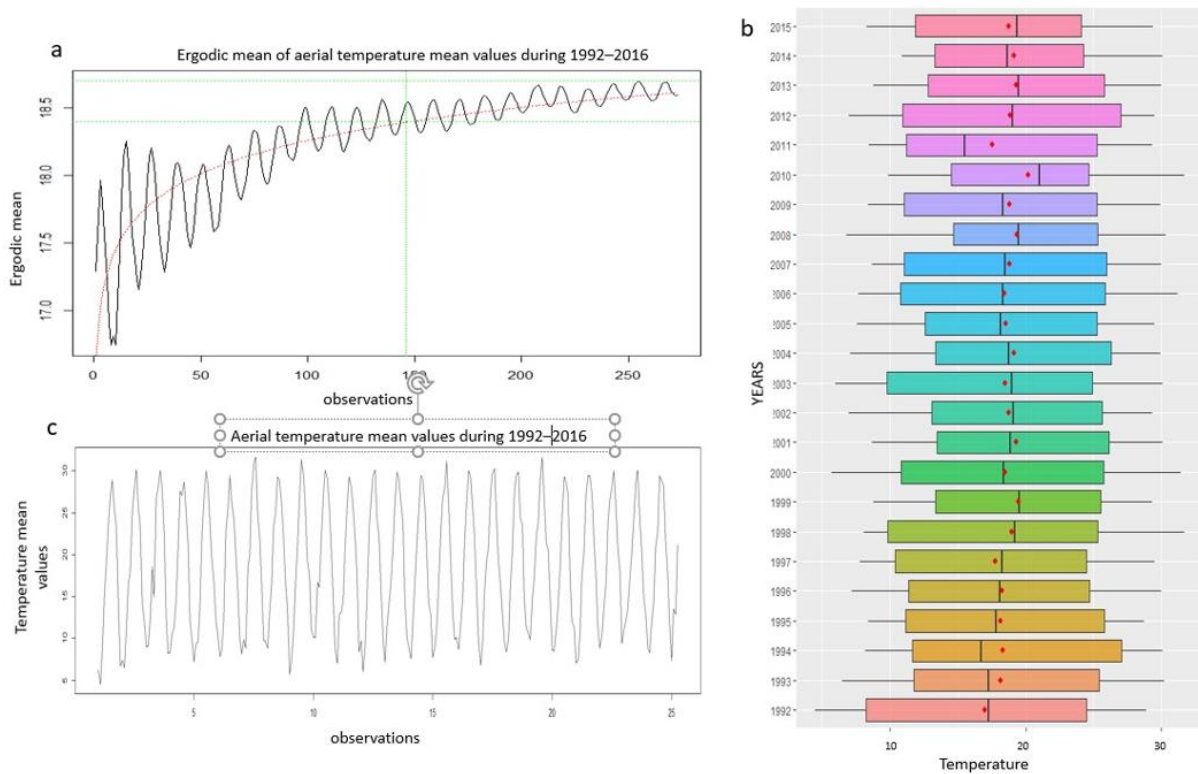
Πίνακας 7-1: Βασικά στατιστικά στοιχεία για τις χρονοσειρές LST, NDVI και θερμοκρασίας αέρα

Time Series	Min.	1st Quantile	Median	Mean	3rd Quantile	Max.	Stdev
LST 1993-2000	8.40	18.38	25.50	24.89	32.25	36.80	7.722
NDVI 1993-2000	0.34	0.41	0.45	0.45	0.49	0.55	0.049
aerial 1993-2000	5.70	10.57	18.20	18.44	25.50	31.70	7.755
LST 2013-2018	9.50	17.32	25.85	25.01	32.73	38.60	8.892
NDVI 2013-2018	0.47	0.52	0.56	0.56	0.59	0.63	0.044
aerial 2013-2016	7.30	13.10	19.05	19.00	24.43	30.10	7.108

Οι μέσες τιμές της χρονοσειράς LST και αυτής της θερμοκρασίας του αέρα για τη δεύτερη χρονική περίοδο, παρουσίασαν αύξηση σε σχέση με αυτές της πρώτης χρονικής περιόδου. Ωστόσο, επειδή οι δύο χρονοσειρές LST προήλθαν από δεδομένα που καταγράφηκαν σε ελαφρώς διαφορετικές φασματικές περιοχές, λόγω διαφοράς στους αισθητήρες του Landsat-5 έναντι του Landsat-8, θα αποφύγουμε την άμεση σύγκρισή τους.

7.2.2.3.3 Παρατηρήσεις επί των τάσεων των χρονοσειρών

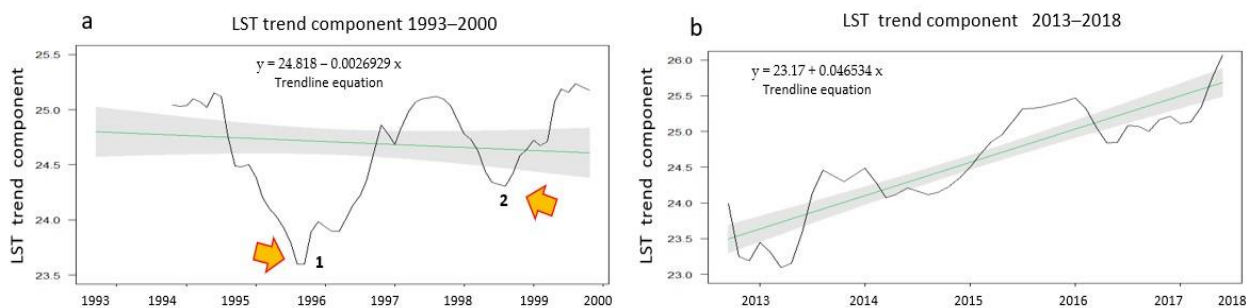
Σύμφωνα με το μοντέλο της προσθετικής αποσύνθεσης, η γραμμική εξίσωση που περιγράφει τη συνιστώσα τάσης όπως προκύπτει από την αποσύνθεση, είναι $y = 18.244 + 0.0031197x$. Εξετάζοντας ολόκληρη τη χρονοσειρά της θερμοκρασίας του αέρα (Εικόνα 7-6b, c), δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ των ετήσιων τιμών των θερμοκρασιών αέρα. Ωστόσο, με μια πιο προσεκτική ματιά στο διάγραμμα του εργοδικού μέσου όρου (Εικόνα 7-6a), εμφανίζεται μια ελαφρώς ανοδική τάση. Αυτή η παρατήρηση, συμφωνεί με την ανοδική τάση της τάξης του 0.3%, που υποδεικνύεται από τον συντελεστή (0.0031197) της εξίσωσης της συνιστώσας τάσης. Η παρατηρούμενη τάση είναι επίσης σε συμφωνία με την ανάλυση του Τμήματος Μετεωρολογίας Κύπρου [SOER Country profile - Distinguishing Factors, Cyprus, 2022] (βλέπε και 7.2.1.1).



Εικόνα 7-6: Διαγράμματα σχετικά με τη χρονοσειρά θερμοκρασίας του αέρα 1992-2016: (α) διάγραμμα εργοδικού μέσου όρου μηνιαίων τιμών, (β) διάγραμμα boxplot που δείχνει τη μέση τιμή (κόκκινη κουκίδα) και τη διάμεση τιμή (μαύρη γραμμή) και (γ) γραμμικό διάγραμμα για τις μηνιαίες τιμές.

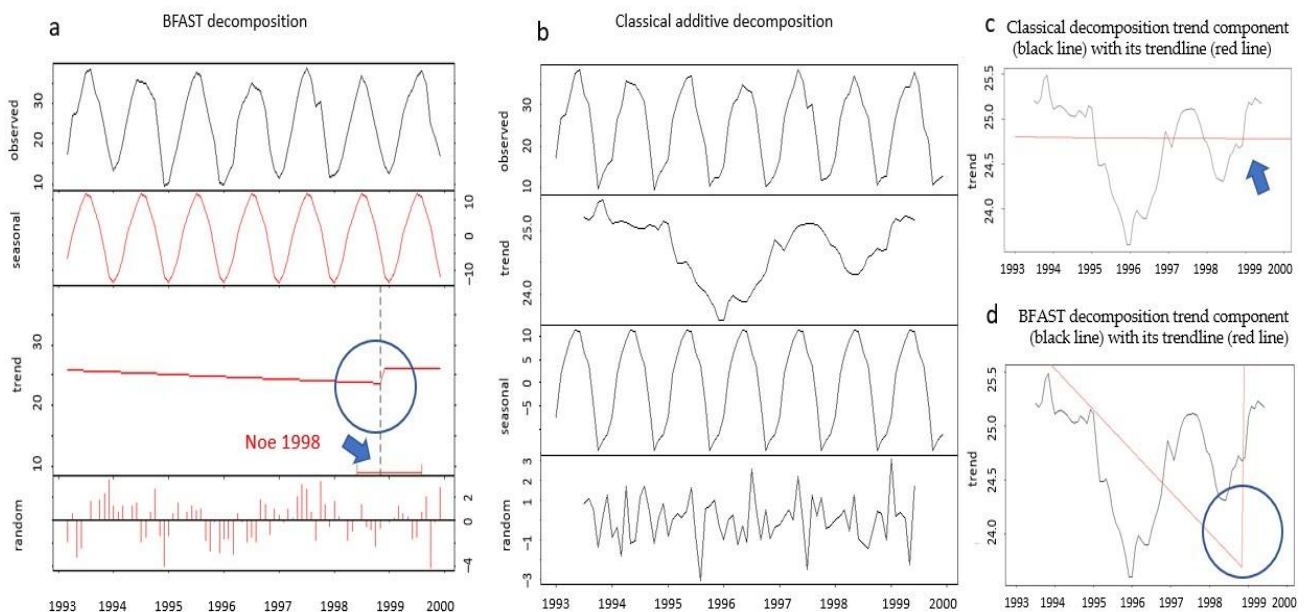
Σχετικά με τις χρονοσειρές της Θερμοκρασίας Εδάφους

Στη χρονοσειρά LST 1993-2000, η γραμμή τάσης ($y = 24.818 - 0.026929x$) είχε αρνητική κλίση 2.7%, (Εικόνα 7-7α). Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από τις θερμοκρασίες του αέρα. Τα έτη 1992, 1993 και 1997 ήταν τα πλέον κρύα της δεκαετίας 1990-2000. Επιπλέον, το 1992, οι βροχοπτώσεις ήταν σημαντικά περισσότερες και μεγαλύτερες σε σχέση με τις “κανονικές” βροχοπτώσεις στην περιοχή μελέτης, ενώ το 1993 παρουσιάζει επίσης μια μικρή αύξηση σε σχέση με τις “κανονικές βροχοπτώσεις” (βλέπε και 7.2.1.1).



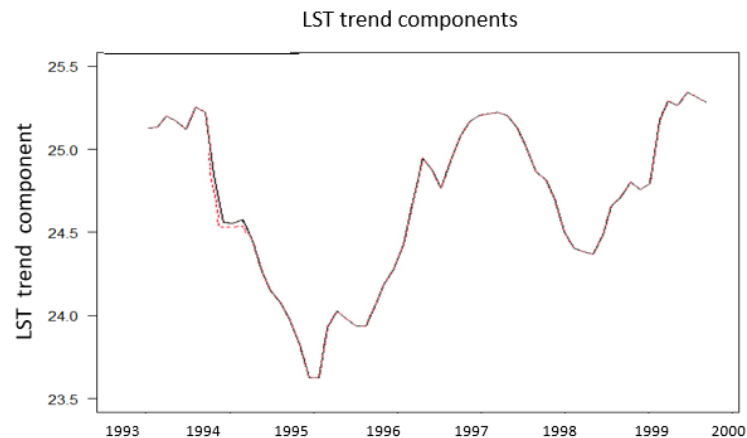
Εικόνα 7-7: Διαγράμματα για τη συνιστώσα τάσης μετά την αποσύνθεση: (α) Η γραμμή τάσης (με μπλε χρώμα) για τη χρονοσειρά 1993-2000 με εξίσωση $y = 24.818 - 0.026929x$. Τα βέλη δείχνουν τις περιοχές των σημείων μεταβολής στην τάση και (β) η γραμμή τάσης (με μπλε χρώμα) για τη χρονοσειρά 2013-2018 με εξίσωση $y = 23.17 + 0.046534x$.

Στη χρονοσειρά LST 1993-2000, μια ασυνήθιστη αύξηση της συνιστώσας τάσης LST εντοπίστηκε από τον αλγόριθμο BFAST τον Νοέμβριο του 1998 (Εικόνα 7-8a,c,d), η οποία σημειώνεται με ένα βέλος στην Εικόνα 7-8a. Αποτελεί σημείο που σηματοδότησε μια στατιστικά σημαντική μεταβολή στη γραμμή τάσης και συμπίπτει με το σημείο 2 στην Εικόνα 7-7a. Για την ερμηνεία αυτού του αποτελέσματος, εξετάστηκαν οι μέσες ετήσιες τιμές της χρονοσειράς LST για τα έτη 1998 και 1999. Παρατηρήθηκε ένας μέσος όρος 23.73 °C για το 1998, ο οποίος αυξήθηκε σημαντικά σε 26.09 °C για το έτος 1999. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αύξηση στις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του αέρα για τα έτη 1998 και 1999, όπου η θερμοκρασία του αέρα από 19.00 °C αυξήθηκε στους 19.46 °C αντίστοιχα. Το σημείο 1 στην Εικόνα 7-7a, που αντιστοιχεί στον Αύγουστο του 1995, δεν ανιχνεύθηκε ως σημείο στατιστικά σημαντικής μεταβολής από τον αλγόριθμο BFAST. Εξετάζοντας τις τιμές LST, παρατηρήθηκε ότι τα έτη 1994, 1995 και 1996 παρουσιάζουν κατά μέσο όρο θερμοκρασίες για τον αέρα 25.40 °C, 24.71 °C και 23.93 °C, αντίστοιχα, παρουσιάζοντας μια μάλλον ομαλή μείωση της τάσης. Ο αλγόριθμος BFAST, επομένως, έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα, υποδεικνύοντας ότι απαιτείται περαιτέρω ανάλυση στη γραμμή τάσης μετά την αποσύνθεση, για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τα στατιστικά σημαντικά σημεία στην τάση της χρονοσειράς LST 1993-2000. Σχετικά με τη χρονοσειρά LST 2013-2018, η γραμμή τάσης είχε μια σαφώς ανοδική κλίση ($y = 23.17 + 0.046534x$) 4.6%, ενώ δεν παρουσιάζει αξιόλογες μεταβολές (Εικόνα 7-7b) όπως υπέδειξε και ο αλγόριθμος BFAST ο οποίος επίσης δεν ανίχνευσε σημεία στατιστικά σημαντικών αλλαγών (θετικών ή αρνητικών).



Εικόνα 7-8: Εφαρμογή του αλγόριθμου BFAST για τη χρονοσειρά LST 1993-2000: (a) Η αποσύνθεση BFAST ανιχνεύει ένα σημείο στατιστικά σημαντικής μεταβολής της τάσης, που εμφανίζεται στον μπλε κύκλο πάνω από τη γραμμή τάσης (κόκκινη γραμμή), (b) κλασική αποσύνθεση της ίδιας χρονοσειράς με βάση το προσθετικό μοντέλο, (c) η συνιστώσα τάσης από την αποσύνθεση (μαύρη γραμμή) με τη γραμμή τάσης της (κόκκινη γραμμή) και το βέλος να δείχνει το σημείο που αξιολογήθηκε ως στατιστικά σημαντική μεταβολή και (d) η συνιστώσα τάσης (μαύρη γραμμή) σε επίθεση από τη γραμμή τάσης από τον αλγόριθμο BFAST (κόκκινη γραμμή) με τον μπλε κύκλο να υποδηλώνει τη σημαντική μεταβολή.

Το προσθετικό μοντέλο της αποσύνθεσης των χρονοσειρών και ο αλγόριθμος BFAST εφαρμόστηκαν επίσης στη χρονοσειρά LST 1993-2000, στην οποία οι τιμές των σημείων επιρροής 10 και 22 αντικαταστάθηκαν από νέες τιμές που (επανα)υπολογίστηκαν από το φίλτρο Kalman (βλέπε και 7.2.2.3.1 και την Εικόνα 7-9). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα νέα σημεία που αντικατέστησαν τα σημεία πολύ μεγάλης επιρροής, άλλαξαν τοπικά και πολύ ελαφρά την τάση της χρονοσειράς και τα σημεία στατιστικής μεταβολής που υποδεικνύονταν από τον αλγόριθμο BFAST παρέμειναν τα ίδια με αυτά που παρουσιάζονται στην Εικόνα 7-7a.

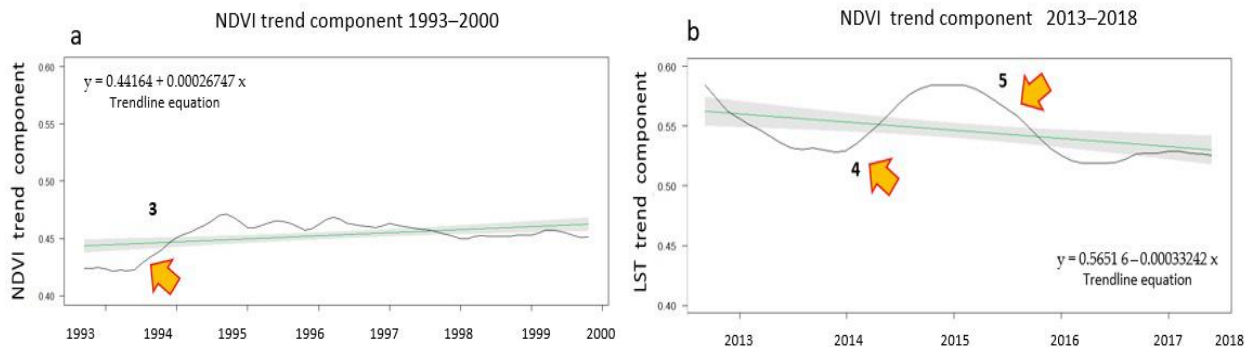


Εικόνα 7-9: Η συνιστώσα της τάσης από την κλασική αποσύνθεση με βάση το προσθετικό μοντέλο, για τη χρονοσειρά LST 1993-2000 που (επανα)υπολογίστηκαν οι ελλειπείς τιμές έπειτα από την αφαίρεση των τιμών μεγάλης επιρροής (με μαύρο χρώμα) και σε επίθεση (με κόκκινο χρώμα) η συνιστώσα της τάσης από την κλασική αποσύνθεση με βάση το προσθετικό μοντέλο της ίδιας χρονοσειράς που περιέχει τα σημεία επιρροής.

Στη χρονοσειρά LST 2013-2018, η γραμμή τάσης έχει σαφή ανοδική κλίση ($y = 23.17 + 0.046534x$) 4.6%, (Εικόνα 7-7b), ενώ δεν παρουσιάζει απότομες μεταβολές. Ο αλγόριθμος BFAST επίσης δεν αποκάλυψε σημάδια σημαντικών μεταβολών (θετικών ή αρνητικών).

Σχετικά με τις χρονοσειρές του Δείκτη Βλάστησης

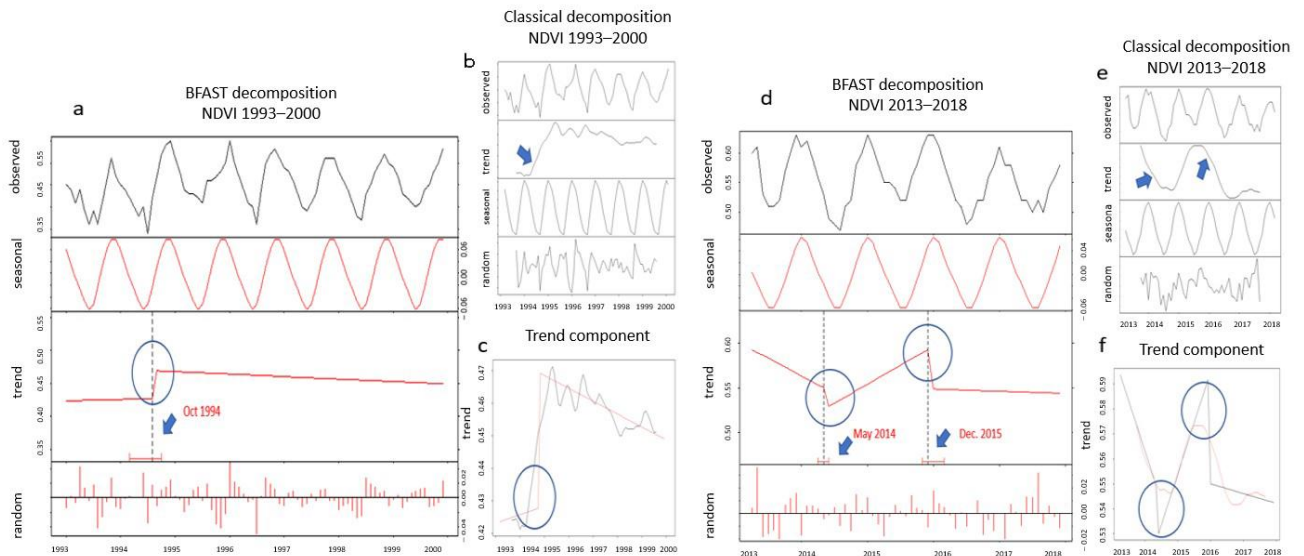
Στη χρονοσειρά NDVI 1993-2000, παρατηρήθηκε ελαφρά ανοδική τάση 0.02% ($y = 0.44164 + 0.00026747x$), (Εικόνα 7-10a). Η μέση τιμή του δείκτη NDVI κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ήταν 0.45, ενώ δεν πρέπει να αγνοηθεί μια στατιστικά σημαντική μεταβολή της συνιστώσας τάσης που σημειώθηκε τον Οκτώβριο του 1994 (σημείο 3 στην Εικόνα 7-10). Στη χρονοσειρά NDVI 2013-2018, υπήρξε πτωτική τάση ($y = 0.56516 - 0.00033242x$) της τάξης του 0.03% (Εικόνα 7-10b). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η μέση τιμή του NDVI ήταν 0.56, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές NDVI που προέκυψαν από τις εικόνες Landsat-8 είναι γνωστό ότι είναι υψηλότερες από αυτές του Landsat-5 [Vogelmann J.E., 2001; Xu D., 2014], επομένως αυτές οι μέσες τιμές NDVI δεν συγκρίνονται άμεσα. Όσον αφορά τη χρονοσειρά NDVI 2013-2018, εντοπίστηκαν δύο ενδιαφέρουσες μεταβολές στη συνιστώσα τάσης: μία τον Μάιο του 2014 και μία τον Δεκέμβριο του 2015 (σημεία 4 και 5 στην Εικόνα 7-10b).



Εικόνα 7-10: Η συνιστώσα τάσης της χρονοσειράς του NDVI μετά την κλασική αποσύνθεση: (α) Η γραμμή τάσης (με μπλε χρώμα) για τη χρονοσειρά 1993-2000 με εξίσωση $y = 0.44164 + 0.00026747x$ και (β) η γραμμή τάσης (με μπλε χρώμα) για τη χρονοσειρά 2013-2018 με εξίσωση $y = 0.56516 - 0.00033242x$. Τα βέλη δείχνουν τις περιοχές με τα σημεία στατιστικά σημαντικών μεταβολής των τάσεων, όπως ανιχνεύονται από τον αλγόριθμο BFAST.

Ο αλγόριθμος BFAST εντόπισε στατιστικά σημαντικές μεταβολές στην τάση των χρονοσειρών NDVI (Εικόνα 7-11). Συγκεκριμένα στη χρονοσειρά NDVI 1993-2000, εντοπίστηκε σημαντική μεταβολή τον Οκτώβριο του 1994 (Εικόνα 7-11a,b,c). Ο Οκτώβριος είναι ο μήνας που οι αιθαλείς θάμνοι και τα γεώφυτα αντανακλούν αρκετά στις υπέρυθρες περιοχές του φάσματος και δρουν ανταγωνιστικά στα δέντρα. Συνήθως, υψηλές τιμές NDVI παρατηρούνται αυτόν τον μήνα σε δασικές περιοχές λόγω της ανάπτυξης θάμνων και γεωφύτων. Τα υψηλά επίπεδα βροχόπτωσης κατά τα έτη 1992 και 1993 πιθανότατα συνέβαλαν στην αύξηση των θάμνων στη δασική περιοχή, η οποία υποδηλώθηκε από μια σημαντική αύξηση των τιμών NDVI τον Οκτώβριο του 1994. Μετά από αυτό, οι τιμές NDVI διατηρήθηκαν σχεδόν σταθερές, με μια ανεπαίσθητη μείωση, ενδεικτική των κλιματολογικών επιπτώσεων (που ακολουθούν το μήνα Οκτώβριο) στη βλάστηση. Για τη χρονοσειρά NDVI 2013-2018 (Εικόνα 7-11d,e,f), ο αλγόριθμος BFAST εντόπισε δύο σημεία στατιστικά σημαντικών μεταβολών στη βλάστηση. Το πρώτο αφορούσε την περίοδο του Μαΐου του 2014, όπου παρατηρήθηκε σημαντική αυξητική τάση του NDVI, έως το Δεκέμβριο του 2015. Αυτό μπορεί να συνδέεται με μειωμένη δράση της κάμπιας *Thaumetopoea pityocampa*, λόγω χαμηλών θερμοκρασιών κατά τους φθινοπωρινούς μήνες. Συγκεκριμένα, το φθινόπωρο του 2013 η μέση θερμοκρασία ήταν 14.70 °C, το φθινόπωρο του 2014 η μέση θερμοκρασία μειώθηκε στους 13.35 °C, ενώ το φθινόπωρο του 2015 η μέση θερμοκρασία ανήλθε στους 15,62 °C. Επιπλέον, σημαντική ποσότητα βροχοπτώσεων τον Μάιο του 2014 (49.2 mm) ευνόησε την ανάπτυξη της βλάστησης. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας εδάφους από 22.9 °C (Απρίλιος 2014) σε 27.6 °C (Μάιος 2014) και της μέσης θερμοκρασίας του αέρα από 17.2 °C (Απρίλιος 2014) σε 20.1 °C (Μάιος 2014), δημιούργησε επίσης πολύ ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη της βλάστησης. Το δεύτερο σημείο στατιστικά σημαντικής μεταβολής, ανιχνεύθηκε τον Δεκέμβριο του 2015 (Εικόνα 7-11d). Υπήρξε αξιοσημείωτη μείωση στις τιμές της τάσης μετά τον Δεκέμβριο του 2015, η οποία συμφωνεί με την απώλεια δασικής έκτασης στην περιοχή μελέτης που έλαβε χώρα το 2016 (βλέπε και 7.2.1.1) και εντοπίστηκε και χαρτογραφήθηκε από τον διαδραστικό παγκόσμιο χάρτη δασών και τα δεδομένα αλλαγής κάλυψης δέντρων του Global Forest Watch (GFW). Αυτή η μεγάλη μείωση στην τάση του NDVI, θα μπορούσε επίσης να σχετίζεται με τις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκε εισβολή ακρίδων

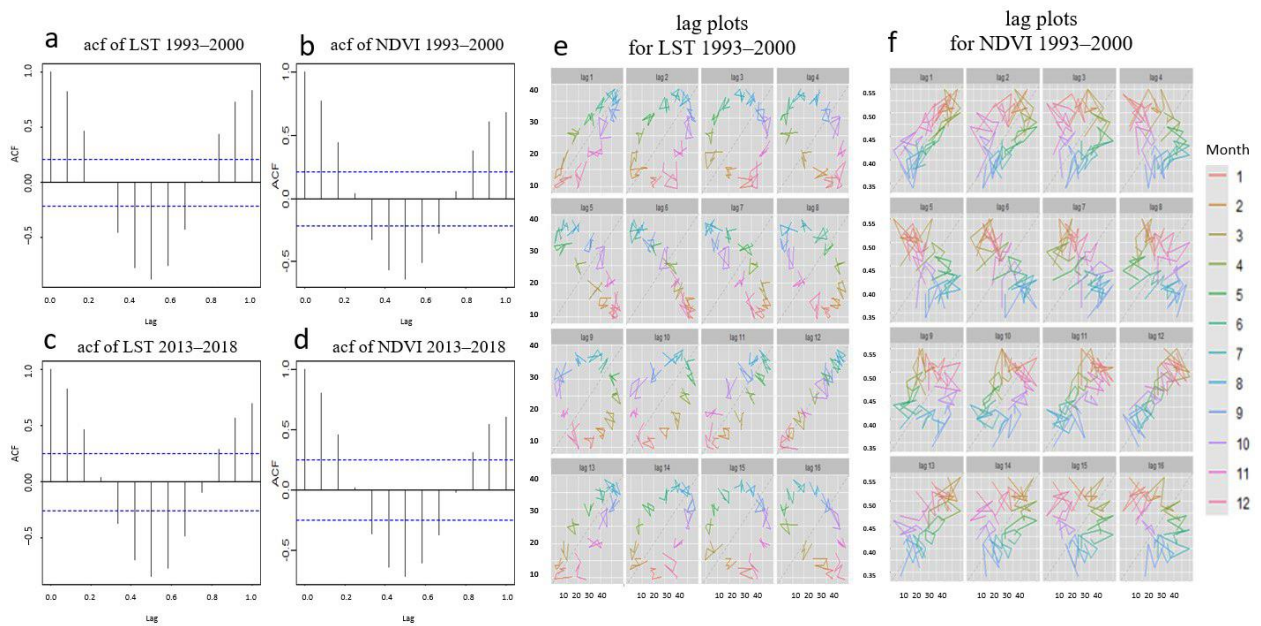
στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Ευρώπης το 2015, η οποία ήταν επίσης ένα πλήγμα για τα νησιά στο νότιο τμήμα της Μεσογείου, όπως αναφέρθηκε στον ημερήσιο τύπο διαφόρων χρωμών της περιοχής.



Εικόνα 7-11: (α) Το σημείο μεταβολής της τάσης για τη χρονοσειρά NDVI 1993-2000 σημειώνεται με τον μπλε κύκλο και η ακριβής ημερομηνία με το μπλε βέλος, (β) αποσύνθεση της χρονοσειράς NDVI 1993-2000 σύμφωνα με το προσθετικό μοντέλο. Το μπλε βέλος δείχνει την περιοχή του σημείου σημαντικής μεταβολής, (γ) η γραμμή τάσης της χρονοσειράς NDVI 1993-2000 (με μαύρο χρώμα) που επικαλύπτεται πάνω από τη γραμμή τάσης που προήλθε από τον αλγόριθμο BFAST (με κόκκινο χρώμα). Ο μπλε κύκλος υποδεικνύει το σημείο μεταβολής, (δ) Αποσύνθεση BFAST και τα δύο σημεία στατιστικά σημαντικής μεταβολής για τη χρονοσειρά NDVI 2013-2018, σημειώνονται με μπλε κύκλους, (ε) η κλασική αποσύνθεση της χρονοσειράς NDVI 2013-2018 με βάση το προσθετικό μοντέλο. Τα μπλε βέλη δείχνουν στα σημεία μεταβολής, όπως αυτά ανιχνεύθηκαν από τον αλγόριθμο BFAST στο (δ) και (φ) η γραμμή τάσης της χρονοσειράς NDVI 2013-2018 (με κόκκινο χρώμα) και με επίθεση (με μαύρο χρώμα) η γραμμή τάσης που προήλθε από τον αλγόριθμο BFAST. Με μπλε κύκλους τονίζονται τα σημεία μεταβολής, τον Μάιο του 2014 και το Δεκέμβριο του 2015.

7.2.2.3.4 Συσχετίσεις μεταξύ εδαφικής θερμοκρασίας και δείκτη βλάστησης

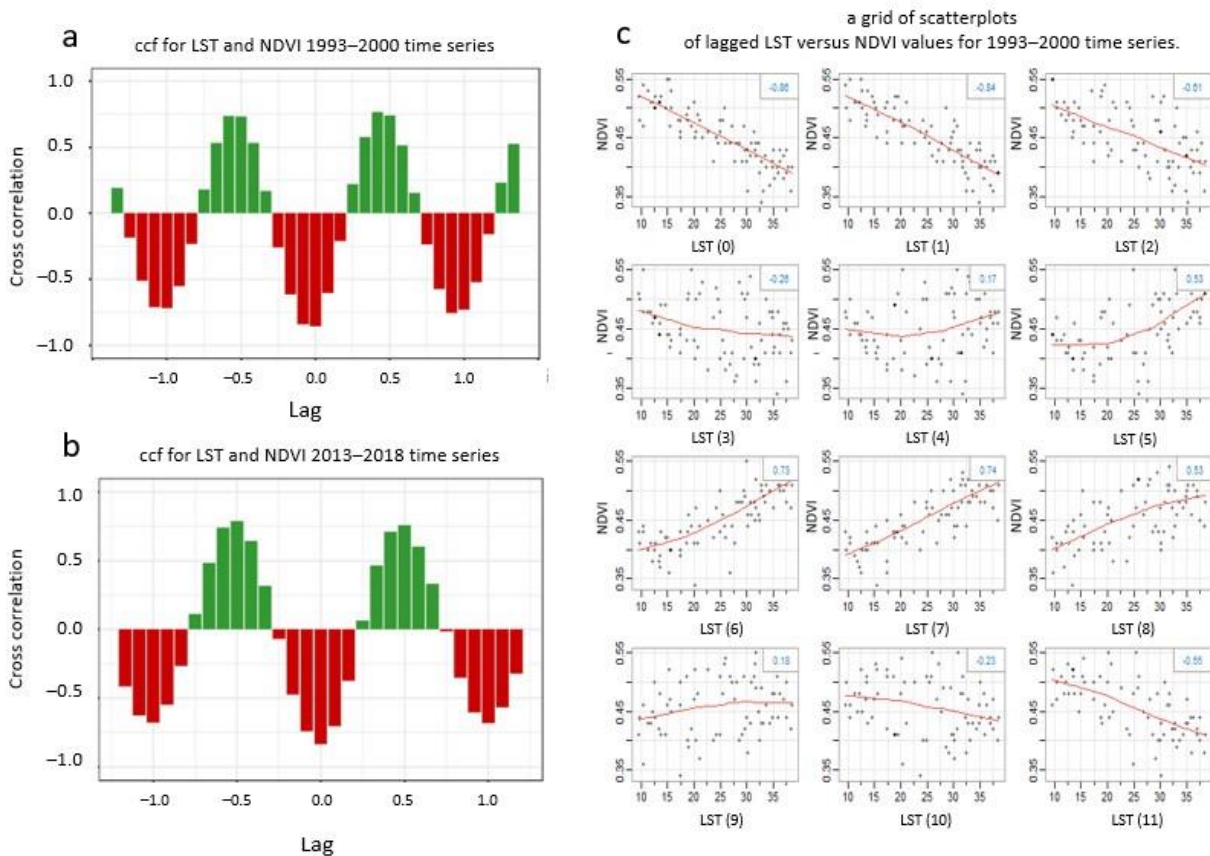
Για τις χρονοσειρές LST και NDVI 1993-2000, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (Auto Correlation Function, ACF) (Εικόνα 7-12a, b), δείχνει μια ισχυρή αρνητική συσχέτιση τον έκτο μήνα. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνεται επίσης από τα διαγράμματα (καθ)υστέρησης (Εικόνα 7-12e,f), όπου τα χρώματα είναι ενδεικτικά για τους μήνες του έτους. Γενικά στα διαγράμματα που δείχνουν υστέρηση (όπως η Εικόνα 7-12e,f και η Εικόνα 7-13c), η κλίση στα σύνολα των δεδομένων καθορίζει εάν υπάρχει συσχέτιση και η κατεύθυνση της κλίσης δείχνει εάν η συσχέτιση είναι θετική ή αρνητική. Η συσχέτιση ήταν θετική για την υστέρηση των 12 μηνών (lag12 στην Εικόνα 7-12e), αντανακλώντας την έντονη εποχικότητα στα δεδομένα ενώ υπήρξε ισχυρή αρνητική συσχέτιση για την υστέρηση των έξι μηνών (lag6 στην Εικόνα 7-12e). Παρατηρήθηκε ότι η αρνητική συσχέτιση ξεκινά από τον 5^ο μήνα (lag5) και διαρκεί έως τον 7^ο μήνα (lag7). Όσον αφορά τις χρονοσειρές LST και NDVI 2013-2018, τα αποτελέσματα ήταν πολύ όμοια (Εικόνα 7-12c,d).



Εικόνα 7-12: Γραφήματα αυτοσυσχέτισης για τη χρονοσειρά: (a) LST 1993-2000, (b) NDVI 1993-2000, (c) LST 2013-2018, (d) τη χρονοσειρά NDVI 2013-2018 και Διαγράμματα υστέρησης (για υστέρηση (lag) = 1 έως υστέρηση (lag) = 15): (e) για τη χρονοσειρά LST 1993-2000 και (f) για τη χρονοσειρά NDVI 1993-2000.

Επιπλέον, υπολογίστηκε η συνάρτηση διασταυρούμενης συσχέτισης (Cross Correlation Function, CCF) μεταξύ των μεταβλητών LST και NDVI για τη χρονική περίοδο 1993-2000, μετά την κανονικοποίηση των τιμών τους [Schachat, S.R. et al, 2018] για να διασφαλιστεί η ομοιομορφία και κατά συνέπεια η συγκρισιμότητα μεταξύ τους.

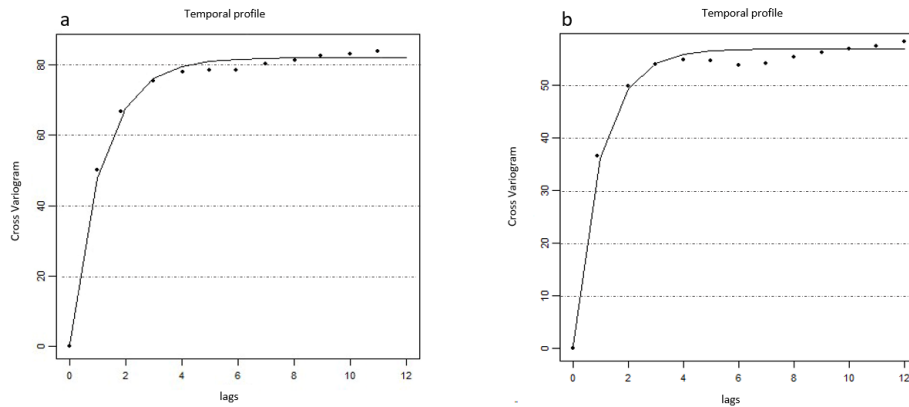
Από τη συνάρτηση διασταυρούμενης συσχέτισης, παρατηρήθηκε ισχυρή αρνητική συσχέτιση μέχρι τις τρεις πρώτες υστερήσεις (Εικόνα 7-13a,c), στη συνέχεια η συσχέτιση αντιστράφηκε σε θετική για τις ακόλουθες τρεις καθυστερήσεις (Εικόνα 7-13b,c). Εάν συγκεντρωθούν περισσότερα δεδομένα στη διαγώνιο στο διάγραμμα υστέρησης, σημαίνει ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση, όπως στην Εικόνα 7-13c για LST(0), LST(1), LST(2), LST(6) κλπ.



Εικόνα 7-13 : Διάγραμμα διασταυρούμενης συσχέτισης για τις χρονοσειρές (a) LST 1993-2000 και NDVI 1993-2000, (b) LST 2013-2018 και NDVI 2013-2018. (c) Διαγράμματα διασποράς της μεταβλητής LST της χρονοσειράς 1993-2000, έναντι της μεταβλητής NDVI στη χρονοσειρά 1993-2000.

Όσον αφορά τις χρονολογικές σειρές LST και NDVI για την περίοδο 2013-2018 (Εικόνα 7-13b), υπήρχαν ισχυρές αρνητικές διασταυρούμενες συσχετίσεις για τις δύο πρώτες (καθ)υστερήσεις. Η κυρίαρχη (μεγαλύτερη) θετική διασταυρούμενη συσχέτιση εμφανίστηκε για την υστέρηση (6), υποδηλώνοντας ότι μια υψηλή μέση τιμή LST συσχετίστηκε με την εμφάνιση μιας υψηλής μέσης τιμής NDVI με διαφορά έξι μηνών.

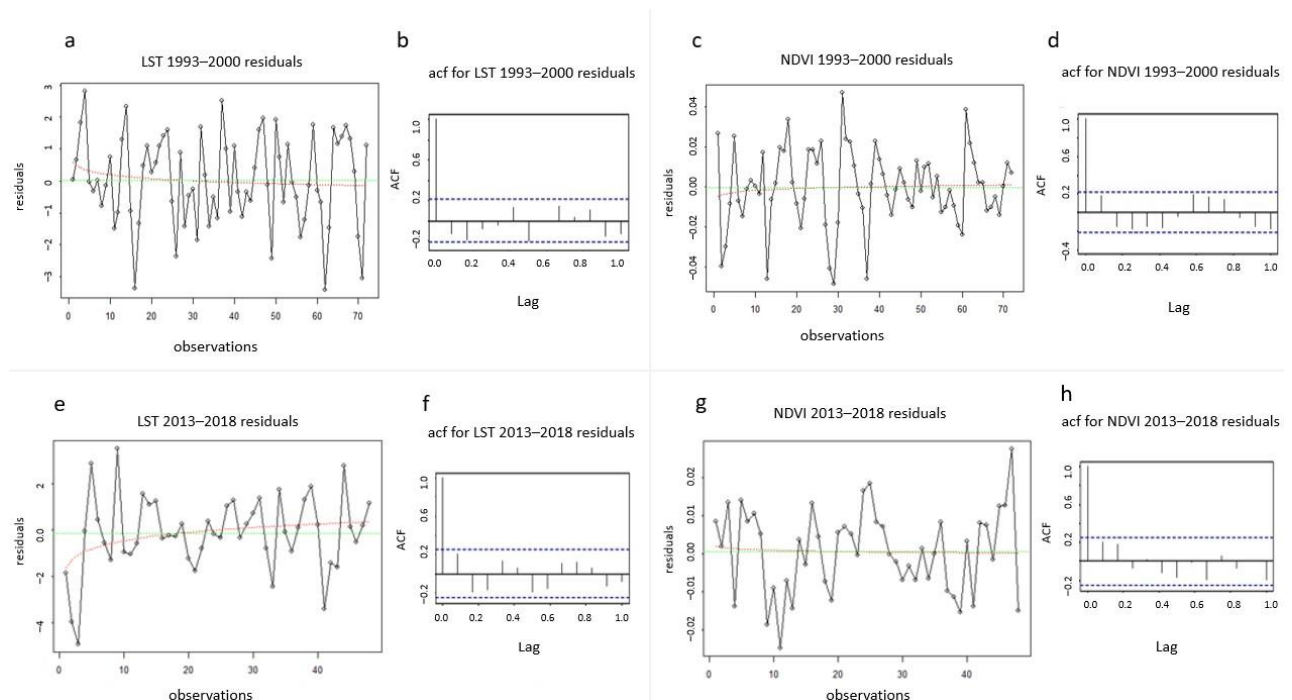
Επιπλέον, το διασταυρούμενο βαριόγραμμα των μεταβλητών LST και NDVI υπολογίστηκε για να συσχετίσει τις τιμές LST και NDVI σε διαφορετικές (καθ)υστερήσεις. Παρατηρήθηκε ένα εύρος επιρροής περίπου 5.5-6.5 μηνών για τις χρονοσειρές 1993-2000 και εμφανίστηκε θετική συσχέτιση για την υστέρηση (4), την υστέρηση (5), την υστέρηση (6), την υστέρηση (7) και την υστέρηση (8), το οποίο στη συνέχεια έγινε αρνητικό (Εικόνα 7-14a). Αυτά τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα CCF (Εικόνα 7-13), όπου οι υψηλότερες τιμές του συντελεστή διασταυρούμενης συσχέτισης εμφανίστηκαν στην υστέρηση (5) και στην υστέρηση (6) και ισχυρή θετική συσχέτιση εντοπίστηκε για την υστέρηση (5), την υστέρηση (6), την υστέρηση (7) και την υστέρηση (8). Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν για τις δυο χρονοσειρές 2013-2018.



Εικόνα 7-14: Διασταυρούμενο βαριόγραμμα για τις χρονοσειρές (a) LST και NDVI 1993-2000, (b) LST και NDVI 2013-2018.

7.2.2.3.5 Ανάλυση των καταλοίπων

Τα κατάλοιπα (υπολείμματα) της αποσύνθεσης όλων των χρονοσειρών που εξετάστηκαν σε αυτή την έρευνα, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα (Εικόνα 7-15a,c,e,g) κατανεμήθηκαν τυχαία γύρω από την τιμή 0 επιβεβαιώνοντας την ορθότητα της επιλογής του προσθετικού μοντέλου αποσύνθεσης και δεν παρουσίασαν αυτοσυσχέτιση στις χρονοσειρές LST (Εικόνα 7-15a,b,e,f) και NDVI (Εικόνα 7-15c,d,g,h), μπορούμε επομένως να ισχυριστούμε ότι οι διακυμάνσεις των συντελεστών των μοντέλου και τα τεστ υποθέσεων ήταν αμερόληπτα.

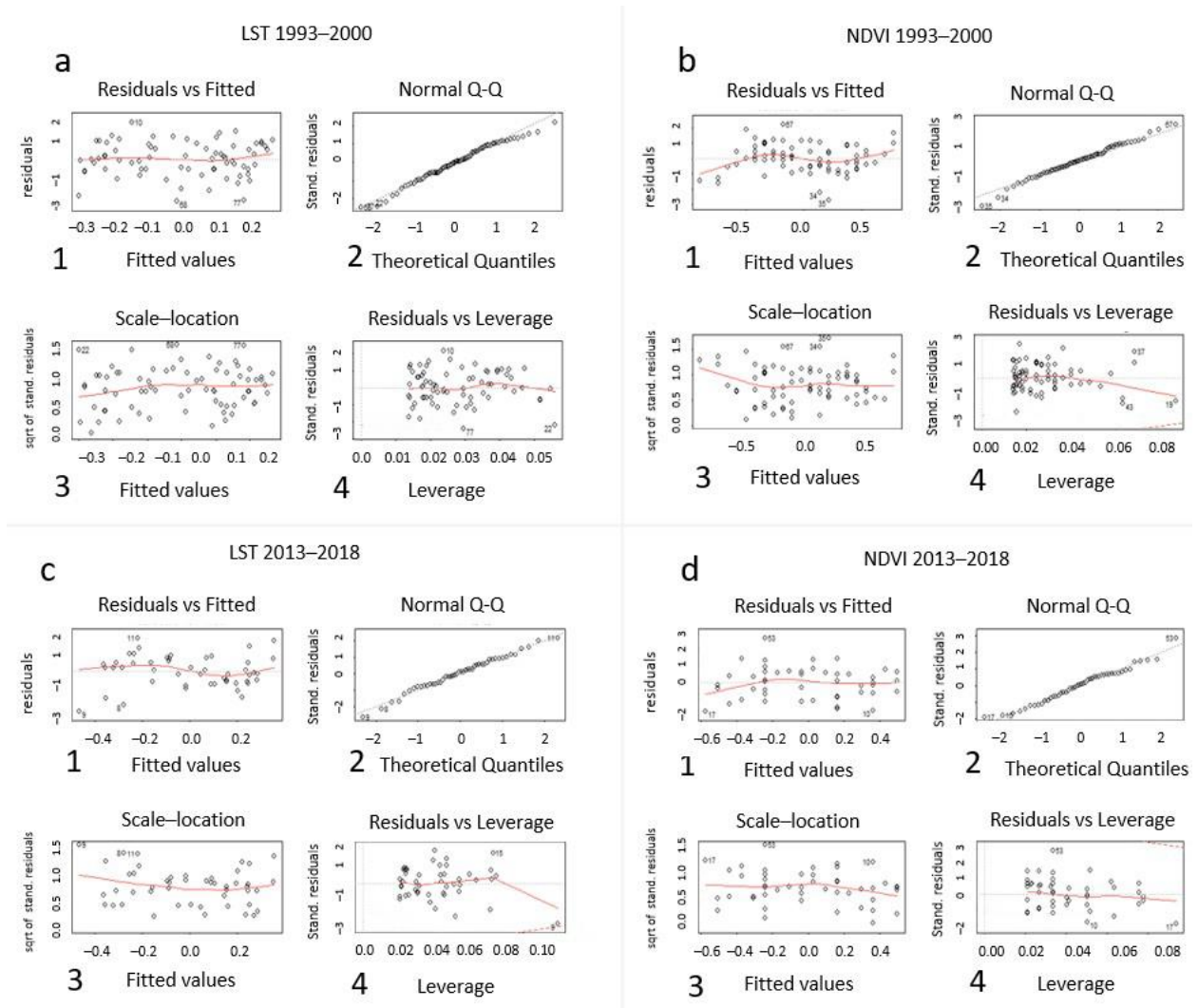


Εικόνα 7-15: (a) Γραφική παράσταση των καταλοίπων της χρονοσειράς LST 1993-2000 με τη μέση τιμή (με πράσινο χρώμα) και τον εργοδικό μέσο (με κόκκινο χρώμα), (b) γραφική παράσταση της αυτοσυσχέτισης για τα κατάλοιπα της χρονοσειράς LST 1993-2000, (c) γραφική παράσταση των καταλοίπων της χρονοσειράς NDVI 1993-2000 με τη μέση τιμή (με πράσινο χρώμα) και τον εργοδικό μέσο (με κόκκινο χρώμα), (d) γραφική παράσταση της αυτοσυσχέτισης για τα κατάλοιπα της χρονοσειράς

NDVI 1993-2000, (e) γραφική παράσταση των καταλοίπων της χρονοσειράς LST 2013-2018 με τη μέση τιμή (με πράσινο χρώμα) και τον εργοδικό μέσο (με κόκκινο χρώμα), (f) γραφική παράσταση της αυτοσυσχέτισης για τα κατάλοιπα της LST 2013-2018, (g) γραφική παράσταση των καταλοίπων της χρονοσειράς NDVI 2013-2018 με τη μέση τιμή (με πράσινο χρώμα) και τον εργοδικό μέσο (με κόκκινο χρώμα) και (h) γραφική παράσταση της αυτοσυσχέτισης για τα κατάλοιπα της χρονοσειράς NDVI 2013-2018.

Έγιναν πρόσθετοι στατιστικοί έλεγχοι για την ανάλυση των καταλοίπων (βλέπε 7.2.2), με τη δημιουργία :

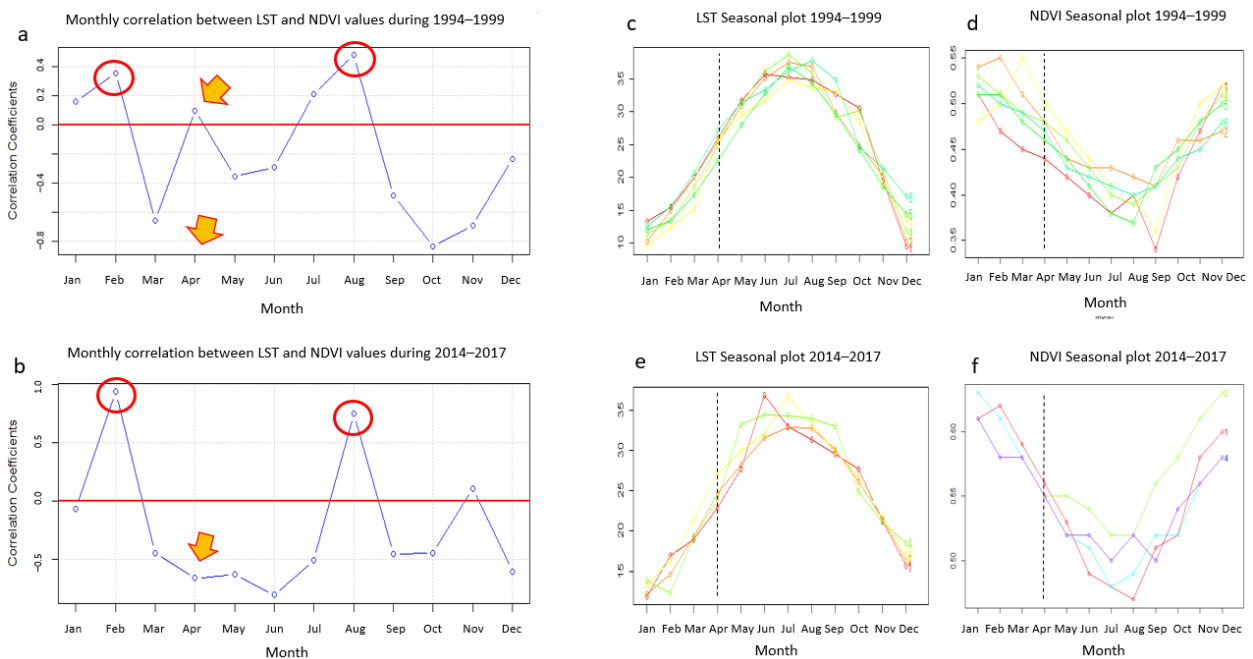
- a) διαγραμμάτων διασποράς των καταλοίπων έναντι των προσαρμοσμένων τιμών των μοντέλων αποσύνθεσης, (Εικόνα 7-16a1, b1, c1, d1), με τα κατάλοιπα στον άξονα y και τις προσαρμοσμένες τιμές στον άξονα x , που έδειξε μια γραμμικότητα και ίσες αποκλίσεις σφαλμάτων,
- b) διαγραμμάτων “Q-Q plots” τα οποία έδειξαν ότι τα κατάλοιπα των μοντέλων αποσύνθεσης (Εικόνα 7-16a2, b2, c2, d2) κατανέμονται κανονικά,
- c) διαγραμμάτων Scale – location (Εικόνα 7-16a3, b3, c3, d3), τα οποία δείχνουν σε ικανοποιητικό βαθμό, ότι η μεταβλητότητα των σφαλμάτων κατανέμεται ομοιογενώς και κατά συνέπεια, η υπόθεση της ομοσκεδαστικότητας επιβεβαιώνεται στα προσθετικά μοντέλα αποσύνθεσης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα και
- d) διαγραμμάτων Residuals - Leverage, (Εικόνα 7-16a4, b4, c4, d4), τα οποία δείχνουν με ποιον τρόπο μεταβάλλεται η εξάπλωση των τυποποιημένων καταλοίπων καθώς αυξάνεται η μόχλευση, οπότε μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν δεν παρουσιάζεται ετεροσκεδαστικότητα και εμφανίζονται ελάχιστα σημεία με υψηλή επιρροή. Αυτά είναι κυρίως σημεία μόχλευσης (δηλαδή, παρουσιάζουν τιμές που απέχουν πολύ από τον μέσο όρο) και μεταβάλλουν σε κάποιο βαθμό την κλίση της προσαρμοσμένης γραμμής του εκάστοτε μοντέλου.



Εικόνα 7-16: Οι χρονοσειρές για: (a) LST 1993-2000, (b) NDVI 1993-2000, (c) LST 2013-2018, (d) NDVI 2013-2018. Για κάθε χρονοσειρά, περιλαμβάνονται τα διαγράμματα ελέγχου: (1) Residuals vs Fitted values, (2) τα γραφήματα Q-Q plot, (3) τα διαγράμματα Scale – location και (4) τα διαγράμματα Residuals vs Leverage.

Υπολογίστηκε ο συντελεστής διασταυρούμενης συσχέτισης για τις χρονοσειρές 1993-2000 και 2013-2018 μεταξύ των καταλοίπων από την αποσύνθεση των χρονοσειρών LST και NDVI για κάθε μήνα. Η χρονοσειρά 1993-2000 έχει σημείο έναρξης τον Μάρτιο του 1993 και σημείο πέρατος τον Φεβρουάριο του 2000, ενώ η χρονοσειρά 2013-2018 έχει σημείο έναρξης τον Απρίλιο του 2013 και σημείο πέρατος τον Μάρτιο του 2018 και αυτό ίσως να επηρεάζει τα γραφικά αποτελέσματα της ανάλυσης. Για το λόγο αυτό, για την απόκτηση βέλτιστων αποτελεσμάτων και ολοκληρωμένης χρονοσειράς εποχιακού αριθμού 12μηνων παρατηρήσεων για την ανάλυση των καταλοίπων, χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές 1994-1999 και 2014-2017, έτσι ώστε να ξεκινούν τον Ιανουάριο και να ολοκληρώνονται τον μήνα Δεκέμβριο. Το επίπεδο μηδενικής συσχέτισης φαίνεται στο γράφημα με την κόκκινη οριζόντια γραμμή (Εικόνα 7-17a,b). Και για τις δύο περιόδους, τον Φεβρουάριο και τον Αύγουστο, οι τιμές των καταλοίπων συσχετίστηκαν θετικά (κόκκινος κύκλος), ενώ για όλους τους υπόλοιπους μήνες τα κατάλοιπα

ήταν αρνητικά. Εξαιρέση αποτέλεσε η συσχέτιση για τον Απρίλιο (κόκκινο βέλος), όπου η θετική τιμή 0.36 στη χρονοσειρά 1994-1999 μετατράπηκε σε αρνητική τιμή (-0.66) στη χρονοσειρά 2014-2017 (Εικόνα 7-17b). Πράγματι, μια προσεκτική παρατήρηση των εποχιακών γραφημάτων LST (Εικόνα 7-17c,e) και NDVI (Εικόνα 7-17d,f) αποκάλυψε ότι ο Απρίλιος παρουσίασε μια μέση τιμή NDVI περίπου 0.46 με μια μέση τιμή LST 26 °C για τη χρονοσειρά 1994-1999, ενώ παρουσίασε μια μέση τιμή NDVI περίπου 0.56 με μέση τιμή LST 24.5 °C για τη χρονοσειρά 2014-2017. Η μελέτη των καταλοίπων ανέδειξε αυτή την αλλαγή που δεν μπορούσε εύκολα να παρατηρηθεί στα εποχιακά γραφήματα. Είναι ενδιαφέρον ότι η υπολειμματική ανάλυση (η ανάλυση των καταλοίπων) μπορεί ενδεχομένως να αποκαλύψει αλλαγές που δεν είναι εμφανείς στα εποχιακά γραφήματα.



Εικόνα 7-17: Οι συντελεστές διασταυρούμενης συσχέτισης απεικονίζονται γραφικά μεταξύ των υπολειμμάτων LST και NDVI ανά μήνα: (a) στη χρονοσειρά 1994-1999, (b) στη χρονοσειρά 2014-2017. Εποχικά Διαγράμματα (12 μηνών) για: (c) για τη χρονοσειρά LST 1994-1999, (d) τη χρονοσειρά NDVI 1994-1999, (e) για την LST 2014-2017 και (f) για την NDVI 2014-2017. Στα διαγράμματα (c-f), υπάρχει μια μαύρη διακεκομμένη γραμμή που υποδεικνύει τον μήνα Απρίλιο, ο οποίος παρουσίασε μια μη αναμενόμενη συμπεριφορά στα διαγράμματα συσχέτισης. Οι αριθμοί 1,2,3,4,5,6 στα δεξιά των γραμμών, υποδεικνύουν τα έτη 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, για τις χρονοσειρές 1994-1999 και τα έτη 2014, 2015, 2017, για τη χρονολογική σειρά 2014-2017.

7.2.2.4 Υπολογιστικές Απαιτήσεις και Περιορισμοί

Στην έρευνα που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο έχει χρησιμοποιηθεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ανεξάρτητο από κάποια συγκεκριμένη πλατφόρμα. Οι εικόνες Landsat συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας το εργαλείο λήψης (bulk download tool) της USGS. Η προεπεξεργασία και η επεξεργασία των απεικονίσεων (δηλαδή, η απομάκρυνση των σύννεφων, οι υπολογισμοί του δείκτη NDVI και της εδαφικής θερμοκρασίας LST κλπ) πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό προγραμμάτων και script της Python και της GDAL. Η κύρια ανάλυση των

χρονοσειρών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R. Δεν υπάρχουν περιορισμοί στην επέκταση της ανάλυσης σε μεγαλύτερες περιοχές ή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αυτοί κυρίως οριοθετούνται από τις διαθέσιμες απεικονίσεις και τα ευρύτερα μετεωρολογικά δεδομένα, το χρόνο λήψης τους, το χώρο αποθήκευσής και τον χρόνο προεπεξεργασίας και επεξεργασίας τους. Ένας περιορισμός που δεν μπορεί ασφαλώς να ξεπεραστεί, είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων αυτών. Εάν αυτή η εργασία επεκταθεί σε πολύ μεγάλες περιοχές, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί παράλληλη επεξεργασία (parallel processing) για την ανάκτηση στατιστικών αποτελεσμάτων και τη δυνατότητα αποσύνθεσης μεγάλων χρονοσειρών (πχ με τον αλγόριθμο BFAST). Η προεπεξεργασία και η βασική επεξεργασία μέσω cloud, στο οποίο διατίθενται όλα τα σχετικά τηλεπισκοπικά δεδομένα ως διαθέσιμα στο διαδίκτυο, θα αύξανε σημαντικά την ταχύτητα επεξεργασίας και ανάλυσης και συνίσταται ιδιαίτερα για επεξεργασία μεγάλου πλήθους δεδομένων. Η αποσύνθεση χρονοσειρών μπορεί επίσης να καταστεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία σε R ή Python, αλλά τα αποτελέσματα πρέπει να εξεταστούν και να αξιολογηθούν προσεκτικά και όχι αυτοματοποιημένα. Μόλις γίνουν διαθέσιμα νέα δορυφορικά δεδομένα, η ανάλυση χρονοσειρών μπορεί να συμπληρωθεί με αυτόματη λήψη και επεξεργασία των νέων δεδομένων (με διεργασίες cronab ή schtasks ανάλογα την πλατφόρμα εργασίας και κατάλληλα σενάρια scripting R ή και Python) και επανεκτέλεση της ανάλυσης για να επικαιροποιηθούν τα προηγούμενα αποτελέσματα.

7.2.3 Συζήτηση και συμπεράσματα

Η προσφορά των δασικών οικοσυστημάτων για μια χώρα είναι μεγάλη και πολύπλευρη. Η κλιματική αλλαγή σχετίζεται με την υποβάθμιση των φυσικών οικοσυστημάτων, ενώ τα δάση δεν παρέχουν μόνο περιβαλλοντικά οφέλη αλλά και οικονομικά και κοινωνικά, δικαιολογώντας την ανάγκη διατήρησης υγιών δασών και τη μέριμνα της ΕΕ με σχετικές οδηγίες και νόμους [Tiainen S., 2021]. Η σύνθεση των μεσογειακών δασών αλλάζει, επομένως είναι σημαντικό να παρακολουθούμε τις τάσεις και να κατανοούμε πώς θα επηρεαστούν τα δάση μας στο μέλλον από την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Αυτό είναι σημαντικό για την προάσπιση και τη χάραξη πολιτικής, τη διατήρηση των δασών και τη διαχείριση (π.χ. δημιουργία προστατευόμενων ζωνών). Σε αυτή την έρευνα φάνηκε ότι τα μεγάλα σε πλήθος δεδομένα παρατήρησης της Γης, ειδικά τα δεδομένα απεικονίσεων Landsat, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική παρακολούθηση των μεταβολών της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης (LST) και της κατανόησης του τρόπου με τον οποίο αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν τα μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα (όπως το κωνοφόρο δάσος της Πάφου, στην Κύπρο). Ο δείκτης βλάστησης (NDVI) επιλέχθηκε ως ένας βασικός, αξιόπιστος και αποδεκτός δείκτης για τον καθορισμό της κατάστασης της βλάστησης. Καθώς τα δεδομένα του Landsat ανακτήθηκαν από διαφορετικές δορυφορικές αποστολές, η περίοδος της έρευνας χωρίστηκε σε δύο χρονικές περιόδους, σε αυτήν του 1993-2000 και σε αυτήν του 2013-2018. Οι δύο χρονοσειρές που περιέχουν τις μηνιαίες μέσες τιμές των LST και NDVI, αντίστοιχα, υπολογίστηκαν σε καθεμία από αυτές τις χρονικές περιόδους για την περιοχή μελέτης. Ελλιπείς τιμές από τη διαδοχή των τιμών των χρονοσειρών, συμπληρώθηκαν με τη χρήση του φίλτρου

Kalman, το οποίο εξομαλύνει ικανοποιητικά τη συνολική επίδραση που δημιουργείται από τις απλές παρατηρήσεις αλλά και από παρατηρήσεις υψηλής μόχλευσης. Σε αυτή την έρευνα εντοπίστηκαν μόνο δύο σημεία που ήταν έξω από τα όρια του 95% καθορισμένου διαστήματος εμπιστοσύνης, χρησιμοποιώντας την απόσταση Cook, μέσω της οποίας ανιχνεύθηκαν σημεία στατιστικής επιρροής στις χρονοσειρές και μελετήθηκε η επίδρασή τους στην αποσύνθεση και την ανάλυση καταλοίπων των χρονοσειρών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο κλασικής προσθετικής αποσύνθεσης και τον αλγόριθμο BFAST, αξιολογήθηκαν κατάλληλα με περαιτέρω στατιστικούς ελέγχους για να προκύψουν αξιόπιστα συμπεράσματα, που σχετίζονται με στατιστικά σημαντικές μεταβολές στις χρονοσειρές των LST και NDVI. Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από τις συναρτήσεις διασταυρούμενης συσχέτισης των μεταβλητών LST και NDVI και των καταλοίπων των χρονοσειρών τους, αξιολογήθηκαν και προσδιορίστηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ των χρονοσειρών NDVI και των χρονοσειρών LST. Δορυφορικά, μετεωρολογικά και περιβαλλοντικά δεδομένα συνδυάστηκαν για να ερμηνεύσουν τις μεταβολές στο δάσος της Πάφου, στην Κύπρο.

Η έρευνα αποφέρει κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα για την περιοχή μελέτης. Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων της θερμοκρασίας του αέρα, έδειξε σχεδόν σταθερή μέση αρνητική απόκλιση περίπου 6.50 βαθμών από την αντίστοιχη μέση τιμή LST κατά την περίοδο 1993-2018. Μια ελαφρά ανοδική τάση εντοπίστηκε στα δεδομένα της θερμοκρασίας του αέρα. Η ανάλυση της αποσύνθεσης έδειξε αύξηση 0.3% στη χρονοσειρά της θερμοκρασίας του αέρα κατά την περίοδο 1992-2016, μείωση 2.7% στη θερμοκρασία LST για την περίοδο 1993-2000 και αύξηση 4.6% στη θερμοκρασία LST κατά την περίοδο 2013-2018. Η ερμηνεία της τάσης στις χρονοσειρές LST (όπως και σε όλες τις χρονοσειρές) υποβοηθήθηκε από την ανάλυση των μεταβολών στη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία του αέρα. Η ανάλυση της αποσύνθεσης στις χρονοσειρές NDVI, έδειξε ότι η τάση τους συσχετίστηκε αρνητικά με την τάση των χρονοσειρών LST και για τις δύο χρονικές περιόδους, υπονοώντας ότι ακόμη και μια ελαφρά αύξηση της LST προϊόντος του χρόνου, προκαλεί μείωση των τιμών NDVI και αντίστροφα. Ο αλγόριθμος BFAST εντόπισε στατιστικά με επιτυχία σημεία σημαντικής μεταβολής στη γραμμή τάσης κάθε χρονοσειράς. Μια σημαντική αύξηση στη γραμμή τάσης LST εντοπίστηκε τον Νοέμβριο του 1998, για την ερμηνεία της οποίας χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές από τη χρονοσειρά της θερμοκρασίας του αέρα. Αντίστοιχα, στις χρονοσειρές NDVI, παρατηρήθηκαν απότομες αυξήσεις τον Οκτώβριο του 1994 και τον Μάιο του 2014, που προκλήθηκαν από αυξημένες βροχοπτώσεις και ευνοϊκές για την ανάπτυξη της βλάστησης μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Επιπλέον, η αύξηση στις τιμές του NDVI, τον Μάιο του 2014 που διήρκεσε έως τον Δεκέμβριο του 2015, μπορεί να συνδέεται με μειωμένη δράση της κάμπιας *Thaumetopoea pityocampa* λόγω χαμηλών θερμοκρασιών τους προηγούμενους φθινοπωρινούς μήνες. Μια απότομη μείωση της τάσης του NDVI εντοπίστηκε τον Δεκέμβριο του 2015, που πιθανότατα προκλήθηκε από την εισβολή ακρίδων που σημειώθηκε στο νησί νωρίτερα εκείνο το έτος.

Δύο σημαντικά σημεία επιρροής (έκτροπα σημεία) εντοπίστηκαν στη χρονοσειρά LST 1993-2000 χρησιμοποιώντας την απόσταση Cook. Η ύπαρξη τέτοιων σημείων (παρατηρήσεων) οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις των ποσοτήτων που μας ενδιαφέρουν, λόγω α) αύξησης της διασποράς των τυχαίων σφαλμάτων και β) προκατάληψης (μείωσης της αξιοπιστίας) των στατιστικών

ελέγχων. Τα σημεία αφαιρέθηκαν από τη χρονοσειρά και νέες τιμές για αυτά τα σημεία (επαν)υπολογίστηκαν, χρησιμοποιώντας το φίλτρο Kalman. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το μοντέλο προσθετικής αποσύνθεσης και ο αλγόριθμος BFAST στις ενημερωμένες χρονοσειρές. Η ανάλυση έδειξε ότι τα σημεία επιρροής σε σχέση με τη συνιστώσα τάσης του μοντέλου αποσύνθεσης, την επηρεάζουν ελαφρά και τοπικά, με αποτέλεσμα τα σημεία μεταβολής της τάσης να παρέμειναν ίδια. Οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης έδειξαν παρόμοιο μοτίβο για τις χρονοσειρές LST και NDVI στο δάσος της Πάφου. Παρατηρήθηκαν ισχυρές αρνητικές συσχετίσεις στην υστέρηση (6) δηλαδή τον έκτο μήνα, και για τις δύο χρονικές περιόδους. Η ανάλυση της διασταυρούμενης συσχέτισης των μεταβλητών LST και NDVI έδειξε ισχυρή αρνητική συσχέτιση μέχρι τις δύο πρώτες (καθ)υστερήσεις. Αυτή η συσχέτιση έγινε θετική μετά τις δύο επόμενες υστερήσεις. Εμφανίστηκε θετική συσχέτιση για τις υστερήσεις (4), (5), (6), (7) και (8). Το αποτέλεσμα παρατηρήθηκε και στις δύο χρονοσειρές, 1993-2000 και 2013-2018, και επιβεβαιώθηκε με διασταυρούμενα βαριογράμματα. Η ανάλυση των καταλοίπων σε αυτή την έρευνα, ανέδειξε εκτός των άλλων και την καταλληλότητα του προσθετικού μοντέλου αποσύνθεσης. Στη γραφική παράσταση του συντελεστή διασταυρούμενης συσχέτισης για τις χρονοσειρές 1993-2000 και 2013-2018, μεταξύ των καταλοίπων LST και NDVI για κάθε μήνα, ανιχνεύθηκε πιθανότατα ένα ενδιαφέρον σημείο που παρουσιάστηκε κατά το μήνα Απρίλιο, τις δύο χρονικές περιόδους (Εικόνα 7-17a), που ίσως αποτελεί ένδειξη για πιο επισταμένη έρευνα, λόγω της σημαντικής διαφοροποίησης που παρουσιάζεται στις δύο χρονικές περιόδους, κατά τον μήνα Απρίλιο. Αυτό μπορεί επίσης να συνδέεται με μειωμένη δράση της κάμπιας *Thaumatorpea pityocampa*, τα έτη 2014 και 2015.

7.3 Βιβλιογραφία

Abdul Athick, A.S.M.; Shankar, K.; Naqvi, H.R. Data on time series analysis of land surface temperature variation in response to vegetation indices in twelve Wereda of Ethiopia using mono window, split window algorithm and spectral radiance model. *Data Br.* 2019, 27, 104773. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104773>.

Akinyemi, F.O.; Ikanyeng, M.; Muro, J. Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. *City Environ. Interact.* 2019, 4, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100029>.

Avouris N., Katsanos C., Tselios N., Moustakas K. “Πειραματικός σχεδιασμός και στατιστική ανάλυση για μέτρηση εμπειρίας χρήσης διαδραστικών συστημάτων”, chapter 9 in Avouris, N., Katsanos, C., Tselios, N., & Moustakas, K., 2015, “Introduction to Human-Computer Interaction”, Kallipos, Open Academic Editions, <http://hdl.handle.net/11419/4222>

Ali, S.B.; Patnaik, S.; Madguni, O. Microclimate land surface temperatures across urban land use/land cover forms. *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 2017, 3, 231-242. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.03.001>.

Ben Abbes, A.; Bounouh, O.; Farah, I.R.; de Jong, R.; Martínez, B. Comparative study of three satellite image time-series decomposition methods for vegetation change detection. *Eur. J.*

- Remote Sens. 2018, 51, 607-615. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1465360>, Taylor & Francis, Published online.
- Cleveland, W.R.; Cleveland, J.; McRae, I.T. Statistics Sweden; Journal of Official Statistics, vol. 6. No 1, pp. 3-73, 1990.
- Dagum, E.B. Time Series Modeling and Decomposition. *Statistica* 2010, 70, 433-457. <https://doi.org/10.6092/issn.1973-2201/3597>.
- Dang, T.; Yue, P.; Bachofer, F.; Wang, M.; Zhang, M. Monitoring land surface temperature change with landsat images during dry seasons in Bac Binh, Vietnam. *Remote Sens.* 2020, 12, 4067. <https://doi.org/10.3390/rs12244067>.
- Dash, P. Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval from Satellite Measurements. *Meteorologie* 2005, p. 1-99.
- Cook Dennis, *Residuals and Influence in Regression*; 1982, New York: Chapman and Hall.
- Guha, S.; Govil, H. An assessment on the relationship between land surface temperature and normalized difference vegetation index. *Environ. Dev. Sustain.* 2021, 23, 1944-1963. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00657-6>.
- Han, H.; Bai, J.; Ma, G.; Yan, J. Vegetation phenological changes in multiple landforms and responses to climate change. *ISPRS Int. J. Geo-Informat.* 2020, 9, 111. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020111>.
- Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.A.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.V.; Goetz, S.J.; Loveland, T.R.; et al. University of M. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 2013, 342, 850-853.
- Heinemann, S.; Siegmann, B.; Thonfeld, F.; Muro, J.; Jedmowski, C.; Kemna, A.; Kraska, T.; Muller, O.; Schultz, J.; Udelhoven, T.; et al. Land surface temperature retrieval for agricultural areas using a novel UAV platform equipped with a thermal infrared and multispectral sensor. *Remote Sens.* 2020, 12, 1075. <https://doi.org/10.3390/rs12071075>.
- Hilas, C.S.; Goudos, S.K.; Sahalos, J.N. Seasonal decomposition and forecasting of telecommunication data: A comparative case study. *Technol. Forecast. Soc. Change* 2006, 73, 495-509. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.07.002>.
- Hódar, J.A.; Castro, J.; Zamora, R. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biol. Conserv.* 2003, 110, 123-129. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00183-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00183-0).
- Invasive Species Compendium *Thaumetopoea Pityocampa* (Pine Processionary). Available online: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/53501#toenvironments> (accessed on 02 Feb. 2022).
- How, D.; Aik, J.; Ismail, M.H.; Muharam, F.M. Land Use/Land Cover Changes and the Relationship. *Land* 2020, 9, 372.

- Jennings, R.C. The locust problem in cyprus. *Bull. Sch. Orient. African Stud.* 1988, 51, 279-313. <https://doi.org/10.1017/S0041977X00114594>.
- Kumar, D.; Shekhar, S. Statistical analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship through thermal remote sensing. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015, 121, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.004>.
- Lambert, J.; Drenou, C.; Denux, J.P.; Balent, G.; Cheret, V. Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis. *GIScience Remote Sens.* 2013, 50, 437-457. <https://doi.org/10.1080/15481603.2013.820070>.
- Lambin, E.F.; Ehrlich, D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. *Int. J. Remote Sens.* 1996, 17, 463-487. <https://doi.org/10.1080/01431169608949021>.
- Liu, Y.; Yamaguchi, Y.; Ke, C. Reducing the discrepancy between ASTER and MODIS land surface temperature products. *Sensors* 2007, 7, 3043-3057. <https://doi.org/10.3390/s7123043>.
- Macarof, P.; Groza, S.; Statescu, F. Investigating Correlation LST and Vegetation Indices Using Landsat Images for the Warmest Month: A Case Study of Iasi County. *Ann. Valahia Univ. Targoviste, Geogr. Ser.* 2018, 18, 33-40. <https://doi.org/10.2478/avutgs-2018-0004>.
- Meng, X.; Cheng, J.; Zhao, S.; Liu, S.; Yao, Y. Estimating land surface temperature from Landsat-8 data using the NOAA JPSS enterprise algorithm. *Remote Sens.* 2019, 11, 155. <https://doi.org/10.3390/rs11020155>.
- Miltiadou, M.; Antoniou, E.; Theocharidis, C.; Danezis, C. Do people understand and observe the effects of climate crisis on forests? The case study of cyprus. *Forests* 2021, 12, 1152. <https://doi.org/10.3390/f12091152>.
- Mohd Jaafar, W.S.W.; Maulud, K.N.A.; Muhmad Kamarulzaman, A.M.; Raihan, A.; Sah, S.M.; Ahmad, A.; Maizah Saad, S.N.; Mohd Azmi, A.T.; Syukri, N.K.A.J.; Khan, W.R. The influence of deforestation on land surface temperature-A case study of Perak and Kedah, Malaysia. *Forests* 2020, 11, 670. <https://doi.org/10.3390/F11060670>.
- Moritz, S.; Bartz-Beielstein, T. ImputeTS: Time series missing value imputation in R. *R J.* 2017, 9, 207-218. <https://doi.org/10.32614/rj-2017-009>.
- Muflihah Rizky Yudha Pahlawan Perbandingan Teknik Interpolasi Berbasis R Dalam Estimasi Data Curah Hujan Bulanan Yang Hilang Di Sulawesi Comparison of R-Based Interpolation Techniques To Estimate. 2017, 107-111; available online: <http://puslitbang.bmkg.go.id/jmg/index.php/jmg/article/download/343/pdf>; (accessed on 17 Feb. 2022).
- Mutiibwa, D.; Strachan, S.; Albright, T. Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2015, 8, 4762-4774. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2468594>.

Potter, C.; Coppernoll-Houston, D. Controls on land surface temperature in deserts of southern California derived from MODIS satellite time series analysis, 2000 to 2018. *Climate* 2019, 7, 32. <https://doi.org/10.3390/cli7020032>.

Quan, J.; Zhan, W.; Chen, Y.; Wang, M.; Wang, J. Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands. *Nature* 1955, 175, 238. <https://doi.org/10.1038/175238c0>.

Qiu, S.; Zhu, Z.; He, B. Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsats 4-8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sens. Environ.* 2019, 231, 111205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.024>.

Rajendran, P.; Mani, D.K. Estimation of Spatial Variability of Land Surface Temperature using Landsat-8 Imagery. *Int. J. Eng. Sci.* 2015, 4, 19-23.

Republic of Cyprus, Ministry of Agriculture; N.R. and E. Paphos Forest Management Plan: 2011, Nicosia, Cyprus.

Rhif, M.; Ben Abbes, A.; Martinez, B.; Farah, I.R. An improved trend vegetation analysis for non-stationary NDVI time series based on wavelet transform. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020, 28, 46603-46613. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10867-0>.

Rodrigues, C.; Teodoro, A.C.M. Relationship between the land surface temperature and the vegetation proportion to identify Heat Islands. Case study of Brasília (Brazil). In *Proceedings of the Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XI*; Schulz, K., Nikolakopoulos, K.G., Michel, U., Eds.; DOI:10.1117/12.2572802; SPIE: 2020; p. 34, Online: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11534/1153411/Relationship-between-the-land-surface-temperature-and-the-vegetation-proportion/10.1117/12.2572802.short?SSO=1> (accessed on 31 Jan 2022).

Saputra, M.D.; Hadi, A.F.; Riski, A.; Anggraeni, D. Handling Missing Values and Unusual Observations in Statistical Downscaling Using Kalman Filter. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1863, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1863/1/012035>.

Schachat, S.R.; Labandeira, C.C.; Maccracken, S.A. The importance of sampling standardization for comparisons of insect herbivory in deep time: A case study from the late palaeozoic. *R. Soc. Open Sci.* 2018, 5, 171991. <https://doi.org/10.1098/rsos.171991>.

Schelter, B.; Winterhalder, M. *Handbook of Time Series Analysis*; 2006; ISBN 9780471363552.

SOER Country profile—Distinguishing Factors (Cyprus). Available online: <https://www.eea.europa.eu/soer/2010/countries/cy/country-introduction-cyprus> (accessed on 31 Jan. 2022).

Sutcliffe, A. *X11 Time Series Decomposition and Sampling Errors*; Australian Bureau of Statistics, 1993, Melbourne, Australia.

Solanky, V.; Singh, S.; Katiyar, S.K. Land Surface Temperature Estimation Using Remote Sensing Data. In *Hydrologic Modeling*; Springer: Singapore, 2018.

- Tang, B.; Zhao, X.; Zhao, W. Local effects of forests on temperatures across Europe. *Remote Sens.* 2018, 10, 529. <https://doi.org/10.3390/rs10040529>.
- Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Zeileis, A.; Culvenor, D. *Phenological Change Detection While Accounting for Abrupt and Gradual Trends in Satellite Image Time Series*; Volume 114, ISBN 6139545226; <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.003>; 2010, *Remote Sensing of Environment*; Elsevier.
- Vogelmann, J.E.; Helder, D.; Morfitt, R.; Choate, M.J.; Merchant, J.W.; Bulley, H. Effects of Landsat-5 Thematic Mapper and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper plus radiometric and geometric calibrations and corrections on landscape characterization. *Remote Sens. Environ.* 2001, 78, 55-70. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00249-8).
- Welch, G.; Bishop, G. An Introduction to the Kalman Filter. *Proc. SIGGRAPH Course 2001*, 8, 41. <https://doi.org/10.1.1.117.6808>.
- Xu, D. Compare NDVI Extracted from Landsat-8 Imagery with that from Landsat 7 Imagery. *Am. J. Remote Sens.* 2014, 2, 10. <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20140202.11>.
- Yan, Y.; Mao, K.; Shi, J.; Piao, S.; Shen, X.; Dozier, J.; Liu, Y.; Ren, H.L; Bao, Q. Driving forces of land surface temperature anomalous changes in North America in 2002-2018. *Sci. Rep.* 2020, 10, 6931. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63701-5>.
- Yang, J.; Ren, J.; Sun, D.; Xiao, X.; Xia, J.; Jin, C.; Li, X. Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 69, 102818. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818>.
- Zachariadis, T. Climate Change in Cyprus: Impacts and Adaptation Policies. *Cyprus Econ. Policy Rev.* 2012, 16, 21-37.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ – ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8.1 Συμπεράσματα – Προοπτικές εξέλιξης της διατριβής

Τα υπερφασματικά δεδομένα επηρεάζονται από το φαινόμενο της φασματικής καμπυλότητας (φασματικό χαμόγελο). Ιδιαίτερα τα δεδομένα από αερομεταφερόμενες πλατφόρμες, που έχουν πολύ υψηλή χωρική και φασματική ανάλυση, επηρεάζονται εντονότερα. Πειράματα που πραγματοποιήσαμε, έδειξαν ότι η καμπύλη του φασματικού χαμόγελου επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες που οφείλονται κυρίως :

- i. στις συνθήκες φωτισμού κατά τη διάρκεια της πτήσης, που οφείλονται στον προσανατολισμό της αερομεταφερόμενης πλατφόρμας ως προς τον ήλιο, και
- ii. στις έντονες αποκλίσεις στην ανακλαστικότητα, που προκύπτουν από διαφορετικούς τύπους κάλυψης γης, στην κάθετη προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας.

Προτείνουμε μια πρωτότυπη τροποποιημένη μέθοδο TLSC δύο σταδίων, η οποία μπορεί να βελτιώσει τη ραδιομετρία μιας υπερφασματικής απεικόνισης, εξαλείφοντας το φαινόμενο του φασματικού χαμόγελου και τη μεταβολή της κλίσης της καμπύλης του που οφείλεται στις συνθήκες φωτισμού την ώρα λήψης των δεδομένων, χωρίς να απαιτείται μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας.

Υπερφασματικές απεικονίσεις πολύ υψηλής ανάλυσης, με έντονες αλλαγές κάλυψης γης κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας, είναι πιθανό να εξακολουθούν να παρουσιάζουν κάποια μικρή κλίση της φασματικής καμπυλότητας ακόμη και μετά τη διόρθωση. Διαφορική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανά ομοιογενείς περιοχές και το μασκάρισμα της υπερφασματικής απεικόνισης πριν από τη διόρθωση του φασματικού χαμόγελου, θα μπορούσαν να συμβάλουν στην πλήρη εξάλειψή της. Αυτό αποτελεί πεδίο περαιτέρω έρευνας προκειμένου να δημιουργηθεί μια μεθοδολογία διόρθωσης του φασματικού χαμόγελου σε υπερφασματικές απεικονίσεις, οι οποίες παρουσιάζουν έντονες μεταβολές στην κάλυψη γης.

Η δημιουργία μιας εξειδικευμένης φασματικής βιβλιοθήκης βλάστησης με μεσογειακά είδη, από μετρήσεις πεδίου (in situ), μέσα από μια εύχρηστη και φιλική διεπαφή, πέρα από τον πρακτικό της ρόλο σε μελέτες της λεκάνης της Μεσογείου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικουρικά με δημοφιλείς φασματικές βιβλιοθήκες, λόγω του ότι :

- Είναι απολύτως εξειδικευμένα, περιλαμβάνοντας φασματικές υπογραφές από είδη μεσογειακής βλάστησης, τα οποία δεν έχουν καταγραφεί σε γνωστές, μεγάλες βιβλιοθήκες.
- Περιέχει φασματικές υπογραφές που έχουν μετρηθεί σε απόσταση το πολύ ενός μέτρου από το στόχο, και όχι από τηλεπισκοπικούς δέκτες μεγάλης απόστασης.
- Εμφανίζεται η φωτογραφία του μετρημένου αντικείμενου, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να αξιολογήσει άμεσα εάν το μετρημένο αντικείμενο είναι συγκρίσιμο με αυτό που ερευνά και θέλει να ταυτοποιήσει.

Σε μια μελλοντική συστηματική προσπάθεια, εάν τυποποιηθούν οι συνθήκες λήψης των φασματικών υπογραφών στο πεδίο (είναι δύσκολο λόγω της δυναμικά μεταβαλλόμενης πραγματικότητας του αληθινού κόσμου, σε αντίθεση με τις σταθερές και σταθερά επαναλαμβανόμενες συνθήκες στο εργαστήριο), θα μπορούσαν να βρεθούν γραμμικές ή/και μη σχέσεις που να συνδέουν τη φασματική βιβλιοθήκη πεδίου που αναπτύξαμε, με τις βιβλιοθήκες

της USGS, της ASTER κλπ, συντελώντας με τον τρόπο αυτό στην ομογενοποίηση και την καλύτερη συσχέτιση των εγγραφών τους. Ασφαλώς, προείνεται και ο περαιτέρω εμπλουτισμός της φασματικής βιβλιοθήκης με περισσότερα είδη μεσογειακής βλάστησης.

Η αξιολόγηση των δεικτών βλάστησης και των δεικτών χρωστικών δεν είναι εύκολη, επειδή πολλοί δείκτες φαίνονται ισοδύναμοι ως προς τα αποτελέσματά τους. Η ευαισθησία όμως που δείχνουν στην πυκνότητα της βλάστησης και ιδιαίτερα στις χρωστικές, παρουσιάζει μικρές αλλά ουσιαστικές διαφοροποιήσεις από δείκτη σε δείκτη. Γι' αυτό αξιολογήθηκαν δείκτες που παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία ως προς τις βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης, κατά προτίμηση με γραμμική απόκριση και κορεσμό σε πολύ μεγάλες τιμές των παραμέτρων που εξετάζουμε. Οι πλέον ενδιαφέροντες από όσους αξιολογήθηκαν είναι:

- Ο δείκτης χλωροφύλλης TCI-2, ο οποίος αξιολογήθηκε ως περισσότερο ευαίσθητος στην μεταβολή των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης και στηρίζεται στο γεγονός ότι όσο μειώνεται η περιεκτικότητα της βλάστησης σε χλωροφύλλη, η απορρόφησή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μειώνεται στο ερυθρό τμήμα του φάσματος και προκαλεί μετατόπιση της περιοχής του "Red Edge" προς μικρότερα μήκη κύματος. Ως αποτέλεσμα ο δείκτης να αποτελεί έναν αξιόπιστο εκτιμητή της πυκνότητας βλάστησης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνος του για να χαρτογραφήσει την πυκνότητα βλάστησης της περιοχής.
- Ο λόγος των δεικτών TCARI / OSAVI, ως δείκτης ευαίσθητος στις ιδιότητες ανακλαστικότητας του εδάφους, ειδικά για βλάστηση με χαμηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας, που είναι έντονες οι επιδράσεις του εδάφους.
- Οι υπόλοιποι δείκτες που μελετήθηκαν, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, ιδιαίτερα αυτοί που ενεργοποιούνται στην περιοχή "Red Edge" του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, καθώς παρουσιάζουν σχετική ευαισθησία ως προς τις επιδράσεις απορρόφησης της χλωροφύλλης και της εσωτερικής σκέδασης των φύλλων.

Με στόχο τη βελτιστοποίηση του φασματικού διαχωρισμού για δασικές εφαρμογές, καθιστώντας περισσότερο αποτελεσματική την ανάλυση των υπερφασματικών δεδομένων, αξιοποιήθηκε η μείωση του υπερφασματικού χώρου με βάση τις οπτικές και βιοφυσικές ιδιότητες της βλάστησης, προσδοκώντας σε μια μεθοδολογικά και υπολογιστικά αποδοτικότερη στρατηγική για την ανίχνευση των ειδών της βλάστησης.

Πειράματα που πραγματοποιήσαμε, αναφορικά με την εξαγωγή καθαρών στόχων βλάστησης

- i. χρησιμοποιώντας το σύνολο των φασματικών καναλιών (71 κανάλια, από 421.8 nm έως 967.7 nm) μιας υπερφασματικής απεικόνισης,
- ii. χρησιμοποιώντας ένα υποσύνολο καναλιών (το οποίο καταλαμβάνει το 25% του διατιθέμενου υπερφασματικού κύβου της απεικόνισης) από την επιλεγμένη φασματική περιοχή του "Red Edge" (18 κανάλια, στο εύρος περίπου 650 έως 780nm),

έδειξαν ότι:

- οι μικρές διακυμάνσεις α) στις συγκεντρώσεις κυρίως της χλωροφύλλης αλλά και των άλλων χρωστικών στην περιοχή του "Red Edge" και β) στην εσωτερική δομή των φύλλων -η οποία συμβάλλει σημαντικά στην ανακλαστικότητα του φύλλου στο εγγύς υπέρυθρο, σχετίζονται περισσότερο με τα διαφορετικά υγιή δασικά είδη.

- η ανακλαστικότητα της χλωροφύλλης στην πράσινη περιοχή του φάσματος, κυριαρχεί με τέτοιο τρόπο που καταστέλλει την ανακλαστικότητα των άλλων χρωστικών και καταλήγει σε καθαρούς στόχους που αντιστοιχούν σε αποχρώσεις του πράσινου και αντιπροσωπεύουν περισσότερο την κατάσταση υγείας του φυτού, παρά την ποικιλία δασικών ειδών.

Σε κάθε περίπτωση η επιλογή του βέλτιστου υποσυνόλου καναλιών είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή των καθαρών στόχων ενδιαφέροντος. Τα κανάλια αυτά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό μελλοντικών δεκτών για την αποτελεσματικότερη ανίχνευση διαφορετικών ειδών βλάστησης.

Ως προοπτική, το βέλτιστο αυτό υποσύνολο καναλιών μπορεί να εισαχθεί σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks, CNN) βοηθώντας στη συνάθροιση χαρακτηριστικών και τη σημασιολογική συμπύκνωσή τους, καθιστώντας τη διαδικασία της μάθησης πολύ πιο γρήγορη.

Η Μπεϋζιανή προσέγγιση στο φασματικό διαχωρισμό βασίζεται στην προϋπόθεση ότι η αβεβαιότητα πρέπει να μοντελοποιείται μέσω των πιθανοτήτων και ότι τα στατιστικά συμπεράσματα πρέπει να είναι λογικά συμπεράσματα με βάση τους νόμους των πιθανοτήτων, τα οποία πρέπει να διαμορφωθούν από την *a priori* γνώση που κατέχουμε. Η εφαρμογή της όμως έδωσε αποτελέσματα που υποφέρουν από πολυσυγγραμμικότητα όπως αποδεικνύεται από τον πίνακα συσχέτισης και τον δείκτη VIF. Για την εξάλειψή της, ποινικοποιήσαμε τις αφθονίες εφαρμόζοντας την Elastic Net ποινή, και προτείνουμε την πρωτότυπη μέθοδο ENLoST η οποία κατά την ποινικοποίηση, λαμβάνει υπόψη την κατάσταση της βλάστησης στους γείτονες και τη στατιστική τους σημαντικότητα που περιέχονται εντός μιας περιοχής 100 m². Η μέθοδος:

- Οδηγεί σε αραιό, φειδωλό μοντέλο με αξιόπιστες, συρρικνωμένες και στατιστικά σημαντικές αφθονίες.
- Εξαλείφει το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας.
- Αναδεικνύει τη βιοποικιλότητα της περιοχής, όταν εφαρμόζεται σε δασική περιοχή.

Η Μπεϋζιανή συμπερασματολογία, αν και είναι εννοιολογικά σχετικά απλή, μπορεί να καταστεί μαθηματικά και αριθμητικά πολύπλοκη. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αύξηση της υπολογιστικής δύναμης, βελτιώνονται ολοένα οι πιθανοτικές γλώσσες προγραμματισμού εφαρμόζοντας τις βέλτιστες συναρτήσεις για την ευκολότερη κατασκευή Μπεϋζιανών μοντέλων με αποτελεσματικές μεθόδους εξαγωγής συμπερασμάτων, πολλές φορές αυτοματοποιημένων. Αυτό βοηθά τους αναλυτές να επικεντρωθούν σε συγκεκριμένα προβλήματα, αφήνοντας τις γλώσσες αυτές να χειρίζονται τις υπολογιστικές λεπτομέρειες. Προφανώς, η τάση αυτή θα συνεχίσει να αυξάνεται και συμβάλει σε μια επιβεβλημένη -θα ισχυριζόμουν- υιοθέτηση της Μπεϋζιανής συμπερασματολογίας σε περισσότερες τεχνικές της Τηλεπισκόπησης.

Ένα ακόμη πεδίο περαιτέρω έρευνας, θα μπορούσε να είναι προς την κατεύθυνση να βρεθούν (ή να δημιουργηθούν) κατάλληλες πρότερες, οι οποίες θα μπορούσαν να ποινικοποιούν τις αφθονίες την ώρα του Μπεϋζιανού φασματικού διαχωρισμού.

Ως δυναμικά συστήματα στον πλανήτη, τα μεσογειακά δάση αλλάζουν και είναι σημαντικό να παρακολουθούμε τις τάσεις και να κατανοούμε τον τρόπο που θα επηρεαστούν τα δάση μας στο μέλλον, από την κλιματική αλλαγή και ιδιαίτερα από την αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Δορυφορικά, μετεωρολογικά και περιβαλλοντικά δεδομένα χρονοσειρών μπορούν να αξιοποιηθούν, για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επηρεάζονται τα μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα όπως το κωνοφόρο δάσος της Πάφου, στην Κύπρο, από την κλιματική αλλαγή. Η ανάλυσή των χρονοσειρών έδειξε ότι:

- Ελλιπείς τιμές στις χρονοσειρές συμπληρώνονται ικανοποιητικά με τη χρήση του φίλτρου Kalman.
- Παρατηρήσεις υψηλής μόχλευσης ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας την απόσταση Cook και αξιολογούνται ως προς τον τρόπο που επηρεάζουν την τάση των χρονοσειρών.
- Η θερμοκρασία του αέρα δείχνει μια σταθερή μέση αρνητική απόκλιση περίπου 6.50 βαθμών από την αντίστοιχη μέση τιμή LST κατά την περίοδο 1993-2018.
- Η ανάλυση της αποσύνθεσης στις χρονοσειρές NDVI, έδειξε ότι η τάση τους συσχετίζεται αρνητικά με την τάση των χρονοσειρών LST, υπονοώντας ότι ακόμη και μια ελαφρά αύξηση της LST προϊόντος του χρόνου, προκαλεί μείωση των τιμών NDVI και αντίστροφα.
- Ο αλγόριθμος BFAST εντόπισε σημεία σημαντικής μεταβολής στη γραμμή τάσης κάθε χρονοσειράς, τα οποία ερμηνεύτηκαν με τη βοήθεια μετεωρολογικών και περιβαλλοντικών δεδομένων και εντοπίστηκαν περίοδοι εμφάνισης βλαπτικών εντόμων στο δάσος.

Ως περαιτέρω έρευνα, έχει ενδιαφέρον να ενσωματωθούν περισσότερα δεδομένα με διαφορετικές μεταβλητές (π.χ. να εξετάσουμε τη συμβολή της εξατμισοδιαπνοής και της σχετικής υγρασίας του αέρα στην κατάσταση της βλάστησης των δασών) και να συγκρίνουμε αποτελέσματα με δεδομένα από μεσογειακές περιοχές σε διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος. Επίσης ο πειραματισμός και με άλλες μεθόδους αναπλήρωσης ελλιπών τιμών των χρονοσειρών.

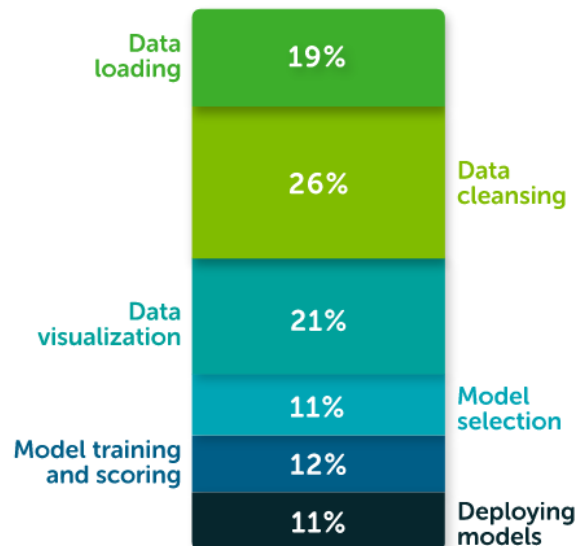
8.2 Επίλογος

Στις μέρες μας, διαθέτουμε πληθώρα τηλεπισκοπικών δεδομένων -που έχουν αυξηθεί πολύ και θα συνεχίσουν να αυξάνονται με υψηλότερο ρυθμό στο μέλλον- για να κάνουμε έρευνα στην κατεύθυνση επίλυσης πραγματικών προβλημάτων αναφορικά με τα χαρακτηριστικά και τη δυναμική της βλάστησης. Ωστόσο, απαιτούνται όχι μόνο ποσοτικά αλλά κυρίως ποιοτικά σύνολα δεδομένων, ώστε να αξιοποιηθούν στην ανάλυση, με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων και μοντέλων. Θα έλεγα ότι η απαίτηση αυτή καθίσταται θεμελιώδης σε έναν κόσμο που ασχολείται με τη σχεδίαση και την υλοποίηση μοντέλων που προορίζονται να λαμβάνουν αποφάσεις, μιμούμενα πολλές φορές στοιχεία της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Όπως φάνηκε από την έρευνα αυτή, για να αξιοποιηθούν οι κατάλληλες τεχνικές Τηλεπισκόπησης και τα μοντέλα που δείχνουν τη δυναμική της βλάστησης αναδεικνύοντας τα χαρακτηριστικά της, πρέπει τα δεδομένα :

- να είναι αντιπροσωπευτικά για την εφαρμογή που καλούνται να καλύψουν,
- να είναι πλήρη και όχι ελλιπή, οπότε χρειάζεται να συμπληρωθούν κατάλληλα, εάν υπάρχει ανάγκη,

- να είναι ακριβή, απαλλαγμένα από μεροληψία (προκατάληψη), οπότε απαιτούνται προκαταρκτικές διορθώσεις στα σύνολα τηλεπισκοπικών δεδομένων,
- να είναι απαλλαγμένα από ακραίες τιμές (outliers) και από αλληλοσυσχετίσεις που δημιουργούν πολυσυγγραμμικότητα,
- να ελέγχονται ως προς τους περιορισμούς που πιθανώς να θέτουν, όταν χρησιμοποιούνται σε μοντέλα πολυμεταβλητών δεδομένων, υψηλών διαστάσεων.

Σε επιβεβαίωση των ανωτέρω, πιθανότατα να εκπλήσσει το γεγονός σε κάποιο βαθμό, αλλά υπάρχουν έγκυρες αναφορές [State of Data Science report, 2020] πως η προετοιμασία και η κατανόηση των δεδομένων, είναι μία από τις πιο σημαντικές και χρονοβόρες εργασίες του κύκλου ζωής ενός έργου. Η έρευνα δείχνει (Εικόνα 8-1) ότι οι περισσότεροι επιστήμονες ανάλυσης δεδομένων, ξοδεύουν σχεδόν το 66% του χρόνου τους στην προετοιμασία και διαχείριση των δεδομένων. Το υπόλοιπο 34% του χρόνου που απομένει, ξοδεύεται σε διαδικασίες, όπως η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου, η εκπαίδευσή του, η δοκιμή και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 8-1 : Οι εργασίες προετοιμασίας και διαχείρισης των δεδομένων, καταναλώνουν δυσανάλογο χρόνο εργασίας. Πηγή: State of Data Science report, 2020.

Στις μέρες μας, καταγράφονται στην περιοχή της Μεσογείου -και βεβαίως στη χώρα μας, διαδικασίες που υποβαθμίζουν τους βιότοπους της βλάστησης, οι οποίες οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα και υπάρχει εν δυνάμει ο κίνδυνος από την κλιματική αλλαγή, δηλαδή τη μεταβολή προς το δυσμενέστερο των κλιματικών συνθηκών της περιοχής της Μεσογείου. Για να αντιληφθούμε τη εξέλιξη στη δυναμική της βλάστησης στο διάβα του χρόνου, πρέπει να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς προσαρμογής που διαθέτουν τα φυτά του μεσογειακού χώρου έναντι των μεταβολών της θερμοκρασίας (και όχι μόνο). Ο πιο βασικός στόχος αυτής της προσαρμογής, είναι η επιβίωση των φυτών, μέσω της προσπάθειάς τους να εξοικονομήσουν νερό από το έδαφος ώστε να επιβιώσουν τη σχετικά άνομβρη μεσογειακή θερινή περίοδο, η οποία λόγω της κλιματικής αλλαγής μεγαλώνει σε διάρκεια. Εκτός από τον κίνδυνο αυτό, τα δάση υποβαθμίζονται είτε λόγω διάφορων μηχανισμών (υπερβόσκηση, επιθέσεις βλαπτικών εντόμων, παρασίτων κλπ) είτε από τις συχνότερες του φυσιολογικού

ρυθμού πυρκαγιές, με αποτέλεσμα να εκφυλίζονται σε θαμνώδεις εκτάσεις και λιβάδια ή να μετατρέπονται σε καλλιεργήσιμο έδαφος (εκχερσώνονται). Εάν οι περιοχές αυτές προστατευθούν, έχουν τη δυνατότητα να επανέλθουν ως βιότοποι. Για να γίνει όμως αυτό, πρέπει να παρακολουθούνται συστηματικά και οι τεχνικές Τηλεπισκόπησης συμβάλλουν σημαντικά προς αυτήν την κατεύθυνση. Αποτελεί άλλωστε και θεσμοθετημένη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης η επικαιροποίηση (το Δεκέμβριο του 2021) της προηγούμενης δασικής στρατηγικής (του 2013), να λαμβάνει υπόψη τις πρόσφατες εξελίξεις και να ανταποκρίνεται στους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, με στόχο την επίτευξη (έως το 2030, αλλά πιθανότατα το διάστημα αυτό θα επεκταθεί) μιας σύγχρονης, ουδέτερης ως προς τις ανθρακούχες εκπομπές, αποδοτικής ως προς τη χρήση των πόρων, ανταγωνιστικής και κοινωνικά δίκαιης Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω της εθνικής παρακολούθησης και διαχείρισης των δασών. Στη νέα δασική στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2030, αναφέρεται ρητώς ότι τα δάση διαδραματίζουν πολύπλευρο, σημαντικό ρόλο στην οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον, για την ευημερία των ανθρώπων [Tiainen S., Δεκ. 2021].

8.3 Βιβλιογραφία

State of Data Science report, 2020, www.anaconda.com/state-of-data-science-2020, τελευταία πρόσβαση Νοέμβριος 2022.

Tiainen S., Δεκέμβριος 2021., “Νέα δασική στρατηγική της ΕΕ για το 2030”. Proceedings of the European Economic and Social Commi

