



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΓΙΑ ΤΟΝ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΥΠΕΛΑΦΙΩΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΛΟΠΩΝ**

ΑΘΩΣ ΑΓΑΠΙΟΥ

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΛΕΜΕΣΟΣ 2012**

Copyright by Agapiou Athos, 2012
All Rights Reserved.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΑΠΟΔΟΧΗΣ

διδασκατορικής διατριβής

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΥΠΕΛΔΑΦΩΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ

που εκπονήθηκε από τον

Άθω Αγαπίου

Διόφαντος Γλ. Χατζημιτσής

Αναπληρωτής Καθηγητής

Επιβλέπων

Ανδρέας Γεωργόπουλος

Καθηγητής

Μέλος Επιτροπής

Απόστολος Σαρρής

Ερευνητής Α'

Μέλος Επιτροπής

Μαρία Δ. Τσακίρη

Καθηγήτρια

Εξωτερικό Μέλος

Ανδρέας Ανδρέου

Αναπληρωτής Καθηγητής

Εξωτερικό Μέλος

Πρόεδρος Επιτροπής

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχετικές Δημοσιεύσεις

Δημοσιεύσεις σε Βιβλία

Alexakis D., **Agapiou A.**, Hadjimitsis D., Sarris A. 2012. Remote Sensing Applications in Archaeological Research, in Remote Sensing - Applications, Dr. Boris Escalante (Ed.), ISBN: 978-953-51-0651-7, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/remote-sensing-applications/remote-sensing-applications-in-archaeology>

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Περιοδικά

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., 2011. Detection of possible Archaeological Crop Marks in Cyprus Using Vegetation Indices and Field Spectroradiometric Measurements: Verification under area surveyed with geophysical campaigns, Journal of Applied Remote Sensing 5, 053554, doi:10.1117/1.3645590

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Papoutsas C., Alexakis D.D., Papadavid G. 2011. The Importance of Accounting for Atmospheric Effects in the Application of NDVI and Interpretation of Satellite Imagery Supporting Archaeological Research: The Case Studies of Palaepaphos and Nea Paphos Sites in Cyprus. Remote Sensing, 3(12):2605-2629.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D., Sarris, A., 2012. Observatory validation of Neolithic tells ("Magoules") in the Thessalian plain, central Greece, using hyperspectral spectro-radiometric data, Journal of Archaeological Science, 39 (5),1499–1512. doi.org/10.1016/j.jas.2012.01.001.

Agapiou A., Alexakis D., Hadjimitsis D. G., 2012. Evaluation of spectral sensitivity of ALOS, ASTER, IKONOS, LANDSAT and SPOT satellite sensors intended for the detection of archaeological crop marks, Digital Earth, DOI:10.1080/17538947.2012.674159.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D., Papadavid G., 2012. Examining the Phenological Cycle of Barley Crops for the detection of buried archaeological remains, *GIScience & Remote Sensing* (accepted).

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Sarris A., Georgopoulos A., Alexakis D. D., 2013. Optimum Temporal and Spectral Window for Monitoring Crop Marks over Archaeological Remains in the Mediterranean region. *Journal of Archaeological Science*, 40 (3), 1479–1492.

Sarris A., Papadopoulos N., **Agapiou A.**, Salvia M.C., Hadjimitsis D.G., Parkinson A.W., Yerkes W.R., Gyucha A., Duffy R.P., 2013. Integration of geophysical surveys, ground hyperspectral measurements, aerial and satellite imagery for archaeological prospection of prehistoric sites: the case study of Veszto-Magor Tell, Hungary. *Journal of Archaeological Science*, 40(3), 1454-1470.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D., 2013. Development of an image-based method for the detection of archaeological buried relics using multi-temporal satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D. D., 2012. Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks. *Remote Sensing*, 4, 3892-3919.

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Συνέδρια

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Georgopoulos A., Sarris A., Alexakis D. D., Towards to an Archaeological Index: Identify the Spectral Regions of Stress Vegetation due to Buried Archaeological Remain, LNCS , M. Ioannides et al. (Eds.): EuroMed 2012, 7616, pp. 129--138. Springer, Heidelberg.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Sarris A., Georgopoulos A., Alexakis D. D., 2012. Linear Spectral Unmixing for the detection of Neolithic Settlements in the Thessalian Plain, 32nd EARSeL Symposium 2012, Mykonos Island, Greece, 21-24/05/2012.

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Nisantzi A., Alexakis D. D., Themistocleous K., Papadavid G., Papoutsas C., 2012. Variability of field spectroradiometric measurements using nearly Lambertian surfaces and auxiliary Lidar observations, 32nd EARSeL Symposium 2012, Mykonos Island, Greece, 21-24/05/2012.

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Sarris, A., Georgopoulos A., 2012. A New Method for the Detection Validation of Architectural Remains Using Field Spectroscopy: Experimental Remote Sensing Archaeology, Proceedings XVI Congress of the UISPP (International Union for Prehistoric and Protohistoric Sciences), 4 - 10 September, Florianopolis, Brazil, British Archaeological Reports (BAR).

Sarris A., Papadopoulos N., Salvi M.C., Seferou E., **Agapiou A.**, 2011. Mapping the Archaeological Landscape of Palaepaphos through Remote Sensing Techniques, Proceedings XVI Congress of the UISPP (International Union for Prehistoric and Protohistoric Sciences), 4 - 10 September, Florianopolis, Brazil, British Archaeological Reports (BAR).

Agapiou A., Hadjimitsis G. D. , Sarris A. Themistocleous K., Papadavid G., 2010. Hyperspectral ground truth data for the detection of buried architectural remains, LNCS 6436, pp. 318–331,. Proceedings 3rd International Euro-Mediterranean Conference (EuroMed), 8-13 November 2010, Limassol, Cyprus.

Agapiou A., Hadjimitsis G. D., Sarris A, Georgopoulos A., 2010. Macro-scale archaeological perspectives: Remote Sensing techniques for investigating archaeological sites in Cyprus, *Archaeolingua*, 263-268, ISBN 978-963-9911-16-1, Proceedings 3rd International Euro-Mediterranean Conference (EuroMed), 8-13 November 2010, Limassol, Cyprus.

Agapiou A., Hadjimitsis D., Themistocleous K., Papadavid G., Toullos L. 2010. Detection of archaeological crop marks in Cyprus using field spectroscopy measurements, Proceedings of SPIE Vol. 7831, 78310V.

Agapiou A, Hadjimitsis D., Sarris A., 2010. Space technologies and Geographic Information Systems used for monitoring natural and anthropogenic hazards: case studies at cultural heritage sites and monuments in Cyprus, 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Patra, Greece 31 May - 2 June 2010.

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., 2010. Use of field spectroscopy to support the detection from high-resolution satellite imagery of archaeological remains buried under vegetated and non vegetated areas in Cyprus, XXXVIII Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA 2010, Granada, Spain, 6-9 April 2010 (Poster).

Περίληψη

Η επισκόπηση μιας περιοχής, ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, αναγνωρίστηκε από την επιστημονική κοινότητα ότι μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αρχαιολογική έρευνα. Ιδιαίτερα δε, η εκτόξευση των πρώτων πολυφασματικών και υπερφασματικών δορυφόρων αλλά και των δορυφόρων υψηλής ευκρίνειας, δείχνουν ότι η αρχαιοτηλεπισκόπηση μπορεί να δώσει πολύτιμα στοιχεία στην αρχαιολογική εξερεύνηση.

Η παρούσα διατριβή αποσκοπεί στη μελέτη υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων, σε εκτάσεις που καλύπτονται με βλάστηση, με την υποστήριξη επίγειων και δορυφορικών τηλεπισκοπικών δεδομένων. Για τους σκοπούς της έρευνας πραγματοποιήθηκαν επίγειες μετρήσεις σε ελεγχόμενα πεδία, τα οποία δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, σε όλο το φαινολογικό κύκλο ανάπτυξης των φυτών. Παράλληλα έγινε μελέτη σε διάφορους αρχαιολογικούς χώρους στην Ευρώπη (Κύπρος, Ελλάδα, Ουγγαρία). Η έρευνα στηρίχθηκε σε μετρήσεις ανακλαστικότητας της βλάστησης με τη βοήθεια επίγειων φασματοραδιομέτρων αλλά και σε διάφορους πολυφασματικούς και υπερφασματικούς δορυφόρους (Landsat TM / ETM+, Hyperion, Chris Proba, GeoEye-1 κ.τ.λ.).

Η μελέτη έρχεται να συμβάλλει σημαντικά ως προς την αναγνώριση διαφοροποιήσεων της βλάστησης με την ανάπτυξη ενός νέου δείκτη βλάστησης ενώ ταυτόχρονα κατόρθωσε να προσδιορίσει τα χρονικά όρια στα οποία αυτές οι διαφοροποιήσεις μεγιστοποιούνται. Επιπλέον η παρούσα διατριβή εισάγει και υλοποιεί για πρώτη φορά την έννοια της «Πειραματικής Αρχαιοτηλεπισκόπησης».

Η διατριβή ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη μιας προτεινόμενης μεθοδολογίας η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου η χωρική ανάλυση δεν είναι επαρκής για να στηρίξει την φωτοερμηνευτική διαδικασία. Η προτεινόμενη μεθοδολογία στηρίζεται στο σύνολο της μελέτης που έγινε στο πλαίσιο της διατριβής και μπορεί να εφαρμοστεί με πληροφορίες που βρίσκονται στην ίδια την εικόνα.

Abstract

Since the beginning of the 20th century, Remote Sensing has been recognized by the scientific community that can significantly contribute to the archaeological research. In particular, the launch of the first multispectral and hyperspectral satellites along with high resolution satellite sensors have demonstrated that remote sensing archaeology can provide valuable information to archaeological exploration.

This thesis aims to study subsurface archaeological remains over vegetated areas using both ground and satellite remote sensing data. For the purposes of this investigation, several measurements have been carried out at all stages of plant growth, in controlled fields. These fields have been created for the purposes of this study. Moreover the study was expanded in various archaeological sites in Europe (Cyprus, Greece, and Hungary). The study was based on several reflectance's measurements over vegetation using ground spectroradiometers in conjunction with multispectral and hyperspectral satellites (Landsat TM / ETM +, Hyperion, Chris Proba, GeoEye-1, etc.).

The study has significantly contributed to the recognition of differences in vegetation development using a new vegetation index. Furthermore the study was able to identify the time window in which such difference is maximized. Furthermore, this thesis introduces and implements for the first time the "Experimental Remote Sensing Archaeology".

The thesis concludes with the development of a proposed methodology that can be used in cases where the spatial resolution is not sufficient to support an interpretation of an image. The proposed methodology is based on the results of this study and can be applied using auxiliary data found in the image itself.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή έχει τύχει υποτροφίας από το **Κοινοφελές Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάση** το οποίο θα ήθελα και να εκφράσω τις βαθύτατες μου ευχαριστίες.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω και στον **Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος** (European Space Agency, ESA) για την έγκριση και παραχώρηση προγραμματισμένων λήψεων του δορυφορικού δέκτη CHRIS Proba πάνω από προεπιλεγμένες περιοχές μελέτης της διατριβής.

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής οφείλω να ευχαριστήσω θερμά διάφορους ανθρώπους που συνέβαλλαν σημαντικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της:

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα **Αν. Καθ. Διόφαντο Χατζημιτσή** για την υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Οι συμβουλές του αλλά και η καθοδήγηση του σε αρκετά σημεία της διατριβής ήταν κάτι περισσότερο από σημαντικές. Θερμές ευχαριστίες γιατί πάνω από όλα με έμαθε να κοιτάω μπροστά και να στοχεύω ψηλά υπερσκελώνοντας δυσκολίες και προβλήματα.

Στον **Καθ. Ανδρέα Γεωργόπουλο**, που ακόμη μια φορά με ανέχτηκε και με στήριξε στη μελέτη. Ήταν πραγματικά τιμή μου να τον έχω δίπλα μου σε όλα τα στάδια της πανεπιστημιακής μου εκπαίδευσης όχι μόνο σε θέματα που άπτονται του ακαδημαϊκού χώρου αλλά και για τις πατρικές του συμβουλές. Ιδιαίτερα δε τον ευχαριστώ για τις χρήσιμες επισημάνσεις του στο κείμενο της διατριβής.

Στον **Δρ. Απόστολο Σαρρή**, για την παραχώρηση δεδομένων γεωφυσικών διασκοπήσεων σε διάφορες αρχαιολογικές θέσεις, αλλά και για τις πλούσιες επιστημονικές γνώσεις που μου μετέφερε. Κυρίως όμως θα ήθελα να τον ευχαριστώ γιατί πρώτος μου άνοιξε διάπλατα την πόρτα στις νέες τεχνολογίες στην Αρχαιολογία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστώ θερμά τα δύο εξωτερικά μέλη της εξεταστικής επιτροπής **Καθ. Μαρία Τσακίρη** και **Αν. Καθ. Ανδρέα Ανδρέου**.

Η διατριβή αυτή δεν θα είχε ξεκινήσει, εάν δεν υπήρχε η άμεση εμπλοκή μου από το 2007 σε ένα πρωτοποριακό ερευνητικό έργο για την μελέτη της αρχαιολογικής θέσης της Παλαιάφου. Οι νέες διεπιστημονικές τεχνολογίες που εφαρμόστηκαν, υπό την καθοδήγηση της **Καθ. Μαρίας Ιακώβου**, της Ερευνητικής Μονάδας Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου, έδειξαν πως διάφορα επιστημονικά πεδία μπορεί να συνυπάρξουν στην αρχαιολογική έρευνα. Η μελέτη και έρευνα που πραγματοποιήθηκε και συνεχίζεται μέχρι σήμερα στην Παλαίπαφο έχουν συμβάλει σημαντικά αλλά και ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της διατριβής στην παρούσα της μορφή.

Ευχαριστίες επίσης στο **Τμήμα Αρχαιοτήτων** και ιδιαίτερα στην Διευθύντρια του Τμήματος **Δρ. Μ. Χατζηκωστή** για την άδεια ελεύθερης πρόσβασης σε αρχαιολογικούς χώρους της Κύπρου, που παραχωρήθηκε για τους σκοπούς της διατριβής. Επίσης το **Τμήμα Κτηματολογίου και Χωρομετρίας** για την παραχώρηση γεωγραφικών δεδομένων.

Ευχαριστώ ακόμη τον αρχαιολόγο **Δρ. Κώστα Βουζαζάκη** από την Αρχαιολογική Εφορεία Μαγνησίας (Βόλου) για την πολύτιμη του βοήθεια όσο αφορά τον εντοπισμό μαγούλων στο Θεσσαλικό κάμπο.

Τους **Δρ. William A. Parkinson** του Τμήματος Ανθρωπολογίας, του Chicago Field Museum και του αρχαιολόγου **Attila Gyucha** της Υπηρεσίας Field Service of Cultural Heritage της Ουγγαρίας, για την φιλοξενία τους και την άδεια τους για συμμετοχή στο ερευνητικό πρόγραμμα KRAP στην Ουγγαρία. Ευχαριστίες και στον **Δρ. Νίκο Παπαδόπουλο** του Εργαστηρίου Γεωφυσικής - Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης & Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (Ιδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας) για τη βοήθεια του σε θέματα προγραμματισμού.

Το **Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών** και τη Διευθύντρια του Τμήματος **Δρ. Δώρα Χειμωνίδου**, για την άδεια χρήσης τμήματος αγροτικής έκτασης στον Πειραματικό Σταθμό Αχέλειας στην Πάφο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το **Δρ. Γιώργο Παπαδαΐδ** για τη συνολική του βοήθεια σε θέματα που άπτονται της γεωπονίας και όχι μόνο. Ιδιαίτερα χρήσιμες ήταν οι συζητήσεις που έγιναν με τον λειτουργό του Τμήματος **κ. Αντρέα Παλλίδη**.

Τη **Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου** και το Διευθυντή του Τμήματος **Δρ. Σίλα Μιχαηλίδη** για την παραχώρησή μετεωρολογικών δεδομένων σε διάφορες θέσεις της Κύπρου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στο Λειτουργό του τμήματος **κ. Στέλιο Πιασιαρδή**.

Όλα τα ερευνητικά μέλη του **Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης** του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, για την συνεχή υποστήριξη τους και βοήθεια σε διάφορα μικρά και μεγάλα προβλήματα που προέκυπταν κατά τη διάρκεια της διατριβής. Θερμές ευχαριστίες στον **Δρ. Κυριάκο Θεμιστοκλέους** για τη βοήθεια του ιδιαίτερα στα πρώτα δύσκολα στάδια της διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον **Δρ. Δημήτριο Αλεξάκη**, για τις πολύωρες και χρήσιμες συζητήσεις σε θέματα που άπτονταν της μελέτης. Την βοήθεια του και ξενάγηση στις νεολιθικές θέσεις της Θεσσαλίας καθώς και τις «οικολογικές του επισημάνσεις» καθόλη τη διάρκεια της διαδρομής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους **γονείς μου** για την αμέριστη συμπαράσταση τους. Χωρίς τη βοήθεια τους η παρούσα διατριβή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί.

Η διατριβή είναι αφιερωμένη στις δύο μου **Αγάπες**.

Περιεχόμενα

Περίληψη	VII
Abstract	VIII
Ευχαριστίες	IX
Περιεχόμενα	XII
Κατάλογος Εικόνων	XVI
Κατάλογος Πινάκων	XXXIV
1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	5
2.1. Υφιστάμενοι δορυφορικοί δέκτες για υποστήριξη αρχαιολογικών εφαρμογών	7
2.2. Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία για τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων	10
2.2.1. Χρήση αεροφωτογραφιών και κατασκοπευτικών δορυφόρων	10
2.2.2. Χρήση πολυφασματικών δορυφόρων	14
2.2.3. Χρήση δορυφόρων υψηλής χωρικής ανάλυσης και υπερφασματικά δέκτες	16
2.2.4. Σύνθεση τηλεπισκοπικών αποτελεσμάτων για βελτίωση της αρχαιολογικής ορατότητας	17
2.2.5. Περιορισμοί τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία	20
2.3. Δείκτες βλάστησης και φαινολογία για την παρακολούθηση της βλάστησης	22
2.4. Συμβολή διατριβής	27
3. Περιοχές Μελέτης	30
3.1. Ελεγχόμενα Πεδία	31
3.1.1. Περιοχή Αλάμπρας	31
3.1.2. Περιοχή Αχέλειας	32
3.2. Αρχαιολογικές Θέσεις	33
3.2.1. Παλαίπαφος, Κύπρος	33
3.2.2. Μαγούλες Θεσσαλίας, Ελλάδα	36
3.2.3. Visztu, Ουγγαρία	39

4. Επίγειες μετρήσεις	42
4.1. Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις	42
4.1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο	42
4.1.2. Ιστορική εξέλιξη επίγειων φασματοραδιομέτρων	45
4.1.3. Μεθοδολογία συλλογής και επεξεργασίας επίγειων μετρήσεων	46
4.1.4. Έλεγχος φασματοραδιομέτρου	53
4.2. Πεδία Ελέγχου	63
4.2.1. Περιοχή Αλάμπρας	63
4.2.2. Περιοχή Αχέλειας	67
4.2.3. Επιλογή βλάστησης στα ελεγχόμενα πεδία	68
4.3. Λοιπές έρευνες επισκόπησης στις αρχαιολογικές θέσεις	74
4.3.1. Παλαίπαφος, Κύπρος	74
4.3.2. Μαγούλες Θεσσαλίας, Ελλάδα	75
4.3.3. Visztu, Ουγγαρία	76
5. Μεθοδολογία και Διαθέσιμα	77
5.1. Μεθοδολογία	77
5.2. Διαθέσιμα Δεδομένα	80
5.2.1. Δορυφορικές εικόνες	80
5.2.2. Λοιπά δεδομένα	85
5.3. Προεπεξεργασία Δορυφορικών Δεδομένων	86
5.3.1. Γεωμετρική Διόρθωση	86
5.3.2. Ραδιομετρική διόρθωση	90
5.3.3. Ατμοσφαιρική διόρθωση	92
5.4. Εκτίμηση ατμοσφαιρικής επίδρασης για αρχαιολογικές εφαρμογές	95
6. Αποτελέσματα	115
6.1. Ελεγχόμενα Πεδία	115
6.1.1. Αλάμπρα	115
6.1.1.1. Α΄ περίοδος 2010-2011	115
6.1.1.2. Β΄ περίοδος 2011-2012	124
6.1.2. Αχέλεια	130
6.2. Λοιπές αρχαιολογικές θέσεις	136
6.2.1. Παλαίπαφος	136

6.2.1.1.	Φασματικές υπογραφές	137
6.2.1.2.	Μελέτη φαινολογικού κύκλου	144
6.2.1.3.	Υπερφασματικά δορυφορικά δεδομένα	153
6.2.1.4.	Φωτοερμηνεία πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών	164
6.2.1.5.	Αρχαιολογικές ανασκαφές	173
6.2.2.	Θεσσαλία	176
6.2.2.1.	Φασματικές υπογραφές	177
6.2.2.2.	Δείκτες βλάστησης	185
6.2.2.3.	Φαινολογικός κύκλος	206
6.2.3.	Ουγγαρία	214
6.2.3.1.	Φασματικές υπογραφές	215
6.2.3.2.	Δείκτες βλάστησης	222
7.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	240
7.1.	Χρήση φασματοραδιομέτρων στην Αρχαιολογία	241
7.2.	Ανάπτυξη Αρχαιολογικού Δείκτη	244
7.2.1.	Συσχετίσεις ανακλαστικότητας	244
7.2.2.	Διαχωριστικότητα φασματικών καναλιών	247
7.2.3.	Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών	256
7.2.4.	Εφαρμογή Αρχαιολογικού Δείκτη σε υπερφασματικές δορυφορικές εικόνες	262
7.2.5.	Ευαισθησία Αρχαιολογικού Δείκτη	269
7.3.	Φασματική ευαισθησία δορυφορικών δεκτών για την παρακολούθηση της βλάστησης	272
7.3.1.	Φασματικά χαρακτηριστικά δορυφορικών δεκτών	272
7.3.2.	Επίγειες μετρήσεις	276
7.3.3.	Ανάλυση μετρήσεων	278
7.3.3.1.	Φασματικές υπογραφές	279
7.3.3.2.	Δείκτες βλάστησης	282
7.4.	Εντοπισμός βέλτιστης περιόδου για την παρακολούθηση διαφοροποιήσεων βλάστησης	290
8.	Ανάπτυξη προτεινόμενης μεθόδολογίας	297

8.1.1.	Βήματα μεθοδολογίας	298
8.1.2.	Κριτήρια για την επιλογή των δύο περιοχών διερεύνησης (Βήμα 4)	299
8.1.2.1.	Προϋπόθεση α: ίδια χαρακτηριστικά εδάφους	302
8.1.2.2.	Προϋπόθεση β: ίδια κλιματικά χαρακτηριστικά	303
8.1.2.3.	Προϋπόθεση γ: ίδια καλλιέργεια	304
8.1.2.4.	Προϋπόθεση δ: ίδιες τεχνικές καλλιέργειας	304
9.	Συμπεράσματα	306
9.1.	Συμβολή διατριβής	306
9.2.	Καινοτομία διατριβής	307
9.3.	Μελλοντικές εργασίες	309
	Βιβλιογραφία	312

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Έρευνα στην Αρχαιολογία	1
Εικόνα 2: (α) Δορυφορική εικόνα CORONA της Κύπρου (1973/07/22) με χωρική ανάλυση 10m. (β) Η αρχαιολογική περιοχή του Κουρίου πριν και μετά τη συστηματική ανασκαφή του χώρου του Τμήματος αρχαιοτήτων στην εικόνα CORONA 1962/07/21 (αριστερά) και η αντίστοιχη εικόνα από Google Earth (δεξιά). Ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος στο Ναό του Απόλλωνα Υλάτη (Κούριο) τη δεκαετία του 1960 στην εικόνα CORONA 1962/07/21 (αριστερά) και η αντίστοιχη εικόνα από Google Earth (δεξιά) (Agariou et al., 2010a).	13
Εικόνα 3: Φωτογραφίες από τις ανασκαφές στη θέση Hadjiaboullah	21
Εικόνα 4: Υποτιθέμενο τείχος στη θέση Hadjiabdoullah (Agariou et al., 2010a).	22
Εικόνα 5: Χάρτης με τις περιοχές μελέτης	30
Εικόνα 6: Περιοχή μελέτης (Google Earth [©])	32
Εικόνα 7: Φωτογραφίες από την περιοχή μελέτης	32
Εικόνα 8: Ελεγχόμενο πεδίο Αχέλειας, Πάφου	32
Εικόνα 9: Φωτογραφίες από την περιοχή της Αχέλειας	33
Εικόνα 10: Αεροφωτογραφία περιοχής Παλαιπάφου όπου επισημαίνονται οι θέσεις στην περιοχή Άρκαλον.	34
Εικόνα 11: Φωτογραφίες από την ανασκαφική δραστηριότητα του Πανεπιστημίου Κύπρου στην περιοχή Άρκαλον.	35
Εικόνα 12: Αρχαιολογικά ευρήματα από τις ανασκαφές του Τμήματος Αρχαιοτήτων 2010.	36
Εικόνα 13: Αρχαιολογικές θέσεις Θεσσαλίας.	38
Εικόνα 14: Νεολιθικές θέσεις Θεσσαλίας (α: Νίκαια 6, β: Νίκαια 16, γ: Καρατσάνταγλι και δ: Αλμυρός II)	39
Εικόνα 15: Έκταση της Μεγάλης Πεδιάδας της Ουγγαρίας και η αρχαιολογική θέση Visztu	40
Εικόνα 16: Ευρήματα από την ανασκαφική έρευνα στην περιοχή Visztu Ουγγαρίας (Εικ. 12 και 13, από Parkinson 2011).	41

Εικόνα 17: Περιοχή έρευνας, Visztu, Ουγγαρίας. Πάνω η θέση Szeghalom- Kónácsalom στην περιοχή Kőrös (X:511820, Y: 5204250, WGS'84). Κάτω η θέση Tell Veszto – Magor (X: 515929, Y: 5198320, WGS'84).	41
Εικόνα 18: Προσπίπτουσα και ανακλώμενη ακτινοβολία. Αριστερά η περίπτωση της αμφίδρομης κατανομής (BDRF) και δεξιά η περίπτωση της ημισφαιρικής – κωνικής κατανομής (HCRF).	43
Εικόνα 19: Δυνατότητες επίγειων φασματοραδιομέτρων για αρχαιολογικούς σκοπούς (ατμοσφαιρική διόρθωση δορυφορικών εικόνων, συλλογή φασματικών υπογραφών, δημιουργία φασματικής βιβλιοθήκης κ.τ.λ.).	44
Εικόνα 20: Το φασματοραδιόμετρο GER 1500 που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή (αριστερά), το spectralone panel (δεξιά)	48
Εικόνα 21: Καταγραφή ανακλαστικότητας με τη χρήση του GER 1500 (Εικόνα από το NERC Field Spectroscopy Facility, University of Edinburgh, http://fsf.nerc.ac.uk/).	48
Εικόνα 22: Μετρήσεις προσπίπτουσας και ανακλώμενης ακτινοβολίας και καταγραφή της ανακλαστικότητας σε ένα στόχο	49
Εικόνα 23: Φασματική ευαισθησία για τα κανάλια 1-4 του Landsat 5 TM (δεδομένα από Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) http://calvalportal.ceos.org/cvp/web/guest/landsat-5-tm).	50
Εικόνα 24: Διάγραμμα συλλογής παρατηρήσεων με το φασματοραδιόμετρο GER 1500.	51
Εικόνα 25: Παράδειγμα πρωτογενών μετρήσεων από το φασματοραδιόμετρο	52
Εικόνα 26: Διαδικασία μετατροπής υπαίθριων μετρήσεων (στάδιο I) σε μονάδες ανακλαστικότητας ανά κανάλι δορυφόρου με τη χρήση των αντίστοιχων φίλτρων RSR (στάδιο II) και τέλος η μετατροπή τους σε δείκτες βλάστησης (στάδιο III).	52
Εικόνα 27: Φωτογραφίες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων	53
Εικόνα 28: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).	54
Εικόνα 29: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).	54
Εικόνα 30: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).	55

- Εικόνα 31: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α). 55
- Εικόνα 32: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β). 56
- Εικόνα 33: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β). 56
- Εικόνα 34: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β). 57
- Εικόνα 35: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β). 57
- Εικόνα 36: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α) 58
- Εικόνα 37: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α) 59
- Εικόνα 38: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α) 59
- Εικόνα 39: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α) 60
- Εικόνα 40: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β) 60
- Εικόνα 41: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β) 61

- Εικόνα 42: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β) 61
- Εικόνα 43: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β) 62
- Εικόνα 44: Επίδραση αλλαγής ακτινοβολίας στο δείκτη βλάστησης NDVI. Με μαύρη γραμμή αναφέρονται οι τιμές NDVI χωρίς κάποιο σφάλμα. Με μπλε διακεκομμένη γραμμή σημειώνονται οι νέες τιμές που θα πάρει ο δείκτης NDVI αν θεωρήσουμε μια αύξηση της ανακλαστικότητας 1% τόσο στο κόκκινο όσο και στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Ομοίως με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή η αλλαγή του δείκτη με 2% αύξηση 63
- Εικόνα 45: Γενικό διάγραμμα πεδίου ελέγχου 64
- Εικόνα 46: Φωτογραφίες από την υλοποίηση του πεδίου ελέγχου. Φωτογραφίες από την εκσκαφή αρχαιολογικού τετραγώνου σε βάθος 25 cm (α-γ). Υλοποίηση τετραγώνου για προσομοίωση τάφου (δ) και αρχαιολογικών καταλοίπων (ε-ζ). Τοποθέτηση χόματος πίσω στα τετράγωνα (η). 66
- Εικόνα 47: Πεδίο ελέγχου μετά την υλοποίηση του 66
- Εικόνα 48: Φωτογραφίες από τη σπορά του πεδίου ελέγχου Αλάμπρας. 67
- Εικόνα 49: Αποτύπωση πεδίου με τη χρήση GPS. 67
- Εικόνα 50: Φωτογραφίες από την υλοποίηση του πεδίου ελέγχου στην περιοχή Αχέλειας. 68
- Εικόνα 51: Πυκνότητα σποράς από την περιοχή Αλάμπρας 70
- Εικόνα 52: Διάγραμμα άντλησης υγρασίας που προσεγγίζει την υδατοϊκανότητα του φυτού σε όλο το βάθος του ριζικού συστήματος. 71
- Εικόνα 53: Διάγραμμα άντλησης υγρασίας του σιταριού και κριθαριού (προσεγγιστικά). 72
- Εικόνα 54: Διάγραμμα άντλησης υγρασίας του σιταριού και κριθαριού με τα υπεδάφια κατάλοιπα στο πεδίο ελέγχου. 72
- Εικόνα 55: Χαρακτηριστικές φασματικές υπογραφές του κριθαριού με βάση επίγειες μετρήσεις. α) αρόσιμη γη πριν από τη σπορά – έδαφος, β) κριθάρι σε

πλήρη ανάπτυξη, γ) περίοδος ξεσταχυάσματος και δ) αρόσιμη γη μετά το θερισμό.	73
Εικόνα 56: Μεθοδολογία διατριβής.	79
Εικόνα 57: Αεροσκάφη ανακτούν την κυψέλη που περιέχει το φωτογραφικό φιλμ από το δορυφόρο CORONA.	84
Εικόνα 58: Γεωμετρική διόρθωση δορυφορικών εικόνων με τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου (με κίτρινο η περιοχή ενδιαφέροντος).	88
Εικόνα 59: Αποτελέσματα γεωμετρικής διόρθωσης για κάθε εικόνα (βλ. Πίνακας 4)	89
Εικόνα 60: Θέσεις 0 - 4 που χρησιμοποιήθηκαν για σκοπούς ατμοσφαιρικής επίδρασης (Θέση 0: Φράγμα Ασπρόγκρεμμου, Θέση 1: Περιοχή Άρκαλον, Θέση 2: Περιοχή Μαρτσέλου, Θέση 3: Περιοχή Μουρόκαμπου και Θέση 4: Αρχαιολογικός χώρος Νέας Πάφου) .	96
Εικόνα 61: Μετρήσεις στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου. Μέτρηση στο λαμπερτιανό στόχο (α) και βύθιση της οπτικής ίνας στο φράγμα (β)	97
Εικόνα 62: Φασματική υπογραφή νερού στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου.	97
Εικόνα 63: Υπολογισμός ισοδύναμης μάζας υδρατμών με βάση τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία (McClatchey et al.,1971)	100
Εικόνα 64: Τιμές NDVI για τις Θέσεις 1 -3 με βάση (α) τις τιμές ανακλαστικότητας χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση και (β) τιμές ανακλαστικότητας μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση (DP αλγόριθμος)	102
Εικόνα 65: Τιμές NDVI για τις Θέσεις 1 -3 με βάση (α) τις τιμές ανακλαστικότητας χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση και (β) τιμές ανακλαστικότητας μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση (με βάση τις επίγειες μετρήσεις)	102
Εικόνα 66: Η αρχαιολογική θέση που μελετήθηκε για την ατμοσφαιρική επίδραση στη Νέα Πάφο (Εικόνα από Google Earth ©).	104
Εικόνα 67: Υπολογισμός των $Global_{min}$ και $Global_{max}$ για κάθε κανάλι, με στόχο την γραμμική επέκταση του ιστογράμματος.	104
Εικόνα 68: Έγχρωμο σύνθετο NIR-R-G πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την ατμοσφαιρική διόρθωση (εικόνα 15/06/2010).	107
Εικόνα 69: Σχετικές διαφορές NDVI πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.	112
Εικόνα 70: Σύγκριση αποτελεσμάτων NDVI όπως προκύπτουν από τις δορυφορικές εικόνες (πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση) σε σχέση με τις	

- επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις για τη θέση 1 (περιοχή Παλαιπάφου, Άρκαλον). 113
- Εικόνα 71: Σύγκριση αποτελεσμάτων NDVI όπως προκύπτουν από τις δορυφορικές εικόνες (πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση) σε σχέση με τις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις για αγροτική περιοχή πλησίον του αεροδρομίου Πάφου, ΝΔ Κύπρος. 114
- Εικόνα 72: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας από 11 δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ για την περίοδο 2008 - 2010. 116
- Εικόνα 73: Σχετική υγρασία στην περιοχή Αλάμπρας για την περίοδο Νοεμβρίου - Δεκέμβριο (Δεδομένα από Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου). 118
- Εικόνα 74: Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στα τετράγωνα με κριθάρι (άξονας των X: κόκκινη ακτινοβολία, άξονας των Y: εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία). Με διακεκομμένη γραμμή η γραμμή εδάφους (soil line). 121
- Εικόνα 75: Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στα τετράγωνα με σιτάρι (άξονας των X: κόκκινη ακτινοβολία, άξονας των Y: εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία). Με διακεκομμένη γραμμή η γραμμή εδάφους (soil line) 121
- Εικόνα 76: Φωτογραφίες από τα τετράγωνα 1 και 2 στο ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας όπου φαίνεται η φυσιολογική εξέλιξη των καλλιεργειών στις περιοχές με την προσομοίωση τάφων. 122
- Εικόνα 77: Περιοχή ελεγχόμενου πεδίου Αλάμπρας και Θέσης 1 (Εικόνα από Google Earth©) 123
- Εικόνα 78: Φαινολογικός κύκλος για το κριθάρι στο τετράγωνο 1 και την θέση 1. 123
- Εικόνα 79: Ανακλαστικότητα των τετραγώνων 1-8, στην περιοχή Αλάμπρας, στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+. 124
- Εικόνα 80: Σπορά κριθαριού στην περιοχή Αλάμπρας για την περίοδο 2011-2012. 125
- Εικόνα 81: Χαρακτηριστική φωτογραφία από περιοχή τετραγώνων 3-8 με τη μη ομοιόμορφη σπορά. 125
- Εικόνα 82: Φωτογραφίες όπου επισημαίνεται το τετράγωνο 1 στην περιοχή Αλάμπρας. 129
- Εικόνα 83: Ανακλαστικότητα του ελεγχόμενου πεδίου στην Αχέλεια και στο περίγυρο του, στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+. 130

Εικόνα 84: Ανακλαστικότητα του υπεδάφιου καταλοίπου (κόκκινο χρώμα) και υγιούς βλάστησης (μπλε χρώμα) στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.	134
Εικόνα 85: Θέση μετεωρολογικού σταθμού αεροδρομίου Πάφου (Εικόνα από Google Earth©).	135
Εικόνα 86: Μετεωρολογικά δεδομένα στο χρονικό παράθυρο 17-03-2012 μέχρι 03-04-2012 στην περιοχή Αχέλειας, Πάφου (Βροχόπτωση 0.00 mm).	135
Εικόνα 87: Ενδεικτικό διάγραμμα τομών στις οποίες λήφθηκαν φασματοσκοπικές μετρήσεις πάνω από τη μαγνητική ανωμαλία (κόκκινο χρώμα).	137
Εικόνα 88: Επιτόπιες μετρήσεις στη θέση Άρκαλον 05/03/2010	138
Εικόνα 89: Φασματικές υπογραφές για τις τομές Α-Δ πάνω από την γεωφυσική ανωμαλία κατά της 05-03-2010	139
Εικόνα 90: Επιτόπιες μετρήσεις στη θέση Άρκαλον 12/03/2010. Αριστερά το διάγραμμα λήψης των μετρήσεων	140
Εικόνα 91: Φασματικές υπογραφές για τις τομές Α-Γ πάνω από τη γεωφυσική ανωμαλία κατά της 12/03/2010	141
Εικόνα 92: Φασματικές υπογραφές για τις τομές Α-Ζ πάνω από την γεωφυσική ανωμαλία κατά της 24-03-2010	142
Εικόνα 93: Φασματικές υπογραφές κριθαριού κατά της 28/04/2010	143
Εικόνα 94: Φασματικές υπογραφές κριθαριού κατά την 04/05/2010	143
Εικόνα 95: Περιοχές μελέτης φαινολογικού κύκλου: Η θέση 1 αντιστοιχεί στην αρχαιολογική περιοχή Άρκαλον, η θέση 2 σε αγροτική έκταση στην περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς και η θέση 3 σε αγροτική έκταση στην περιοχή των Κουκλιών.	144
Εικόνα 96: Ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την περιοχή της Παλαιπάφου (Θέση 1 και Θέση 3) και οι αντίστοιχες μετρήσεις για την περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς (Θέση 2). Οι μετρήσεις λήφθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς.	145
Εικόνα 97: Μέση σχετική υγρασία για την περιοχή της Παλαιπάφου (θέση 1 και θέση 3) και οι αντίστοιχες μετρήσεις για την περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς (θέση 2). Οι μετρήσεις λήφθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς.	146
Εικόνα 98: Εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ στην περιοχή της Παλαιπάφου (θέση 1 και 3) –αριστερά- και στην περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς –δεξιά).	147

Εικόνα 99: Ακτινοβολία βλάστησης στο κόκκινο μήκος κύματος (Band 3) στις τρεις περιοχές μελέτης.	148
Εικόνα 100: Ακτινοβολία βλάστησης στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος (Band 4) στις τρεις περιοχές μελέτης.	149
Εικόνα 101: Ανακλαστικότητα των θέσεων 1-3 στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.	150
Εικόνα 102: Φαινολογικός κύκλος φυτών σε διαφορετικές περιπτώσεις	152
Εικόνα 103: Δείκτης NDVI σε αρχαιολογικές και μη αρχαιολογικές περιοχές. Στο διάγραμμα απεικονίζονται επίσης και οι επίγειες μετρήσεις από φασματοραδιόμετρα.	153
Εικόνα 104: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 17-14-11 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).	156
Εικόνα 105: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 15-10-3 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).	156
Εικόνα 106: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 10-5-1 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).	157
Εικόνα 107: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 18-14-7 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).	157
Εικόνα 108: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 17-14-11 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18) μετά από τη διαδικασία του pan-sharpen.	158
Εικόνα 109: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 10-03-1 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18) μετά από τη διαδικασία του pan-sharpen.	158
Εικόνα 110: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 18-16-7 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18) μετά από τη διαδικασία του pan-sharpen.	159
Εικόνα 111: Δημιουργία υπερφασματικού δείκτη mNDVI στην περιοχή της Παλαιπάφου. Τα διανυσματικά στοιχεία αφορούν αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων.	160
Εικόνα 112: Αποτελέσματα ανάλυσης PCA στην περιοχή της Παλαιπάφου. Τα διανυσματικά στοιχεία αφορούν αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων.	160
Εικόνα 113: Παράδειγμα mixed pixel ανάλογα με τη χωρική διακριτική ικανότητα του δέκτη.	161
Εικόνα 114: Μεθοδολογικό διάγραμμα εφαρμογής του αλγορίθμου LSU	162

- Εικόνα 115: Έγχρωμος σύνθετος χάρτης της περιοχής της Παλαιπάφου, μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου LSU σε δορυφορική εικόνα Chris Proba. Με κόκκινο περιοχές με καταπονημένη βλάστηση, με μπλε περιοχές με υγιή βλάστηση και πράσινο περιοχές με έδαφος. 163
- Εικόνα 116: Έγχρωμος σύνθετος χάρτης της περιοχής της Παλαιπάφου, μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου LSU σε δορυφορική εικόνα Landsat. Με έντονο κόκκινο περιοχές με καταπονημένη βλάστηση. 164
- Εικόνα 117: Θέση υψώματος Λαόνας στην περιοχή της Παλαιπάφου (εικόνα Google Earth). 165
- Εικόνα 118: Ενδείξεις από μαγνητικές ανωμαλίες στην περιοχή Λαόνας(από Ερευνητικό πρόγραμμα Παλαιπάφου). 168
- Εικόνα 119: Φασματικές υπογραφές (03-02-2012) πάνω στο ύψωμα Λαόνας. Στην αριστερή εικόνα οι μετρήσεις σε βλάστηση εκτός της ανωμαλίας και στη δεξιά εικόνα μετρήσεις πάνω στην ανωμαλία που εντοπίστηκε στην εικόνα GeoEye-1 (06-01-2011). 168
- Εικόνα 120: Η κυκλική ανωμαλία (αμφιθέατρο;) όπως απεικονίζεται σε (α) σύγχρονους τοπογραφικούς χάρτες, (β) αεροφωτογραφία του 1993, (γ) ορθοφωτογραφία του 2008, (δ) δορυφορική εικόνα QuickBird 23-01-2003, (ε) IKONOS 14-03-2000 και (στ) GeoEye 09-01-2011. 169
- Εικόνα 121: Εικόνες από το αρχείο Google Earth (α: 23/12/2002, β: 9/9/2006, γ: 26/6/2008 και δ: 30/05/2010). 169
- Εικόνα 122: Ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος της Νέας Πάφου όπως καταγράφηκε σε παγχρωματική αεροφωτογραφία του 1945 (πάνω) και μεγέθυνση της πιθανής ελλειπτικής ανωμαλίας (κάτω). 170
- Εικόνα 123: Ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος της Νέας Πάφου όπως καταγράφηκε σε παγχρωματική αεροφωτογραφία του 1957 (πάνω) και μεγέθυνση της πιθανής ελλειπτικής ανωμαλίας (κάτω). 171
- Εικόνα 124: Αρχική εικόνα GeoEye-1 09-01-2011 (α), συνένωση αρχικής εικόνας με το παγχρωματικό κανάλι (β), φίλτρο 3x3 με διεύθυνση Δ-Α (γ), ψηφιοποίηση των αποτελεσμάτων (δ). 172
- Εικόνα 125: Φωτογραφίες χαμηλού ύψους της περιοχής με τη χρήση αερόστατου. Με βέλη απεικονίζεται η ελλειπτική ανωμαλία. 173
- Εικόνα 126: Ανασκαφικά τετράγωνα στην περιοχή Άρκαλον, Παλαίπαφος. 174

Εικόνα 127: Αποτελέσματα γεωφυσικών διασκοπήσεων το φθινόπωρο του 2010 στη θέση Άρκαλον, Παλαίπαφος (από Σαρρή και Παπαδόπουλο, 2010).	175
Εικόνα 128: Φωτογραφίες από τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί από το Τμήμα Αρχαιοτήτων.	175
Εικόνα 129: Οι Νεολιθικές θέσεις του Θεσσαλικού κάμπου που μελετήθηκαν στη διατριβή.	176
Εικόνα 130: Μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό στη Λάρισα	177
Εικόνα 131: Φωτογραφίες από τις μετρήσεις στις Νεολιθικές θέσεις της Θεσσαλίας	178
Εικόνα 132: Διάγραμμα τομών σε κάθε μαγούλα	179
Εικόνα 133: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με την μαγούλα Νίκαια 6.	180
Εικόνα 134: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 6 (Α' τομή)	181
Εικόνα 135: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 6 (Β' τομή)	181
Εικόνα 136: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 6 (Γ' τομή)	182
Εικόνα 137: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με τη μαγούλα Νίκαια 16.	182
Εικόνα 138: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 16 (Γ' τομή)	183
Εικόνα 139: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με τη μαγούλα Καρατσάνταγλι	183
Εικόνα 140: Φασματικές υπογραφές στη θέση Καρατσάνταγλι	184
Εικόνα 141: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με τη μαγούλα Αλμυρός II	185
Εικόνα 142: Φασματικές υπογραφές στη θέση Αλμυρός II.	185
Εικόνα 143: RSR φίλτρα για τα πρώτα τέσσερα κανάλια του δορυφόρου Landsat 5 TM	188
Εικόνα 144: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης: (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR, για τις τρεις τομές στη θέση Νίκαια 6 σε σχέση με το ανάγλυφο.	189
Εικόνα 145: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR για τις τρεις τομές στη θέση Νίκαια 16. Η κεντρική τομή (γ και ζ) δείχνει ένα διαφορετικό πρότυπο για τους δείκτες βλάστησης σε σχέση με το ανάγλυφο.	191
Εικόνα 146: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR για τις τρεις τομές στη θέση Καρατσάνταγλι σε σχέση με το ανάγλυφο.	192

- Εικόνα 147: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR για τις τρεις τομές στη θέση Αλμυρός II σε σχέση με το ανάγλυφο. 193
- Εικόνα 148: Διάγραμμα δεικτών βλάστησης για την Α' τομή στη θέση Νίκαια 6 σε σχέση με το ανάγλυφο. 195
- Εικόνα 149: Διάγραμμα δεικτών βλάστησης για την Β' τομή στη θέση Νίκαια 6 σε σχέση με το ανάγλυφο. 197
- Εικόνα 150: Διάγραμμα δεικτών βλάστησης για την Γ' τομή στη θέση Νίκαια 16 σε σχέση με το ανάγλυφο. 199
- Εικόνα 151: Διάγραμμα NDVI κατά μήκος της θέσης Νίκαια 6 για διάφορες ημερομηνίες 200
- Εικόνα 152: Διάγραμμα SR κατά μήκος της θέσης Νίκαια 6 για διάφορες ημερομηνίες 200
- Εικόνα 153: Εφαρμογή δείκτη βλάστησης NDVI (αριστερά) και του δείκτη SR (δεξιά) σε δορυφορική εικόνα τύπου Landsat 5 TM. 201
- Εικόνα 154: Αποτελέσματα δείκτη NDVI στη θέση Νίκαια 6 (εικόνες Landsat) 202
- Εικόνα 155: Αποτελέσματα δείκτη NDVI στη θέση Νίκαια 16 (εικόνες Landsat) 203
- Εικόνα 156: Αποτελέσματα δείκτη NDVI στη θέση Αλμυρός II (εικόνες Landsat) 203
- Εικόνα 157: Αποτελέσματα του δείκτη NDVI στη θέση Πρόδρομος II: (α) αρχική εικόνα Landsat χωρίς ραδιομετρική ενίσχυση, (β) εικόνα της περιοχής μετά από γραμμική επέκταση max-min (γ) εικόνα μετά από τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Πρόδρομος II και (δ) τροποποιημένη τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Πρόδρομος II. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η μαρούλα. 204
- Εικόνα 158: Αποτελέσματα δείκτη της θέσης Ζερέλια: (α) αρχική εικόνα Landsat χωρίς ραδιομετρική ενίσχυση, (β) εικόνα της περιοχής μετά από γραμμική επέκταση max-min (γ) εικόνα μετά από τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Ζερέλια και (δ) τροποποιημένη τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Ζερέλια. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η μαρούλα. 204
- Εικόνα 159: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου Tasseled Cap για τη θέση Νίκαια 16 (σε κύκλο): (α) Brightness, (β) greenness, (γ) wetness και (δ) RGB των τριών πρώτων καναλιών του Tasseled Cap. 205

Εικόνα 160: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου Tasselled Cap για τη θέση Αλμυρός ΙΙ (σε κύκλο): (α) Brightness, (β) greenness, (γ) wetness και (δ) RGB των τριών πρώτων καναλιών του Tasselled Cap.	206
Εικόνα 161: Συνολικός αριθμός δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη Θεσσαλία ανά έτος.	209
Εικόνα 162: Θέσεις που επιλέχθηκαν για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου στη Θεσσαλία. Με κόκκινο η αρχαιολογική θέση (Αλμυρός ΙΙ) και με άσπρο οι μη αρχαιολογικές θέσεις.	210
Εικόνα 163: Φαινολογικός κύκλος για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός ΙΙ και τη μη αρχαιολογική θέση 1 (βλ. Εικόνα 161)	211
Εικόνα 164: Φαινολογικός κύκλος για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός ΙΙ και τη μη αρχαιολογική θέση 2 (βλ. Εικόνα 161)	212
Εικόνα 165: Φαινολογικός κύκλος για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός ΙΙ και τη μη αρχαιολογική θέση 3 (βλ. Εικόνα 101)	213
Εικόνα 166: Φαινολογικός κύκλος για τις θέσεις Αλμυρός ΙΙ και θέσεις 1 – 3 για την περίοδο 9-6-2003 μέχρι 21-11-2003.	213
Εικόνα 167: Περιοχές μελέτης στην ευρύτερη περιοχή Visztu, Ουγγαρία.	214
Εικόνα 168: Φωτογραφίες από τη διάρκεια λήψης φασματοραδιομετρικών παρατηρήσεων στην περιοχή Visztu.	215
Εικόνα 169: Διαγράμματα τομών που έγιναν στα τετράγωνα 403-409 με επίγεια φασματοραδιόμετρα. Υπόβαθρο: γεωφυσικές ανωμαλίες από αποτελέσματα του ΙΜΣ (από Sarris και Papadopoulos 2011).	216
Εικόνα 170: Διάγραμμα τομής που υλοποιήθηκε στα τετράγωνα 4527 και 4503 με επίγεια φασματοραδιόμετρα. Υπόβαθρο: γεωφυσικές ανωμαλίες από αποτελέσματα του ΙΜΣ (από Sarris και Papadopoulos 2011).	217
Εικόνα 171: Φασματικές υπογραφές για την τομή Α	218
Εικόνα 172: Φασματικές υπογραφές για την τομή Β	218
Εικόνα 173: Φασματικές υπογραφές για την τομή Ε	219
Εικόνα 174: Φασματικές υπογραφές για την τομή Ζ	219
Εικόνα 175: Διάγραμμα NDVI για την τομή Α.	220
Εικόνα 176: Διάγραμμα NDVI για την τομή Β.	220
Εικόνα 177: Διάγραμμα NDVI για την τομή Ζ.	221
Εικόνα 178: Διάγραμμα SR για την τομή Ζ.	221
Εικόνα 179: Φωτογραφίες από τη θέση Veszto – Magor.	222

- Εικόνα 180: Φωτογραφίες από τα τετράγωνα 4509 και 4507 222
- Εικόνα 181: Αποτελέσματα παρεμβολής των σημειακών παρατηρήσεων. Από αριστερά προς δεξιά: μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με πολώνυμα, μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, μέθοδος προσαρμογής splines και μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (kriging). 226
- Εικόνα 182: Αποτελέσματα εφαρμογής διάφορων δεικτών βλάστησης στη θέση Veszto – Magor. Η γεωφυσική ανωμαλία που έχει αναγνωριστεί και από την μετατροπή των επίγειων φασματοραδιομετρικών μετρήσεων σε δείκτες βλάστησης βρίσκεται στα 80m. Μικρότερη ανωμαλία έχει εντοπιστεί και στα 30m. 228
- Εικόνα 183: Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τη θέση Veszto – Magor. Από αριστερά προς δεξιά PCA1 - PCA3. 230
- Εικόνα 184: Πολυφασματικός δείκτης NDVI (αριστερά) και υπερφασματικοί δείκτες NDVI και NDVI2 (κέντρο και δεξιά) αντίστοιχα για τη θέση Veszto – Magor. 231
- Εικόνα 185: Ο δείκτης NDVI με βάση τις μετρήσεις όπως λήφθηκαν στο ύπαιθρο με διάστημα 1m (μέση) και πιο πυκνά βήματα (2m και 5m). 231
- Εικόνα 186: Αποτελέσματα μετρήσεων γεωραντάρ και μαγνητικών διασκοπήσεων στην περιοχή Vészto-Mágor (Εικ. 6.20, Sarris και Papadopoulos, 2011). Στο άσπρο ορθογώνιο απεικονίζεται η κοινή περιοχή με τις επίγειες φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις. 233
- Εικόνα 187: Αποτελέσματα γεωφυσικών διασκοπήσεων (αριστερά, Εικ. 6.21, Sarris και Papadopoulos 2011) και εφαρμογή δείκτη NDVI (με βήμα 5 m) με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων. Στην κόκκινη περιοχή τα υπεδάφια κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί σε βάθος πέραν του 1.3 m. 234
- Εικόνα 188: Αποτελέσματα γεωφυσικών διασκοπήσεων (αριστερά, Εικ. 6.21, Sarris και Papadopoulos 2011) και εφαρμογή δείκτη NDVI (με βήμα 1 m) με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων. Στην κόκκινη περιοχή τα υπεδάφια κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί σε βάθος πέραν του 1.3 m. 235
- Εικόνα 189: Εφαρμογή δείκτη NDVI (αριστερά) και του δείκτη TSAVI (δεξιά) στο τετράγωνο 4509. 236
- Εικόνα 190: Σύγκριση αποτελεσμάτων γεωφυσικών διασκοπήσεων (γραμμικές ενδείξεις) και του δείκτη NDVI (υπόβαθρο εικόνας) για το τετράγωνο 4509. 236

- Εικόνα 191: Ανακλαστικότητα στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο κανάλι (πρώτη σειρά) και αποτελέσματα από την εφαρμογή διαφόρων δεικτών βλάστησης στο τετράγωνο 4509. 237
- Εικόνα 192: Δείκτης NDVI (αριστερά) και TSAVI (δεξιά) στο τετράγωνο 4507 238
- Εικόνα 193: Εικόνα 194: Φωτογραφίες βλάστησης από τις θέσεις Vészto-Mágor (1η και 2η σειρά), που φαίνεται η ομοιομορφία της βλάστησης σε σχέση με τα τετράγωνα 403-409, 4527, 4503 (3η σειρά) και 4507, 4509 (4η σειρά). Η πυκνότητα της βλάστησης σε αυτά τα τετράγωνα δεν επέτρεψε την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. 239
- Εικόνα 195: Διακυμάνσεις της ακτινοβολίας στα κανάλια 1-4 (α-δ)στη θέση Veszto – Magor 243
- Εικόνα 196: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αλάμπρας, Λευκωσία (n = 1897). 245
- Εικόνα 197: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αχέλειας, Πάφου (n = 569). 245
- Εικόνα 198: Χαρακτηριστικές φασματικές υπογραφές της βλάστησης. 247
- Εικόνα 199: Χαρακτηριστική φασματική υπογραφή υγιούς βλάστησης σε σχέση με το μήκος κύματος (φάσμα). Ο άξονας των X αντιπροσωπεύει το μήκος κύματος (από 450-900nm) και ο άξονας των Y την ανακλαστικότητα (%). 252
- Εικόνα 200: Ανακλαστικότητα του υπεδάφιου καταλοίπου (κόκκινο χρώμα) και υγιούς βλάστησης (μπλε χρώμα) στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+. 261
- Εικόνα 201: Γραφική αναπαράσταση των τελικών αποτελεσμάτων από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για την περιοχή Αχέλειας. 261
- Εικόνα 202: Γραφική αναπαράσταση των τελικών αποτελεσμάτων από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για την περιοχή Αλάμπρας. 262
- Εικόνα 203: Περιοχή κάλυψης εικόνων HYPERION στο Θεσσαλικό κάμπο 263

- Εικόνα 204: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (03-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009) , στη θέση Αναγέννηση 1. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Αναγέννηση 1 μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.) 264
- Εικόνα 205: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (03-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009), στη θέση Μελιά 2. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Μέλια 2 μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.) 265
- Εικόνα 206: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (03-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009), στη θέση Μελιά 1. Η μη αναγνώριση διαφοροποιήσεων βλάστησης στη συγκεκριμένη αρχαιολογική θέση θα πρέπει να αποδοθεί στην απουσία βλάστησης. 266
- Εικόνα 207: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (19-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009), στη θέση Στεφανοβίκειο 5. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Στεφανοβίκειο 5, μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.) 267
- Εικόνα 208: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (19-09-2001) στη θέση Ριζόμυλος 1. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Ριζόμυλος 1, μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.) 268
- Εικόνα 209: Ενίσχυση της διαφοροποίησης της βλάστησης με τη χρήση του αρχαιολογικού δείκτη και του πολυφασματικού - υπερφασματικού δείκτη NDVI $((\rho_{800}-\rho_{670}) / (\rho_{800}+\rho_{670}))$ για το ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας (κριθάρι) 271
- Εικόνα 210: Ενίσχυση της διαφοροποίησης της βλάστησης με τη χρήση του αρχαιολογικού δείκτη και του πολυφασματικού - υπερφασματικού δείκτη NDVI $((\rho_{800}-\rho_{670}) / (\rho_{800}+\rho_{670}))$ για το ελεγχόμενο πεδίο Αχέλειας (σιτάρι) 271

Εικόνα 211: Φασματικό εύρος του κόκκινο και εγγύς υπέρυθρου καναλιού των δορυφορικών δεκτών του Πίνακας 35. Με πράσινη γραμμή η φασματική υπογραφή υγιούς βλάστησης.	275
Εικόνα 212: RSR φίλτρα για το κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο κανάλι όλων των αισθητήρων του Πίνακας 35.	276
Εικόνα 213: Φασματικές υπογραφές της βλάστησης και του εδάφους όπως τις εμφανίζει ο Πίνακας 36	278
Εικόνα 214: Φασματική υπογραφή στο κόκκινο κανάλι για κάθε αισθητήρα σε κάθε μέτρηση (βλ. Πίνακας 36)	280
Εικόνα 215: : Φασματική υπογραφή στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι για κάθε αισθητήρα σε κάθε μέτρηση (βλ. Πίνακας 17)	280
Εικόνα 216: Σχετικές διαφορές αισθητήρων στο κόκκινο κανάλι ως προς τον Landsat 7 ETM+.	281
Εικόνα 217: Σχετικές διαφορές αισθητήρων στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι ως προς τον Landsat 7 ETM+.	282
Εικόνα 218: Ο δείκτης βλάστησης NDVI όπως υπολογίστηκε με βάση όλες τις φασματικές υπογραφές (βλ. Πίνακας 36).	283
Εικόνα 219: Ο δείκτης SAVI όπως υπολογίστηκε με βάση όλες τις φασματικές υπογραφές (βλ. Πίνακας 17)	284
Εικόνα 220: Ο δείκτης βλάστησης SR όπως υπολογίστηκε με βάση όλες τις φασματικές υπογραφές (βλ. Πίνακας 17)	284
Εικόνα 221: Σχετικές διαφορές του δείκτη NDVI ως προς τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+	287
Εικόνα 222: Σχετικές διαφορές του δείκτη SAVI ως προς τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+	287
Εικόνα 223: Σχετικές διαφορές του δείκτη SR ως προς τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+	289
Εικόνα 224: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης NDVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.	291
Εικόνα 225: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης EVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η	

- διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 292
- Εικόνα 226: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης Green NDVI. Σε γκρίζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 292
- Εικόνα 227: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης SR. Σε γκρίζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 293
- Εικόνα 228: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης TSAVI. Σε γκρίζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 293
- Εικόνα 229: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης RDVI. Σε γκρίζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 294
- Εικόνα 230: Φωτογραφίες πεδίου κατά την εμφάνιση καρπών στο κριθάρι στην περιοχή Αλάμπρας (αριστερά). Στην δεξιά φωτογραφία κριθάρι που βρίσκεται πάνω από την αρχαιολογική περιοχή (A) και την μη αρχαιολογική περιοχή (B). 294
- Εικόνα 231: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αχέλειας με το δείκτη βλάστησης NDVI. Με πράσινο πλαίσιο η βέλτιστη χρονική στιγμή όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 295
- Εικόνα 232: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αχέλειας με το δείκτη βλάστησης EVI. Με πράσινο πλαίσιο η βέλτιστη χρονική στιγμή όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 295
- Εικόνα 233: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αχέλειας με το δείκτη βλάστησης Green NDVI. Με πράσινο πλαίσιο η βέλτιστη χρονική στιγμή όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά. 296
- Εικόνα 234: Φωτογραφίες πεδίου κατά την εμφάνιση καρπών στο σιτάρι στην περιοχή Αχέλειας. 296
- Εικόνα 235: Βήματα προτεινόμενης μεθοδολογίας 297

Εικόνα 236: Κριτήρια για την επιλογή της περιοχής Β.	301
Εικόνα 237: Παράδειγμα γραμμών εδάφους από τέσσερις διαφορετικές περιοχές (Αλάμπρα, Αχέλεια, Κούκλια, Κοκκινοχώρια)	303
Εικόνα 238: Έλεγχος σύμπτωσης γραμμών εδάφους για δύο περιοχές διερεύνησης.	303

Κατάλογος Πινάκων

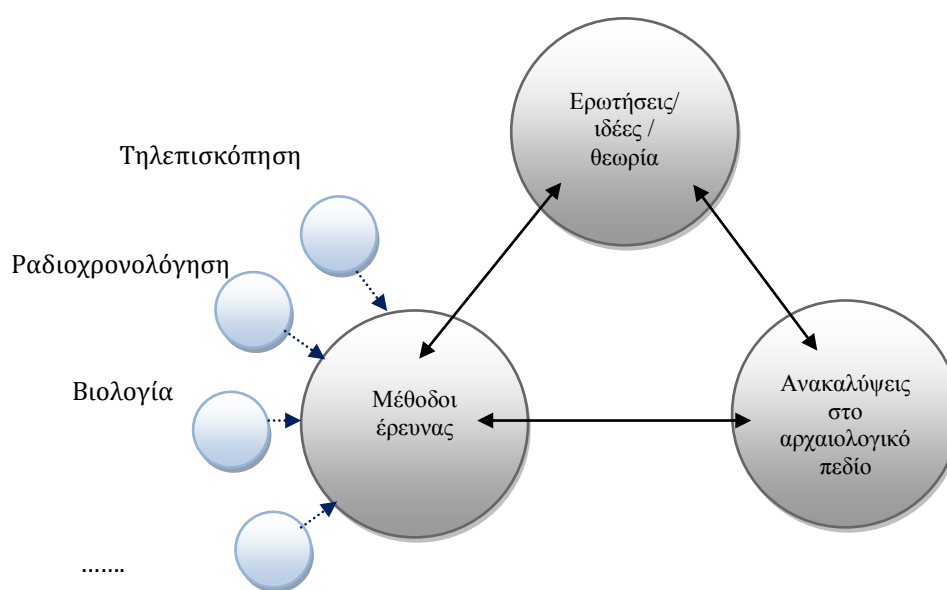
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά διάφορων δορυφορικών δεκτών που είναι διαθέσιμοι σήμερα στο χρήστη.	8
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φασματοραδιομέτρου GER 1500.	47
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά δορυφόρων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην διατριβή	85
Πίνακας 4: Στατιστικά αποτελέσματα γεωμετρικής διόρθωσης δορυφορικών εικόνων τύπου Landsat TM/ETM+	88
Πίνακας 5: Δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για ατμοσφαιρική διόρθωση	96
Πίνακας 6: Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου.	98
Πίνακας 7: Μετεωρολογικά δεδομένα από το αεροδρόμιο της Πάφου (δεδομένα από την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου).	99
Πίνακας 8: Ισοδύναμη μάζα υδρατμών και οπτικό πάχος υδρατμών για τις δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη	101
Πίνακας 9: Δείγμα από τα αποτελέσματα ατμοσφαιρικής διόρθωσης με την τροποποιημένη μέθοδο DP στην περιοχή του Ασπρόγκρεμμου	105
Πίνακας 10: Δείγμα από τα αποτελέσματα ατμοσφαιρικής διόρθωσης με την τροποποιημένη μέθοδο DP στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Νέας Πάφου (επισημαίνεται με κύκλο στην πρώτη εικόνα αριστερά).	108
Πίνακας 11: Δείγμα από τα αποτελέσματα ατμοσφαιρικής διόρθωσης με την μέθοδο DP στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Νέας Πάφου.	110
Πίνακας 12: Σχετική διαφορά του δείκτη NDVI για όλες τις θέσεις πριν (Π) και μετά (Μ) την ατμοσφαιρική διόρθωση (οι min και max τιμές για κάθε θέση έχουν υπογραμμιστεί)	113
Πίνακας 13: Μετεωρολογικά δεδομένα βροχόπτωσης στην περιοχή Αλάμπρας για την περίοδο Νοεμβρίου - Δεκέμβριο (Δεδομένα από Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου).	117
Πίνακας 14: Φωτογραφίες από τα διάφορα στάδια της βλάστησης στο ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας της Α' περιόδου (2009-2010).	119
Πίνακας 15: Κατάλογος φασματικών υπογραφών στο τετράγωνο 1, περιοχή Αλάμπρας (περίοδος 2011-2012).	126

Πίνακας 16: Κατάλογος φασματικών υπογραφών στην περιοχή Αχέλειας (περίοδος 2011-2012).	131
Πίνακας 17: Κατάλογος εικόνων Landsat TM/ETM+ που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου	146
Πίνακας 18: Φασματικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Chris Proba Mode 2	154
Πίνακας 19: Κατάλογος διαθέσιμων εικόνων για τη θέση Λαόνας στην Παλαίπαφο. Με βέλη στην εικόνα GeoEye-1 παρουσιάζονται οι δύο ανωμαλίες που εντοπίστηκαν.	166
Πίνακας 20: Δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν στις μαγούλες Θεσσαλίας	186
Πίνακας 21: Δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου στο Θεσσαλικό κάμπο	206
Πίνακας 22: Δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν στη θέση Vestzo - Magor	223
Πίνακας 23: Συσχέτιση μεταξύ των δεικτών του Πίνακα 16. Υψηλή συσχέτιση ($R^2 > 85\%$) καταγράφεται με γκρι χρώμα.	229
Πίνακας 24: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αλάμπρας, Λευκωσία (n = 1897 παρατηρήσεις).	246
Πίνακας 25: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αχέλειας, Πάφου (n = 569 παρατηρήσεις).	246
Πίνακας 26: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ευκλείδεια απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).	249
Πίνακας 27: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την απόσταση Mahalanobis για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).	250
Πίνακας 28: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ομοιότητα συνημίτονου απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).	251
Πίνακας 29: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ευκλείδεια απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).	253

Πίνακας 30: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την απόσταση Mahalanobis για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω). Με γκρι καταγράφονται οι ψηλότερες τιμές.	253
Πίνακας 31: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ομοιότητα συνημίτονου απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).	254
Πίνακας 32: Αποτελέσματα ανάλυσης κύριων συνιστωσών για την περιοχή Αχέλειας και Αλάμπρας.	257
Πίνακας 33: Συντελεστές για την κάθε κύρια συνιστώσα από δεδομένα της περιοχής Αχέλειας	258
Πίνακας 34: Συντελεστές για την κάθε κύρια συνιστώσα από δεδομένα της περιοχής Αλάμπρας	259
Πίνακας 35: Χαρακτηριστικά αισθητήρων που μελετήθηκαν για την φασματική τους ευαισθησία.	274
Πίνακας 36: Συλλογή επίγειων δεδομένων από την περιοχή Αλάμπρας	276
Πίνακας 37: Τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI για όλους τους αισθητήρες και φασματικές υπογραφές	285
Πίνακας 38: Τιμές του δείκτη SAVI για όλους τους αισθητήρες και φασματικές υπογραφές	285
Πίνακας 39: Τιμές του δείκτη SR για όλους τους αισθητήρες και φασματικές υπογραφές	285
Πίνακας 40: Προσαρμογή 2ου βαθμού πολωνύμου στις σχετικές διαφορές NDVI της Εικόνα 221. Το y στην εξίσωση 2 ^{ου} βαθμού αντιπροσωπεύει την τιμή NDVI για τον κάθε δέκτη ενώ η τιμή X αφορά την τιμή NDVI όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ETM+.	288
Πίνακας 41: Προσαρμογή 2ου βαθμού πολωνύμου στις σχετικές διαφορές SAVI της Εικόνα 222. Το y στην εξίσωση 2 ^{ου} βαθμού αντιπροσωπεύει την τιμή SAVI για τον κάθε δέκτη ενώ η τιμή X αφορά την τιμή SAVI όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ETM+.	288
Πίνακας 42: Προσαρμογή 2ου βαθμού πολωνύμου στις σχετικές διαφορές SR της Εικόνα 223. Το y στην εξίσωση 2 ^{ου} βαθμού αντιπροσωπεύει την τιμή SR για τον κάθε δέκτη ενώ η τιμή X αφορά την τιμή SR όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ETM+.	289

1. Εισαγωγή

Η αρχαιολογία, όπως εύστοχα διατυπώθηκε από τους Renfrew και Bahn (2001), είναι μια συναρπαστική αναζήτηση γνώσης γύρω από τον άνθρωπο και το παρελθόν του. Η αρχαιολογία στη διαδικασία εξερεύνησης για το άγνωστο παρελθόν προσπαθεί να εφαρμόσει θεωρητικά μοντέλα, ιδέες αλλά και ερωτήματα με σκοπό να δοθούν εξηγήσεις και απαντήσεις μέσα από τα ίδια τα αρχαιολογικά ευρήματα. Η διερεύνηση αυτών των βασικών ερωτημάτων γίνεται μέσα από μια σειρά από αρχαιολογικές έρευνες (επιφανειακές επισκοπήσεις, μελέτη υλικού, ανασκαφές κ.τ.λ.) με τη βοήθεια άλλων επιστημών. Με βάση τα στοιχεία και τις αναλύσεις που προκύπτουν, αλλά και τη συνεχή ροή των δεδομένων, ο ερευνητής θα πρέπει να είναι σε θέση να βρει τις απαντήσεις που ψάχνει ή να αναθεωρήσει το θεωρητικό του μοντέλο (Renfrew και Bahn 2001, Lock 2003). Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης μπορεί να συμβάλει, μαζί με άλλες επιστήμες, στην αρχαιολογική έρευνα και να παρέχει πολύτιμα στοιχεία και πληροφορίες στον ερευνητή (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Έρευνα στην Αρχαιολογία

Η Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) είναι η επιστήμη η οποία αφορά τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, τα οποία έχουν αποκτηθεί από μια συσκευή, χωρίς να είναι σε άμεση επαφή με το μελετώμενο αντικείμενο (Levin 1999, Parcak

2009). Πιο συγκεκριμένα με τον όρο Τηλεπισκόπηση, περιλαμβάνονται όλες οι μέθοδοι που επιτρέπουν, με τη χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τον εντοπισμό και την ανίχνευση διάφορων φαινομένων (Sabins 1997).

Με βάση τον πιο πάνω γενικό ορισμό που δόθηκε διάφορες τεχνικές όπως είναι η δορυφορική τηλεπισκόπηση, η αεροφωτογράφιση, οι επίγειες γεωφυσικές διασκοπήσεις ή ακόμη και η τρισδιάστατη σάρωση αντικειμένων, αποτελούν επιστημονικά πεδία της Τηλεπισκόπησης (Johnson 2006). Επεκτείνοντας αυτόν τον ορισμό η Parcak (2009) στην έρευνά της αναφέρει ότι όλες οι τεχνικές φωτογράφισης, βιντεογράφισης και γενικότερα οπτικοποίησης, εμπίπτουν στο γνωστικό πεδίο της Τηλεπισκόπησης.

Η Τηλεπισκόπηση ως επιστήμη έχει ανοίξει νέους ορίζοντες και δυνατότητες στην επιστήμη της Αρχαιολογίας. Η εναέρια φωτογράφιση εικόνων μπορεί να ανιχνεύσει φαινόμενα στην επιφάνεια του εδάφους τα οποία συνδέονται με υπεδάφια μνημεία (Bewley *et al.*, 1999). Η χρήση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από δορυφορικές εικόνες πέρα από το ορατό, όπως είναι το υπέρυθρο και το θερμικό έχει χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση αρχαιολογικών καταλοίπων κάτω από πυκνή βλάστηση και ερήμους (McCaughey *et al.*, 1982). Επιπλέον η Τηλεπισκόπηση ως μια μη καταστροφική τεχνική μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη συνολική διερεύνηση ενός αρχαιολογικού χώρου, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την ανασκαφική περίοδο. Σε επίπεδο μικροκλίμακας οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορεί να προσφέρουν πληροφορίες για υπεδάφια μνημεία, ενώ σε επίπεδο μακροκλίμακας οι αεροφωτογραφίες και η δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορεί να υποδείξουν εκτάσεις όπου εντοπίζονται ίχνη παλαιότερων επεμβάσεων στο χώρο. Παράλληλα μπορεί να συμβάλει στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος χώρου ενός μνημείου και τις ανθρωπογενείς και περιβαλλοντικές επιδράσεις που έχουν σημειωθεί σε αυτό με το πέρασμα του χρόνου (Rowlands και Sarris, 2007; Masini και Lasaponara, 2007; Hadjimitsis *et al.*, 2009; Ventera *et al.*, 2006; Negria και Leucci, 2006; Cavalli *et al.*, 2007; Altaweel 2005; Aqduş *et al.*, 2008; Bassani *et al.*, 2009).

Η παρούσα διατριβή εστιάζεται στον εντοπισμό υπεδάφιων αρχαιολογικών καταλοίπων μέσα από την καταγραφή φασματικών διαφοροποιήσεων σε περιοχές που καλύπτονται από βλάστηση (crop marks). Αυτή η μέθοδος είναι μάλιστα και η

πιο διαδεδομένη στο επιστημονικό πεδίο της Αρχαιοηλεπισκόπησης. Αν και οι σχετικές έρευνες και εφαρμογές έχουν αρχίσει να πολλαπλασιάζονται την τελευταία δεκαετία – ως αποτέλεσμα κυρίως της τεχνολογικής ανάπτυξης των δορυφορικών δεκτών- (βλ. επόμενο κεφάλαιο) εντούτοις δύο βασικά ερωτήματα που άπτονται των διαφοροποιήσεων της βλάστησης παραμένουν ανοικτά: *ποια είναι η καλύτερη περίοδος παρακολούθησης της βλάστησης και ποιες φασματικές περιοχές προσφέρονται για να ενισχυθεί το τελικό αποτέλεσμα στην εικόνα.* Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στο πλαίσιο της διατριβής, έδειξε ότι αυτά τα βασικά ερωτήματα είναι σχεδόν αδύνατον να απαντηθούν αφενός λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου και αφετέρου λόγω της συνήθους πρακτικής που εφαρμόζεται στην Αρχαιοηλεπίσκοπηση. Για το λόγο αυτό η παρούσα διατριβή έχει εισαγάγει και υλοποιήσει την έννοια της “Πειραματικής Αρχαιοηλεπισκόπησης” για τη συστηματική μελέτη των διαφοροποιήσεων της βλάστησης σε πεδία ελέγχου.

Η παρούσα διατριβή παράλληλα πραγματεύεται την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου για τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων, με τη συνδυασμένη χρήση δορυφορικών και επίγειων δεδομένων σε περιπτώσεις όπου η χωρική ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων δεν είναι επαρκής.

Στο πλαίσιο της διατριβής πραγματοποιήθηκαν επίγειες και δορυφορικές παρατηρήσεις σε τρεις γνωστές αρχαιολογικές θέσεις: στην Παλαίπαφο (σημερινό χωριό Κούκλια επαρχίας Πάφου, Κύπρου), τις Νεολιθικές θέσεις (μαγούλες) στο Θεσσαλικό κάμπο (κεντρική Ελλάδα) καθώς και στην θέση Visztu η οποία βρίσκεται στην Μεγάλη Πεδιάδα (“Great Hungarian Plain”) της Ουγγαρίας. Στις θέσεις αυτές έγιναν συστηματικές αρχαιολογικές έρευνες από διάφορα πανεπιστήμια (όπως την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας Πανεπιστήμιου Κύπρου κ.ά), ενώ παράλληλα έχουν γίνει και άλλες έρευνες επιφανειακής επισκόπησης, κυρίως γεωφυσικές διασκοπήσεις από το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας από την Ελλάδα.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από άλλα οκτώ κεφάλαια τα οποία αναπτύσσονται εν συντομία στη συνέχεια: Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις διάφορες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία. Σε αυτή την ανασκόπηση γίνεται και αναφορά στους διάφορους δέκτες που έχουν

χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς. Το κεφάλαιο κλείνει με τη συμβολή της παρούσας διατριβής για την Αρχαιοτηλεπισκόπηση. Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές μελέτης όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις για τους σκοπούς της διατριβής. Οι θέσεις αυτές διακρίνονται σε 3 αρχαιολογικές θέσεις σε διαφορετικές περιοχές και σε 2 ελεγχόμενα πεδία στην Κύπρο. Σκοπός του επόμενου κεφαλαίου (**Κεφάλαιο 4**) είναι να γίνει μια εισαγωγή στις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις. Παράλληλα περιγράφεται η διαδικασία υλοποίησης των ελεγχόμενων πεδίων, σε Αλάμπρα και Αχέλεια. Το κεφάλαιο κλείνει με μια τεκμηρίωση της επιλογής της βλάστησης και κάποιες άλλες έρευνες που έγιναν κατά καιρούς στις αρχαιολογικές θέσεις που εξετάστηκαν.

Στο **Κεφάλαιο 5** που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε στη διατριβή αλλά και τα διαθέσιμα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Γίνεται αναφορά στις διαδικασίες προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων με ιδιαίτερη αναφορά στην ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων. Τα αποτελέσματα ανά περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στη συνέχεια (**Κεφάλαιο 6**). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τόσο τα αποτελέσματα από τις επίγειες μετρήσεις αλλά και τα αποτελέσματα από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων. Παράλληλα γίνεται και μια προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων με άλλες τεχνικές εντοπισμού υπεδάφινων στόχων, όπως είναι τα γεωφυσικά αλλά και με αποτελέσματα αρχαιολογικής έρευνας (ανασκαφές ή επιφανειακές επισκοπήσεις).

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια προσπάθεια αξιολόγησης όλων των αποτελεσμάτων. Στόχος είναι να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα για τη χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία. Ακολουθεί η παρουσίαση μια νέας μεθοδολογίας που προτείνεται μέσα από τη διατριβή με στόχο τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων (**Κεφάλαιο 8**). Η παρούσα διατριβή ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα της μελέτης (**Κεφάλαιο 9**).

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου εστιάζεται στην καταγραφή των διαθέσιμων δεκτών οι οποίοι δύναται να χρησιμοποιηθούν για αρχαιολογική έρευνα. Οι δέκτες αυτοί μπορεί σήμερα να είναι ανενεργοί –να έχουν τεθεί δηλαδή εκτός λειτουργίας- αλλά οι εικόνες αρχείου οι οποίες είναι διαθέσιμες σήμερα είναι σε θέση να συμβάλουν στην αρχαιολογική έρευνα. Στη συνέχεια γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη συμβολή της τηλεπισκόπησης για τον εντοπισμό υπεδάφια αρχαιολογικών καταλοίπων. Στόχος είναι να γίνει μια κριτική προσέγγιση των εφαρμογών και να παρουσιαστεί διεξοδικά η τεχνογνωσία που έχει αποκτηθεί μέχρι σήμερα στον τομέα αυτό.

Ακολούθως το κεφάλαιο επικεντρώνεται στους δείκτες βλάστησης οι οποίοι αφορούν και σε ένα σημαντικό κομμάτι της παρούσας έρευνας. Γίνεται προσπάθεια καταγραφής των δεικτών της χρήσης τους -πέρα από την αρχαιολογική έρευνα- όπως αυτή παρουσιάζεται σε άλλες επιστήμες κυρίως στη γεωργία ακριβείας και στη γεωπονία.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη συμβολή της παρούσας διατριβής στο γνωστικό αντικείμενο της Αρχαιοηλεκτροπισκόπησης. Η διατριβή αυτή δεν έχει ως στόχο να καλύψει όλα τα κενά που παρουσιάζονται σήμερα, αλλά και να απαντήσει σε κάποια ερωτήματα ως προς την μελλοντική εφαρμογή των τηλεπισκοπικών δεδομένων και των δορυφόρων στην αρχαιολογική έρευνα. Η εξέλιξη άλλωστε της διαστημικής τεχνολογίας τα τελευταία 15 χρόνια έχουν δώσει μεγάλα κίνητρα στους ερευνητές να εξερευνήσουν νέες δυνατότητες και προοπτικές της τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία.

Ο εντοπισμός υπεδάφια καταλοίπων από δορυφορικές εικόνες ή αεροφωτογραφίες, στηρίζεται στο γεγονός ότι τα υπεδάφια μνημεία μπορεί να επηρεάσουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που καταγράφει ο δέκτης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα υπεδάφια κατάλοιπα αλλοιώνουν την ανάπτυξη των φυτών (crop marks) τα οποία βρίσκονται πάνω από αυτά στο επιφανειακό έδαφος αλλά και την

υγρασία του εδάφους (damp marks). Παράλληλα επιδρούν στο ύψος των καλλιεργειών (shadow marks) ή ακόμη και στο χρώμα (σύσταση) του εδάφους (soil marks) (Gallo *et al.*, 2009). Συνήθως τα αρχαιολογικά κατάλοιπα μπορεί να παρακρατούν την εδαφική υγρασία σε διαφορετικό ποσοστό από ό,τι στον περίγυρο. Αυτή η διαφοροποίηση έχει ως αποτέλεσμα την διαφορετική ανάπτυξη της βλάστησης, η οποία μπορεί άλλοτε να καταπονείται και άλλοτε να καταγράφεται ενίσχυση της υγιούς ανάπτυξης του φυτού (Winton και Horne, 2010).

Για παράδειγμα, αν η βλάστηση αναπτύσσεται πάνω από θαμμένα χαντάκια ή τάφρους, τότε η ανάπτυξή της είναι πιθανό να ενισχυθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρακρατεί την εδαφική υγρασία σε αντίθεση με άλλες περιοχές (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη νερού) με αποτέλεσμα να υπάρχει μια συσσώρευση θρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Αυτή η διαφοροποίηση της βλάστησης μπορεί να παρατηρηθεί από τον αέρα ή και το διάστημα και συχνά αναφέρεται ως θετική διαφοροποίηση (positive crop mark) (Lasaponara και Masini, 2007, Jonson 2006, Sharp 2004, Stanjek και Fabinder, 1995). Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει αρκετή υγρασία στο υπέδαφος δεν υπάρχει η απαιτούμενη ποσότητα νερού για την εξατμισοδιαπνοή, γεγονός το οποίο οδηγεί το φυτό σε καταπόνηση (negative crop marks) (Lasaponara και Masini, 2007, Jonson 2006, Sharp 2004, Riley, 1979). Η ενίσχυση της βλάστησης μπορεί να παρατηρηθεί στο ύπαιθρο ως βλάστηση πιο ψηλή σε σχέση με τον περίγυρο, από ένα πιο έντονο πράσινο χρώμα και γενικά από την υγεία των φυτών έναντι καταπονημένης βλάστησης (Sharp 2004, Jonson 2006).

Πολλές σύγχρονες μελέτες τείνουν να συμφωνήσουν ότι η μελέτη διαφοροποιήσεων βλάστησης περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Πράγματι τόσο οι Adqus *et al.* (2007), οι Mills και Palmer (2007) όσο και οι Winton και Horne, (2010), τονίζουν ότι η διαμόρφωση αυτών των αλλοιώσεων στη βλάστηση οφείλεται σε ένα συνδυασμό παραγόντων, όπως είναι η διαθέσιμη εδαφική υγρασία, τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους (ιδιαίτερα σε φάσεις ανάπτυξης του φυτού), το έδαφος, το βάθος του καταλοίπου, οι κλιματολογικές συνθήκες κ.ά. Για αυτό το λόγο η μελέτη των διαφοροποιήσεων της βλάστησης είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα και η γνώση της αρχαιολογίας μιας περιοχής θα πρέπει να είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της Αρχαιοτηλεπισκόπησης.

2.1. Υφιστάμενοι δορυφορικοί δέκτες για υποστήριξη αρχαιολογικών εφαρμογών

Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα από δορυφορικές εικόνες οι οποίες είναι διαθέσιμες στον χρήστη. Οι εικόνες αυτές μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με την χωρική τους ανάλυση (μεγάλης, μεσαίας και μικρής ανάλυσης), τα φασματικά τους χαρακτηριστικά (πολυφασματικά ή υπερφασματικά), την περιοδικότητα λήψης των εικόνων καθώς και τη ραδιομετρική τους ανάλυση. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει συνοπτικά τα γενικά χαρακτηριστικά σημαντικών δορυφορικών δεκτών. Είναι ενδεικτικό ότι οι δέκτες αυτοί είναι σε θέση να παρέχουν πληροφορία σχεδόν μετά τη δεκαετία του 1960 το οποίο συνδέεται άμεσα με τις τεχνολογικές διαστημικές εξελίξεις του ψυχρού πολέμου. Ορόσημο για τους τηλεπισκοπικούς δέκτες όπως είναι γνωστοί σήμερα αποτελεί το διαστημικό πρόγραμμα Landsat το οποίο ξεκίνησε το 1972 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

Κύριο χαρακτηριστικό των δορυφορικών δεκτών πριν από το πρόγραμμα Landsat (π.χ. CORONA, Zenit 2-8) είναι οι παγχρωματικές εικόνες που λάμβαναν, δηλαδή καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο ορατό μήκος κύματος. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι αυτοί οι δορυφόροι χαρακτηρίζονται από μη περιοδικότητα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιοχές έρευνας οι οποίες να μην είχαν απεικονιστεί από τους συγκεκριμένους δορυφόρους. Σε αντίθεση, το πρόγραμμα Landsat έχει πολλά χαρακτηριστικά τα οποία ωφέλησαν σημαντικά σε πολλές εφαρμογές τηλεπισκόπησης, συμπεριλαμβανομένου και της αρχαιολογικής έρευνας. Το πρόγραμμα Landsat έδωσε τη δυνατότητα ανάκτησης της πληροφορίας της γης σε μεγαλύτερο εύρος μήκους κύματος (ορατό, υπέρυθρο και θερμικό κανάλι) όπως επίσης έδωσε τη δυνατότητα στους ερευνητές να μελετούν συστηματικά πλέον μια περιοχή μελέτης, μέσα από συχνές λήψεις. Στο διάστημα που μεσολαβεί μέχρι και το 2000, νέοι πολυφασματικοί δορυφόροι εκτοξεύονται, από διάφορες χώρες (Η.Π.Α., Ε.Σ.Σ.Δ., Γαλλία, Ιαπωνία κ.τ.λ.) οι οποίοι βελτιώνουν κυρίως τη χωρική ανάλυση των εικόνων. Σημειώνεται ότι μέχρι και το 1999 δεν έχουν κάνει την εμφάνιση τους οι υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες (χωρική ανάλυση <4m). Από τη χρονιά εκείνη είναι πλέον διαθέσιμες στους ερευνητές δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης χάρη στο διαστημικό πρόγραμμα IKONOS. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί

ορόσημο αφού πρόκειται και για τον πρώτο δορυφόρο τον οποίο διαχειρίζεται ιδιωτικός οργανισμός (Space Imaging). Την επόμενη χρονιά η NASA, παρουσιάζει τον πρώτο υπερφασματικό δέκτη, τον EO-1 Hyperion ο οποίος έχει τη δυνατότητα να καταγράφει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε 220 ξεχωριστά φασματικά κανάλια.

Στη δεκαετία που ακολουθεί νέοι δορυφόροι με καλύτερη χωρική ανάλυση είναι πλέον διαθέσιμοι στην ερευνητική κοινότητα, ενώ παράλληλα και άλλες χώρες εμπλέκονται ενεργά στην προώθηση της διαστημικής τεχνολογίας. Συγκεκριμένα έχει εκτοξευθεί ένας σημαντικός αριθμός νέων δορυφόρων των οποίων οι δέκτες υπερτερούν κατά πολύ σε θέματα χωρικής και φασματικής ανάλυσης από προγενέστερους δορυφορικούς δέκτες. Στους περισσότερους από τους νέους δορυφόρους δίνεται η δυνατότητα πλέον να γίνεται προγραμματισμός λήψης με αποτέλεσμα να μην υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία σε τακτά και προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα για όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Παράλληλα σημειώνεται ότι έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται εξειδικευμένοι δέκτες για συγκεκριμένες εφαρμογές εξυπηρετώντας συγκεκριμένους τομείς έρευνας (π.χ. γεωργία) κ.τ.λ.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά διάφορων δορυφορικών δεκτών που είναι διαθέσιμοι σήμερα.

Δορυφόρος	Αισθητήρας	Χρονολογία Εκτόξευσης - Τερματισμός	Χωρική ανάλυση (m)		Φασματική ανάλυση (nm) (μέχρι εγγύς υπέρυθρο φάσμα)	Περιοδικότητα
			Παν.	VIS- NIR		
ALOS	PRISM	2006-Σήμερα	2.5	10	420 -890	Κάθε 46 ημέρες
CBERS	HRCC	2003-Σήμερα	20		450 - 890	Κάθε 26 ημέρες
CORONA		1960-1972	1.8 – 12		παγχρωματικό	
CARTOSAT- 1		2005-Σήμερα	2.5		παγχρωματικό	Κάθε 116 ημέρες
EO-1	ALI	2000-Σήμερα	10	30	433-890	Απαιτείται προγραμματισμός
EO-1	Hyperion	2000-Σήμερα	10		356-996	Απαιτείται προγραμματισμός
FORMOSAT- 2		2004-Σήμερα	2	8	450 -900	Απαιτείται προγραμματισμός
GeoEye-1		2008-Σήμερα	0.41	1.65	450 -920	Απαιτείται προγραμματισμός

IKONOS		1999-Σήμερα	1	4	450 -950	Απαιτείται προγραμματισμός
IRS	Cartosat-1 (IRS-P5)	2005-Σήμερα	2.5		παγχρωματικό	Απαιτείται προγραμματισμός
IRS	Cartosat-2B	2010-Σήμερα	1		παγχρωματικό	Απαιτείται προγραμματισμός
IRS	Resourcesat-1 (IRS-P6)	2003-Σήμερα	5.8	23.5	520 -860	Απαιτείται προγραμματισμός
IRS	Resourcesat-2	2011-Σήμερα	5.8	23.5	520 -860	Απαιτείται προγραμματισμός
IRS	1C / 1D	1996/7- Σήμερα	5.8	23.5	520 -860	Απαιτείται προγραμματισμός
KOMPSAT-2		2006-Σήμερα	1	4	450 -900	Απαιτείται προγραμματισμός
Kometa	KVR-1000	1981-2005	2-3		παγχρωματικό	
Kometa	TK-350	1981-2005	2-3		παγχρωματικό	
Landsat 4	MSS	1982-1993	60		520 - 900	
Landsat 5	TM	1984-Σήμερα	15	30	450 -900	Κάθε 16 ημέρες
Landsat 7	ETM+	1999-Σήμερα	15	30	450 -900	Κάθε 16 ημέρες
Orbview-3		2003-Σήμερα	1	4	450 -900	Απαιτείται προγραμματισμός
Pleiades-1		2011-Σήμερα	0.5	2	430-950	Απαιτείται προγραμματισμός
Proba	CHIRS	2001-Σήμερα	17-34		415-1050	Απαιτείται προγραμματισμός
QuickBird	-	2001-Σήμερα	0,60	2,4	450 -900	Απαιτείται προγραμματισμός
RapidEye		2008-Σήμερα	5		440 - 850	Απαιτείται προγραμματισμός
SPOT-1	HRV	1986-2003	10	20	500-890	
SPOT-2	HRV	1990-2009	10	20	500-890	
SPOT-3	HRV	1993-1996	10	20	500-890	
SPOT-4	HRVIR	1998-Σήμερα	10	20	500-890	Απαιτείται προγραμματισμός
SPOT-5	HRG	2002-Σήμερα	5	10	500-890	Απαιτείται προγραμματισμός
Terra	ASTER	1999-Σήμερα	15		520-860	Απαιτείται προγραμματισμός
Kometa	KVR-1000	1981-2005	2-3		παγχρωματικό	

WorldView-1		2007-Σήμερα	0.5		παγχρωματικό	Απαιτείται προγραμματισμός
WorldView-2		2009-Σήμερα	0.5	1.8	400-1040	Απαιτείται προγραμματισμός
Zenit	2-8	1961-1994	15-2		παγχρωματικό	-

Το βασικό ερώτημα για το ποιος από τους πιο πάνω διαθέσιμους δέκτες είναι ο καταλληλότερος για αρχαιολογικές έρευνες είναι δύσκολο να απαντηθεί. Όλοι οι διαθέσιμοι δέκτες είναι εν δυνάμει υποψήφιοι και χρήσιμοι για αρχαιολογική έρευνα αφού τα κριτήρια καταλληλότητας ποικίλουν από εφαρμογή σε εφαρμογή. Παλαιότερες δορυφορικές εικόνες χαμηλότερης χωρική ανάλυσης δίνουν την δυνατότητα διερεύνησης περιοχών που έχουν αλλοιωθεί συστηματικά τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω ανθρωπογενών επεμβάσεων. Παράλληλα οικονομικοί περιορισμοί, τα χαρακτηριστικά της ίδιας της αρχαιολογικής εφαρμογής επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου δορυφόρου.

Σημειώνεται ότι ένα βασικό ερώτημα που τέθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αφορούσε τα φασματικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένας δορυφορικός δέκτης για να θεωρείται κατάλληλος για υποστήριξη αρχαιολογικής έρευνας μέσα από την ανίχνευση διαφοροποιήσεων της βλάστησης.

2.2. Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία για τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων

2.2.1. Χρήση αεροφωτογραφιών και κατασκοπευτικών δορυφόρων

Η χρήση της τηλεπισκόπησης για τον εντοπισμό υπεδάφινων καταλοίπων έχει απασχολήσει στο παρελθόν ένα σημαντικό αριθμό ερευνητών. Αν και η πρώτη αεροφωτογράφιση πραγματοποιήθηκε σε περιοχή νοτιοδυτικά του Παρισιού στα μέσα του 19^{ου} αι. (1858) από τον Laussedat εντούτοις μόλις μετά από έναν αιώνα σχεδόν (μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου) άρχισε να γίνεται συστηματική χρήση της Τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία (Σαρρής 2008).

Οι πρώτες αεροφωτογραφήσεις για αρχαιολογικούς σκοπούς πραγματοποιήθηκαν πριν από την έναρξη του Α' Παγκοσμίου Πολέμου τόσο στο Ηνωμένο Βασίλειο όσο και στην Ιταλία (βλ. Capper 1907, Parcak 2009, Bewley *et al.*, 1999, Riley 1987). Η

περιοχή της Levant, της Υπεριορδανίας και της Μεσοποταμίας είναι επίσης περιοχές που έχουν φωτογραφηθεί μέχρι και τη δεκαετία του 1940 (βλ. Keneddy 1925, Crawford 1923, Glueck 1965, Keneddy 2002). Να σημειωθεί ότι κατά την περίοδο αυτή οι ερευνητές είχαν διαπιστώσει και καταγράψει ήδη τη σημασία των επιφανειακών αλλοιώσεων της βλάστησης για την ανίχνευση αρχαιολογικών χώρων (Parcak 2009, 16).

Το πέρας του Β' Παγκοσμίου Πολέμου (δεκαετία του 1950) θεωρείται ένα σημαντικό ορόσημο στην εξέλιξη της επιστήμης της Αρχαιοηλεκτρονικής. Το ενδιαφέρον των ερευνητών επικεντρώνεται σε περιοχές όπου έχουν ληφθεί αναγνωριστικές αεροφωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πολέμου. Έτσι, εξερευνώνται πλέον νέες περιοχές τόσο στη Μέση και Άπω Ανατολή όσο και σε Ευρώπη και Αμερική (Parcak 2009). Το 1956 πραγματοποιήθηκε και η πρώτη δημοσίευση σχετικά με την υπέρυθη ακτινοβολία (βλ. Endeine 1956) ενώ την ίδια δεκαετία (1950) παρατηρείται και η ανάπτυξη των πλευρικών ραντάρ (Σαρρής 2008).

Αν και η χρήση αεροφωτογραφιών έχει απασχολήσει από παλιά τους ερευνητές, τα διαστημικά προγράμματα των Η.Π.Α. και Ε.Σ.Σ.Δ. κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, στη δεκαετία του 1960, (συστήματα CORONA, Argon, Lanyard και COSMOS), δεν ήταν δυνατό να αξιοποιηθούν άμεσα, παρά μόνο μετά από 25 χρόνια οπότε έγινε ο αποχαρακτηρισμός των εικόνων αυτών ως απορρήτων (Parcak 2009). Πράγματι, οι υψηλής ανάλυσης εικόνες αρχείου (1960-72) του διαστημικού προγράμματος CORONA έχουν αρχίσει μόλις τα τελευταία χρόνια να χρησιμοποιούνται για φωτοερμηνεία περιοχών. Η χωρική ανάλυση των κατασκοπευτικών εικόνων των Η.Π.Α που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, και αποδεδειγμένα το 1995, μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 0.6 m (Lock 2003). Οι εικόνες αυτές θα πρέπει να διορθωθούν γεωμετρικά αφού παρουσιάζουν εκτροπή λόγω αναγλύφου και έντονες παραμορφώσεις (βλ. Goossens et. al, 2006, Bitelli και Girelli 2009). Επιπλέον ένα σημαντικό θέμα για την ποιότητα των αποτελεσμάτων αποτελεί και η σάρωση των αρνητικών των φωτογραφιών αφού υπάρχει ένα σημαντικό θέμα ποιοτικής απώλειας των πιο αναλογικών δεδομένων (βλ. Fowler και Fowler, 2005).

Στην έρευνά τους οι Fowler και Fowler (2005), εξέτασαν την πιθανότητα χρήσης εικόνων CORONA για σκοπούς αρχαιολογικής έρευνας. Στα συμπεράσματά τους καταλήγουν, ότι τέτοιες εικόνες μπορεί να χρησιμοποιηθούν και στον Ευρωπαϊκό χώρο, όπου η παραδοσιακή αεροφωτογράφιση σε πολλές περιοχές, έχει καταστεί δυνατή μόλις στο πρόσφατο παρελθόν. Επιπλέον η χαρτογράφιση γεωμορφολογικών οντοτήτων σε περιοχή της ΒΑ Σιβηρίας, με τη χρήση δορυφορικών εικόνων CORONA παρουσιάζεται από τους Grosse *et al.* (2005). Συνδυασμένη χρήση εικόνων ASTER και CORONA στην περιοχή της βόρειας Μεσοποταμίας (σημερινό βόρειο Ιράκ) παρουσιάζεται από τον Altaweel (2005). Η εξαγωγή πολύτιμης μετρητικής πληροφορίας από τις εικόνες CORONA παρουσιάζεται από τους Bitelli και Girelli (2009). Στο άρθρο τους παρουσιάζουν μια λεπτομερή περιγραφή της μεθοδολογίας που ενδείκνυται να ακολουθήσει κανείς για την ανάκτηση μετρητικής πληροφορίας, και την απαλοιφή των έντονων διαστροφών που παρουσιάζουν συχνά αυτές οι εικόνες. Παράλληλα παρουσιάζεται και η χρήση των εικόνων CORONA για την εξαγωγή γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών σε αρχαιολογικές θέσεις, όπως είναι το Tilmen HöyüK στην σημερινή Τουρκία.

Στο ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο ‘‘Preservation of the Frozen Tombs of the Altai Mountains’’ του Πανεπιστημίου Ghent σε συνεργασία με φορείς της UNESCO, έγινε προσπάθεια χαρτογράφισης των ‘‘παγωμένων τάφων’’ (Frozen Tombs) της Δημοκρατίας της Αλτάι (Ρωσία, κεντρική Ασία) με ιστορικές εικόνες CORONA (Goossens *et al.*, 2006). Το τελικό αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθεί ένας ορθοφωτοχάρτης της περιοχής, απαλλαγμένος από τις έντονες παραμορφώσεις που παρατηρούνται συνήθως σε τέτοιες εικόνες. Η χρήση ορθοφωτοχάρτη βοήθησε και στην περίπτωση της ρωμαϊκής θέσης Uxama Argeala στην Ισπανία (Gillani, 2007). Όμως όπως πολύ ορθά τονίζουν οι Wilkinson *et al.* (2006), τέτοιες δορυφορικές εικόνες δεν μπορούν να χρησιμοποιούνται χωρίς περιορισμούς. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να γνωρίζει ο ερευνητής τη γεωμορφολογία του εδάφους αλλά και τη γεωμορφολογική εξέλιξη μιας περιοχής. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί και η εργασία των Moshier και El-Kalani (2008) που με τη χρήση εικόνων CORONA και δειγματοληψία εδάφους σε διάφορες αρχαιολογικές θέσεις προσπάθησαν να ανακτήσουν πληροφορίες για το αρχαιο-περιβάλλον της εποχής του Νέου Βασιλείου της Αιγύπτου.

Ελάχιστες δορυφορικές εικόνες CORONA είναι διαθέσιμες και για την περιοχή της Κύπρου. Αν και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί άμεσα για αρχαιολογική έρευνα, εντούτοις έχουν δημοσιευτεί μερικά αποτελέσματα (Αγαρίου *et al.*, 2010a, βλ. Εικόνα 2). Η μη συστηματική χρήση τέτοιων εικόνων για τον Κυπριακό χώρο, οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η λήψη τους συμπίπτει χρονικά με την πρώτη συστηματική αεροφωτογράφιση όλης της Κύπρου (1963), όπου τόσο η ποιότητα όσο και η ευκρίνειά τους είναι καλύτερη από τις αντίστοιχες δορυφορικές εικόνες CORONA.



Εικόνα 2: (α) Δορυφορική εικόνα CORONA της Κύπρου (1973/07/22) με χωρική ανάλυση 10m. (β) Η αρχαιολογική περιοχή του Κουρίου πριν και μετά τη συστηματική ανασκαφή του χώρου του Τμήματος αρχαιοτήτων στην εικόνα CORONA 1962/07/21 (αριστερά) και η αντίστοιχη εικόνα από Google Earth (δεξιά). Ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος στο Ναό του Απόλλωνα Υλάτη (Κούριο) τη δεκαετία του 1960 στην εικόνα CORONA 1962/07/21 (αριστερά) και η αντίστοιχη εικόνα από Google Earth (δεξιά) (Αγαρίου *et al.*, 2010a).

Παρόμοια χαρακτηριστικά, με τις αντίστοιχες δορυφορικές εικόνες CORONA, διαθέτουν και οι εικόνες (διαθέσιμες μετά από το 1987) KVR -1000 του ρωσικού διαστημικού σταθμού COSMOS. Η υψηλή διακριτική ικανότητα του δορυφόρου (2-3 m) καθιστά τα δεδομένα του δορυφόρου πολύτιμα, ιδιαίτερα σε περιοχές που έχουν υποστεί ανθρωπογενείς επεμβάσεις στο χώρο τις τελευταίες δεκαετίες. Αν και έχει χρησιμοποιηθεί από διάφορους ερευνητές, όπως για παράδειγμα τους Fowler και Curtis (1995) στην περιοχή του Stonehenge αλλά και από τον Comfort (1997) για την ανίχνευση ρωμαϊκών και οθωμανικών τειχών εντούτοις η Parcak (2009) τονίζει ότι το υψηλό κόστος τους δυσχεραίνει τη χρήση τους για αρχαιολογικούς σκοπούς. Η συνδυασμένη χρήση εικόνων CORONA και KVR παρουσιάστηκε από τον Kostka (2002), με σκοπό τη συνεχή παρακολούθηση χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς, και τυχόν αλλοίωσή τους από τον ανθρωπογενή παράγοντα σε θέση στο σημερινό Ιράν. Στην περιοχή της βόρειας Μεσοποταμίας, ο Ur (2003) παρουσίασε την εφαρμογή εικόνων CORONA, για τον εντοπισμό συστημάτων επικοινωνίας μεταξύ αρχαιολογικών θέσεων. Μάλιστα όπως τονίζει ο ίδιος στα αποτελέσματά του, οι πληροφορίες που μπορεί να αντλήσει κάποιος ερευνητής από τις εικόνες CORONA είναι εξαιρετικά πολύτιμες, σε σχέση με την αστικοποίηση και βιομηχανοποίηση που παρατηρείται στην περιοχή.

2.2.2. Χρήση πολυφασματικών δορυφόρων

Από τη δεκαετία του 1970 υπάρχει μια εξέλιξη των καταγραφικών δεκτών που συνοδεύεται και με την εκτόξευση νέων δορυφορικών συστημάτων. Η εξέλιξη αυτή σηματοδοτείται το 1972 από το διαστημικό πρόγραμμα Landsat των Η.Π.Α. ενώ λίγα χρόνια αργότερα και άλλες χώρες εγκαινιάζουν δικά τους διαστημικά προγράμματα (βλ. SPOT από τη Γαλλία) (Parcak 2009, Σαρρής 2008). Ο Lock (2003) επισημαίνει μάλιστα ότι η εκτόξευση των δορυφόρων Landsat 4 και 5 στις αρχές της δεκαετίας του 1980, βοήθησε σημαντικά την αρχαιολογική έρευνα και αποτελεί σταθμό για την αρχαιοτηλεπισκόπηση. Οι εικόνες τύπου Landsat είναι διαθέσιμες από το 1972 και παρά τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν (π.χ. προβληματικές γραμμές σάρωσης από το Μάιο του 2003) χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στην αρχαιολογική έρευνα. Παρά την χαμηλή χωρική ανάλυση των εικόνων (από 15-80m) εντούτοις παρουσιάζουν άλλα συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες εικόνες όπως είναι για παράδειγμα το σχετικά χαμηλό κόστος (ή και δωρεάν ακόμη για ερευνητικούς σκοπούς), η μεγάλη περιοχή κάλυψης (180 x 180 km²) αλλά και η δυνατότητα

καταγραφής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τόσο στο ορατό – υπέρυθρο όσο και θερμικό μήκος κύματος.

Οι εικόνες Landsat έχουν χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό υπεδάφιαρχαιολογικών θέσεων αλλά και για τη μελέτη του περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής θέσεων σε πολλές μελέτες και έρευνες. Οι Vaughn και Crawford (2009) για παράδειγμα προσπάθησαν με τη χρήση χωρικών μοντέλων και δορυφορικών δεδομένων Landsat, να εντοπίσουν νέες περιοχές με πιθανούς οικισμούς των Μάγια. Οι Barlindhaug *et al.*, (2007) έδειξαν ότι οι δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat είναι οι πλέον κατάλληλες για την παρακολούθηση των χώρων αυτών, αν και όπως τονίζουν, υψηλότερης διακριτικής ικανότητας εικόνες, θα είχαν καλύτερα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα στον ελλαδικό χώρο έχει γίνει χρήση των εικόνων Landsat, τα αποτελέσματα όμως των οποίων περιορίζονταν συχνά από τη χωρική ανάλυση του δορυφόρου (Αλεξιάκης, 2009). Στον Κυπριακό χώρο οι εικόνες Landsat έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής κυρίως όχι τόσο για την ανίχνευση υπεδάφιαρχαιολογικών μνημείων αλλά για τη διαχρονική παρακολούθηση του περιβάλλοντος χώρου μνημείων και τις επιδράσεις που παρατηρούνται κυρίως από τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις (Hadjimitsis *et al.*, 2009; Hadjimitsis *et al.*, 2008). Η μελέτη των Hadjimitsis *et al.* (2008, 2009) εστιάζεται κυρίως στη διαχρονική χαρτογράφηση χρήσεων γης μέσα από διάφορους αλγόριθμους ταξινόμησης, για τον εντοπισμό ανθρωπογενών παρεμβάσεων (π.χ. αστικοποίηση) τα τελευταία χρόνια. Τα αποτελέσματα τους έχουν δείξει ότι η αλλαγή γύρω από αρχαιολογικούς χώρους μόνο την τελευταία δεκαετία (2000- 2010) ξεπερνά το 20%.

Η δεκαετία του 1980 σημαδεύεται από την ανάπτυξη των πολυφασματικών, θερμικών δεκτών αλλά και των εικόνων ραντάρ (Bewley *et al.*, 1999). Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και η Ινδία εκτοξεύει πολυφασματικούς δορυφόρους στο διάστημα (Tripathi 2005a). Παρόμοιας ανάλυσης δορυφόροι με τους Landsat αποτελούν και οι Ινδικοί IRS 1A,1B, 1C, 1D και IRS P2 (Tripathi 2005a). Αν και έχουν χρησιμοποιηθεί για αρχαιολογικούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα την αναγνώριση της μυθικής θέσης Dvaraka στην Ινδία (Tripathi 2005b) ή για τον εντοπισμό θέσεων στην περιοχή Hampi, Ινδία (Raj *et al.*, 2005) εντούτοις είναι φανερό η απουσία τους στον ευρωπαϊκό χώρο.

2.2.3. Χρήση δορυφόρων υψηλής χωρικής ανάλυσης και υπερφασματικά δέκτες

Από τη δεκαετία του 1990 και μετά στο χώρο της Τηλεπισκόπησης κυριαρχούν πλέον και τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) αλλά και νέα δορυφορικά συστήματα υψηλής χωρικής ευκρίνειας. Οι σύγχρονοι δορυφόροι Quickbird, IKONOS, WorldView και GeoEye παρέχουν σήμερα εικόνες με μεγάλη διακριτική ικανότητα, οι οποίες είναι διαθέσιμες και για αρχαιολογική έρευνα. Η ανάλυση των εικόνων μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 0.5 m για το παγχρωματικό ενώ στο υπέρυθρο η ανάλυση είναι της τάξης των λίγων μέτρων. Η χρήση τέτοιων εικόνων στην αρχαιολογική έρευνα έχει περισσότερα πλεονεκτήματα παρά μειονεκτήματα σε σχέση με κάποιες άλλες. Αν και το κόστος εξακολουθεί να είναι υψηλό για τις σύνηθες ανάγκες ενός αρχαιολογικού προγράμματος, εντούτοις το κόστος δύναται να μειωθεί για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς λόγους (Parcak 2009).

Επιπρόσθετα το τελευταίο διάστημα έχουν κάνει την εμφάνισή τους και οι δορυφορικοί υπερφασματικοί σαρωτές (π.χ. HYPERION) οι οποίοι μάλιστα μπορεί να είναι και αερομεταφερόμενοι (π.χ. AIS, AVIRIS, CASI, MIVIS). Σε αντίθεση με τη συμβατική πολυφασματική τηλεπισκόπηση, η οποία βασίζεται στη χρήση περιορισμένου αριθμού καναλιών με μεγάλο εύρος φασματικής περιοχής, η υπερφασματική τηλεπισκόπηση βασίζεται στη χρήση και ανάλυση εκατοντάδων καναλιών πολύ μικρού εύρους φασματικής περιοχής. Χαρακτηριστικά των υπερφασματικών συστημάτων είναι η υψηλή φασματική, χωρική και ραδιομετρική ανάλυση. Τα υπερφασματικά δεδομένα παρέχουν άφθονη φασματική πληροφορία, η οποία χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και το διαχωρισμό φασματικά παρόμοιων, αλλά μοναδικών υλικών. Έτσι είναι δυνατό να προκύψουν πιο λεπτομερείς και ακριβείς πληροφορίες. Ο Αλεξιάκης (2009), μέσα από τη διατριβή του, έχει δείξει ότι αυτές οι νέες τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν στην ανίχνευση αρχαιολογικών θέσεων, αλλά θα πρέπει να είναι γνωστή και η φασματική υπογραφή των αντικειμένων που είναι επιθυμητό να ανιχνευτούν. Παρόλα αυτά όμως, όπως επισημαίνει ο ίδιος, η εξαγωγή φασματικής υπογραφής του εδάφους που θα σχετίζεται με τα αρχαιολογικά κατάλοιπα, δεν είναι πάντα εφικτή, εξαιτίας της συχνής παρουσίας βλάστησης η οποία διαφοροποιεί την αρχική φασματική υπογραφή.

Στην βιβλιογραφία έχουν πολλαπλασιαστεί τα τελευταία χρόνια οι δημοσιεύσεις σχετικά με εφαρμογές τηλεπισκόπησης για την αρχαιολογία λόγω κυρίως της ανάπτυξης όλων των πιο πάνω νέων τεχνολογιών που δίνουν πολλά πλεονεκτήματα στους ερευνητές (Lasaponara και Masini, 2011). Οι Lasaponara και Masini (2007a) στις πρόσφατες έρευνές τους αναδεικνύουν τις δυνατότητες των δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης, για τον εντοπισμό υπεδάφιας μνημείων μέσα από τη χρήση δεικτών βλάστησης αλλά και τεχνικών ανίχνευσης ακμών. Παρόμοια μεθοδολογία ακολουθείται και σε άλλες περιοχές μελέτης της νότιας Ιταλίας με τη χρήση εικόνων IKONOS και QuickBird. Οι Cavalli *et al.* (2007) αναφέρουν τη χρήση του αερομεταφερόμενου υπερφασματικού σαρωτή Multispectral Infrared Visible Imaging Spectrometer (M.I.V.I.S.) για σκοπούς ανίχνευσης υπεδάφιας μνημείων, με τη μορφή φασματικών ανωμαλιών. Από τα συμπεράσματά τους προκύπτει ότι η ανίχνευση υπεδάφιας μνημείων είναι εφικτή στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αλλά επίσης και σε περιοχές όπου η βλάστηση είναι αραιή, οπότε και είναι δυνατό να εντοπιστούν ανωμαλίες και με τη χρήση μέσου υπέρυθρου και θερμικού φάσματος. Στον αρχαιολογικό χώρο Μεταπόντιο, στη νότια Ιταλία, οι Lasaponara και Masini (2007b) παρουσιάζουν τα επιτυχή αποτελέσματά τους από τη χρήση τεχνικών φασματικής ενίσχυσης σε δορυφορικές εικόνες QuickBird. Συνδυασμός υπερφασματικών δεδομένων αλλά και τεχνικών επεξεργασίας εικόνων για τον εντοπισμό υπεδάφιας μνημείων στην ανατολική Σκωτία παρουσιάστηκε και από τους Aqdas *et al.* (2009).

2.2.4. Σύνθεση τηλεπισκοπικών αποτελεσμάτων για βελτίωση της αρχαιολογικής ορατότητας

Όλα τα πιο πάνω δεδομένα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της αρχαιολογικής ορατότητας και τη δυνατότητα ερμηνείας μιας αρχαιολογικής θέσεως. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τέτοια παραδείγματα.

Οι Beck (2007) και Beck *et al.* (2007) πραγματοποίησαν μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση αφού πέρα από τις δορυφορικές εικόνες CORONA και IKONOS πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή ανάλυση εδάφους για τη θέση Homs της Συρίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το δείγμα εδάφους από περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος έτειναν να έχουν διαφορετική φασματική υπογραφή από τον περιβάλλοντα χώρο, γεγονός που βοήθησε στην μετά-επεξεργασία των δορυφορικών

εικόνων. Οι Rowlands και Sarris (2007) κάνουν χρήση αερομεταφερόμενων υπερφασματικών σαρωτών Airborne Thematic Mapper (ATM) και Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) καθώς επίσης και τη χρήση δεδομένων LIDAR για τη μελέτη της θέσης Ιτάνος της Κρήτης. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση αντικειμενοστραφούς λογισμικού, όπου η κατάτμηση και ανάλυση των εικόνων γίνεται σε αντικείμενα που αναγνωρίζονται στην εικόνα, αντί σε pixels. Στα συμπεράσματά τους οι μελετητές αναφέρουν ότι παρουσιάστηκαν αρκετές δυσκολίες στον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων. Η χρήση τέτοιων μεθόδων και εφαρμογών, συνεχίζουν, θα πρέπει να εφαρμόζεται παράλληλα με άλλες τεχνικές τηλεπισκόπησης, όπως είναι οι γεωφυσικές διασκοπήσεις και τα Lidar. Στην αρχαία πόλη Σαγαλασσό, στην σημερινή Τουρκία, οι Laet *et al.* (2007) εφαρμόζουν αντικειμενοστραφείς τεχνικές και συνδυασμό εικόνων ASTER, SPOT, IKONOS, για τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων. Από τα αποτελέσματα της έρευνάς τους φαίνεται ότι, μετά από μια σειρά τεχνικών, όπως ενίσχυση εικόνων και συνεχούς φωτοερμηνείας, οι ταξινομήσεις μέσα από αντικειμενοστραφείς προσεγγίσεις είναι σε θέση να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις πλείστες αναλύσεις επεξεργασίας σε επίπεδο εικονοστοιχεία.

Εξαγωγή πολύτιμων ιδιοτήτων του επιφανειακού εδάφους μέσα από τη χρήση πολυφασματικών δορυφορικών δεδομένων μέσης ανάλυσης (ASTER) και υψηλής ανάλυσης (IKONOS) πραγματοποιήθηκε από τους Schmid *et al.* (2008) στον αρχαιολογικό χώρο Aksum, της Αιθιοπίας. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε δύο περιόδους: το 2001 σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Naples “L'Orientale” (Ιταλία) και το Πανεπιστήμιο της Βοστώνης (ΗΠΑ), ενώ η δεύτερη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε το 2006 σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Βοστώνης (ΗΠΑ), το Πανεπιστήμιο Mekelle και το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης της Αιθιοπίας. Τα δείγματα αυτά, αναλύθηκαν σε εργαστήριο όσον αφορά τη σύστασή τους, ενώ παράλληλα έγινε και χρήση φασματοραδιομέτρου για την εξαγωγή της φασματικής υπογραφής των δειγμάτων. Από τη χρήση των δορυφορικών εικόνων μέσα από επιβλεπόμενες και μη επιβλεπόμενες τεχνικές ταξινόμησης του εδάφους, υλοποιήθηκαν θεματικοί χάρτες εδάφους. Από αυτούς τους χάρτες, προέκυψε ότι οι αρχαιολογικές θέσεις της περιοχής Aksum, δημιουργήθηκαν σε στεγνό έδαφος, σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο και γύρω από συγκεκριμένους τύπους εδαφών τα οποία προσφέρονταν τόσο για βόσκηση όσο και για άρση.

Υπερφασματικά δεδομένα από τον κινέζικο σαρωτή OMISII και χρήση τους για την ανίχνευση αρχαιολογικών θέσεων παρουσιάζεται από τους Kelong *et al.* (2008). Με βάση δύο αρχαιολογικές θέσεις της Κίνας έγινε λήψη υπερφασματικών δεδομένων, με χωρική ανάλυση 3.6 m, τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας. Σκοπός της έρευνας των Kelong *et al.* (2008) ήταν να εντοπιστούν τυχόν ανωμαλίες της φασματικής υπογραφής του εδάφους. Να σημειωθεί ότι στην έρευνα αυτή μελετήθηκε και η θερμική ακτινοβολία και μάλιστα η λήψη δεδομένων κατά τη διάρκεια της νύχτας έδωσε καλύτερα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματά τους έχουν επιβεβαιωθεί με ένα μεγάλο ποσοστό επιτυχίας τόσο όσον αφορά παράλληλες γεωφυσικές διασκοπήσεις όσο και μετά από αρχαιολογική ανασκαφή. Η χρήση θερμικής ακτινοβολίας παρουσιάζεται και στην εργασία του Erpelbaum (2009). Στα συμπεράσματα του ο Erpelbaum αναφέρει ότι υπεδάφια μνημεία μπορεί να ανιχνευθούν με επιτυχία με τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε μικρό βάθος από το επιφανειακό έδαφος. Μετά από την εξάλειψη των θορύβων που είναι δυνατό να παρατηρηθούν, η ένδειξη θερμοκρασιακών διαφορών που είναι δυνατό να καταγραφεί, μπορεί να σχετίζεται με ίχνη ανθρώπινης χρήσης κάτω από το έδαφος.

Πρόσφατο παράδειγμα εξαγωγής μορφολογικών χαρακτηριστικών από τη χρήση δορυφορικών εικόνων, παρουσιάζουν οι Rajani *et al.* (2009). Η περιοχή έρευνάς τους επικεντρώνεται στην περιοχή Badami της Ινδίας, ενώ χρησιμοποίησαν πολυφασματικά δεδομένα από τους ινδικούς δορυφόρους IRS-P6 (ή ResourceSat-1) με τον αισθητήρα LISS-4 (5.8 m χωρική ανάλυση) και ορθοφωτογραφίας από το δορυφόρο CARTOSAT -1 (2.5 m χωρική ανάλυση). Οι Vaughn και Crawford (2009) με τη βοήθεια ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων Landsat TM αλλά και ανάλυση μορφολογικών στοιχείων που εξάγουν από το ΨΜΕ (κλίση, προσανατολισμός), προσπάθησαν να εντοπίσουν νέες περιοχές με πιθανούς οικισμούς των Μάγια μέσα από μοντέλα πρόβλεψης.

Μια ενδιαφέρουσα μελέτη όσον αφορά τη χρήση διάφορων τύπων πολυφασματικών και υπερφασματικών δεδομένων (Landsat ETM, ASTER, EO1 - HYPERION και IKONOS) πραγματοποιήθηκε για τις Νεολιθικές θέσεις της Θεσσαλίας (Alexakis *et al.* 2009, 2011). Μέσα από την επεξεργασία των εικόνων και την εφαρμογή διάφορων τεχνικών, όπως είναι οι δείκτες βλάστησης και Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA), φαίνεται ότι η χρήση δορυφορικών εικόνων ιδιαίτερα αυτών με μεγαλύτερη χωρική

ανάλυση (ASTER, HYPERION και IKONOS) μπορεί να βοηθήσει τόσο στην ανίχνευση αρχαιολογικών θέσεων όσο επίσης και στην δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης. Στην ίδια μελέτη έγινε χρήση επεξεργασίας των εικόνων με βάση τα εικονοστοιχεία αλλά και με αντικειμενοστραφείς αναλύσεις. Οι Benz *et al.* ήδη λίγα χρόνια προηγουμένως (2004) είχαν αναδείξει τα πλεονεκτήματα της αντικειμενοστραφούς και ασαφούς λογικής σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης. Λίγο βορειότερα στην περιοχή της ανατολικής Μακεδονίας, οι Kaimaris *et al.* (2009) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση όσο αφορά τον εντοπισμό νέων αρχαιολογικών θέσεων κατά μήκος της Εγνατίας οδού. Η διαδικασία μεταξύ άλλων περιελάμβανε ανάλυση παλαιών και σύγχρονων αεροφωτογραφιών, διαχρονικές δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης (QuickBird και WorldView) καθώς επίσης και σύγχρονους και ιστορικούς χάρτες. Η χρήση δορυφορικών εικόνων μεγάλης χωρικής ανάλυσης (QuickBird) και δείκτες βλάστησης για τον εντοπισμό υπεδάφια μνημείων προτείνεται από τους Masini *et al.* (2009). Οι Bassani *et al.* (2009) περιγράφουν στην μελέτη τους ότι η χρήση υπερφασματικών δεδομένων είναι σε θέση να εντοπίσουν φασματικές ανωμαλίες του εδάφους στην περιοχή Apri της Ιταλίας.

Όπως φάνηκε μέσα από τα πιο πάνω παραδείγματα η εφαρμογή της τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία έχει πολλές δυνατότητες αν και στις πλείστες περιπτώσεις αυτές αφορούν πειραματικές εφαρμογές. Παράλληλα αυτό που παρατηρείται στις σύγχρονες βιβλιογραφίες είναι η διεπιστημονικότητα των αρχαιολογικών ερευνητικών προγραμμάτων αλλά παράλληλα και ο συνδυασμός (fusion) διάφορων τεχνικών και δεδομένων τηλεπισκόπησης. Τέτοιο πρόσφατο παράδειγμα αποτελεί το μεγάλο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα "ArchaeoLandscapes Europe" (<http://www.archaeolandscapes.eu/>) .

2.2.5. Περιορισμοί τηλεπισκόπησης στην αρχαιολογία

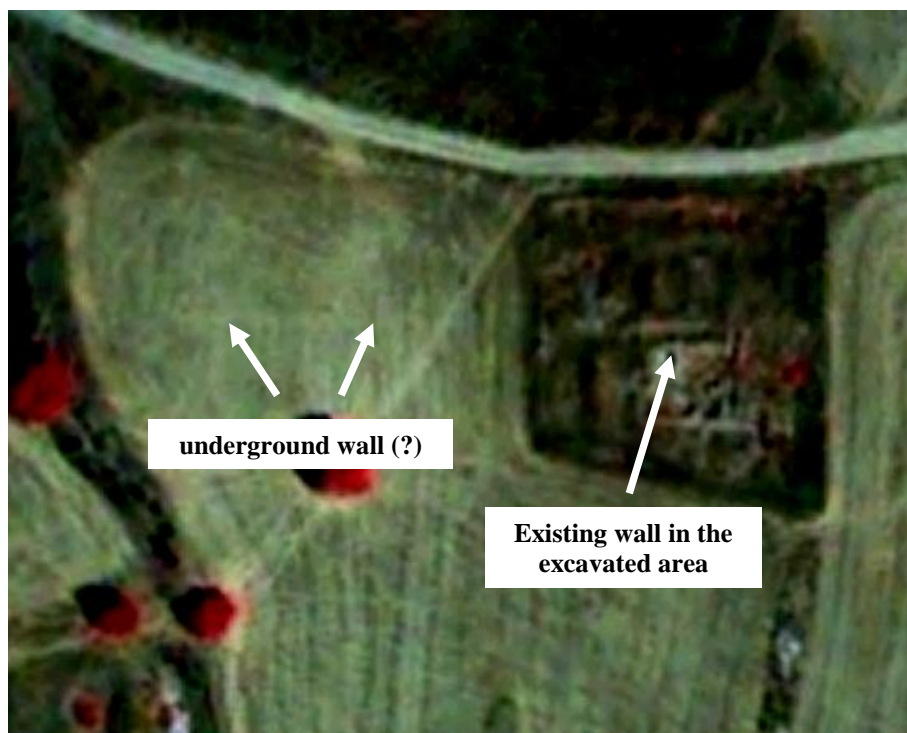
Κλείνοντας αυτό το υπο-κεφάλαιο, παρατίθενται τρία παραδείγματα τα οποία έχουν αποτελέσει αφετηρία για τον έντονο προβληματισμό αυτής της έρευνας. Το πρώτο παράδειγμα αφορά τη μελέτη της εργασίας των Garrison *et al.* (2008) οι οποίοι χρησιμοποίησαν εικόνες IKONOS για τον εντοπισμό καταλοίπων των Μάγιας, σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές της Γουατεμάλας, χωρίς όμως να προκύψουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Το πρόβλημα φαίνεται να προκύπτει από τους

διαφορετικούς συνδυασμούς βροχόπτωσης, εδάφους και φυτικής κάλυψης. Παρόλα αυτά η χρήση τεχνικών δορυφορικής τηλεπισκόπησης στέφθηκε με επιτυχία μόλις ένα χρόνο πριν στην ίδια περιοχή για τον εντοπισμό συστημάτων επικοινωνίας μεταξύ των οικισμών των Μάγιας (Garrison, T.G., 2007). Το δεύτερο παράδειγμα αποτελεί η αντίφαση μερικών ερευνητών ως προς την περίοδο μελέτης των διαφοροποιήσεων της βλάστησης. Η Sharpe (2004) αναφέρει ότι τέτοιες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται συχνά στο Ηνωμένο Βασίλειο σε καλλιέργειες σιτηρών, σε θερμές και ξηρές περιόδους, σε αντίθεση με τους Ciminale *et al.*, (2009) που αναφέρουν ότι, για τη λεκάνη της Μεσογείου οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι πιο εύκολα αναγνωρίσιμες στο τέλος της άνοιξης. Το τρίτο και τελευταίο παράδειγμα αποτελεί μια από τις πρώτες προσπάθειες για τη χρήση δορυφορικών εικόνων για τον εντοπισμό αρχαιολογικών θέσεων στην Κύπρο (Agariou *et al.*, 2010a). Η περιοχή ενδιαφέροντος εστιάστηκε στη θέση Hadjiabdoullah, στην Παλαιάπαφο, όπου την περίοδο 2010 διεξάγονταν ανασκαφικές δραστηριότητες από την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας υπό τη διεύθυνση της αρχαιολόγου Μ. Ιακώβου (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Φωτογραφίες από τις ανασκαφές στη θέση Hadjiabdoullah

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4 εντοπίστηκε μια γραμμική ανωμαλία σε πολυφασματική εικόνα τύπου QuickBird, η οποία αποτελούσε και προέκταση διαδρόμου σε ήδη ανασκαμμένα τετράγωνα της περιοχής λίγο πιο ανατολικά. Το πιο πάνω οδήγησε στην ανασκαφή δύο δοκιμαστικών τετραγώνων, ένα στο δυτικότερο άκρο της γραμμικής προέκτασης και ένα πιο ανατολικά. Αν και στο τελευταίο υπήρχαν ενδείξεις αρχαιολογικών καταλοίπων εντούτοις στο πρώτο δεν είχε εντοπιστεί το οτιδήποτε. Η ανωμαλία αυτή ίσως να αποτελούσε σχηματισμό γεωλογικών πετρωμάτων της περιοχής.



Εικόνα 4: Υποτιθέμενο τείχος στη θέση Hadjiabdoullah (Agariou *et al.*, 2010a).

Όλα τα πιο πάνω φανερώνουν μερικές αδυναμίες που παρουσιάζει σήμερα η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων στην αρχαιολογική έρευνα. Η παρούσα διατριβή προσπάθησε να συμβάλλει ουσιαστικά προς αυτή την κατεύθυνση όπως φαίνεται και από το κεφ. 2.4

2.3. Δείκτες βλάστησης και φαινολογία για την παρακολούθηση της βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την παρακολούθηση της βλάστησης με τη χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων. Για την περαιτέρω κατανόηση των δεικτών βλάστησης κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ο μηχανισμός με τον οποίο αναπτύσσεται το φυτό και πώς η ανάπτυξη αυτή επηρεάζει τις φασματικές ανακλάσεις.

Τα φυτά έχουν ένα συγκεκριμένο και μοναδικό τρόπο με τον οποίο ανακλούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γνωστό και ως η φασματική υπογραφή της βλάστησης. Λόγω διάφορων χρωστικών στη βλάστηση, η περισσότερη από την ορατή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απορροφάται, ειδικά στη μπλε και κόκκινη περιοχή του

ορατού φάσματος. Η απορρόφηση στις πράσινες περιοχές είναι λίγο πιο χαμηλή. Αντιθέτως, στην κοντινή υπέρυθη περιοχή του φάσματος (NIR), η ενέργεια δεν επηρεάζεται από τις χρωστικές ουσίες και σχεδόν πλήρως διαπερνά το δρυφακτοειδές παρέγχυμα. Όταν φτάνει στο σπογγώδες παρέγχυμα (ενδιάμεσο επίπεδο στο φύλλωμα), η παρουσία των κενών προκαλεί τη διάθλαση της ενέργειας στο κοντινό υπέρυθρο σε διάφορες κατευθύνσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περίπου το μισό της ενέργειας να περνάει μέσα από το φύλλο και να διαφεύγει προς το έδαφος, ενώ το άλλο μισό ανακλάται και εξέρχεται από την πάνω επιδερμίδα, προς τον ουρανό.

Συνοψίζοντας δηλαδή, η ανάκλαση της υγιούς βλάστησης είναι πολύ χαμηλή στις μπλε και κόκκινες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, λίγο υψηλότερη στην πράσινη περιοχή και υψηλή στο κοντινό υπέρυθρο. Η φυσιολογική διαδικασία ανάπτυξης ενός φυτού μπορεί να διαταραχθεί όταν αυτό περνά μια περίοδο καταπόνησης (stress). Όταν βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση, το φυτό δε λειτουργεί σωστά για μία ή περισσότερες αιτίες. Όταν ένα φυτό καταπονείται, συνήθως αυτό εκφράζεται με ορισμένα ορατά συμπτώματα, αλλά και ορισμένα που δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι. Συμπτώματα καταπόνησης μπορεί να εμφανίζονται σε όλα τα φυτά στο χωράφι ή μόνο σε ορισμένα τμήματα του χωραφιού, ανάλογα με την αιτία του φαινομένου (Καλαϊτζίδης και Μανάκος 2012).

Γενικά οι δείκτες βλάστησης στηρίζονται στο χαρακτηριστικό γνώρισμα της υγιούς βλάστησης που είναι η χαμηλή ανάκλαση του φυτού στο ορατό φάσμα και η υψηλή ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο (Rondeaux *et al.*, 1996). Σε αρκετές εφαρμογές παρακολούθησης της βλάστησης με τη χρήση Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, γίνεται χρήση των δεικτών βλάστησης (vegetation indices) οι οποίες στηρίζονται κυρίως σε απλούς συνδυασμούς του ορατού φάσματος και του υπέρυθρου (Rondeaux *et al.*, 1996). Οι Bannari *et al.* (1995), στη μελέτη τους αναφέρουν ότι μέσα από τη βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί περισσότεροι από 50 διαφορετικοί δείκτες βλάστησης. Σε αποδελίωση που έγινε στο πλαίσιο διατριβής βρέθηκαν περί τους 100 δείκτες βλάστησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνταν σε διάφορες εφαρμογές τηλεπισκόπησης.

Οι Baret και Guyot (1991) αναφέρουν ότι αυτοί οι δείκτες μπορεί να επηρεαστούν από εξωτερικούς παράγοντες και από παράγοντες που οφείλονται στα

χαρακτηριστικά του ίδιου του φυτού. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι συγκεκριμένα (Rondeaux *et al.*, 1996; Jakson και Huete 1991): η γεωμετρία του ήλιου και της βλάστησης, το έδαφος (soil background), η υγρασία του εδάφους (moisture) και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Επιπλέον η γεωμετρία λήψης από τον αισθητήρα σε σχέση με το φυτό και ήλιο μπορεί να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα. Όλες αυτές οι επιδράσεις είναι αρκετά περίπλοκες να μελετηθούν (Qi *et al.*, 1993). Ιδιαίτερα δε για την επίδραση του εδάφους, οι Rondeaux *et al.* (1996) αναφέρουν ότι ενώ κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του φυτού η επίδραση του εδάφους αναμένετε να μειώνεται, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η επίδραση του παραμένει εξίσου σημαντική. Αυτό μπορεί να οφείλετε και πάλι με τη σειρά του σε διάφορους λόγους όπως είναι η πυκνότητα του φυτού, η ομοιομορφία της βλάστησης, το σχήμα των φυλλωμάτων, η επίδραση του ανέμου κ.ά.

Όλοι οι δείκτες βλάστησης είναι αδιάστατοι στο μέγεθος και προσπαθούν να υποδείξουν την παρουσία υγιούς βλάστησης σε μια περιοχή. Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο προκύπτουν μπορεί να προέρχονται από λόγους των καναλιών (ratio), να στηρίζονται στη “γραμμή εδάφους” (soil line, slope) ή και από άλλους συνδυασμούς καναλιών. Οι δείκτες μάλιστα μπορεί να διακριθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: α) σε απλούς λόγους (π.χ. SR και NDVI) οι οποίοι κάνουν χρήση μόνο την φασματική ακτινοβολία. Στη διεθνή βιβλιογραφία αυτοί οι δείκτες κατηγοριοποιούνται ως “Intrinsic Vegetation Indices”, β) δείκτες που κάνουν χρήση τη γραμμή του εδάφους (soil-line related indices), οι οποίοι περιλαμβάνουν παραμέτρους της γραμμής εδάφους όπως είναι ο PVI, WDVI, SAVI TSAVI, MSAVI κ.ά, και γ) οι ατμοσφαιρικά διορθωμένοι δείκτες όπως είναι ο ARVI και ο GEMI. Ένας άλλος βασικός διαχωρισμός που γίνεται στους δείκτες βλάστησης είναι οι πολυφασματικοί δείκτες, οι οποίοι προκύπτουν από πολυφασματικά δεδομένα, και οι υπερφασματικοί δείκτες οι οποίες προέρχονται αντίστοιχα από χρήση υπερφασματικών δεδομένων (Stagakis *et al.*, 2010).

Δείκτες βλάστησης για τον εντοπισμό υπεδάφινων ανωμαλιών όπως φάνηκε και από το προηγούμενο κεφάλαιο έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες περιοχές με σημαντικά ευρήματα σε διάφορες περιοχές (βλ. Rowlands και Sarris, 2007; Masini και Lasaponara, 2007; Cavalli *et al.*, 2007; Parcak, 2009; Lasaponara και Masini, 2007a; Lasaponara και Masini, 2005; Lasaponara και Masini, 2006; Aqduş *et al.*, 2008; 2007

Bassani *et al.*, 2009). Παρόλα αυτά, είναι αξιοσημείωτη η χρήση μόνο ενός περιορισμένου αριθμού πολυφασματικών δεικτών –κυρίως του δείκτη NDVI- για αρχαιολογικές έρευνες. Αυτή η αντίφαση είναι φανερή όταν κάποιος προσπαθήσει να συγκρίνει του δείκτες που εφαρμόζονται για αρχαιολογικές έρευνες και σε γεωργικές εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρονται εξειδικευμένοι δείκτες οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στην απουσία νερού στο φυτό (π.χ. Vegetation Water Stress Index (Abduwasit *et al.*, 2008); Water Deficit Index (Moran *et al.*, 1994)), ευαισθησία της ακτινοβολίας λόγω χλωροφύλλης (π.χ. Chlorophyll Absorption Ratio Index, modified Chlorophyll Absorptions Integral, Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (Stagakis *et al.*, 2010); Modified Simple Ratio (Castro-Esau *et al.*, 2006)), δείκτες που είναι ευαίσθητοι στην καταπόνηση των φυτών (π.χ. Curvature Index (Stagakis *et al.*, 2010), Vegetation stress ratio (White *et al.*, 2008) κ.ά.

Ένα άλλο κενό που καταγράφεται στη βιβλιογραφία είναι η απουσία παρακολούθησης της βλάστησης σε αρχαιολογικό περιβάλλον καθόλη τη διάρκεια ανάπτυξης του φυτού, δηλαδή σε ένα πλήρη φαινολογικό κύκλο. Η φαινολογία είναι ο επιστημονικός κλάδος που σχετίζεται με τον προσδιορισμό, την καταγραφή αλλά και τη μελέτη των διαφόρων σταδίων ανάπτυξης των φυτών. Δηλαδή, η φαινολογία εστιάζεται στη μελέτη των αλληλεπιδράσεων όλων των βιολογικών αλλαγών του φυτού (Shaykewich 1994, Lieth 1974). Όπως ο McCloy (2010) αναφέρει, ο φαινολογικός κύκλος μπορεί να οριστεί ως η παρατήρηση, η καταγραφή αλλαγών του φυτού για μία φαινολογική περίοδο (συνήθως ένα έτος).

Μέσα από την παρούσα διατριβή φάνηκε ότι η μελέτη της φαινολογίας μπορεί να δώσει πολύτιμα στοιχεία για τη βλάστηση και να επιβεβαιώσει την ύπαρξη υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων. Τα φαινολογικά στάδια στα σιτηρά αποτελούν σημαντικούς δείκτες για την γεωργική παραγωγή, τη διαχείριση, το σχεδιασμό αλλά και τις λήψεις αποφάσεων σχετικά με την άρδευση (O'Leary *et al.* 1985, Gouranga και Harsh 2005). Πράγματι, οι οδηγίες του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) σχετικά με την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε καλλιέργειες για απαιτήσεις άρδευσης, λαμβάνει υπόψη τόσο τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών αλλά και το φαινολογικό στάδιο της καλλιέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του συντελεστή Kc ο οποίος αφορά το στάδιο ανάπτυξης της υπό μελέτη καλλιέργειας (Allen *et al.*, 1998). Για την προσομοίωση του φαινολογικού κύκλου

των καλλιεργειών έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα , λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους (Shaykewich 1994; O 'Leary *et al.* 1985; Stewart και Dwyer, 1987). Ωστόσο, τα εν λόγω μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί αφορούν σε μεμονωμένες περιοχές με σχετική ομοιογένεια (Van Bussel *et al.*, 2010).

Επιπλέον, η φαινολογία είναι δύσκολο να μελετηθεί για μεγάλες περιοχές με τις παραδοσιακές πρακτικές. Παραδοσιακά, η παρακολούθηση του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης γίνεται με βάση τις επιτόπιες επισκέψεις παρατηρητών. Η ανάγκη για κατανόηση της φαινολογίας των καλλιεργειών για μεγάλες περιοχές, έχει μετατοπίσει το επιστημονικό ενδιαφέρον στη χρήση δορυφορικών δεδομένων με τεχνικές τηλεπισκόπησης. Οι πρώτες συστηματικές προσπάθειες για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου μέσα από διαστημικές τεχνικές, ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 (Justice *et al.*, 1984) και σήμερα η δορυφορική τηλεπισκόπηση συμβάλλει καθοριστικά στην παρακολούθηση των αλλαγών της βλάστησης (Kross *et al.*, 2011).

Τα δεδομένα αυτά μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών για μεγάλες περιοχές. Διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια, εκτιμούν το φαινολογικό κύκλο με τη χρήση δωρεάν εικόνων χαμηλής χωρικής ανάλυσης (π.χ. MODIS / NOAA / AVHRR). Για παράδειγμα, οι Sakamoto *et al.* (2005) χρησιμοποιούν μεγάλες σειρές διαχρονικών δεδομένων MODIS, προκειμένου να αναπτύξουν μια νέα συστηματική μέθοδο για την ανίχνευση του φαινολογικού κύκλου. Από την άλλη πλευρά, τόσο οι Bradley *et al.* (2007) όσο και οι Funk και Budde (2009) προσδιορίζουν το φαινολογικό κύκλο μέσα από τη μελέτη του δείκτη βλάστησης NDVI. Παράλληλα, έχει κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί συνδυασμός δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων με φασματοραδιόμετρα για την εκτίμηση του φαινολογικού κύκλου καλλιεργειών Papadavid *et al.* (2010; 2011).

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που εγείρεται, πέρα από τον περιορισμένο αριθμό δεικτών βλάστησης που χρησιμοποιούνται για αρχαιολογικές έρευνες, είναι το ζήτημα της ανάπτυξης ή τροποποίησης κάποιου υφιστάμενου δείκτη βλάστησης με στόχο την ενίσχυση των διαφοροποιήσεων της βλάστησης που παραμένει ένα μεγάλο κενό σήμερα στη διεθνή βιβλιογραφία. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας καταγράφηκε η

πρώτη προσπάθεια δημιουργίας ενός τέτοιου δείκτη βλάστησης ο οποίος θα είναι σε θέση να βοηθήσει τη διαδικασία της φωτοερμηνείας για την αναγνώριση των διαφοροποιήσεων της βλάστησης. Τέτοιες έρευνες μπορεί να συμβάλουν και σε μελλοντικό στάδιο όσον αφορά το σχεδιασμό νέων δορυφόρων που θα εστιάζονται σε εφαρμογές αρχαιολογικής έρευνας.

2.4. Συμβολή διατριβής

Οι σύγχρονες διαστημικές τεχνολογικές εξελίξεις αναμένεται τα επόμενα χρόνια να είναι ραγδαίες. Οι νέοι δορυφόροι τόσο της NASA όσο και της ESA, αλλά και άλλων κυβερνητικών ή μη οργανισμών, δίνουν το στίγμα για την κατάσταση που θα επικρατήσει τα επόμενα χρόνια στον τομέα της τηλεπισκόπησης. Παραδείγματα αποτελούν η συνέχεια του προγράμματος Landsat με την εκτόξευση του νέου δορυφόρου στις αρχές του 2013, καθώς και η εκτόξευση του νέου δορυφόρου WorldView-3 (Irons *et al.*, 2012, <http://www.digitalglobe.com/content/worldview3/>). Μάλιστα ο τελευταίος δορυφόρος αναμένεται να έχει χωρική διακριτική ικανότητα της τάξης των 0.31m.

Κοινός παρανομαστής όλων των παραπάνω εφαρμογών δορυφορικής Αρχαιοτηλεπισκόπησης (βλ. κεφ. 2.2) είναι το γεγονός ότι η ανίχνευση υπεδάφια καταλοίπων γίνεται με τον εντοπισμό διαφοροποιήσεων της βλάστησης. Αυτές οι διαφοροποιήσεις ανάλογα με το σχήμα, μέγεθος αλλά και θέση με άλλα ευρήματα, μπορεί να οδηγήσουν τους ερευνητές σε χρήσιμα συμπεράσματα. Επιπλέον η εφαρμογή τεχνικών τηλεπισκόπησης μπορεί να γίνεται μεν σε πιθανά υπεδάφια αρχαιολογικά μνημεία, όμως για αυτά δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ουσιαστικά τίποτα πριν από την ανασκαφή. Αυτό όμως με τη σειρά του δημιουργεί βασικά ερωτήματα και προβληματισμούς ως προς το μέλλον της Αρχαιοτηλεπισκόπησης.

Το κυριότερο πρόβλημα εστιάζεται στο γεγονός ότι η επαλήθευση της υπεδάφιας ανωμαλίας γίνεται a-posteriori, δηλαδή μετά από μια ανασκαφή. Πολλές φορές όμως η επιβεβαίωση των δορυφορικών αποτελεσμάτων από αρχαιολογικές έρευνες απλώς απουσιάζει. Η πλήρης κατανόηση του φαινομένου του σχηματισμού των διαφοροποιήσεων στη βλάστηση ή και στο έδαφος δεν έχει πλήρως μελετηθεί. Σημαντικές λεπτομέρειες της Αρχαιοτηλεπισκόπησης (π.χ. μέχρι ποιο βάθος είναι

ανιχνεύσιμοι οι υπεδάφιοι στόχοι, ποιες καλλιέργειες θεωρούνται καταλληλότερες για τον εντοπισμό αρχιτεκτονικών καταλοίπων, ποια είναι τα χρονικά παράθυρα για παρακολούθηση της καλλιέργειας κ.ά) δεν έχουν μελετηθεί διεξοδικά μέχρι στιγμής και μάλλον αυτό θα είναι αδύνατο να γίνει με τις συνήθεις πρακτικές.

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την εισαγωγή ενός νέου πεδίου τηλεπισκόπησης για τον εντοπισμό υπεδάφινων καταλοίπων την “πειραματική Αρχαιοτηλεπισκόπηση”. Η πειραματική Αρχαιοτηλεπισκόπηση θα έχει ως στόχο να μελετήσει τις διαφοροποιήσεις της βλάστησης σε ελεγχόμενους και γνωστούς υπεδάφινους στόχους με τηλεπισκοπικά δεδομένα. Η γνώση δηλαδή της υπεδάφιας ανωμαλίας να γίνεται *apriori*. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με την αντιστροφή της μέχρι σήμερα διαδικασίας: από γνωστά αρχιτεκτονικά κατάλοιπα να μελετηθεί η διαφοροποίηση της βλάστησης. Μάλιστα η πειραματική Αρχαιοτηλεπισκόπηση μπορεί να παραλληλιστεί με την πειραματική αρχαιολογία, όπου οι ερευνητές προσπαθούν να κατανοήσουν προϊστορικές πρακτικές μέσα από σύγχρονες αναπαραστάσεις.

Όμως η δυνατότητα συστηματικής έρευνας σε τέτοια πεδία πιθανώς να περιορίζεται τόσο από τις δυνατότητες χωρικής, φασματικής και χρονικής ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων όσο και από οικονομικούς λόγους (για την αγορά δεδομένων). Αυτή η κατάσταση μπορεί να ανατραπεί με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων τα οποία δίνουν υπερφασματικά δεδομένα της τάξης των μόλις λίγων νανόμετρων, με μεγάλη χωρική ανάλυση (κάλυψη μερικών τετραγωνικών εκατοστών) αλλά και μεγάλη χρονική ανάλυση, αφού η λήψη των μετρήσεων θα είναι πλέον στην κρίση του ερευνητή.

Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσέγγισης αναμένεται να είναι πολλαπλά για το μέλλον της αρχαιοτηλεπισκόπησης. Αφενός θα μπορεί να μελετηθούν σε βάθος όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τη βλάστηση και το έδαφος, και αφετέρου οι ερευνητές θα μπορεί να πειραματιστούν με νέες ιδέες (π.χ. νέες καλλιέργειες, επιλογή βάθους του αρχιτεκτονικού καταλοίπου, σύσταση αρχιτεκτονικού καταλοίπου κ.ά.) αλλά παράλληλα θα μπορεί να προσομοιωθούν μελλοντικοί δορυφόροι, δείκτες κ.ά. που να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες αρχαιολογικές έρευνες και σε συγκεκριμένες αρχαιολογικές συνθήκες.

Πέρα από το πιο πάνω γενικό πλαίσιο η παρούσα διατριβή πραγματεύεται και άλλα θέματα για τα οποία η βιβλιογραφία είναι πολύ περιορισμένη. Ένα από αυτά είναι η εκτίμηση και ποσοτικοποίηση της ατμοσφαιρικής επίδρασης στην αρχαιολογική έρευνα, η μελέτη φασματικών υπογραφών κατά τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου σιτηρών σε αρχαιολογικούς χώρους, αλλά και η χρήση δορυφορικών δεδομένων των οποίων η χωρική ανάλυση δεν είναι αρκετή για την ανίχνευση γραμμικών χαρακτηριστικών στη βλάστηση. Μάλιστα στο τελευταίο θέμα έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση, αφού η μελέτη του φαινολογικού κύκλου των φυτών με πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η εισαγωγή του φαινολογικού κύκλου για αρχαιολογικές έρευνες γίνεται για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι έρευνες δεν περιορίζονται μόνο σε ελεγχόμενα πεδία αλλά γίνεται και μελέτη σε αρχαιολογικούς χώρους στην Κύπρο, Ελλάδα και Ουγγαρία με συγκρίσεις με άλλες μεθόδους επιφανειακής έρευνας. Μέσα από τη διεξαγωγή της έρευνας έγινε εφικτή η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αρχαιολογικό χώρο ο οποίος καλύπτεται από πυκνή βλάστηση (κριθάρι – σιτάρι), χρησιμοποιώντας βοηθητικές πληροφορίες μόνο από την ίδια την εικόνα.

3. Περιοχές Μελέτης

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι περιοχές μελέτης της παρούσας διατριβής. Οι περιοχές αυτές διακρίνονται σε γνωστές αρχαιολογικές θέσεις και σε ελεγχόμενα πεδία. Οι αρχαιολογικές θέσεις είναι (α) η Παλαιάπαφος (Κύπρος) (β) οι Νεολιθικές θέσεις (μαγούλες) στη Θεσσαλία (Ελλάδα) και (γ) η θέση Visztu (Ουγγαρία), ενώ οι αγροτικές περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν ως ελεγχόμενα πεδία, είναι η περιοχή της Αλάμπρας και της Αχέλειας στην Κύπρο (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Χάρτης με τις περιοχές μελέτης

Η επιλογή των θέσεων δεν ήταν τυχαία. Στην αρχαιολογική θέση της Παλαιάπαφου, ο εκπονών είχε εμπλακεί ενεργά από το 2007 - 2010 στις ανασκαφικές δραστηριότητες του Πανεπιστημίου Κύπρου και ειδικότερα της Ερευνητικής Μονάδας Αρχαιολογίας. Παράλληλα υπήρχε ενεργή συμμετοχή στο ερευνητικό πρόγραμμα εφαρμοσμένης έρευνας “A long-term response to the need to make modern development and the preservation of the archaeo-cultural record mutually compatible operations. Pilot application at Kouklia-Palaipaphos”(2007-2010), το οποίο είχε ως στόχο τη χρήση νέων τεχνολογιών για τη διάσωση και διαχείριση εκτεταμένων αρχαιολογικών θέσεων (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, γεωφυσικές διασκοπήσεις) μαζί με τις ανασκαφικές δραστηριότητες για τον εμπλουτισμό της αρχαιολογικής ορατότητας

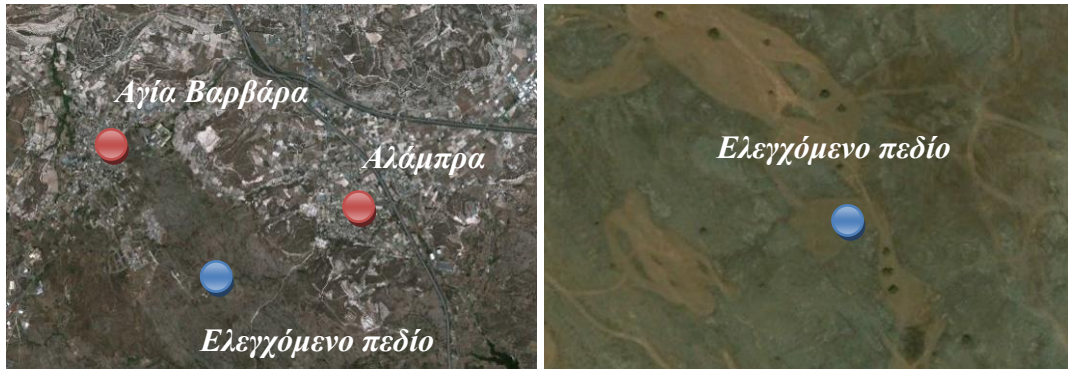
της περιοχής (βλ. Sarris *et al.*, 2009; 2011, Iaconou *et al.*, 2009; Ιακώβου *et al.*, 2010; Αγαρίου *et al.*, 2010b). Οι Νεολιθικές θέσεις της Θεσσαλίας προσέφεραν τη δυνατότητα διερεύνησης των δυνατοτήτων της Γεωπληροφορικής σε θέσεις “Tells” (Μαγούλες) που δεν συναντούνται αρχαιολογικά εντός Κύπρου. Παράλληλα στην Ουγγαρία πραγματοποιείται ένα μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα (“Koros Regional Archaeological Project – KRAP”) όπου γίνεται η συνδυασμένη χρήση νέας τεχνολογίας με αρχαιολογικές έρευνες: γεωφυσικές διασκοπήσεις, χημικές αναλύσεις, επιφανειακές αρχαιολογικές έρευνες και χρήση δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων για τη διερεύνηση της κατοίκησης της Ύστερης Νεολιθικής εποχής. Οι αγροτικές περιοχές που επιλέχθηκαν για την δημιουργία χώρων πειραματικών μετρήσεων ελέγχου είναι παραδοσιακές περιοχές καλλιέργειας σιτηρών (Παπαδαβίδ, 2011) με εύκολη προσβασιμότητα.

Σημειώνεται ότι όλες οι περιοχές αυτές είναι καλυμμένες με χαμηλή και πυκνή βλάστηση (κυρίως κριθάρι και σιτάρι) και επομένως είναι ιδανικές για τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων με τη χρήση τηλεπισκοπικών τεχνικών. Τόσο τα σιτηρά όσο και το κριθάρι μειώνουν τις επιδράσεις του εδάφους αφού χαρακτηρίζονται από ψηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index >3).

3.1. Ελεγχόμενα Πεδία

3.1.1. Περιοχή Αλάμπρας

Το πεδίο ελέγχου Αλάμπρας, το οποίο έχει δημιουργηθεί για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, βρίσκεται στις αγροτικές εκτάσεις του ομώνυμου χωριού της επαρχίας Λευκωσίας, 2 χλμ. ανατολικά από το σημερινό πυρήνα της Αλάμπρας (Εικόνα 6). Η επιλογή της θέσης για την υλοποίηση της περιοχής ελέγχου έγινε με το σκεπτικό η περιοχή να παρέχει άμεση προσβασιμότητα για σκοπούς διευκόλυνσης των παρατηρήσεων αλλά παράλληλα η θέση να προσφέρεται για καλλιέργεια σιτηρών (παραδοσιακή περιοχή καλλιέργειας σιτηρών) (Εικόνα 7). Στην περιοχή Αλάμπρας δημιουργήθηκαν οκτώ τετράγωνα διαστάσεων 5 x 5 μέτρων προσομοιάζοντας διαφορετικά αρχαιολογικά κατάλοιπα. Το πεδίο αυτό δημιουργήθηκε το Φθινόπωρο του 2010.



Εικόνα 6: Περιοχή μελέτης (Google Earth[©])



Εικόνα 7: Φωτογραφίες από την περιοχή μελέτης

3.1.2. Περιοχή Αχέλειας

Το δεύτερο ελεγχόμενο πεδίο το οποίο δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της διατριβής βρίσκεται στην περιοχή Αχέλειας, της επαρχίας Πάφου (Εικόνα 8). Το ελεγχόμενο πεδίο βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό (αεροδρόμιο Πάφου) της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας Κύπρου και σε κοντινή απόσταση από την αρχαιολογική περιοχή της Παλαιπάφου, που αποτελεί επίσης αντικείμενο έρευνας της παρούσης διατριβής.



Εικόνα 8: Ελεγχόμενο πεδίο Αχέλειας, Πάφου

Ο χώρος αποτελεί ιδιοκτησία του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών Κύπρου και σε αυτές τις εκτάσεις οι ερευνητές του Ινστιτούτου πειραματίζονται και ερευνούν θέματα που άπτονται της γεωργίας (π.χ. με νέες καλλιέργειες, βιολογικές καλλιέργειες κ.τ.λ.). Στην περιοχή αυτή δημιουργήθηκε ένα τετράγωνο διαστάσεων 3 x 3 μέτρων, με τοπική λίθο θαμμένη σε βάθος 25 εκατοστών. Το νέο αυτό ελεγχόμενο πεδίο δημιουργήθηκε το Φθινόπωρο του 2011 (05 Σεπτεμβρίου 2011).



Εικόνα 9: Φωτογραφίες από την περιοχή της Αχέλειας

3.2. Αρχαιολογικές Θέσεις

3.2.1. Παλαίπαφος, Κύπρος

Η Παλαίπαφος, η οποία εντοπίζεται στο σημερινό χωριό Κούκλια της επαρχίας Πάφου, στα νοτιοδυτικά της Κύπρου, βρίσκεται πολύ κοντά στον ποταμό Διάριζο που είναι και ο μεγαλύτερος της ευρύτερης περιοχής. Αν και η Παλαίπαφος θεωρείται μια εκτεταμένη αρχαιολογική θέση, υπάρχει σημαντικό πρόβλημα στην οριοθέτησή της λόγω περιορισμένης αρχαιολογικής ορατότητας. Ο μικρός αριθμός των ορατών μνημείων, αλλά επίσης και το γνωστό τέμενος το οποίο είναι αφιερωμένο σε μια ανεικονική θεά, γνωστή μεταγενέστερα ως Αφροδίτη, βρίσκονται διασκορπισμένα σε μια έκταση περίπου 2 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η Παλαίπαφος, ήταν μία από δύο θέσεις-λιμάνια της Κύπρου (η άλλη ήταν το Κίτιο) που δεν εγκαταλείφθηκαν στη διάρκεια της πανμεσογειακής κρίσης του τέλους της Ύστερης Εποχής του Χαλκού. Κίτιο και Παλαίπαφος παρουσιάζουν μνημειακή αρχιτεκτονική στη διάρκεια του 12^{ου} αι. π.Χ. και πολιτειακή συνέχεια από την Ύστερη Εποχή του Χαλκού στην Εποχή του Σιδήρου (Iaconou 2008, 2012). Στην πρώτη χιλιετία η Παλαίπαφος εδραιώνεται ως μια από τις πόλεις- βασιλεια του νησιού (Iaconou *et al.*, 2009).

Οι αρχαιολογικές έρευνες στην περιοχή της *Παλαιπάφου* ξεκινούν το 1888 από το “Cyprus Exploration Fund” (Hogarth 1889; Maier *et al.*, 2004). Οι ανασκαφές συνεχίζονται πλέον το 1950, με μια δεύτερη Βρετανική αρχαιολογική αποστολή υπό τον επιγραφολόγο T. B. Mitford, από το Πανεπιστήμιο St. Andrews, και τον J. H. Piffie του Μουσείου του Liverpool. Το 1966 η Γερμανό-Ελβετική αποστολή με επικεφαλής τον F.-G. Maier ανασκάπτει πέρα από το χώρο του τεμένους και τους μεσαιωνικούς ζαχαρόμυλους στη θέση *Σταυρός*, αλλά και σε άλλες θέσεις (*Μαρτσέλλο, Ευρετή, Χατζηαππουλλάς*) με σημαντικά ευρήματα (Maier 1979; 1981; Maier και Wartburg 1995). Το Τμήμα Αρχαιοτήτων διεξάγει σωστικές ανασκαφές στην περιοχή αυτή από τη δεκαετία του 1960. Το 1979-80 σε ανασκαφές στην περιοχή *Σκάλες*, έρχεται στην επιφάνεια μέρος ενός αρχαίου νεκροταφείου (Karageorghis 1983) ενώ το 1984 νέοι τάφοι έρχονται στην επιφάνεια από το Τμήμα Αρχαιοτήτων στην περιοχή *Τερατσούδια* και *Ελιομύλια* (Karageorghis 1990). Από το 2006, η Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου υπό την διεύθυνση της Μ. Ιακώβου διεξάγει ανασκαφές στο πλαίσιο ενός νέου πολυεπίπεδου προγράμματος με τίτλο, “The Palaeraphos Urban Landscape Project” (βλ. Ιακωβου 2008, 2012).



Εικόνα 10: Αεροφωτογραφία περιοχής Παλαιπάφου όπου επισημαίνονται οι θέσεις στην περιοχή Αρκαλον.

Η περιοχή που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία περιορίζεται στη θέση *Αρκαλον* (Εικόνα 10). Το *Αρκαλον* βρίσκεται δυτικά του *Ιερού της Αφροδίτης* και ανατολικά του λόφου *Χατζηαππουλλάς*. Στην περιοχή αυτή είχε διενεργηθεί γεωφυσική έρευνα το 2007 και το 2010 από το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών (Sarris *et al.*, 2008; 2011) η οποία είχε καταδείξει διάφορες γεωφυσικές ανωμαλίες. Στο ανατολικό τμήμα της *Αρκάλου* βρίσκεται η κλιτύς με τον κτιστό τάφο, γνωστό ως “Σπήλαιο της Ρήγαινας”.

Σε αυτήν την περιοχή το 2010 είχαν πραγματοποιηθεί συστηματικές ανασκαφές βάσει των προγενέστερων πορισμάτων της γεωφυσικής έρευνας που διεξήχθη στην περιοχή το 2007, από την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου (Εικόνα 11). Τα αποτελέσματα των ανασκαφών έδειξαν ότι παρά την εξαιρετικά προνομιακή θέση της περιοχής, η περιοχή *Αρκαλον* δε φαίνεται να αποτέλεσε τμήμα του αστικού ιστού της Παλαιάφου κατά την Εποχή του Χαλκού αλλά ούτε και κατά την περίοδο άνθησης του βασιλείου στα Αρχαϊκά και Κλασσικά χρόνια. Τα μεγάλα σύνολα οστράκων που προήλθαν από τις δοκιμαστικές τομές, δεν καταδεικνύουν χρήση της περιοχής κατά την Εποχή του Χαλκού, αλλά ούτε και πριν από τον 4ο αι. π.Χ. Τα φτωχά οικιστικά κατάλοιπα που εντοπίστηκαν, τα οποία πρέπει να ανήκουν στην ύστερη Κλασσική ή και την Ελληνιστική περίοδο, φαίνεται να μην έχουν κάποια συνάφεια με τις γεωφυσικές ανωμαλίες που εντοπίστηκαν (επαναχρησιμοποιημένο οικοδομικό υλικό και ερυθρή ώχρα πάνω στο πεσμένο επίχρισμα των τοίχων). Εικάζεται ότι η περιοχή *Αρκάλου* δεν είχε κατοικηθεί πριν από τον 4ο αιώνα π.Χ. (Ιακώβου, 2010).



Εικόνα 11: Φωτογραφίες από την ανασκαφική δραστηριότητα του Πανεπιστημίου Κύπρου στην περιοχή *Αρκαλον*.

Σε γειτονικό τεμάχιο, στην ίδια περιοχή το 2010 είχαν πραγματοποιηθεί διαγνωστικές έρευνες από το Τμήμα Αρχαιοτήτων (βλ. Εικόνα 10). Οι έρευνες έφεραν στο φως αρχαιολογικά αρχιτεκτονικά ευρήματα, τα οποία χρονολογούνται πιθανώς στην ύστερη Κλασική περίοδο. Τα ευρήματα αυτά βρίσκονται 20 - 30 εκ. κάτω από το έδαφος, όπως και τα αντίστοιχα φτωχά κατάλοιπα που εντόπισε η πανεπιστημιακή ανασκαφή (Εικόνα 12). Τα αποτελέσματα των ανασκαφών και των γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν χρησιμοποιηθεί παράλληλα με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την παρούσα διατριβή.



Εικόνα 12: Αρχαιολογικά ευρήματα από τις ανασκαφές του Τμήματος Αρχαιοτήτων 2010.

3.2.2. Μαγούλες Θεσσαλίας, Ελλάδα

Η περιοχή της Θεσσαλίας που βρίσκεται στην Κεντρική Ελλάδα, θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές αγροτικές περιοχές της Ελλάδας. Στο Θεσσαλικό κάμπο, εντοπίζονται πολλές θέσεις (γήλοφοι - μαγούλες) που χρονολογούνται από την Πρώιμη Νεολιθική περίοδο μέχρι και την Εποχή του Χαλκού (6000 – 3000 π.Χ.). Τυπικά, οι μαγούλες είναι μικροί λοφίσκοι με υψομετρική διαφορά 1-5 μέτρα από τη γύρω περιοχή και αποτελούνται από μάργες και λάσπη. Εκατοντάδες τέτοιες μαγούλες βρίσκονται διασκορπισμένες στη Θεσσαλία και είναι καλυμμένες κάτω από διαφορετικά είδη βλάστησης. Λόγω της εντατικής καλλιέργειας στη σύγχρονη εποχή πολλές τέτοιες μαγούλες δεν είναι σήμερα ορατές από το έδαφος λόγω ισοπέδωσης των λοφίσκων (Alexakis *et al.*, 2009; Alexakis *et al.*, 2011).

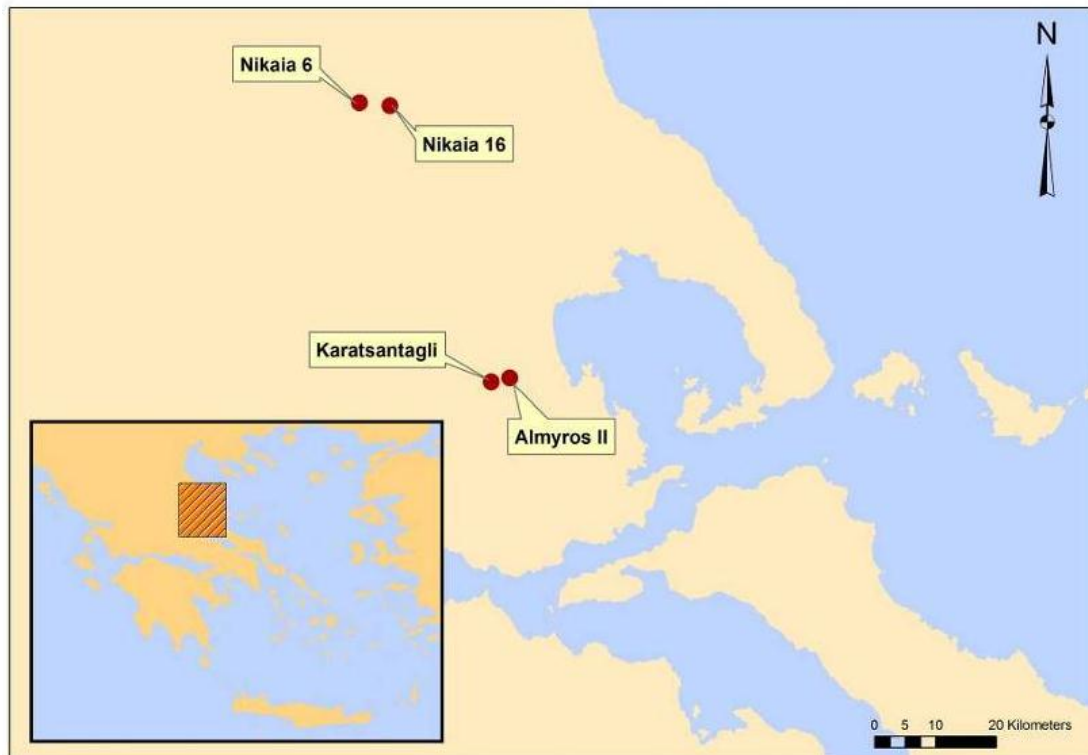
Οι πρώτες έρευνες για τις θέσεις στη Θεσσαλία έγιναν από τον Χρ. Τσουντα (1908). Μάλιστα όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Βουζαζάκης (2009), η ενασχόληση του Τσουντα με τις θέσεις της Θεσσαλίας είναι ένα αξιοσημείωτο θέμα αφού δεν υπήρχε

καμία αναφορά στα έως τότε γνωστά και αποδεκτά πρότυπα της κλασικής αρχαιότητας. Επιπλέον, συνεχίζοντας ο Βουζαξάκης (2009), αναφέρει ότι “το ενδιαφέρον γίνεται εντονότερο, αν ληφθεί υπόψη ότι οι αρχικές εκείνες έρευνες για τη νεολιθική περίοδο πραγματοποιούνταν στη σκιά των μεγάλων ανασκαφών και αποκαλύψεων στις Μυκήνες και στην Κρήτη”. Τις έρευνες συνεχίζουν οι Βρετανοί ερευνητές Wace και Thompson (1912) ενώ ακολουθούν άλλες έρευνες στην περιοχή (βλ. Βουζαξάκης, 2009). Παρόλα αυτά, η πρώτη δημοσιευμένη επιφανειακή έρευνα διενεργήθηκε τη δεκαετία του 1980 στην πεδιάδα της Λάρισας από τον Κ. Γαλλή και τους συνεργάτες του στην ΙΕ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων (Γαλλής, 1992). Όπως ο Βουζαξάκης τονίζει στην δική του έρευνα (2009), είναι εμφανές, ότι στην περιοχή της Θεσσαλίας δεν έχουν αναπτυχθεί επιφανειακές αρχαιολογικές έρευνες, σε αντίθεση με άλλες περιοχές του ελλαδικού χώρου.

Εκτεταμένη μελέτη για τον εντοπισμό μαγούλων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας με τη χρήση τεχνικών Γεωπληροφορικής έχει γίνει από τους Alexakis *et al.* (2009; 2011). Η μεθοδολογία τους βασιζόταν κυρίως στη χρήση πολυφασματικών και υπερφασματικών εικόνων μέσης και υψηλής χωρικής ανάλυσης. Διάφοροι αλγόριθμοι (κυρίως δείκτες) σε δορυφορικές εικόνες μαζί με φίλτρα σε Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία για την εξαγωγή των μαγούλων (βλ. εκτενέστερα Αλεξάκης, 2009).

Παράλληλα γεωφυσικές διασκοπήσεις που έγιναν σε Νεολιθική θέση της Θεσσαλίας (θέση Ζερέλια) έδειξαν ότι υπεδάφια κατάλοιπα μπορεί να ανιχνευτούν από επίγειες γεωφυσικές διασκοπήσεις (βλ. Papadopoulos *et al.*, 2011). Οι διασκοπήσεις είναι σε θέση να χαρτογραφήσουν τις υπεδάφειες ανωμαλίες (π.χ. γραμμικές, κυκλικές) αλλά παράλληλα με βάση τις μετρήσεις να γίνουν υποθέσεις σχετικά με το είδος των αρχαιολογικών καταλοίπων (π.χ. τάφος, κτίσμα κ.τ.λ.).

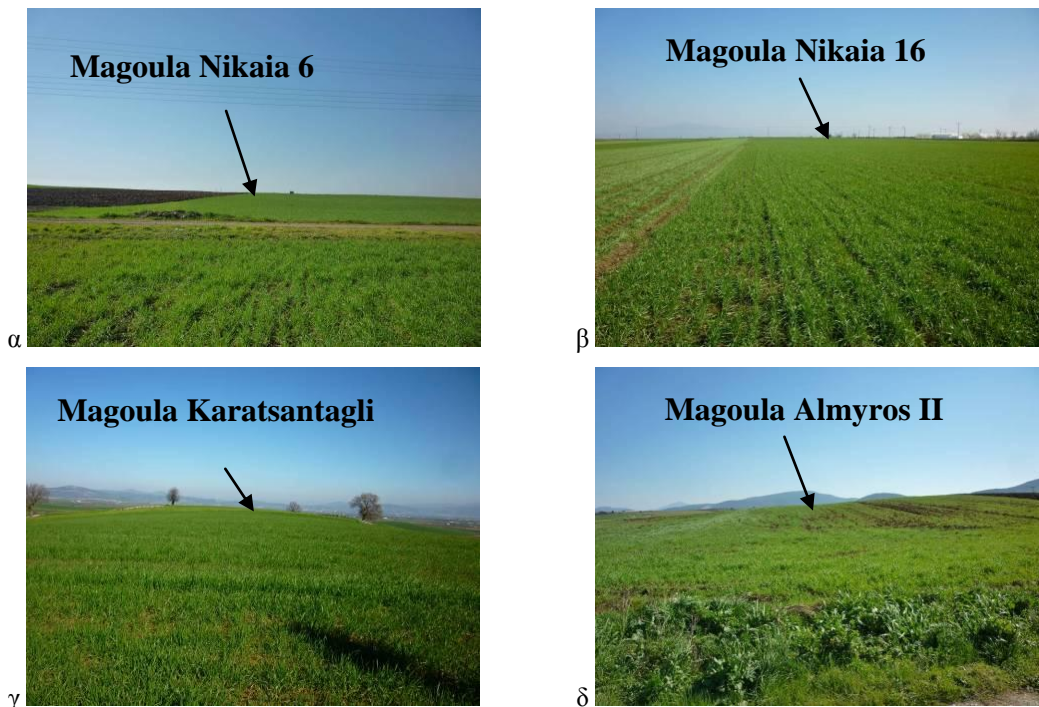
Στην περιοχή της Θεσσαλίας επιλέχθηκαν τέσσερις αρχαιολογικές θέσεις για επιτόπιες μετρήσεις. Αυτές οι θέσεις είναι οι: Νίκαια 6, Νίκαια 16, Καρατσάνταγλι και Αλμυρός II. Οι πρώτες τρεις θέσεις είναι σχετικά ορατές με γυμνό μάτι λόγω του σχηματισμού μικρού λοφίσκου σε σχέση με την τελευταία θέση η οποία έχει σχεδόν ισοπεδωθεί (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Αρχαιολογικές θέσεις Θεσσαλίας.

Οι θέσεις Νίκαια 6 και Νίκαια 16 (Εικόνα 14α-β), χρονολογούνται στην Ύστερη Νεολιθική περίοδο και βρίσκονται σε μια λοφώδη περιοχή περίπου 1,5 χιλιόμετρο δυτικά του σύγχρονου οικισμού της Νίκαιας. Οι μαγούλες έχουν ένα κυκλικό σχήμα με διάμετρο περίπου 120 (Νίκαια 6) και 150 μέτρων (Νίκαια 16) και βρίσκονται υπερυψωμένες 2 μέτρα από τη γύρω περιοχή (Γαλλής, 1992). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που έγιναν στον πλαίσιο της διατριβής και οι δύο θέσεις ήταν καλλιεργημένες.

Η θέση Καρατσάνταγλι (Εικόνα 14γ) χρονολογείται στην Πρώιμη και Μέση Νεολιθική περίοδο και θεωρείται ως μια από τις πρωιμότερες θέσεις της περιοχής. Η θέση υπολογίζεται να καταλαμβάνει μια έκταση 8 εκταρίων, ενώ μια μεγάλη ποσότητα κεραμικής έχει εντοπιστεί στο λόφο του Καρατσάνταγλι μετά από πρόσφατη επιφανειακή έρευνα (περισσότερα από 20-25 κομμάτια κεραμικής/m²). Μεγάλη πυκνότητα οστράκων καταγράφηκε και στη θέση Αλμυρός II (≈10 κομμάτια κεραμικής/m²) (βλ. Βουζαξάκης, 2009) (Εικόνα 14δ). Και αυτές οι δύο θέσεις ήταν καλλιεργημένες κατά την περίοδο των επίγειων μετρήσεων που έγιναν στον πλαίσιο της παρούσας έρευνας.



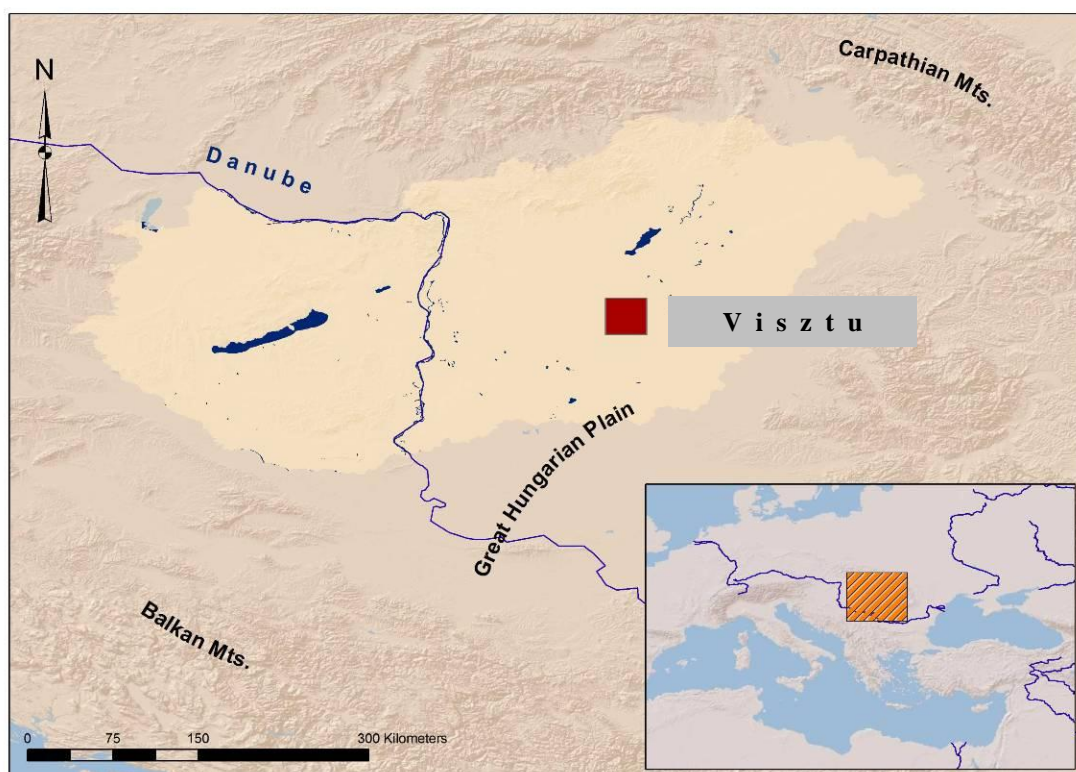
Εικόνα 14: Νεολιθικές θέσεις Θεσσαλίας (α: Νίκαια 6, β: Νίκαια 16, γ: Καρατσάνταγλι και δ: Αλμυρός ΙΙ)

3.2.3. Viszta, Ουγγαρία

Η περιοχή Viszta βρίσκεται στην Μεγάλη Πεδιάδα της Ουγγαρίας (“Great Hungarian Plain”) (Εικόνα 15) η οποία αποτελεί αντικείμενο συστηματικής αρχαιολογικής έρευνας αφού η μετάβαση από την Τελική Νεολιθική (ca.5,000–4,500 π.Χ.) στην πρώιμη Εποχή του Σιδήρου (ca. 4,500–4,000 π.Χ.), σημαδεύεται -σύμφωνα με το αρχαιολογικό υλικό- από δραματικές αλλαγές.

Οι αλλαγές αυτές δεν αφορούν μόνο τη μακρο-κλίμακα δηλαδή τις σχέσεις μεταξύ των πληθυσμών της περιοχής, όπως καταγράφεται μέσα από τις αλλαγές του εμπορικού δικτύου ή της οργάνωσης των οικισμών, αλλά και την μικρο-κλίμακα αφού σημειώνονται αλλαγές και στις ίδιες τις υπάρχουσες θέσεις όπως είναι αλλαγές στην αρχιτεκτονική και ταφικά έθιμα (Parkinson, 2002). Σύμφωνα με τους Parkinson *et al.* (2010), έχει καταγραφεί η άποψη από μερικούς ερευνητές (Gimbutas, 1979,1980) ότι ο πολιτισμός που αναπτύχθηκε στην πεδιάδα αυτή αποτελεί ένδειξη της διείσδυσης των Ινδό-Ευρωπαίων από τις νότιες Ρωσικές στέπες. Παρόλα αυτά όμως, σύμφωνα με τους Bánffy (1994; 1995) και Parkinson (2002), αυτές οι θεωρίες φαίνεται να μην ευσταθούν, αφού οι αλλαγές αυτές θα πρέπει να συνδέονται με τεχνολογικές εξελίξεις, οι οποίες οδηγούν με τη σειρά τους σε τοπικές αλλαγές: Η

συστηματική εξόρυξη και χρήση του χαλκού από τις χαλκοφόρες πηγές των Καρπαθίων και των Βαλκανίων (Jovanoni 1982), η εξημέρωση της κατσίκας μαζί με την παραγωγή γάλακτος και τυριού (Charman 1983; Sherratt 1981, 1983) αλλά κυρίως η εισαγωγή αρότρου (Milisauskas και Kruk 1991), η οποία έδωσε τη δυνατότητα άροσης σε μεγαλύτερες εκτάσεις στην πεδιάδα, είναι μερικές από τις σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις αυτής της περιόδου.



Εικόνα 15: Έκταση της Μεγάλης Πεδιάδας της Ουγγαρίας και η αρχαιολογική θέση Viszta

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό πρόγραμμα “Kőrös Regional Archaeological Project- KRAP” ερευνά το προϊστορικό υπόβαθρο της Μεγάλης Πεδιάδας της Ουγγαρίας στην ανατολική πλευρά των Καρπαθίων (Parkinson *et al.*, 2002; Parkinson *et al.*, 2004a; Sarris *et al.*, 2004; Yerkes *et al.*, 2007). Το εν λόγω πρόγραμμα, το οποίο ξεκίνησε από το 1998 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, έχει ως στόχο να καταγράψει τις αλλαγές στην περιοχή αυτή κατά το τέλος της Νεολιθικής εποχής, μέσα από εκτεταμένες επιφανειακές έρευνες και αρχαιολογικές ανασκαφές (Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Ευρήματα από την ανασκαφική έρευνα στην περιοχή Visztu Ουγγαρίας (Εικ. 12 και 13, από Parkinson 2011).

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής επιλέχθηκαν δύο θέσεις στην ευρύτερη περιοχή Visztu, Ουγγαρίας (Εικόνα 17). Η πρώτη θέση είναι η Szeghalom-Konácsalom στην περιοχή Körös, ενώ η δεύτερη θέση έρευνας είναι το Tell Veszto – Magor, το οποίο ανασκάφηκε τη δεκαετία του 1970. Οι θέσεις αυτές αποτέλεσαν περιοχές συστηματικής έρευνας του προγράμματος KRAP από το 2010 και συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 4.3.



Εικόνα 17: Περιοχή έρευνας, Visztu, Ουγγαρίας. Πάνω η θέση Szeghalom-Konácsalom στην περιοχή Körös (X:511820, Y: 5204250, WGS'84). Κάτω η θέση Tell Veszto – Magor (X: 515929, Y: 5198320, WGS'84).

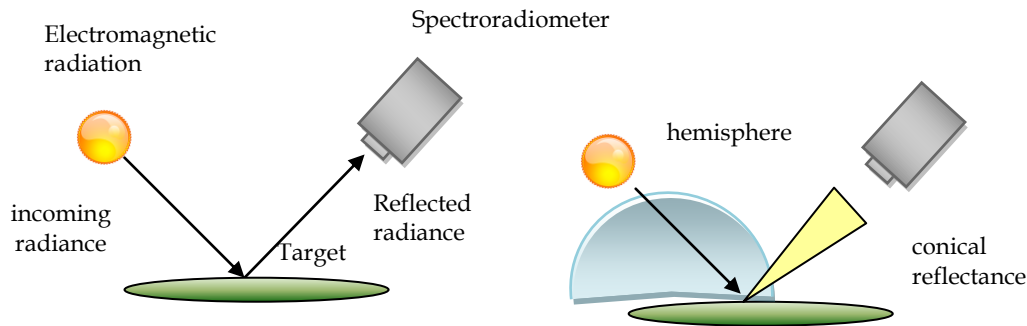
4. Επίγειες μετρήσεις

4.1. Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις

4.1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Η καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ειδικών αισθητήρων, τα φασματοραδιόμετρα (Milton, 1987). Πράγματι, τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από αυτούς τους αισθητήρες, αναφέρονται πολλές φορές στη βιβλιογραφία και ως “επίγεια αληθή δεδομένα” σε αντίθεση με τα δορυφορικά δεδομένα. Αυτό, οφείλεται στο λόγο, ότι οι μετρήσεις με τα φασματοραδιόμετρα καταγράφονται σε σχετικά πολύ μικρή απόσταση από το αντικείμενο μελέτης και έτσι ο χρήστης είναι σε θέση να εστιάσει σε ένα συγκεκριμένο αντικείμενο κατά την ώρα της καταγραφής του στο ύπαιθρο (Jonhson, 2006). Παρόλα αυτά όμως, όπως τονίζουν και οι Curran και Williamson (1986) ακόμη και αυτές οι επίγειες μετρήσεις υπόκεινται σε σφάλματα τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Ο τρόπος με τον οποίο τα φασματοραδιόμετρα καταγράφουν την ακτινοβολία μπορεί να εξηγηθεί μέσα από φυσικούς νόμους. Ήδη, από τη δεκαετία του 1970 οι Nicodemous *et al.* (1977) πρότειναν το βασικό μοντέλο για την “κατανομή αμφίδρομης συνάρτησης ανακλαστικότητας” (bidirectional reflectance distribution function, BRDF, βλ. Εικόνα 18, αριστερά), η οποία περιγράφει την σχέση μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από μια διεύθυνση σε σχέση με την ανακλώμενη ακτινοβολία προς μια άλλη κατεύθυνση. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα των Nicodemous *et al.* (1977) δεν είχαν χρησιμοποιηθεί από την επιστημονική κοινότητα (Schaepman-Strub *et al.*, 2006; Milton *et al.*, 2009) παρά μόνο αρκετά χρόνια αργότερα, μέσα από τη μελέτη των Martonchik *et al.* (2000) και Schaepman-Strub *et al.* (2006). Ο Milton *et al.* (2009), τονίζουν ότι η φασματοσκοπία από καθαρά αυστηρώς όρους φυσικής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στην περίπτωση της “ημισφαιρικής-κωνικής κατανομής της ακτινοβολίας (hemispherical-conical reflectance function, HCRF, βλ. Εικόνα 18, δεξιά). Συνήθως ένας στόχος δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τις διευθύνσεις του ορίζοντα ($360^\circ \times 180^\circ$), όπως ένα ημισφαίριο.



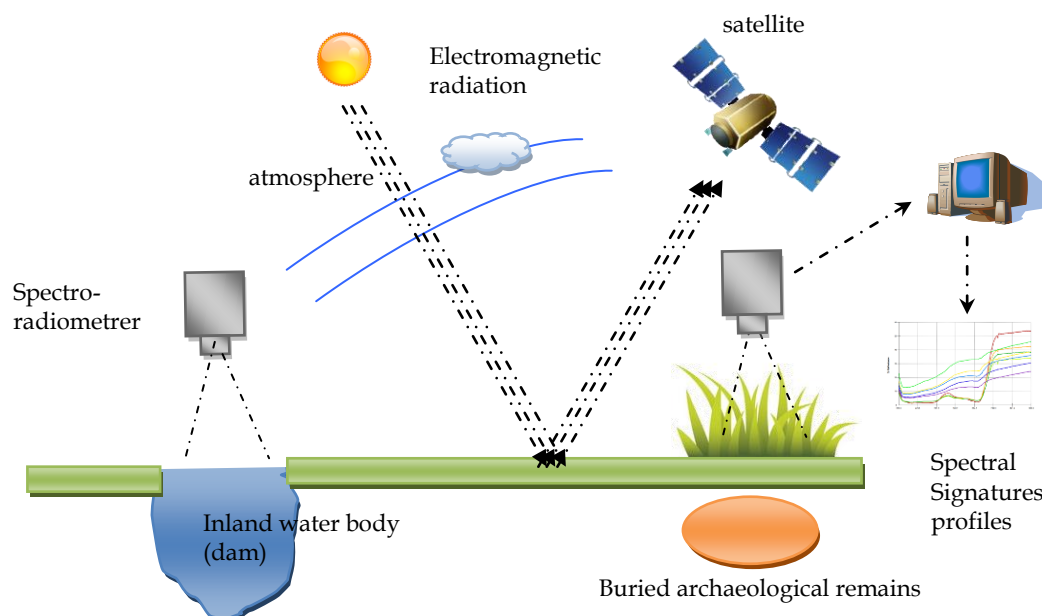
Εικόνα 18: Προσπίπτουσα και ανακλώμενη ακτινοβολία. Αριστερά η περίπτωση της αμφίδρομης κατανομής (BRDF) και δεξιά η περίπτωση της ημισφαιρικής – κωνικής κατανομής (HCRF).

Η χρήση επιγείων φασματοραδιομέτρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ακριβείς μετρήσεις της ανακλαστικότητας σε περιπτώσεις που οι μετρήσεις συνοδεύονται από ειδικούς Λαμπερτιανούς στόχους (στόχος βαθμονόμησης). Οι Milton *et al.* (2009) τονίζουν πως ένας σημαντικός παράγοντας για ορθά και ακριβή αποτελέσματα, είναι η βαθμονόμηση του ειδικού στόχου. Επιπλέον η πλειονότητα των επιγείων φασματοραδιομέτρων που υπάρχουν σήμερα στην αγορά (όπως και αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή), χαρακτηρίζονται ως "single-beam". Δηλαδή το ίδιο όργανο που χρησιμοποιείται για την καταγραφή της ακτινοβολίας στο στόχος βαθμονόμησης (spectralon panel), το ίδιο όργανο χρησιμοποιείται και για την καταγραφή των φασματικών υπογραφών στα διάφορα αντικείμενα. Παρόλα αυτά στο διάστημα που μεσολαβεί, θεωρείται, ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες έχουν παραμείνει αναλλοίωτες. Αυτό μπορεί να είναι ορθό σε αρκετές περιπτώσεις, αλλά σε συνθήκες νεφοκάλυψης ή σε συνθήκες απότομης αλλαγής του καιρού να μην ευσταθεί η πιο πάνω υπόθεση (βλ. Milton 1987). Εντούτοις, όπως αναφέρουν οι Milton και Rollin (2006) σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 2-3 λεπτά, τότε ουσιαστικά η ηλιακή ακτινοβολία παραμένει αναλλοίωτη. Επιπλέον, πέρα από την προστασία του στόχου βαθμονόμησης, οι παρατηρητές θα πρέπει να παραμένουν μακριά από το αντικείμενο που καταγράφουν, έτσι ώστε να μειώνουν την ανάκλαση που θα έχουν τα ρούχα τους στο αντικείμενο. Για το λόγο αυτό, προτείνεται ο ρουχισμός των παρατηρητών να είναι σκούρος για να απορροφά την ακτινοβολία κατά την ώρα λήψης των μετρήσεων. Επιπλέον, οι παρατηρητές θα πρέπει να βρίσκονται απέναντι από τον ήλιο και το αντικείμενο, για να αποφεύγονται επιδράσεις της σκίασης (Milton *et al.*, 2009).

Ένα σημαντικό τμήμα της παρούσας διατριβής πραγματεύεται τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων για τον εντοπισμό υπεδάφινων καταλοίπων. Η χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων σχετίζεται, τόσο με την καταγραφή φασματικών υπογραφών, αλλά και με τη μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών για ένα αντικείμενο και τις βιοφυσικές του ιδιότητες στο φυσικό του περιβάλλον. Ως εκ τούτου, τα επίγεια φασματοραδιόμετρα μπορεί να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για μια περιοχή, εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η ανθρώπινη όραση μπορεί να καλύψει μόνο ένα μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από περίπου 400 έως 700 nm, ενώ η φασματοσκοπία σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης λειτουργεί σε ένα ευρύτερο φάσμα (Milton *et al.*, 2009).

Η παρούσα διατριβή εισάγει για πρώτη φορά στην αρχαιολογική έρευνα, τη συστηματική χρήση των επίγειων φασματοραδιομέτρων (

Εικόνα 19). Με τα φασματοραδιόμετρα μπορεί να γίνει καταγραφή των φασματικών υπογραφών, να υπολογιστούν διάφοροι δείκτες βλάστησης, αλλά και να μελετηθεί ο φαινολογικός κύκλος μιας καλλιέργειας μέσα από μια χρονοσειρά μετρήσεων.



Εικόνα 19: Δυνατότητες επίγειων φασματοραδιομέτρων για αρχαιολογικούς σκοπούς (ατμοσφαιρική διόρθωση δορυφορικών εικόνων, συλλογή φασματικών υπογραφών, δημιουργία φασματικής βιβλιοθήκης κ.τ.λ.).

4.1.2. Ιστορική εξέλιξη επίγειων φασματοραδιομέτρων

Η συστηματική χρήση των επίγειων φασματοραδιομέτρων αφορά τη μελέτη και την κατανόηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αυτή προσπίπτει και έρχεται σε επαφή με διάφορα υλικά. Η πρώτη χρήση των επίγειων φασματοραδιομέτρων έγινε από τον Penndorf (1956) με στόχο την παρακολούθηση της ανθρώπινης όρασης. Κατά τη δεκαετία του 1960 έγιναν πολλές εφαρμογές για τη μελέτη και κατανόηση της φωτοσύνθεσης στα φυτά (Milton 1987). Μερικά από αυτά τα όργανα είχαν σχεδιαστεί έτσι ώστε να καταγράψουν ένα εύρος κύματος, όπως είναι για παράδειγμα οι μελέτες των Adhav (1963), Brach και Wiggings (1967) και των Bulpitt *et al.* (1965), ενώ άλλες έρευνες εστίασαν σε ένα μικρό εύρος κύματος (π.χ. Birth και McVey 1968). Να σημειωθεί ότι τα φασματοραδιόμετρα αυτά περιορίζονταν σε ένα εύρος μήκος κύματος από τα 0,4 μέχρι και τα 1.1 nm.

Το επιστημονικό ενδιαφέρον μετατοπίζεται για λίγα χρόνια στη μελέτη γεωλογικών πετρωμάτων (βλ. Goetz 1975). Παρόμοιες μελέτες έγιναν και από τον Hunt (1977; 1979) ο οποίος ταξινόμησε διάφορα πετρώματα από τη φασματική τους υπογραφή. Την ίδια περίοδο περίπου δημιουργήθηκε και ο πρώτος αερομεταφερόμενος σαρωτής, για την παρακολούθηση της βλάστησης βασιζόμενο στις διακυμάνσεις του μήκους κύματος στα όρια του ερυθρού φάσματος (red edge) (Milton *et al.*, 2009).

Η διαπίστωση ότι η βλάστηση, μέσα από προηγούμενες έρευνες, δεν αποτελούσε μια λαμπεριανή επιφάνεια η οποία διαδίδει την ακτινοβολία ισόποσα προς όλες τις κατευθύνσεις, αποτέλεσε την αφορμή για την ανάπτυξη του συστήματος PARABOLA. Το σύστημα αυτό προσπαθεί να μελετήσει τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας όταν προσπίπτει, ιδιαίτερα σε περιοχές με βλάστηση, υπό γωνία (βλ. Deering 1986). Μια ιστορική αναδρομή παρόμοιων συστημάτων παρουσιάζεται διεξοδικά στους Milton *et al.* (2009).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της φασματικής υπογραφής της βλάστησης από τον Kriebel (1978) στα 0.52 nm. Με βάση τα αποτελέσματά του, προκύπτει ότι υπάρχει αλλοίωση της ακτινοβολίας κατά 1% σε αλλαγή 1° της ζενίθιας γωνίας του ήλιου και επίσης 1% σε αλλαγή 10% του οπτικού πάχους αερολύματος.

Στη μελέτη τους οι Robinson και Bielh (1979) βρήκαν μια διαφορά της τάξης των 3% της ακτινοβολίας, στο φάσμα 0.5 – 0.6 μm σε ομιχλώδεις μέρες (ορατότητα = 8 Km).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ώθηση στην επιστήμη της επίγειας φασματοσκοπίας, αφού πλέον πραγματικές φασματικές υπογραφές αποτελούν ένα απαραίτητο στοιχείο για τη βαθμονόμηση διάφορων μοντέλων και ελέγχου των δορυφορικών και εναέριων σαρωτών (Milton *et al.*, 2009). Αν και υπάρχουν αρκετές εφαρμογές που μελετούν και συσχετίζουν τη φασματική υπογραφή ενός αντικειμένου με διάφορους παράγοντες, εντούτοις στις πλείστες εφαρμογές αυτό που επιδιώκεται είναι ακριβώς το αντίστροφο: η μελέτη και η αναγνώριση “άγνωστων” στόχων μέσα από τις ιδιότητες της φασματικής τους υπογραφής (Milton 1987). Αυτή η διαδικασία όμως απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, ειδικά στη βλάστηση, αφού μπορεί δύο διαφορετικά είδη να παρουσιάζουν πανομοιότυπες φασματικές υπογραφές λόγω άλλων παραμέτρων (Price 1994).

Η μέτρηση της ανακλαστικότητας σε περιοχές με υψηλή βλάστηση, είναι ένας ιδιαίτερος τομέας, αφού όχι μόνο το όργανο θα πρέπει να υπερυψωθεί για να παρθεί η μέτρηση, αλλά παράλληλα συνήθως καλύπτεται και μια ευρύτερη περιοχή στο έδαφος. Στην μελέτη τους οι Chen και Vierling (2006) χρησιμοποίησαν έναν μπαλόνι σε ύψος περίπου 75 m, για τη μέτρηση της φασματικής υπογραφής πάνω από μια δασώδη έκταση. Σε άλλες αντίστοιχες εφαρμογές είχε γίνει χρήση αετού, αλλά και μικρών μοντέλων αεροπλάνων και ελικοπτέρων κ.ά. (βλ. Milton *et al.*, 2009). Οι Peltoniemi *et al.* (2005) με τη χρήση ενός ειδικού γωνιο-ραδιομέτρου μελέτησαν τις φασματικές ιδιότητες της βλάστησης σε δάσος της Φιλανδίας. Εφαρμογές με τη χρήση επίγειων ραδιομέτρων για τη μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις παρουσιάζονται από τους Papadavid *et al.* (2009a; 2010; 2011a).

4.1.3. Μεθοδολογία συλλογής και επεξεργασίας επίγειων μετρήσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έχουν διεξαχθεί επίγειες μετρήσεις σε αρχαιολογικούς χώρους και σε ελεγχόμενα πεδία στην Κύπρο αλλά και στο εξωτερικό (Ελλάδα, Ουγγαρία). Όλες οι περιοχές χαρακτηρίζονται ως αγροτικές εκτάσεις σιτηρών ή άλλης πυκνής βλάστησης. Στη διατριβή αυτή έχει χρησιμοποιηθεί το φασματοραδιόμετρο GER 1500 της εταιρείας Spectra Vista Corporation

(<http://www.spectravista.com/1500.html>). Το συγκεκριμένο φασματοραδιόμετρο έχει την ικανότητα να καταγράφει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τα 350 μέχρι και τα 1050 nm. Η ακτινοβολία καταγράφεται σε περισσότερα από 500 κανάλια (φασματικοί δίαυλοι), ενώ το κάθε κανάλι έχει περίπου εύρος 1.5 nm. Το οπτικό πεδίο (FOV) του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της διατριβής ήταν 4°. Σημειώνεται ότι κάθε φασματική υπογραφή που έδινε το όργανο, ήταν αποτέλεσμα 5 διαδοχικών μετρήσεων οι οποίες λαμβάνονται σε ελάχιστο χρόνο (1-2 sec). Περισσότερα χαρακτηριστικά του οργάνου παρουσιάζει ο Πίνακας 2. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί και οθόνη PDA η οποία ήταν συνδεδεμένη με το φασματοραδιόμετρο GER 1500. Αυτό έδινε τη δυνατότητα στο χρήστη να παρατηρεί σε πραγματικό χρόνο τις φασματικές υπογραφές των αντικειμένων.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φασματοραδιομέτρου GER 1500.

Specifications	
Spectral Range	350 nm to 1050 nm
Internal Memory	470 scans
Channels	512
FOV	4° standard, 8° and 25° optional with fiber optic, irradiance sphere, reflectance probe
Weight	2 kg
Battery Life	4 hours
Wavelength Repeatability	±0.1 nm
Noise Equivalent Radiance	400 nm: $1.1 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 700 nm: $5.0 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 900 nm: $2.0 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$

Μαζί με το GER 1500, έχει χρησιμοποιηθεί και ο στόχος αναφοράς (spectralone panel) για τη μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο στόχος αυτός είναι ειδικά κατασκευασμένος να συμπεριφέρεται ως μια λαμπερτιανή επιφάνεια με σχεδόν 100% ανακλαστικότητα (99,98% ανακλαστικότητα με βάση την βαθμονόμηση του οργάνου το Δεκέμβριο του 2010).

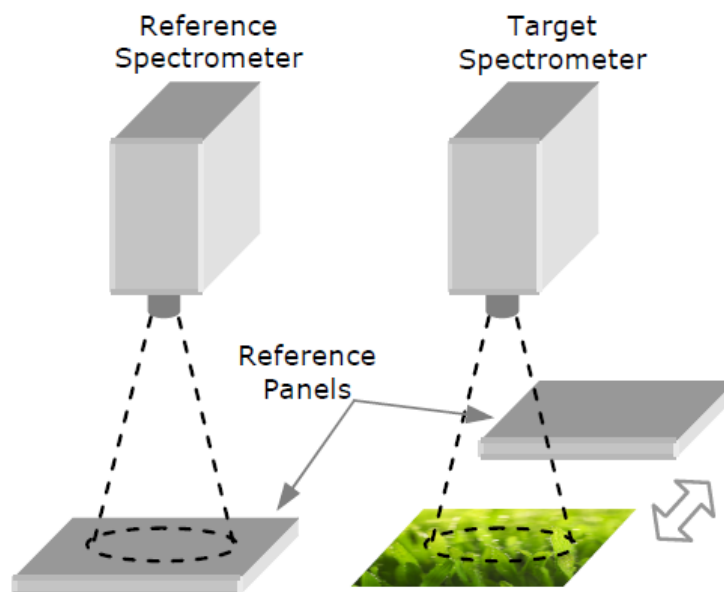


Εικόνα 20: Το φασματοραδιόμετρο GER 1500 που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή (αριστερά), το spectralone panel (δεξιά)

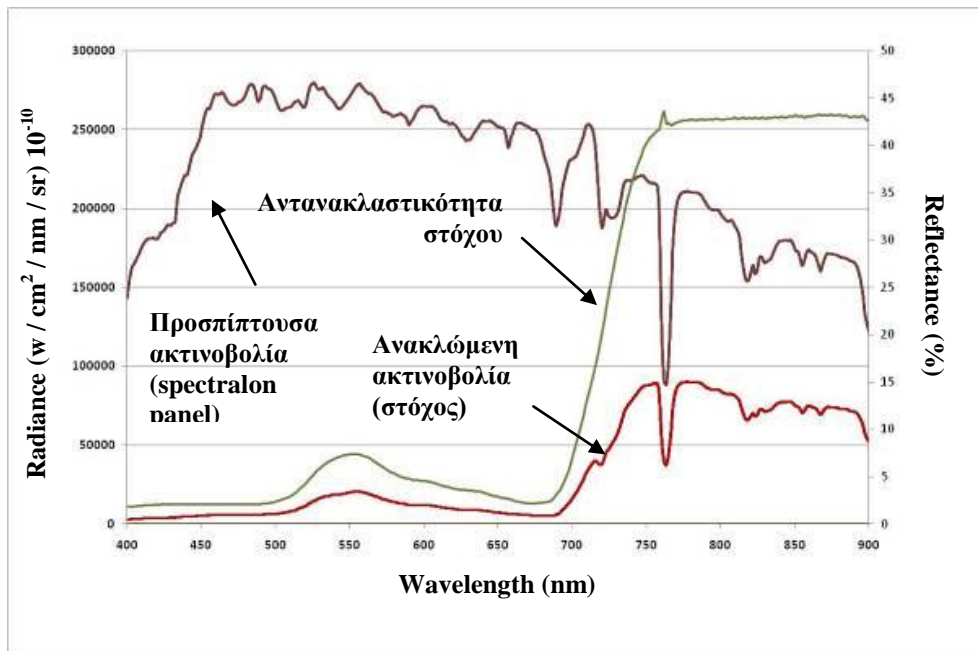
Η μέτρηση της ακτινοβολίας στο στόχο αναφοράς (reference) προηγείται από την αντίστοιχη μέτρηση του στόχου (target), π.χ. βλάστηση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21. Μετρήσεις της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτινοβολίας καθώς επίσης και η ανακλαστικότητα φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 22. Η ανακλαστικότητα σε μια επιφάνεια προκύπτει από την εξίσωση 1:

$$\text{Ανακλ.} = \frac{\text{ακτινοβολία αντικειμένου}}{\text{ακτινοβολία στόχου αναφοράς}} \times \text{βαθμονόμηση του στόχου αναφοράς}$$

$$\text{Ανακλ.} = \frac{\text{ακτινοβολία αντικειμένου}}{\text{ακτινοβολία στόχου αναφοράς}} \times \text{βαθμονόμηση του στόχου αναφοράς} [1]$$



Εικόνα 21: Καταγραφή ανακλαστικότητας με τη χρήση του GER 1500 (Εικόνα από το NERC Field Spectroscopy Facility, University of Edinburgh, <http://fsf.nerc.ac.uk/>).



Εικόνα 22: Μετρήσεις προσπίπτουσας και ανακλώμενης ακτινοβολίας και καταγραφή της ανακλαστικότητας σε ένα στόχο

Η ανακλαστικότητα κάθε αντικειμένου πλέον με τη χρήση του φασματοραδιομέτρου θα αντιστοιχεί στα 500 και πλέον κανάλια του οργάνου. Για τη μετατροπή της πιο πάνω υπερφασματικής ακτινοβολίας σε πολυφασματική, θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη μετατροπή, με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε δορυφόρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις στην παρούσα διατριβή έγινε προσομοίωση των επιγείων μετρήσεων σε δεδομένα Landsat TM/ETM+ χρησιμοποιώντας τη φασματική ευαισθησία του δορυφόρου. Η φασματική ευαισθησία του κάθε δορυφόρου δίνεται από τα RSR φίλτρα (Relative Spectral Response filters – RSR filters). Τα φίλτρα αυτά περιγράφουν την ευαισθησία του οργάνου του δορυφόρου στην ακτινοβολία για ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Wu *et al.*, 2010). Η φασματική ευαισθησία μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 1 και είναι αδιάστατο μέγεθος αφού αφορά σχετική ευαισθησία σε σχέση με τη μέγιστη τιμή (Εικόνα 23).

Αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούνται σε κάθε δορυφορικό ή αερομεταφερόμενο αισθητήρα. Για παράδειγμα, στον δορυφόρο Landsat 5 TM κάθε φασματικό κανάλι ενεργοποιείται από μια συστοιχία 16 αισθητήρων και το σήμα που καταγράφεται από το σύνολο αυτών των αισθητήρων, αποτελεί μια φασματική υπογραφή σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Αν και υπάρχουν πολλαπλοί αισθητήρες για κάθε κανάλι, εντούτοις σε κάθε κανάλι υπάρχει μόνο ένα φίλτρο (Markham και Barker, 1985). Η

χρήση αυτών των φίλτρων έχει ως στόχο να καταγράψει μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, αποκόποντας την υπόλοιπη φασματική ακτινοβολία.

Η ανακλαστικότητα λοιπόν των στόχων έχει προκύψει από τη χρήση των φίλτρων RSR ως ακολούθως (εξίσωση 2):

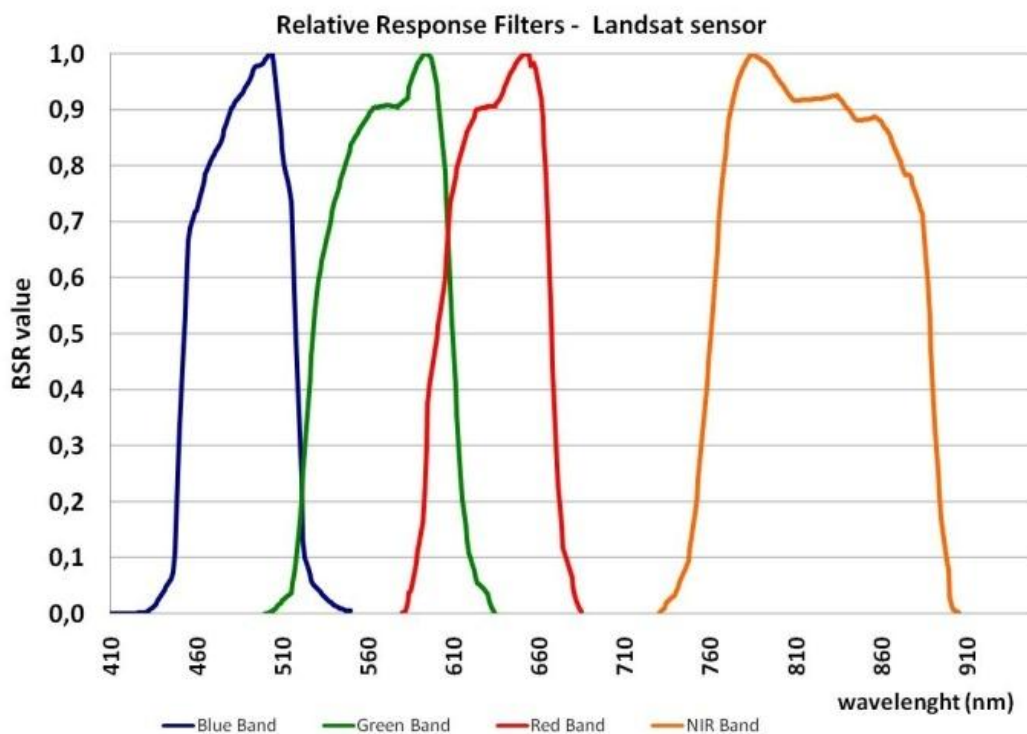
$$R_{\text{band}} = \Sigma (R_i * RSR_i) / \Sigma RSR_i \quad [2]$$

Όπου:

R_{band} = η ανακλαστικότητα σε ένα φασματικό διάυλο – κανάλι (π.χ. R_{Band1})

R_i = η ανακλαστικότητα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (π.χ. $R_{450 \text{ nm}}$)

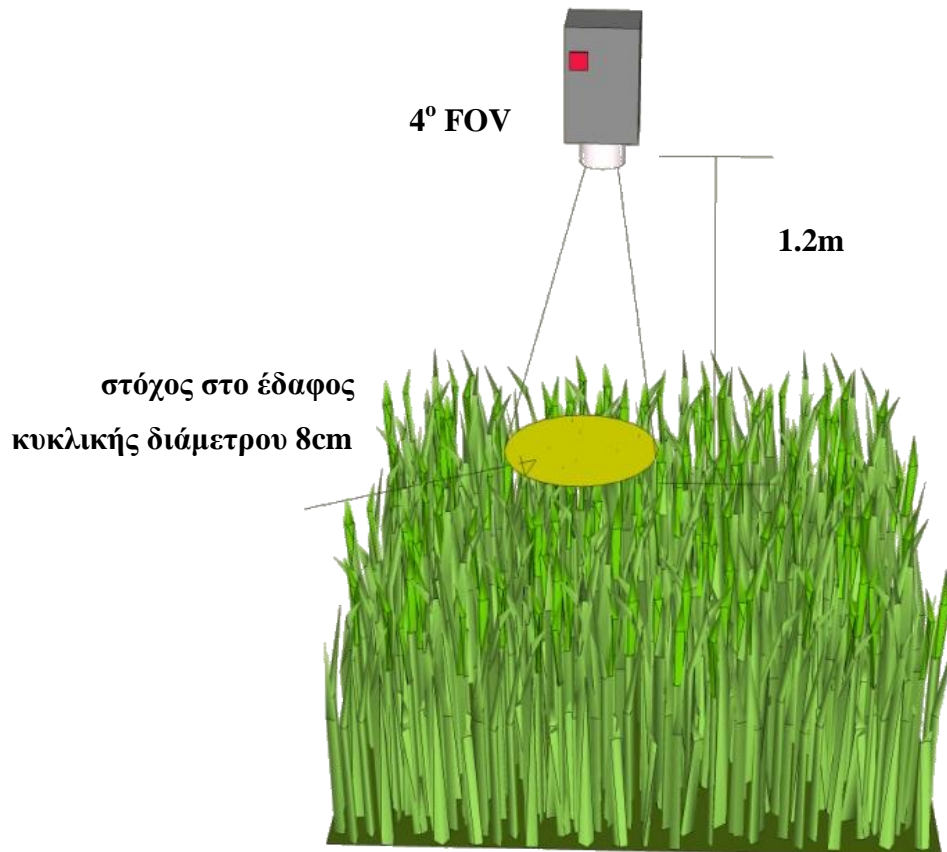
RSR_i = Η φασματική ευαισθησία (RSR) για το συγκεκριμένο μήκος κύματος



Εικόνα 23: Φασματική ευαισθησία για τα κανάλια 1-4 του Landsat 5 TM (δεδομένα από Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) <http://calvalportal.ceos.org/cvp/web/guest/landsat-5-tm>).

Για να αποφευχθούν σφάλματα λόγω απότομης αλλαγής των ατμοσφαιρικών συνθηκών, οι μετρήσεις μεταξύ του Λαμπερτιανού στόχου και της βλάστησης γινόταν σε σύντομο χρονικό διάστημα (λιγότερο από 2 λεπτά). Με αυτό τον τρόπο η

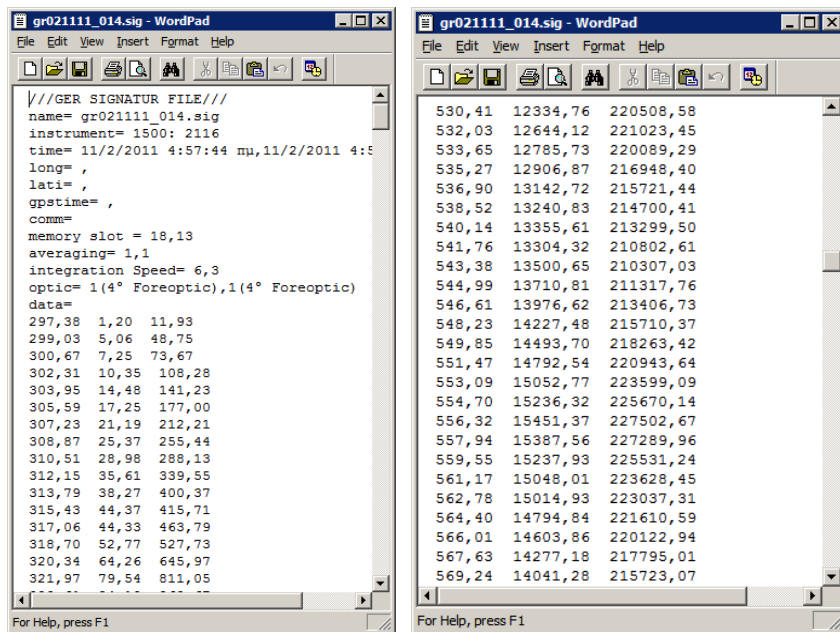
ηλιακή ακτινοβολία δεν είχε σημαντική μεταβολή, το οποίο σύμφωνα με τους Milton *et al.* (2009) ευσταθεί σε περιπτώσεις αίθριου καιρού. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν από ύψος 1.2 m καλύπτοντας στο έδαφος ένα κύκλο με διάμετρο 8 cm (Εικόνα 24). Τέλος, όλες οι μετρήσεις ελήφθησαν από τις 10:00 μέχρι και τις 14:00 (τοπική ώρα) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας (Milton, 1987).



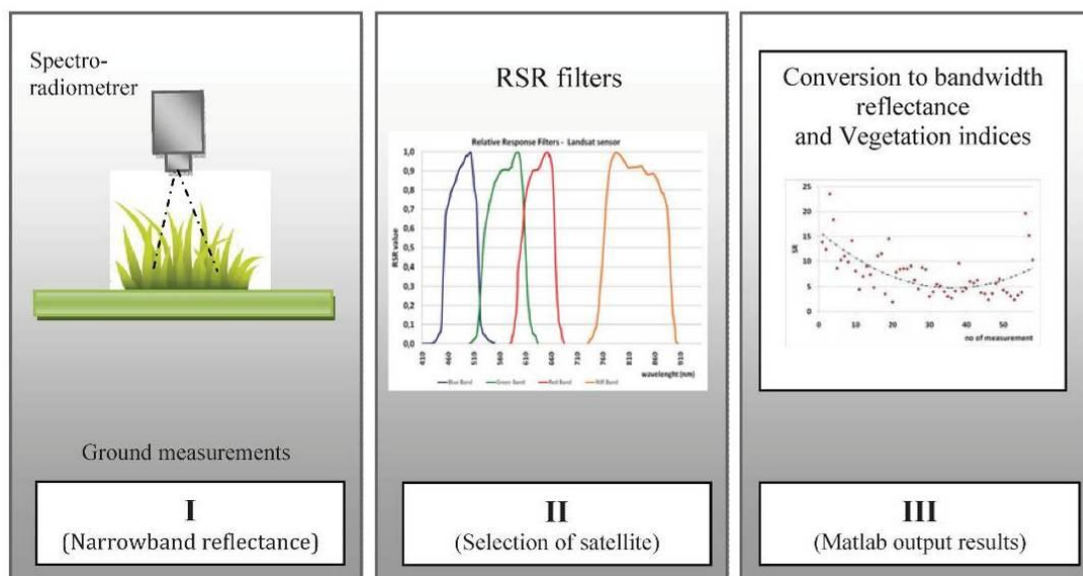
Εικόνα 24: Διάγραμμα συλλογής παρατηρήσεων με το φασματοραδιόμετρο GER 1500.

Η αναγωγή των επίγειων μετρήσεων της ανακλαστικότητας σε αντίστοιχα κανάλια πολυφασματικών δορυφόρων έγινε με τη χρήση ενός αλγόριθμου (Matlab) ο οποίος αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής. Ο αλγόριθμός αυτός (βλ. Παράρτημα) επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει το δορυφόρο επιλογής του (RSR Filter), αλλά και τα κανάλια τα οποία χρειάζεται. Παρόλο που η διαδικασία μετατροπής των δεδομένων είναι απλή, εντούτοις η χρήση του κώδικα επιτρέπει στον περιορισμό των τυχαίων σφαλμάτων από το χρήστη (αντί για παράδειγμα τη χρήση λογιστικών φύλλων–spreadsheets, βλ. Εικόνα 25) αλλά επιπλέον μπορεί εύκολα να αναπτυχθεί

έτσι ώστε να καλύπτει και άλλους δορυφόρους (πολυφασματικούς ή υπερφασματικούς). Αφού γίνει η μετατροπή των δεδομένων σε μονάδες ανακλαστικότητας ανά κανάλι δορυφόρου, τότε μπορεί να υπολογιστούν διάφοροι δείκτες βλάστησης (Εικόνα 26). Το τελευταίο στάδιο έχει και αυτό αυτοματοποιηθεί με τη σύνταξη αντίστοιχου κώδικα σε περιβάλλον Matlab (βλ. Παράρτημα).



Εικόνα 25: Παράδειγμα πρωτογενών μετρήσεων από το φασματοραδιόμετρο



Εικόνα 26: Διαδικασία μετατροπής υπαίθριων μετρήσεων (στάδιο I) σε μονάδες ανακλαστικότητας ανά κανάλι δορυφόρου με τη χρήση των αντίστοιχων φίλτρων RSR (στάδιο II) και τέλος η μετατροπή τους σε δείκτες βλάστησης (στάδιο III).

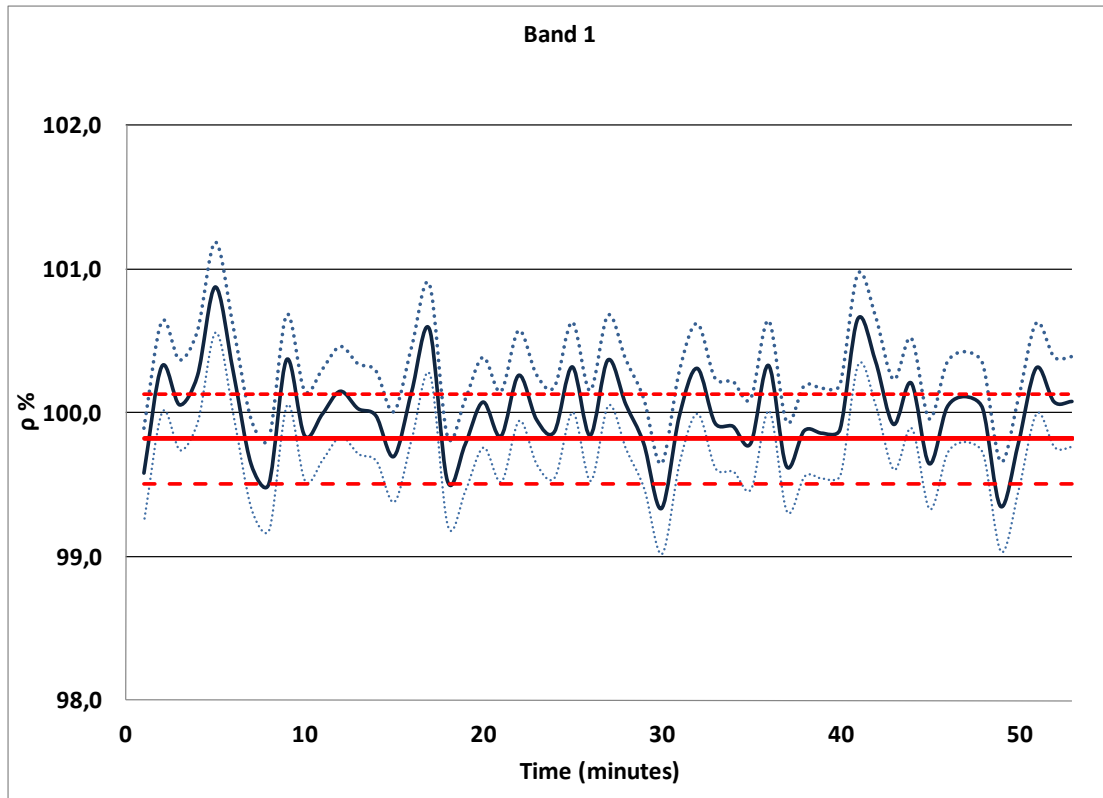
4.1.4. Έλεγχος φασματοραδιομέτρου

Για σκοπούς ελέγχου της υπόθεσης των Milton *et al.* (2009) όσον αφορά το μέγιστο χρονικό διάστημα που δύναται να μεσολαβεί μεταξύ της μέτρησης στο στόχο αναφοράς και στο αντικείμενο, πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων σε ελεγχόμενο πεδίο, στον υπαίθριο χώρο του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου (Εικόνα 27). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο φασματοραδιόμετρα τύπου GER 1500 για το σκοπό αυτό (Agariou *et al.*, 2012a) στις 22 Νοεμβρίου 2011. Οι μετρήσεις λήφθηκαν ακολουθώντας την πιο κάτω διαδικασία για το κάθε όργανο: συνολικά έγιναν εξήντα (60) ζεύγη μετρήσεων στο στόχο αναφοράς και στην επιφάνεια του αντικειμένου, εναλλάξ, με χρονική απόσταση ενός λεπτού, του ενός ζεύγους από το άλλο από τις 11:30 – 12:30 τοπική ώρα. Το ένα όργανο έχει καταγράψει ως στόχο στην επιφάνεια αναφοράς (spectralone panel) (περίπτωση Α) ενώ το άλλο όργανο στόχευε μια επιφάνεια από σκυρόδεμα με σχεδόν ομοιόμορφη κάλυψη (περίπτωση Β).

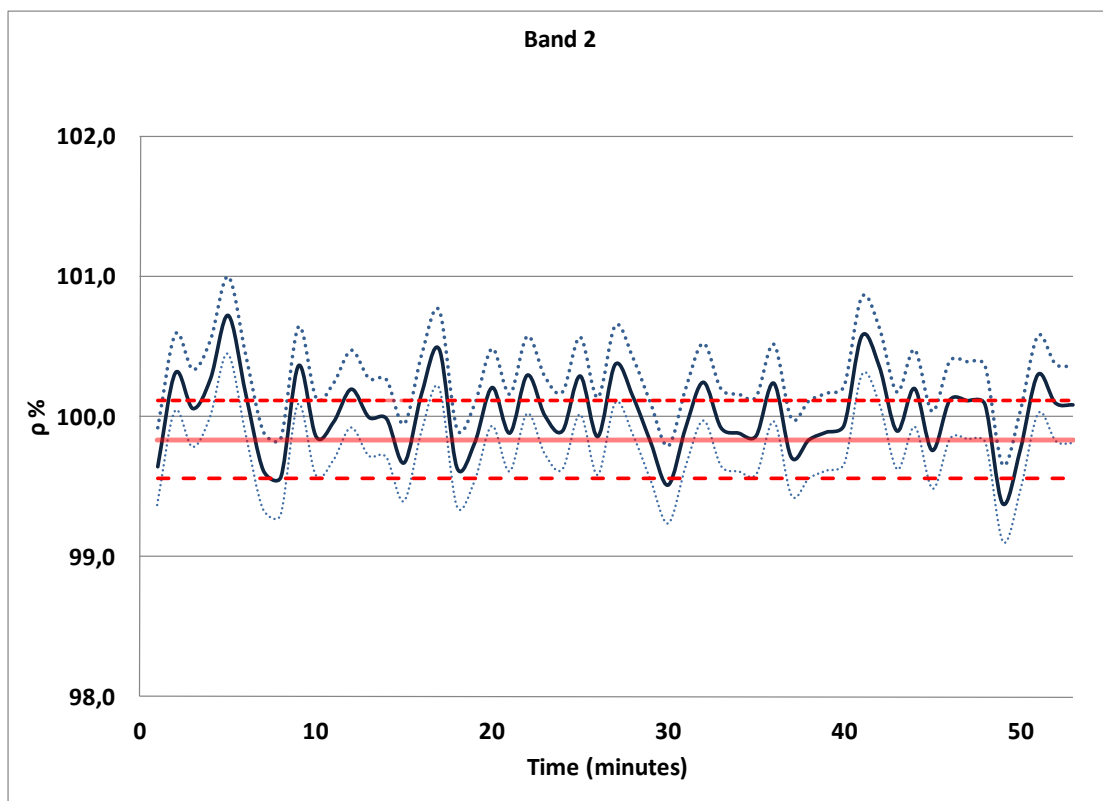


Εικόνα 27: Φωτογραφίες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

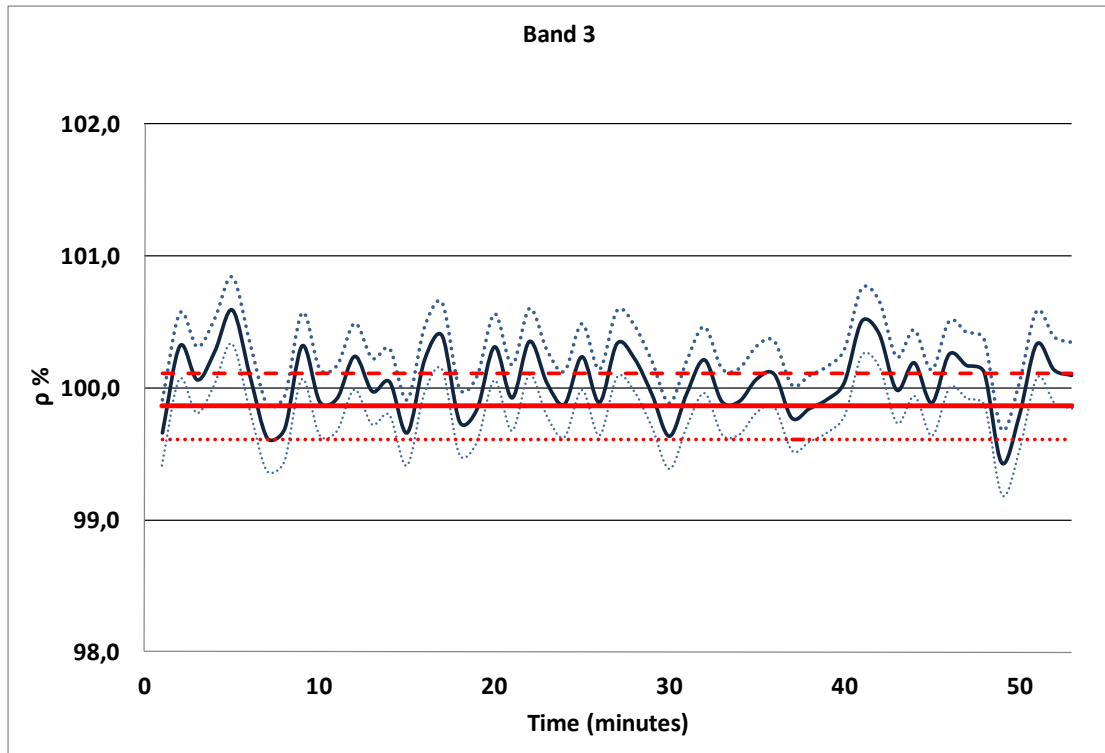
Στη συνέχεια έγινε μετατροπή των υπερφασματικών μετρήσεων σε πολυφασματικές με βάση τα χαρακτηριστικά (RSR filters) του δορυφόρου Landsat 5 TM. Τα αποτελέσματα της διακύμανσης των τιμών ακτινοβολίας για τους δύο στόχους παρουσιάζονται στη συνέχεια ανά κανάλι (Εικόνα 28-Εικόνα 35). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την περίπτωση Α η διακύμανση ήταν μικρότερη από 0,35%, ενώ για την περίπτωση Β η διακύμανση της ακτινοβολίας ήταν λιγότερη από 1%. Αυτό είναι αναμενόμενο από τη στιγμή που η επιφάνεια του στόχου δεν ήταν ομοιόμορφη.



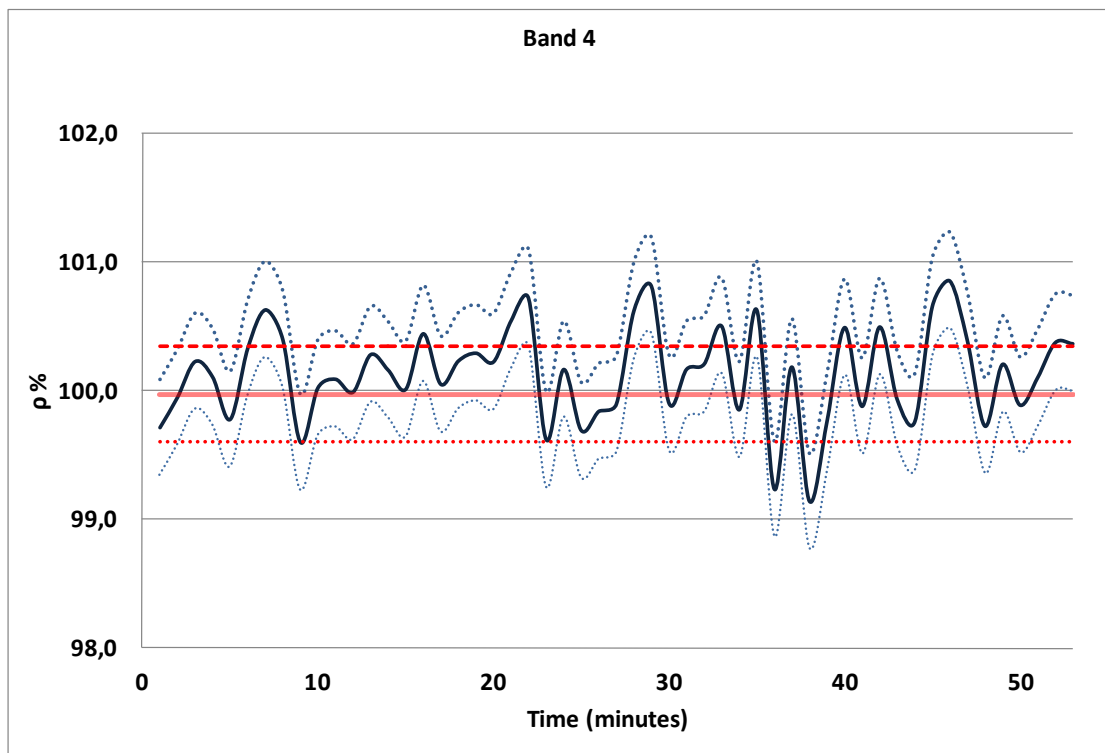
Εικόνα 28: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).



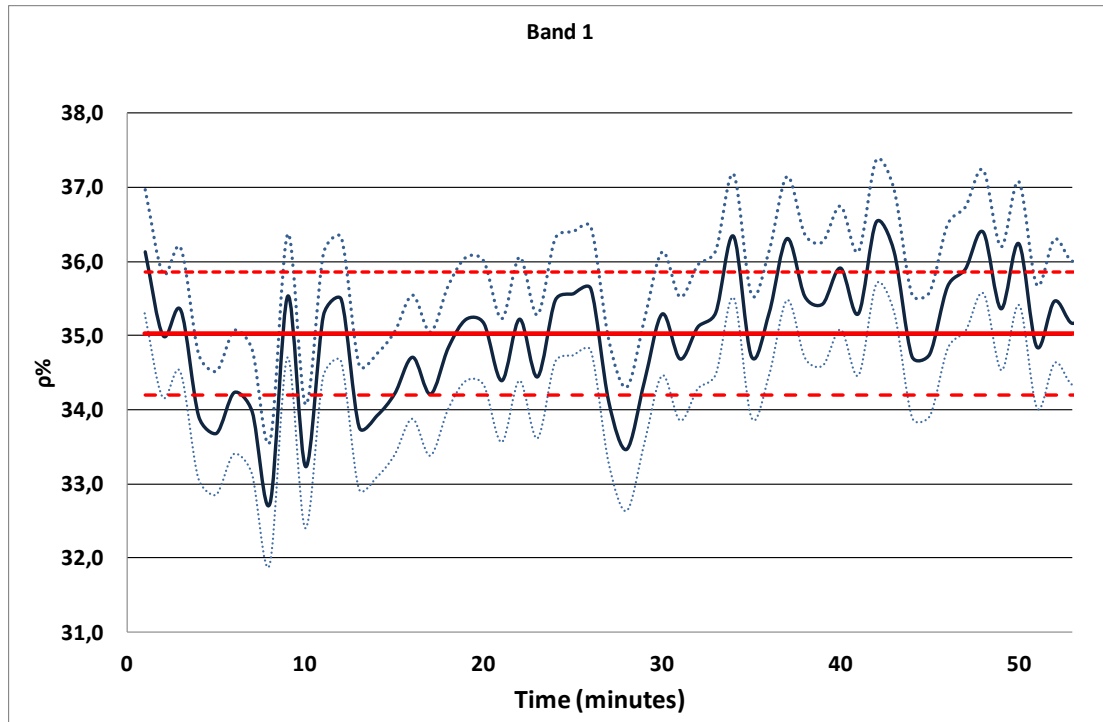
Εικόνα 29: Μεταβολή ανακλαστικότητας για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).



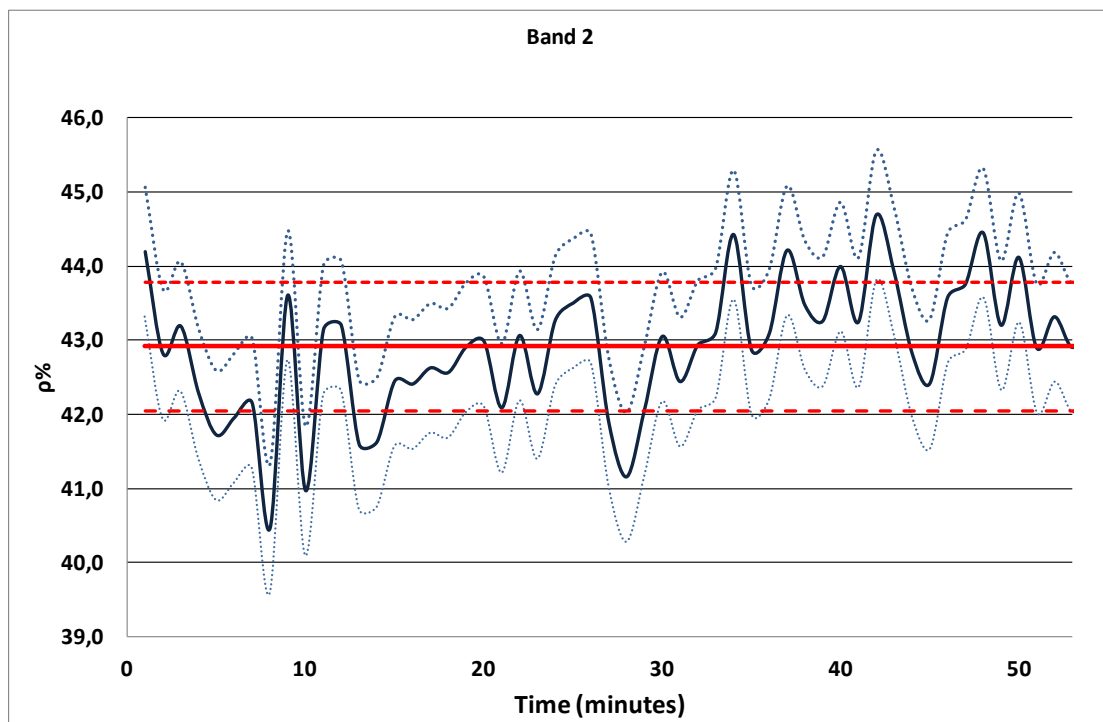
Εικόνα 30: Μεταβολή ανακλαστικότητα για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).



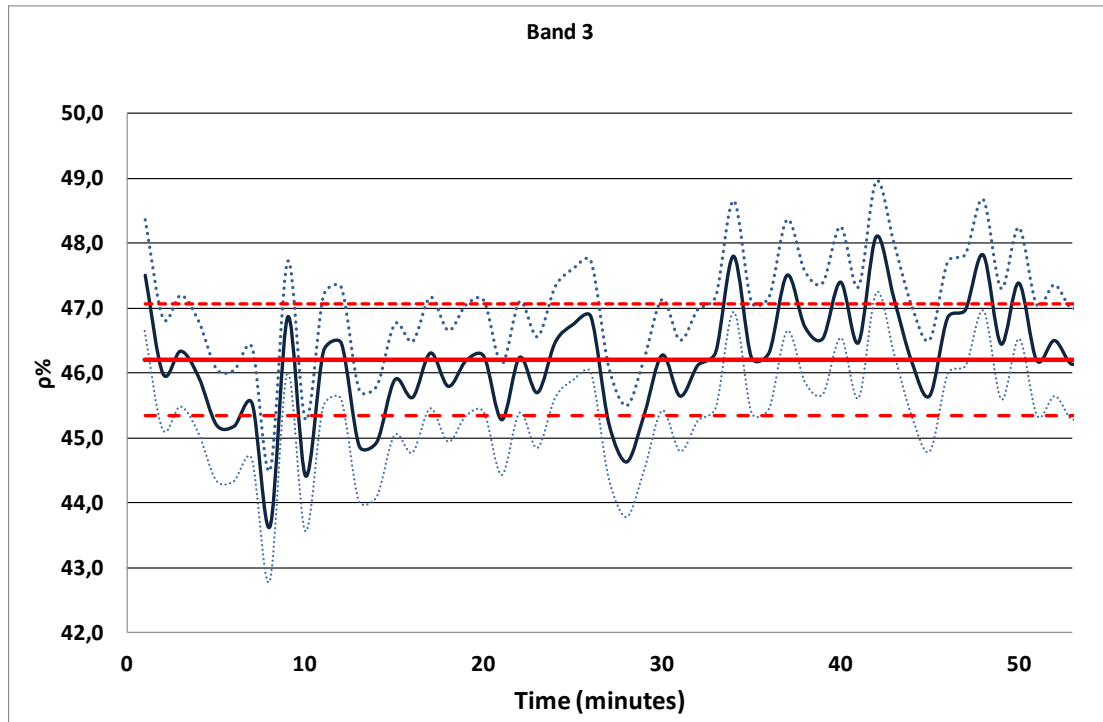
Εικόνα 31: Μεταβολή ανακλαστικότητα για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Α).



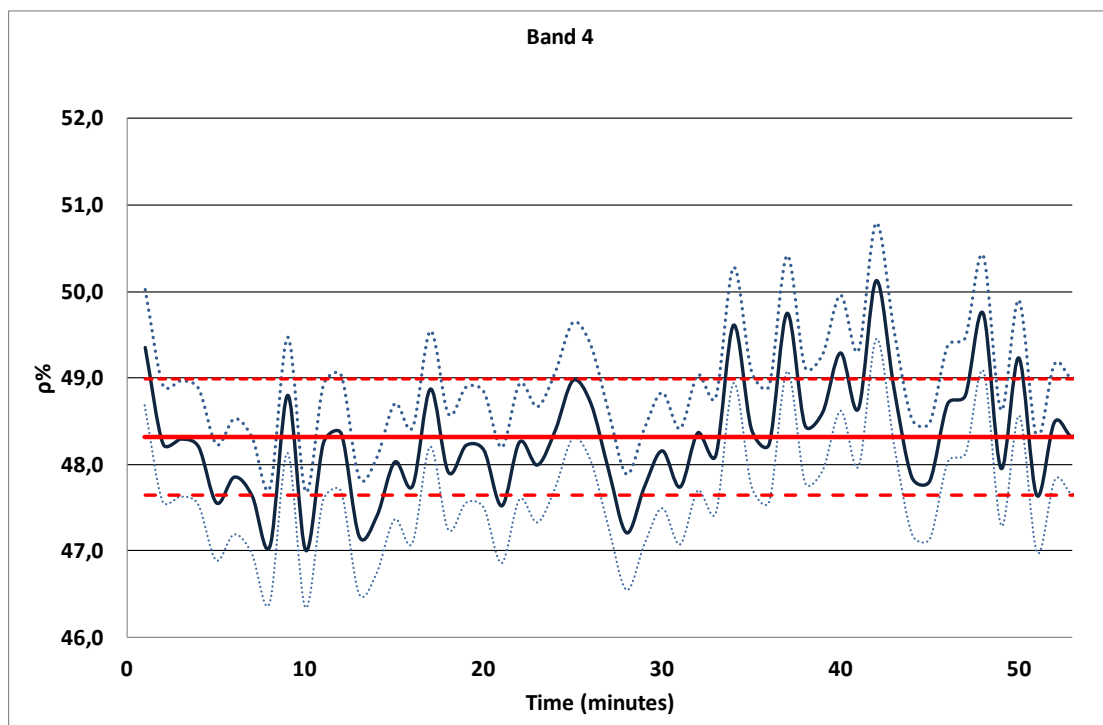
Εικόνα 32: Μεταβολή ανακλαστικότητα για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β).



Εικόνα 33: Μεταβολή ανακλαστικότητα για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β).



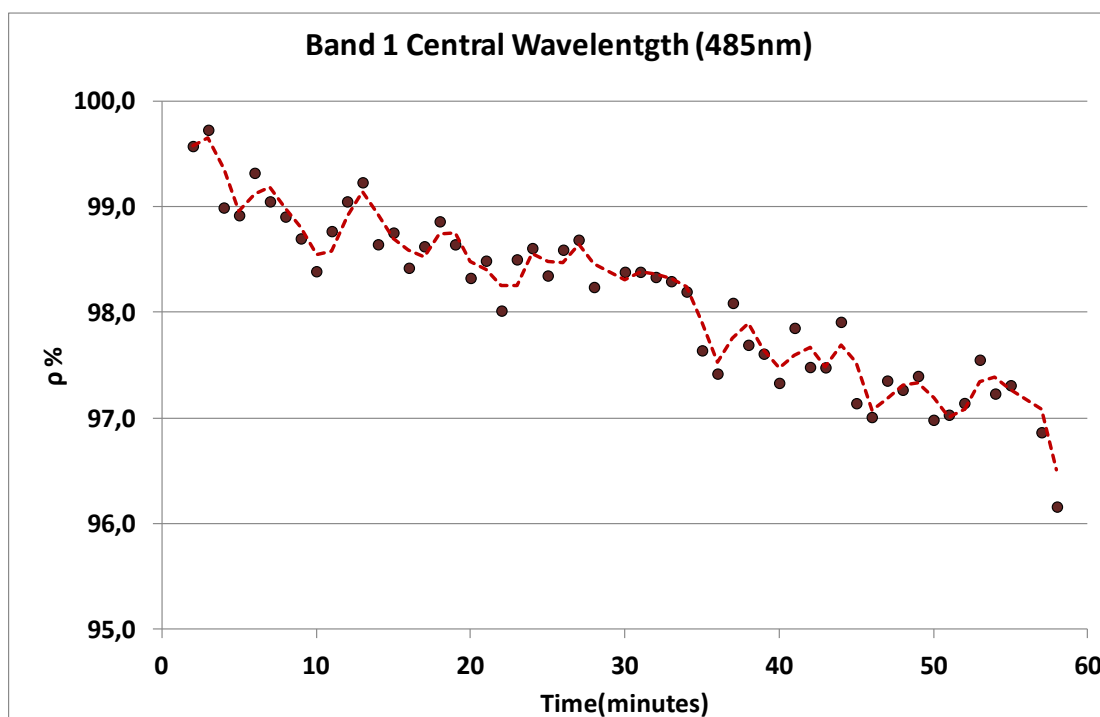
Εικόνα 34: Μεταβολή ανακλαστικότητα για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β).



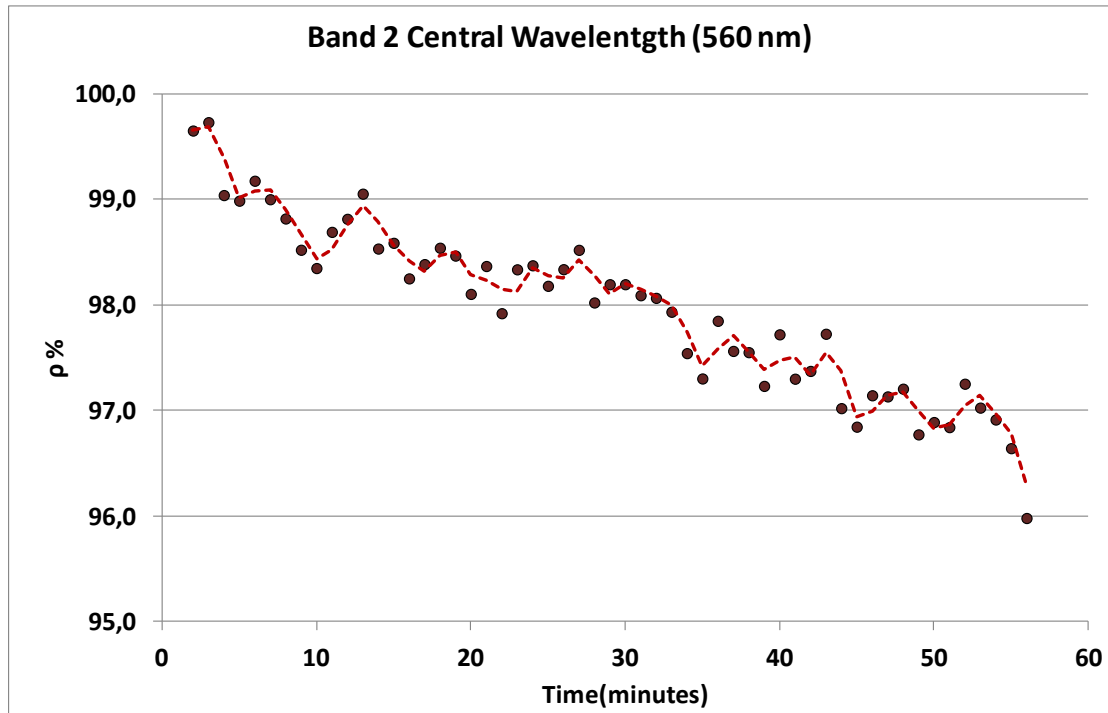
Εικόνα 35: Μεταβολή ανακλαστικότητα για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) από τις 11:30 μέχρι της 12:30 (Περίπτωση Β).

Στην Εικόνα 40- Εικόνα 43 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας στις μετρήσεις ανακλαστικότητας για το χρονικό διάστημα 1 ώρας (11:30 – 12:30). Για το σκοπό αυτό έχει υπολογισθεί η ανακλαστικότητα όλων των μετρήσεων με βάση την πρώτη μέτρηση αναφοράς (η ώρα 11:30). Αυτό έγινε για να εξεταστεί κατά πόσο επιδρά ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των παρατηρήσεων στόχου – spectralon panel στην μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας.

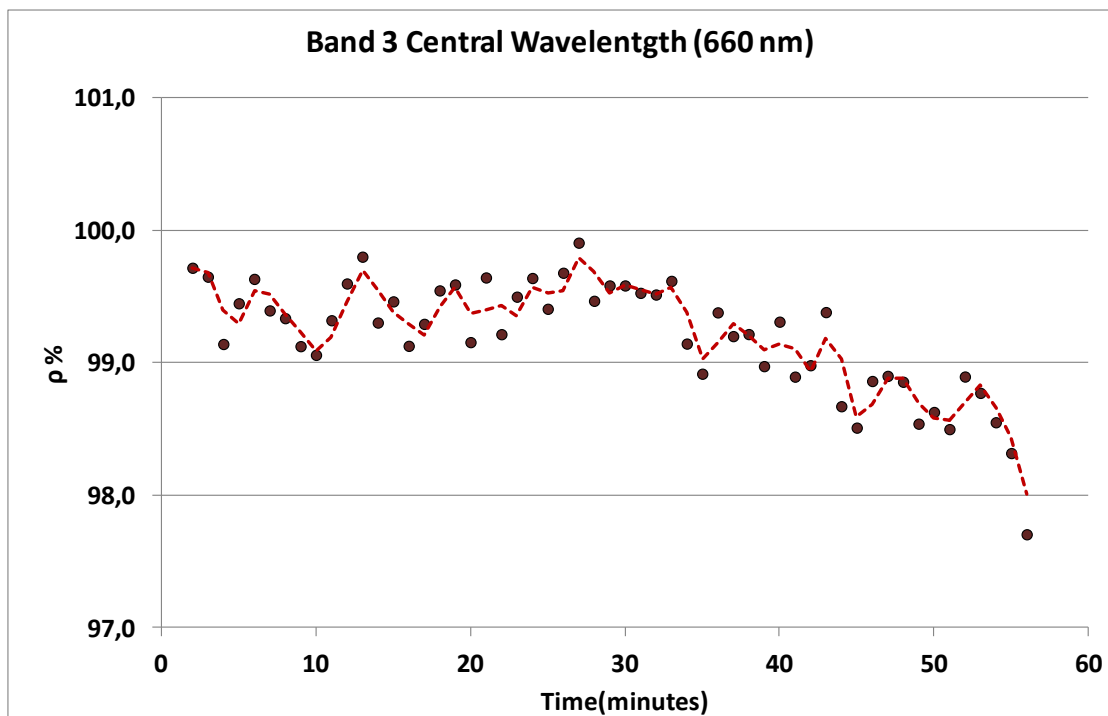
Οι παρατηρήσεις, στην περίπτωση Α δείχνουν μια αναμενόμενη βαθμιαία μείωση της ακτινοβολίας για το ορατό φάσμα (Κανάλια 1-3) μέχρι και 4%. Στο εγγύς υπέρυθρο η μεταβολή δεν είναι σταθερή και παρατηρείται μια αυξομείωση της ακτινοβολίας αυτή είναι της τάξης των $\pm 2\%$. Στην περίπτωση Β οι μετρήσεις δεν ακολουθούν ένα συγκεκριμένο πρότυπο και δείχνουν μια διασπορά αν και αυτές στην πλειονότητα τους δεν φαίνεται να ξεπερνούν το 1.5% για όλα τα κανάλια.



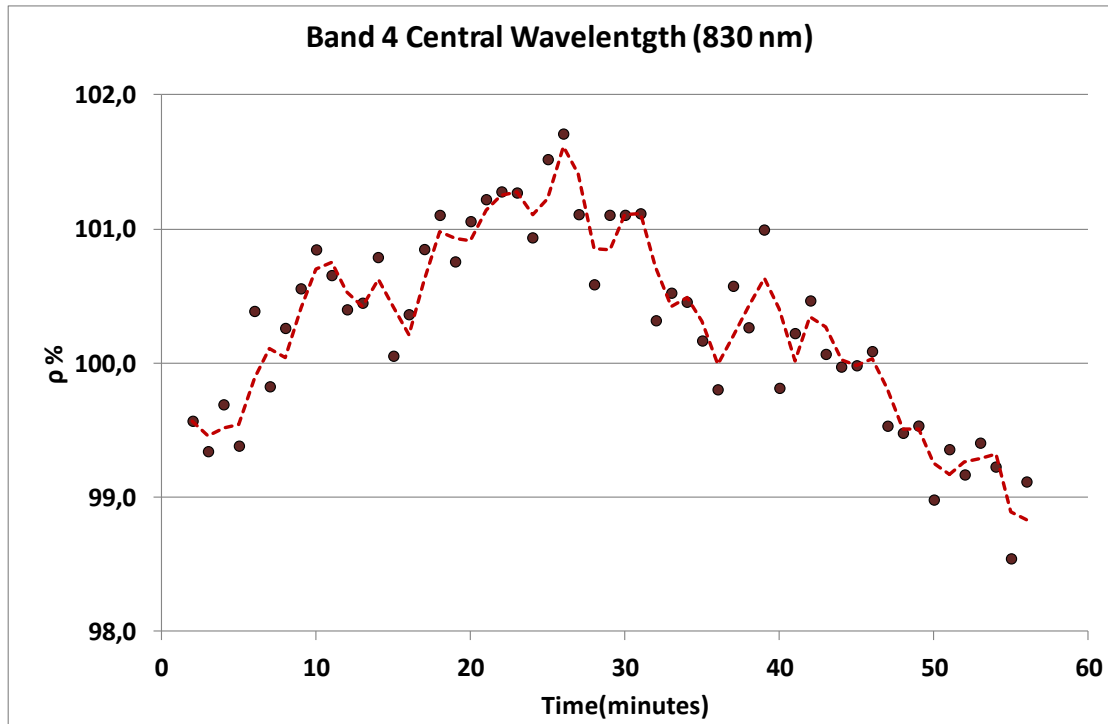
Εικόνα 36: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α)



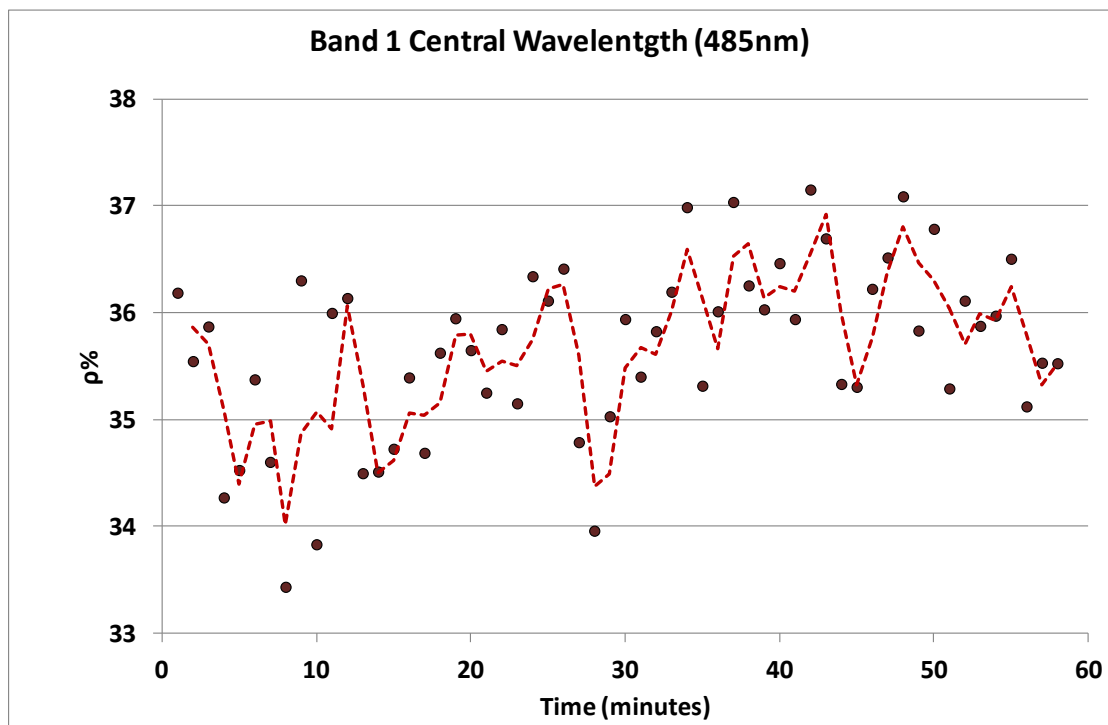
Εικόνα 37: Μεταβολή ανακλαστικότητα του στόχου για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α)



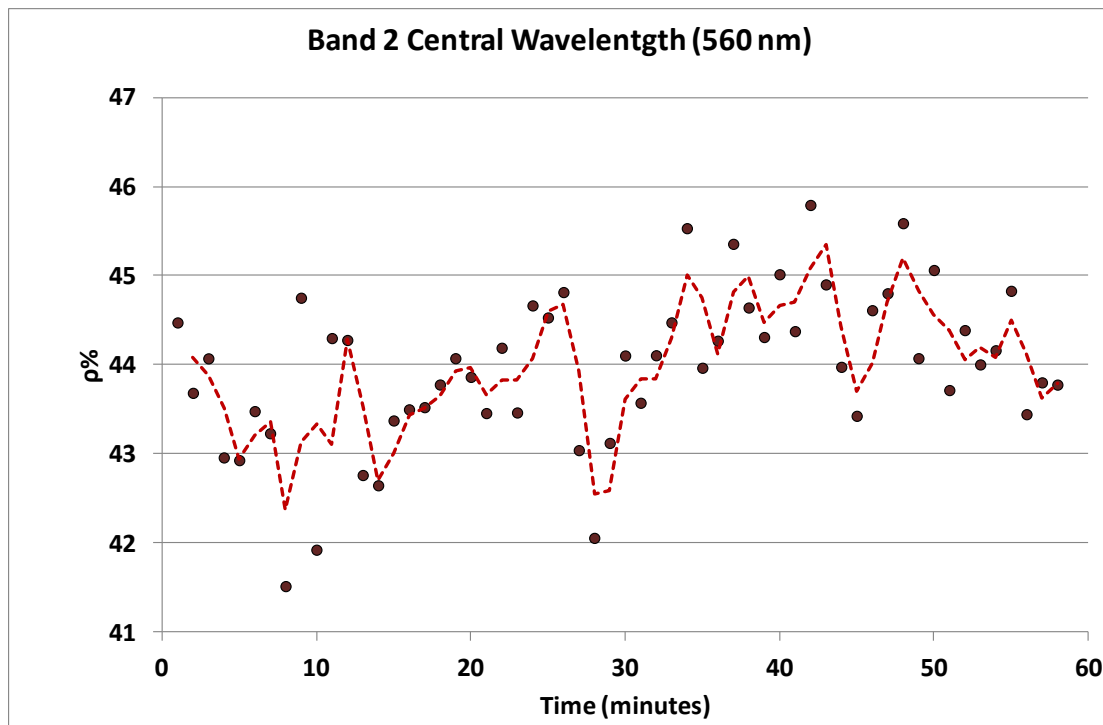
Εικόνα 38: Μεταβολή ανακλαστικότητα του στόχου για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α)



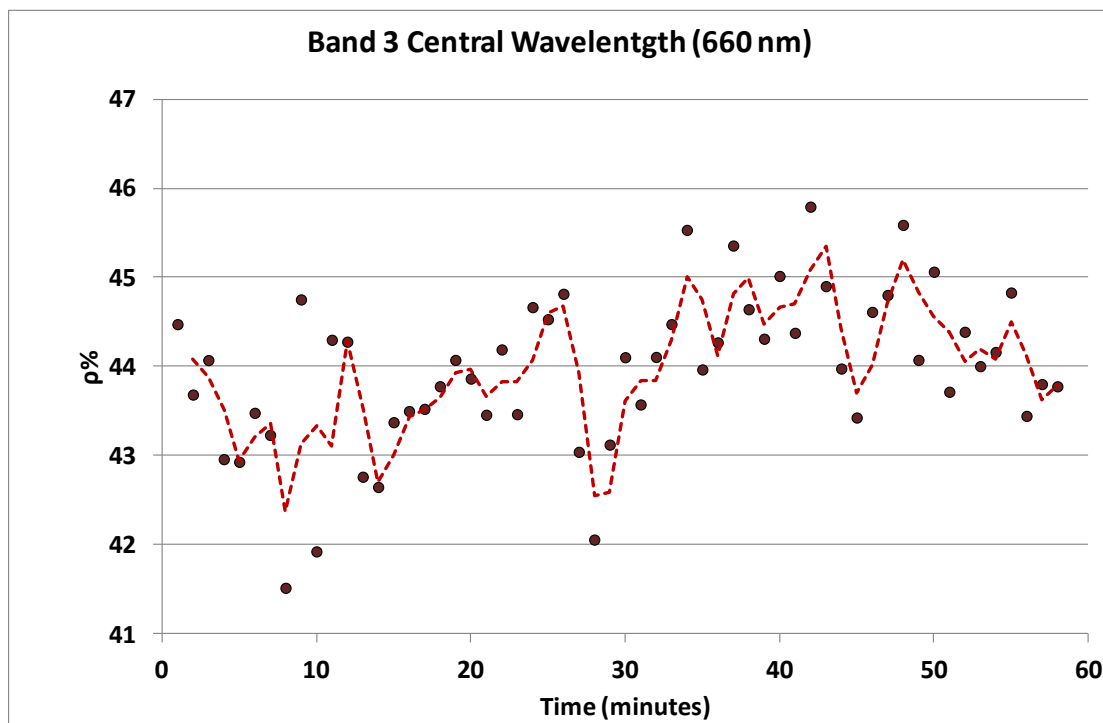
Εικόνα 39: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Α)



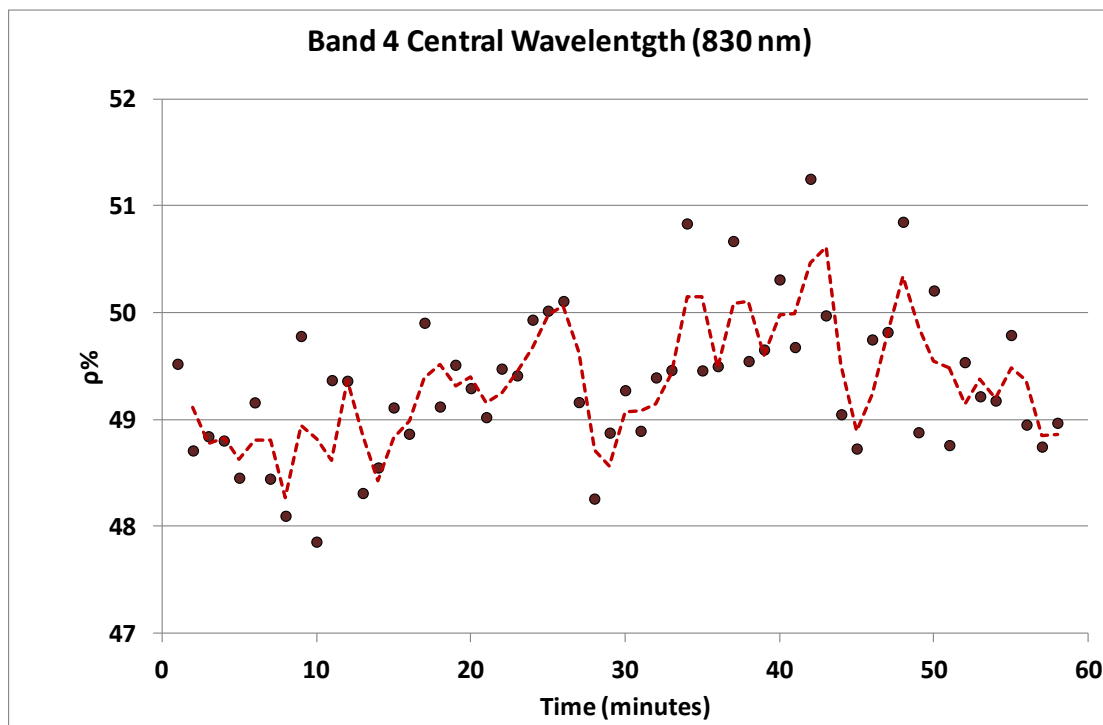
Εικόνα 40: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 1 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β)



Εικόνα 41: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 2 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β)

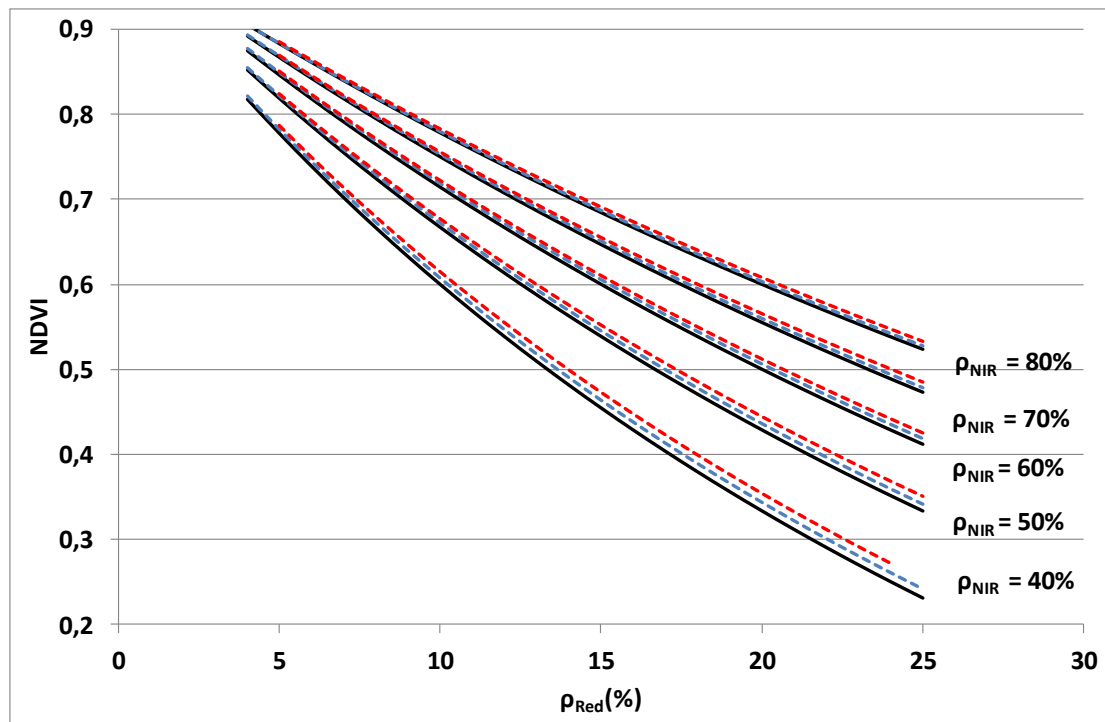


Εικόνα 42: Μεταβολή ανακλαστικότητας του στόχου για το Κανάλι 3 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β)



Εικόνα 43: Μεταβολή ανακλαστικότητα του στόχου για το Κανάλι 4 (Landsat 5 TM) λαμβάνοντας υπόψη την πρώτη μέτρηση στο panel (11:30) ως μέτρηση αναφοράς για όλα τα ζεύγη μετρήσεων (μέχρι της 12:30) (Περίπτωση Β)

Συνοψίζοντας, το αποτέλεσμα δίνει την ένδειξη ότι, συχνές λήψεις μέτρησης στην επιφάνεια αναφοράς (< από 3 λεπτά) δίνουν μικρές αποκλίσεις στην μέτρηση της ανακλαστικότητας ενός στόχου. Αυτός ο χρόνος δύναται να αυξηθεί σε περιπτώσεις όπου γίνονται μετρήσεις στο panel πριν και μετά τις μετρήσεις στόχων. Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα η Εικόνα 44 δείχνει την επίδραση που θα έχει ο δείκτης βλάστησης NDVI σε ομοιόμορφες αλλαγές +1% και +2% της ακτινοβολίας στο κόκκινο και στο εγγύς υπέρυθρο. Η επίδραση αυτή είναι πολύ μικρή στις περισσότερες περιπτώσεις (< 0.5% του NDVI) ενώ η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί, πλησιάζει το 2%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση της αλλαγής της ακτινοβολίας είναι σχεδόν αμελητέα, όταν το φυτό αρχίζει να αναπτύσσεται. Σε αυτή τη χρονική περίοδο η ανακλαστικότητα του φυτού χαρακτηρίζεται με μεγάλες τιμές στο εγγύς υπέρυθρο και χαμηλές τιμές στο κόκκινο φάσμα.



Εικόνα 44: Επίδραση αλλαγής ακτινοβολίας στο δείκτη βλάστησης NDVI. Με μαύρη γραμμή αναφέρονται οι τιμές NDVI χωρίς κάποιο σφάλμα. Με μπλε διακεκομμένη γραμμή σημειώνονται οι νέες τιμές που θα πάρει ο δείκτης NDVI αν θεωρήσουμε μια αύξηση της ανακλαστικότητα 1% τόσο στο κόκκινο όσο και στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Ομοίως με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή η αλλαγή του δείκτη με 2% αύξηση

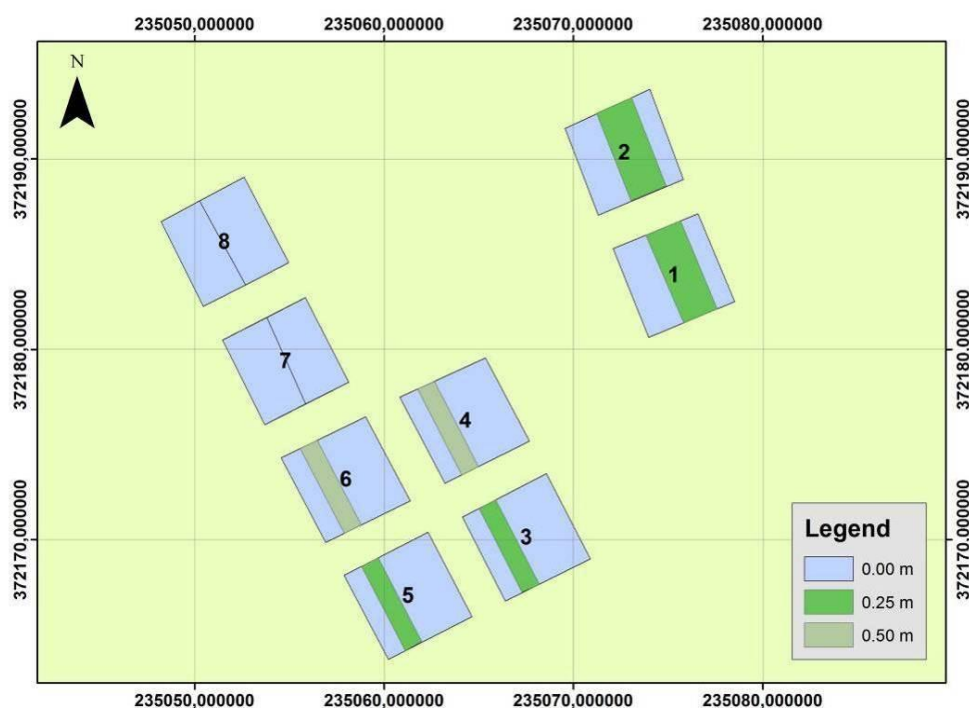
4.2. Πεδία Ελέγχου

4.2.1. Περιοχή Αλάμπρας

Το ελεγχόμενο πεδίο στην περιοχή Αλάμπρας (βλ. Αγαρίου *et al.*, 2011a), έχει διαχωριστεί σε διάφορες υπο-περιοχές, οι οποίες προσομοιάζουν αρχιτεκτονικά κατάλοιπα θαμμένα στο έδαφος μέχρι και 0.5 μέτρο και τάφους σε βάθος 0.25 μέτρα κάτω από το επιφανειακό έδαφος, δηλαδή σε βάθη που κατά κανόνα ευρίσκονται τα υπεδάφια κατάλοιπα στην Κύπρο. Συγκεκριμένα έχουν υλοποιηθεί οκτώ τετράγωνα διαστάσεων 5 x 5 μέτρων. Το κάθε τετράγωνο διαχωρίζεται από το επόμενο με μια απόσταση 2 μέτρα για περιμετρική πρόσβαση του τετραγώνου. Η χρήση τοπικού λίθου για οικοδόμηση αποτελεί συνηθισμένο φαινόμενο και εντοπίζεται σε διάφορους αρχαιολογικούς χώρους στην Κύπρο, όπως είναι για παράδειγμα ο αρχαιολογικός χώρος στην Κάτω Πάφο, ο αρχαιολογικός χώρος της Αμαθούντας, του Κουρίου κ.ά.. Η χρήση εισηγμένου λίθου ή λίθου από άλλη περιοχή της Κύπρου αποτελεί την

εξαίρεση στον κανόνα. Σημειώνεται ότι στην περιοχή Αλάμπρας βρίσκεται και η ομώνυμη αρχαιολογική θέση της Μέσης Κυπριακής περιόδου.

Για την υλοποίηση του πεδίου προηγήθηκαν κάποιες προκαταρκτικές εργασίες, όπως για παράδειγμα, η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής, η χάραξη των τετραγώνων, η συλλογή τοπικού λίθου κ.ά. Ο τοπικός λίθος που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο ελέγχου συγκεντρώθηκε από την ευρύτερη περιοχή της Αλάμπρας. Αφού έγινε η επιλογή του χώρου, ακολούθησε η χάραξη των τετραγώνων, έτσι ώστε να ακολουθήσει σε μεταγενέστερο χρόνο η υλοποίηση του πεδίου με τη χρήση εκσκαφένων. Η χάραξη των τετραγώνων έγινε με τοπομετρικές μετρήσεις με τη χρήση μετροταινίας.



Εικόνα 45: Γενικό διάγραμμα πεδίου ελέγχου

Το γενικό διάγραμμα του πεδίου ελέγχου φαίνεται στην Εικόνα 45. Ανατολικά έχουν δημιουργηθεί δύο τετράγωνα τα οποία προσομοιάζουν με τάφους (Τετράγωνα 1 και 2, Εικόνα 45). Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα τεχνητό κούφωμα διαστάσεων 2x5 μέτρα στο οποίο εγκλωβίστηκε αέρας. Δυτικά έχουν δημιουργηθεί τέσσερα τετράγωνα τα οποία προσομοιάζουν θαμμένα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα –διαστάσεων 1x5 μέτρα- σε βάθος 0.25 (Τετράγωνα 3 και 5, Εικόνα 45) και 0.50 μέτρα (Τετράγωνα 4 και 6, Εικόνα 45). Τέλος, τα υπόλοιπα δύο τετράγωνα (Τετράγωνα 7 και 8, Εικόνα 45) έχουν παραμείνει φυσικά, δηλαδή χωρίς οποιαδήποτε τεχνητή αλλοίωση. Στην Εικόνα 46 παρουσιάζονται φωτογραφίες από τη διαδικασία υλοποίησής του πεδίου ελέγχου. Κατά τη διαδικασία εναπόθεσης του χώματος από

τον εκσκαφέα δόθηκε προσοχή έτσι ώστε η στρωματογραφία του εδάφους να μην διαταραχθεί και να τοποθετηθεί όπως ήταν πριν την εκσκαφή.





η

Εικόνα 46: Φωτογραφίες από την υλοποίηση του πεδίου ελέγχου. Φωτογραφίες από την εκσκαφή αρχαιολογικού τετραγώνου σε βάθος 25 cm (α-γ). Υλοποίηση τετραγώνου για προσομοίωση τάφου (δ) και αρχαιολογικών καταλοίπων (ε-ζ). Τοποθέτηση χώματος πίσω στα τετράγωνα (η).

Στο ανατολικό τμήμα του πεδίου ελέγχου έγινε η υλοποίηση των “τάφων” σε βάθος 0.25 μέτρα κάτω από το επιφανειακό έδαφος και πλάτους 2 μέτρα. Το βάθος εκσκαφής πλησίασε τα 50-60 εκατοστά και ακολούθως τοποθετήθηκαν πλαστικά κουτιά και πάνω σε αυτά ξύλινες πλάκες έτσι ώστε να καλύψουν όλο το άνοιγμα. Η χρήση πλαστικών κουτιών έγινε για να μην αλλοιωθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας αφού δεν διασπώνται εύκολα στο χώμα (αποσύνθεση). Πάνω από τις πλάκες τοποθετήθηκε χώμα. Στο δυτικό τμήμα του πεδίου ελέγχου έγινε η υλοποίηση των αρχιτεκτονικών καταλοίπων σε βάθος 25 και 50 εκατοστών και πλάτους 1μέτρου. Στα τετράγωνα 3-6 τοποθετήθηκε τοπική λίθος σε όλη την έκταση της εκσκαφής. Ακολούθως η εκσκαφή ξαναγέμισε με χώμα (Εικόνα 47).



Εικόνα 47: Πεδίο ελέγχου μετά την υλοποίηση του

Ακολούθησε η σπορά των τετραγώνων σύμφωνα με τις παραδοσιακές μεθόδους και πρακτικές που εφαρμόζονται στην περιοχή. Την πρώτη περίοδο (2010 - 2011), έγινε σπορά κριθαριού στα τετράγωνα 1,3,4,8 ενώ στα τετράγωνα 2,5,6 και 7 έγινε σπορά σιταριού, ενώ τη δεύτερη περίοδο (2011-2012) έγινε σπορά κριθαριού σε όλα τα τετράγωνα. Φωτογραφίες από τη διαδικασία σποράς των τετραγώνων παρουσιάζεται στην Εικόνα 48.



Εικόνα 48: Φωτογραφίες από τη σπορά του πεδίου ελέγχου Αλάμπρας.

Το πεδίο ελέγχου αφού υλοποιήθηκε, αποτυπώθηκε με τη χρήση δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού και πλοήγησης – GPS. Αυτό κρίθηκε σκόπιμο αφού το πεδίο ελέγχου δύναται να χρησιμοποιηθεί και μελλοντικά. Τα χαρακτηριστικά σημεία των τετραγώνων και των σημείων εκσκαφής καταγράφηκαν στο τοπικό σύστημα αναφοράς της Κύπρου (ΚΓΣΑ '93). Παράλληλα δημιουργήθηκε και ένα τοπικό τοπογραφικό δίκτυο με δύο σημεία με γνωστές συντεταγμένες (Εικόνα 49).



Εικόνα 49: Αποτύπωση πεδίου με τη χρήση GPS.

4.2.2. Περιοχή Αχέλειας

Σε αγροτική έκταση της περιοχής Αχέλειας δημιουργήθηκε την περίοδο 2011-2012 ένα νέο ελεγχόμενο πεδίο. Ο σκοπός υλοποίησης του νέου πεδίου ήταν να διεξαχθούν μετρήσεις σε ένα διαφορετικό κλιματολογικό περιβάλλον αλλά παράλληλα να αξιοποιηθούν δορυφορικά δεδομένα –αρχαικό υλικό αλλά και νέες προγραμματισμένες λήψεις- τα οποία ήταν διαθέσιμα στην περιοχή. Στην περιοχή αυτή υλοποιήθηκε ένα τετράγωνο διαστάσεων 3x3 μέτρων στο οποίο τοποθετήθηκε τοπική λίθος (Εικόνα 50). Η διαδικασία υλοποίησης έγινε με παρόμοιο τρόπο με το αντίστοιχο πεδίο της Αλάμπρας: αρχικά έγινε η επιλογή του χώρου και η σήμανσή του, ενώ μετά, εκσκαφέας δημιούργησε ένα όρυγμα βάθους 50-60 εκατοστών. Το όρυγμα αυτό γέμισε με τοπική λίθο της περιοχής μέχρι και σε βάθος 25-30 εκατοστών. Ακολούθως το όρυγμα σκεπάστηκε με χώμα και μετά καλλιεργήθηκε μαζί με τη γύρω περιοχή.



Εικόνα 50: Φωτογραφίες από την υλοποίηση του πεδίου ελέγχου στην περιοχή Αχέλειας.

4.2.3. Επιλογή βλάστησης στα ελεγχόμενα πεδία

Η επιλογή της βλάστησης στα ελεγχόμενα πεδία ήταν ιδιαίτερα σημαντική, αφού αυτή αποτελούσε το “μέσο” ανίχνευσης των υπεδάφινων καταλοίπων με τη χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης.

Είναι γενικά αποδεκτό, ότι μπορεί να εμφανιστούν διαφοροποιήσεις της βλάστησης σε περιοχές όπου σε μικρό βάθος, κάτω από το επιφανειακό έδαφος, υπάρχουν αρχιτεκτονικά κατάλοιπα. Αυτά τα κατάλοιπα έχουν ως αποτέλεσμα να διατηρούν ένα διαφορετικό επίπεδο υγρασίας του εδάφους σε σχέση με τον περίγυρό του. Έτσι, όταν το φυτό αρχίζει να αναπτύσσεται πάνω από τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα, τότε η διαφοροποίηση της βλάστησης είναι εμφανής και ιδιαίτερα σε περιόδους όπου υπάρχει έλλειψη νερού (Winton και Horne, 2010). Αυτό το φαινόμενο μπορεί να ανιχνευτεί είτε από ψηλά με τη χρήση αεροφωτογραφιών ή δορυφόρων, είτε ακόμη και από λήψεις σε χαμηλό ύψος ή επίγεια με τη χρήση φασματοραδιομέτρων (Lasaponara και Masini, 2007; Jonson 2006 ; Sharp 2004; Stanjek και Fabinder, 1995; Agariou και Hadjimitsis, 2011).

Ο Jonson (2006) αναφέρει ότι τέτοιες βλαστικές διαφοροποιήσεις έχουν παρατηρηθεί σε δημητριακά όπως είναι το κριθάρι, το σιτάρι, η βρώμη και η σίκαλη (Allen 1984, Jones 1979, Riley 1987). Αυτά τα φυτά λόγω ανομοιογένειας στην εδαφική υγρασία μπορεί να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό υπεδάφινων καταλοίπων, ανιχνεύοντας διαφοροποιήσεις του φυτού (ανάπτυξη του φυτού, χρώμα, ύψος, ωρίμανση κ.ά.) (Riley 1987). Ο Allen (1984) αναφέρει ότι και περιοχές με γρασίδι έχουν δείξει

παρόμοιες διαφοροποιήσεις, αλλά επειδή είναι πιο ευαίσθητο στην υγρασία και κατ' επέκταση και στις κλιματολογικές συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνείες των αποτελεσμάτων από τους ερευνητές. Σε αυτό το συμπέρασμα είχε καταλήξει και νωρίτερα ο Riley (1979) ο οποίος αναφέρει ότι, το γρασίδι δεν προσφέρεται για αρχαιολογικές έρευνες με αυτές τις μεθόδους. Άλλες φυτείες οι οποίες κατά καιρούς έχουν συμβάλει στην ανίχνευση αρχιτεκτονικών καταλοίπων είναι και τα κονδυλοειδή, όπως είναι οι πατάτες, τα ραπανάκια και τα ζαχαρότευτλα (παντζάρια), αλλά οι δυνατότητές τους ποικίλλουν (Jonson 2006). Όπως σχολιάζει η Sharpe (2004) η ανίχνευση διαφοροποιήσεων βλάστησης λόγω αρχαιολογικών καταλοίπων, εντοπίζεται πολύ συχνά σε εκτάσεις με σιτηρά και ιδιαίτερα σε εκτάσεις από κριθάρι. Έχει επανειλημμένως αναφερθεί και αλλού στη βιβλιογραφία, ότι η καλλιέργεια αυτή προσφέρεται για την ανίχνευση υπεδάφιων καταλοίπων (π.χ. Hejzman και Smrz, 2010; Alexakis et al 2009). Ο εντοπισμός υπεδάφιων καταλοίπων μάλιστα θεωρείται ιδανικός σε θερμές και ξηρές μέρες, όταν η εδαφική υγρασία είναι μειωμένη, δηλαδή η διαπνοή του φυτού δε γίνεται κανονικά.

Παρόλα αυτά όμως οι λόγοι που εντοπίζονται διαφοροποιήσεις της βλάστησης με μεγαλύτερη συχνότητα σε μια καλλιέργεια έναντι μιας άλλης, δε φαίνεται να αποτέλεσε ποτέ πεδίο επιστημονικής συζήτησης. Ένας βασικός λόγος που αποτρέπει ίσως αυτήν την έρευνα, είναι η πολυπλοκότητα του φαινομένου. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής, δηλαδή η ποσοτική εκτίμηση του νερού που απαιτείται σε μια καλλιέργεια μπορεί να γίνει με τη χρήση σύνθετων ενεργειακών ισοζυγίων (FAO 1998; Παπαζαφειρίου 1999) ή ακόμη και με τη χρήση τεχνικών Τηλεπισκόπησης (Papadavid *et al.*, 2009b; 2011b). Παρόλα αυτά η ποσοτικοποίηση της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το είδος του φυτού, η ανακλαστικότητα της καλλιέργειας, το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από την καλλιέργεια, το ύψος της καλλιέργειας, το βάθος του ριζικού συστήματος, το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και φυσικά οι κλιματολογικοί παράγοντες (Παπαζαφειρίου 1999).

Σε αυτό το συμπέρασμα έχουν καταλήξει και άλλες σύγχρονες μελέτες οι οποίες τονίζουν την πολυπλοκότητα του φαινομένου (Mills και Palmer 2007, Winton και Horne, 2010). Οι Adqus *et al.* (2007) και Jonson (2006), αναφέρουν στις μελέτες τους ότι η εμφάνιση της διαφοροποίησης μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες και

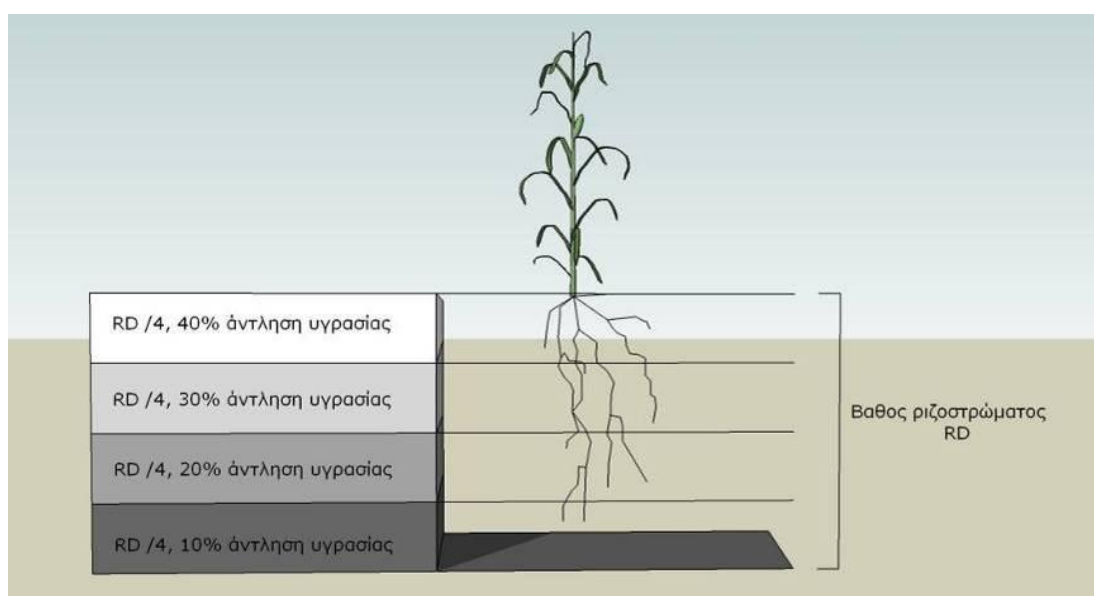
διαφορετικές παραμέτρους, όπως είναι η υγρασία, τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους, ο τύπος του εδάφους, το βάθος του, οι κλιματικές συνθήκες κ.τ.λ. Είναι λοιπόν φανερό με βάση τα πιο πάνω, ότι αν κάτι ισχύει για μια περιοχή, μπορεί να μην εφαρμόζεται σε μια άλλη που δεν έχει παρόμοια χαρακτηριστικά ή ακόμη να μην μπορεί να εφαρμοστεί στην ίδια περιοχή σε άλλη χρονική περίοδο (π.χ. αλλαγή καλλιέργειας, άλλες κλιματολογικές συνθήκες κ.τ.λ.). Εντούτοις θεωρώντας ότι η βροχόπτωση και γενικότερα οι κλιματολογικές συνθήκες σε μια περιοχή παραμένουν οι ίδιες (π.χ. μετρήσεις στο ίδιο ή γειτονικό αγροτεμάχιο) και ότι ακολουθείται η ίδια πρακτική σποράς, όπως για παράδειγμα σπορά την ίδια περίοδο, κοινή πρακτική λίπανσης κ.λπ. τότε η διαφοροποίηση της βλάστησης αναμένεται να επηρεαστεί μόνο από τη σύσταση του εδάφους και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης. Στην παρούσα έρευνα επιλέχθηκαν τα σιτηρά (κριθάρι και σιτάρι) με βάση τα πιο κάτω δύο κριτήρια:

(α) Συντελεστής Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index- LAI): Ο δείκτης LAI είναι ο λόγος της επιφάνειας των φύλλων, σε όλο το ύψος του φυτού, ανά μονάδα επιφανείας εδάφους (m^2/m^2). Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο LAI κυμαίνονται από 0 (γυμνό έδαφος) μέχρι 10 (πυκνά δάση). Βλάστηση με ψηλό συντελεστή LAI έχει μεγαλύτερη επιφάνεια για εξάτμιση (transpiration) και επομένως τα φυτά αυτά είναι πιο ευαίσθητα σε συνθήκες ξηρασίας. Επιπλέον, υψηλός συντελεστής LAI, καλύπτει πλήρως το έδαφος (ομοιογένεια) το οποίο είναι απαραίτητο για τη χρήση τηλεπισκοπικών δεκτών που δεν λαμβάνουν υπόψη το θόρυβο του εδάφους (π.χ. NDVI). Γενικά, μια καλλιέργεια θεωρείται ότι καλύπτει πλήρως το έδαφος όταν το δείκτης LAI είναι μεγαλύτερος του 3. Επιπλέον, τα σιτηρά έχουν και μεγάλη πυκνότητα σποράς όπως φαίνεται από την Εικόνα 51.



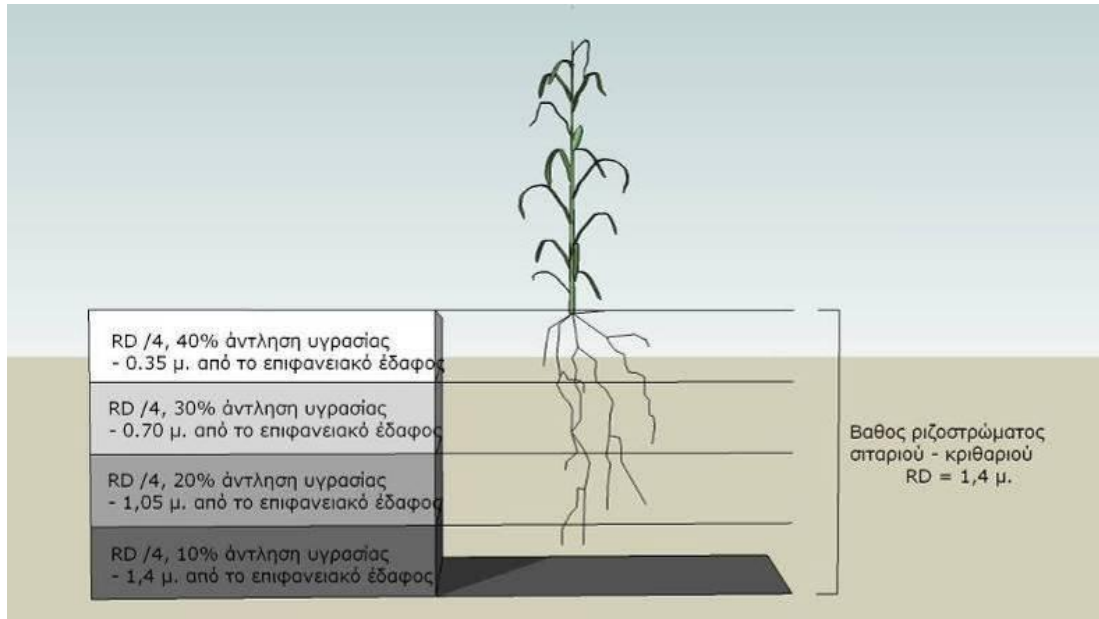
Εικόνα 51: Πυκνότητα σποράς από την περιοχή Αλάμπρας

(β) Υδατοϊκανότητα της βλάστησης: Τα φυτά λαμβάνουν τα διαθέσιμα στοιχεία από το έδαφος και το νερό μέσα από το ριζικό τους σύστημα. Η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος εξαρτάται από την εδαφική υγρασία, καθώς η ανάπτυξη των ριζών περιορίζεται σημαντικά όταν η υγρασία προσεγγίσει το σημείο μόνιμης μάρανσης. Το ριζικό σύστημα των σιτηρών μπορεί να φθάσει από 1,0 μέχρι 1,8 μέτρα βάθος ανάλογα με το είδος του εδάφους (Canadell *et al.*, 1996; Παπαζαφειρίου 1999). Η ικανότητα άντλησης αυτής της εδαφικής υγρασίας προσεγγίζεται από την υδατοϊκανότητα της βλάστησης σε όλο το βάθος του ριζοστρώματος, το οποίο με τη σειρά του αντιπροσωπεύει το 80-90% των ενεργών ριζών ενός φυτού (Εικόνα 52).



Εικόνα 52: Διάγραμμα άντλησης υγρασίας που προσεγγίζει την υδατοϊκανότητα του φυτού σε όλο το βάθος του ριζικού συστήματος.

Με βάση τα πιο πάνω, το τυπικό διάγραμμα άντλησης υγρασίας για το σιτάρι και το κριθάρι παρουσιάζεται στην Εικόνα 53. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού τα υπεδάφια κατάλοιπα δημιουργούν συνθήκες μάρανσης του φυτού (Εικόνα 54). Επομένως, είναι δυνατό με βάση το τυπικό διάγραμμα άντλησης υγρασίας να ειπωθεί ότι τα σιτηρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση υπεδάφια καταλοίπων τα οποία βρίσκονται σε βάθος μέχρι 1.0 -1.8 μέτρα, που είναι η τιμή του βάθους του ριζοστρώματος. Έτσι εάν ένα αρχιτεκτονικό κατάλοιπο βρίσκεται σε βάθος 30-40 εκατοστά κάτω από το έδαφος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα η βλάστηση να αντλεί μόνο ένα 40% του απαιτούμενου νερού που χρειάζεται για να αναπτυχθεί (Εικόνα 54).



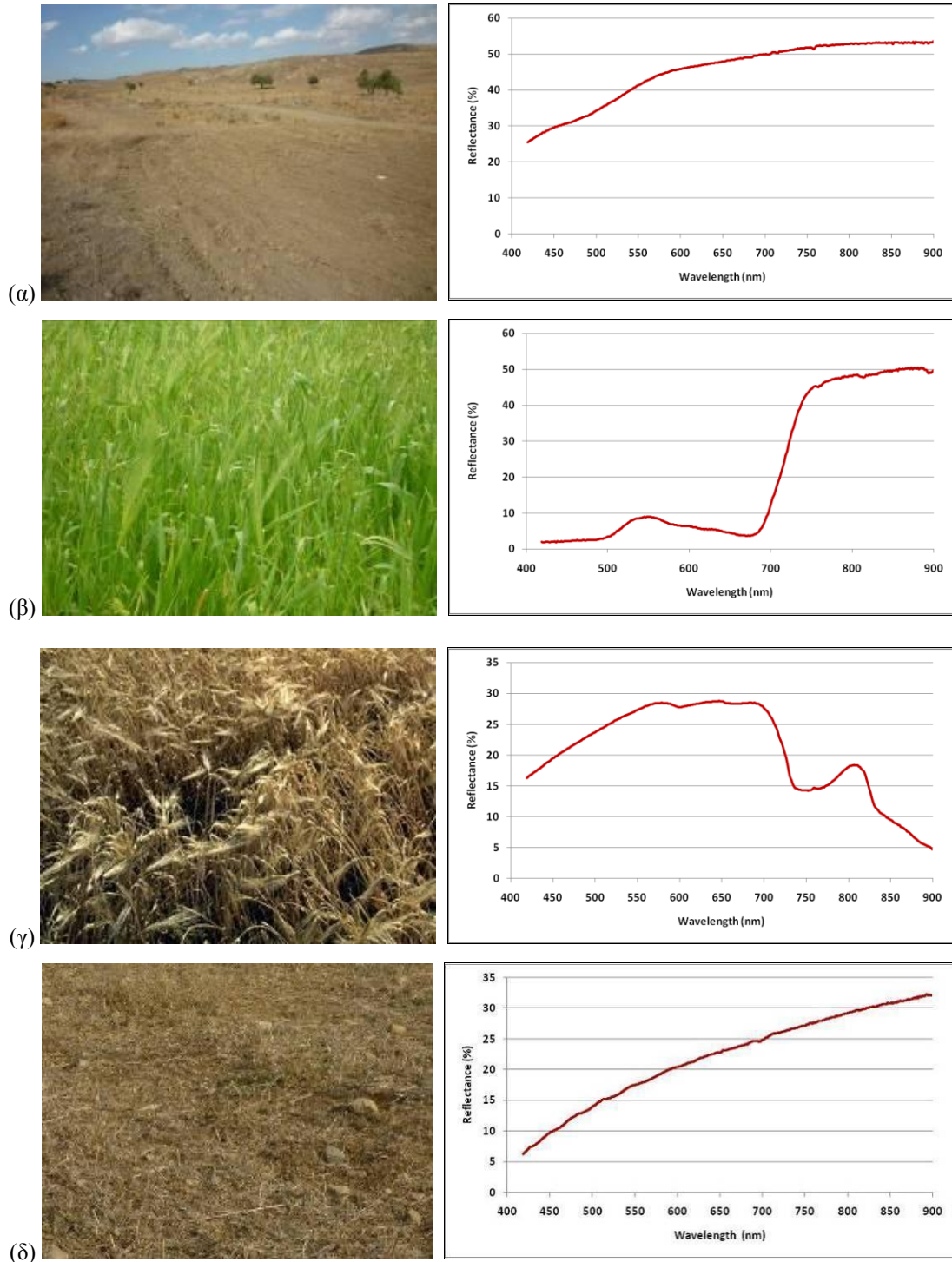
Εικόνα 53: Διάγραμμα άντλησης υγρασίας του σιταριού και κριθαριού (προσεγγιστικά).



Εικόνα 54: Διάγραμμα άντλησης υγρασίας του σιταριού και κριθαριού με τα υπεδάφια κατάλοιπα στο πεδίο ελέγχου.

Τα σιτηρά στην Κύπρο, ανήκουν στις ξηρικές καλλιέργειες, και θάβονται σε βάθος περίπου από 7-16 cm. Ο φαινολογικός τους κύκλος ξεκινάει από τα μέσα Νοεμβρίου με αρχές Δεκεμβρίου, με τις πρώτες χειμερινές βροχές, μέχρι και τα τέλη Μάιου με αρχές Ιουνίου οπότε γίνεται ο θερισμός. Μετά τη σπορά σε περίπου 10 ημέρες αρχίζουν να εμφανίζονται πάνω στο έδαφος οι βλαστοί από τα σιτηρά. Το

ξεστάχνασμα (εμφάνιση καρπών) γίνεται περίπου 80 ημέρες μετά τη φύτευση. Χαρακτηριστικές φασματικές υπογραφές της βλάστησης καθ' όλη τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου, παρουσιάζονται στην Εικόνα 55.



Εικόνα 55: Χαρακτηριστικές φασματικές υπογραφές του κριθαριού με βάση επίγειες μετρήσεις. α) αρόσιμη γη πριν από τη σπορά – έδαφος, β) κριθάρι σε πλήρη ανάπτυξη, γ) περίοδος ξεσταχιάσματος και δ) αρόσιμη γη μετά το θερισμό.

4.3. Λοιπές έρευνες επισκόπησης στις αρχαιολογικές θέσεις

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται συνοπτικά διάφορες παράλληλες και συμπληρωματικές έρευνες, που πραγματοποιηθήκαν στις αρχαιολογικές θέσεις που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Οι έρευνες αυτές διακρίνονται σε επίγειες γεωφυσικές διασκοπήσεις, αναλύσεις δορυφορικών εικόνων, ανασκαφικές δραστηριότητες, επιφανειακές επισκοπήσεις κ.τ.λ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν χρησιμοποιηθεί για σκοπούς σύγκρισης και αντιπαραβολής με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής. Οι έρευνες αυτές έχουν διεξαχθεί στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων ή και εκπονήσεις διδακτορικών διατριβών.

4.3.1. Παλαίπαφος, Κύπρος

Η έκταση και η δομή της αρχαίας πολιτείας της Παλαιπάφου παραμένουν ακόμη και σήμερα σχεδόν άγνωστες, αν και έχουν πρόσφατα δημοσιευθεί τα πρώτα πορίσματα αναφορικά με την ίδρυση της θέσης και την ανάπτυξη της αστικής και διοικητικής δομής κατά την Ύστερη Χαλκοκρατία και εν συνεχεία την Εποχή του Σιδήρου (Iacovou 2012). Με στόχο την ανατροπή αυτής της αρνητικής πραγματικότητας, η Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου σε συνεργασία με το Εργαστήριο Γεωφυσικής – Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας στην Κρήτη, προχώρησε το 2002 στην ψηφιακή χαρτογράφηση ορατών (μνημεία) αλλά και αόρατων πλέον (ταφικά συγκροτήματα) αρχαιολογικών καταλοίπων με τη χρήση GPS αλλά και τη δημιουργία του Ψηφιακού Αρχαιολογικού Άτλαντα της Παλαιπάφου με τη χρήση GIS. (βλ. Sarris *et al.*, 2009, 2011, Iacovou 2008, Iacovou *et al.*, 2009, 2010, Agariou *et al.*, 2010b).

Οι επιφανειακές γεωφυσικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν το 2007 με ηλεκτρικά και μαγνητικά εργαλεία γεωφυσικής τηλεπισκόπησης και με γεωραντάρ (GPR). Περισσότερα από 100 στρέμματα της ευρύτερης περιοχής Παλαιπάφου έχουν καλυφθεί από τις επιφανειακές έρευνες. Οι γεωφυσικές έρευνες επικεντρώθηκαν στις περιοχές βόρεια και ανατολικά του ιερού. Στόχος των γεωφυσικών διασκοπήσεων των να εντοπιστούν ενδιαφέρουσες αρχαιολογικά περιοχές, οι οποίες δύνανται να ερευνηθούν μελλοντικά από την αρχαιολογική σκαπάνη. Συμπληρωματικές γεωφυσικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν και το 2010 ανατολικά του ιερού, στη θέση *Άρκαλον*.

Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών ερευνών έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα έρευνα ως εναλλακτικές μέθοδοι εντοπισμού υπεδάφινων καταλοίπων. Αν και τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των δορυφορικών αναλύσεων ή των επίγειων μετρήσεων φασματοραδιομέτρων, εντούτοις, αυτό που είναι χρήσιμο, είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να επαληθευτούν μέσα από τις αρχαιολογικές ανασκαφές που έγιναν στην περιοχή από την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας και από το Τμήμα Αρχαιοτήτων.

4.3.2. Μαγούλες Θεσσαλίας, Ελλάδα

Τα τελευταία χρόνια η γνώση για τις Νεολιθικές θέσεις Θεσσαλικό κάμπο, που ήδη μελετώνται από το 1908 (βλ. κεφάλαιο 3.2.2), εμπλουτίστηκε με δύο διδακτορικές διατριβές: του Κ. Βουζαξιάκη (2009) και του Δ. Αλεξιάκη (2009). Οι διατριβές αυτές προσέγγισαν την ίδια περιοχή κάτω από μια διαφορετική σκοπιά. Ο μεν Βουζαξιάκης (2009) έδωσε προτεραιότητα στην διεύρυνση της αρχαιολογικής ορατότητας των θέσεων στην πεδιάδα του Αλμυρού μέσα από επιφανειακές επισκοπήσεις, καταγραφή κεραμικής και αρχαιολογικής έρευνας. Για το σκοπό αυτό κατά τις επιτόπιες παρατηρήσεις έγιναν μετρήσεις στίγματος των θέσεων με δέκτες GPS, ενώ αργότερα έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ο Αλεξιάκης (2009), χρησιμοποίησε πολυφασματικά και υπερφασματικά δεδομένα στην περιοχή για τον εντοπισμό θέσεων μαγούλων. Παράλληλα με ανάλυση σε περιβάλλον GIS προσπάθησε να προσδιορίσει επιτυχώς χωρικά πρότυπα στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας.

Αυτές οι έρευνες αποκτούν μια διαφορετική σημασία για την παρούσα διατριβή: Η μεν πρώτη δίνει το αρχαιολογικό υπόβαθρο της περιοχής και τεκμηριώνει -μέσα από τις επιφανειακές επισκοπήσεις- ότι στον Θεσσαλικό κάμπο υπάρχουν προϊστορικές θέσεις. Μάλιστα η καταλογράφηση των θέσεων μαζί με την καταγραφή των συντεταγμένων έχει βοηθήσει σημαντικά την παρούσα έρευνα. Αντίθετα η έρευνα του Αλεξιάκη (2009) επιβεβαίωσε ότι οι μαγούλες είναι ανιχνεύσιμες με τη χρήση τηλεπισκόπησης. Όμως αυτό που απουσιάζει από τη συγκεκριμένη διατριβή, είναι η μελέτη και προσπάθεια μοντελοποίησης της φασματικής υπογραφής της μαγούλας και του περιγυρού της. Αυτό το κενό εξετάζεται στην παρούσα μελέτη και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα αντίστοιχα κεφάλαια. Η πιθανή μοντελοποίηση,

δηλαδή η κατανόηση του πώς συμπεριφέρεται φασματικά η βλάστηση πάνω σε αρχαιολογικές θέσεις (μαγούλες), δίνει το πλεονέκτημα της αυτοματοποίησης της διαδικασίας μέσα από την ανάλυση δορυφορικών εικόνων.

4.3.3. Visztu, Ουγγαρία

Στην ευρύτερη περιοχή Visztu διεξάγονται τα τελευταία χρόνια συστηματικές επιφανειακές έρευνες υπό τη διεύθυνση του Chicago Field Museum το οποίο χρηματοδοτείται από το USA-National Science Foundation (NSF), σε συνεργασία με το μουσείο Munkacsy Mihaly Museum, Bekescsaba, της Ουγγαρίας. Το ερευνητικό πρόγραμμα KRAP (The Koros Regional Archaeological Project) ξεκίνησε από το 2002 και συνεχίζει μέχρι και σήμερα. Στόχος του ερευνητικού προγράμματος είναι να μελετήσει τους διάφορους οικισμούς της Νεολιθικής και Πρώιμης εποχής του χαλκού (βλ. Parkinson *et al.*, 2002, 2004a; 2004b, Sarris *et al.*, 2004).

Το ερευνητικό πρόγραμμα KRAP, είναι ένα διεπιστημονικό ερευνητικό έργο, υπό την καθοδήγηση του αρχαιολόγου Δρ. William A. Parkinson του Τμήματος Ανθρωπολογίας, του Chicago Field Museum και του αρχαιολόγου Attila Gyucha της Υπηρεσίας Field Service of Cultural Heritage της Ουγγαρίας. Στις έρευνες αυτές έχουν εμπλακεί και άλλα πανεπιστήμια και ερευνητικά ιδρύματα όπως είναι το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών- Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας (Εργαστήριο Γεωφυσικής – Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης & Αρχαιοπεριβάλλοντος), με εκτεταμένες γεωφυσικές διασκοπήσεις, το Πανεπιστήμιο του Leicester με δειγματοληψίες εδάφους για γεωχημικές αναλύσεις της στρωματογραφίας, ενώ το Πανεπιστήμιο του Illinois κατέγραψε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής με τη χρήση διπλόσυχνου GPS. Επιπλέον πραγματοποιούνται και στοχευμένες ανασκαφικές δραστηριότητες από τους υπεύθυνους του προγράμματος. Η έκταση της περιοχής μελέτης ξεπερνάει τα 33 εκτάρια, ενώ η συλλογή ευρημάτων από επιφανειακές έρευνες ξεπερνούν τις 42000. Σε μια πιο εκτεταμένη έρευνα στην περιοχή γίνονται δειγματοληψίες από το Munkacsy Mihaly Museum για ανασύσταση του παλαιοπεριβάλλοντος και γεωμορφολογίας της περιοχής (Parkinson, 2011). Τα συνθετικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις διάφορες έρευνες του πεδίου (αρχαιολογικές ανασκαφές, γεωφυσικές διασκοπήσεις) έχουν χρησιμοποιηθεί για σκοπούς σύγκρισης με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής.

5. Μεθοδολογία και Διαθέσιμα

5.1. Μεθοδολογία

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην παρουσίαση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής. Η μεθοδολογία απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 56 και εστιάζεται στα πιο κάτω βήματα:

- **Επιλογή περιοχών μελέτης:** Το πρώτο στάδιο αφορά την ανάλυση για την επιλογή των περιοχών μελέτης καθώς και την δημιουργία των ελεγχόμενων πεδίων σε Αλάμπρα και Αχέλεια.
- **Μετρήσεις πεδίου:** Οι εργασίες πεδίου αφορούν τις απαραίτητες μετρήσεις που έχουν γίνει στις διάφορες περιοχές μελέτης. Συγκεκριμένα έχουν γίνει τακτικές λήψεις φασματοραδιομετρικών μετρήσεων στα ελεγχόμενα πεδία (Αλάμπρας και Αχέλειας) καθόλη τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου, έτσι ώστε να μελετηθεί διεξοδικά η φασματική υπογραφή της βλάστησης.

Επιπλέον έχουν γίνει επίγειες μετρήσεις στις αρχαιολογικές θέσεις που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τα επίγεια φασματοραδιόμετρα θα μπορεί να συνδυαστούν στο στάδιο της ανάλυσης με δορυφορικές εικόνες για σκοπούς βαθμονόμησης των εικόνων, κυρίως για την αναγωγή λόγω ατμοσφαιρικών επιδράσεων, αλλά και για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων από την επεξεργασία των δορυφορικών καταγραφών.

- **Φασματικές υπογραφές:** Οι επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις μελετήθηκαν ως προς τα φασματικά τους χαρακτηριστικά έτσι ώστε να εντοπιστούν τυχόν αλλοιώσεις στην φασματική ανακλαστικότητα της βλάστησης. Η επεξεργασία των φασματικών υπογραφών έδειξε ποιοι φασματικοί δίαυλοι είναι καταλληλότεροι για τον εντοπισμό υπεδάφινων στόχων. Παράλληλα οι μετρήσεις αποτελούν και τη βάση για τη ψηφιακή βιβλιοθήκη φασματικών υπογραφών.
- **Μελέτη του φαινολογικού κύκλου:** Ο φαινολογικός κύκλος μελετήθηκε στα δύο ελεγχόμενα πεδία που έχουν δημιουργηθεί, με στόχο να εντοπιστούν τα χρονικά

παράθυρα για τα οποία οι δορυφορικοί δέκτες ανταποκρίνονται καλύτερα στη φασματική ανωμαλία και διαφοροποίηση της συγκεκριμένης βλάστησης.

- **Προ-επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων:** Η προεπεξεργασία δορυφορικών εικόνων περιλαμβάνει γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση. Επιπλέον έχει γίνει και μια ποσοτικοποίηση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής επίδρασης στον εντοπισμό υπεδάφια στόχων.
- **Εφαρμογή υφιστάμενων δεικτών βλάστησης και καταγραφή φασματικής υπογραφής:** Στόχος είναι να γίνει μια κριτική προσέγγιση και εφαρμογή υφιστάμενων δεικτών βλάστησης και άλλων αλγορίθμων σε γνωστούς αρχαιολογικούς χώρους.
- **Ανάλυση αποτελεσμάτων:** Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις μετρήσεις στους αρχαιολογικούς χώρους συγκρίνονται με άλλες μεθόδους όπως είναι οι γεωφυσικές διασκοπήσεις και φυσικά με την παραδοσιακή αρχαιολογική έρευνα και ερμηνεία.
- **Ανάπτυξη νέας μεθόδου:** Από τα συνολικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος εντοπισμού υπεδάφια στόχων, η οποία αξιολογείται για την αποτελεσματικότητα, την ακρίβεια και την εφαρμοσιμότητά της, ειδικά σε ενδεχόμενες αρχαιολογικές θέσεις στην Κύπρο.



Εικόνα 56: Μεθοδολογία διατριβής.

5.2. Διαθέσιμα Δεδομένα

5.2.1. Δορυφορικές εικόνες

Η επιλογή των δορυφορικών εικόνων για τους σκοπούς της διατριβής βασίστηκε στη φασματική ανάλυση των δορυφόρων (VIS – VNIR), την περιοδικότητα των εικόνων και φυσικά τη χωρική ανάλυση. Παράλληλα και άλλα σημαντικά κριτήρια όπως για παράδειγμα η διαθεσιμότητα των εικόνων αλλά και το κόστος τους έχουν ληφθεί σημαντικά υπόψη. Αν και ο βέλτιστος συνδυασμός θα ήταν η χρήση εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης με τακτική λήψη εικόνων, εντούτοις το κόστος των εικόνων αλλά και η μη τακτική λήψη τους, δεδομένου ότι για αυτήν απαιτείται προγραμματισμός λήψης, αποτέλεσε έναν ανασταλτικό παράγοντα. Σημειώνεται ότι ο οικονομικός παράγοντας είναι πολλές φορές ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας που αποτρέπει την αγορά μιας εκτεταμένης δορυφορικής βάσης για αρχαιολογικές έρευνες (Parcak 2009). Επιπλέον εικόνες αρχείου υψηλής ανάλυσης είναι διαθέσιμες μόνο για την περίοδο μετά το 2000 σε αντίθεση με άλλες εικόνες μέσης ανάλυσης (π.χ. Landsat) που είναι διαθέσιμες από τη δεκαετία του 1980.

Οι σημαντικοί αυτοί περιορισμοί, δηλαδή το κόστος και η δυσμενής διαθεσιμότητα εικόνων αρχείου, οδήγησαν σε αναζήτηση άλλων εναλλακτικών λύσεων για την εφαρμογή της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Είναι φανερό μέσα από τις πολλές εφαρμογές που έχουν γίνει (βλ. Κεφ. 2) ότι η χρήση εικόνων υψηλής ανάλυσης είναι σε θέση να δώσει σημαντικά ευρήματα για τον εντοπισμό υπεδάφια καταλοίπων. Παρόλα αυτά, η χρήση μιας εκτεταμένης βάσης δορυφορικών εικόνων τύπου Landsat (ή άλλων αντίστοιχων εικόνων) δεν έχει ερευνηθεί, λόγω κυρίως της χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Συνεπώς το σημαντικό θεωρητικό πρόβλημα που τέθηκε ήταν η αναζήτηση τεχνικών που θα οδηγούσαν στην αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων, όταν η χωρική ανάλυσή τους δεν είναι ικανοποιητική για την αρχαιολογική έρευνα.

Μέσα από την παρούσα διατριβή αποδείχτηκε ότι η χρήση μιας μεγάλης χρονοσειράς δορυφορικών δεδομένων (π.χ. για την περιοχή της Θεσσαλίας ξεπερνούν τις 95 διαχρονικές δορυφορικές εικόνες), με μεσαία χωρική ανάλυση, μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα. Η εξέταση του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης,

δηλαδή των φασματικών ιδιοτήτων της, που εφαρμόζεται για πρώτη φορά στο πλαίσιο αρχαιολογικών ερευνών, αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο ερμηνείας και διαφορετική προσέγγιση χρήσης δορυφορικών δεδομένων μέσης ανάλυσης. Όπως φάνηκε μέσα από τη μελέτη των Agarίου και Hadjimitsis (2011) και Agarίου *et al.* (2011b) τα δορυφορικά δεδομένα τύπου Landsat μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για αρχαιολογικές έρευνες, ενώ η χρήση μετρήσεων από επίγεια φασματοραδιόμετρα τη στιγμή της λήψης της δορυφορικής εικόνας μπορεί να επαληθεύσει τα δορυφορικά αποτελέσματα και έτσι να αυξήσει σημαντικά την αξιοπιστία των συμπερασμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, εγκρίθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) σχετική ερευνητική πρόταση η οποία αφορούσε τη χρήση νέων λήψεων του πειραματικού υπερφασματικού σαρωτή Chris Proba πάνω από την περιοχή της Παλαιπάφου και του ελεγχόμενου πεδίου της Αχέλειας. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν και υψηλής ανάλυσης εικόνες (IKONOS και QuickBird) αλλά και αεροφωτογραφίες του Κτηματολογίου Κύπρου, που ήταν διαθέσιμες από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης και Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά από έρευνα που έγινε, κατέστη ανέφικτο να εντοπιστούν αεροφωτογραφήσεις της Κύπρου πριν από το 1960 (π.χ. από R.A.F.). Μερικές αεροφωτογραφίες, αλλά όχι σε παγκύπρια κλίμακα, υπάρχουν κατά τη δεκαετία του 1940 και 1950 στο Τμήμα Κτηματολογίου και Χωρομετρίας, αλλά η ποιότητά τους ποικίλλει. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλες περιοχές (π.χ. Αγγλία, Μεσοποταμία, Υπεριορδανία κ.τ.λ.) όπου υπάρχει πρόσβαση σε παλαιότερες εικόνες κυρίως του Α' και Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Στη συνέχεια περιγράφονται βασικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών δεκτών που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή.

- **Δορυφόρος Landsat (MSS / TM / ETM+):** Το διαστημικό πρόγραμμα Landsat είναι το αποτέλεσμα των προσπαθειών της NASA και το USGS για παρακολούθηση της γης από το διάστημα με τεχνικές τηλεπισκόπησης. Η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου έγινε το 1972 (Landsat 1) και έκτοτε έχουν τεθεί σε τροχιά άλλοι 6 δορυφόροι (ο Landsat 6 δεν τέθηκε σε τροχιά λόγω προβλήματος). Ο δορυφόρος Landsat αποτελεί σύμφωνα με την Parcak (2009) τον πιο διαδεδομένο

δορυφόρο για αρχαιολογικούς σκοπούς. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό έως μηδαμινό κόστος αγοράς εικόνων, την παγκόσμια κάλυψη λόγω ηλιοσύγχρονης τροχιάς, αλλά και τις εικόνες αρχείου που διαθέτει από τη δεκαετία του 1970. Μια δορυφορική εικόνα τύπου Landsat καλύπτει μια έκταση της τάξης των $185 \times 185 \text{ km}^2$. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια εικόνα τύπου Landsat είναι σε θέση να καλύψει σχεδόν όλη την Κύπρο. Τα πολυφασματικά κανάλια του δορυφόρου καλύπτουν τόσο το ορατό όσο και το εγγύς και μέσο υπέρυθρο, ενώ παράλληλα έχει και αισθητήρες για την καταγραφή της θερμοκρασίας εδάφους. Το παγχρωματικό του κανάλι έχει χωρική ανάλυση της τάξης των 15 m, ενώ τα υπόλοιπα κανάλια έχουν ανάλυση 30 m με εξαίρεση το θερμικό που έχει ανάλυση 60 m. Τα δεδομένα Landsat μπορεί να αποκτηθούν σε μορφή GeoTiff δωρεάν μέσα από FTP έπειτα από αίτηση στην USGS (<http://glovis.usgs.gov/>).

- **Δορυφόρος CHRIS Proba:** Ο δορυφόρος Proba αναπτύχθηκε μέσα από το διαστημικό πρόγραμμα του Ευρωπαϊκού Διαστημικού Οργανισμού (ESA). Ο αισθητήρας CHRIS ονομάστηκε από τα αρχικά των λέξεων Compact High Resolution Imaging Spectrometer (Υψηλής Ανάλυσης Απεικονιστικό Φασματοόμετρο Μικρού Μεγέθους). Εκτοξεύτηκε στις 22 Οκτωβρίου του 2001 και δίνει υπερφασματικές εικόνες σε 63 ξεχωριστά κανάλια, με χωρική ανάλυση 18 m. Το φασματικό εύρος του δορυφόρου επεκτείνεται από τα 415 nm μέχρι και τα 1050 nm. Στόχος του CHRIS Proba είναι κυρίως η αξιολόγηση των νέων τεχνολογιών από δορυφορικές απεικονίσεις και για αυτό άλλωστε αναφέρεται και ως πειραματικός δορυφόρος, αλλά παράλληλα και η χρήση των δεδομένων για περιβαλλοντικούς σκοπούς. Τα δεδομένα του δορυφόρου παραχωρούνται σε μορφή HDF μετά από έγκριση επιτροπής της ESA. Μια δορυφορική εικόνα τύπου CHRIS Proba καλύπτει μια έκταση $13 \times 13 \text{ km}^2$. Τα δεδομένα CHRIS Proba είναι διαθέσιμα δωρεάν μετά από αίτημα στην ESA από το λογισμικό EOLI Catalogue.

- **Δορυφόρος EO-1 HYPERION:** Ο HYPERION, αποτελεί τον πρώτο δορυφόρο μιας νέας γενιάς διαστημικού προγράμματος της NASA και εκτοξεύτηκε το 2000. Κυρίως στόχος του δορυφόρου ήταν να συλλέξει πειραματικά δεδομένα για μελλοντικούς δέκτες. Κύριο χαρακτηριστικό του αισθητήρα του δορυφόρου HYPERION είναι η πληθώρα των υπερφασματικών δεδομένων. συνολικά 220

ξεχωριστά κανάλια, και το φασματικό εύρος (356 nm - 2577 nm) που παρέχει. Η χωρική ανάλυση των δεδομένων ανέρχεται στα 30 m. Δεδομένα από τον HYPERION μπορεί να αποκτηθούν σε μορφή GeoTiff δωρεάν μέσα από FTP έπειτα από αίτηση στην USGS (<http://glovis.usgs.gov/>).

- **Δορυφόρος IKONOS:** Ο δορυφόρος IKONOS είναι ένας εμπορικός δορυφόρος υψηλής χωρικής ανάλυσης. Έχει εκτοξευτεί στο διάστημα το 1999 και μπορεί να δώσει εικόνες με χωρική ανάλυση έως και 1m στο παγχρωματικό του κανάλι ή 4m στα πολυφασματικά κανάλια. Η φασματική του ανάλυση επεκτείνεται από το ορατό μέχρι και το εγγύς υπέρυθρο, ενώ λήψη εικόνων σε μια περιοχή γίνεται κατόπιν προγραμματισμού. Αν και μπορεί να υπάρχουν διαθέσιμες εικόνες αρχείου IKONOS για μια περιοχή, εντούτοις αυτές δεν καταγράφονται από το δορυφόρο σε συστηματική βάση. Η ραδιομετρική ανάλυση του δορυφόρου είναι 11bit ενώ μπορεί να καλύψει μια περιοχή της τάξης των 13 x 13 km². Αξίζει να αναφερθεί ότι ο δορυφόρος IKONOS λαμβάνει και στερεοσκοπικές εικόνες οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους ή Επιφανείας (DEM , DSM). Τα δεδομένα IKONOS είναι διαθέσιμα σε μορφή GeoTiff με κόστος από την GeoEye κατόπιν αίτησης.

- **Δορυφόρος QuickBird:** Ο συγκεκριμένος εμπορικός δορυφόρος της εταιρείας DigitalGlobe είναι στο διάστημα από το 2001. Ο συγκεκριμένος δορυφόρος συγκαταλέγεται αυτήν τη στιγμή στην τετράδα τηλεπισκοπικών δορυφόρων με την υψηλότερη χωρική ανάλυση μαζί με τους WorldView-1, WorldView-2 και GeoEye-1. Η χωρική του ανάλυση φθάνει σχεδόν το μισό μέτρο (0,60 m) στο παγχρωματικό φάσμα, ενώ στα πολυφασματικά κανάλια έχει ανάλυση 2,4 m. Η φασματική του ικανότητα είναι αντίστοιχη του δορυφόρου IKONOS (ορατό και εγγύς υπέρυθρο) ενώ μια εικόνα QuickBird καλύπτει έκταση στο έδαφος 16.5 x 16.5 km². Τα δεδομένα QuickBird είναι διαθέσιμα σε μορφή GeoTiff με κόστος από την DigitalGlobe κατόπιν αίτησης.

- **Δορυφόρος GeoEye-1:** ο δορυφόρος GeoEye-1 είναι ο πιο πρόσφατος δορυφόρος υψηλής διακριτικής ικανότητας που έχει εκτοξευτεί στο διάστημα (2008) και κατασκευάστηκε από την ομώνυμη εταιρεία. Η διακριτική ικανότητα του

δορυφόρου είναι στα 0.41 m στο παγχρωματικό κανάλι και 1.65 m στα πολυφασματικά κανάλια. Η φασματική του ικανότητα περιορίζεται στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος. Ο δορυφόρος GeoEye είναι επίσης εμπορικός και έτσι η κάλυψη σε μια περιοχή γίνεται σχεδόν αποκλειστικά μόνο μετά από αίτηση από ενδιαφερόμενους. Μια εικόνα GeoEye-1 καλύπτει έκταση 15 x 15 km².

- **Δορυφόρος CORONA:** οι δορυφορικές εικόνες τύπου CORONA αποτελούν εικόνες σε φιλμ και χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά για σκοπούς αρχαιολογικής έρευνας στην Κύπρο. Οι παγχρωματικές εικόνες CORONA αποτελούν προϊόν του ψυχρού πολέμου. Κατά την περίοδο αυτή (1960 – 1972) έχει ληφθεί ένας μεγάλος όγκος εικόνων (πέραν των 860.000) σε διάφορες περιοχές του κόσμου από την U.S. Intelligence. Το φωτογραφικό φιλμ του κατασκοπευτικού δορυφόρου έπεφτε στη γη με τη βοήθεια αλεξιπτώτου και συλλέγονταν από ειδικά αεροσκάφη (βλ. Εικόνα 57). Οι εικόνες τύπου CORONA, οι οποίες αποδεσμεύτηκαν από το 1995 και μετά είναι διαθέσιμες σήμερα σε ψηφιακή μορφή και διατίθενται μετά από αίτηση με κόστος \$30 ανά εικόνα.



Εικόνα 57: Αεροσκάφη ανακτούν την κυψέλη που περιέχει το φωτογραφικό φιλμ από το δορυφόρο CORONA.

Ο Πίνακας 3 συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά των πιο πάνω δορυφόρων. Για σκοπούς πληρότητας και σύγκρισης αναφέρεται ότι το φασματοραδιόμετρο GER 1500 το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή έχει φασματική ανάλυση από 350 – 1050 nm.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά δορυφόρων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην διατριβή

Δορυφόρος	Αισθητήρας	Χρονολογία Εκτόξευσης - Τερματισμός	Χωρική ανάλυση (m)		Φασμ. ανάλυση (nm)	Περιοδικότητα
			Παν.	VIS-NIR		
CORONA		1960 - 1972	1.8 – 12		Ορατό φάσμα 400-700	Περιορισμένος αριθμός πάνω από την Κύπρο
EO-1	Hyperion	2000- Σήμερα	10		356-996	Απαιτείται προγραμματισμός
GeoEye-1	-	2008 – Σήμερα	0.41	1.65	450 -920	Απαιτείται προγραμματισμός
IKONOS	-	1999 - Σήμερα	1	4	450 -950	Απαιτείται προγραμματισμός
Landsat 4	MSS	1982 - 1993	-	60	520 - 900	Κάθε 16 ημέρες
Landsat 5	TM	1984 - Σήμερα	15	30	450 -900	Κάθε 16 ημέρες
Landsat 7	ETM+	1999 – Σήμερα	15	30	450 -900	Κάθε 16 ημέρες
Proba	CHRIS	2001 - Σήμερα	-	17-34	415-1050	Απαιτείται προγραμματισμός
QuickBird	-	2001 - Σήμερα	0,60	2,4	450 -900	Απαιτείται προγραμματισμός

5.2.2. Λοιπά δεδομένα

Επιπρόσθετα από τα δορυφορικά και επίγεια φασματοραδιομετρικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής και μετεωρολογικές παρατηρήσεις και εδαφολογικοί χάρτες .

Οι μετεωρολογικές παρατηρήσεις αφορούσαν ημερήσιες θερμοκρασίες, σχετικές υγρασίες και ύψος βροχόπτωσης. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να καταγράψουν σημαντικές κλιματικές αλλαγές που ενδεχομένως να επιδρούσαν στην καταπόνηση ή ενίσχυση της βλάστησης (π.χ. περίοδοι ξηρασίας ή περίοδοι βροχοπτώσεων). Παράλληλα η καταγραφή της πρώτης βροχόπτωσης μετά τη σπορά

των σιτηρών σηματοδοτούσε και την έναρξη του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης. Τα δεδομένα για την Κύπρο παραχωρήθηκαν από την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου από διάφορους σταθμούς (Αεροδρόμιο Πάφου, Αγίας Βαρβάρας Λευκωσίας, Κόρνος, Αθαλάσσας, Πόλης Χρυσοχούς κ.τ.λ.).

5.3. Προεπεξεργασία Δορυφορικών Δεδομένων

Το στάδιο της προ-επεξεργασίας για την περαιτέρω ψηφιακή ανάλυση δορυφορικών εικόνων χαρακτηρίζεται από δύο είδη βασικών διορθώσεων. Η πρώτη περιλαμβάνει τη γεωμετρική διόρθωση, η οποία αφορά τη διόρθωση των σφαλμάτων που προέρχονται από τη γεωμετρία της προβολής του αισθητήρα αλλά και εκτροπής λόγω αναγλύφου. Η δεύτερη διόρθωση, είναι η ραδιομετρική που αφορά τις διορθώσεις των μεταβολών στην ένταση της ακτινοβολίας. Η προεπεξεργασία αυτή έγινε μέσα από τα λογισμικά ERDAS 10, ENVI 4.0, και ArcGIS 10.

5.3.1. Γεωμετρική Διόρθωση

Οι παράγοντες που επιδρούν στην παραμόρφωση της γεωμετρίας μιας εικόνας είναι πάρα πολλοί. Ενδεικτικά αναφέρονται η κίνηση του δορυφόρου γύρω από τη Γη, η ίδια η περιστροφή της Γης, η επίδραση της καμπυλότητας, η εσωτερική γεωμετρία του δέκτη κ.ά. Συνήθως στη βιβλιογραφία, όλα αυτά τα σφάλματα ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: εσωτερικά και εξωτερικά σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά επίσης μπορούν να διακριθούν αν είναι συστηματικά ή μη συστηματικά, δηλαδή τυχαία σφάλματα (Campbell 2002).

Τα εσωτερικά σφάλματα τα οποία εντοπίζονται σε μια δορυφορική εικόνα συνήθως οφείλονται στο αισθητήρα του δορυφόρου που καταγράφει από το διάστημα μια περιοχή ή σε σχέση με την περιστροφή και την καμπυλότητα της Γης. Αυτές οι παραμορφώσεις που παρουσιάζονται σε μια εικόνα, είναι συχνά συστηματικά σφάλματα και έτσι μπορεί να αναγνωριστούν εύκολα και να διορθωθούν. Οι διορθώσεις μπορεί να γίνουν με βάση τις παραμέτρους πριν από την εκτόξευση του δορυφόρου (pre-launch) ή και με δεδομένα τα οποία λαμβάνονται, όταν ο δορυφόρος είναι σε τροχιά και περιγράφουν πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα κ.ά.

Επίσης είναι φανερό, ότι το γεωμετρικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την προεπεξεργασία των εικόνων εξαρτάται από τον τρόπο καταγραφής της εικόνας. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθεί ένα φωτογραφικό σύστημα με ένα οπτικό κέντρο τότε όλη η περιοχή που αποτυπώνεται στον αισθητήρα καταγράφεται την ίδια χρονική στιγμή. Έτσι το μοντέλο διόρθωσης είναι η κεντρική προβολή. Αντίθετα εάν πρόκειται για σαρωτή τύπου pushbroom scanner (π.χ. SPOT) όπου η σάρωση είναι ταυτόχρονη μόνο για κάθε γραμμή σάρωσης, και όχι για όλη την εικόνα, τότε θεωρείται ότι τα εικονοστοιχεία στην ίδια γραμμή έχουν ληφθεί την ίδια χρονική στιγμή. Σε περίπτωση όπου η σάρωση των εικονοστοιχείων γίνεται σειριακά (multispectral scanner), δηλαδή κάθε εικονοστοιχείο έχει καταγραφεί σε διαφορετική χρονική στιγμή (π.χ. Landsat TM/ ETM+), τότε η σχετική θέση δορυφόρου-γης μεταβάλλεται διαρκώς κατά την λήψη κάθε εικονοστοιχείου της δορυφορικής εικόνας.

Ένας διαδεδομένος τρόπος διόρθωσης δορυφορικών εικόνων αποτελεί η χρήση επίγειων σημείων ελέγχου (Ground Control Points) με το μαθηματικό μοντέλο δευτέρου βαθμού πολυωνύμου. Η κατανομή των επίγειων σημείων ελέγχου αλλά και το ανάγλυφο της περιοχής αποτελούν σημαντικούς παράγοντες σε θέματα ακρίβειας του τελικού προϊόντος. Το σύστημα γεωαναφοράς που επιλέχθηκε είναι το WGS 84, Εγκάρσια Μερκατορική προβολή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά αποτελέσματα της γεωμετρικής διόρθωσης δορυφορικών εικόνων τύπου Landsat TM / ETM+ στην περιοχή της Παλαιπάφου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηριστικά επίγεια σημεία ελέγχου (Ground Control Points, GCP) στην ευρύτερη περιοχή και τα οποία ελήφθησαν από Κτηματολογικούς χάρτες κλίμακας 1: 5000 (ακρίβεια ± 1.25 m). Η γεωμετρική διόρθωση έγινε με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS 10 (Εικόνα 58). Να σημειωθεί ότι η περιοχή ενδιαφέροντος για τη γεωμετρική διόρθωση εστιάστηκε στις παραθαλάσσιες περιοχές από τα Κούκλια μέχρι και την Πάφο που χαρακτηρίζονται από ήπιο ανάγλυφο.



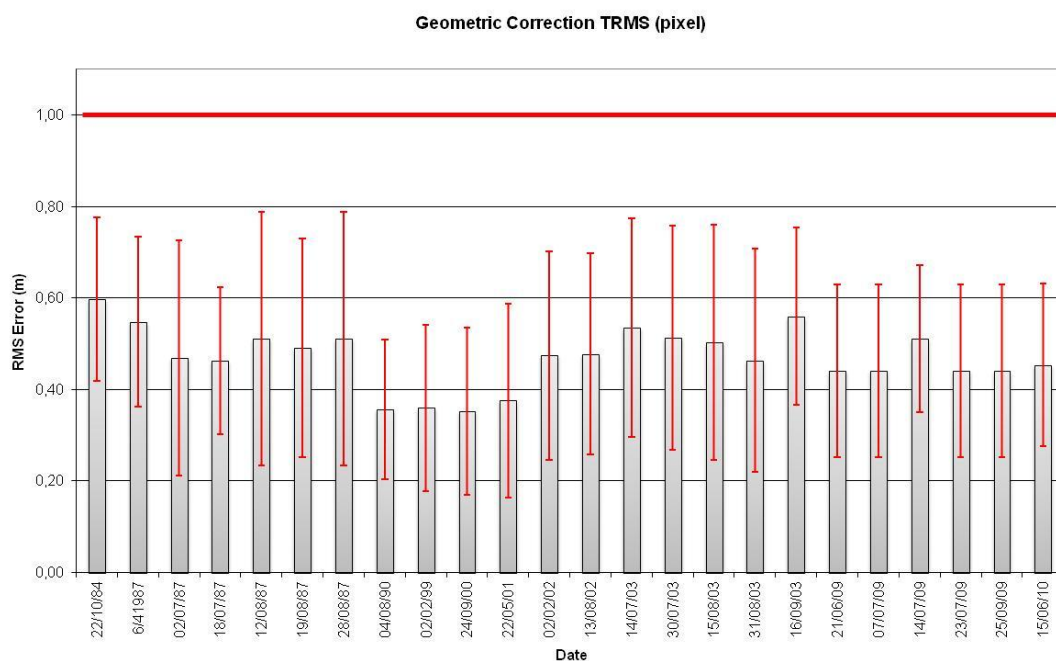
Εικόνα 58: Γεωμετρική διόρθωση δορυφορικών εικόνων με τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου (με κίτρινο η περιοχή ενδιαφέροντος).

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4 το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (TRMS) είναι κοντά στα 15 m, δηλαδή στο $\frac{1}{2}$ pixel του δορυφόρου. Σε όλες τις εικόνες έχουν κατανεμηθεί ομοιόμορφα στην περιοχή περισσότερα από 13 ομόλογα σημεία. Η χρήση άλλωστε περισσότερων ομόλογων σημείων έχει δείξει ότι δεν βελτιώνει απαραίτητα και την γεωμετρική ακρίβεια της εικόνας (Kardoulas *et al.*, 1996). Διαγραμματικά τα αποτελέσματα της γεωμετρικής διόρθωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 59.

Πίνακας 4: Στατιστικά αποτελέσματα γεωμετρικής διόρθωσης δορυφορικών εικόνων τύπου Landsat TM/ETM+

Ημερ.	Τύπος Δορ.	Αρ. GCP	TRMS (m)	TRMS (pixel)	Stddev (m)	Stddev (pixel)	Max (m)	Max (pixel)
22/10/1984	Landsat 5 TM	15	17,9	0,6	5,4	0,2	29,2	1,0
06/04/1987	Landsat 5 TM	16	16,5	0,5	5,6	0,2	25,2	0,8
02/07/1987	Landsat 5 TM	13	14,1	0,5	7,7	0,3	32,4	1,1
18/07/1987	Landsat 5 TM	13	13,9	0,5	4,8	0,2	20,3	0,7
12/08/1987	Landsat 5 TM	15	15,3	0,5	8,3	0,3	40,4	1,3
19/08/1987	Landsat 5 TM	13	14,8	0,5	7,2	0,2	29,2	1,0

28/08/1987	Landsat 5 TM	15	15,3	0,5	8,3	0,3	40,4	1,3
04/08/1990	Landsat 5 TM	15	10,7	0,4	4,6	0,2	19,5	0,6
02/02/1999	Landsat 5 TM	15	10,8	0,4	5,5	0,2	19,9	0,7
24/09/2000	Landsat 7 ETM+	15	10,6	0,4	5,5	0,2	19,8	0,7
22/05/2001	Landsat 7 ETM+	15	11,3	0,4	6,4	0,2	25,4	0,8
02/02/2002	Landsat 7 ETM+	17	14,2	0,5	6,8	0,2	29,4	1,0
13/08/2002	Landsat 7 ETM+	18	14,3	0,5	6,6	0,2	25,6	0,9
14/07/2003	Landsat 5 TM	19	16,0	0,5	7,2	0,2	29,9	1,0
30/07/2003	Landsat 5 TM	15	15,4	0,5	7,4	0,2	24,8	0,8
15/08/2003	Landsat 5 TM	20	15,1	0,5	7,7	0,3	30,4	1,0
31/08/2003	Landsat 5 TM	20	13,9	0,5	7,3	0,2	33,2	1,1
16/09/2003	Landsat 5 TM	14	16,8	0,6	5,8	0,2	26,2	0,9
21/06/2009	Landsat 5 TM	17	13,2	0,4	5,7	0,2	24,0	0,8
07/07/2009	Landsat 5 TM	17	13,2	0,4	5,7	0,2	24,0	0,8
14/07/2009	Landsat 5 TM	16	15,3	0,5	4,8	0,2	23,0	0,8
23/07/2009	Landsat 5 TM	17	13,2	0,4	5,7	0,2	24,0	0,8
25/09/2009	Landsat 5 TM	17	13,2	0,4	5,7	0,2	24,0	0,8
15/06/2010	Landsat 5 TM	15	13,6	0,5	5,3	0,2	23,7	0,8



Εικόνα 59: Αποτελέσματα γεωμετρικής διόρθωσης για κάθε εικόνα (βλ. Πίνακας 4)

Σε αρκετές περιπτώσεις χρήσης δορυφορικών εικόνων κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, το στάδιο της γεωμετρικής διόρθωσης δεν κρίθηκε απαραίτητο,

αφού οι δορυφορικές εικόνες είναι ήδη γεωμετρικά διορθωμένες με ακρίβεια κοντά στο 1 pixel (http://landsat.usgs.gov/geometric_accuracy.php).

5.3.2. Ραδιομετρική διόρθωση

Οι μεταβολές στην ένταση της ακτινοβολίας μπορεί να οφείλονται είτε στον ίδιο τον αισθητήρα του σαρωτή είτε σε εξωγενείς παράγοντες, όπως είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, το γήινο ανάγλυφο κ.ά. Οι επιδράσεις αυτές έχουν ως συνέπεια την αυξομείωση των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων σε κάθε κανάλι. Η ραδιομετρική διόρθωση είναι πολύ σημαντικό να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που γίνεται χρήση δορυφορικών δεδομένων που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους ή από διαφορετικούς δορυφορικούς δέκτες. Σκοπός της ραδιομετρικής διόρθωσης των εικόνων είναι να απαλείφουν ή να ελαττωθούν οι ασυμβατότητες μεταξύ των δεκτών, οι ελαττωματικές λειτουργίες τους και οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Οι ψηφιακές τιμές των εικόνων μετατρέπονται σε μονάδες ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες παραμέτρους βαθμονόμησης για κάθε εικόνα (μέσα από το αρχείο μεταδεδομένων που συνοδεύει την εικόνα). Για τις εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ η ραδιομετρική διόρθωση δίνεται από την εξίσωση 3 (Landsat Handbook):

$$L_{\text{sat}} = [(L_{\text{max}\lambda} - L_{\text{min}\lambda})/Q_{\text{calmax}}]*Q_{\text{cal}} + L_{\text{min}\lambda} \quad [3]$$

Όπου

L_{sat} : φαινόμενη φασματική ακτινοβολία στον δορυφορικό δέκτη ($W \cdot m^2 \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \mu m^{-1}$),

$L_{\text{max}\lambda}$ και $L_{\text{min}\lambda}$: σταθερές βαθμονόμησης ($W \cdot m^2 \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \mu m^{-1}$),

Q_{calmax} : μέγιστη ψηφιοποιημένη βαθμονομημένη τιμή για κάθε εικονοστοιχείο

Q_{cal} : ψηφιακή τιμή της εικόνας

Το επόμενο βήμα είναι η μετατροπή της ακτινοβολίας σε μονάδες ανακλαστικότητας χρησιμοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία, την απόσταση γης-ήλιου και την ηλιακή ζενίθια γωνία με βάση την εξίσωση 4 (Landsat Handbook):

$$\rho = (\pi * L_{sat} * d^2) / ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s \quad [4]$$

όπου:

ρ : φασματική ανακλαστικότητα στην επιφάνεια (%),

d : απόσταση γης-ηλίου σε αστρονομικές μονάδες (AUs)

$ESUN_{\lambda}$: προσπίπτουσα φασματική ακτινοβολία στην επιφάνεια, κάθετη στις ακτίνες της γης, έξω από την ατμόσφαιρα ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)

$\cos\theta_s$: συνημίτονο της ηλιακής ζενίθιας εικόνας

Ομοίως για τις υπερφασματικές εικόνες CHRIS Proba η μετατροπή της αρχικής εικόνας σε τιμές ανακλαστικότητας έγινε με τη χρήση της εξίσωσης 5:

$$\rho = (\pi * L_{sat}) / (I * \cos\theta_s) \quad [5]$$

όπου:

ρ : φασματική ανακλαστικότητα στην επιφάνεια (%),

I : ηλιακή ακτινοβολία έκτος ατμόσφαιρας ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)

θ_s : γωνία μεταξύ της ακτινοβολίας και του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια.

Σημειώνεται ότι στην πιο πάνω σχέση η γωνία θ θεωρείται σταθερή χωρίς μεταβολές κατά τη διάρκεια λήψης της εικόνας. Το μέγεθος I προσδιορίζεται από τους πίνακες των Thuillier *et al.* (2003), όπου λαμβάνονται υπόψη και οι εποχιακές μεταβολές (J : Ιουλιανή ημέρα), όπως φαίνεται και από την εξίσωση 6:

$$I = 1 / [(1 - 0.01673 * \cos(0.9856 (J - 4)\pi / 180))]^2 \quad [6]$$

Στην περίπτωση των εικόνων EO-Hyperion, ο υπολογισμός των τιμών ακτινοβολίας είναι σχετικά απλός αφού τα κανάλια του ορατού μήκους κύματος διαιρούνται με το συντελεστή 40 ενώ τα κανάλια του υπέρυθρου με το συντελεστή 80. Ακολουθεί ο υπολογισμός των τιμών ανακλαστικότητας όπως και στην περίπτωση του δορυφόρου Landsat (βλ. εξίσωση 4) (Yuan και Niu, 2007).

5.3.3. Ατμοσφαιρική διόρθωση

Ένα σημαντικό πρόβλημα της ραδιομετρικής προεπεξεργασίας αποτελεί η ατμοσφαιρική διόρθωση (Lillesand *et al.*, 2004; Campbel 2002). Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας στις φασματικές υπογραφές και στους δείκτες βλάστησης έχουν απασχολήσει τους ερευνητές από τη δεκαετία του 1980 (Duggin και Piwinski, 1984). Η ατμόσφαιρα αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα θορύβου σε δορυφορικές απεικονίσεις, με αποτέλεσμα την αλλοίωση των παρατηρήσεων (Honkavaara *et al.*, 2009, Bagheri 2011, Conghe και Woodcock, 2003). Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις είναι αποτέλεσμα της μοριακής σκέδασης και απορρόφησης, οι οποίες αλλοιώνουν την πληροφορία που εξάγεται από τις δορυφορικές απεικονίσεις όπως είναι οι δείκτες βλάστησης. Οι Che και Price (1992) αναφέρουν μάλιστα ότι η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων μπορεί να είναι μέχρι και 10%, ανάλογα με το κανάλι, λόγω αυτών των επιδράσεων. Οι Hadjimitsis *et al.* (2010) τονίζουν στην εργασία τους τη σημασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης στους δείκτες βλάστησης, όπως είναι για παράδειγμα ο δείκτης NDVI. Η μελέτη κατέγραψε μια μέση διαφορά 18% του δείκτη NDVI πριν και μετά την εφαρμογή ατμοσφαιρικών διορθώσεων.

Με βάση τα πιο πάνω, είναι φανερό ότι η αντιμετώπιση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων είναι ένα σημαντικό στάδιο προεπεξεργασίας σε πολλές εφαρμογές τηλεπισκόπησης (Bastiaanssen *et al.*, 2000, Kaufman και Sendra, 1988). Επιπρόσθετα σε περιπτώσεις όπου οι δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται για εντοπισμό αλλαγών και παρακολούθησης μιας περιοχής, είναι αναγκαίο να εφαρμοστούν ραδιομετρικές διορθώσεις, συμπεριλαμβανομένης της ατμοσφαιρικής, έτσι ώστε όλες οι εικόνες να έχουν μια κοινή ραδιομετρία.

Ανατρέχοντας κανείς στη βιβλιογραφία εντοπίζει διάφορους αλγόριθμους διόρθωσης ατμοσφαιρικών επιδράσεων, οι οποίοι ποικίλλουν ως προς την πολυπλοκότητά τους (Courault *et al.*, 2003, Hadjimitsis *et al.*, 2004a, Hadjimitsis *et al.*, 2000). Οι Hadjimitsis *et al.* (2004b) ταξινομούν τους αλγόριθμους για διόρθωση της ατμοσφαιρικής επίδρασης στις δύο πιο κάτω κατηγορίες:

- **Κατηγορία (Α): απόλυτες ατμοσφαιρικές διορθώσεις.** Αυτή η κατηγορία μπορεί να διακριθεί με τη σειρά της σε άλλες δύο υπο-κατηγορίες: τεχνικές που

εφαρμόζουν μόνο στοιχεία από την ίδια την εικόνα (image-based atmospheric corrections) όπως είναι για παράδειγμα η μέθοδος του Σκοτεινού Στόχου (Darkest Pixel, DP), η μέθοδος της συμμεταβλητότητας (Covariance Matrix method) και διορθώσεις που βασίζονται σε φυσικά μοντέλα με την εισαγωγή δεδομένων (π.χ. επίγειες μετρήσεις ή ιστορικά μετεωρολογικά στοιχεία) που αφορούν τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας

- **Κατηγορία (B): σχετικές ατμοσφαιρικές διορθώσεις.** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους που δεν οδηγούν σε απόλυτες τιμές ανακλαστικότητας αλλά σε μια σχετική διόρθωση.

Το πλεονέκτημα των μεθόδων ατμοσφαιρικής διόρθωσης που χρησιμοποιούν στοιχεία μόνο από την δορυφορική εικόνα, έγκειται στο γεγονός ότι δεν χρειάζονται οποιαδήποτε άλλα δεδομένα κατά τη στιγμή λήψης της εικόνας (Lu *et al.*, 2002). Ένας τέτοιος αλγόριθμος, από τους πιο απλούς σε εφαρμογή, είναι μέθοδος DP. Η αρχή της μεθόδου του DP στηρίζεται στο γεγονός ότι η ακτινοβολία που καταγράφεται από τον αισθητήρα του δορυφόρου για ένα σκοτεινό στόχο (dark target), όπως είναι για παράδειγμα δεξαμενές νερού, αναμένεται να έχουν μηδενική ανακλαστικότητα (0%). Επομένως η όποια διαφορετική τιμή ανακλαστικότητας καταγράφεται στους δέκτες, όχι 0%, θεωρείται ότι οφείλεται στην επίδραση της ατμόσφαιρας και η οποία θα πρέπει να αφαιρεθεί. Βασική υπόθεση στη μέθοδο DP είναι ότι η ατμοσφαιρική επίδραση στο εγγύς και μέσο υπέρυθρο είναι μηδαμινές σε αντίθεση με το ορατό μήκος κύματος (Lu *et al.*, 2002), αφού οι σκοτεινοί στόχοι όπως είναι το νερό απορροφούν την ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο και κάθε αποτέλεσμα της σκέδασης θεωρείται αμελητέο (Hadjimitsis και Clayton, 2008).

Η χρήση υδάτινων στόχων έχει χρησιμοποιηθεί και για την αξιολόγηση άλλων αλγορίθμων ατμοσφαιρικής διόρθωσης (Hadjimitsis και Clayton 2004, 2008, 2011). Μια κριτική προσέγγιση που έγινε από τους Hadjimitsis *et al.* (2004a) με τη χρήση πολλών μοντέλων ατμοσφαιρικών διορθώσεων σε εικόνες Landsat TM (κανάλια 1-3) έδειξε ότι η μέθοδος DP δίνει τα πιο ορθά αποτελέσματα, τουλάχιστον για ημέρες χωρίς νεφοκάλυψη. Επιπλέον και άλλοι ερευνητές έχουν καταλήξει στο ίδιο συμπέρασμα (Song *et al.*, 2003, Chrysoulakis *et al.*, 2010, Hadjimitsis *et al.*, 2004b).

Η χρήση της μεθόδου DP, όπως επισημαίνεται από τους Hadjimitsis *et al.* (2004b) θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η παρουσία υδρατμών (water vapour) είναι σημαντική. Ο Forster (1984) στην έρευνά του αναφέρει ότι η ποσότητα υδρατμών σε μήκη κύματος μικρότερα από 0,7 μm μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη, αλλά όχι και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως είναι για παράδειγμα το εγγύς υπέρυθρο.

Σε πολλές εφαρμογές αρχαιολογικής έρευνας, υπάρχει η ανάγκη για χρήση όχι μόνο πρόσφατων εικόνων αλλά και εικόνων αρχείου. Με αυτό το σκεπτικό η χρήση αλγορίθμων που βασίζονται σε φυσικά μοντέλα (Κατηγορία A) είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί, αφού υπάρχει η πιθανότητα να μην είναι διαθέσιμα τα βοηθητικά στοιχεία που απαιτούνται (μετεωρολογικά δεδομένα, ορατότητες κτλ.). Αντίθετα, η χρήση μοντέλων ατμοσφαιρικής διόρθωσης με βάση μόνο τη δορυφορική εικόνα (π.χ. DP) είναι πολύ πιο εύκολο να εφαρμοστεί, ανεξαρτήτως δορυφόρου και αισθητήρα. αφού δεν απαιτεί τέτοια στοιχεία

Παρά την αναγκαιότητα ατμοσφαιρικής διόρθωσης των δορυφορικών εικόνων, στις πλείστες αρχαιολογικές εφαρμογές αυτό το στάδιο απουσιάζει εντελώς. Στο πλαίσιο της διατριβής, μελετήθηκαν ο αλγόριθμος DP και μια παραλλαγή του, με τη χρήση επίγειων μετρήσεων σε σκοτεινό στόχο (Φράγμα Ασπρόγκρεμμου, Πάφος) και σε διάφορες αρχαιολογικές θέσεις. Επιπρόσθετα μετεωρολογικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί το οπτικό πάχος υδρατμών και να επαληθευτεί η ατμοσφαιρική διόρθωση. Για το σκοπό αυτό οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας εξετάστηκαν σε δείκτες βλάστησης σε ολόκληρο το φαινολογικό κύκλο σιτηρών (σε αρχαιολογικές και μη περιοχές), καθώς επίσης και σε θέματα που αφορούν τη φωτοερμηνεία αρχαιολογικών χώρων.

Συνήθως ο υπολογισμός της ανακλαστικότητας δίνεται από την εξίσωση 4, εντούτοις η αυτή μετατροπή δεν λαμβάνει υπόψη τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις (απορρόφηση και σκέδαση). Η χρήση της μεθόδου DP μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 7:

$$\rho = (\pi * (L_{\text{sat}} - L_{\text{darkest target}}) * d^2) / ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s \quad [7]$$

όπου

L_{darkest} = ακτινοβολία στο σκοτεινό στόχο.

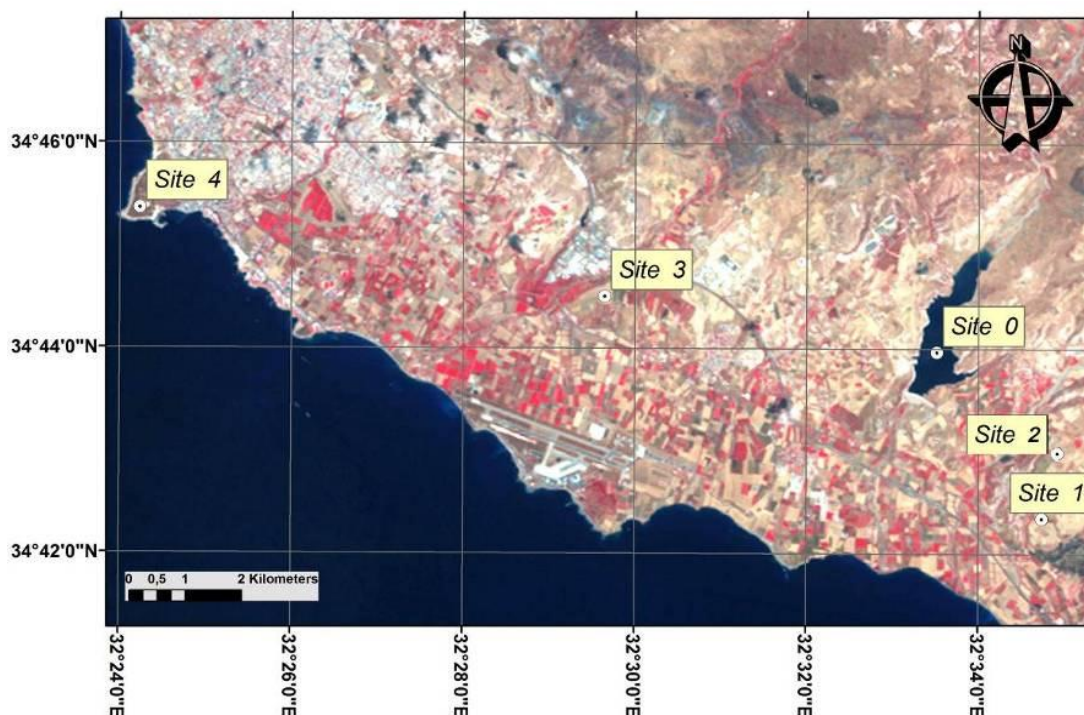
Μια δεύτερη μέθοδος που μελετήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής αφορά μία παραλλαγή της μεθόδου DP. Η μέθοδος αυτή διαφοροποιείται ως προς την DP στο γεγονός ότι ο σκοτεινός στόχος δεν θεωρείται ότι δίνει μηδενική ανακλαστικότητα αλλά πολύ κοντά σε αυτή την τιμή. Για την εφαρμογή αυτή της μεθόδου η τιμή της ανακλαστικότητας σε σκοτεινό στόχο (φράγμα) προσδιορίστηκε με ακρίβεια με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομετρικών μετρήσεων.

5.4. Εκτίμηση ατμοσφαιρικής επίδρασης για αρχαιολογικές εφαρμογές

Αν και τα περισσότερα στάδια της προεπεξεργασίας, δηλ. η γεωμετρική και η ραδιομετρική διόρθωση, εφαρμόζονται σε όλες τις αρχαιολογικές εφαρμογές και σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης γενικότερα, σε αρκετές από αυτές απουσιάζει το στάδιο της ατμοσφαιρικής διόρθωσης (Agariou *et al.*, 2011b). Μάλιστα η μελέτη της ατμοσφαιρικής επίδρασης και η ποσοτικοποίησή της για σκοπούς αρχαιολογικών ερευνών δεν έχει γίνει ποτέ στο παρελθόν.

Για το σκοπό αυτό έγινε εφαρμογή της μεθόδου DP και της παραλλαγής της με μετρήσεις από το Φράγμα του Ασπρόγκρεμμου (Θέση 0). Οι περιοχές μελέτης εστιάστηκαν στο ΝΔ τμήμα της Κύπρου. Συγκεκριμένα επελέγησαν δύο καλλιεργήσιμες εκτάσεις σε αρχαιολογικούς χώρους (Άρκαλον και Μαρτσέλλο, Θέση 1 - 2) και μια παραδοσιακή αγροτική έκταση στην ίδια περιοχή (Μουρόκαμπος, Θέση 3). Οι θέσεις 1-3 έχουν την ίδια καλλιέργεια (σιτηρά) ενώ επιπλέον έχουν παρόμοια κλιματικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον ο αρχαιολογικός χώρος της Νέας Πάφου (Θέση 4) χρησιμοποιήθηκε για σκοπούς ελέγχου της ατμοσφαιρικής διόρθωσης. Όλες οι θέσεις απεικονίζονται στην Εικόνα 60.

Χρησιμοποιήθηκαν 11 δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ (Πίνακας 5) από την USGS Glovis (<http://glovis.usgs.gov/>). Μετά το 2009, με την αποδέσμευση των εικόνων αρχείου τύπου Landsat, η πρόσβαση σε αυτά τα δεδομένα είναι δωρεάν για σκοπούς έρευνας (Hantson και Chuvieco, 2011).



Εικόνα 60: Θέσεις 0 - 4 που χρησιμοποιήθηκαν για σκοπούς ατμοσφαιρικής επίδρασης (Θέση 0: Φράγμα Ασπρόγκρεμμου, Θέση 1: Περιοχή Άρκαλων, Θέση 2: Περιοχή Μαρτσέλου, Θέση 3: Περιοχή Μουρόκαμπου και Θέση 4: Αρχαιολογικός χώρος Νέας Πάφου) .

Πίνακας 5: Δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για ατμοσφαιρική διόρθωση

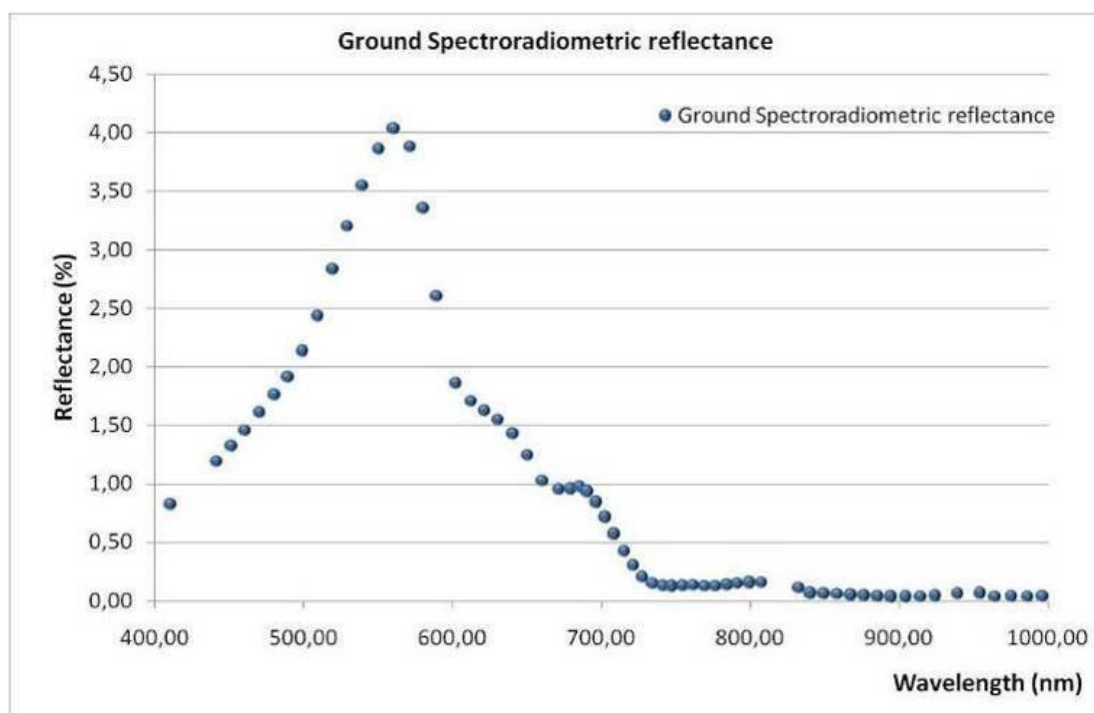
α/α	Δορυφόρος	Αισθητήρας	Ημερομηνία Λήψης	Ιουλιανή μέρα	Γωνία ύψους (ήλιου)	Αζιμούθιο (ήλιου)
1	Landsat	TM	21/06/2009	172	65,88	111,03
2	Landsat	ETM+	29/06/2009	180	65,77	111,50
3	Landsat	TM	07/07/2009	188	64,84	111,92
4	Landsat	TM	14/07/2009	195	64,16	113,41
5	Landsat	TM	23/07/2009	204	63,10	116,16
6	Landsat	TM	25/09/2009	268	49,04	145,70
7	Landsat	ETM+	22/12/2009	356	27,96	155,96
8	Landsat	ETM+	07/01/2010	7	28,30	153,70
9	Landsat	ETM+	19/03/2010	78	47,66	140,76
10	Landsat	ETM+	13/04/2010	103	56,66	134,51
11	Landsat	TM	15/06/2010	167	66,48	112,40

Έγινε εφαρμογή της διόρθωσης της ατμοσφαιρικής επίδρασης στις δορυφορικές εικόνες αφού αυτές υπέστησαν γεωμετρική και ραδιομετρική επεξεργασία με τις δύο μεθόδους: την DP και την παραλλαγή της DP με βάση επίγειες

φασματοραδιομετρικές μετρήσεις. Οι τελευταίες αφορούν 16 μετρήσεις από αντίστοιχες εξορμήσεις στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου¹ από τον Απρίλιο 2010 μέχρι και τον Οκτώβριο του 2010. Οι μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια συστήματος GPS Garmin GPS72 για την καταγραφή του στίγματος της μέτρησης (Papoutsas *et al.*, 2011). Το φορητό φασματοραδιόμετρο GER 1500 χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή της ανακλαστικότητας του στόχου, με τη βύθιση του καλωδίου οπτικής ίνας (fiber optic probe) το οποίο ήταν ενσωματωμένο στο όργανο (Εικόνα 61). Η Εικόνα 62 παρουσιάζει την φασματική υπογραφή του νερού μετά την επεξεργασία των μετρήσεων.



Εικόνα 61: Μετρήσεις στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου. Μετρηση στο φακωτικό στόχο (α) και βύθιση της οπτικής ίνας στο φράγμα (β)



Εικόνα 62: Φασματική υπογραφή νερού στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου.

¹ Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν μέρος της διδακτορικής διατριβής της Χριστιάνας Παπούτσας με θέμα την παρακολούθηση των επιφανειακών υδάτων της Κύπρου με Τηλεπισκόπηση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις επιτόπιες επισκέψεις στο φράγμα παρουσιάζει ο Πίνακας 6. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές ανακλαστικότητας στο φράγμα ήταν πολύ χαμηλές και πλησίαζαν το μηδέν, ιδιαίτερα στο εγγύς υπέρυθρο. Συγκεκριμένα η μέση ανακλαστικότητα στο μπλε φάσμα υπολογίστηκε στο 1,67% ($\pm 0,44\%$), στο πράσινο 3,21% ($\pm 0,72\%$), στο κόκκινο 1,07% ($\pm 0,30\%$) και στο εγγύς υπέρυθρο 0,09% ($\pm 0,03\%$). Με βάση τις μετρήσεις αυτές η τυπική απόκλιση των μετρήσεων είναι μικρότερη από 1%, ενώ ιδιαίτερα στα κανάλια 3 και 4 (που χρησιμοποιούνται συχνά σε δείκτες βλάστησης) η τυπική απόκλιση ήταν μικρότερη από 0,30%. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παραλλαγή της μεθόδου του σκοτεινού στόχου.

Πίνακας 6: Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στο φράγμα του Ασπρόγκρεμμου.

Μέτρηση	Κανάλι 1 (%)	Κανάλι 2 (%)	Κανάλι 3 (%)	Κανάλι 4 (%)
1	1,08	2,20	0,70	0,05
2	1,48	2,89	1,08	0,09
3	1,76	3,70	1,39	0,10
4	1,35	3,12	1,14	0,09
5	1,58	3,58	1,28	0,11
6	1,72	3,53	1,24	0,10
7	1,56	3,22	1,10	0,11
8	2,73	4,88	1,52	0,12
9	1,61	2,95	0,80	0,05
10	1,57	2,86	0,82	0,06
11	1,49	2,82	0,78	0,07
12	2,15	3,87	1,17	0,10
13	1,78	3,31	1,05	0,11
14	0,96	1,88	0,54	0,05
15	1,56	2,70	0,93	0,07
16	2,36	3,90	1,62	0,13
M.O	1,67	3,21	1,07	0,09
max	2,73	4,88	1,62	0,13
min	0,96	1,88	0,54	0,05
std	0,44	0,72	0,30	0,03

Με βάση μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία παραχωρήθηκαν από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου (Πίνακας 7) φάνηκε ότι η σχετική υγρασία ήταν παρόμοια στην περιοχή ($\approx 57-67\%$) για όλες τις ημερομηνίες εκτός από τις 19/03/2010 (33%) και 15/06/2010 (77%).

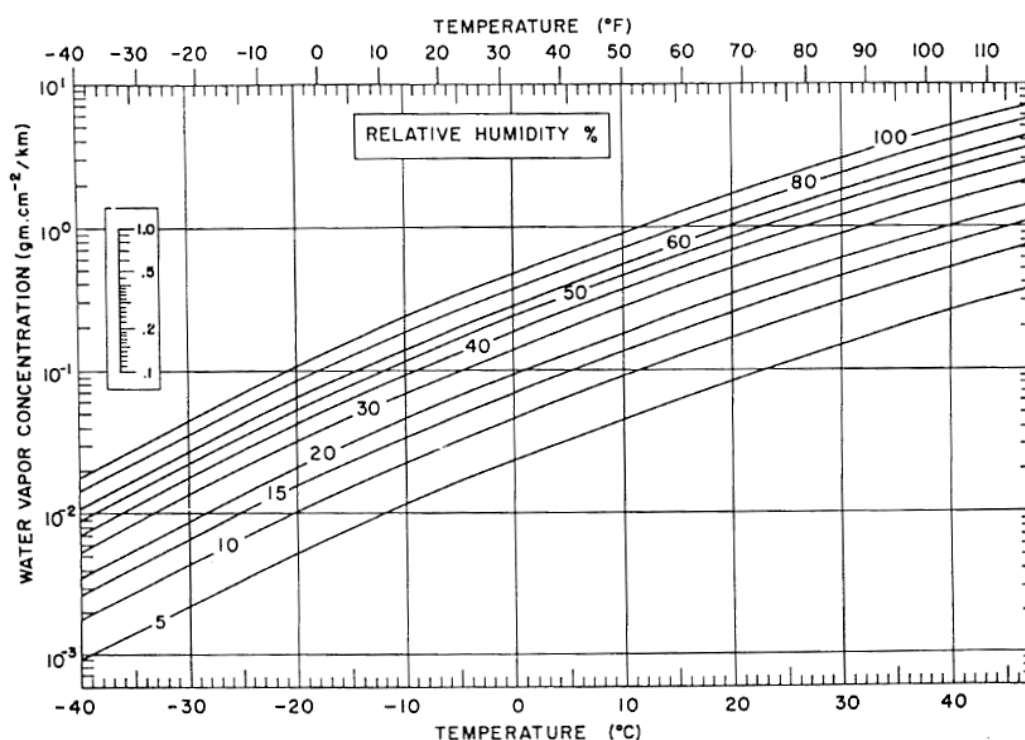
Από τις εργασίες των Forster (1984), McClatchey *et al.* (1971) και Hadjimitsis και Clayton (2008), η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η μάζα των υδρατμών ή η στήλη των υδρατμών στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 63). Η χρήση της μεθόδου DP δεν απαιτεί τέτοια δεδομένα, εντούτοις ο υπολογισμός της μάζας των υδρατμών την ημέρα λήψης της κάθε δορυφορικής εικόνας που χρησιμοποιήθηκε, έγινε με σκοπό να ερευνηθεί κατά πόσο υπάρχει απορρόφηση από τους υδρατμούς κατά την ατμοσφαιρική διόρθωση.

Πίνακας 7: Μετεωρολογικά δεδομένα από το αεροδρόμιο της Πάφου (δεδομένα από την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου).

α/α	Ημερομηνία λήψης	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	θερμοκρασία στις 13:00 (°C)	Ημερήσια βροχόπτωση (mm)	Σχετική υγρασία στις 13:00 (%)
1	21/06/2009	31	20	29.5	0.00	62
2	29/06/2009	28	18	27.8	0.00	68
3	07/07/2009	30	22	29.5	0.00	67
4	14/07/2009	30	21	29.4	0.00	64
5	23/07/2009	32.3	21	32.3	0.00	68
6	25/09/2009	29	19	28.3	0.05	58
7	22/12/2009	20.5	12.9	20.5	0.33	57.4
8	07/01/2010	20.0	9.3	19,6	0.00	63
9	19/03/2010	18.9	7.1	18.5	0.00	30
10	13/04/2010	20.7	11.3	20.6	0.00	67
11	15/06/2010	27.4	19.4	26.7	0.00	77

Στην περίπτωση αυτή η μερική πίεση των υδρατμών μπορεί να υπολογισθεί με βάση το νόμο για τα ιδανικά αέρια. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της παρουσίας υδρατμών μπορεί να αγνοηθεί για μήκη κύματος μικρότερα από 0,7 μm (Forster 1984; Hadjimitsis και Clayton, 2008). Με βάση αυτή την υπόθεση η απορρόφηση λόγω υδρατμών για τα ορατά κανάλια του δορυφόρου Landsat TM/ETM+ (Κανάλι 1: 0.45 – 0.52 μm ; Κανάλι 2: 0.52 – 0.60 μm ; Κανάλι 3: 0.63 - 0.69 μm) θεωρείται μηδενική. Παρόλα αυτά η στήλη υδρατμών για το εγγύς υπέρυθρο κανάλι (Κανάλι 4: 0.76 -0.90 μm) του ίδιου δορυφόρου θα πρέπει να

υπολογισθεί, όπως δείχνει ο Πίνακας 8. Με βάση τα στοιχεία αυτά οι τελευταίες τρεις εικόνες (19/03/2010; 13/04/2010 και 15/06/2010) που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό της διατριβής παρουσιάζουν το μικρότερο οπτικό πάχος υδρατμών. Στις υπόλοιπες εικόνες το οπτικό πάχος κυμαίνεται από 0,031 – 0,067. Ο υπολογισμός του οπτικού πάχους των υδρατμών μας επιτρέπει να δούμε με προσοχή τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης DP που ακολουθούν, αφού αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την εφαρμογή της DP (Hadjimitsis *et al.*, 2004b)



Εικόνα 63: Υπολογισμός ισοδύναμης μάζας υδρατμών με βάση τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία (McClatchey *et al.*, 1971)

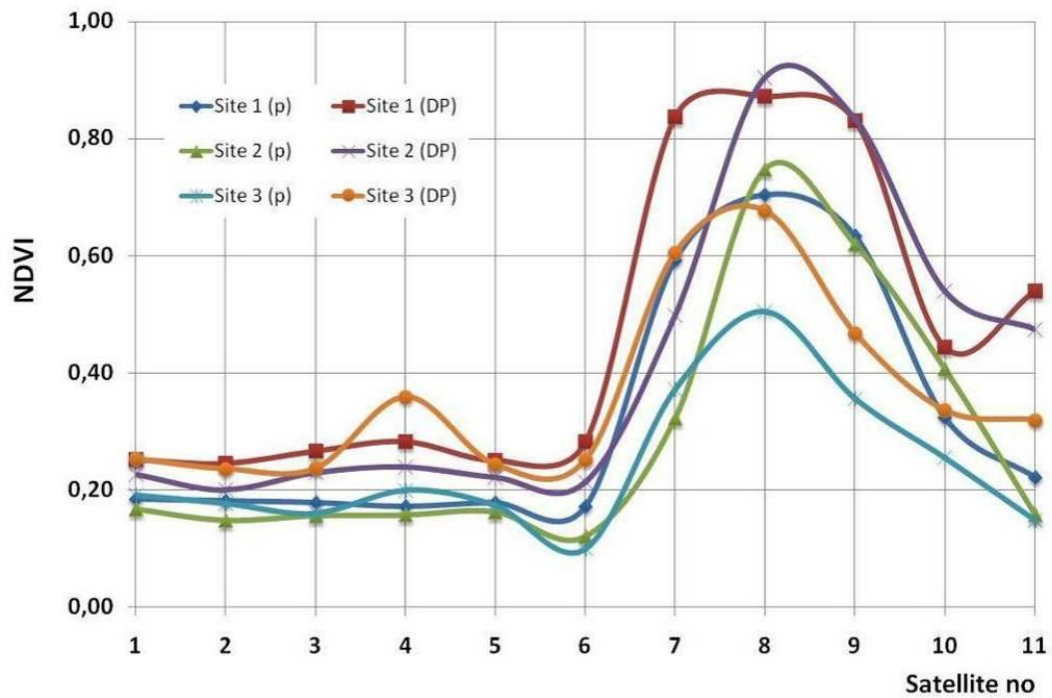
Τόσο η μέθοδος του DP όσο και η παραλλαγή της ίδιας μεθόδου με τις επίγειες μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε για την ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων. Ακολούθως υπολογίστηκε ο δείκτης NDVI για τις θέσεις 1-3 τόσο πριν όσο και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 64 και Εικόνα 65 οι τιμές του δείκτη NDVI είναι μικρότερες στις εικόνες χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση σε αντίθεση με τις διορθωμένες εικόνες.

Πίνακας 8: Ισοδύναμη μάζα υδρατμών και οπτικό πάχος υδρατμών για τις δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη

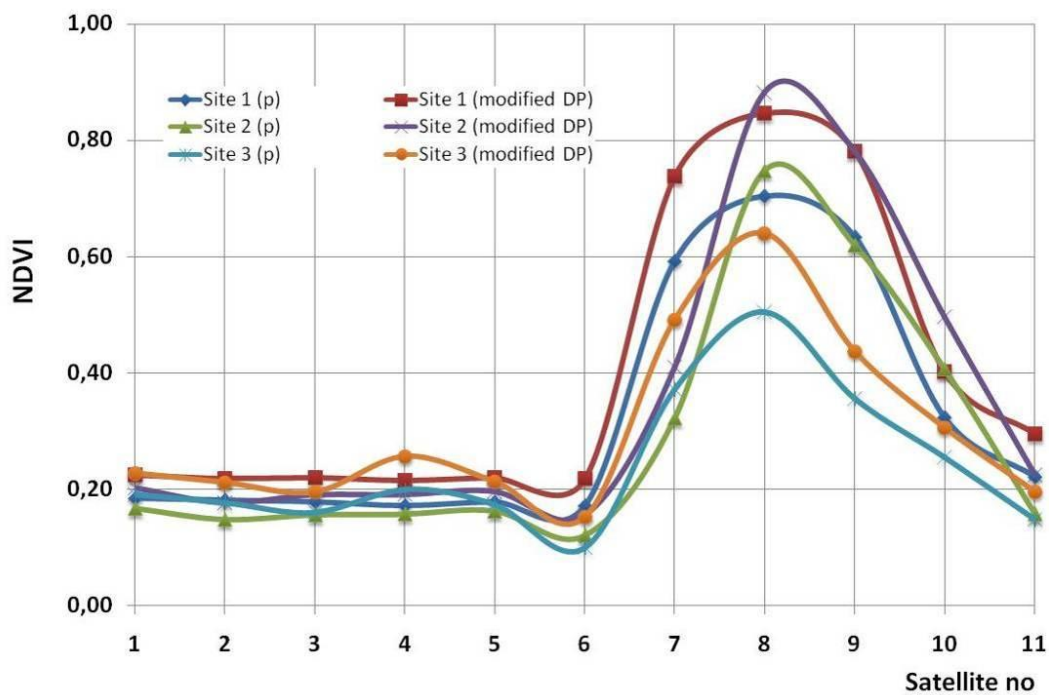
α/α	Ημερομηνία λήψης	Ισοδύναμη μάζα υδρατμών (g /cm ²)	τ _{H2O} (οπτικό πάχος υδρατμών)
			Κανάλι 4 (0.76 - 0.90 μm)
1	21/06/2009	1,70	0,055
2	29/06/2009	1,80	0,058
3	07/07/2009	1,95	0,063
4	14/07/2009	1,95	0,063
5	23/07/2009	2,10	0,067
6	25/09/2009	1,50	0,048
7	22/12/2009	1,00	0,031
8	07/01/2010	1,10	0,034
9	19/03/2010	0,25	0,008
10	13/04/2010	0,30	0,009
11	15/06/2010	0,85	0,026

Μάλιστα η ατμοσφαιρική διόρθωση τείνει να δίνει ψηλότερες τιμές NDVI για όλες τις θέσεις καθόλη τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου. Η μέση διαφορά της επίδρασης της ατμόσφαιρας στο δείκτη NDVI υπολογίστηκε στο 0.10 για την τροποποιημένη μέθοδο DP (Εικόνα 64). Παρόλα αυτά η σχετική διαφορά που προκύπτει στο δείκτη NDVI μπορεί να φθάσει μέχρι και το 25% πριν και μετά τη διόρθωση. Αντίστοιχα στη μέθοδο DP η μέση διαφορά υπολογίστηκε στο 0.16, ενώ η σχετική διαφορά στο 32% (Εικόνα 65).

Ο έλεγχος Student's t-test που έγινε έδειξε ότι οι διαφορές NDVI που προκύπτουν πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση είναι σημαντικές. Συγκεκριμένα: $t_{observed}$ για τις θέσεις 1 – 3: $t_1 = 5,205$; $t_2 = 5,064$; $t_3 = 14,587$ και $t_{statistical}$: $t_{1-3} = 2.228$ για $n - 1 = 10$ βαθμούς ελευθερίας σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%.



Εικόνα 64: Τιμές NDVI για τις Θέσεις 1 -3 με βάση (α) τις τιμές ανακλαστικότητας χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση και (β) τιμές ανακλαστικότητας μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση (DP αλγόριθμος)



Εικόνα 65: Τιμές NDVI για τις Θέσεις 1 -3 με βάση (α) τις τιμές ανακλαστικότητας χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση και (β) τιμές ανακλαστικότητας μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση (με βάση τις επίγειες μετρήσεις)

Αυτός ο έλεγχος φανερώνει ότι η ατμοσφαιρική επίδραση έχει μια σημαντική στατιστική διαφορά στον υπολογισμό δεικτών βλάστησης όπως είναι ο NDVI. Στην περίπτωση της εικόνας 15/06/2010 όπου έχει καταγραφεί χαμηλή τιμή στη στήλη υδρατμών, η διαφορά του δείκτη NDVI πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες εικόνες (≈ 0.15 σε απόλυτη τιμή NDVI ή 30% σχετική διαφορά με την παραλλαγμένη μέθοδο DP και ≈ 0.30 σε απόλυτη τιμή NDVI ή 60% σχετική διαφορά για τη μέθοδο DP). Αυτές οι διαφοροποιήσεις μπορεί να είναι αποτέλεσμα της μηδαμινής επίδρασης των υδρατμών στην ανακλαστικότητα της εικόνας.

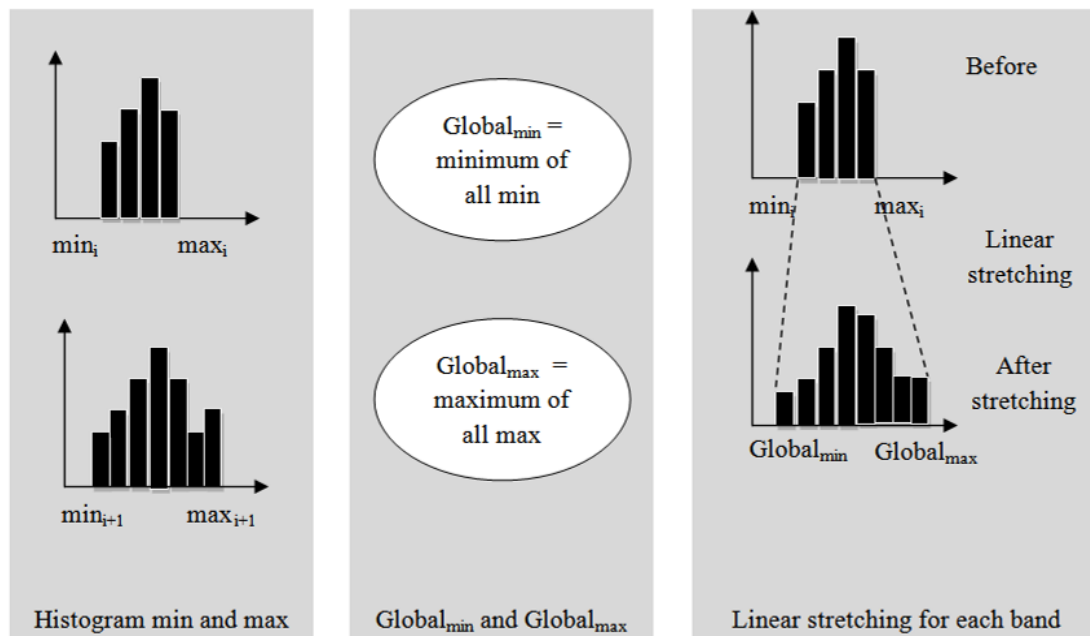
Τέτοιες διαφοροποιήσεις έχουν καταγραφεί και αλλού στη βιβλιογραφία. Οι Conghe και Woodcock (2003) αναφέρουν στη μελέτη τους ότι ο δείκτης NDVI έδωσε ψηλότερες τιμές σε ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες σε σχέση με τις μη διορθωμένες. Αυτό επαληθεύεται και στις θεωρητικές αναλύσεις των Pinty και Verstraete (1992). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις εικόνες που έχουν ληφθεί κατά το χρονικό διάστημα όπου υπάρχει βλάστηση, από το Σεπτέμβριο μέχρι και το Μάιο (εικόνες 6-10, Πίνακας 5). Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 64 και Εικόνα 65, μπορεί να εμφανιστούν σημαντικές διαφορές στις τιμές NDVI και να οδηγήσουν σε παρερμηνείες αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο δείκτης NDVI τείνει να δώσει παρόμοια αποτελέσματα ακόμη και χωρίς ατμοσφαιρική διόρθωση με παραλλαγές στον άξονα των Y (τιμές NDVI). Αυτό φυσικά είναι αποτέλεσμα της κανονικοποίησης των τιμών των καναλιών από το ίδιο τον δείκτη NDVI, με αποτέλεσμα οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις να μειώνονται. Στη βιβλιογραφία έχουν εντοπιστεί δείκτες όπως είναι για παράδειγμα ο ARVI και ο SARVI οι οποίες μειώνουν καλύτερα τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις (Kaufman και Tanré, 1992).

Για να γίνει εκτίμηση της ατμοσφαιρικής επίδρασης στις αρχαιολογικές εφαρμογές και ιδιαίτερα για τον εντοπισμό υπεδάφίων καταλοίπων, επιλέχθηκε ένας γνωστός υπεδάφιος στόχος στον αρχαιολογικό χώρο της Νέας Πάφου (Θέση 1, Εικόνα 60) και το φράγμα Ασπόγκρεμμου ως σκοτεινός στόχος (Θέση 0, Εικόνα 60) για οπτική φωτοερμηνευτική σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά τη διόρθωση. Στη Νέα Πάφο το αρχαίο αμφιθέατρο (;) νότια του σημερινού αρχαιολογικού χώρου (Εικόνα 66) επιλέχθηκε κυρίως λόγω των μεγάλων του διαστάσεων, αφού είναι ορατό και σε εικόνες μέσης ανάλυσης όπως του Landsat ($\approx 3 \times 2$ pixels).



Εικόνα 66: Η αρχαιολογική θέση που μελετήθηκε για την ατμοσφαιρική επίδραση στη Νέα Πάφο (Εικόνα από Google Earth ©).

Με στόχο όλες οι εικόνες (Πίνακας 5) να έχουν μια κοινή ραδιομετρία, καταγράφηκαν η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή από τα ιστογράμματα κάθε εικόνας για κάθε κανάλι (Κανάλι 1-4), τόσο πριν όσο και μετά την διόρθωση της ατμοσφαιρικής επίδρασης. Στη συνέχεια όλα τα ιστογράμματα των εικόνων υπέστησαν γραμμική επέκταση με βάση $Global_{min}$ και $Global_{max}$ για κάθε κανάλι (Εικόνα 67)



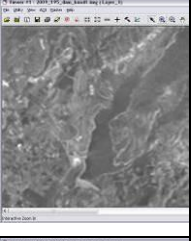
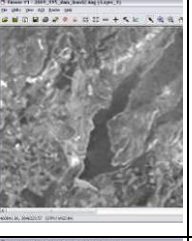
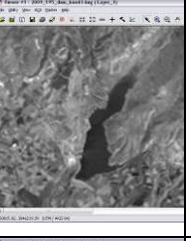
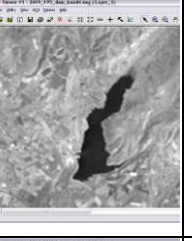

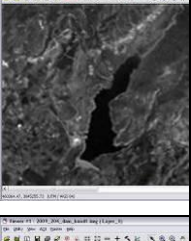
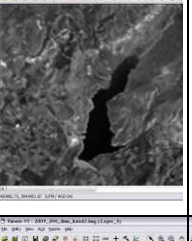
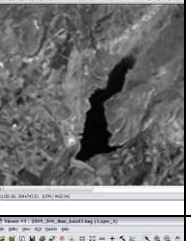
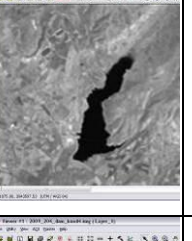

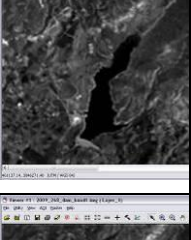
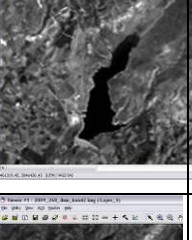
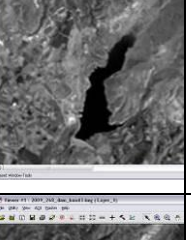
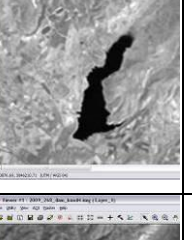
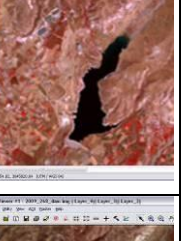
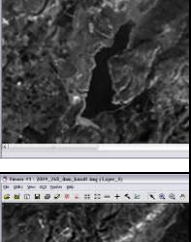
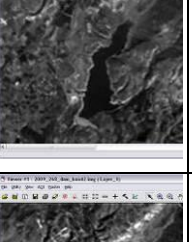
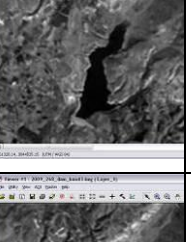
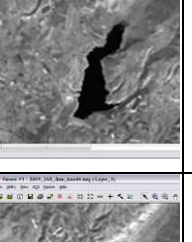
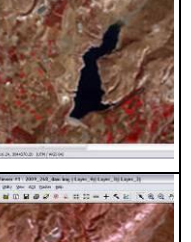
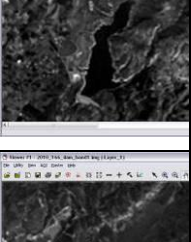
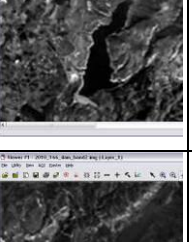
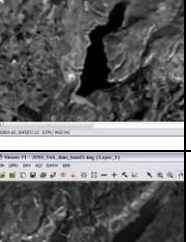
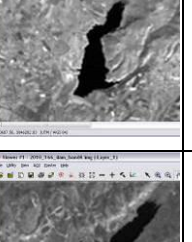
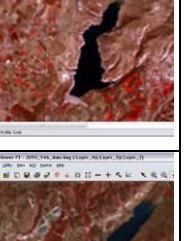
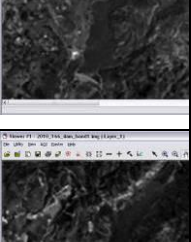
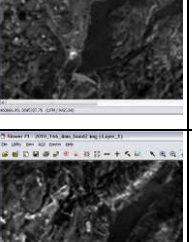
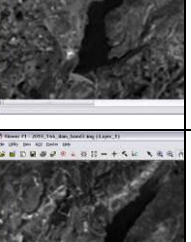
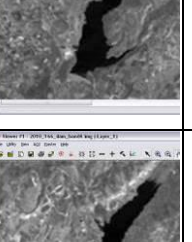
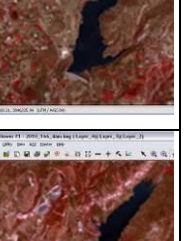
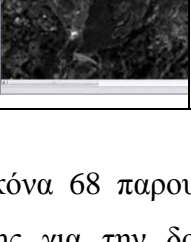
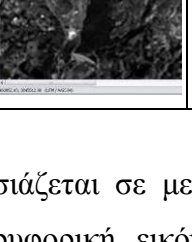
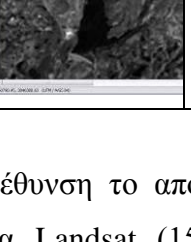
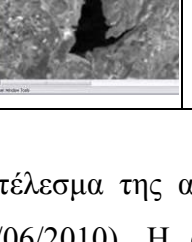






Εικόνα 67: Υπολογισμός των $Global_{min}$ και $Global_{max}$ για κάθε κανάλι, με στόχο την γραμμική επέκταση του ιστογράμματος.

Ο Πίνακας 9 δείχνει τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης γύρω από την περιοχή του Ασπρόγκρεμμου με βάση την τροποποιημένη μέθοδο DP.

Όπως φαίνεται, οι εικόνες βελτιώθηκαν ποιοτικά μετά την αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, τόσο σε κάθε κανάλι όσο και στο έγχρωμο σύνθετο NIR-R-G. Οι ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες ενισχύουν το ιστόγραμμα της εικόνας (επέκταση ιστογράμματος) και βελτιώνουν τόσο την ποιότητα όσο και την φωτοερμηνευτική ικανότητα της εικόνας.

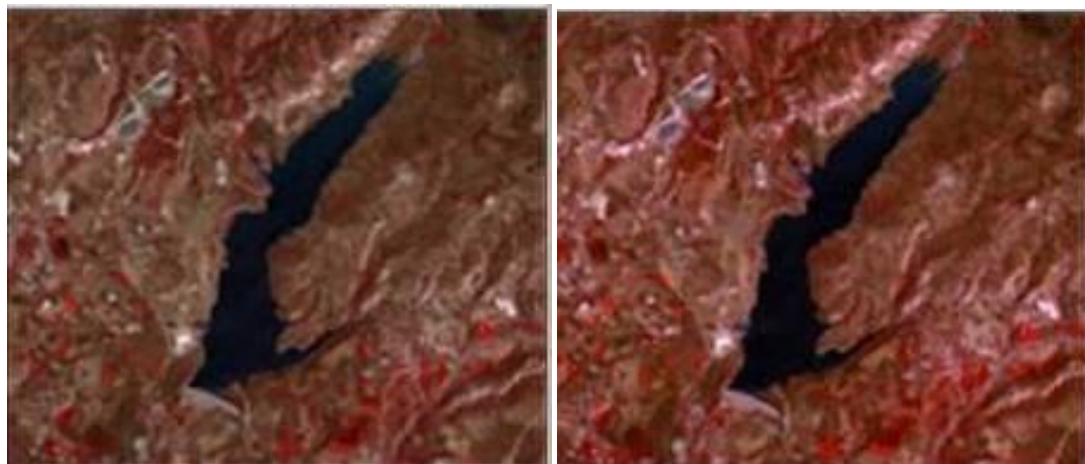
Πίνακας 9: Δείγμα από τα αποτελέσματα ατμοσφαιρικής διόρθωσης με την τροποποιημένη μέθοδο DP στην περιοχή του Ασπρόγκρεμμου

		Κανάλι 1	Κανάλι 2	Κανάλι 3	Κανάλι 4	NIR-Red-Green
21/06/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
07/07/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
14/07/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					

23/07/2009	Μετά την ατμοσφαιρική					
	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
	Πριν την ατμοσφαιρική					
25/09/2009	Μετά την ατμοσφαιρική					
	Πριν την ατμοσφαιρική					
15/06/2010	Μετά την ατμοσφαιρική					
	Πριν την ατμοσφαιρική					

Στην Εικόνα 68 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση το αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης για την δορυφορική εικόνα Landsat (15/06/2010). Η ατμοσφαιρικά

διορθωμένη εικόνα φαίνεται ότι έχει ενισχυθεί ραδιομετρικά με αποτέλεσμα η εικόνα να είναι πιο “καθαρή”. Ο σκοτεινός στόχος στο φράγμα διαφοροποιείται ακόμη περισσότερο μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση ενώ οι περιοχές με βλάστηση είναι ακόμη πιο έντονες.



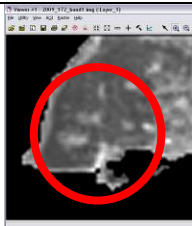
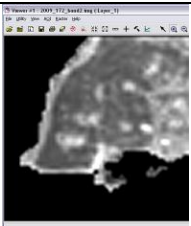
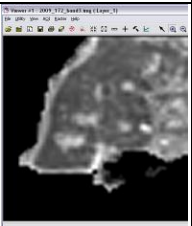
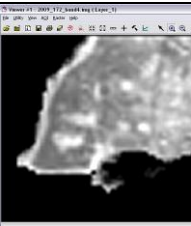
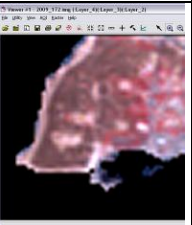
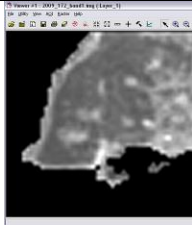
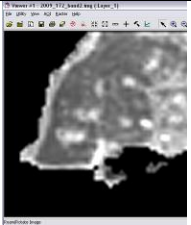
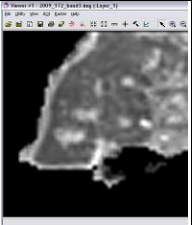
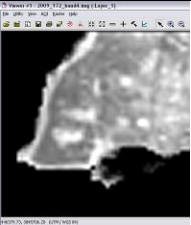
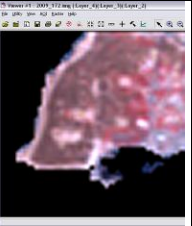
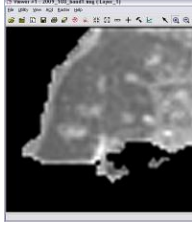
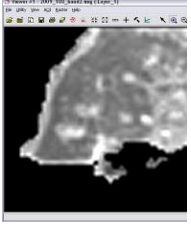
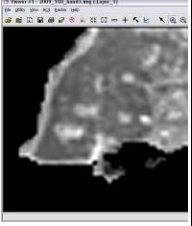
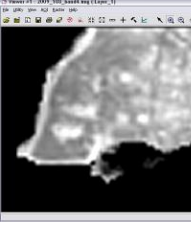
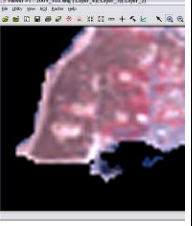
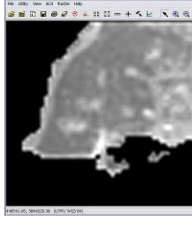
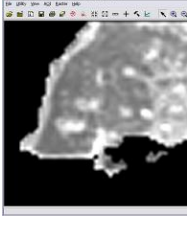
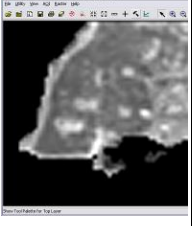
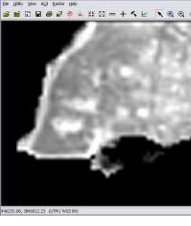
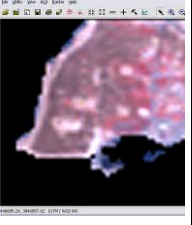
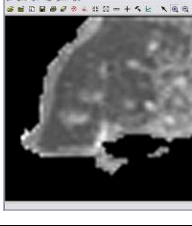
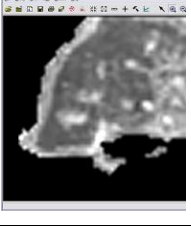
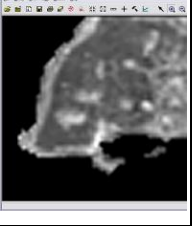
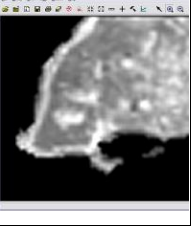
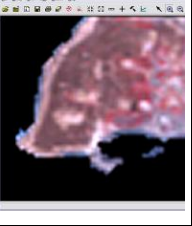
Εικόνα 68: Έγχρωμο σύνθετο NIR-R-G πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την ατμοσφαιρική διόρθωση (εικόνα 15/06/2010).

Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, με βάση την τροποποιημένη μέθοδο DP για κάθε κανάλι την περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Νέας Πάφου. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και πάλι φαίνεται να βελτιώνεται μετά την αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Καλύτερες εικόνες, σε θέματα φωτοερμηνευτικής διαδικασίας, είναι αυτές που έχουν χαμηλό οπτικό πάχος υδρατμών (19/03/2010; 13/04/2010 και 15/06/2010). Σε αυτές τις ημέρες το οπτικό πάχος υδρατμών ήταν το ελάχιστο (λιγότερο από 0.03). Γενικότερα όμως σε εικόνες όπου η τιμή αυτή είναι μικρότερη από 0.05, τότε η ποιότητα της διορθωμένης εικόνας βελτιώνεται σε σχέση με την αρχική. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερου οπτικού πάχους υδρατμών, όπως για παράδειγμα η εικόνα 14/07/2009 (οπτικό πάχος υδρατμών = 0.063), η ποιότητα της εικόνας δεν βελτιώνεται αισθητά.

Ο Πίνακας 11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης για την αρχαιολογική θέση της Νέας Πάφου με τη μέθοδο του DP. Ως σκοτεινός στόχος για την εφαρμογή της μεθόδου επιλέχθηκε το φράγμα του Ασπρόγκρεμμου. Με βάση τα αποτελέσματα που εμφανίζει ο Πίνακας 11, η μέθοδος του DP ενισχύει περισσότερο το ιστόγραμμα της εικόνας σε σχέση με την παραλλαγή της μεθόδου DP. Επιπλέον, σε περίπτωση όπου έχει καταγραφεί χαμηλό πάχος υδρατμών η βελτιστοποίηση ενισχύεται υπερβολικά, όπως στην περίπτωση της εικόνας 15/06/2010. Αυτό

οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την γραμμική επέκταση του ιστογράμματος με τη χρήση $Global_{min}$ και $Global_{max}$, η εικόνα 15/06/2010 έχει τη μικρότερη τιμή ανακλαστικότητας στο κανάλι 4 (33%) σε σχέση με τις άλλες εικόνες. Το $global_{maximum}$ για τις εικόνες υπολογίσθηκε στο 57% και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη ενίσχυση του ιστογράμματος (over-stretch) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κορεσμένα (saturated) εικονοστοιχεία.

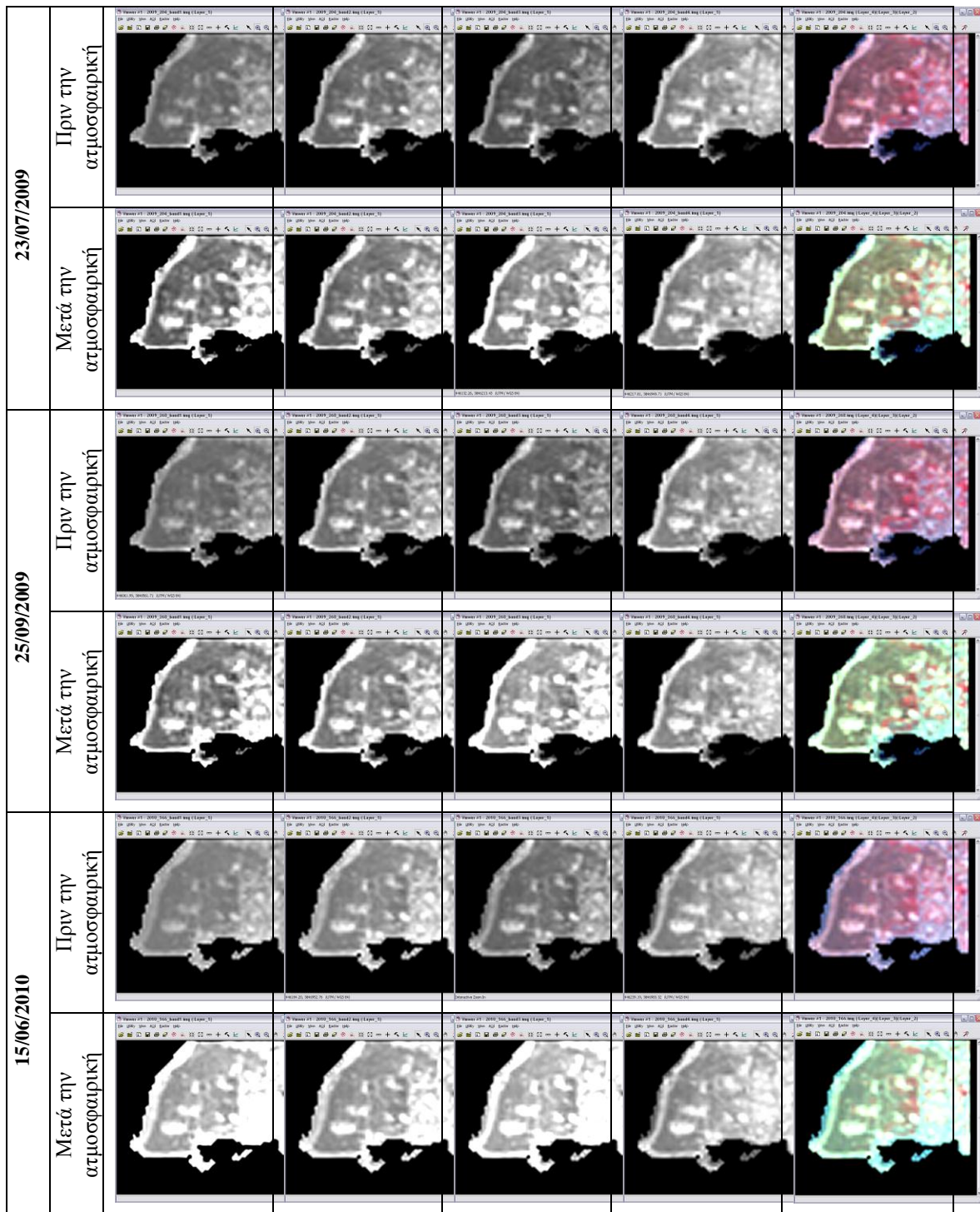
Πίνακας 10: Δείγμα από τα αποτελέσματα ατμοσφαιρικής διόρθωσης με την τροποποιημένη μέθοδο DP στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Νέας Πάφου (επισημαίνεται με κόκκλο στην πρώτη εικόνα αριστερά).

		Κανάλι 1	Κανάλι 2	Κανάλι 3	Κανάλι 4	NIR-Red-Green
21/06/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
07/07/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
14/07/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					

23/07/2009	Μετά την ατμοσφαιρική							
	Πριν την ατμοσφαιρική							
	Μετά την ατμοσφαιρική							
	Πριν την ατμοσφαιρική							
	25/09/2009	Μετά την ατμοσφαιρική						
		Πριν την ατμοσφαιρική						
		Μετά την ατμοσφαιρική						
		Πριν την ατμοσφαιρική						
		15/06/2010	Πριν την ατμοσφαιρική					
			Μετά την ατμοσφαιρική					
Πριν την ατμοσφαιρική								
Μετά την ατμοσφαιρική								

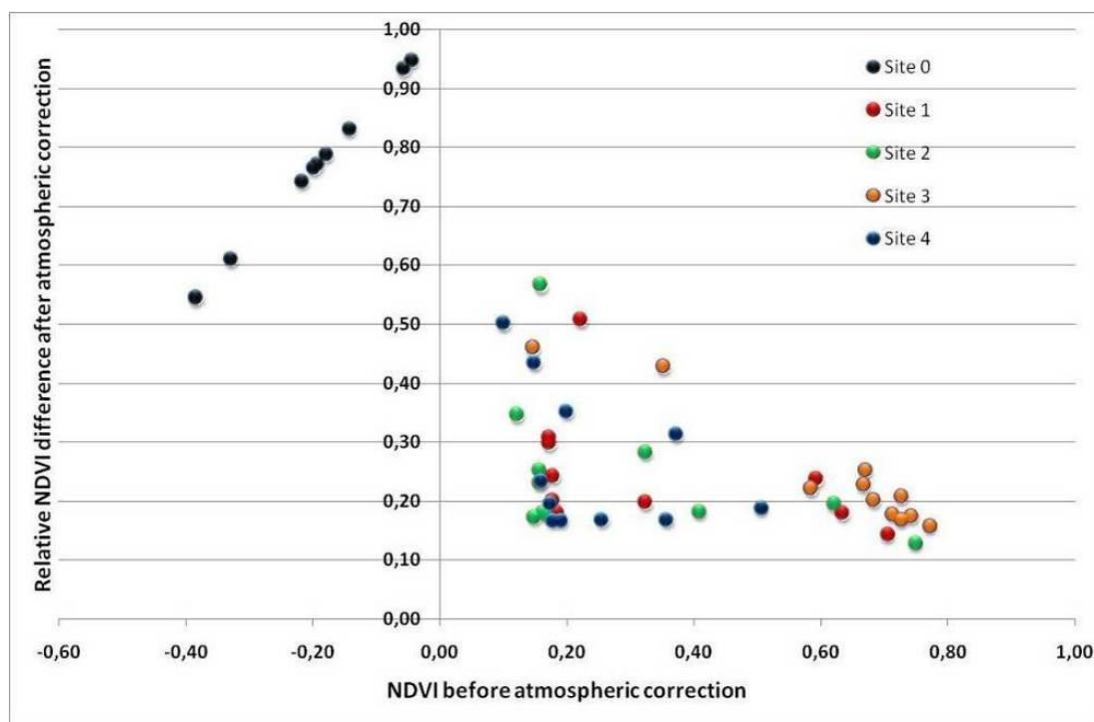
Πίνακας 11: Δείγμα από τα αποτελέσματα ατμοσφαιρικής διόρθωσης με την μέθοδο DP στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Νέας Πάφου.

		Κανάλι 1	Κανάλι 2	Κανάλι 3	Κανάλι 4	NIR-Red-Green
21/06/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
07/07/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					
14/07/2009	Πριν την ατμοσφαιρική					
	Μετά την ατμοσφαιρική					



Η Εικόνα 69 παρουσιάζει το αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής επίδρασης στο δείκτη NDVI. Όπως αναμενόταν για τη Θέση 0 (φράγμα Ασπρόγκρεμμου) υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ των τιμών πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση, αφού χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή από τα κανάλια 3 και 4. Παρόλα αυτά για τις υπόλοιπες θέσεις, έχουν καταγραφεί μεγάλες διαφοροποιήσεις (μη – γραμμικές), οι οποίες δεν είναι δυνατό να διορθωθούν με γραμμικές ενισχύσεις των ιστογραμμάτων

της κάθε εικόνας και για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Αυτό είναι και αναμενόμενο αφού η ατμοσφαιρική επίδραση σε κάθε εικόνα είναι διαφορετική. Οι σχετικές διαφορές πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση, για χαμηλές τιμές NDVI, και συγκεκριμένα για τιμές κάτω από 0.40 οι διαφορές μπορεί να φθάσουν μέχρι και 50%. Για μεγαλύτερες τιμές NDVI (> 0.40) οι διαφορές που έχουν καταγραφεί είναι μικρότερες ($\approx 20\%$) (Πίνακας 12).

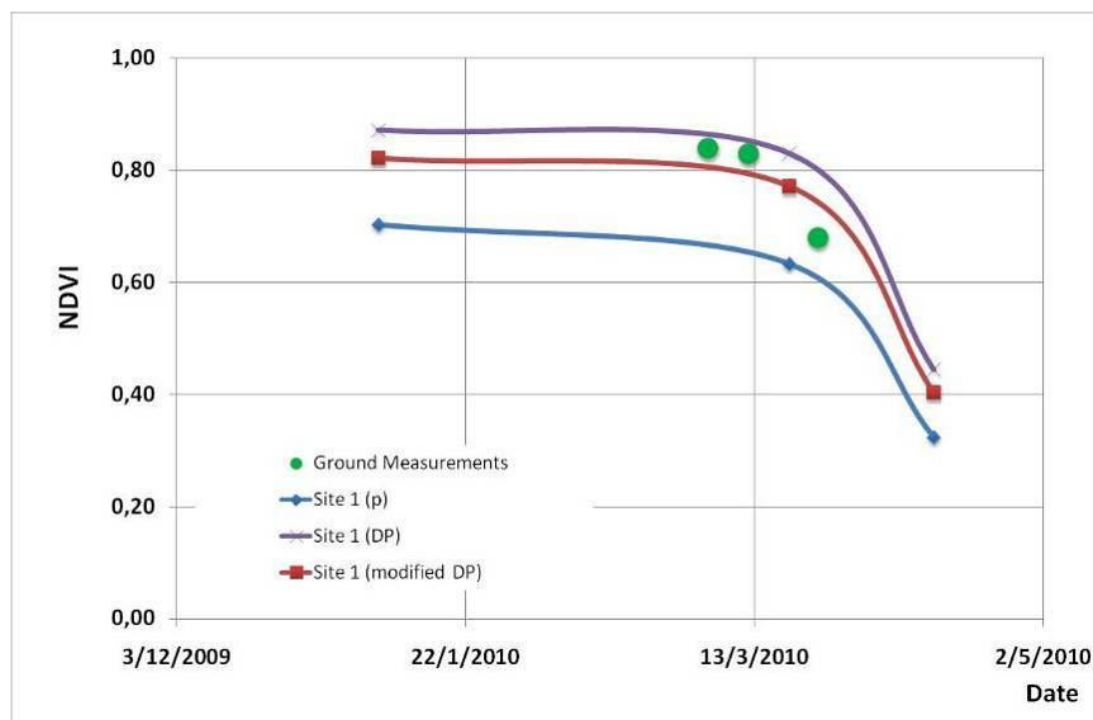


Εικόνα 69: Σχετικές διαφορές NDVI πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.

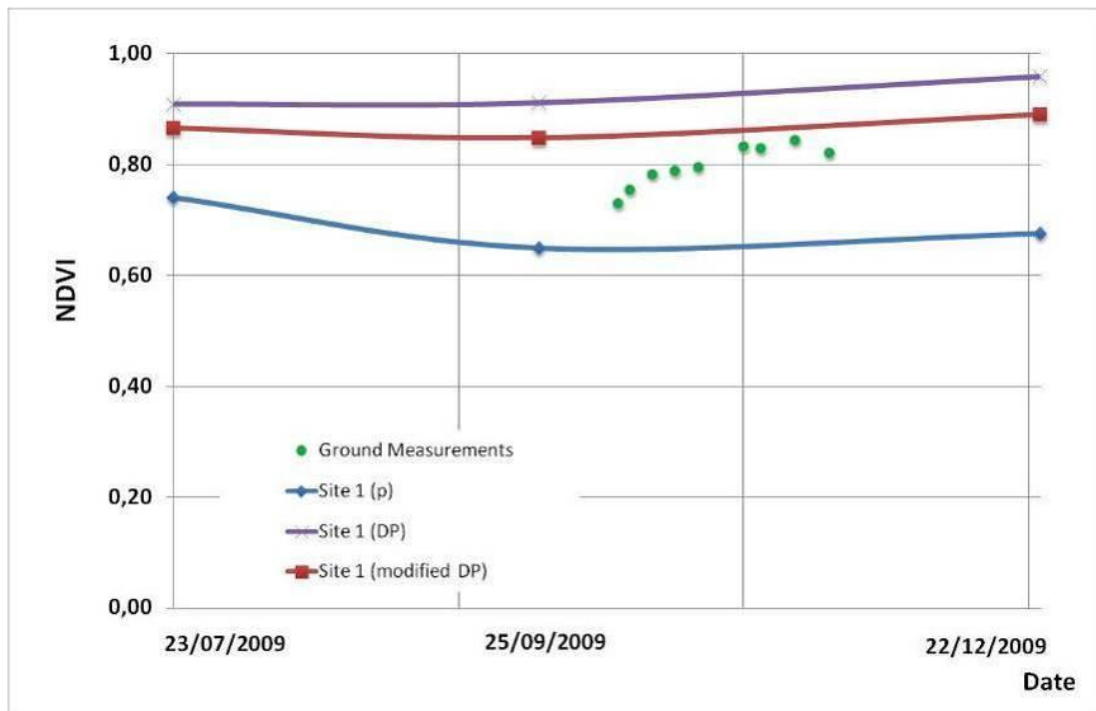
Με σκοπό να γίνει και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, χρησιμοποιήθηκαν επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις από δύο περιοχές μελέτης. Η Εικόνα 70 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις πεδίου στην περιοχή της Παλαιπάφου (Άρκαλον) κατά το μήνα Μάρτιο 2010, όπου το κριθάρι ήταν σε πλήρη ανάπτυξη (05/03/2009; 12/03/2009 και 24/03/2009). Όπως φαίνεται οι επίγειες μετρήσεις πλησιάζουν τα αποτελέσματα των ατμοσφαιρικά διορθωμένων εικόνων. Μάλιστα η μέθοδος του τροποποιημένου σκοτεινού στόχου δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Με βάση αυτές τις μετρήσεις φαίνεται ότι η απουσία ατμοσφαιρικών διορθώσεων μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις του δείκτη NDVI μέχρι και 15%. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και από τη δεύτερη περιοχή μελέτης, μια αγροτική έκταση πλησίον του αεροδρομίου Πάφου (Εικόνα 71).

Πίνακας 12: Σχετική διαφορά του δείκτη NDVI για όλες τις θέσεις πριν (Π) και μετά (Μ) την ατμοσφαιρική διόρθωση (οι min και max τιμές για κάθε θέση έχουν υπογραμμιστεί)

α/α	Ημερομηνία λήψης εικόνας	Θέση 0 (Π)	Θέση 0 (Μ)	Σχετική διαφορά %				
				Θέση 0	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
1	21/06/2009	-0,217	-0,845	0,743	0,180	0,178	0,169	<u>0,167</u>
2	29/06/2009	-0,194		0,771	0,178	0,173	0,174	0,168
3	07/07/2009	-0,143		0,831	0,243	0,231	0,252	0,235
4	14/07/2009	-0,057		0,932	0,298	0,252	0,428	0,352
5	23/07/2009	-0,217		0,743	0,200	0,181	0,178	0,197
6	25/09/2009	-0,329		0,611	0,309	0,346	0,207	0,501
7	22/12/2009	-0,385		<u>0,545</u>	0,237	0,283	0,227	0,313
8	07/01/2010	-0,383		0,546	<u>0,143</u>	<u>0,129</u>	<u>0,158</u>	0,188
9	19/03/2010	-0,179		0,788	0,180	0,195	0,221	0,169
10	13/04/2010	-0,199		0,765	0,198	0,182	0,201	0,169
11	15/06/2010	-0,045		<u>0,946</u>	<u>0,508</u>	<u>0,566</u>	<u>0,459</u>	<u>0,435</u>



Εικόνα 70: Σύγκριση αποτελεσμάτων NDVI όπως προκύπτουν από τις δορυφορικές εικόνες (πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση) σε σχέση με τις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις για τη θέση 1 (περιοχή Παλαιπάφου, Αρκαλον).



Εικόνα 71: Σύγκριση αποτελεσμάτων NDVI όπως προκύπτουν από τις δορυφορικές εικόνες (πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση) σε σχέση με τις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις για αγροτική περιοχή πλησίον του αεροδρομίου Πάφου, ΝΔ Κύπρος.

Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων είναι αναγκαία, ειδικά σε περιπτώσεις που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν διαχρονικές εικόνες. Ο αλγόριθμος DP ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί σε τέτοιες περιπτώσεις, αφού πλησιάζει αρκετά σε επίγεια αληθή δεδομένα, ενώ είναι σχετικά απλός στην εφαρμογή του. Επιπλέον είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν βοηθητικά δεδομένα (π.χ. μετεωρολογικές παρατηρήσεις) για την περιοχή ενδιαφέροντος.

6. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει στο πλαίσιο της διατριβής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά περιοχή μελέτης και διακρίνονται στις δύο βασικές κατηγορίες: στα ελεγχόμενα πεδία και στις ίδιες τις αρχαιολογικές θέσεις. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έχει ως αφετηρία το ελεγχόμενο πεδίο της περιοχής Αλάμπρας το οποίο ήταν και το πρώτο χρονικά το οποίο υλοποιήθηκε. Για την περιοχή Αλάμπρας παρουσιάζονται ξεχωριστά τα αποτελέσματα των δύο περιόδων (2010 - 2011 και 2011 – 2012) που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς φαινολογικούς κύκλους του σιταριού και κριθαριού. Ακολουθούν σε επόμενο υποκεφάλαιο τα αποτελέσματα από το δεύτερο ελεγχόμενο πεδίο στην περιοχή Αχέλειας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αρχαιολογικές θέσεις της Παλαιπάφου, της Θεσσαλίας και αυτής στην Ουγγαρία. Σε κάθε μια θέση αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων, τα αποτελέσματα τα οποία έχουν προκύψει και σχολιασμός τους σε σχέση με άλλες έρευνες στην περιοχή. Γενικότερα συμπεράσματα τα οποία έχουν προκύψει μέσα από την υλοποίηση των πεδίων ελέγχου αλλά και τις αρχαιολογικές θέσεις παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.1. Ελεγχόμενα Πεδία

6.1.1. Αλάμπρα

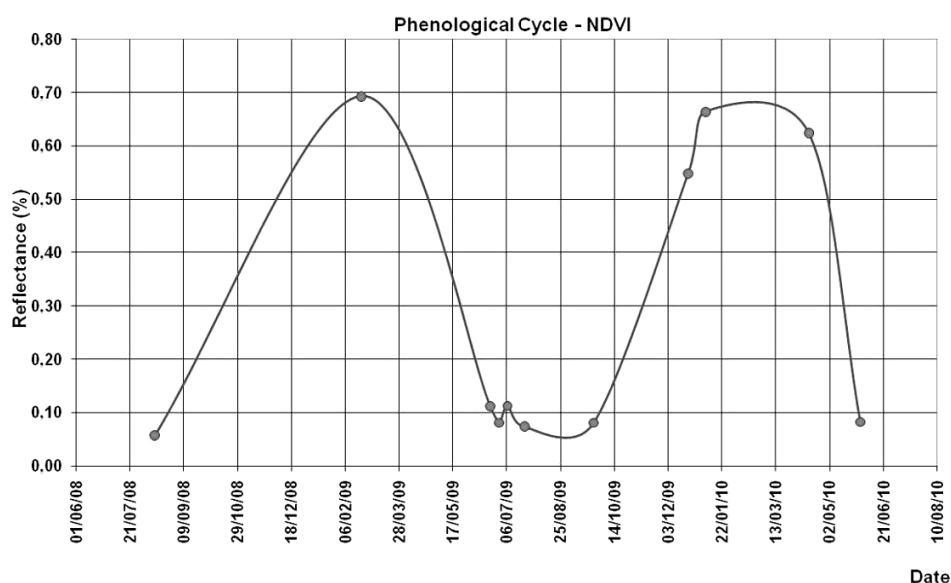
Στο ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας περιγράφονται τα αποτελέσματα δύο περιόδων: 2010-2011 και 2011-2012. Αν και τα αποτελέσματα της πρώτης χρονιάς δεν ήταν τα αναμενόμενα λόγω προβλημάτων που είχαν προκύψει από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή, η εμπειρία που αποκτήθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν σημαντικά για τη μελέτη των αποτελεσμάτων την επόμενη χρονιά.

6.1.1.1. Α΄ περίοδος 2010-2011

Η σπορά στην περιοχή Αλάμπρας για την πρώτη περίοδο έγινε στα μέσα Νοεμβρίου, λίγο πριν την έναρξη των πρώτων χειμερινών βροχών. Στο ελεγχόμενο πεδίο έγινε σπορά τόσο κριθαριού όσο και σιταριού στα τετράγωνα 1,3,4,8 και 2,5,6,7 αντίστοιχα (βλ. Εικόνα 45). Υπενθυμίζεται ότι τα τετράγωνα 1 και 2 αφορούν τις προσομοιώσεις τάφων σε βάθος 0.25 m, τα τετράγωνα 3 και 5 προσομοιώσεις αρχαιολογικών

καταλοίπων σε βάθος 0.25 m και τα τετράγωνα 4 και 6 σε βάθος 0.5 m. Τα τελευταία δύο τετράγωνα (7 και 8) είχαν παραμείνει ανέπαφα.

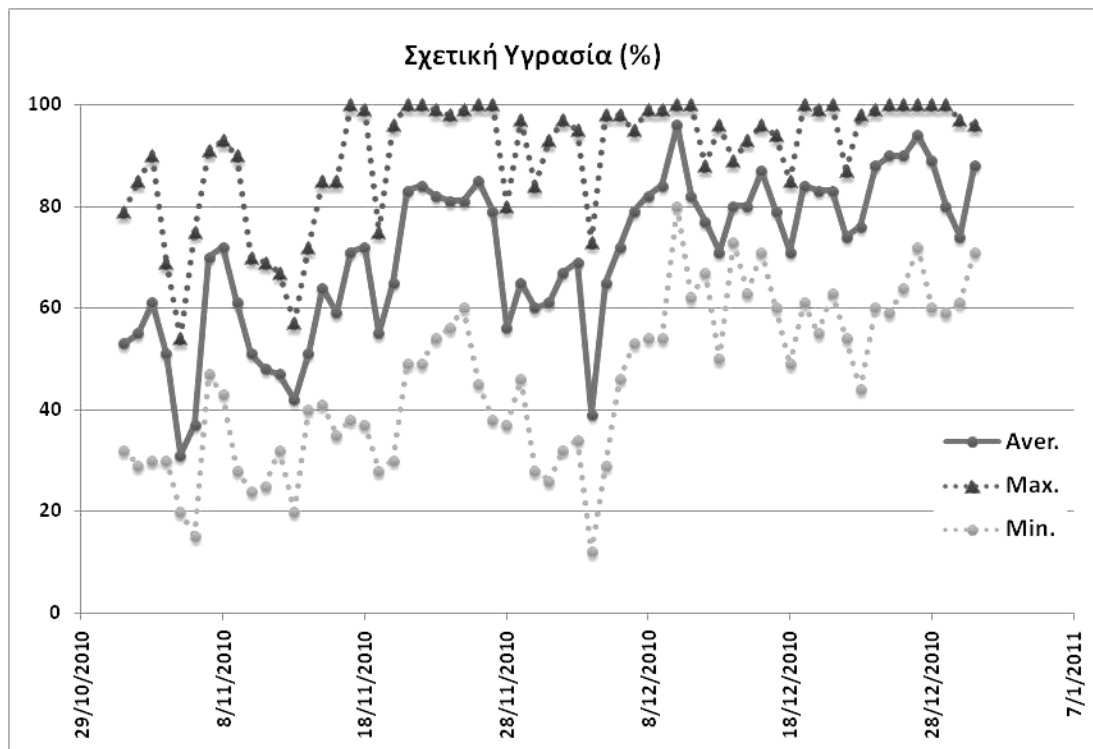
Η επιλογή του χρόνου για τη σπορά έγινε με βάση τις συνήθειες πρακτικές της περιοχής, αλλά και με βάση τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου των καλλιεργειών με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Landsat TM/ETM+ όπου έδειξε ότι στα τέλη Σεπτεμβρίου με τέλη Νοεμβρίου τις προηγούμενες δύο χρονιές (2008-2009) είχαν καλλιεργηθεί σιτηρά στην περιοχή (Εικόνα 72). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 72 η έναρξη του φαινολογικού κύκλου για το 2008 ορίζεται γύρω στο Σεπτέμβριο και κλείνει κοντά στα τέλη Μαΐου. Στη συνέχεια (Ιούλιος – Αύγουστος 2009) η ανακλαστικότητα αφορά έδαφος με μικρές διαφοροποιήσεις που οφείλονται σε εποχιακές αλλαγές της λίγης βλάστησης που εντοπίζεται στην περιοχή και ακολουθεί η νέα σπορά των σιτηρών περί τις αρχές Οκτωβρίου μέχρι και τα μέσα Ιουνίου 2010. Την περίοδο όμως που ακολουθεί (2010 – 2011), χρονιά που υλοποιήθηκε το πεδίο ελέγχου καταγράφηκε ο πιο άνυδρος Νοέμβριος των τελευταίων δεκαετιών με συνολική βροχόπτωση 0.00 mm και ένας από τους πιο άνυδρους Δεκέμβριους των τελευταίων ετών παγκύπρια με συνολική βροχόπτωση για όλο το μήνα 106.00 mm—όπως δείχνει ο Πίνακας 13. Αυτή η κλιματολογική ιδιαιτερότητα είχε άμεση επίδραση και στις καλλιέργειες του ελεγχόμενου πεδίου. Επιπλέον όπως φαίνεται και από την Εικόνα 73 η μέση σχετική υγρασία στην περιοχή ήταν γενικά πάνω από 60%, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις η μέγιστη σχετική υγρασία έφθασε μέχρι και το 100%.



Εικόνα 72: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας από 11 δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ για την περίοδο 2008 - 2010.

Πίνακας 13: Μετεωρολογικά δεδομένα βροχόπτωσης στην περιοχή Αλάμπρας για την περίοδο Νοεμβρίου - Δεκέμβριο (Δεδομένα από Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου).

Ημερομηνία	Ημερήσια Βροχόπτωση (mm)	Ημερομηνία	Ημερήσια Βροχόπτωση (mm)
1-Νοε-10	0,0	1-Δεκ-10	0,0
2-Νοε-10	0,0	2-Δεκ-10	0,0
3-Νοε-10	0,0	3-Δεκ-10	0,0
4-Νοε-10	0,0	4-Δεκ-10	0,0
5-Νοε-10	0,0	5-Δεκ-10	0,6
6-Νοε-10	0,0	6-Δεκ-10	0,0
7-Νοε-10	0,0	7-Δεκ-10	0,0
8-Νοε-10	0,0	8-Δεκ-10	0,0
9-Νοε-10	0,0	9-Δεκ-10	0,0
10-Νοε-10	0,0	10-Δεκ-10	96,2
11-Νοε-10	0,0	11-Δεκ-10	2,0
12-Νοε-10	0,0	12-Δεκ-10	0,7
13-Νοε-10	0,0	13-Δεκ-10	6,2
14-Νοε-10	0,0	14-Δεκ-10	0,0
15-Νοε-10	0,0	15-Δεκ-10	0,0
16-Νοε-10	0,0	16-Δεκ-10	2,2
17-Νοε-10	0,0	17-Δεκ-10	0,7
18-Νοε-10	0,0	18-Δεκ-10	0,0
19-Νοε-10	0,0	19-Δεκ-10	0,0
20-Νοε-10	0,0	20-Δεκ-10	0,0
21-Νοε-10	0,0	21-Δεκ-10	0,0
22-Νοε-10	0,0	22-Δεκ-10	0,0
23-Νοε-10	0,0	23-Δεκ-10	0,0
24-Νοε-10	0,0	24-Δεκ-10	0,0
25-Νοε-10	0,0	25-Δεκ-10	0,0
26-Νοε-10	0,0	26-Δεκ-10	0,0
27-Νοε-10	0,0	27-Δεκ-10	0,0
28-Νοε-10	0,0	28-Δεκ-10	0,0
29-Νοε-10	0,0	29-Δεκ-10	0,0
30-Νοε-10	0,0	30-Δεκ-10	0,0
		31-Δεκ-10	0,9




Εικόνα 73: Σχετική υγρασία στην περιοχή Αλάμπρας για την περίοδο Νοεμβρίου - Δεκέμβριο (Δεδομένα από Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου).

Μετά τις πρώτες χειμερινές βροχές, στις 10-12-2010 (Πίνακας 13) ξεκίνησε και η έναρξη του φαινολογικού κύκλου. Αν και στις αρχές η βλάστηση δεν έδειξε κανένα σημάδι καταπόνησης, η εμφάνιση της ανυδρίας άρχισε να επιδρά με αλλαγή στο χρώμα των φυτών αλλά και το χαμηλό ύψος που είχαν διατηρηθεί οι καλλιέργειες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια κατάσταση καταπόνησης των φυτών μέχρι και τέλος Δεκεμβρίου, ακόμη και με τις ψηλές τιμές σχετικής υγρασίας.

Αυτή η κατάσταση ανατράπηκε τον επόμενο μήνα, τον Ιανουάριο του 2011, όταν η βροχόπτωση λειτούργησε αρνητικά για την ανάπτυξη της βλάστησης. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που έπεσαν στην περιοχή σε συνδυασμό με το μη διαπερατό υπέδαφος της περιοχής είχαν ως αποτέλεσμα να καταπονηθούν ακόμη περισσότερο τα φυτά. Αυτό παρατηρήθηκε για όλα τα τετράγωνα πλην των πρώτων δύο τετραγώνων (1 και 2) όπου το κενό που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση των τάφων λειτούργησε ως διέξοδος για το περίσσειμα του νερού που δεν ήταν απαραίτητο για τις λειτουργίες της φωτοσύνθεσης. Επιπλέον το κριθάρι (τετράγωνο 1) το οποίο αντέχει περισσότερο σε μεγάλες ποσότητες νερού, συνέχιζε να

αναπτύσσεται κανονικά, σε αντίθεση με το σιτάρι (τετράγωνο 2) που παρουσίασε κάποια σημάδια καταπόνησης.

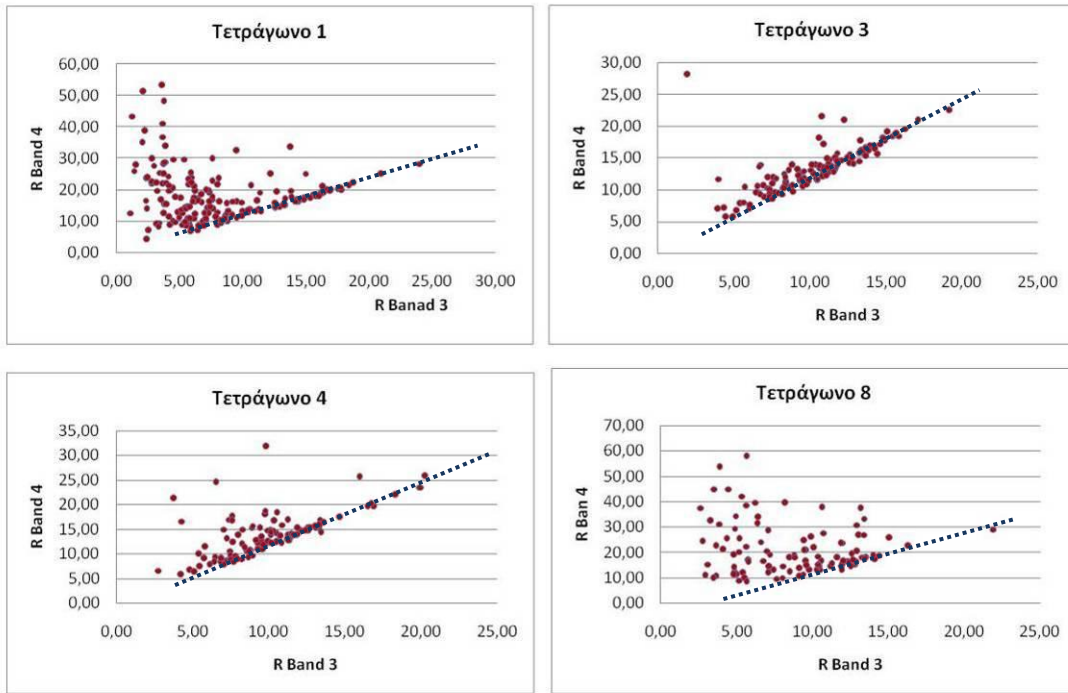
Πίνακας 14: Φωτογραφίες από τα διάφορα στάδια της βλάστησης στο ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας της Α' περιόδου (2009-2010).

<p>13-11-2010: Σπορά σιταριού και κριθαριού</p>			
<p>01-12-2010: έδαφος πριν τις πρώτες χειμερινές βροχές</p>			
<p>14-12-2010: έδαφος μετά τις πρώτες χειμερινές βροχές</p>			
<p>17-12-2010: έναρξη φαινολογικού κύκλου</p>			
<p>26-12-2010: Εμφάνιση σιταριού και κριθαριού στο έδαφος</p>			
<p>04-01-2011: διατήρηση της βλάστησης σε χαμηλό ύψος</p>			

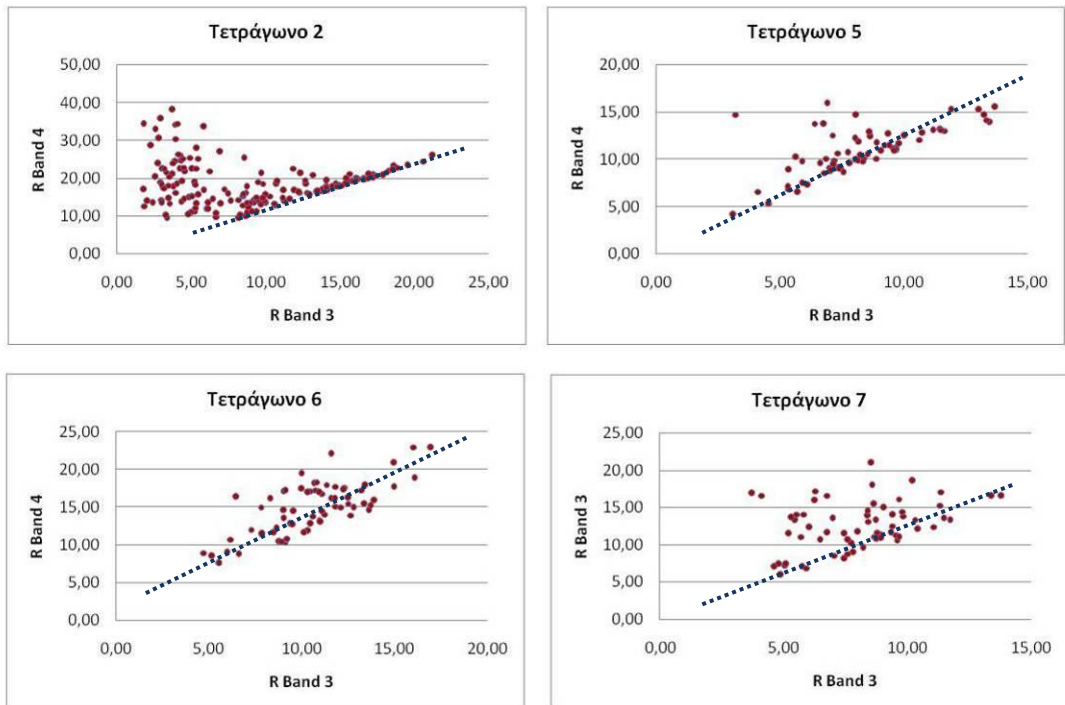
15-01-2011: εμφάνιση καταπόνησης στα φυτά			
20-02-2011: συνέχιση της καταπόνησης των φυτών			
13-03-2011: επικάλυψη της βλάστησης με άλλα εποχιακά φυτά			

Αυτή η καταπόνηση των φυτών καταγράφηκε και από τις φασματοραδιομετρικές μετρήσεις που λαμβάνονταν κατά περιόδους στην περιοχή. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την περίοδο Οκτωβρίου 2010 – Μαρτίου 2011 έγιναν περισσότερες από 20 επιτόπιες επισκέψεις (≈ 1 επίσκεψη κάθε 9 ημερολογιακές ημέρες) και καταγράφηκαν περίπου 1000 μετρήσεις.

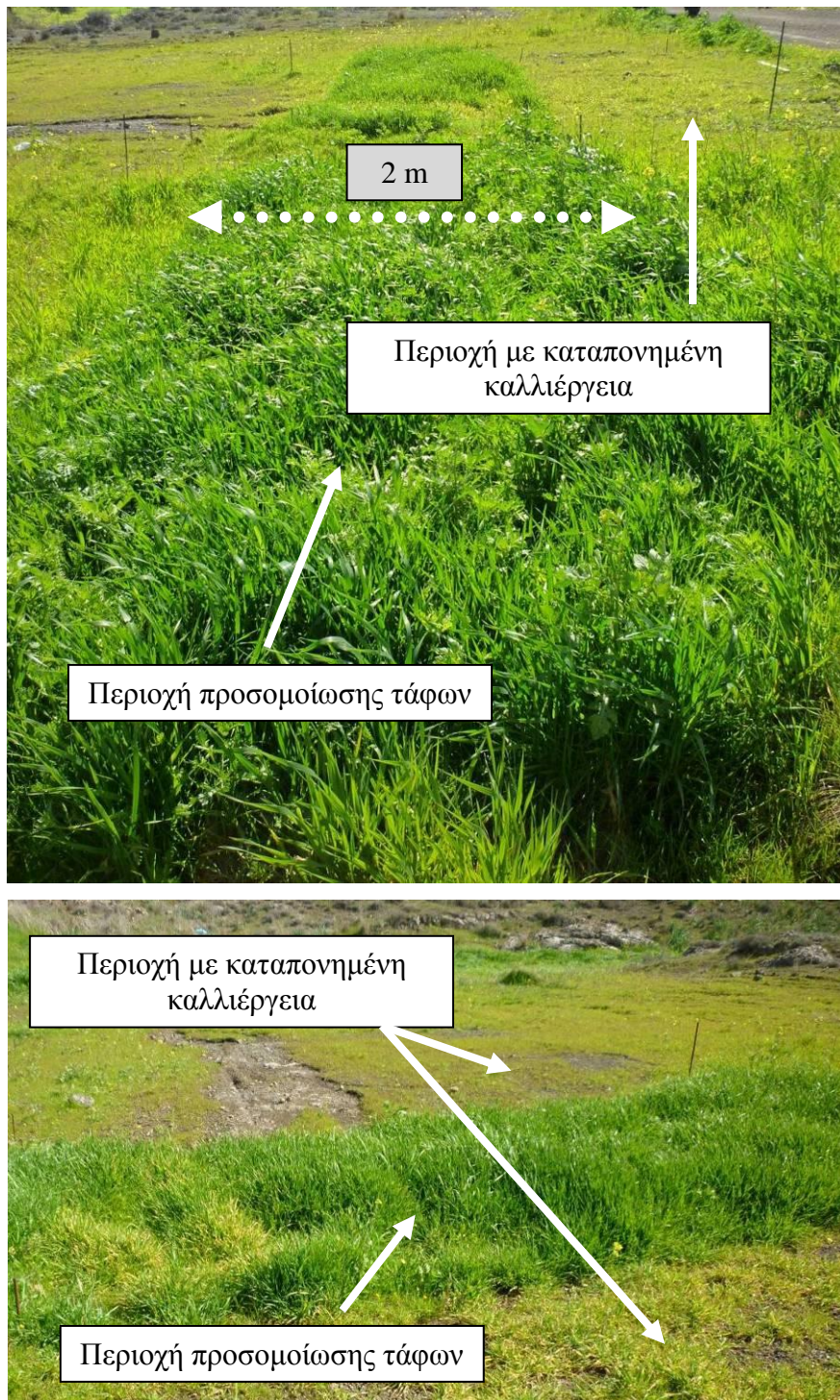
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στην Εικόνα 74 (κριθάρι) και στην Εικόνα 75 (σιτάρι). Από τις γραφικές αυτές παραστάσεις είναι φανερό ότι στα περισσότερα τετράγωνα η βλάστηση δεν είχε φυσιολογική εξέλιξη, αφού υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της ακτινοβολίας στην κόκκινη ανακλαστικότητα και την εγγύς υπέρυθη ανακλαστικότητα (βλ. γραμμή εδάφους, Huete 1988), το οποίο αποδίδεται στην καταπόνηση των καλλιεργειών. Μόνο στα τετράγωνα 1 και 2 αλλά και στα «μη αρχαιολογικά» τετράγωνα 7 και 8 φαίνεται η βλάστηση να ακολουθεί τη φυσιολογική εξέλιξη του φαινολογικού κύκλου. Στην Εικόνα 76 φαίνεται η περιοχή ελέγχου στα μέσα Φεβρουαρίου, όπου η καταπόνηση της βλάστησης είναι φανερή σε όλη την έκταση, πλην των περιοχών όπου υπήρχε ο αέριος θύλακας από την προσομοίωση των αρχαιολογικών τάφων. Η προσομοίωση εμφανίζεται ως μια θετική γραμμική διαφοροποίηση της βλάστησης.



Εικόνα 74: Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στα τετράγωνα με κριθάρι (άξονας των X: κόκκινη ακτινοβολία, άξονας των Y: εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία). Με διακεκομμένη γραμμή η γραμμή εδάφους (soil line).



Εικόνα 75: Φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στα τετράγωνα με σιτάρι (άξονας των X: κόκκινη ακτινοβολία, άξονας των Y: εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία). Με διακεκομμένη γραμμή η γραμμή εδάφους (soil line)



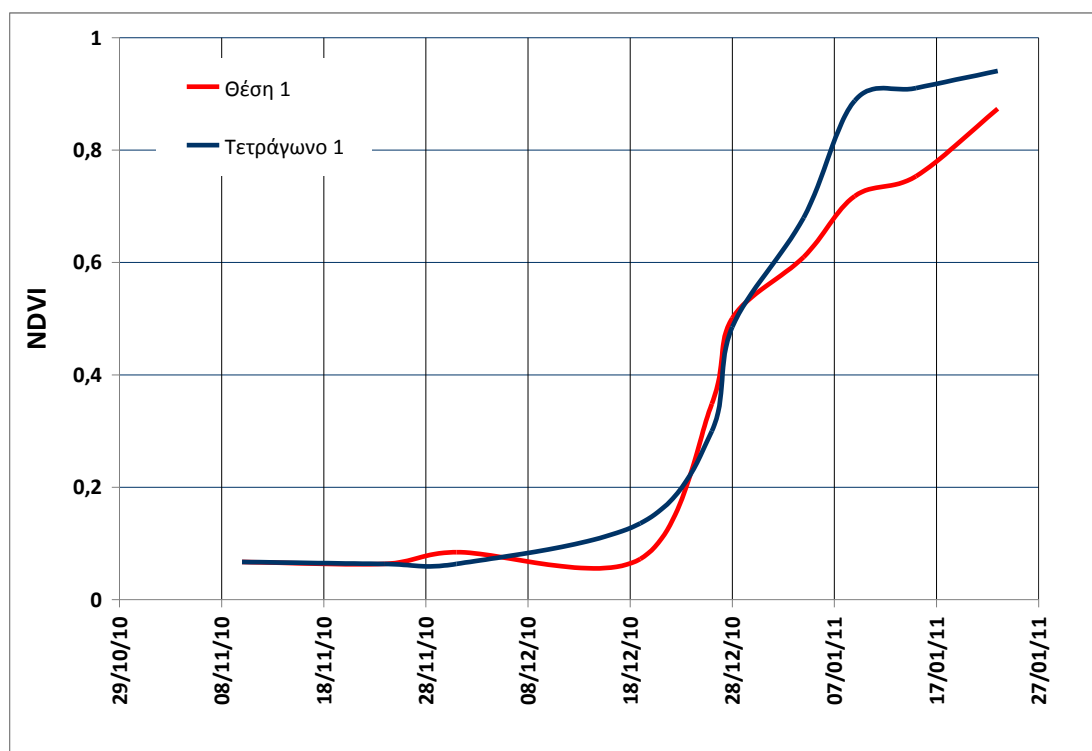
Εικόνα 76: Φωτογραφίες από τα τετράγωνα 1 και 2 στο ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας όπου φαίνεται η φυσιολογική εξέλιξη των καλλιεργειών στις περιοχές με την προσομοίωση τάφων.

Η μελέτη του φαινολογικού κύκλου για το τετράγωνο 1 και μια άλλη υγιή περιοχή σε κοντινή απόσταση από το ελεγχόμενο πεδίο (θέση 1) με την ίδια καλλιέργεια (βλ. Εικόνα 77), έδειξε μια θετική διαφοροποίηση του δείκτη NDVI σε σχέση με την δεύτερη περιοχή μελέτης. Η διαφοροποίηση αυτή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 78,

είναι πιο εμφανής μετά την έναρξη του φαινολογικού κύκλου, δηλαδή μετά τις 8-12-2010. Αυτή η διαφορά είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη του υπεδάφιου αέριου θύλακα, δηλαδή στην προσομοίωση των τάφων. Ο υπολογισμός του δείκτη βλάστησης NDVI έγινε με βάση την αναγωγή των επίγειων μετρήσεων σε πολυφασματικά δεδομένα τύπου Landsat TM/ETM+.



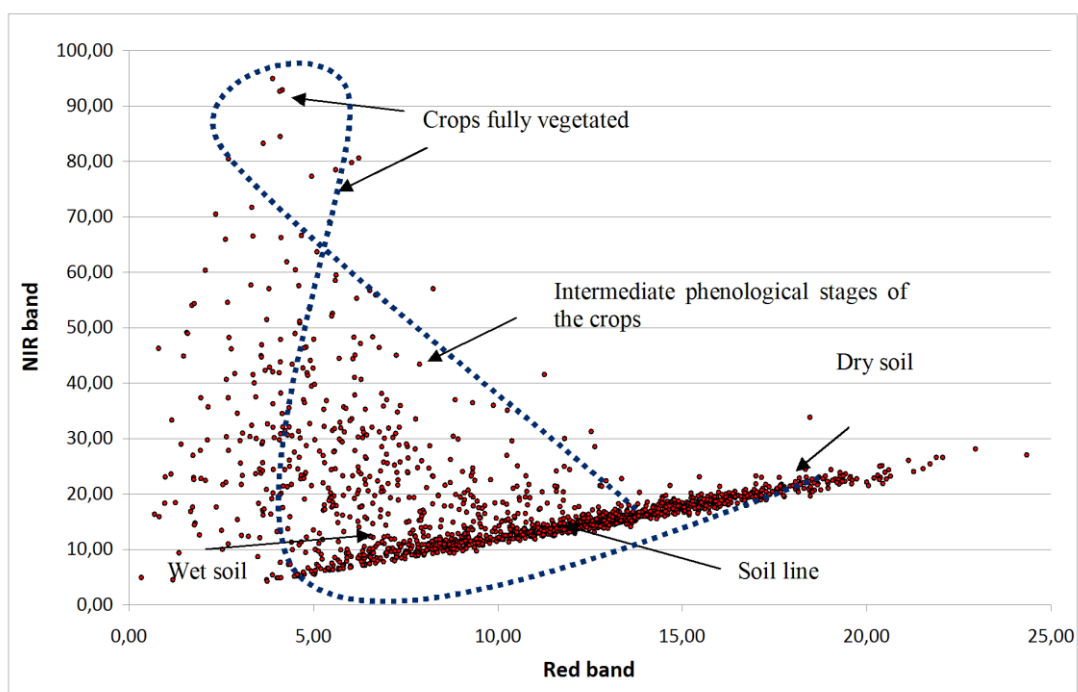
Εικόνα 77: Περιοχή ελεγχόμενου πεδίου Αλάμπρας και Θέσης 1 (Εικόνα από Google Earth©)



Εικόνα 78: Φαινολογικός κύκλος για το κριθάρι στο τετράγωνο 1 και την θέση 1.

6.1.1.2. Β' περίοδος 2011-2012

Την επόμενη περίοδο ακολούθησε σπορά κριθαριού σε όλα τα τετράγωνα, λόγω της ιδιότητας του να αντέχει σε μεγάλες ποσότητες νερού σε σχέση με το σιτάρι. Για τη συστηματική μελέτη του κριθαριού έγιναν περισσότερες από 16 επισκέψεις στο πεδίο με στόχο την καταγραφή της φασματικής υπογραφής της βλάστησης. Σε κάθε επίσκεψη λαμβάνονταν πέραν των 20 επίγειων μετρήσεων σε κάθε τετράγωνο με επαναδειγματοληψία 5 μετρήσεων από το όργανο GER 1500. Συνολικά πάρθηκαν περί τις 1700 επίγειες μετρήσεις (βλ. Εικόνα 79) για το φαινολογικό κύκλο 2011 – 2012.



Εικόνα 79: Ανακλαστικότητα των τετραγώνων 1-8, στην περιοχή Αλάμπρας, στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.

Η σπορά του πεδίου έγινε στις 11 Νοεμβρίου 2011 (βλ. Εικόνα 80). Το επόμενο δεκαήμερο ακολούθησαν και χειμερινές βροχές με αποτέλεσμα να ξεκινήσει και ο φαινολογικός κύκλος στο ελεγχόμενο πεδίο. Αν και το κριθάρι δεν είχε παρουσιάσει κάποιο είδος καταπόνησης στην αρχή του φαινολογικού κύκλου, αργότερα κατά τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου φάνηκε ότι τα τετράγωνα 3-8 δεν προσφέρονταν για έρευνα αφού δεν επιτεύχθηκε ομοιόμορφη σπορά και τα σιτηρά παρέμειναν σε πολύ χαμηλό ύψος καθόλη τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου (βλ. Εικόνα 81). Το

τελευταίο οδηγούσε σε μεγάλη και σημαντική επίδραση του εδάφους στον υπολογισμό ανακλαστικότητας της βλάστησης. Πιθανή αιτία για αυτό το αποτέλεσμα θα πρέπει να αποδοθεί και στην κλίση που παρουσίαζε το έδαφος σε αυτή την περιοχή.



Εικόνα 80: Σπορά κριθαριού στην περιοχή Αλάμπρας για την περίοδο 2011-2012.



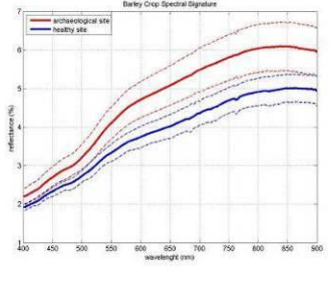

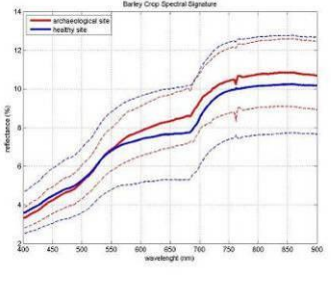

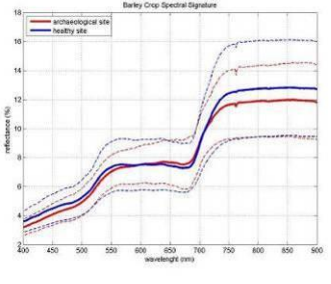

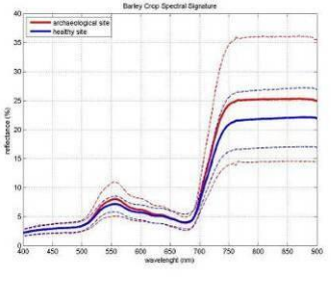

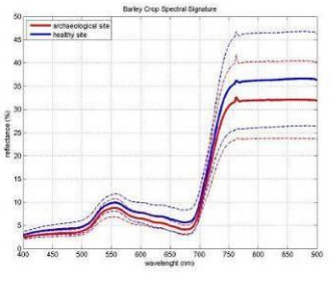

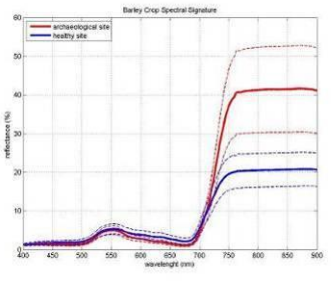

Εικόνα 81: Χαρακτηριστική φωτογραφία από περιοχή τετραγώνων 3-8 με τη μη ομοιόμορφη σπορά.

Σε αντίθεση με τα τετράγωνα 3-8, στα πρώτα δύο τετράγωνα (1 και 2) όπου υπήρχε η προσομοίωση τάφων τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Η μελέτη των φασματικών υπογραφών (Πίνακας 15), κατέδειξε ότι το υπεδάφιο κατάλοιπο είναι ανιχνεύσιμο και διαχωρίσιμο από τον περίγυρό του από τις αρχές Ιανουαρίου μέχρι

και τις αρχές Μαρτίου. Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει τη μέση φασματική υπογραφή για το κριθάρι πάνω από το υπεδάφιο κατάλοιπο (με κόκκινη γραμμή) σε σχέση με τον περίγυρό του (μπλε γραμμή). Με διακεκομμένες γραμμές σημειώνονται οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων.

Πίνακας 15: Κατάλογος φασματικών υπογραφών στο τετράγωνο 1, περιοχή Αλάμπρας (περίοδος 2011-2012).

α/α	Ημερομηνία	Φασματική Υπογραφή	Φωτογραφία
1	17-10-2011	<p>The graph shows reflectance (%) on the y-axis (4 to 20) and wavelength (nm) on the x-axis (400 to 900). A solid red line represents the archaeological site, and a solid blue line represents the healthy site. Dashed lines indicate standard deviations. The archaeological site shows lower reflectance than the healthy site across the spectrum.</p>	<p>A photograph showing a wide, dry field with sparse, brownish vegetation under a clear blue sky.</p>
2	26-10-2011	<p>The graph shows reflectance (%) on the y-axis (6 to 18) and wavelength (nm) on the x-axis (400 to 900). A solid red line represents the archaeological site, and a solid blue line represents the healthy site. Dashed lines indicate standard deviations. The archaeological site shows lower reflectance than the healthy site.</p>	<p>A photograph of a dirt road winding through a dry field with sparse vegetation.</p>
3	31-10-2011	<p>The graph shows reflectance (%) on the y-axis (4 to 24) and wavelength (nm) on the x-axis (400 to 900). A solid red line represents the archaeological site, and a solid blue line represents the healthy site. Dashed lines indicate standard deviations. The archaeological site shows lower reflectance than the healthy site.</p>	<p>A photograph of a field with sparse vegetation and a small structure or building in the background.</p>
4	09-11-2011	<p>The graph shows reflectance (%) on the y-axis (4 to 22) and wavelength (nm) on the x-axis (400 to 900). A solid red line represents the archaeological site, and a solid blue line represents the healthy site. Dashed lines indicate standard deviations. The archaeological site shows lower reflectance than the healthy site.</p>	<p>A photograph of a dirt road in a field with sparse vegetation and hills in the background.</p>

5	16-11-2011	 <p>Barley Crop Spectral Signature</p> <p>reflectance (%)</p> <p>wavelength (nm)</p> <p>archaeological site</p> <p>healthy site</p>	
6	23-11-2011	 <p>Barley Crop Spectral Signature</p> <p>reflectance (%)</p> <p>wavelength (nm)</p> <p>archaeological site</p> <p>healthy site</p>	
7	28-11-2011	 <p>Barley Crop Spectral Signature</p> <p>reflectance (%)</p> <p>wavelength (nm)</p> <p>archaeological site</p> <p>healthy site</p>	
8	13-12-2011	 <p>Barley Crop Spectral Signature</p> <p>reflectance (%)</p> <p>wavelength (nm)</p> <p>archaeological site</p> <p>healthy site</p>	
9	20-12-2011	 <p>Barley Crop Spectral Signature</p> <p>reflectance (%)</p> <p>wavelength (nm)</p> <p>archaeological site</p> <p>healthy site</p>	
10	03-01-2012	 <p>Barley Crop Spectral Signature</p> <p>reflectance (%)</p> <p>wavelength (nm)</p> <p>archaeological site</p> <p>healthy site</p>	

11	11-02-2012		
12	21-02-2012		
13	04-03-2012		
14	17-03-2012		
15	29-03-2012		
16	17-04-2012		

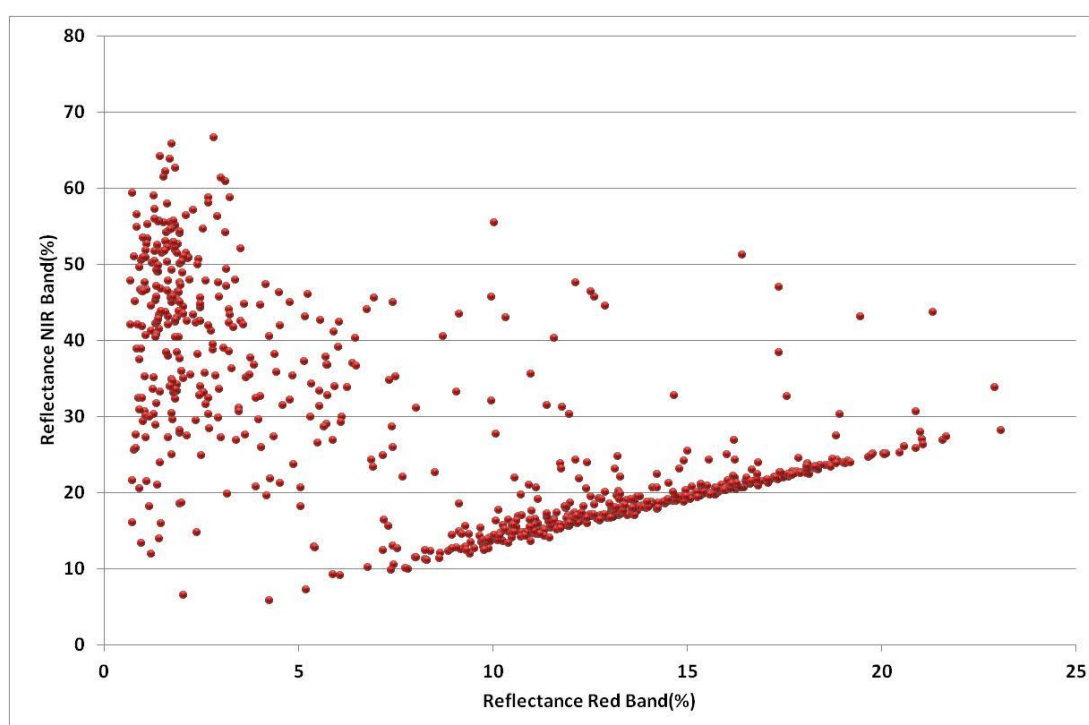
Τα αποτελέσματα του πιο πάνω πίνακα δείχνουν οι σε μερικές περιπτώσεις (Ιανουάριος – Μάρτιος 2012) παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις της ανακλαστικότητας ιδιαίτερα στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι. Αντίθετα οι διαφοροποιήσεις στο ορατό φάσμα είναι σαφώς πιο μικρές.



Εικόνα 82: Φωτογραφίες όπου επισημαίνεται το τετράγωνο 1 στην περιοχή Αλάμπρας.

6.1.2. Αχέλεια

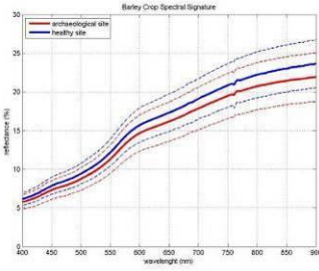

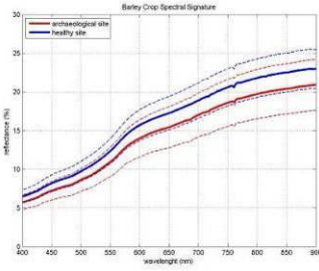

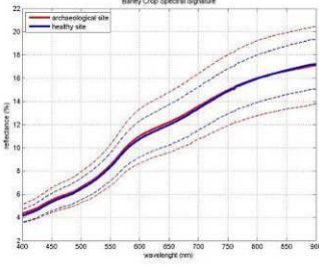

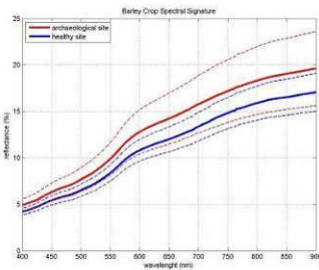

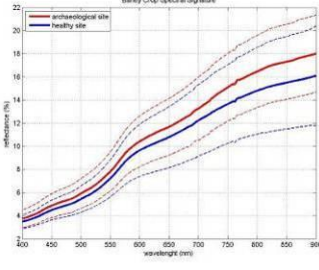

Οι μετρήσεις στην περιοχή Αχέλειας απέκτησαν ιδιαίτερη σημασία μετά τη δυσκολία επεξεργασίας των μετρήσεων στην περιοχή Αλάμπρας για τα τετράγωνα όπου τοποθετήθηκε οικοδομική λίθος την πρώτη περίοδο (2010-2011). Η σπορά στο ελεγχόμενο πεδίο της Αχέλειας έγινε κατά το Δεκέμβριο του 2011. Συνολικά στο χώρο αυτό έγιναν 16 επισκέψεις. Σε κάθε επίσκεψη διενεργούνταν περισσότερες από 20 μετρήσεις στο ελεγχόμενο πεδίο και άλλες 20 στο περίγυρο του πεδίου (με επαναδειγματοληψία 5 μετρήσεων από το όργανο GER 1500). Συνολικά έχουν ληφθεί πέραν των 700 μετρήσεων στο χώρο αυτό (Εικόνα 83).



Εικόνα 83: Ανακλαστικότητα του ελεγχόμενου πεδίου στην Αχέλεια και στο περίγυρο του, στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.

Η μελέτη των φασματικών υπογραφών, όπως δείχνει και ο Πίνακας 16 κατέδειξε ότι το υπεδάφιο κατάλοιπο είναι ανιχνεύσιμο περί τα τέλη Μαρτίου μέχρι και τα τέλη Απριλίου. Ο Πίνακας 16 παρουσιάζει τη μέση φασματική υπογραφή για το κριθάρι πάνω από το υπεδάφιο κατάλοιπο (με κόκκινη γραμμή) σε σχέση με τον περίγυρό του (μπλε γραμμή). Με διακεκομμένες γραμμές σημειώνονται οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων.

Πίνακας 16: Κατάλογος φασματικών υπογραφών στην περιοχή Αχέλειας (περίοδος 2011-2012).

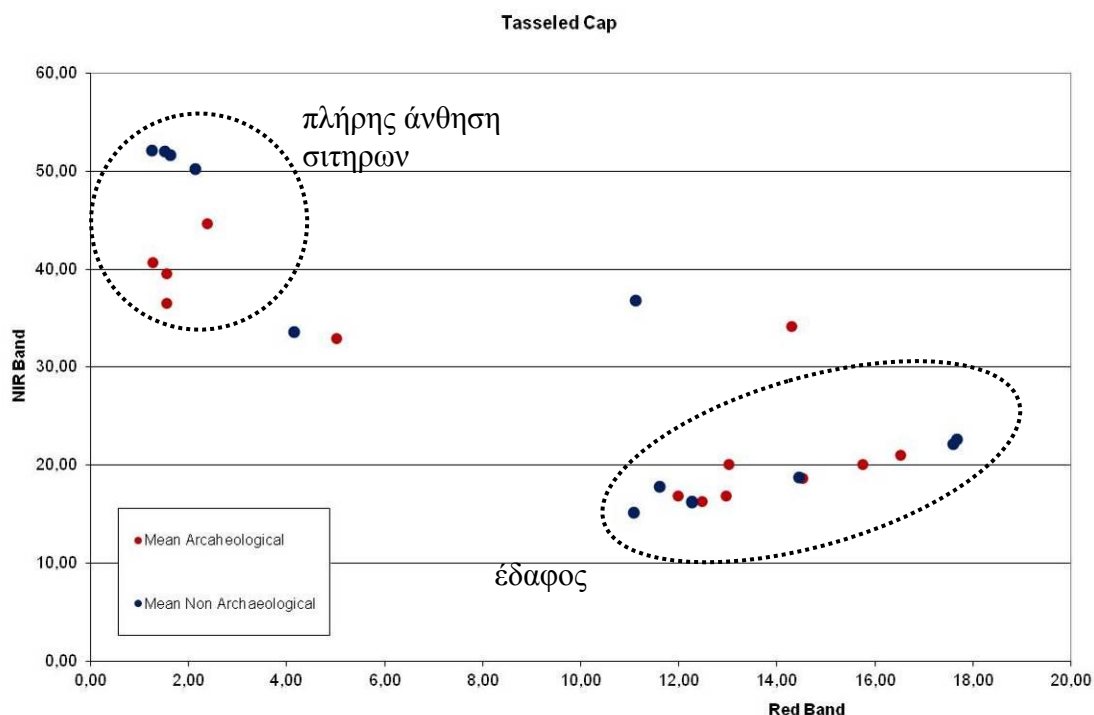
α/α	Ημερομηνία	Φασματική Υπογραφή	Φωτογραφία
1	21-10-2011		
2	27-10-2011		
3	04-11-2011		
4	10-11-2011		
5	19-11-2011		

6	25-11-2011		
7	18-01-2012		
8	03-02-2012		
9	23-02-2012		
10	08-03-2012		
11	21-03-2012		

12	28-03-2012		
13	03-04-2012		
14	24-04-2012		
15	30-04-2012		
16	15-05-2012		

Το διάγραμμα ανακλαστικότητας στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+, όπως φαίνεται στην Εικόνα 84, απεικονίζει τη διαφοροποίηση της φασματικής ανακλαστικότητας για το υπεδάφιο κατάλοιπο και την υγιή βλάστηση. Όπως φαίνεται και στο σχετικό διάγραμμα, η βλάστηση στην περιοχή του υπεδάφιου καταλοίπου έχει υποστεί ένα μικρό είδος καταπόνησης το οποίο εμφανίζεται με

χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο κατά την περίοδο της πλήρους άνθησης των σιτηρών.



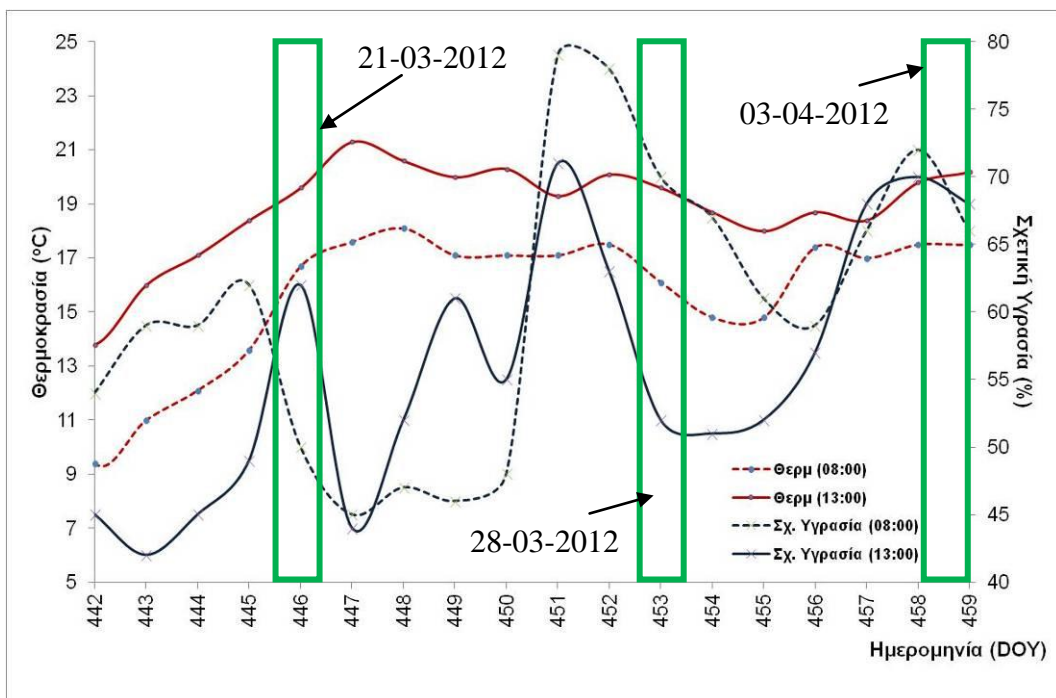
Εικόνα 84: Ανακλαστικότητα του υπεδάφιου καταλοίπου (κόκκινο χρώμα) και υγιούς βλάστησης (μπλε χρώμα) στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποκτούν και τα μετεωρολογικά δεδομένα για την περίοδο 21-03-2012 μέχρι 03-04-2012. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Αεροδρομίου Πάφου (Εικόνα 85), 1500 μέτρα νότια της περιοχής μελέτης.

Κατά την περίοδο αυτή, όπως δείχνει και ο Πίνακας 16, ενώ είχε αρχίσει να καταγράφεται μια διαφοροποίηση της βλάστησης στα υπεδάφια κατάλοιπα (βλ. 21-03-2012) εντούτοις στις 28-03-2012 αυτή η διαφοροποίηση ελαττώνεται και επανέρχεται στις 03-04-2012. Αυτό θα πρέπει να αποδοθεί μάλλον στις υψηλές τιμές υγρασίας (> 70%) που είχαν καταγραφεί τις προηγούμενες ημέρες (25-03-2012 μέχρι 28-03-2012) στην περιοχή (βλ. Εικόνα 86).



Εικόνα 85: Θέση μετεωρολογικού σταθμού αεροδρομίου Πάφου (Εικόνα από Google Earth©).



Εικόνα 86: Μετεωρολογικά δεδομένα στο χρονικό παράθυρο 17-03-2012 μέχρι 03-04-2012 στην περιοχή Αχέλειας, Πάφου (Βροχόπτωση 0.00 mm).

6.2. Λοιπές αρχαιολογικές θέσεις

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αρχαιολογικές θέσεις στην Παλαίπαφο, τις Νεολιθικές θέσεις στην περιοχή Θεσσαλίας και τέλος η θέση Visztu στην Ουγγαρία. Για κάθε μια από τις θέσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις, εφαρμογή δεικτών βλάστησης σε δορυφορικές εικόνες, μελέτη του φαινολογικού κύκλου κ.ά.

6.2.1. Παλαίπαφος

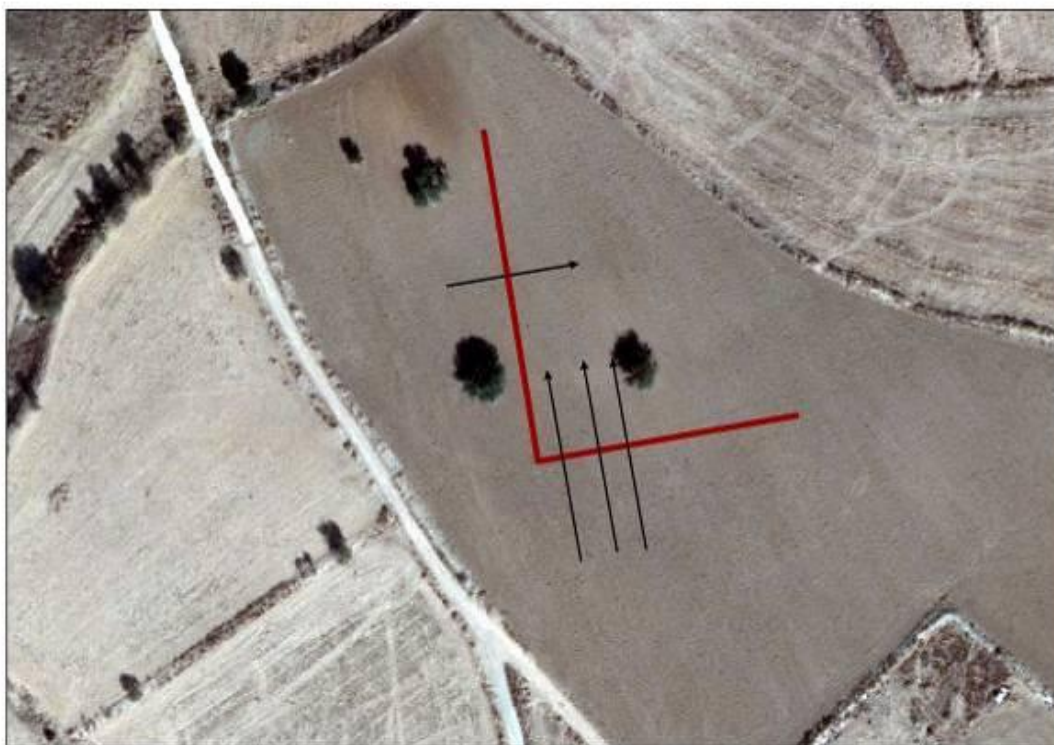
Οι μετρήσεις και οι αναλύσεις εικόνων στην περιοχή της Παλαιπάφου εστιάστηκαν σε δύο γειτονικά τεμάχια τα οποία εντοπίζονται στο τοπωνύμιο Άρκαλον. Στο ανατολικό τμήμα είχαν προηγηθεί γεωφυσικές έρευνες από το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών (2007) όπου και εντοπίστηκαν μαγνητικές ανωμαλίες. Αργότερα το 2010 έγιναν δοκιμαστικές τομές από την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας. Την ίδια χρονιά πραγματοποιήθηκαν αρχαιολογικές ανασκαφές από το Τμήμα Αρχαιοτήτων Κύπρου στο δυτικό τμήμα (βλ. Κεφ. 3.2.1 και 0).

Οι μετρήσεις στην περιοχή της Παλαιπάφου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (α) μετρήσεις φασματικής υπογραφής της βλάστησης με τη χρήση του φασματοραδιομέτρου GER 1500 για το ανατολικό τμήμα και (β) παρατήρηση του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης της περιοχής με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων στο δυτικό μέρος. Η περίπτωση της θέσης Άρκαλον παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα για την εφαρμογή των επίγειων φασματοραδιομετρικών μετρήσεων, αφού η περιοχή καλύπτεται από πυκνή βλάστηση (κριθάρι), ενώ μαγνητικές διασκοπήσεις είχαν δείξει υπεδάφια αρχιτεκτονικά κατάλοιπα. Παράλληλα η περιοχή αυτή εντάσσεται στο γενικότερο αρχαιολογικό περιβάλλον της Παλαιπάφου.

Σημειώνεται ότι για τον ακριβή εντοπισμό της μαγνητικής ανωμαλίας, έγινε χάραξη των χαρακτηριστικών σημείων με τη βοήθεια Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης (GNSS). Έτσι τα σημεία τα οποία προσδιόριζαν τα πιθανά αρχιτεκτονικά κατάλοιπα υλοποιήθηκαν με ακρίβεια $\pm 2\text{cm}$ στο τοπικό Κυπριακό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (Κ.Γ.Σ.Α. 93).

6.2.1.1. Φασματικές υπογραφές

Οι επίγειες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή Άρκαλον κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των σιτηρών στο τεμάχιο στο οποίο εντοπίστηκε η μαγνητική ανωμαλία από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις (βλ. κεφ. 4.3.1). Πραγματοποιήθηκαν πέντε επιτόπιες επισκέψεις στο χώρο και λήφθηκαν φασματοραδιομετρικές μετρήσεις σε μορφή εγκάρσιων τομών (σε κάτοψη) πάνω από την ανωμαλία που είχε εντοπιστεί από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις (βλ. Εικόνα 87). Οι τρεις πρώτες επισκέψεις έγιναν όταν τα σιτηρά ήταν ακόμη σε άνθηση, ενώ οι άλλες δύο, όταν τα σιτηρά είχαν ήδη αρχίσει να ξηραίνονται. Οι επισκέψεις αυτές έγιναν σε διάστημα δύο μηνών από τις 05/03/2010 μέχρι και τις 04/05/2010 (βλ. Αγαρίου *et al.*, 2010c, 2010d).



Εικόνα 87: Ενδεικτικό διάγραμμα τομών στις οποίες λήφθηκαν φασματοσκοπικές μετρήσεις πάνω από τη μαγνητική ανωμαλία (κόκκινο χρώμα).

Σε κάθε επίσκεψη στην αρχαιολογική περιοχή πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 30 φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις. Να σημειωθεί ότι κάθε μέτρηση είναι αποτέλεσμα του μέσου όρου πέντε διαδοχικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις έγιναν από κατακόρυφη λήψη (nadir view) από ύψος περίπου 1.2 m. Οι μετρήσεις έγιναν μεταξύ των ωρών 11:00 - 13:00, έτσι ώστε να μειώνονται τα σφάλματα από τις επιδράσεις της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο βασικός προβληματισμός για το εάν οι

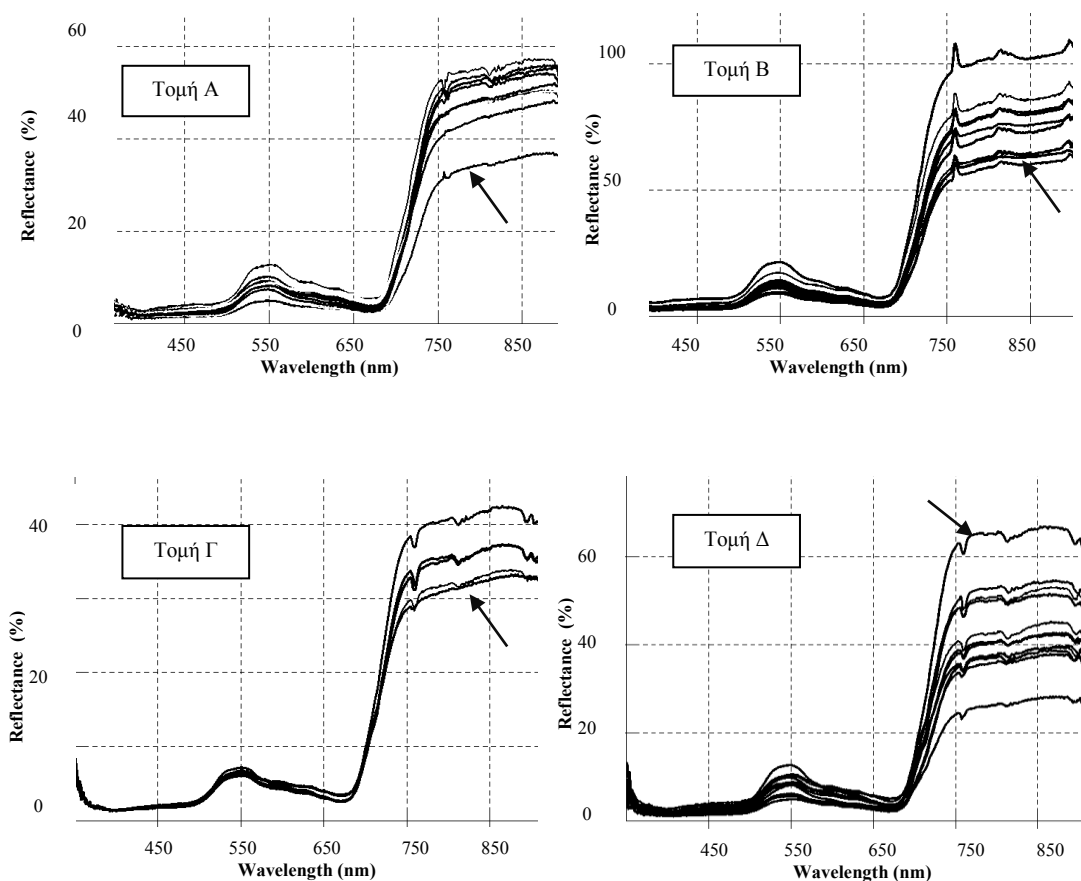
σημειακές φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις είναι χαρακτηριστικές για την περιοχή ενδιαφέροντος αίρεται από τους Milton *et al.* (2009) που αναφέρουν ότι ο παρατηρητής θα πρέπει να εξασφαλίζει, ότι οι μετρήσεις που διεξάγονται είναι αντιπροσωπευτικές των φασματικές διακυμάνσεων της βλάστησης όπως αυτές απεικονίζονται στα εικονοστοιχεία μιας δορυφορικής εικόνας. Πράγματι ο παρατηρητής θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στο πεδίο, έτσι ώστε το δείγμα του να είναι αντιπροσωπευτικό. Επιπλέον θα πρέπει ίδιες μετρήσεις να λαμβάνονται κατά το δυνατόν στο ίδιο σημείο και στις επόμενες επισκέψεις. Κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων, είτε και μετά στο εργαστήριο, θα πρέπει να γίνεται μελέτη των μετρήσεων ανακλαστικότητας για κάθε μέτρηση (π.χ. για το κριθάρι) έτσι ώστε να αφαιρεθούν τυχόν θόρυβοι ή να αποκλειστούν λανθασμένες μετρήσεις Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε στο ύπαιθρο μια οθόνη PDA η οποία ήταν συνδεδεμένη με το φασματοραδιόμετρο GER 1500 έτσι ώστε να εξαλείφονται τυχόν λανθασμένες παρατηρήσεις, μέσα από τη μελέτη των φασματικών υπογραφών.

Η πρώτη χρονικά επίσκεψη έγινε στις 05/03/2010 (Εικόνα 88). Η επίσκεψη περιελάμβανε αναγνωριστικές μετρήσεις, για να εξεταστεί αν όντως οι φασματοραδιομετρικές μετρήσεις θα ήταν σε θέση να υποδείξουν τυχόν ανωμαλία της βλάστησης, η οποία να συνδέεται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων. Τη συγκεκριμένη ημέρα υλοποιήθηκαν τέσσερις τομές. Οι τομές Α – Γ έγιναν στην νότια μαγνητική ανωμαλία, από τα δυτικά προς τα ανατολικά, ενώ η τομή Δ στην ανωμαλία με διεύθυνση Β-Ν.



Εικόνα 88: Επιτόπιες μετρήσεις στη θέση Άρκαλον 05/03/2010

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 89 σε μορφή φασματικών υπογραφών. Η μέτρηση η οποία ταυτίζεται με την υπεδάφια ανωμαλία υποδηλώνεται με βέλος στα γραφήματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε όλες τις τομές καταγράφεται μια υψηλή ή χαμηλή ανακλαστικότητα του κριθαριού στο υπέρυθρο μήκος κύματος ($\approx 750 - 900\text{nm}$). Μάλιστα στις τομές Α- Γ οι οποίες αφορούν το νότιο αρχιτεκτονικό κατάλοιπο, η φασματική ακτινοβολία τείνει να είναι χαμηλότερη στο υπέρυθρο μήκος κύματος από τον περιβάλλοντα χώρο. Αντίθετα στην τομή Δ, η οποία αφορά το αρχιτεκτονικό κατάλοιπο με διεύθυνση Β-Ν, η φασματική ακτινοβολία είναι υψηλότερη σε σχέση με τις άλλες μετρήσεις επί της τομής.



Εικόνα 89: Φασματικές υπογραφές για τις τομές Α-Δ πάνω από την γεωφυσική ανωμαλία κατά της 05-03-2010

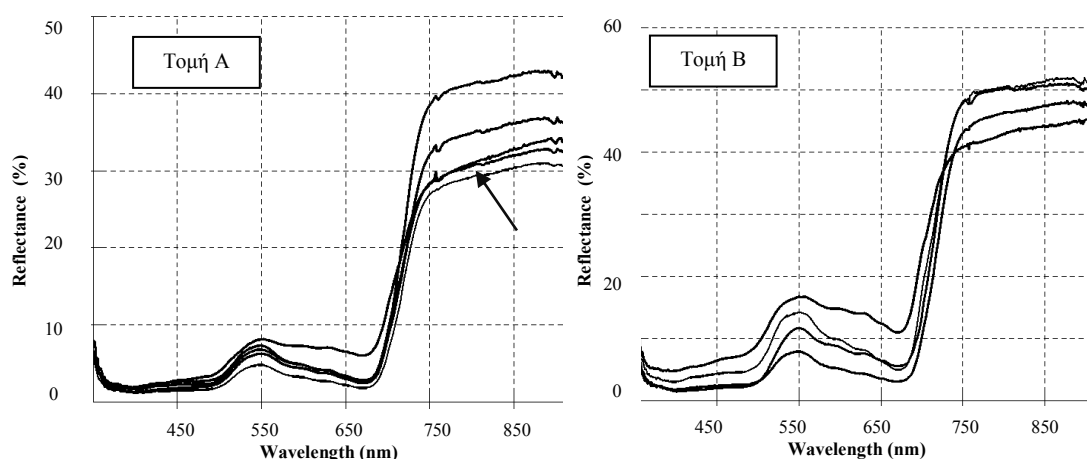
Η επόμενη επίσκεψη στη θέση Άρκαλον έγινε στις 12/03/2010 και υλοποιήθηκαν συνολικά τρεις τομές ως ακολούθως: στην τομή Α οι μετρήσεις έγιναν εγκάρσια της νότιας ανωμαλίας, στην τομή Β έγιναν μετρήσεις κατά μήκος του υπεδάφιου

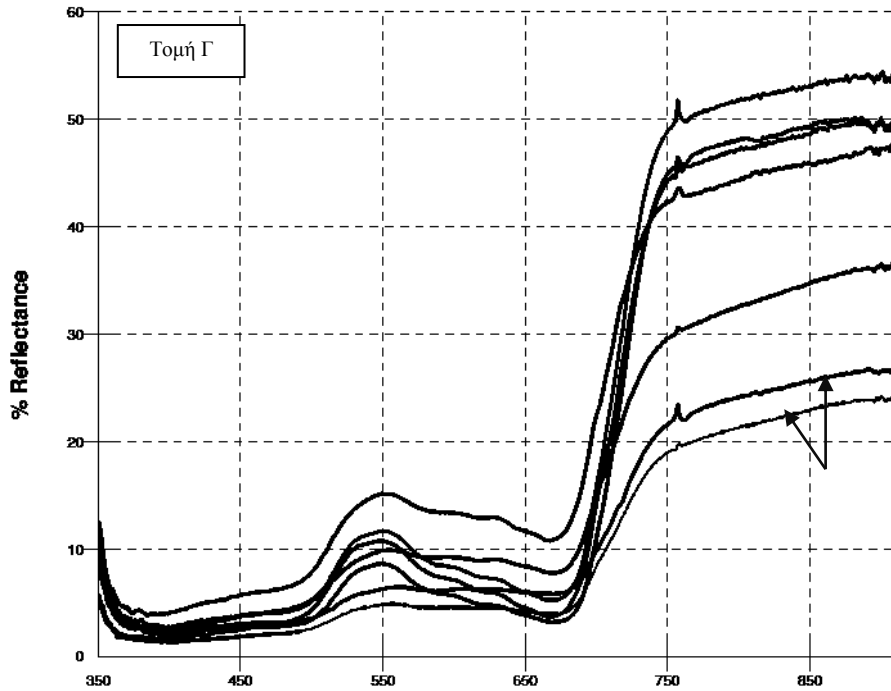
καταλοίπων με διεύθυνση Β-Ν. Τέλος, στην τομή Γ έγιναν μετρήσεις κάθετα προς την βορειότερη ανωμαλία (Εικόνα 90).



Εικόνα 90: Επιτόπιες μετρήσεις στη θέση Άρκαλον 12/03/2010. Αριστερά το διάγραμμα λήψης των μετρήσεων

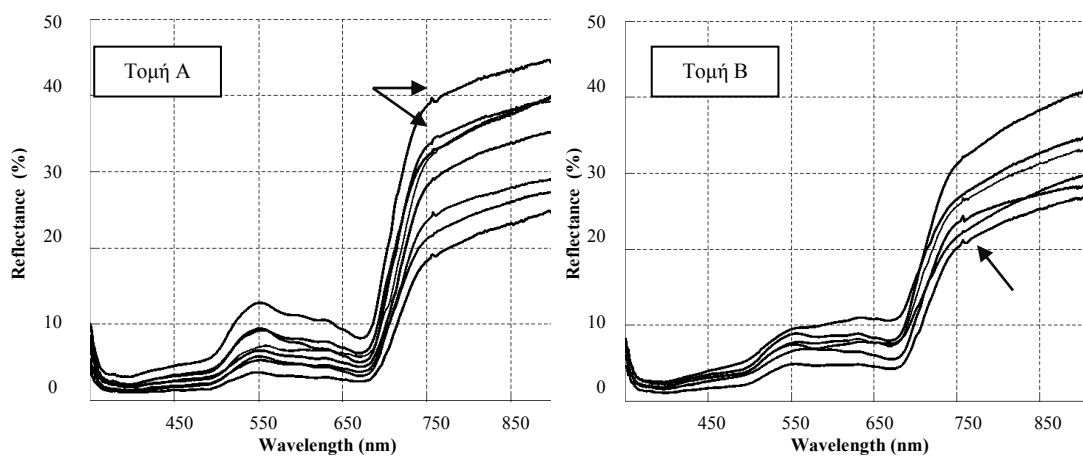
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στις τρεις τομές παρουσιάζονται στην Εικόνα 91. Η μέτρηση η οποία ταυτίζεται με την υπεδάφια ανωμαλία σημειώνεται με βέλος στο γράφημα, εκτός από την τομή Β που οι μετρήσεις λήφθηκαν κατά μήκος της γεωφυσικής ανωμαλίας. Από τις μετρήσεις αυτές εντοπίζεται και πάλι διαφοροποίηση της φασματικής υπογραφής του κριθαριού στο εγγύς υπέρυθρο σε περιοχές όπου υπήρχε μαγνητική ανωμαλία. Οι μετρήσεις στην τομή Β, οι οποίες έγιναν κατά μήκος των υπεδάφιων αρχιτεκτονικών καταλοίπων, έδειξαν διαφορετικές διακυμάνσεις, το οποίο θα πρέπει να συνδεθεί με τυχών ανομοιογένεια των υπεδάφιων καταλοίπων.

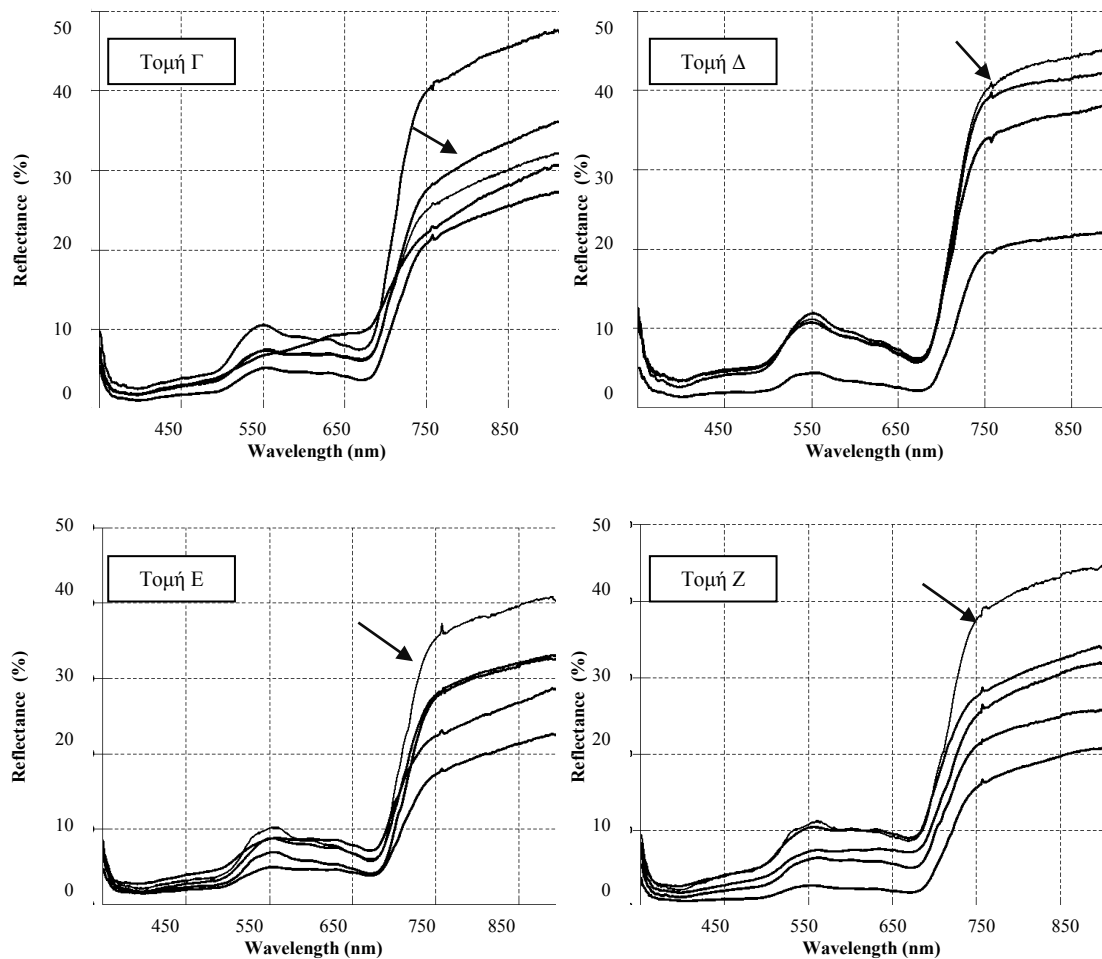




Εικόνα 91: Φασματικές υπογραφές για τις τομές Α-Γ πάνω από τη γεωφυσική ανωμαλία κατά της 12/03/2010

Κατά την επόμενη επίσκεψη στη θέση Άρκαλον, στις 24/03/2010, πραγματοποιήθηκαν έξι διαδοχικές φασματοραδιομετρικές μετρήσεις σε μορφή κάθετων τομών κατά μήκος της νότιας ανωμαλίας. Ως αρχική τομή, (τομή Α), θεωρήθηκε η δυτικότερη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 92. Οι μετρήσεις οι οποίες ταυτίζονται με την υπεδάφια ανωμαλία σημειώνεται με βέλος στα γραφήματα.

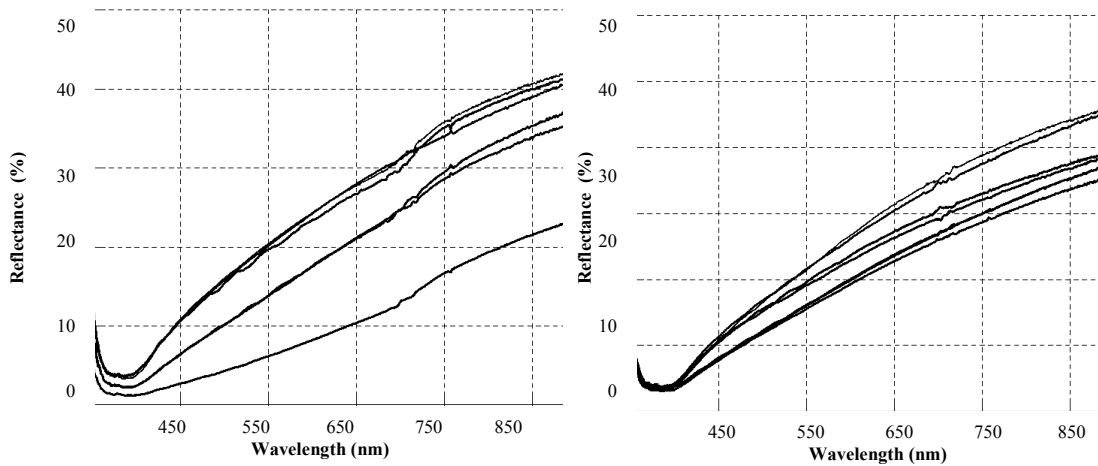




Εικόνα 92: Φασματικές υπογραφές για τις τομές Α-Z πάνω από την γεωφυσική ανωμαλία κατά της 24-03-2010

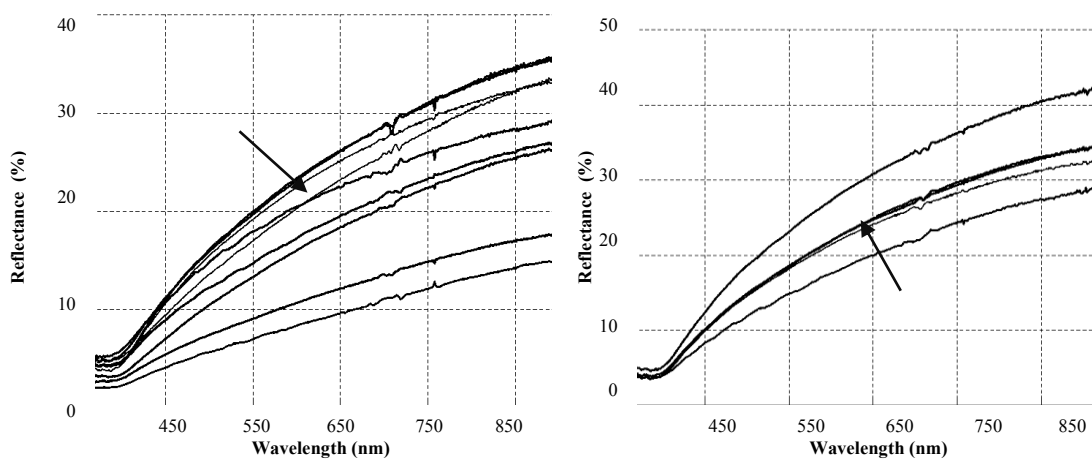
Σε πέντε από τις έξι τομές που έγιναν (τομή Α-Β και τομή Δ-Ζ), έδειξαν ότι η βλάστηση παρουσιάζει την ψηλότερη ή τη χαμηλότερη ανάκλαση σε περιοχές πάνω από τη μαγνητική ανωμαλία στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου.

Οι επόμενες μετρήσεις στην περιοχή διεξήχθησαν στις 28/04/2010. Σε αυτή την περίοδο το κριθάρι είχε ήδη κιτρινίσει και οι μετρήσεις είχαν αναγνωριστικό χαρακτήρα, για να εξεταστεί κατά πόσο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις σε βλάστηση, όταν αυτή βρισκόταν στον τελευταίο κύκλο ζωής της. Για το σκοπό αυτό έγιναν μερικές δειγματοληψίες στο γενικότερο χώρο της περιοχής Άρκαλον. Οι φασματοραδιομετρικές μετρήσεις (Εικόνα 93) έδειξαν ότι το κριθάρι δεν παρουσίαζε πλέον την χαρακτηριστική καμπύλη στο εγγύς υπέρυθρο (NIR), η οποία παρουσιάζεται σε φυτά με υγιή βλάστηση.



Εικόνα 93: Φασματικές υπογραφές κριθαριού κατά της 28/04/2010

Οι τελευταίες μετρήσεις έγιναν στις 04/05/2010. Αν και οι προηγούμενες μετρήσεις έδειξαν ότι το κριθάρι έχει πλέον σταματήσει να φωτοσυνθέτει, εντούτοις κρίθηκε σκόπιμο να γίνει άλλη μια επίσκεψη, αφού κατά τις προηγούμενες μέρες της επίσκεψης είχε παρουσιαστεί στην περιοχή έντονη βροχόπτωση. Έγιναν συνολικά δύο σειρές μετρήσεων σε μορφή κάθετων τομών πάνω στη νότια μαγνητική ανωμαλία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 94. Οι μετρήσεις οι οποίες ταυτίζονται με την υπεδάφια ανωμαλία σημειώνονται με βέλος στα γραφήματα. Από τις μετρήσεις φαίνεται ότι η υπεδάφια ανωμαλία δεν θα μπορούσε να προσδιοριστεί με βάση τη φασματική υπογραφή του κριθαριού σε αυτήν την φάση του κύκλου του.



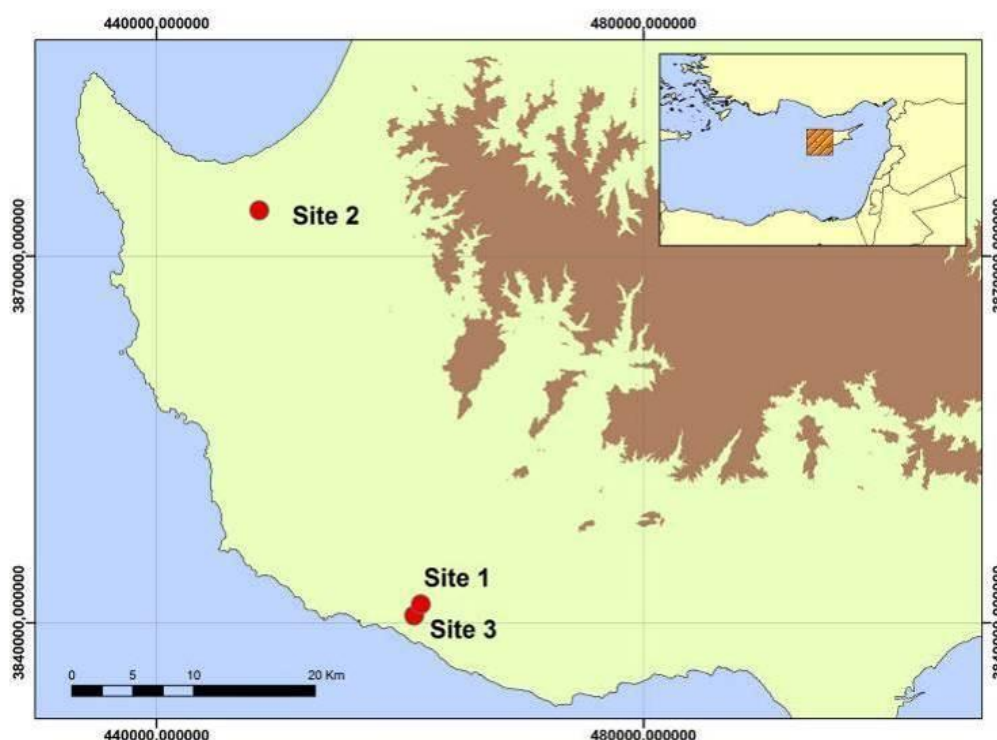
Εικόνα 94: Φασματικές υπογραφές κριθαριού κατά την 04/05/2010

Αν και οι φασματοραδιομετρικές μετρήσεις ήταν σε πλήρη συμφωνία με τις γεωφυσικές διασκοπήσεις, εντούτοις οι αρχαιολογικές ανασκαφές εντόπισαν μόνο

φτωχά οικιστικά κατάλοιπα. Αυτό οδήγησε στην επανάληψη των γεωφυσικών διασκοπήσεων σε μεγαλύτερη έκταση στη θέση Άρκαλον, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7, μαζί με τον σχολιασμό των φασματοραδιομετρικών αποτελεσμάτων.

6.2.1.2. Μελέτη φαινολογικού κύκλου

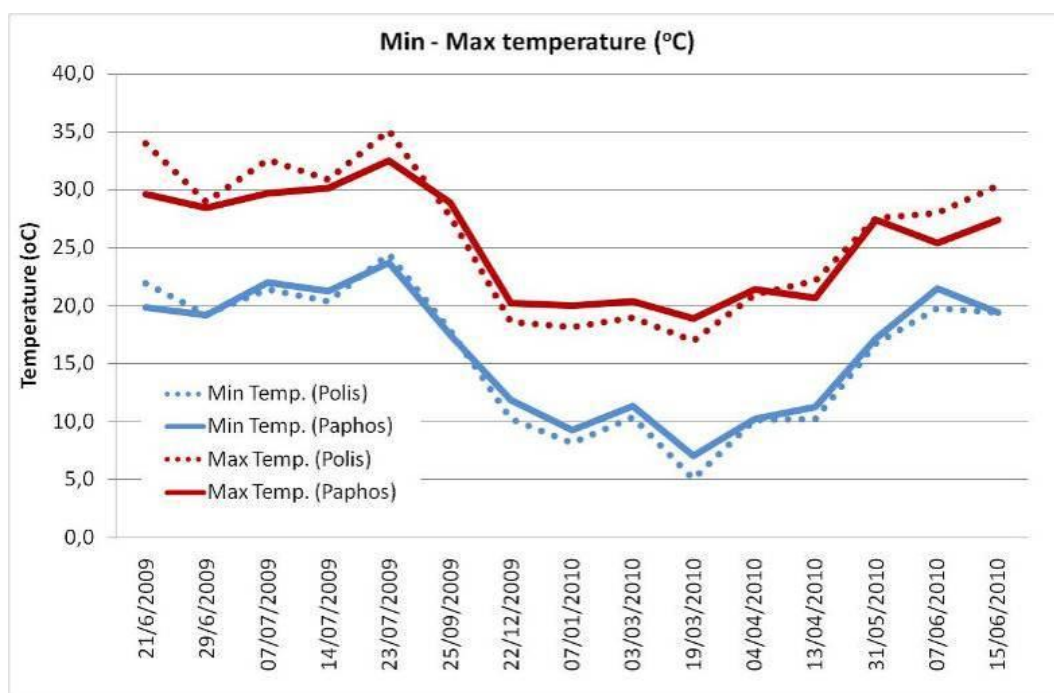
Για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης στο δυτικό τμήμα της θέσης Άρκαλον χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat TM and ETM+ (Αγαρίου και Hadjimitsis, 2011). Στην περιοχή αυτή είχαν πραγματοποιηθεί τον Ιούνιο - Ιούλιο του 2010, αρχαιολογικές έρευνες από το Τμήμα Αρχαιοτήτων με σημαντικά ευρήματα. Οι δορυφορικές εικόνες ήταν ελεύθερα προσβάσιμες από τη βάση της USGS Glovis (<http://glovis.usgs.gov/>). Από τον Ιούνιο του 2009 μέχρι και τον Ιούνιο του 2010 εξετάστηκε ένας πλήρης φαινολογικός κύκλος. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις από τη θέση 1.



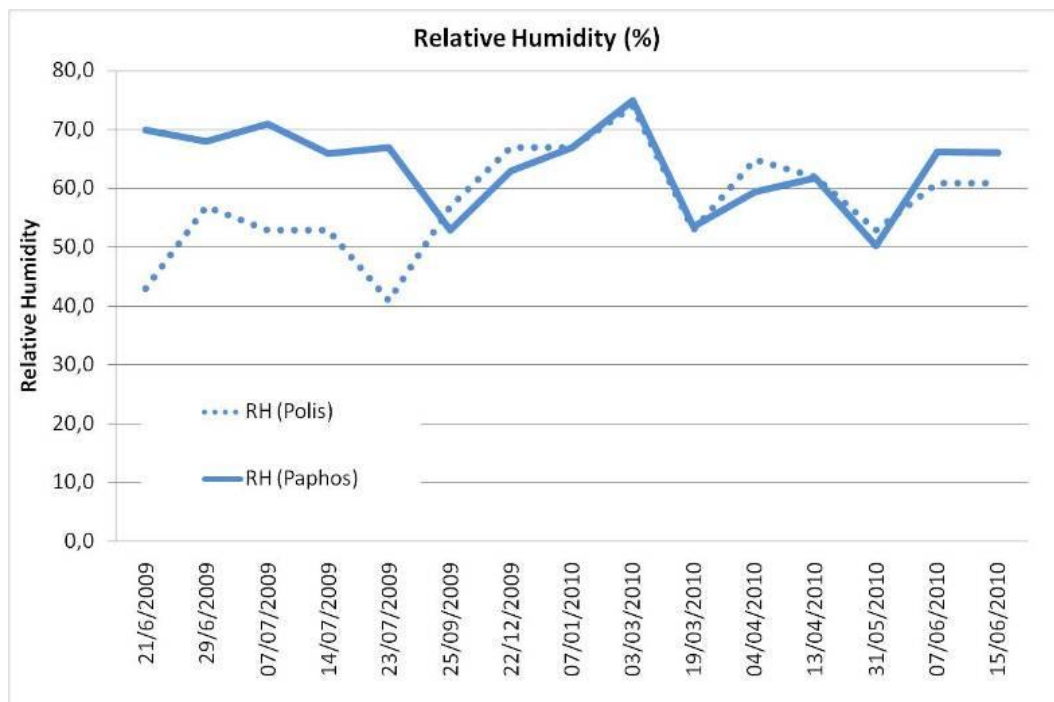
Εικόνα 95: Περιοχές μελέτης φαινολογικού κύκλου: Η θέση 1 αντιστοιχεί στην αρχαιολογική περιοχή Άρκαλον, η θέση 2 σε αγροτική έκταση στην περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς και η θέση 3 σε αγροτική έκταση στην περιοχή των Κουκλιών.

Ο φαινολογικός κύκλος, μελετήθηκε σε τρεις διαφορετικές αγροτικές εκτάσεις (Εικόνα 95). Η πρώτη περιοχή (θέση 1) είναι ο αρχαιολογικός χώρος της Παλαιάφου (θέση Άρκαλον, δυτικό τμήμα), η δεύτερη περιοχή μελέτης είναι μια αγροτική

έκταση στην περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς (θέση 2) και η τρίτη θέση (θέση 3) είναι επίσης μια αγροτική έκταση σε γειτνίαση με τη θέση 1. Σε όλες αυτές τις θέσεις καλλιεργείται κριθάρι κατά την περίοδο μελέτης. Η βασική θεωρία της εξέτασης του φαινολογικού κύκλου για αρχαιολογικές έρευνες βασίζεται στις διαφορετικές φασματικές υπογραφές, που πιθανώς να υπάρχουν σε περιοχές με υπεδάφια κατάλοιπα και σε υγιείς περιοχές. Για να ισχύει αυτή η θεώρηση, θα πρέπει να πληρούνται δύο βασικά κριτήρια: (α) οι περιοχές που μελετώνται να έχουν τα ίδια εδαφολογικά χαρακτηριστικά και (β) οι περιοχές να έχουν τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες. Πράγματι όπως φαίνεται και από την Εικόνα 96 και Εικόνα 97 οι τρεις περιοχές έχουν παρόμοια κλιματολογικά χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα από την περίοδο του Δεκεμβρίου μέχρι και τον Απρίλιο όπου αναπτύσσεται το κριθάρι. Επιπλέον, η βροχόπτωση σε όλες τις περιπτώσεις, όπως έχει καταγραφεί από μετεωρολογικούς σταθμούς ήταν 0.00mm. Από επιτόπιες επισκέψεις που έγιναν στις περιοχές μελέτης φαίνεται ότι το έδαφος για τη θέση 1 και τη θέση 3 είναι παρόμοιο, ενώ το έδαφος στη θέση 2 διαφέρει ελάχιστα ως προς τα ασβεστολιθικά του χαρακτηριστικά. Από γεωλογικούς χάρτες της περιοχής οι θέσεις 1 και 3 χαρακτηρίζονται ως λιθικό – ασβεστολιθικό έδαφος (lithic calcareous soil), ενώ η θέση 2 ως ένα μείγμα από λιθικές αλλουβιακές αποθέσεις.



Εικόνα 96: Ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για την περιοχή της Παλαιπάφου (Θέση 1 και Θέση 3) και οι αντίστοιχες μετρήσεις για την περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς (Θέση 2). Οι μετρήσεις λήφθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς.



Εικόνα 97: Μέση σχετική υγρασία για την περιοχή της Παλαιπάφου (θέση 1 και θέση 3) και οι αντίστοιχες μετρήσεις για την περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς (θέση 2). Οι μετρήσεις λήφθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε (15) δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ όπως δείχνει και ο Πίνακας 17. Οι απαραίτητες προεπεξεργασίες των εικόνων έγιναν μέσα από το λογισμικό ERDAS Imagine v. 10. Η προεπεξεργασία περιελάμβανε τη γεωμετρική διόρθωση των εικόνων με τη χρήση επίγειων σημείων ελέγχου και επίλυση με 2^{ου} βαθμού πολυώνυμα. Ακολούθησε η μετατροπή των ψηφιακών τιμών (Digital Numbers) σε μονάδες ακτινοβολίας και μετά σε μονάδες ανακλαστικότητας. Χαρακτηριστικό δείγμα των εικόνων τύπου Landsat TM και ETM+, όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 98.

Πίνακας 17: Κατάλογος εικόνων Landsat TM/ETM+ που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου

a/a	Δορυφόρος	Αισθητήρας	Ημερομηνία Λήψης	Ιουλιανή μέρα	Γωνία ύψους του ήλιου	Αζιμούθιο ήλιου
1	Landsat	TM	21/06/2009	172	65,88	111,03
2	Landsat	ETM+	29/06/2009	180	65,77	111,50
3	Landsat	TM	07/07/2009	188	64,84	111,92
4	Landsat	TM	14/07/2009	195	64,16	113,41

5	Landsat	TM	23/07/2009	204	63,10	116,16
6	Landsat	TM	25/09/2009	268	49,04	145,70
7	Landsat	ETM+	22/12/2009	356	27,96	155,96
8	Landsat	ETM+	07/01/2010	7	28,30	153,70
9	Landsat	ETM+	03/03/2010	62	41,72	143,92
10	Landsat	ETM+	19/03/2010	78	47,66	140,76
11	Landsat	ETM+	04/04/2010	94	53,57	137,03
12	Landsat	ETM+	13/04/2010	103	56,66	134,51
13	Landsat	ETM+	31/05/2010	151	66,48	116,68
14	Landsat	ETM+	07/06/2010	158	66,76	114,58
15	Landsat	TM	15/06/2010	166	66,48	112,40

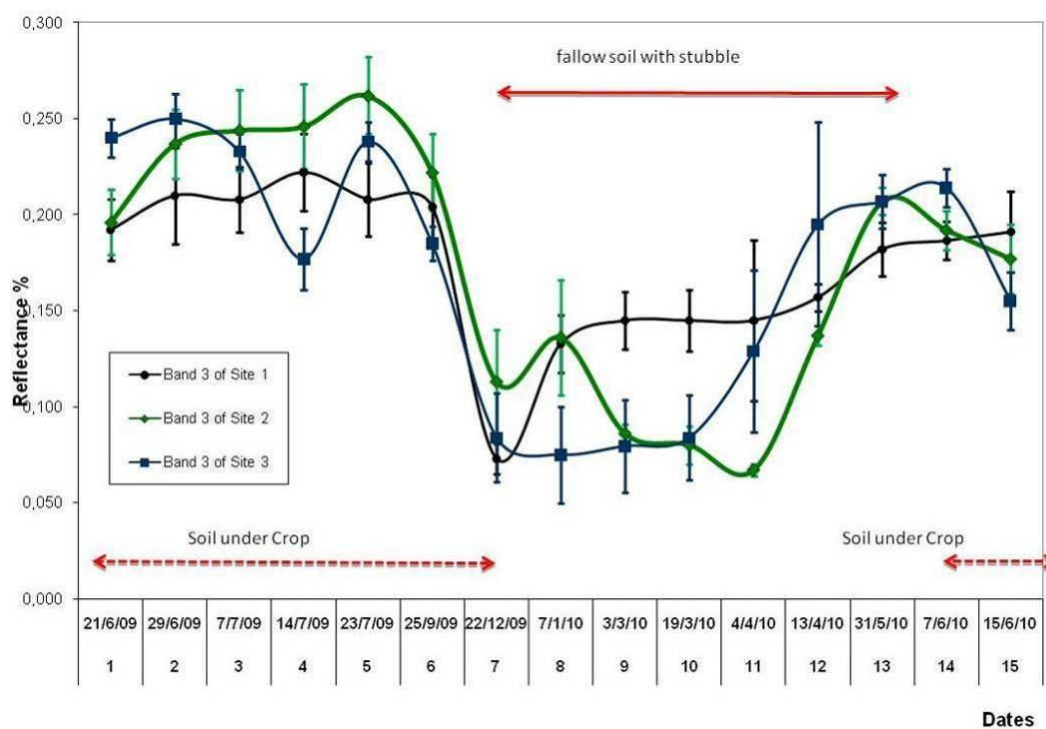


Εικόνα 98: Εικόνες τύπου Landsat TM/ETM+ στην περιοχή της Παλαιπάφου (θέση 1 και 3) – αριστερά- και στην περιοχή της Πόλης Χρυσοχούς –δεξιά).

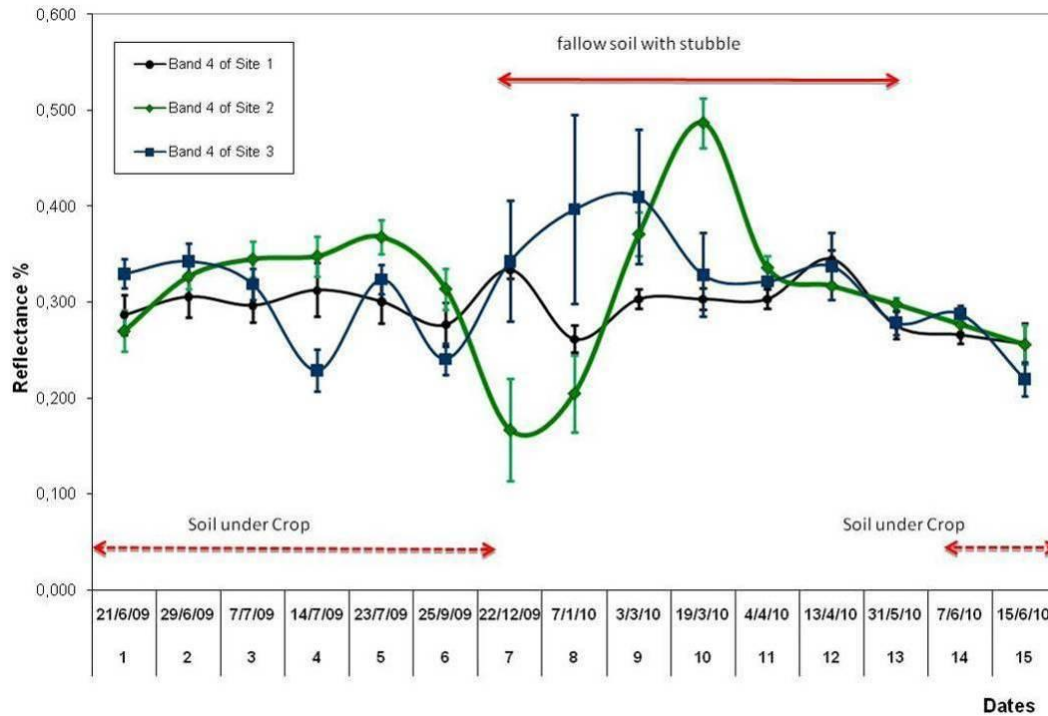
Επιπλέον έγιναν επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις στη θέση Άρκαλον (βλ. Κεφάλαιο 6.2.1.1) και χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των εξαγομένων από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων. Τα διακυμάνσεις της ανακλαστικότητας της βλάστησης στο κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο κανάλι, παρουσιάζονται στην Εικόνα 99 και Εικόνα 100 αντίστοιχα. Ιδιαίτερη σημασία λοιπόν για την παρακολούθηση τυχόν καταπόνησης των φυτών, είναι η περίοδος καλλιέργειας του κριθαριού, δηλαδή η περίοδος από τον Δεκέμβριο 2009 μέχρι και τον Απρίλιο 2010), αφού σε αυτή τη φάση το σπογγώδες παρέγχυμα αναμένεται να αρχίσει να ελέγχει την ποσότητα της ενέργειας στο εγγύς υπέρυθρο, το οποίο ανακλάται (Hatfield και Prueger, 2010).

Από την ανάλυση των δορυφορικών αποτελεσμάτων και ιδιαίτερα της ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο (Εικόνα 100), φαίνεται ότι η φασματική υπογραφή της βλάστησης για τις θέσεις 2 και 3 τείνει να είναι μεγαλύτερη μετά τη σπορά της περιοχής και να είναι σύμφωνη με τα αναμενόμενα για υγιή βλάστηση αποτελέσματα. Αυτό όμως δεν καταγράφεται για την αρχαιολογική θέση 1 που δείχνει μια καταπόνηση. Η ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο αν και αρχίζει να μεγαλώνει μετά τη σπορά, εντούτοις μετά από λίγο χρονικό διάστημα παρουσιάζει μια σχετική σταθεροποίηση, η οποία πιθανώς να συνδέεται με την ύπαρξη υπεδάφρων καταλοίπων.

Οι τυπικές αποκλίσεις που σημειώνονται στα γραφήματα θα πρέπει να αποδοθούν στις απότομες αλλαγές που παρατηρούνται όταν γίνεται φωτοσύνθεση στη βλάστηση, ιδιαίτερα για την περίοδο Δεκέμβριο με Απρίλιο. Σύμφωνα με τους Hatfield και Prueger (2010) η δυναμική εξέλιξη των φυτών που έχει αντίκτυπο και στις ανακλαστικότητες, υποδηλώνουν ότι θα πρέπει να γίνονται συχνές παρατηρήσεις σε περιόδους καλλιέργειας φυτών σε αντίθεση με τις άλλες εποχές, όπου παρατηρείται μικρή αλλαγή της τυπικής απόκλισης.

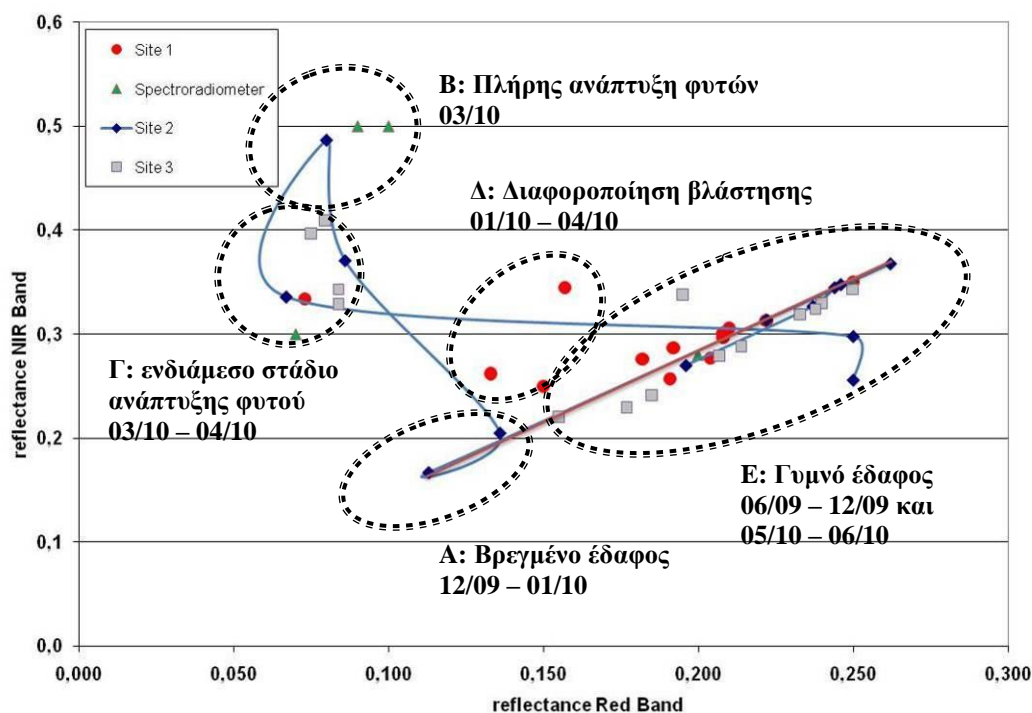


Εικόνα 99: Ακτινοβολία βλάστησης στο κόκκινο μήκος κύματος (Band 3) στις τρεις περιοχές μελέτης.



Εικόνα 100: Ακτινοβολία βλάστησης στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος (Band 4) στις τρεις περιοχές μελέτης.

Ο τρόπος με τον οποίο μεγαλώνουν τα σιτηρά στις θέσεις 2 και 3 παρουσιάζεται στην Εικόνα 101. Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές ανακλαστικότητας στο κόκκινο (X άξονας) και στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι (Y άξονας). Το διάγραμμα αυτό αποτελεί τη βασική θεωρία για τον αλγόριθμο Tasseled Cap όπως αυτός έχει αναπτυχθεί από τους J. Kauth και G.S. Thomas (1976). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα μετά τις πρώτες χειμερινές βροχές στην περιοχή (Σημείο Α, Εικόνα 101), τα σιτηρά αρχίζουν να μεγαλώνουν μέχρι να αναπτυχθούν πλήρως (Σημείο Β, Εικόνα 101). Αυτό απεικονίζεται στις δορυφορικές εικόνες Landsat TM/ETM+ ως περιοχές με υψηλή ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο και χαμηλή ανακλαστικότητα στο κόκκινο κανάλι. Μετά από αυτό το σημείο, η βλάστηση αρχίζει να μαραίνεται (Σημείο Γ, Εικόνα 101) μέχρι και την περίοδο του θερισμού, όπου η περιοχή γίνεται πλέον γυμνό έδαφος (Σημείο Ε, Εικόνα 101). Αυτός ο κύκλος δε φαίνεται να απεικονίζεται για τη θέση 1 (Σημείο Δ, Εικόνα 101). Στην Εικόνα 101 έχουν προστεθεί και οι επίγειες μετρήσεις από τα φασματοραδιόμετρα με σκοπό να γίνει έλεγχος των παρατηρήσεων.



Εικόνα 101: Ανακλαστικότητα των θέσεων 1-3 στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.

Είναι λοιπόν δυνατό να καταγραφούν φασματικές ανωμαλίες, λόγω παρουσίας υπεδάφιων καταλοίπων, αφού αυτές οδηγούν σε καταπόνηση των φυτών. Τέτοιες ανωμαλίες μπορεί να εντοπιστούν και μέσα από τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 103, αφού ο φαινολογικός κύκλος συνδέεται άμεσα με τον τρόπο με τον οποίο η βλάστηση επιδρά στην ηλιακή ακτινοβολία (Hatfield *et al.*, 2008). Για την ορθή ερμηνεία όμως του κύκλου είναι απαραίτητο να μελετηθεί η Εικόνα 102. Αυτό το διάγραμμα αποτελεί βασικό εργαλείο για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να συμπεριφερθεί ο δείκτης βλάστησης NDVI σε παρόμοιες καλλιέργειες κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Αλλαγές στον τύπο του εδάφους ή στις κλιματολογικές συνθήκες έχουν άμεση επίδραση στο δείκτη βλάστησης NDVI κατά τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου. Άλλες αλλαγές μπορεί να εντοπιστούν λόγω διαφορετικού τρόπου καλλιέργειας ή ακόμη και άλλων τοπικών παραγόντων. Τέλος αλλαγές, λόγω καταπόνησης των φυτών, μπορεί να συνδεθούν με αρκετή ασφάλεια και με την ύπαρξη υπεδάφιων αρχαιολογικών καταλοίπων.

Όπως αναφέρει ο McCloy (2010) στην εργασία του, όλες οι υποθέσεις σχετικά με το φαινολογικό κύκλο των φυτών οδηγούν στη δημιουργία συνολικά πέντε

διαφορετικών παραλλαγών φαινολογικού κύκλου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 102. Αυτές οι παραλλαγές αναφέρονται σε περιοχές με ίδια καλλιέργεια και είναι:

Περίπτωση Α: Μετατόπιση του δείκτη NDVI (άξονας Y) σε περιοχές όπου υπάρχει συγκράτηση υγρασίας. Περιοχές με περισσότερη βροχόπτωση μπορεί να οδηγήσουν στην αύξηση του δείκτη NDVI και το αντίστροφο σε περιοχές με λιγότερη βροχόπτωση. Η Περίπτωση Α μπορεί να καταγραφεί ακόμη και όταν υπάρχουν στο έδαφος θρεπτικά συστατικά τα οποία σχετίζονται με την ύπαρξη υπεδάφιων αρχαιολογικών καταλοίπων.

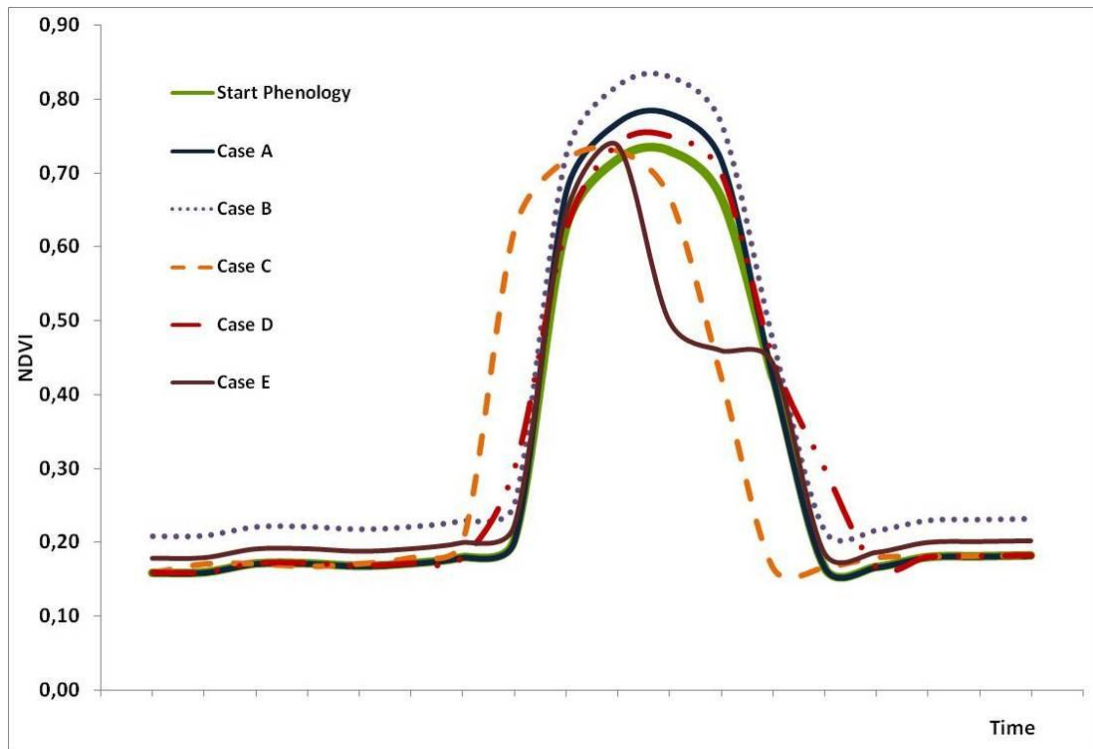
Περίπτωση Β: Γενική αύξηση του δείκτη NDVI καθόλη τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περιοχές με παρόμοια –όχι ίδια– καλλιέργεια.

Περίπτωση Γ: Μετατόπιση της μέγιστης τιμής NDVI ως προς το χρόνο που αυτή παρουσιάζεται (άξονας X). Αυτή η μετατόπιση συνδέεται με περιοχές όπου υπάρχει αλλαγή των κλιματολογικών συνθηκών, οι οποίες οδηγούν στην μετατόπιση του κύκλου ζωής των φυτών.

Περίπτωση Δ: Επιμήκυνση της διάρκειας καλλιέργειας η οποία οδηγεί στην αύξηση ή τη μείωση της διάρκειας του φαινολογικού κύκλου, λόγω αύξησης ή μείωσης της θερμοκρασίας.

Περίπτωση Ε: Αλλαγή στο σχήμα της φαινολογικής καμπύλης κατά τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου. Αυτό μπορεί να συμβεί μετά από την επιδρομή μυκήτων ή εντόμων στα φύλλα. Παράλληλα, τέτοια φαινόμενα, μπορεί να σημειωθούν λόγω απότομης αλλαγής των καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου (π.χ ύπαρξη καύσωνα). Η Περίπτωση Ε μπορεί να καταγραφεί ακόμη και σε περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, ή εμφανίζεται παρακράτηση υπερβολικής ποσότητας νερού από το έδαφος τα οποία σχετίζονται με την ύπαρξη υπεδάφιων αρχαιολογικών καταλοίπων.

Με βάση το φαινολογικό κύκλο μπορεί κανείς να διακρίνει περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος υπό την προϋπόθεση οι περιοχές που μελετώνται να έχουν παρόμοια εδαφολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά.

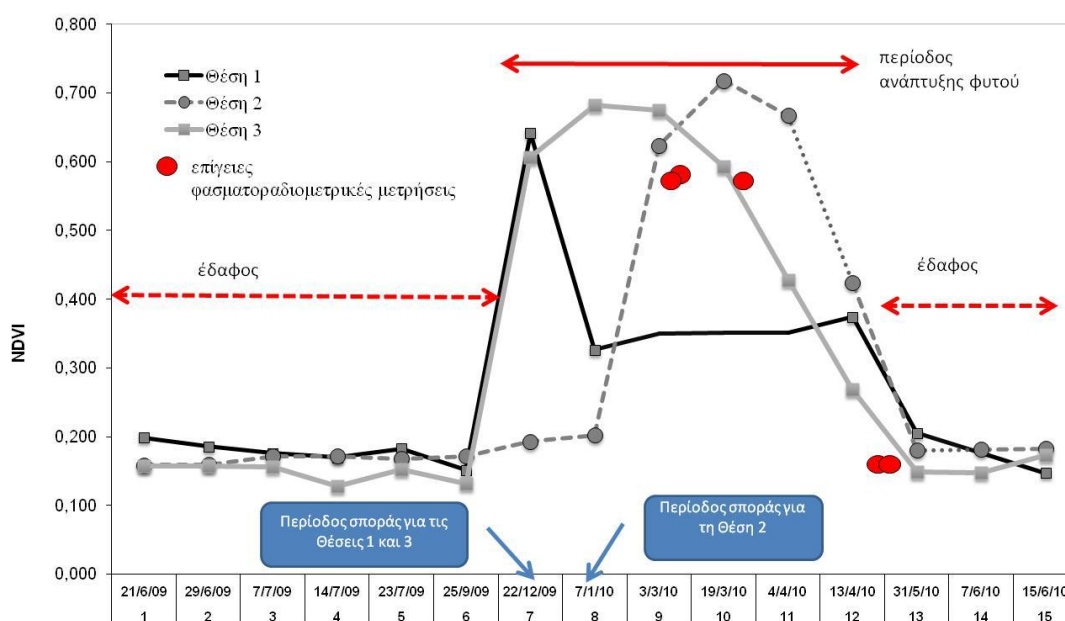


Εικόνα 102: Φαινολογικός κύκλος φυτών σε διαφορετικές περιπτώσεις

Συγκεκριμένα, από την περίοδο 21/06/2009 μέχρι και τις 25/09/2009 (βλ. Εικόνα 103) ο δείκτης βλάστησης NDVI είναι παρόμοιος για όλες τις θέσεις (θέση 1-3). Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού σε αυτή την περίοδο στις αγροτικές περιοχές δεν υπάρχει ακόμη βλάστηση. Η επόμενη εικόνα Landsat με ημερομηνία λήψης 22/12/2009 παρουσιάζει ψηλές τιμές NDVI για τις θέσεις 1 και 3 σε αντίθεση με την περιοχή 2. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι, ενώ στις θέσεις 1 και 3 έγινε η σπορά του κριθαριού, στη θέση 2 έχει καθυστερήσει. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι θέσεις 1 και 3 αφού έχουν παρόμοιες πρακτικές σποράς αναμένουμε τις ίδιες τιμές στο δείκτη βλάστησης NDVI..

Στην επόμενη εικόνα (07/01/2010), παρουσιάζεται μια απότομη μείωση του δείκτη βλάστησης NDVI στη θέση 1. Η μείωση του NDVI μπορεί μόνο να συνδεθεί με την καταπόνηση των φυτών λόγω της ύπαρξης των υπεδάφινων καταλοίπων. Μάλιστα η καταπόνηση αυτή, μπορεί να συνδεθεί με “negative crop mark” λόγω πιθανής ύπαρξης αρχιτεκτονικών λειψάνων. Οι ανασκαφικές δραστηριότητες από το Τμήμα Αρχαιοτήτων στην περιοχή μελέτης, επιβεβαίωσαν αυτή την υπόθεση, με τον εντοπισμό αρχιτεκτονικών καταλοίπων.

Στις άλλες δύο θέσεις (Θέση 2 και 3), ο φαινολογικός κύκλος εξελίχθηκε ομαλά όπως αναμενόταν. Από τις 07/01/2010 μέχρι και τις 31/05/2010, το κριθάρι στη θέση 2 ξεκινάει να αναπτύσσεται ομαλά μέχρι και την περίοδο του θερισμού. Η χρονική μετατόπιση (άξονας X) που παρουσιάζεται στο δείκτη NDVI για τις θέσεις 1, 3 (22/12/2009) και τη θέση 2 (19/03/2010), είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών γεωργικών πρακτικών που εφαρμόζονταν στις περιοχές.



Εικόνα 103: Δείκτης NDVI σε αρχαιολογικές και μη αρχαιολογικές περιοχές. Στο διάγραμμα απεικονίζονται επίσης και οι επίγειες μετρήσεις από φασματοραδιόμετρα.

Οι επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις σε υγρή βλάστηση που λήφθηκαν από τη θέση 1 και σε περιοχές εκτός της μαγνητικής ανωμαλίας, επιβεβαιώνουν τις δορυφορικές παρατηρήσεις. Μάλιστα οι τιμές NDVI βρέθηκαν να είναι πολύ κοντά με τις τιμές της θέσης 3. Οι τιμές NDVI των επίγειων μετρήσεων σε σχέση με τα δορυφορικά αποτελέσματα για τη θέση 3 έχουν απόκλιση λιγότερη από 5%, τα οποία μπορεί να οφείλετε και στις σχετικές αβεβαιότητες της ραδιομετρικής βαθμονόμησης του δορυφορικού αισθητήρα (Trishchenko *et al.*, 2002).

6.2.1.3. Υπερφασματικά δορυφορικά δεδομένα

Για σκοπούς εκτίμησης της χρήσης υπερφασματικών δορυφορικών δεδομένων σε αρχαιολογικές εφαρμογές έγινε προγραμματισμός λήψης δορυφορικής εικόνας

CHRIS Proba πάνω από την περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Παλαιπάφου. Ο Πίνακας 18 παρουσιάζει τα φασματικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δορυφόρου. Η χωρική διακριτική ικανότητά του στο Mode 2 είναι στα 18 m.

Πίνακας 18: Φασματικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Chris Proba Mode 2

Band	Min Band	Max Band	Mid Band	Width (nm)
W1	406	415	411	10
W2	438	447	442	9
W3	486	495	490	9
W4	505	515	510	10
W5	526	534	530	9
W6	556	566	561	10
W7	566	577	570	8
W8	585	596	590	12
W9	618	627	622	9
W10	646	656	651	10
W11	666	677	672	11
W12	677	683	680	6
W13	683	689	686	6
W14	700	712	706	12
W15	752	759	755	7
W16	773	788	781	15
W17	863	881	872	18
W18	1003	1036	1019	33

Η γεωμετρική διόρθωση της αρχικής εικόνας έγινε με τη χρήση 2^{ου} βαθμού πολυωνύμου με κοινά σημεία (GCP) από αντίστοιχη εικόνα της περιοχής τύπου IKONOS. Η μετατροπή της αρχικής εικόνας σε τιμές ανακλαστικότητας έγινε με τη χρήση των εξισώσεων 5 και 6 (βλ.Κεφάλαιο 5.3.2).Η μετά-επεξεργασία της υπερφασματικής εικόνας Chris Proba μπορεί να διακριθεί σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) φωτοερμηνεία δορυφορικής εικόνας με τη χρήση ψευδόχρωμων σύνθετων, (β) εφαρμογή υπερφασματικών δεικτών βλάστησης / Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών –PCA- και (γ) τεχνικές unmixing. Η τελευταία τεχνική θεωρήθηκε αναγκαία να γίνει για το λόγο ότι η χωρική ανάλυση του δορυφόρου (18m) δεν

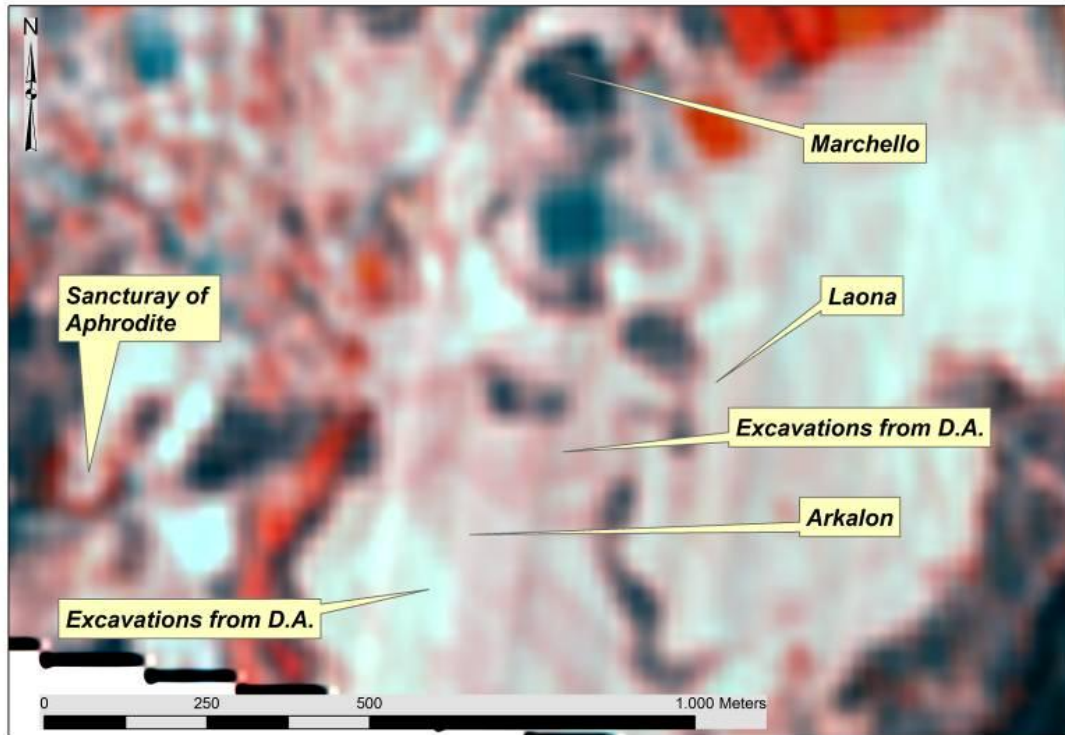
επαρκούσε για την φωτοερμηνεία και αναγνώριση τόσο ορατών όσο και υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων.

Μετά την εφαρμογή των πιο πάνω τεχνικών για σκοπούς ενίσχυσης της φωτοερμηνείας της δορυφορικής εικόνας Chris Proba, έγινε συγχώνευση (fusion) της εικόνας με δορυφορική εικόνα τύπου IKONOS υψηλότερης διακριτικής ικανότητας. Η διαδικασία αυτή, έγινε μέσα από τον αλγόριθμο Pan-Sharpener. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος συνδυάζει το παγχρωματικό κανάλι μιας εικόνας (π.χ. IKONOS) το οποίο είναι σε μεγαλύτερη χωρική ανάλυση και τη φασματική πληροφορία της εικόνας μιας δεύτερης (π.χ. Chris Proba). Η συγχώνευση των δύο εικόνων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές (π.χ. IHS Pan-Sharpener, PCA, Wavelet, P+XS κ.ά.). Η πιο διαδεδομένη τεχνική Pan-sharpen είναι η χρήση του αλγόριθμου HIS (Mercurjev *et al.*, 2007). Η ένταση (Intensity – I) αναφέρεται στην ολική φωτεινότητα ενός χρώματος και λαμβάνει τιμές από 0 (μαύρο) έως 1 (λευκό). Η απόχρωση (Hue – H) αναφέρεται στο κυρίαρχο ή μέσο μήκος κύματος του φωτός ενώ το S (Saturation) στον κορεσμό του χρώματος. Η τεχνική HIS, μετατρέπει την αρχική εικόνα από το σύστημα RGB σε ένα σύστημα HIS. Σε αυτή την περίπτωση όμως η ένταση (I) αντικαθίσταται από την παγχρωματική εικόνας.

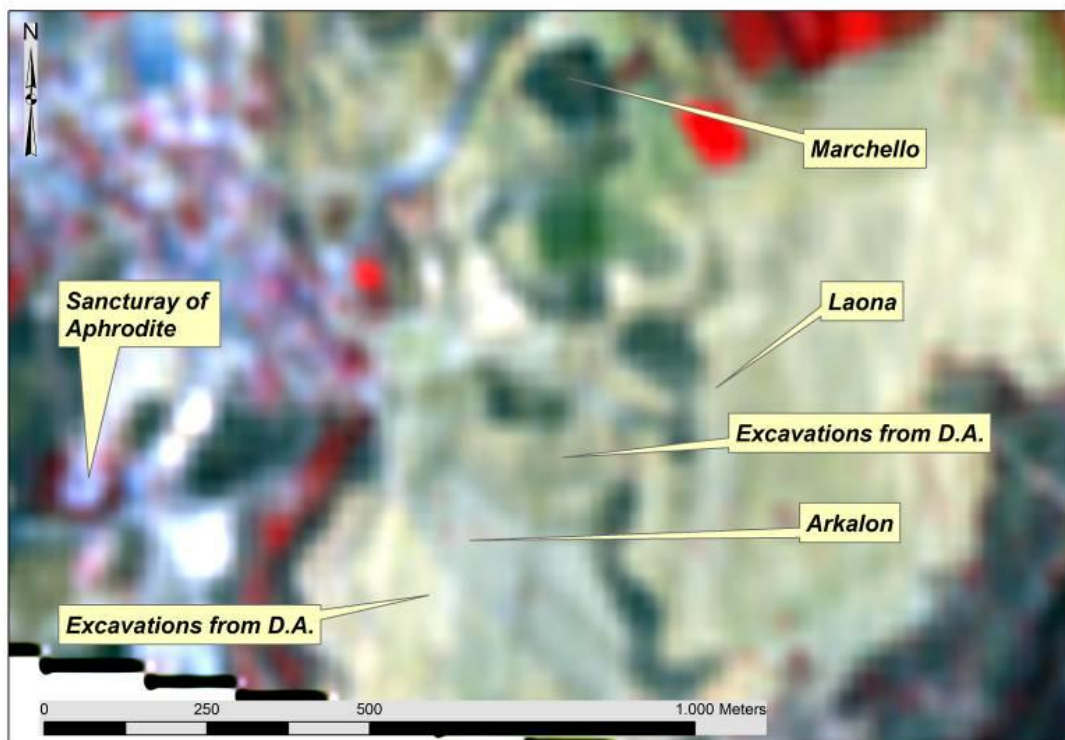
Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως η δορυφορική εικόνα IKONOS που χρησιμοποιήθηκε λήφθηκε μετά τις συστηματικές ανασκαφές που έλαβαν χώρα στην περιοχή της Παλαιπάφου, τόσο από την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου όσο και από το Τμήμα Αρχαιοτήτων. Αντίθετα η δορυφορική εικόνα τύπου Chris Proba έχει παρθεί πριν από αυτές τις έρευνες. Επομένως η νέα εικόνα που προέκυψε από την συγχώνευση δείχνει την οπτική “εικόνα” της περιοχής μετά από τις τελευταίες ανασκαφές αλλά η φασματική πληροφορία που την συνοδεύει αντιστοιχεί σε χρονική εποχή πριν από τις πιο πάνω αρχαιολογικές έρευνες.

(α) φωτοερμηνεία υπερφασματικής εικόνας

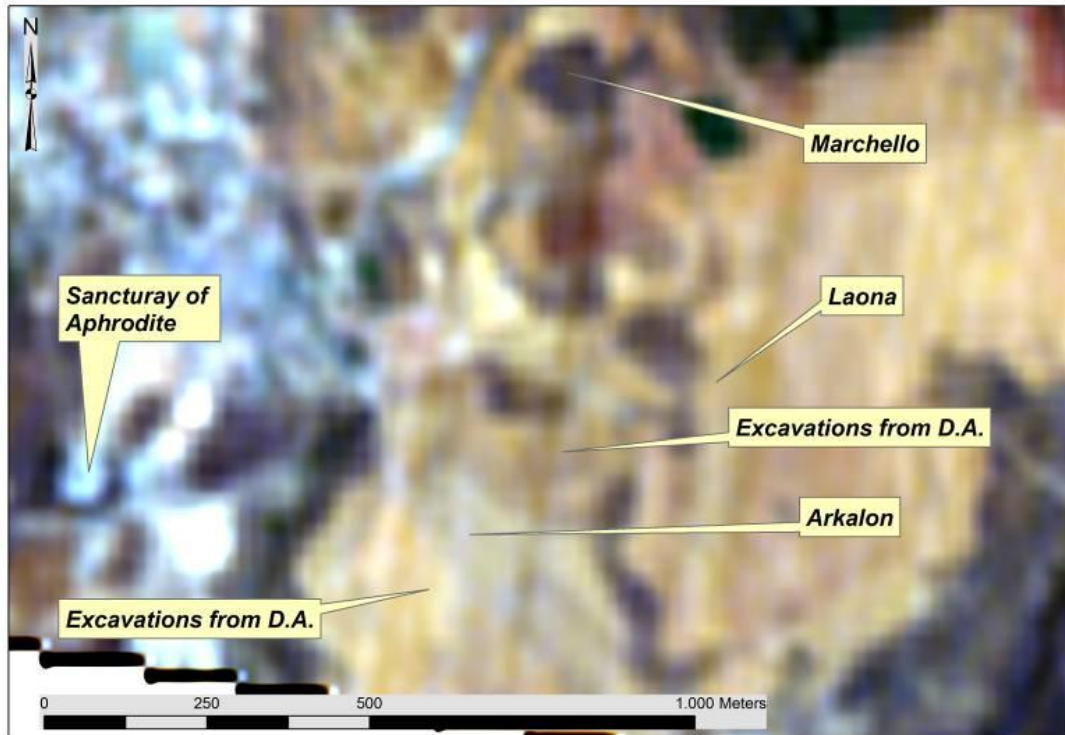
Η φωτοερμηνεία ψευδόχρωμων σύνθετων μέσα από τα δεδομένα του Chris Proba, όπως φαίνεται και από τις σχετικές εικόνες (Εικόνα 104 - Εικόνα 107), δεν μπόρεσε να οδηγήσει σε κάποια συμπεράσματα. Ο βασικός λόγος είναι η μικρή χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.



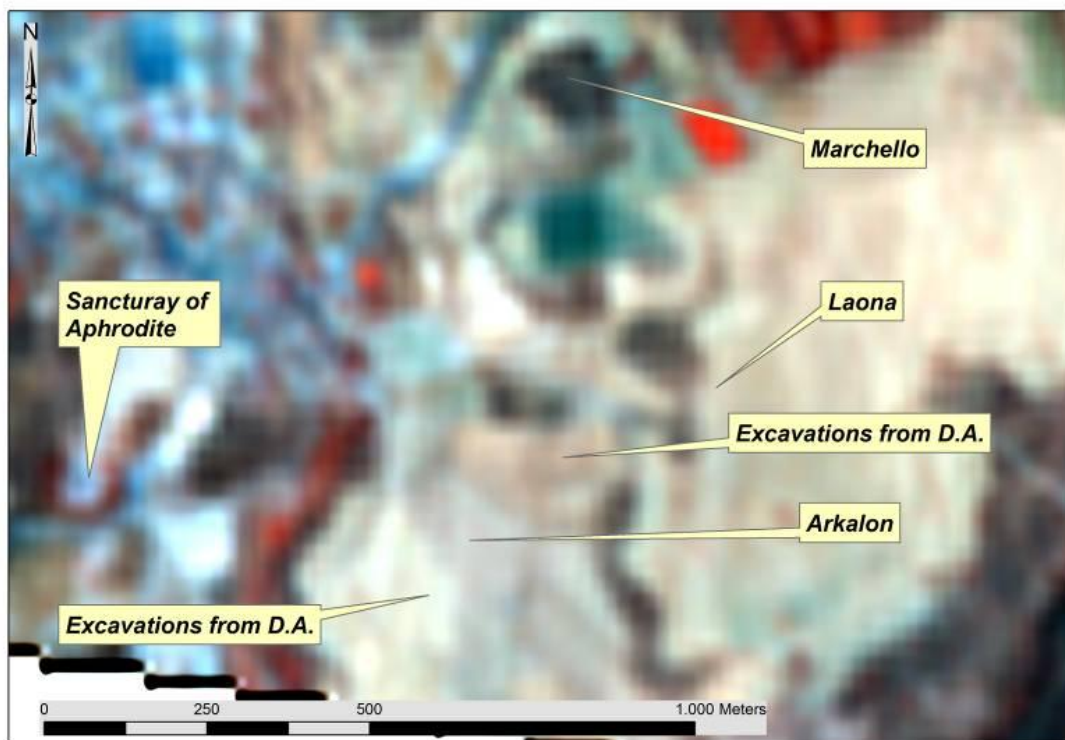
Εικόνα 104: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 17-14-11 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).



Εικόνα 105: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 15-10-3 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).



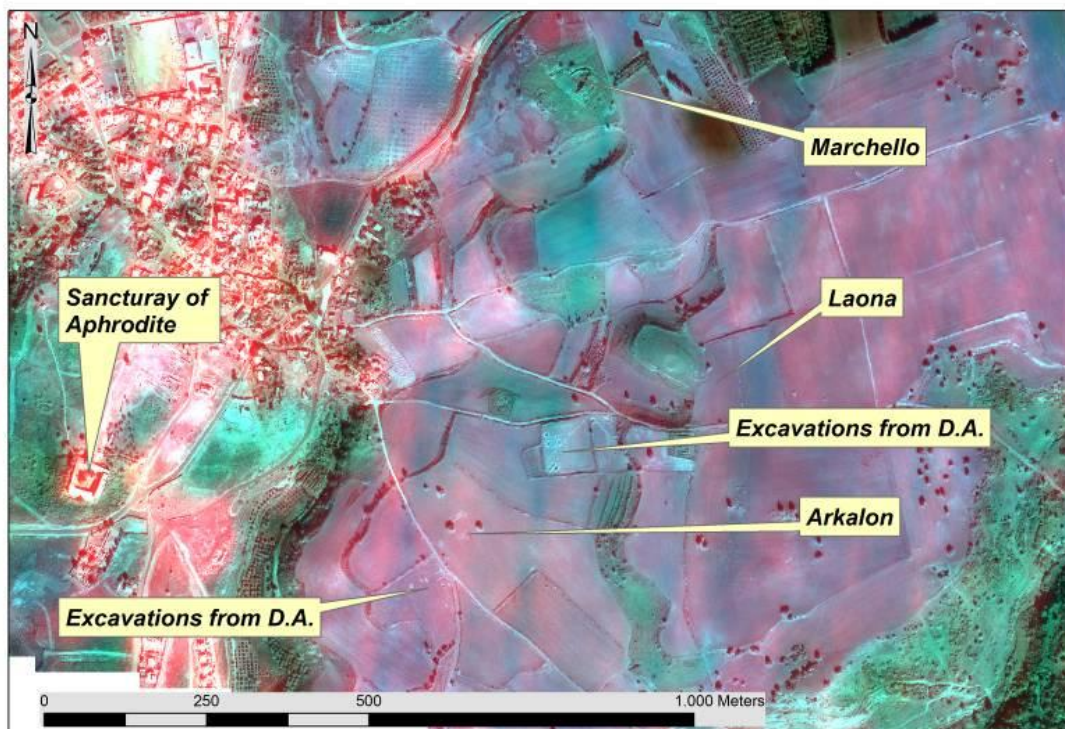
Εικόνα 106: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 10-5-1 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).



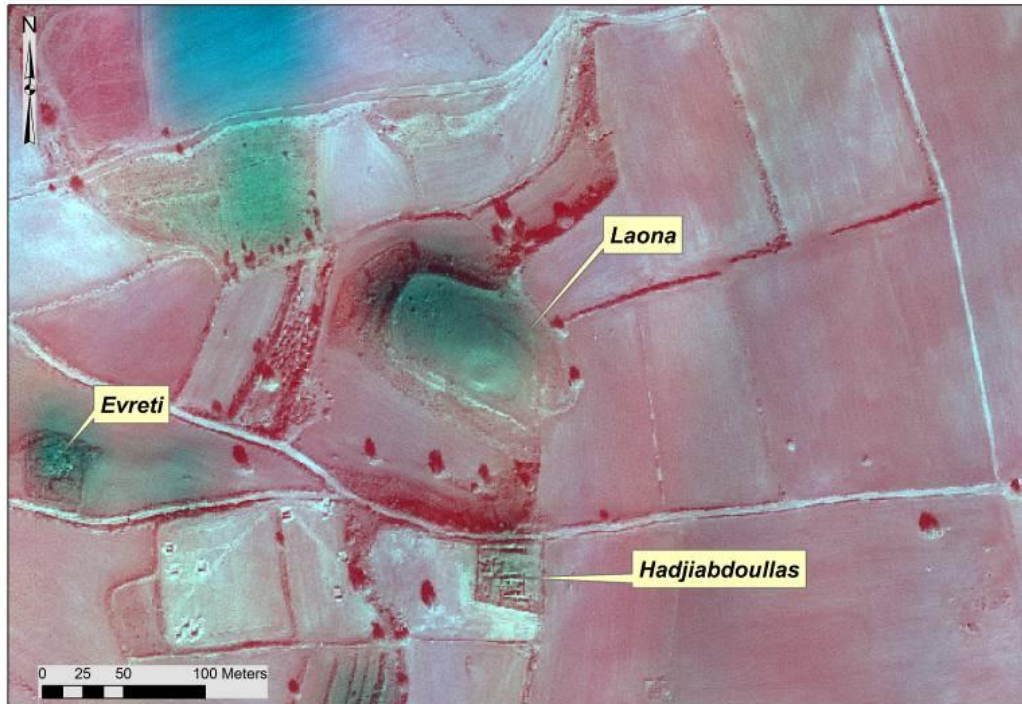
Εικόνα 107: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 18-14-7 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18).



Εικόνα 108: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 17-14-11 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18) μετά από τη διαδικασία του pan-sharpen.



Εικόνα 109: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 10-03-1 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18) μετά από τη διαδικασία του pan-sharpen.

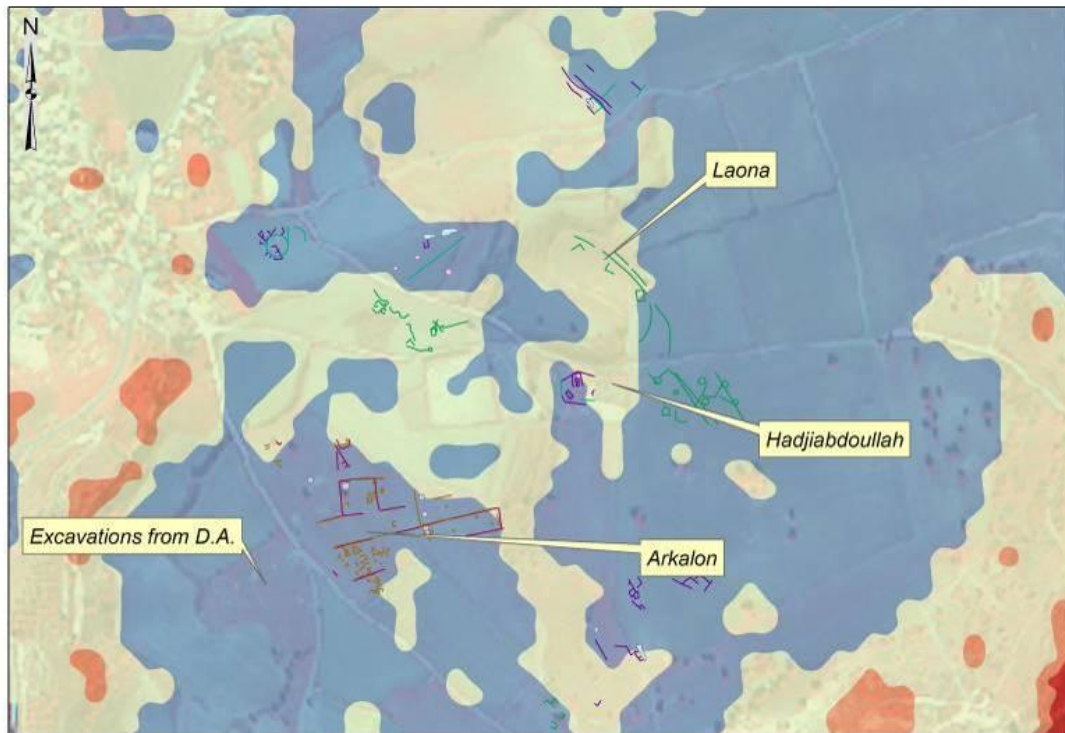


Εικόνα 110: Δημιουργία έγχρωμου σύνθετου 18-16-7 (βλ. κανάλια στον Πίνακα 18) μετά από τη διαδικασία του pan-sharpen.

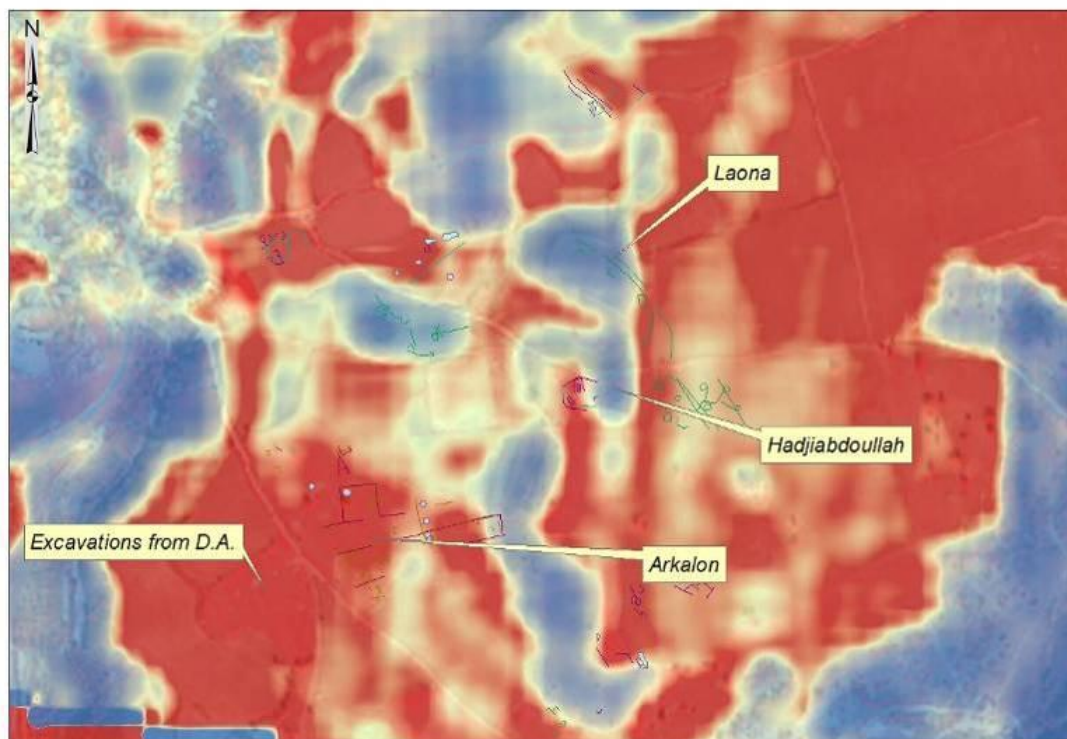
Η μελέτη της δορυφορικής εικόνας μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου pan-sharpen, όπως φαίνεται και στις σχετικές εικόνες (Εικόνα 108 - Εικόνα 110), απέδειξε ότι η φασματική διάκριση υπεδάφινων στόχων εξακολουθεί να είναι δύσκολη αν και τα αποτελέσματα βελτιώνονται οπτικά από την επεξεργασία. Η χρήση τους όμως όπως φαίνεται και από την Εικόνα 110, μπορεί να βοηθήσει στη φασματική διάκριση των ορατών μνημείων της περιοχής όπως είναι για παράδειγμα οι περιφραγμένοι αρχαιολογικοί χώροι στις θέσεις Ευρετή και Χατζηαπτουλλά. Επιπλέον είναι εφικτή και η φασματική διάκριση του υψώματος της θέσης Λαόνας. Οι διαφοροποιήσεις αυτές ενισχύονται ιδιαίτερα στα έγχρωμα σύνθετα τα οποία περιλαμβάνουν και το εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος.

(β) εφαρμογή υπερφασματικών δεικτών βλάστησης / PCA

Σε αντίθεση με τις πολυφασματικές εικόνες τύπου Landsat, είναι δυνατή η εφαρμογή υπερφασματικών δεικτών βλάστησης από τα υπερφασματικά δεδομένα του δορυφόρου Chris Proba. Για τους σκοπούς της διατριβής παρουσιάζονται μερικά από τα αποτελέσματα (Εικόνα 111- Εικόνα 112), όπως έχουν προκύψει από την εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων.



Εικόνα 111: Δημιουργία υπερφασματικού δείκτη mNDVI στην περιοχή της Παλαιπάφου. Τα διανυσματικά στοιχεία αφορούν αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων.

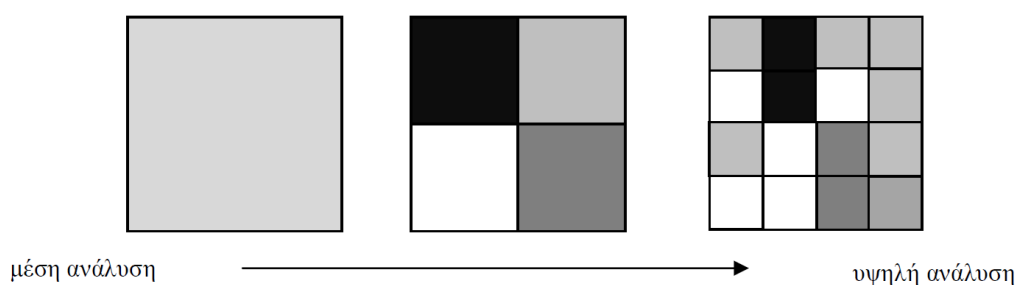


Εικόνα 112: Αποτελέσματα ανάλυσης PCA στην περιοχή της Παλαιπάφου. Τα διανυσματικά στοιχεία αφορούν αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα αυτά στο σύνολο τους, κρίνονται πολύ φτωχά, το οποίο θα πρέπει να αποδοθεί πρώτιστος στη μεσαία χωρική ανάλυση του υπερφασματικού δορυφορικού δέκτη Chris Proba. Πιθανοί υπεδάφιοι στόχοι, όπως καταγράφονται μέσα από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις, δεν είναι εύκολα ευδιάκριτοι μετά την εφαρμογή των διαφόρων υπερφασματικών δεικτών ή μετά από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA).

(γ) τεχνικές unmixing στην υπερφασματικά εικόνα

Με στόχο να εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης του υπερφασματικού δορυφόρου Chris Proba στην ευρύτερη περιοχή της Παλαιπάφου, ακολούθησε έρευνα όσον αφορά τη χρήση τεχνικών unmixing. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η χωρική ανάλυση δεν είναι η ιδανική με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεικτά εικονοστοιχεία (“mixed” pixels) (Εικόνα 130).



Εικόνα 113: Παράδειγμα mixed pixel ανάλογα με τη χωρική διακριτική ικανότητα του δέκτη.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, δύναται να χρησιμοποιηθούν τεχνικές up-scaling, όπως είναι η τεχνική Linear Spectral Unmixing (LSU) με στόχο να βελτιωθεί η αρχική εικόνα. Το φαινόμενο του mixed pixel δυσχεραίνει αρκετές εφαρμογές τηλεπισκόπησης συμπεριλαμβανομένων φυσικά και των αρχαιολογικών ερευνών. Τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι ταξινομήσεις εικόνων, όπου τέτοια εικονοστοιχεία συνήθως ταξινομούνται σε λάθος τάξεις / κατηγορίες.

Η τεχνική unmixing είναι η διαδικασία στην οποία η φασματική πληροφορία του mixed pixel διαχωρίζεται σε επι-μέρους φασματικές τάξεις (endmember) και έτσι κάθε εικονοστοιχείο αποτελείται από τμήματα των επί-μέρους τάξεων (fractions, abundances) (Ritter και Urcid, 2011).

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής εφαρμόστηκε η τεχνική constrained Linear Spectral Unmixing . Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το άθροισμα των επί μέρους τάξεων (abundance) θα πρέπει να είναι ίσο με 1, όπως φαίνεται και από την εξίσωση 8:

$$\mathbf{x} = \mathbf{S}\mathbf{a} + \mathbf{r} = \sum_{i=1}^m a_i \mathbf{s}^i + \mathbf{r};$$

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1 \text{ and } a_i \geq 0 \forall i,$$
[8]

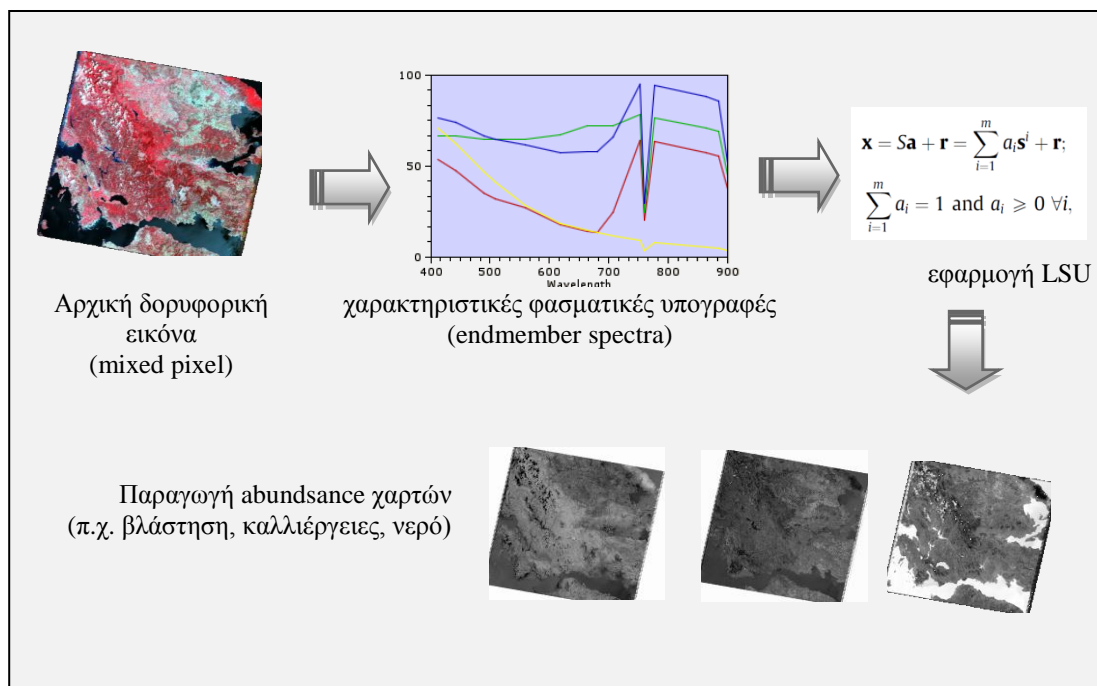
Όπου:

X: η φασματική ανακλαστικότητα στην εικόνα

S: ένας πίνακας n x m όπου οι στήλες του αποτελούνται από τις m φασματικές υπογραφές των endmembers

a: το ποσοστό των επί μέρους τάξεων στο εικονοστοιχείο

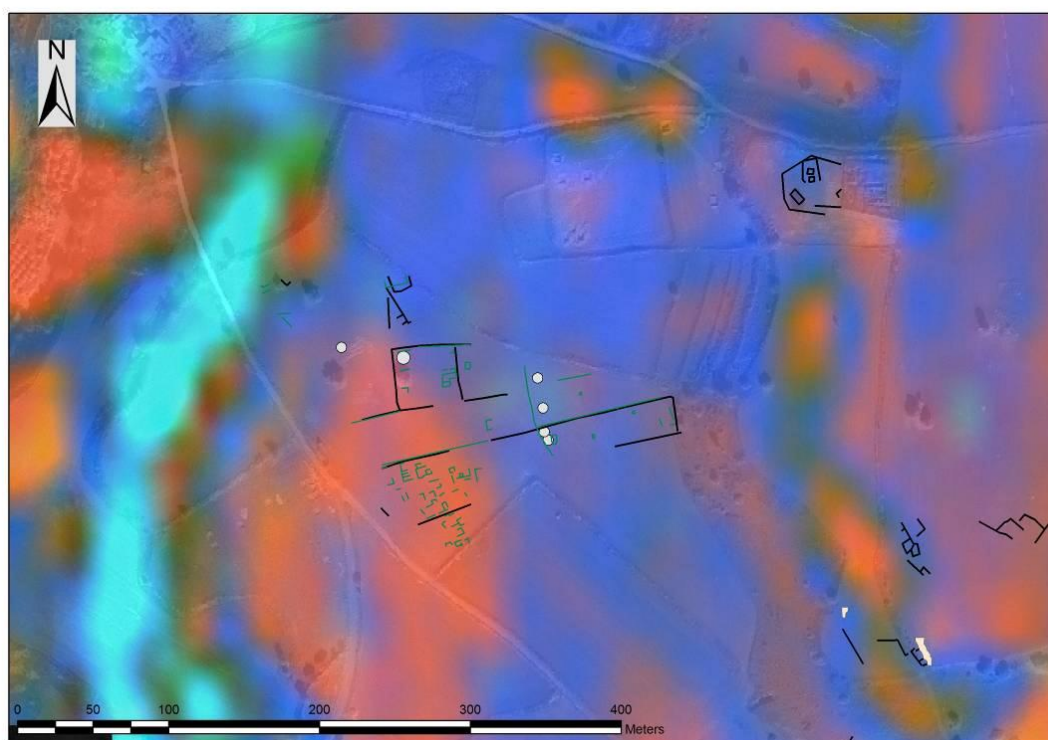
r: τυχαίος θόρυβος της εικόνας



Εικόνα 114: Μεθοδολογικό διάγραμμα εφαρμογής του αλγορίθμου LSU

Η Εικόνα 114 παρουσιάζει το μεθοδολογικό διάγραμμα εφαρμογής του αλγορίθμου LSU σε δορυφορικές εικόνες. Με τη χρήση φασματικών υπογραφών από την ίδια την εικόνα σε “καθαρά” (pure) pixels ή με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων, γίνεται η συλλογή των endmember spectra. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται ώστε αυτές

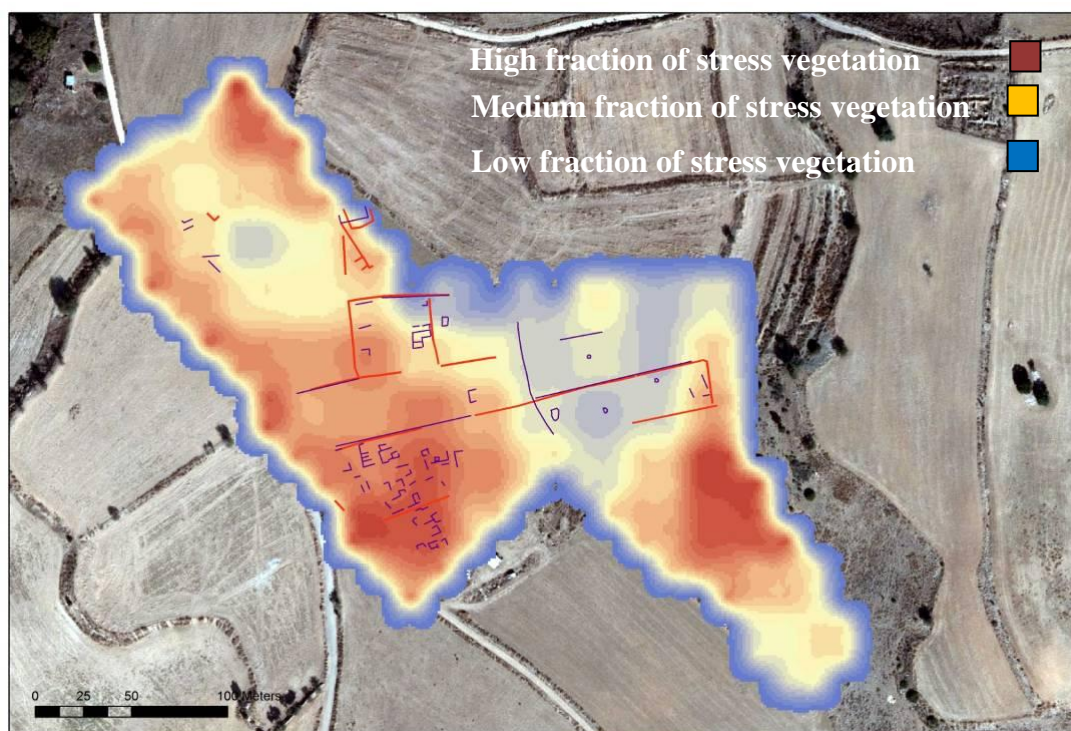
οι φασματικές υπογραφές να ανταποκρίνονται πλήρως στην υπό μελέτη εικόνα . Μετά τη συλλογή των φασματικών υπογραφών ο αλγόριθμος LSU εφαρμόζεται στην αρχική δορυφορική εικόνα και το τελικό αποτέλεσμα είναι η παραγωγή νέων εικόνων (abundance), τόσες σε αριθμό όσο και ο αριθμός των φασματικών υπογραφών + 1 (τυχαίος θόρυβος της εικόνας, r)



Εικόνα 115: Έγχρωμος σύνθετος χάρτης της περιοχής της Παλαιπάφου, μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου LSU σε δορυφορική εικόνα Chris Proba. Με κόκκινο περιοχές με καταπονημένη βλάστηση, με μπλε περιοχές με υγιή βλάστηση και πράσινο περιοχές με έδαφος.

Από φασματικές υπογραφές που συλλέχθηκαν από την ίδια την εικόνα Chris Proba και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου LSU προέκυψαν τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στην Εικόνα 115. Στην εικόνα αυτή απεικονίζονται αρκετές περιοχές και ιδιαίτερα περιοχές με γεωφυσικές ανωμαλίες ή και πρόσφατες ανασκαφές του Τμήματος Αρχαιοτήτων να εμπίπτουν στην κατηγορία που αντιστοιχεί στην καταπονημένη βλάστηση, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους που εφαρμόστηκαν στην υπερφασματική εικόνα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρόμοια αποτελέσματα από την εφαρμογή του LSU, είχαν επιτευχθεί και σε εικόνα Landsat με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομετρικών παρατηρήσεων που λήφθηκαν κατά τη στιγμή λήψης της πολυφασματικής εικόνας (Agariou *et al.*, 2012b). Αν και η βασική

υπόθεση που έγινε στην περίπτωση της εικόνας Landsat (λόγω περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων καναλιών), ήταν ότι η περιοχή καλύπτεται με βλάστηση (καταπονημένη και υγιής) χωρίς την παρουσία εδάφους, τα αποτελέσματα (Εικόνα 145) τα οποία προκύπτουν είναι σε γενική μορφή σύμφωνα με τις γεωφυσικές διασκοπήσεις. Ιδιαίτερη σύμπτωση αποτελεσμάτων καταγράφεται στο νοτιοδυτικό άκρο του τεμαχίου της περιοχής Άρκαλον. Μελλοντική εργασία δύναται να εστιαστεί σε τεχνικές un-mixing σε διάφορες αρχαιολογικές θέσεις με τη χρήση υπερφασματικών δεδομένων και σε συνδυασμό με επίγειες φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις.



Εικόνα 116: Έγχρωμος σύνθετος χάρτης της περιοχής της Παλαιπάφου, μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου LSU σε δορυφορική εικόνα Landsat. Με έντονο κόκκινο περιοχές με καταπονημένη βλάστηση.

6.2.1.4. Φωτοερμηνεία πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών

Η φωτοερμηνεία δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών (πλάγιων ή κατακόρυφων), αποτελεί τον πλέον συνήθη τρόπο για τον εντοπισμό υπεδάφιων καταλοίπων. Η διαδικασία θεωρείται σχετικά απλή για την αναγνώριση υπεδάφιων καταλοίπων μέσα από φωτοερμηνευτικές διαδικασίες, ενώ τα τελικά αποτελέσματα μπορεί να ενισχυθούν και από την αρχαιολογική γνώση της περιοχής. Ένα τέτοιο

αποτέλεσμα προέκυψε μέσα από τη φωτοερμηνεία διάφορων δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών στη θέση *Λαόνας*, περίπου 500 μέτρα βορειότερα από τη θέση *Άρκαλον* και ακριβώς απέναντι από την ανεσκαμμένη θέση *Χατζηαπτουλλά* (Εικόνα 117). Η θέση *Λαόνα*, είναι ένας υπερυψωμένος λοφίσκος, ο οποίος δεσπόζει σε μια ευρύτερη περιοχή και βρίσκεται μεταξύ δύο ήδη γωνιστών και ανεσκαμμένων αρχαιολογικών θέσεων: του *Χατζηαπτουλλά* και του *Μαρτσέλλου*.

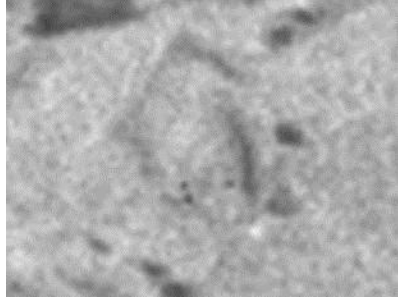
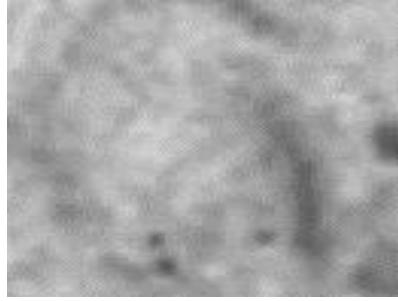

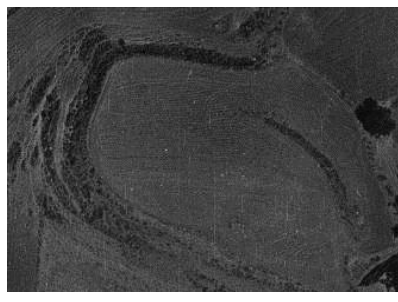














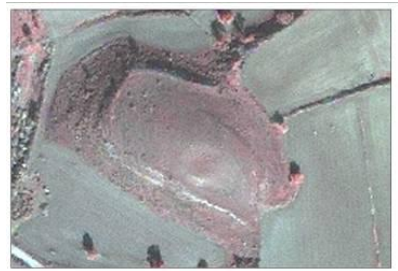

Εικόνα 117: Θέση υψώματος Λαόνας στην περιοχή της Παλαιπάφου (εικόνα Google Earth).

Από τη μελέτη των εικόνων αρχείου που ήταν διαθέσιμες (Πίνακας 19) εντοπίστηκε μια κυκλική ανωμαλία στην κορυφή του λοφίσκου σε πρόσφατη εικόνα υψηλής ανάλυσης GoeEye-1 (βλ. 06-01-2011, Πίνακας 19). Παρόμοια χαρακτηριστικά εντοπίζονται και σε αεροφωτογραφίες του 2008 και του 1993 (υψηλής ευκρίνειας, 1:5000), χωρίς όμως να είναι τόσο εμφανή. Στις υπόλοιπες εικόνες η ανωμαλία αυτή δεν εντοπίζεται, και αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή δεν καλυπτόταν από βλάστηση. Επιπλέον καταγράφεται και μια γραμμική ανωμαλία λίγο πιο βόρεια (βλ. ενδείξεις με βέλος Πίνακας 19) η οποία ταυτίζεται και με γεωφυσικές διασκοπήσεις που έγιναν στην περιοχή από το Εργαστήριο Γεωφυσικής -

Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (βλ. Εικόνα 118).

Πίνακας 19: Κατάλογος διαθέσιμων εικόνων για τη θέση Λαόνας στην Παλαίπαφο. Με βέλη στην εικόνα GeoEye-1 παρουσιάζονται οι δύο ανωμαλίες που εντοπίστηκαν.

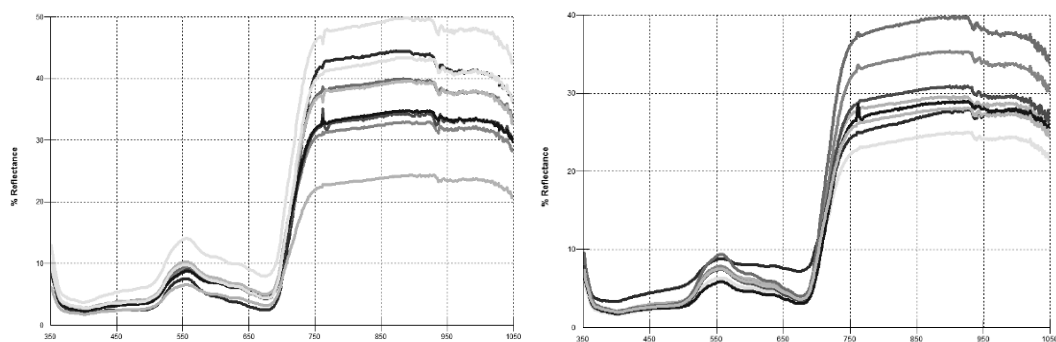
Ημερ.	Ευρύτερη περιοχή	Θέση Λαόνας	Εικόνα
27-07-1962			CORONA
1963			Αεροφ. Κτηματολ.
1993			Αεροφ. Κτηματολ.
27-08-2003			Google Earth

05-01-2007			Google Earth
06-08-2008			Google Earth
2008			Αεροφ. Κτηματολ.
27-09-2009			QuickBird
06-01-2011			GeoEye



Εικόνα 118: Ενδείξεις από μαγνητικές ανωμαλίες στην περιοχή Λαόνας(από Ερευνητικό πρόγραμμα Παλαιπάφου).

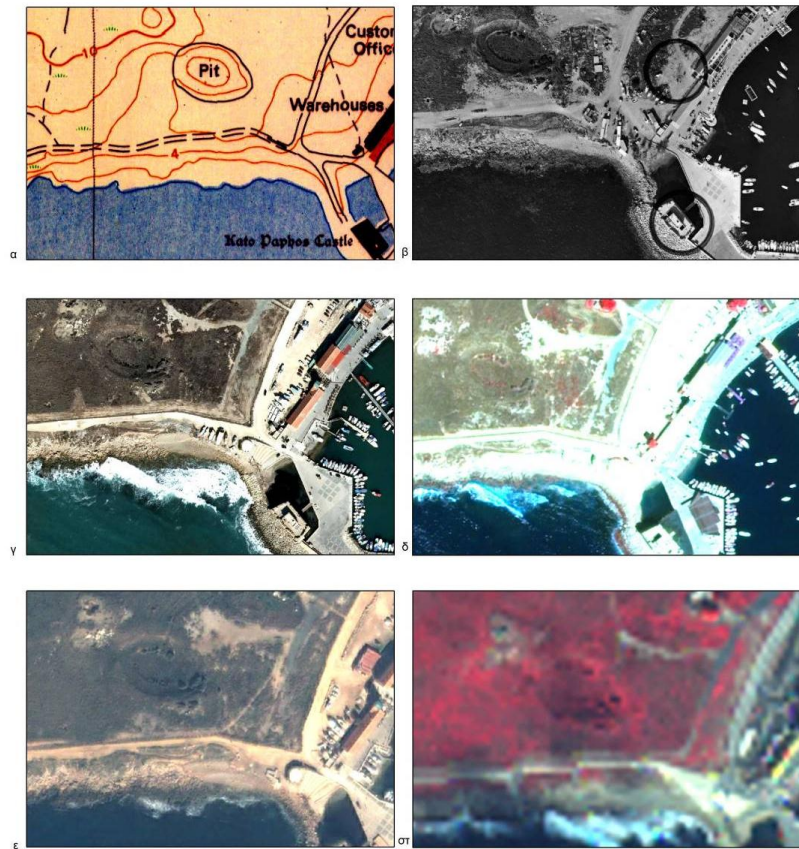
Επίγειες φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις που έγιναν στην περιοχή κατέγραψαν μια μικρή διαφοροποίηση της βλάστησης πάνω στο ύψωμα του λοφίσκου (έως και 10% περισσότερη ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα, βλ. Εικόνα 119). Τα αποτελέσματα αυτά είναι ενθαρρυντικά, και εκτιμάται ότι περισσότερες εικόνες αλλά και άλλες έρευνες, όπως π.χ. επιφανειακή επισκόπηση, νέες γεωφυσικές διασκοπήσεις κ.ά., θα μπορούσαν να δώσουν και άλλα χρήσιμα στοιχεία.



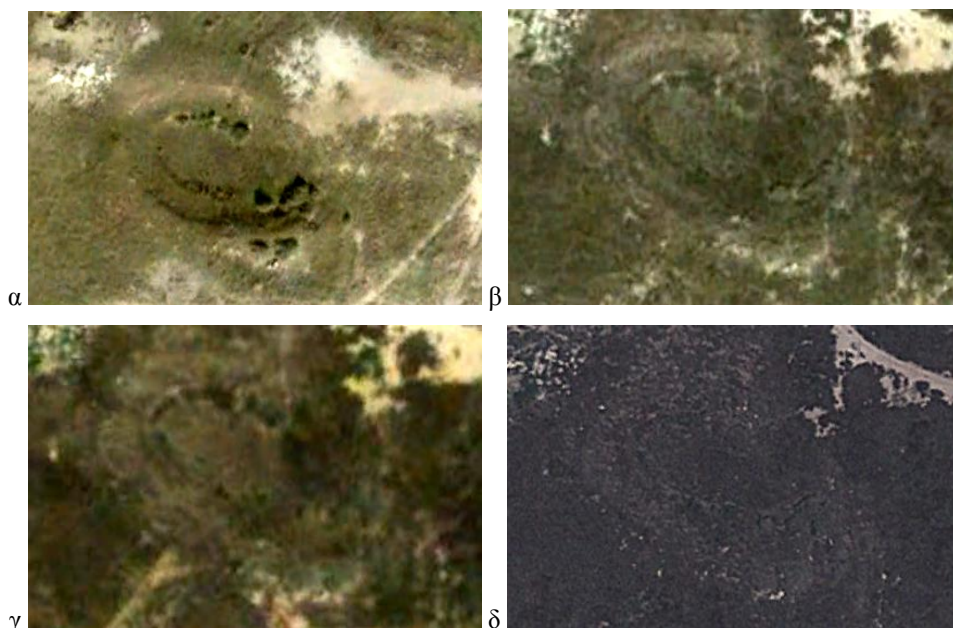
Εικόνα 119: Φασματικές υπογραφές (03-02-2012) πάνω στο ύψωμα Λαόνας. Στην αριστερή εικόνα οι μετρήσεις σε βλάστηση εκτός της ανωμαλίας και στη δεξιά εικόνα μετρήσεις πάνω στην ανωμαλία που εντοπίστηκε στην εικόνα GeoEye-1 (06-01-2011).

Ελλειπτική ανωμαλία εντοπίστηκε και στην αρχαιολογική θέση της Νέας Πάφου (βλ. Εικόνα 120). Η ανωμαλία αυτή λόγω της έκτασης και του σχήματος της (ελλειψοειδές σχήμα με 60 m στο μεγάλο ημιάξονα και 40 m στο μικρό ημιάξονα) είναι ιδιαίτερα εμφανής ακόμη και στο ορατό φάσμα (βλ. Εικόνα 121, Google Earth)

αλλά και σε πανχρωματικές αεροφωτογραφίες αρχείου του 1945 και 1957 (βλ. Εικόνα 122- Εικόνα 123).



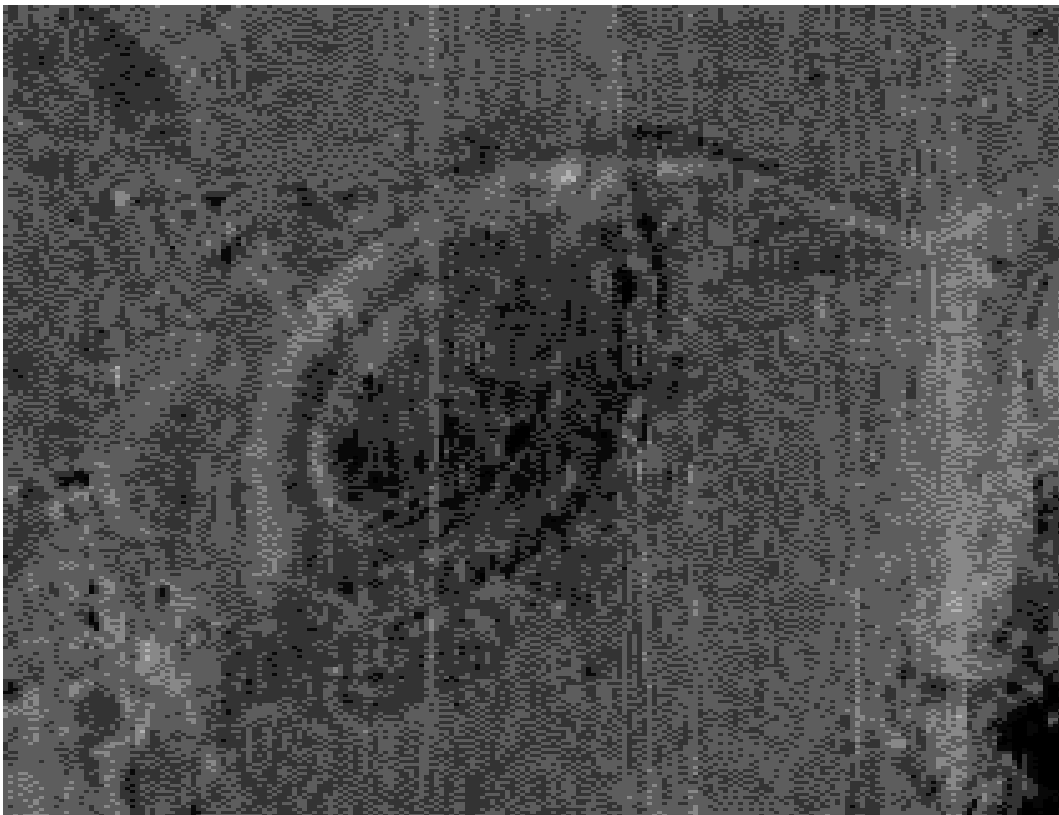
Εικόνα 120: Η κυκλική ανωμαλία (αμφιθέατρο;) όπως απεικονίζεται σε (α) σύγχρονους τοπογραφικούς χάρτες, (β) αεροφωτογραφία του 1993, (γ) ορθοφωτογραφία του 2008, (δ) δορυφορική εικόνα QuickBird 23-01-2003, (ε) IKONOS 14-03-2000 και (στ) GeoEye 09-01-2011.



Εικόνα 121: Εικόνες από το αρχείο Google Earth (α: 23/12/2002, β: 9/9/2006, γ: 26/6/2008 και δ: 30/05/2010).

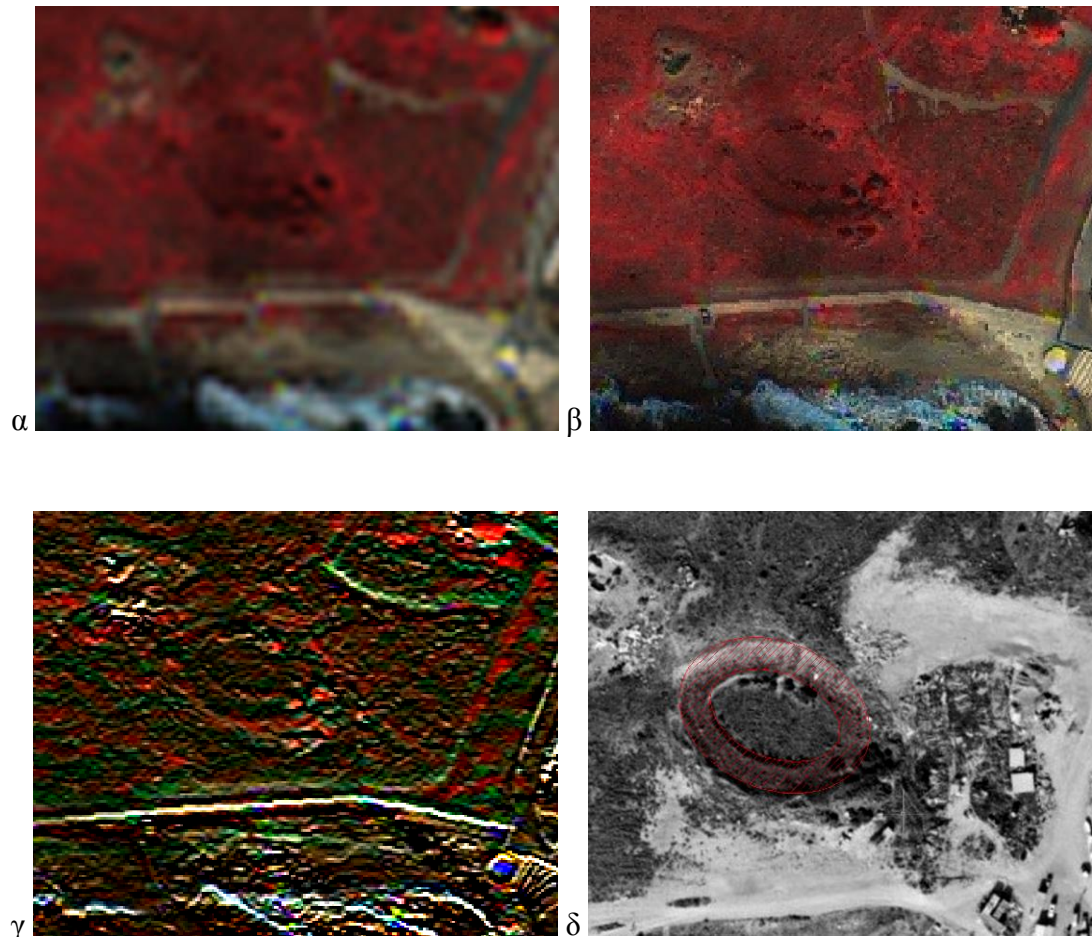


Εικόνα 122: Ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος της Νέας Πάφου όπως καταγράφηκε σε παγχρωματική αεροφωτογραφία του 1945 (πάνω) και μεγέθυνση της πιθανής ελλειπτικής ανωμαλίας (κάτω).

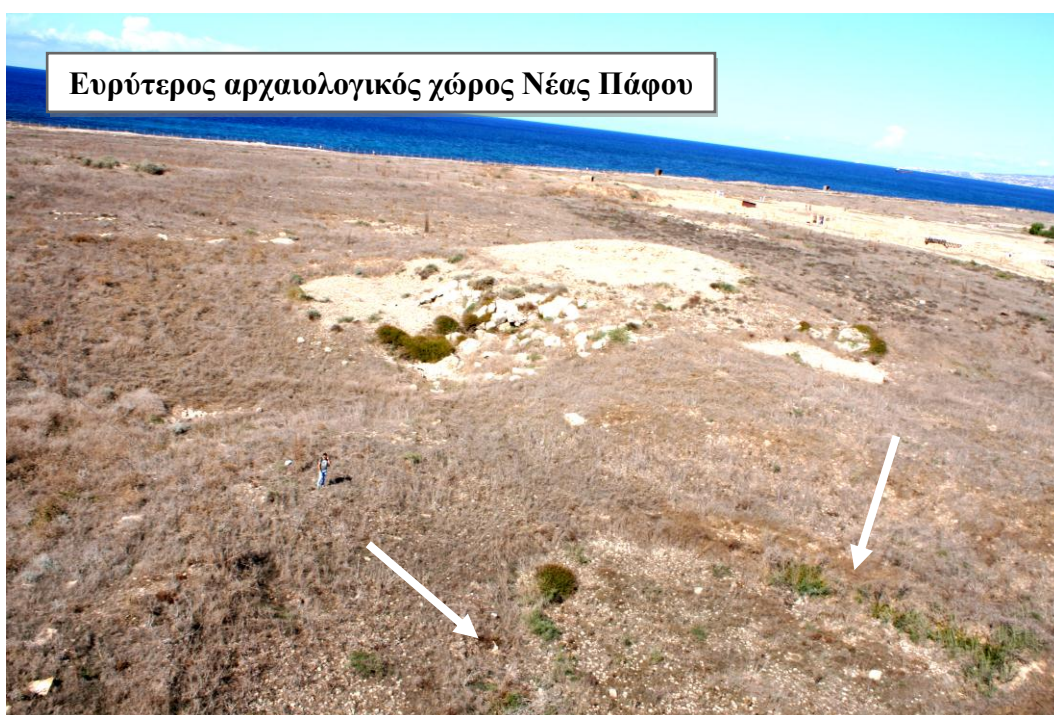


Εικόνα 123: Ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος της Νέας Πάφου όπως καταγράφηκε σε παγχρωματική αεροφωτογραφία του 1957 (πάνω) και μεγέθυνση της πιθανής ελλειπτικής ανωμαλίας (κάτω).

Η χρήση φίλτρων, αλλά και η συνένωση (resolution merge) παγχρωματικής εικόνας με υψηλότερη χωρική ανάλυση, φάνηκε ιδιαίτερα βοηθητική στην αναγνώριση των ορίων αυτής της ανωμαλίας (βλ. Εικόνα 124). Η ανωμαλία αυτή έχει ταυτιστεί με το αμφιθέατρο(;) (Μιχαηλίδης 2011, προσωπική επικοινωνία) στο οποίο μάλιστα δοκιμαστικές ανασκαφές από το Τμήμα Αρχαιοτήτων τη δεκαετία του 1960, έχουν εντοπίσει ευρήματα. Μελλοντικές ανασκαφές στο χώρο ενδεχομένως θα αποκαλύψουν την ακριβή χρήση και έκταση αυτού του κτίσματος. Σύγχρονες φωτογραφίες από χαμηλό ύψος με τη χρήση αερόστατου φαίνονται στην Εικόνα 125. Αν και η ανωμαλία είναι ευδιάκριτη με γυμνό μάτι εντούτοις υπάρχει δυσκολία αναγνώρισης της περιοχής με επίγεια παρατήρηση.



Εικόνα 124: Αρχική εικόνα GeoEye-1 09-01-2011 (α), συνένωση αρχικής εικόνας με το παγχρωματικό κανάλι (β), φίλτρο 3x3 με διεύθυνση Δ-Α (γ), ψηφιοποίηση των αποτελεσμάτων (δ).

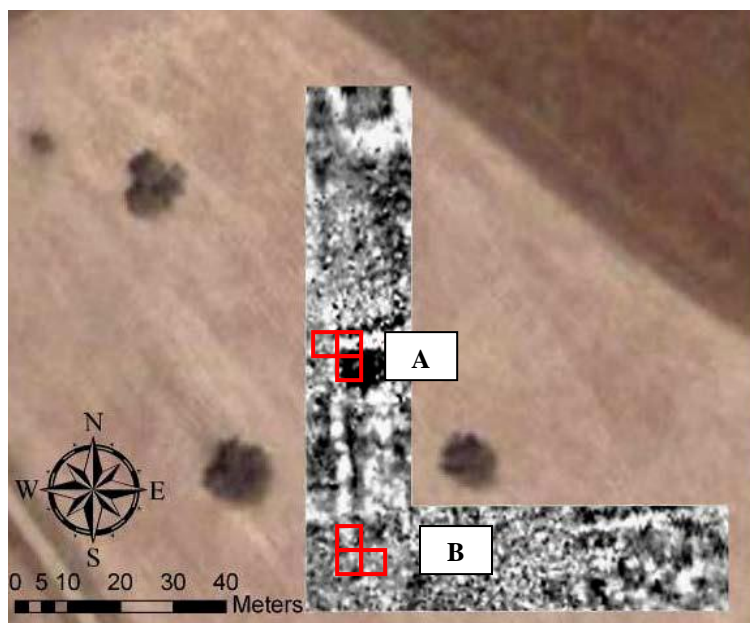


Εικόνα 125: Φωτογραφίες χαμηλού ύψους της περιοχής με τη χρήση αερόστατου. Με βέλη απεικονίζεται η ελλειπτική ανωμαλία.

6.2.1.5. Αρχαιολογικές ανασκαφές

Όπως έχει αναφερθεί, οι αρχαιολογικές ανασκαφές στην περιοχή της θέσης Άρκαλον στην Παλαίπαφο, διεξήχθησαν το καλοκαίρι του 2010 από την Ερευνητική Μονάδα Αρχαιολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου, με βάση τις συστηματικές γεωφυσικές

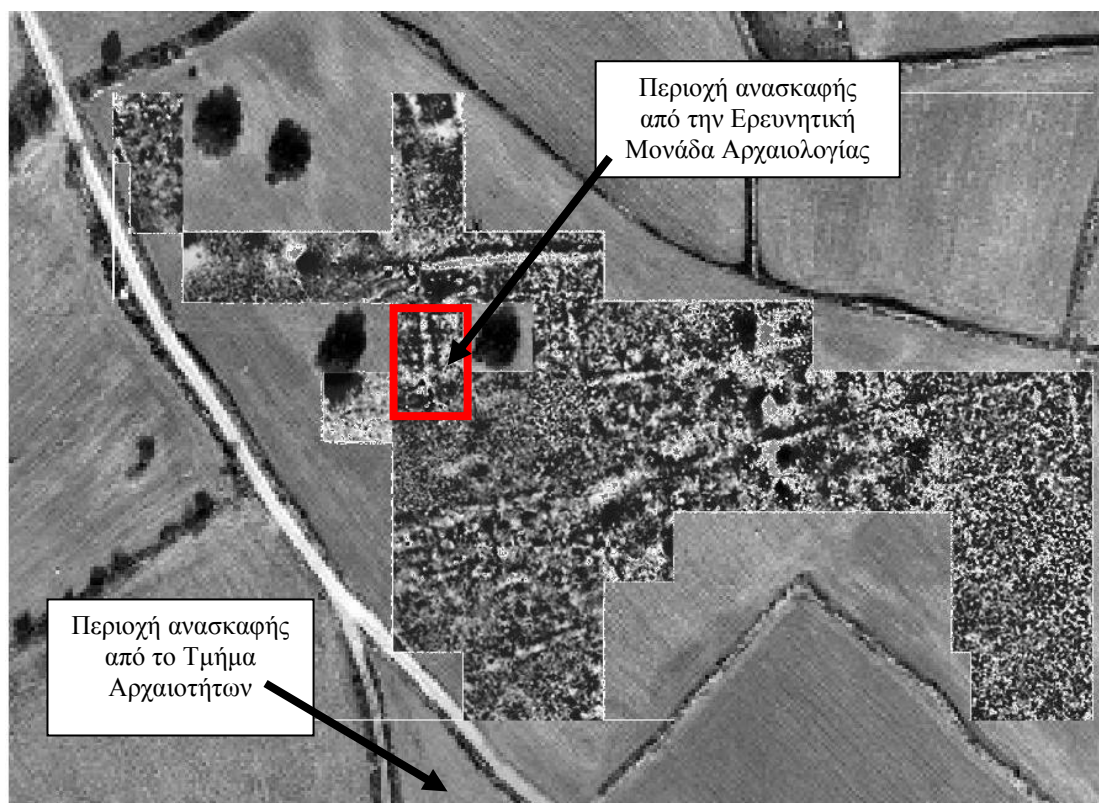
(μαγνητικές) έρευνες του 2007 στην περιοχή. Οι έρευνες αυτές επικεντρώθηκαν σε ανασκαφικά τετράγωνα 4 x 4 m σε δύο περιοχές (A και B, βλ. Εικόνα 126).



Εικόνα 126: Ανασκαφικά τετράγωνα στην περιοχή Άρκαλον, Παλαίπαφος.

Όμως οι αρχαιολογικές ανασκαφές δεν επιβεβαίωσαν τις μαγνητικές ανωμαλίες, ούτε και τις ενδείξεις από τα επίγεια φασματοραδιόμετρα. Τα φτωχά οικιστικά κατάλοιπα που εντοπίστηκαν ήταν επαναχρησιμοποιημένο οικοδομικό υλικό και ερυθρή ώχρα πάνω στο πεσμένο επίχρισμα τοίχων που ο προσανατολισμός τους δεν ταίριαζε με αυτόν των μαγνητικών ανωμαλιών (Ιακώβου, 2010).

Για το λόγο αυτό, διενεργήθηκε μια δεύτερη, ακόμη πιο συστηματική γεωφυσική έρευνα σε μια πιο εκτεταμένη περιοχή στο Άρκαλον, από το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών, το φθινόπωρο του 2010, με συνδυασμό μαγνητικών τεχνικών και γεωραντάρ. Τα αποτελέσματα των νέων ερευνών έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του 2007, ενώ στην περιοχή επικάλυψης εντοπίστηκαν παρόμοιες γραμμικές ανωμαλίες. Τόσο αυτά τα χαρακτηριστικά όσο και άλλα που έχουν εντοπιστεί στην ευρύτερη περιοχή εικάζεται ότι οφείλονται σε γεωλογικά ή τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής (Σαρρής και Παπαδόπουλος, 2010). Οι ερευνητές, με βάση τα ευρήματα των μαγνητικών αποτελεσμάτων συμπέραναν ότι ίσως αυτές οι περιοχές να προέρχονται από την παρουσία παλαιότερων ξερολιθιών ή αναβαθμίδων ή άλλων γεωλογικών ή νεότερων χαρακτηριστικών.



Εικόνα 127: Αποτελέσματα γεωφυσικών διασκοπήσεων το φθινόπωρο του 2010 στη θέση Αρκαλον, Παλαίπαφος (από Σαρρή και Παπαδόπουλο, 2010).

Στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, εντοπίστηκε ένας μεγάλος αριθμός γραμμικών ανωμαλιών, μικρών κυρίως διαστάσεων, με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Αυτή η διεύθυνση, όπως επισημαίνουν οι Σαρρής και Παπαδόπουλος (2010), είναι παρόμοια με τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί μόλις λίγα μέτρα δυτικότερα από το Τμήμα Αρχαιοτήτων (Εικόνα 128).

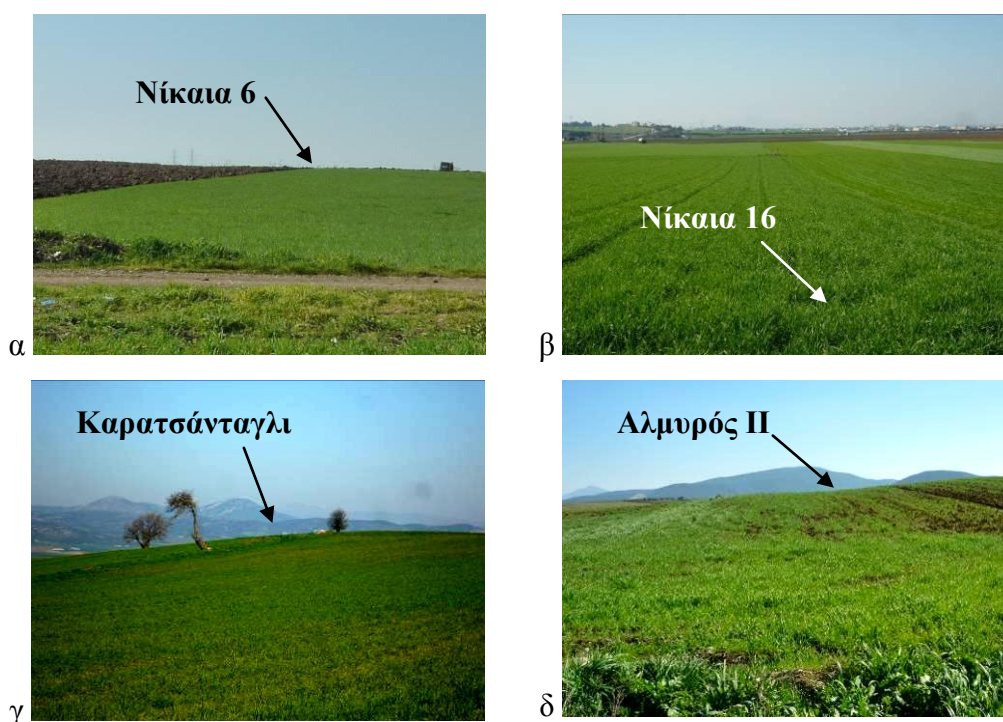


Εικόνα 128: Φωτογραφίες από τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί από το Τμήμα Αρχαιοτήτων.

Οι ανασκαφικές δραστηριότητες στη θέση Άρκαλον και κυρίως οι διαφοροποιήσεις των κλασσικών αρχαιολογικών ερευνών από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις αλλά και των επίγειων φασματοραδιομετρικών παρατηρήσεων, έρχονται να ενισχύσουν την ανάγκη της περαιτέρω και εις βάθος διερεύνησης των δυνατοτήτων της πειραματικής τηλεπισκόπησης, έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθούν αναλυτικά οι επιδράσεις που έχουν τα αρχαιολογικά κατάλοιπα στις φασματοραδιομετρικές αλλά και γεωφυσικές έρευνες

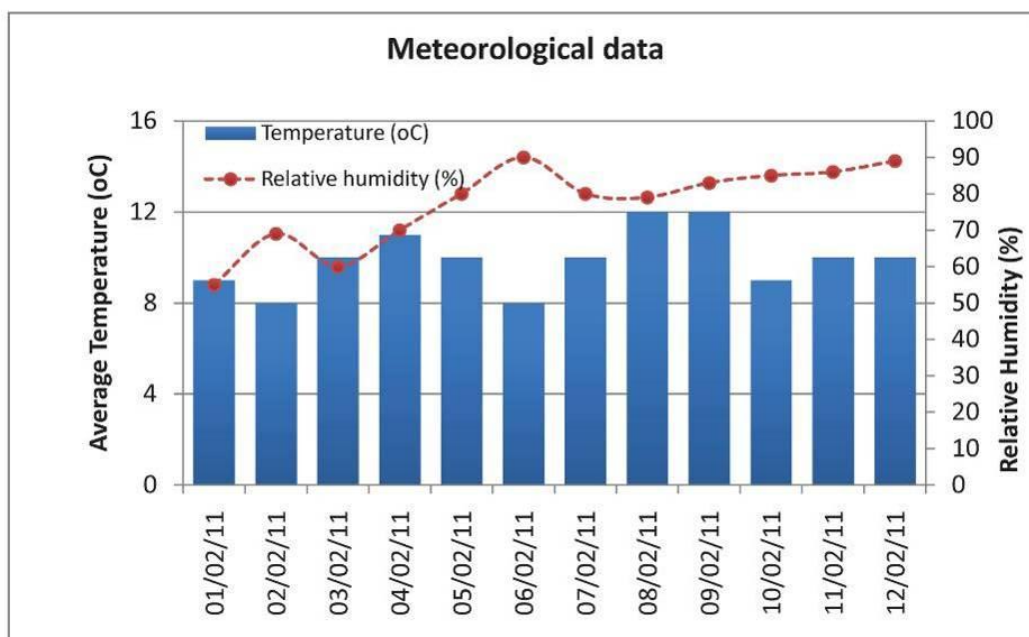
6.2.2. Θεσσαλία

Σε Νεολιθικές θέσεις του Θεσσαλικού κάμπου πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες επισκέψεις για την καταγραφή φασματικών υπογραφών με τη βοήθεια του φασματοραδιομέτρου GER 1500 (Agariou *et al.*, 2012c). Οι μετρήσεις εστιάστηκαν σε τέσσερις μαγούλες (Νίκαια 6, Νίκαια 16, Καρατσάνταγλι και Αλμυρός II) όπως φαίνονται και στην Εικόνα 129. Η επεξεργασία των μετρήσεων έδωσε τη δυνατότητα να ερευνηθούν οι δυνατότητες διαφόρων δεικτών βλάστησης και επιπλέον να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα από την επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων. Τέλος, έγινε η χρήση μιας μεγάλης σε όγκο βάσης δορυφορικών εικόνων (Landsat MSS / TM/ETM+), με στόχο την παρακολούθηση του φαινολογικού κύκλου στις πιο πάνω μαγούλες.



Εικόνα 129: Οι Νεολιθικές θέσεις του Θεσσαλικού κάμπου που μελετήθηκαν στη διατριβή.

Κλιματολογικά δεδομένα (Εικόνα 130) από το μετεωρολογικό σταθμό στη Λάρισα, δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία αλλά και η σχετική υγρασία ήταν σταθερές, τόσο κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων όσο και δύο εβδομάδες προηγουμένως. Επιπλέον, η ημερήσια βροχόπτωση ήταν 0.00 mm για όλες τις ημέρες. Αντίστοιχες μετρήσεις λήφθηκαν και από το μετεωρολογικό σταθμό στο Βόλο Με αυτές τις παρατηρήσεις, φαίνεται ότι οι καλλιέργειες δεν έχουν εκτεθεί σε οποιοδήποτε ακραίο καιρικό φαινόμενο, το οποίο θα οδηγούσε σε καταπόνηση της βλάστησης.



Εικόνα 130: Μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό στη Λάρισα

6.2.2.1. Φασματικές υπογραφές

Συγκεκριμένα στην περιοχή της Θεσσαλίας έγιναν μετρήσεις στις 11 και 12 Φεβρουαρίου 2011. Όλες οι μετρήσεις έγιναν μεταξύ των ωρών 10:00 και 14:00 τοπική ώρα. Την πρώτη ημέρα οι επίγειες παρατηρήσεις διεξήχθησαν στις θέσεις Νίκαια 6 και Νίκαια 16, ενώ την επόμενη μέρα ακολούθησαν μετρήσεις στις άλλες δύο θέσεις (Καρατσάνταγλι και Αλμυρός II). Ενώ οι μαγούλες μπορεί να έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 200 m, οι μετρήσεις κάλυψαν σε αρκετές περιπτώσεις μόνο ένα μέρος τους, περιοριζόμενες αποκλειστικά και μόνο σε ένα τεμάχιο καλυμμένο με βλάστηση με σκοπό να υπάρχει ομοιόμορφη γεωργική πρακτική στην περιοχή μελέτης. Συνολικά έγιναν περισσότερες από 500 επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις. Πέρα από το όργανο Spectra Vista GER 1500 χρησιμοποιήθηκε και

δορυφορικό σύστημα πλοήγησης GNSS με σκοπό την καταγραφή όλων των μετρήσεων σε ένα κοινό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, το WGS '84 (Εικόνα 131)



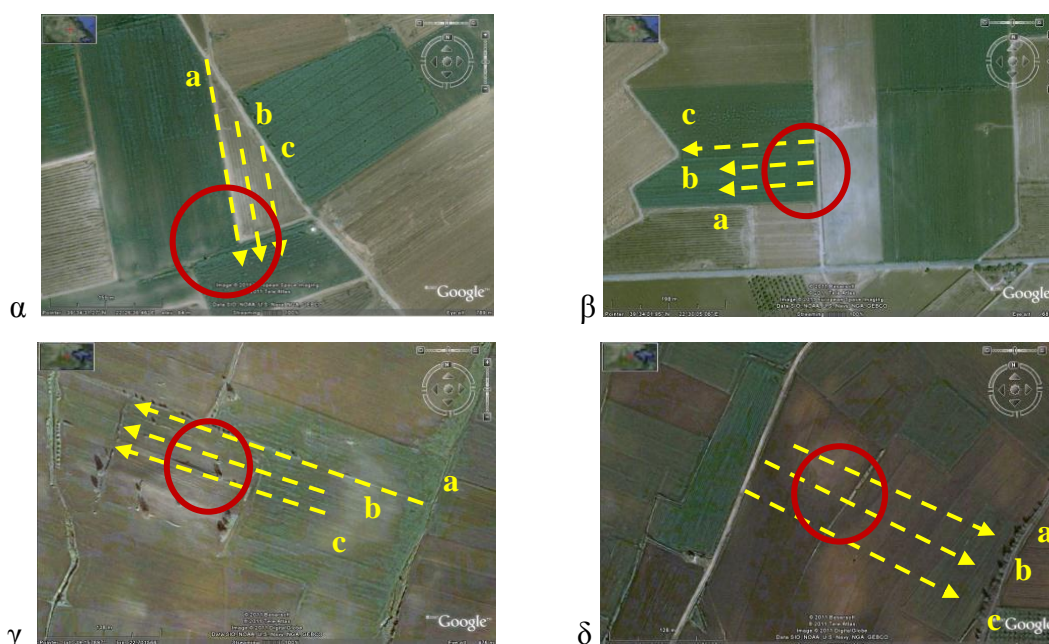
Εικόνα 131: Φωτογραφίες από τις μετρήσεις στις Νεολιθικές θέσεις της Θεσσαλίας

Σε κάθε αρχαιολογική θέση έγιναν μετρήσεις σε τρεις παράλληλες τομές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 132 και σε κάθε τομή γίνονταν μετρήσεις με το φασματοραδιόμετρο, τόσο πάνω στην ίδια την μαγούλα όσο και εκτός από αυτήν. Σε περιπτώσεις όπου αυτό ήταν δυνατόν η τομή γινόταν και στις δύο πλευρές της μαγούλας. Πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 50 μετρήσεις σε κάθε τομή, ενώ μετά από κάθε 5^η μέτρηση γινόταν βαθμονόμηση των μετρήσεων με τη χρήση του στόχου αναφοράς.

Η θέση Νίκαια 6 κατά την περίοδο των μετρήσεων ήταν καλλιεργημένη με σιτάρι μόνο στο βόρειο μέρος της, ενώ το νότιο τμήμα της ήταν ακαλλιέργητο. Και οι τρεις τομές που έγιναν στη συγκεκριμένη μαγούλα είχαν μήκος περίπου 200 m (Εικόνα 132α). Η αφετηρία των μετρήσεων ξεκινούσε έξω από το λοφίσκο της μαγούλας, ενώ

το τέλος των μετρήσεων τελείωνε στην κορυφή της. Αντίστοιχες μετρήσεις με εκείνη της Νίκαιας 6, έγιναν και στη μαγούλα Νίκαια 16 που ήταν επίσης καλλιεργημένη κατά το ήμισυ με σιτάρι (Εικόνα 132β). Οι πρώτες δύο τομές ξεκίνησαν πάνω από το επίπεδο της μαγούλας και προχωρούσαν προς το επίπεδο μέρος του τεμαχίου, έξω από αυτή. Οι δύο τομές αυτές είχαν μήκος περίπου 130m. Η τρίτη τομή κάλυψε ένα μήκος 200 m, αφού το επέτρεπε το σχήμα του τεμαχίου, ξεκινώντας και πάλι από τη μαγούλα προς το επίπεδο μέρος.

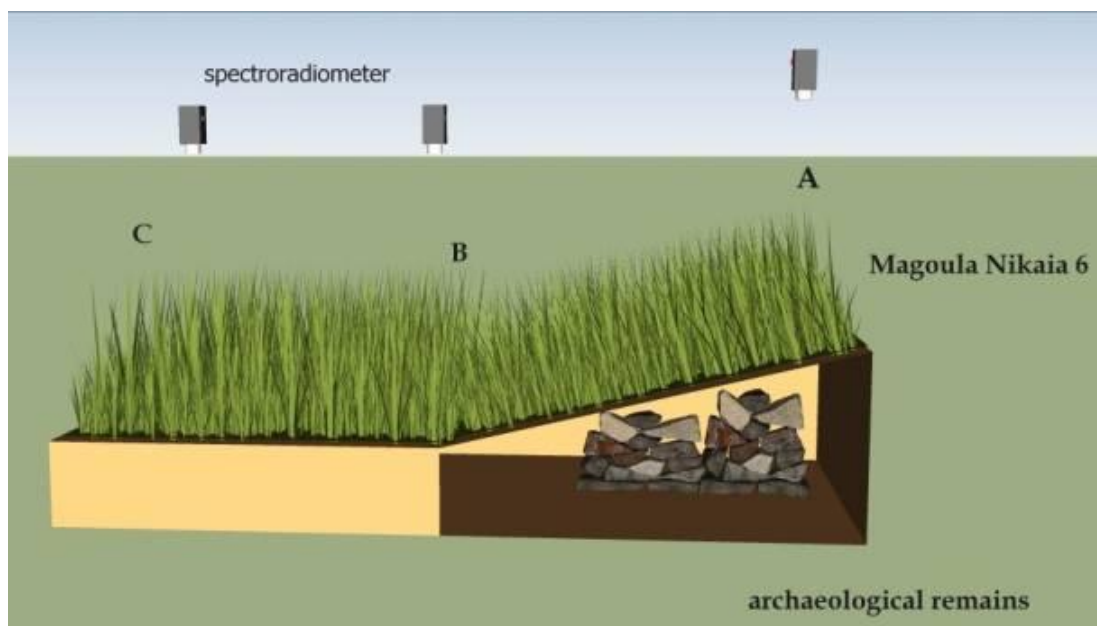
Οι μετρήσεις στη θέση Καρατσάνταγλι (Εικόνα 132γ) η οποία ήταν πλήρως καλυμμένη με κριθάρι, πραγματοποιήθηκαν και στις δύο πλευρές της μαγούλας. Η πρώτη τομή κάλυψε ένα μήκος περίπου 330 m ενώ οι άλλες δύο τομές μήκος της τάξης των 170 m. Στην τελευταία θέση (Αλμυρός II) οι τομές κάλυψαν ένα μήκος περίπου 150 m. Η μαγούλα ήταν καλλιεργημένη μόνο σε ένα μέρος της και έτσι οι μετρήσεις έγιναν μόνο στο δυτικό τμήμα της (Εικόνα 132δ).



Εικόνα 132: Διάγραμμα τομών σε κάθε μαγούλα

Όλες οι μετρήσεις ταξινομήθηκαν ανάλογα με την ημερομηνία λήψης των μετρήσεων, την τομή και φυσικά την αρχαιολογική θέση, με σκοπό να μελετηθούν οι φασματικές υπογραφές της βλάστησης. Η μελέτη των φασματικών υπογραφών αποτελεί το πρώτο βήμα για τον εντοπισμό καταπόνησης της βλάστησης λόγω αρχαιολογικών καταλοίπων. Αυτό μπορεί να γίνει με τη σύγκριση φασματικών

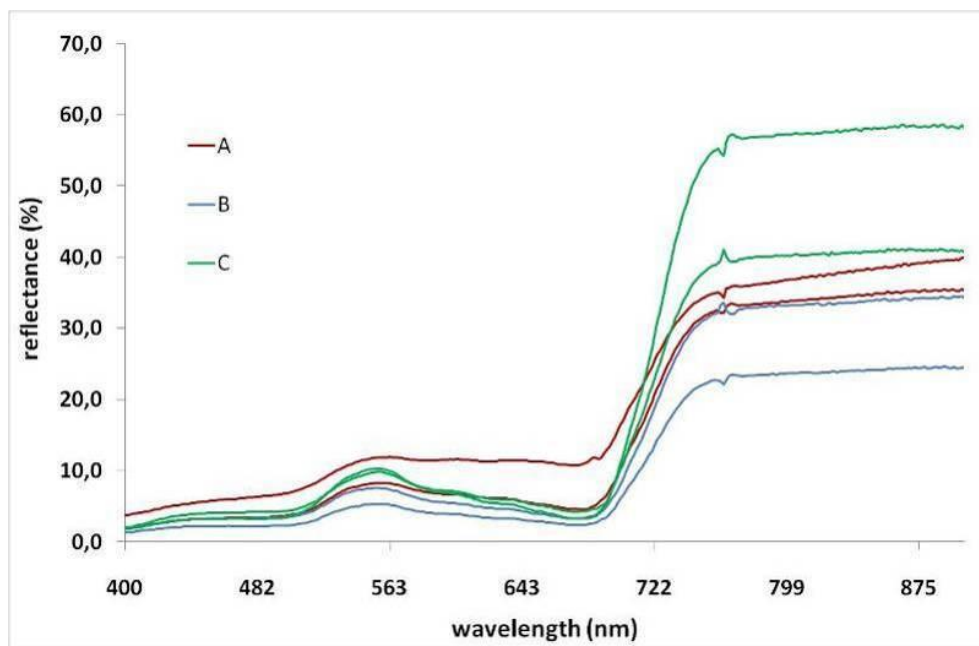
υπογραφών της βλάστησης σε αρχαιολογικές και μη αρχαιολογικές θέσεις. Απώτερος σκοπός αυτής της πρακτικής είναι να μελετηθεί, κατά πόσο μπορεί να υπάρχει διάκριση των δύο αυτών περιοχών πριν από οποιαδήποτε άλλη ανάλυση (π.χ. δείκτες βλάστησης). Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα κυριότερα μόνο αποτελέσματα αυτής της επεξεργασίας, λόγω των πολλών μετρήσεων που συλλέχθηκαν στο Θεσσαλικό κάμπο. Στην περίπτωση της Νίκαιας 6, κάθε τομή διαχωρίστηκε σε τρία τμήματα στα νοητά σημεία A, B και C τα οποία επισημαίνουν την κορυφή της μαγούλας, την αρχή της μαγούλας και την αρχή της επίπεδης περιοχής (μη αρχαιολογική) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 133.



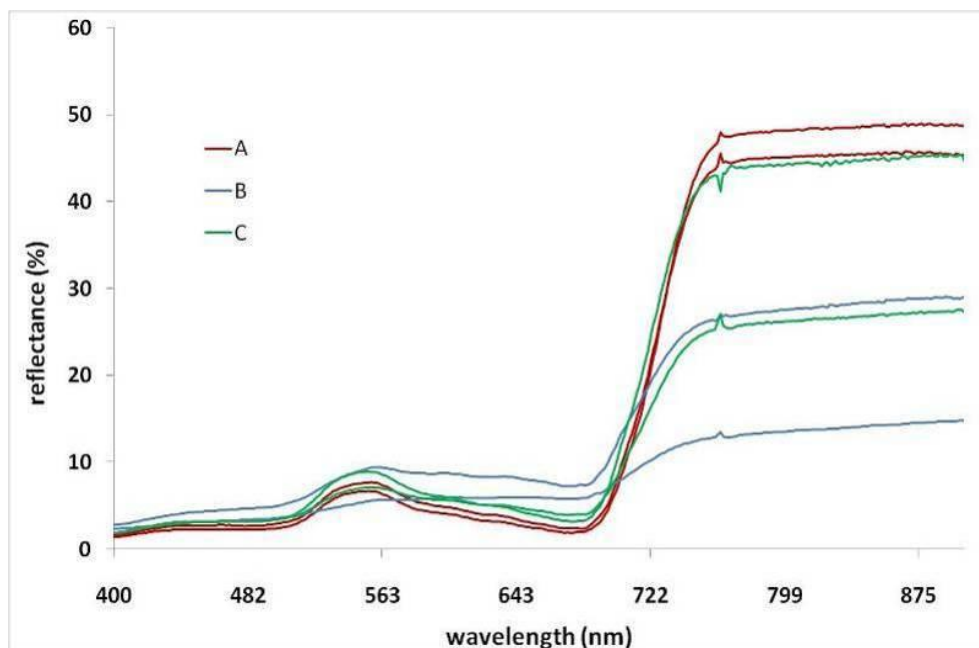
Εικόνα 133: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με την μαγούλα Νίκαια 6.

Η Α' τομή (Εικόνα 134) δείχνει ότι η βλάστηση στην επίπεδη περιοχή (Σημείο C) δίνει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο φάσμα του εγγύς υπέρυθρου (760 – 900 nm), ενώ στην αρχή του λοφίσκου της μαγούλας (Σημείο B) αυτή η ανακλαστικότητα ελαττώνεται. Στο ψηλότερο μέρος της μαγούλας (Σημείο A) η ανακλαστικότητα δίνει μικρότερες τιμές σε σχέση με την επίπεδη περιοχή (Σημείο C) αλλά οι τιμές της είναι παρόμοιες με εκείνες στην περιοχή του Σημείου B. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν εξαχθεί και από την Γ' τομή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 136, αφού ο λοφίσκος της μαγούλας μπορεί να διακριθεί φασματικά από την επίπεδη περιοχή της θέσης. Τα αποτελέσματα της Β' τομής (Εικόνα 135) δείχνουν ότι το ψηλότερο σημείο της μαγούλας (Σημείο A) δίνει τη μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο

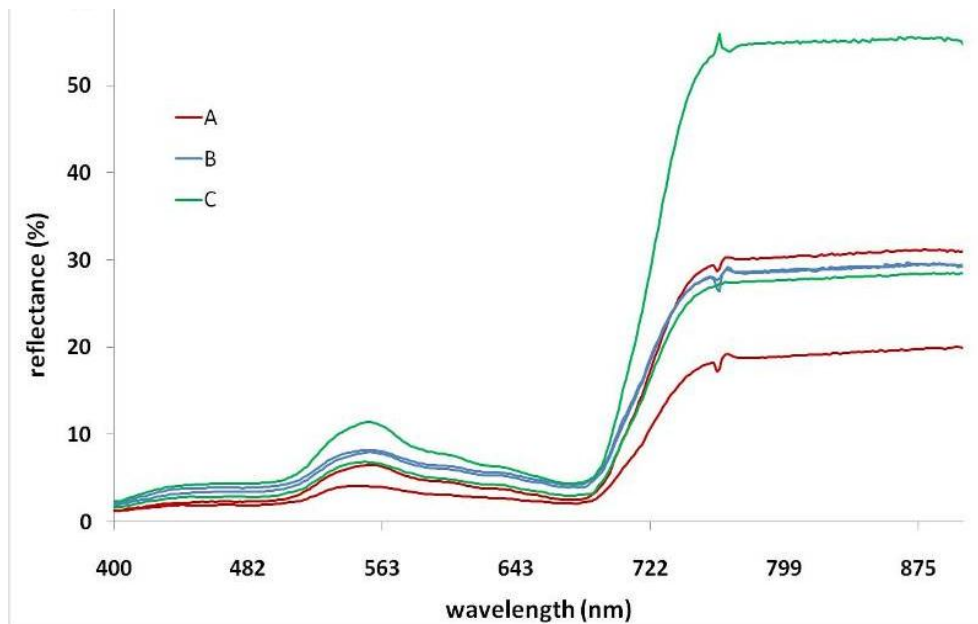
φάσμα σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σημείο και σε αντίθεση με το επικλινές μέρος της μαγούλας (Σημείο B), όπου παρουσιάζονται τα πιο έντονα σημεία καταπόνησης της βλάστησης. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η Β' τομή έγινε κατά μήκος του άξονα της Νίκαιας 6, ενώ οι άλλες δύο τομές έγιναν σε απόσταση 10 m περίπου παράλληλα και εκατέρωθεν από το κέντρο της μαγούλας.



Εικόνα 134: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 6 (Α' τομή)

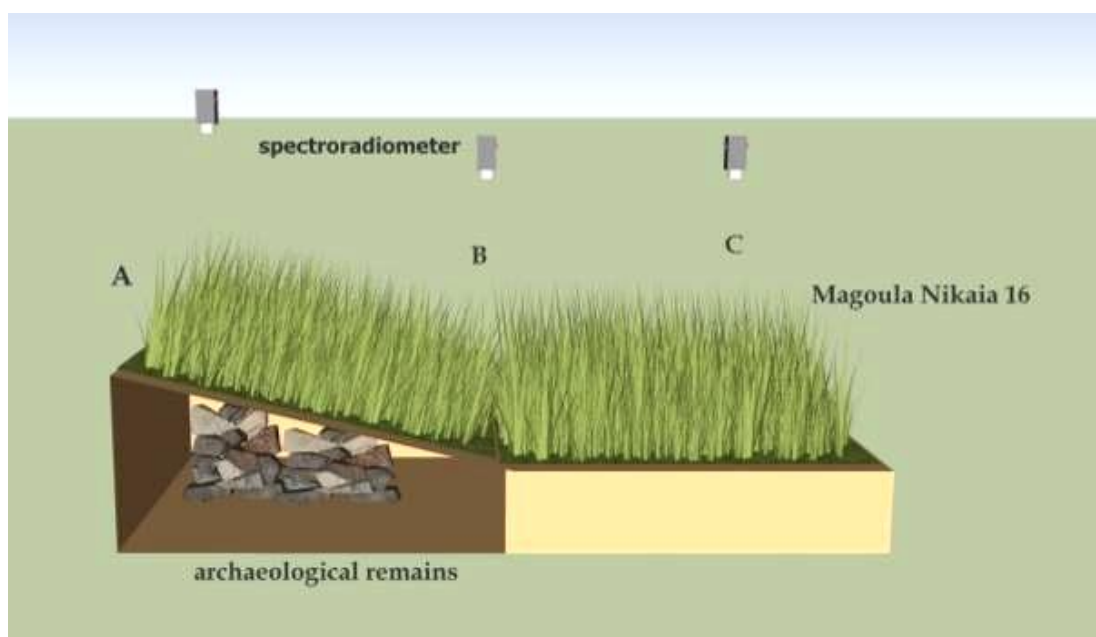


Εικόνα 135: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 6 (Β' τομή)

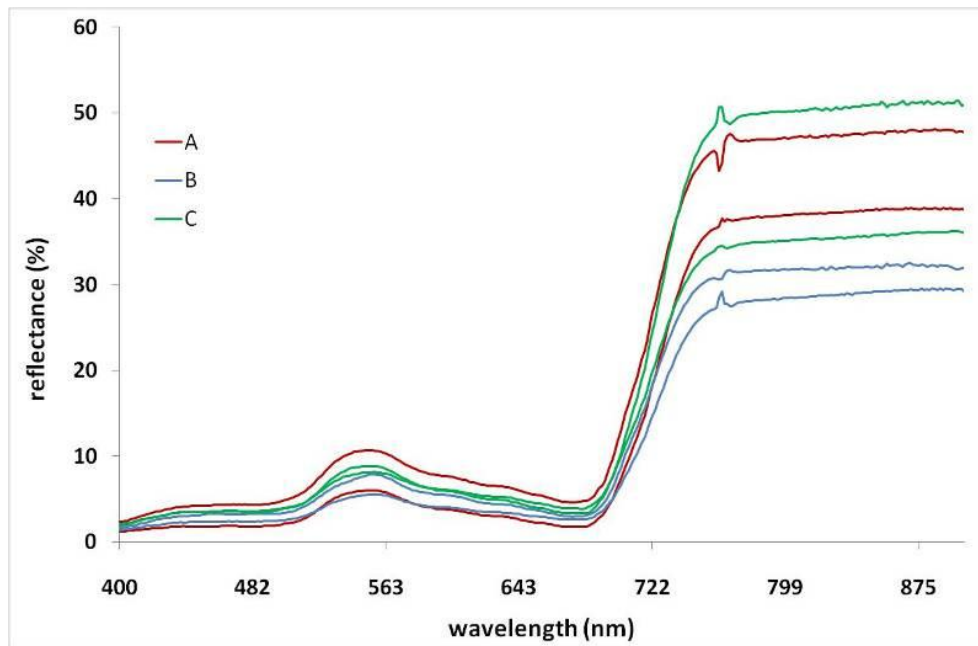


Εικόνα 136: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 6 (Γ' τομή)

Παρόμοιες τιμές και διαφοροποιήσεις για τις φασματικές υπογραφές παρατηρήθηκαν και στη μαγούλα Νίκαια 16 (Εικόνα 137). Η Εικόνα 138 παρουσιάζει τη φασματική υπογραφή για την Γ' τομή. Οι μετρήσεις σε αυτή την τομή έχουν γίνει περίπου στο κέντρο της μαγούλας, σε αντίθεση με τις προηγούμενες δύο, που είχαν γίνει λίγο πιο νότια. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα της θέσης Νίκαια 6, αφού στα σημεία A και C συναντώνται παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά σε αντίθεση με την περιοχή του σημείου B όπου οι ενδείξεις στο εγγύς υπέρυθρο δείχνουν μια καταπόνηση των σιτηρών.

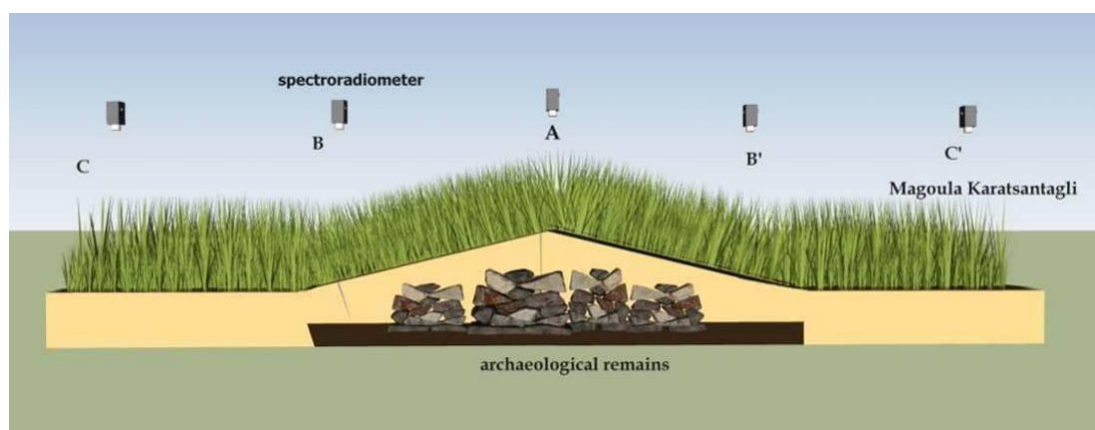


Εικόνα 137: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με τη μαγούλα Νίκαια 16.

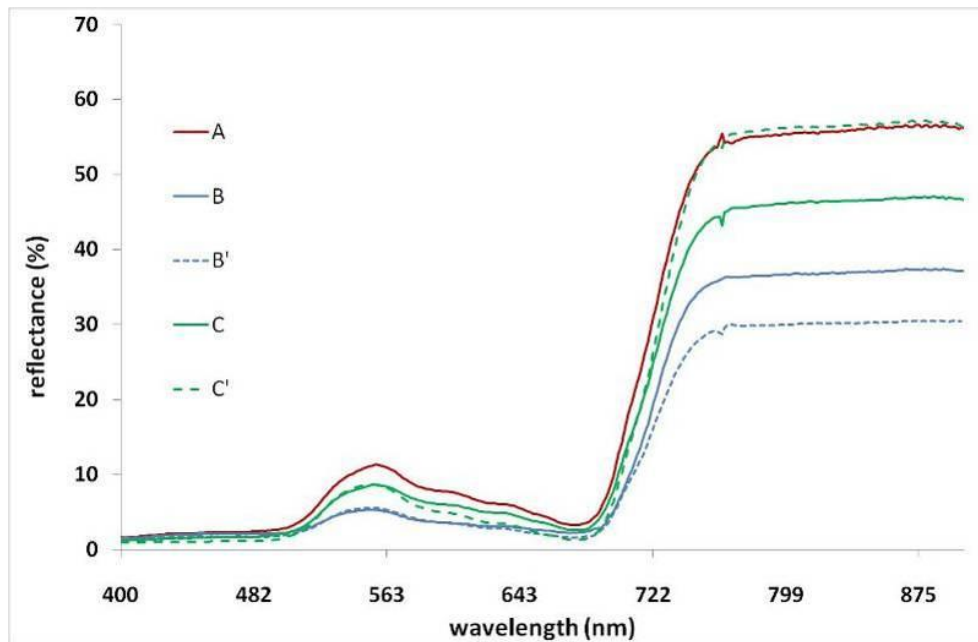


Εικόνα 138: Φασματικές υπογραφές στη θέση Νίκαια 16 (Γ' τομή)

Στη θέση Καρατσάνταγλι, οι μετρήσεις κάλυψαν όλη τη μαγούλα, αφού αυτή βρισκόταν ολόκληρη σε ένα ενιαίο αγροτικό τεμάχιο. Έτσι ήταν δυνατό να μετρηθούν πέντε, αντί 3, χαρακτηριστικά σημεία με το δέκτη GPS με τα σημεία C και C' να αντιστοιχούν στις περιοχές εκτός του λοφίσκου της μαγούλας, δηλαδή στην επίπεδη περιοχή, τα σημεία B και B' να αντιστοιχούν στην αρχή της μαγούλας, δηλαδή στην αρχή του λοφίσκου και από τις δύο πλευρές, ενώ το σημείο A αναφέρεται στο ψηλότερο σημείο της μαγούλας (Εικόνα 139). Αυτό που είναι ενδιαφέρον, είναι το γεγονός ότι και πάλι τα σημεία C, C' και A έχουν την ψηλότερη ανακλαστικότητα στο φάσμα του εγγύς υπέρυθρου, ενώ τα σημεία B και B' έχουν τις χαμηλότερες τιμές (Εικόνα 140).



Εικόνα 139: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με τη μαγούλα Καρατσάνταγλι

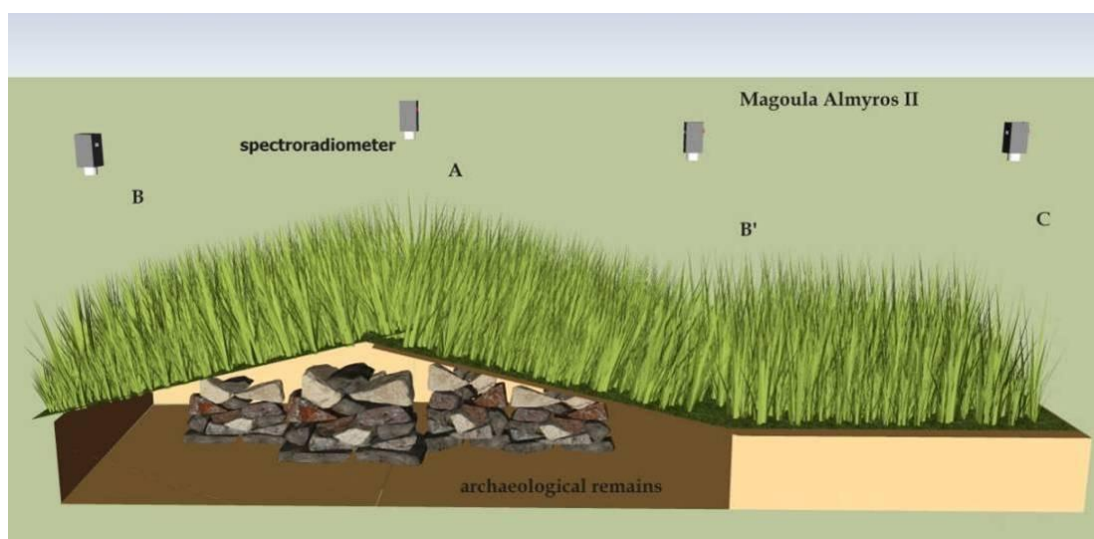


Εικόνα 140: Φασματικές υπογραφές στη θέση Καρατσάνταγλι

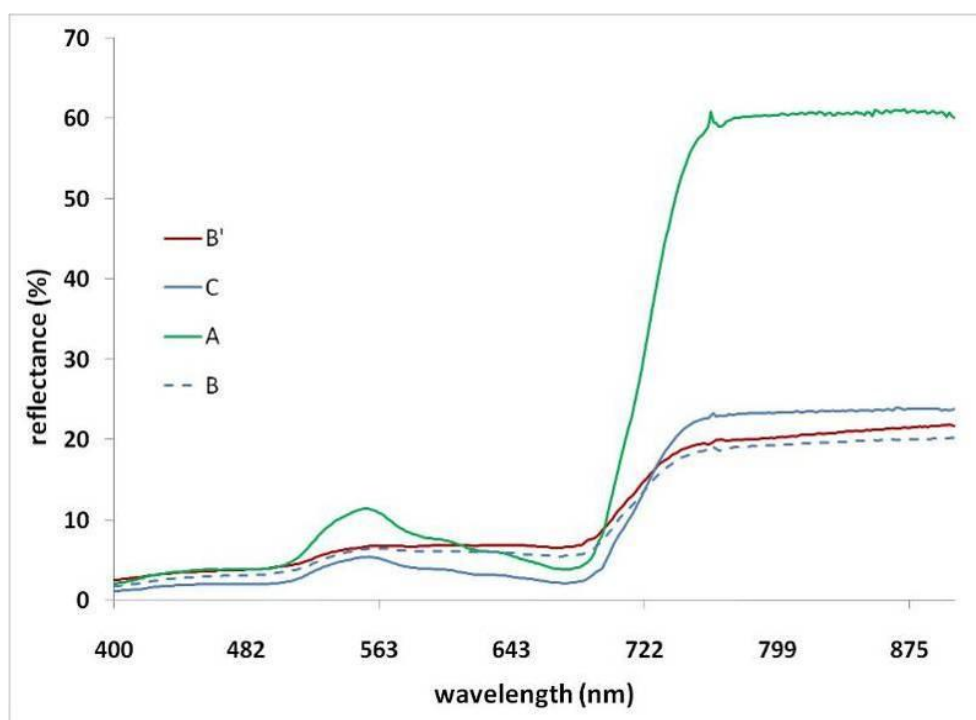
Η θέση Αλμυρός ΙΙ ήταν επίσης καλλιεργημένη με σιτηρά κατά την περίοδο των μετρήσεων. Στη μαγούλα αυτή, χαρτογραφήθηκαν τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία με το GPS, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 141. Η φασματική υπογραφή του σιταριού κατά μήκος της μαγούλας δείχνει ότι η χαρακτηριστική αλληλουχία των μετρήσεων που παρατηρήθηκε στις άλλες θέσεις δεν παρουσιάζεται εδώ. Οι υπογραφές δείχνουν ότι όλη η περιοχή δίνει ομοιόμορφα αποτελέσματα αφού οι μετρήσεις στα σημεία της μαγούλας (B' – C – B) είναι παρόμοιες, ενώ οι μετρήσεις στην κορυφή της μαγούλας (Σημείο A) δίνουν την ψηλότερη φασματική υπογραφή.

Με βάση όλες τις πιο πάνω φασματικές υπογραφές είναι φανερό ότι τα σημεία B και B', δηλαδή περιοχές που βρίσκονται στην πλαγιά του λοφίσκου της μαγούλας, δίνουν χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας στην περιοχή του υπέρυθρου σε σχέση με την κορυφή της μαγούλας (Σημείο A) ή ακόμη και την επίπεδη περιοχή εκτός της μαγούλας (Σημείο C). Αυτή η παρατήρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού με τη χρήση του εγγύς υπέρυθρου φάσματος (π.χ. σε περιπτώσεις δεικτών βλάστησης) θα μπορεί κανείς να διακρίνει την κορυφή της μαγούλας από την υπόλοιπη περιοχή. Παράλληλα, σε μερικές τομές φάνηκε ότι το Σημείο A έδινε ψηλότερη ανακλαστικότητα σε σχέση με τις περιοχές εκτός της μαγούλας (Σημείο C). Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζεται στη θέση Αλμυρός ΙΙ (ίδιες τιμές ανακλαστικότητας

στα σημεία A και B) πιθανώς να οφείλεται στην εντατική καλλιέργεια της περιοχής που είχε ως αποτέλεσμα την σχεδόν πλήρη ισοπέδωση του λοφίσκου της μαγούλας.



Εικόνα 141: Αντιστοίχιση μετρήσεων φασματοραδιομέτρου με τη μαγούλα Αλμυρός II



Εικόνα 142: Φασματικές υπογραφές στη θέση Αλμυρός II.

6.2.2.2. Δείκτες βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης συνήθως χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση εποχιακών αλλαγών στη βλάστηση που μπορεί να σχετίζεται με τις βιοφυσικές ή φαινολογικές ιδιότητες της βλάστησης (Aqdas *et al.*, 2007; Bassani *et al.*, 2009). Οι δείκτες

βλάστησης ποσοτικοποιούν ενδείξεις σχετικά με τη βλάστηση, αφού λαμβάνουν υπόψη φασματικές υπογραφές οι οποίες συνδέονται με τη βιομάζα ή την κατάσταση του φυτού (Jackson και Huete, 1991). Τόσο θεωρητικές όσο και υπαίθριες αναλύσεις έδειξαν ότι οι δείκτες βλάστησης συνδέονται με τα υγιή φυτά τα οποία για τη φωτοσύνθεση, απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία (Glenn *et al.*, 2008).

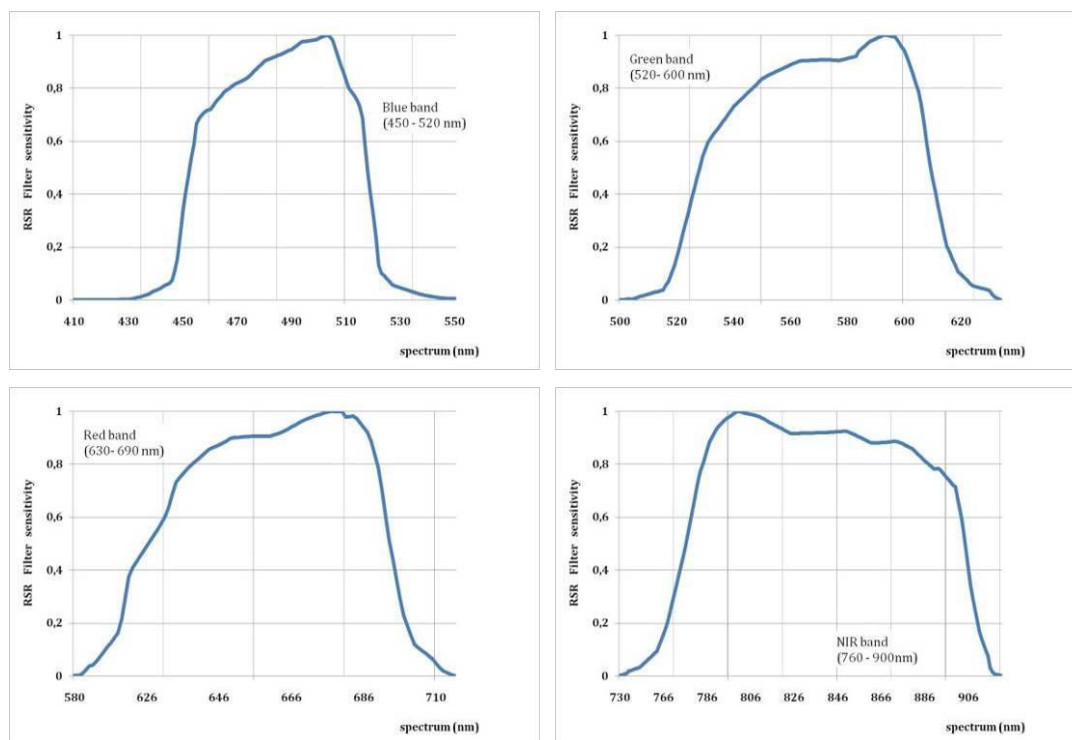
Ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάστησης που χρησιμοποιείται σε αρχαιολογικές έρευνες και όχι μόνο, είναι ο δείκτης NDVI. Ο συγκεκριμένος δείκτης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους Rouse *et al.*, το 1974 και από τότε έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές παρακολούθησης αρχαιολογικών χώρων και σε εφαρμογές ανίχνευσης αρχαιολογικών καταλοίπων (π.χ. Hadjimitsis *et al.*, 2009). Ο δείκτης Simple Ratio (SR) αναπτύχθηκε από τον Jordan (1969) και στηρίζεται στη χαρακτηριστική φασματική υπογραφή της βλάστησης και ιδιαίτερα στην περιοχή της “κόκκινης ακμής” (red edge), η οποία βρίσκεται μεταξύ του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου φάσματος. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και άλλοι δείκτες βλάστησης οι οποίοι προσπαθούν να μειώσουν είτε τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις όπως είναι ο δείκτης ARVI (Kaufman και Tanre, 1992), GEMI (Pinty και Verstraete, 1992) και ο EVI (Huete *et al.*, 1997), είτε να μειώσουν τις επιδράσεις του εδάφους όπως είναι ο δείκτης SAVI (Huete, 1988), ο TSAVI (Baret και Guyot, 1991), ο OSAVI (Rondeaux *et al.*, 1996) και ο MSAVI (Qi *et al.*, 1994) είτε να λάβουν υπόψη και τις δύο αυτές παραμέτρους, όπως είναι ο δείκτης SARVI (Kaufman και Tanre, 1992) (Πίνακας 20 για τις εξισώσεις των δεικτών). Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί και άλλοι δείκτες βλάστησης έτσι ώστε να παρακολουθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της βλάστησης, όπως είναι ο δείκτης Green NDVI ο οποίος είναι ευαίσθητος στη συγκέντρωση Chl-a (Gitelson *et al.*, 1996).

Πίνακας 20: Δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν στις μαγούλες Θεσσαλίας

<i>a/a</i>	Δείκτης βλάστησης	Εξίσωση δείκτη	Βιβλιογραφική αναφορά
[1]	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + p_{red})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
[2]	SR (Simple Ration)	p_{NIR} / p_{red}	Jordan (1969)

[3]	Green NDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{green}) / (p_{NIR} + p_{green})$	Gitelson, Kaufman και Merzlyak, 1996
[4]	EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2.5 (p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + 6 p_{red} - 7.5 p_{blue} + 1)$	Huete <i>et al.</i> , 1997
[5]	SAVI (Soil-adjusted Vegetation Index)	$(1+0.5) (p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + p_{red} + 0.5)$	Huete, 1988
[6]	ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{rb}) / (p_{NIR} + p_{rb}),$ $p_{rb} = p_{red} - \gamma (p_{blue} - p_{red})$	Kaufman και Tanre, 1992
[7]	SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$(1+0.5) (p_{NIR} - p_{rb}) / (p_{NIR} - p_{rb} + 0.5)$ $p_{rb} = p_{red} - \gamma (p_{blue} - p_{red})$	Kaufman και Tanre, 1992
[8]	GEMI (Global Environment Monitoring Index)	$n(1-0.25n)(p_{red} - 0.125) / (1 - p_{red})$ $n = [2(p_{NIR}^2 - p_{red}^2) + 1.5 p_{NIR} + 0.5 p_{red}] / (p_{NIR} + p_{red} + 0.5)$	Pinty και Verstraete, 1992
[9]	MSR (Modified Simple Ratio)	$p_{red} / [(p_{NIR} / p_{red} + 1)]^{1/2}$	Chen, 1996
[10]	PVI (Perpendicular Vegetation Index)	$(p_{NIR} - \alpha p_{red} - b) / (1 + \alpha^2)$ $p_{NIR,soil} = \alpha p_{red,soil} + b$	Richardson και Wiegand, 1977
[11]	TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index)	$[\alpha(p_{NIR} - \alpha p_{NIR} - b)] / [(p_{red} + \alpha p_{NIR} - \alpha b + 0.08(1 + \alpha^2))]$ $p_{NIR,soil} = \alpha p_{red,soil} + b$	Baret και Guyot, 1991
[12]	OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + p_{red} + 0.16)$	Rondeaux, Steven και Baret, 1996
[13]	MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)	$[2 p_{NIR} + 1 - [(2 p_{NIR} + 1)^2 - 8(p_{NIR} - p_{red})]^{1/2}] / 2$	Qi <i>et al.</i> , 1994
[14]	RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + p_{red})^{1/2}$	Roujean και Breon, 1995
[15]	DVI (Difference Vegetation Index)	$p_{NIR} - p_{red}$	Tucker, 1979
<p>p_{NIR}: ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο p_{red}: ανακλαστικότητα στο κόκκινο φάσμα p_{green}: ανακλαστικότητα στο πράσινο φάσμα p_{blue}: ανακλαστικότητα στο μπλε φάσμα</p>			

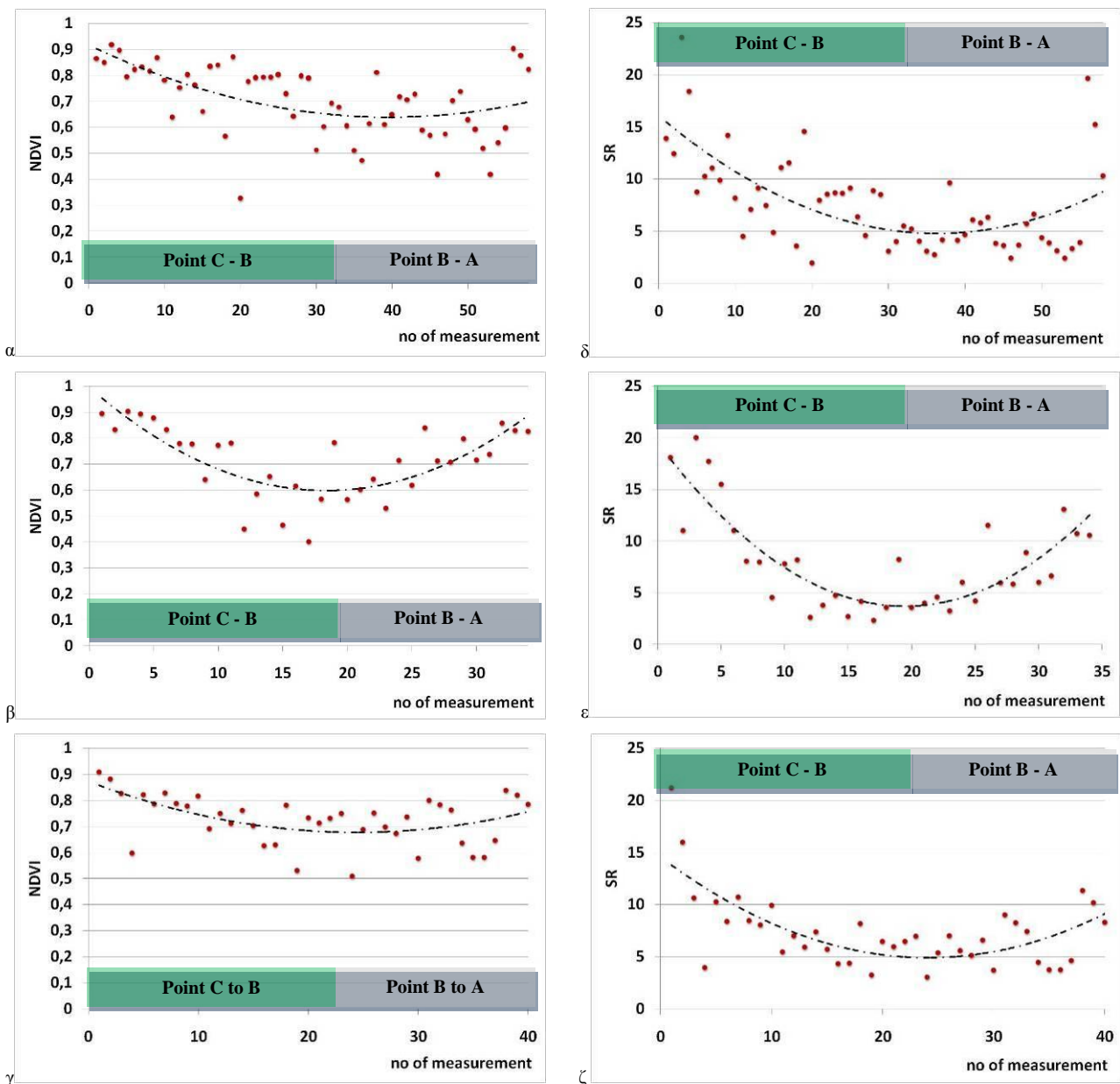
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για τους δείκτες NDVI και SR οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί σε αρκετές περιπτώσεις αρχαιολογικής έρευνας χρησιμοποιώντας πολυφασματικά δεδομένα (Lasaponara και Masini, 2007; Masini και Lasaponara, 2007, Rowlands και Sarris, 2007), Για τους υπόλοιπους δείκτες (Πίνακας 20), παρουσιάζεται μόνο ένα χαρακτηριστικό μέρος των αποτελεσμάτων, λόγω του μεγάλου πλήθους των παρατηρήσεων που πραγματοποιήθηκε στο Θεσσαλικό κάμπο. Για την αναγωγή των επίγειων μετρήσεων στα πολυφασματικά κανάλια του δορυφόρου Landsat 5 TM (Κανάλι 1: 450 – 520 nm, Κανάλι 2: 520 – 600 nm, Κανάλι 3: 630 – 690 nm, Κανάλι 4: 760 – 900 nm) έγινε χρήση των αντίστοιχων φίλτρων RSR του δορυφόρου (Εικόνα 143)



Εικόνα 143: RSR φίλτρα για τα πρώτα τέσσερα κανάλια του δορυφόρου Landsat 5 TM

Μετά τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης έγιναν τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τις τιμές βλάστησης σε συνάρτηση με το φυσικό ανάγλυφο της κάθε μαγούλας, με τα χαρακτηριστικά σημεία A, B, και C, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η Εικόνα 144 (α-γ) παρουσιάζει τις μεταβολές του δείκτη NDVI στις τομές Α-Γ. Η βέλτιστη καμπύλη 2⁰⁰ βαθμού που απεικονίζεται στην εικόνα παρουσιάζει την γενική τάση των δεδομένων σε συνάρτηση με το φυσικό ανάγλυφο της Νεολιθικής θέσης. Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις, μικρότερες τιμές του

NDVI απαντώνται στις περιοχές που ξεκινάει ο φυσικός λοφίσκος της μαγούλας (Σημείο B). Αυτό είναι πιο εμφανές στη Β' τομή η οποία ήταν και η κεντρική πάνω στη μαγούλα. Επιπλέον καταγράφονται παρόμοιες τιμές του δείκτη NDVI στην αρχή και στο τέλος των μετρήσεων (NDVI > 0.9). Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στην επίπεδη περιοχή του τεμαχίου (Σημείο C) και στο ψηλότερο σημείο της μαγούλας (Σημείο A). Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν και στο δείκτη SR όπως φαίνεται στην Εικόνα 144 (δ-ζ) και στο δείκτη SR όπως φαίνεται στην Εικόνα 144 (δ-ζ)

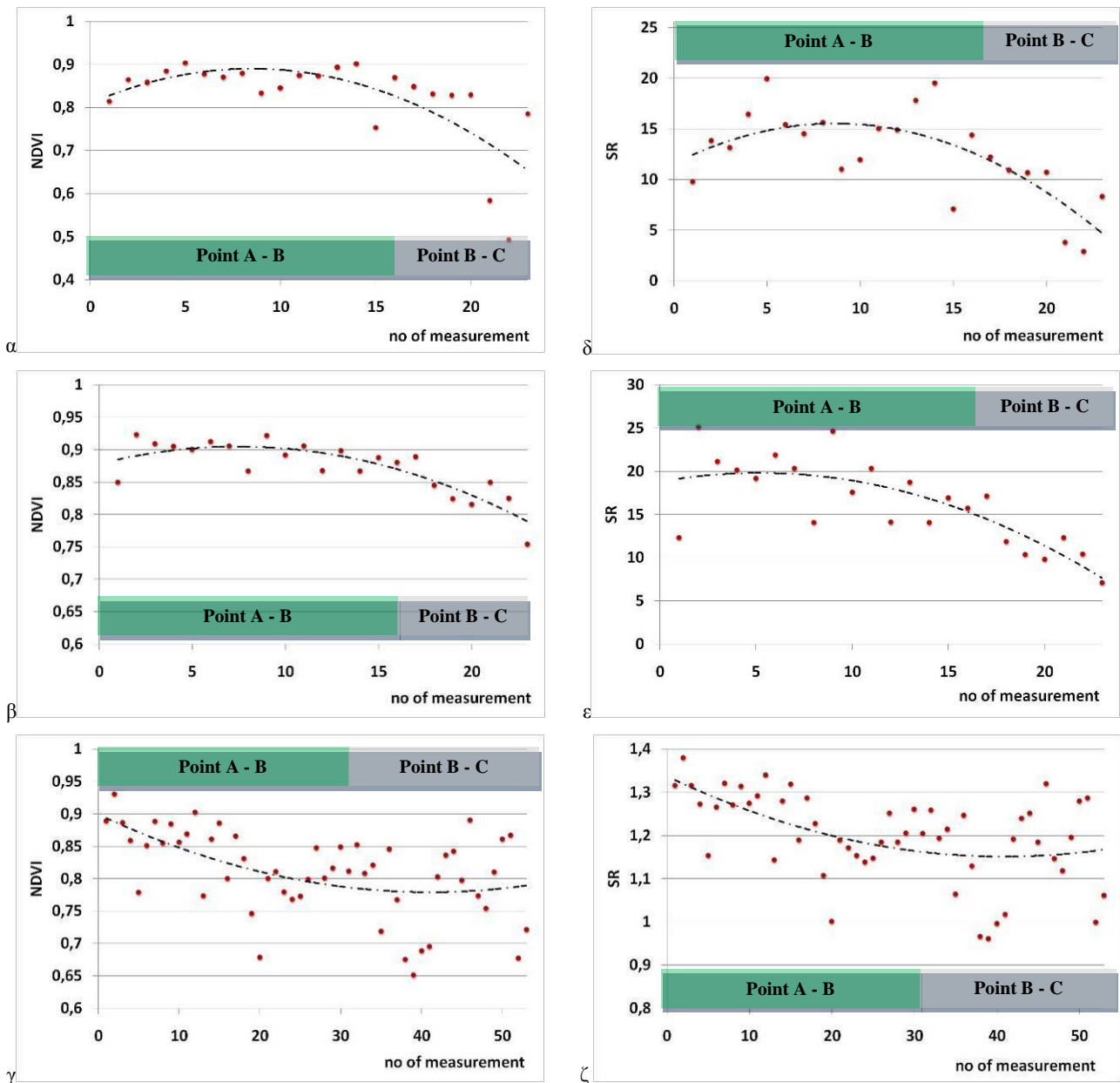


Εικόνα 144: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης: (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR, για τις τρεις τομές στη θέση Νίκαια 6 σε σχέση με το ανάγλυφο.

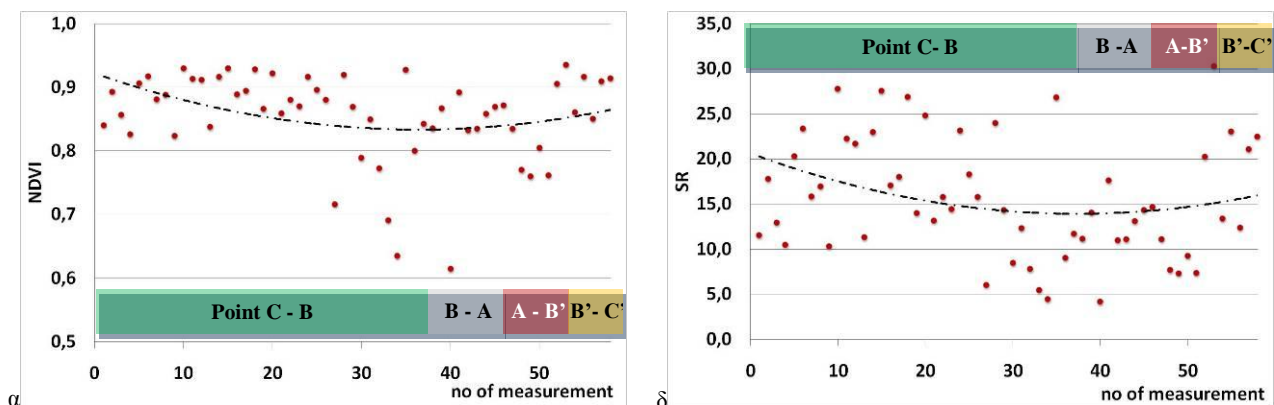
Τα διαγράμματα των δεικτών βλάστησης NDVI και SR για τη μαγούλα Νίκαια 16, δείχνουν παρόμοια αποτελέσματα στις δύο πρώτες τομές (Εικόνα 145, α-β, δ-ε). Πάλι όμως οι τιμές του NDVI είναι ιδιαίτερα ψηλές (>0.8) στα σημεία Α και C σε αντίθεση με την περιοχή γύρω από το σημείο Β. Στο χαμηλότερο σημείο της μαγούλας (Σημείο Β) οι τιμές των NDVI και SR ελαχιστοποιούνται. Αυτή η εικόνα είναι διαφορετική για την τρίτη τομή η οποία περνάει από το κέντρο της μαγούλας. Κατά μήκος της κεντρικής τομής το φυσικό ανάγλυφο είναι πιο έντονο σε σχέση με τις άλλες τομές. Κοινή παρατήρηση και στις τρεις τομές, είναι ότι οι τιμές των δεικτών βλάστησης είναι ψηλότερες στο πάνω μέρος της μαγούλας (Σημείο Α), ενώ προς το εξωτερικό της μαγούλας οι τιμές μειώνονται.

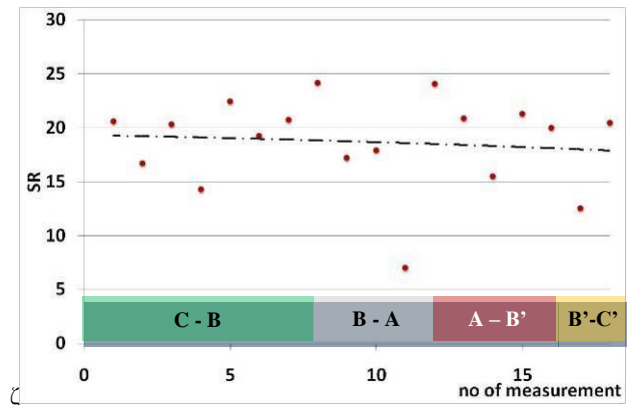
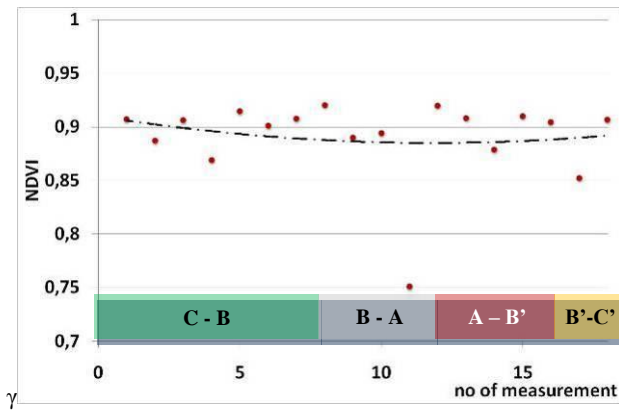
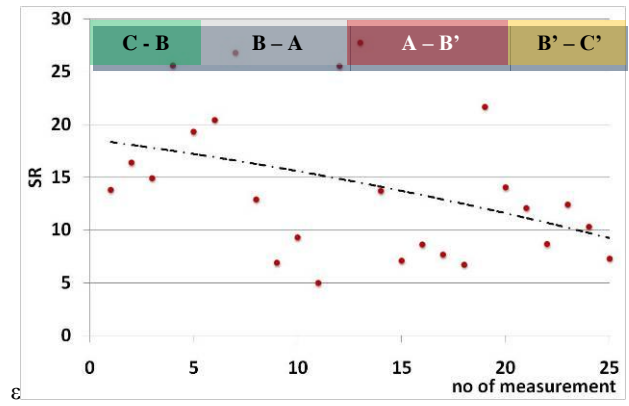
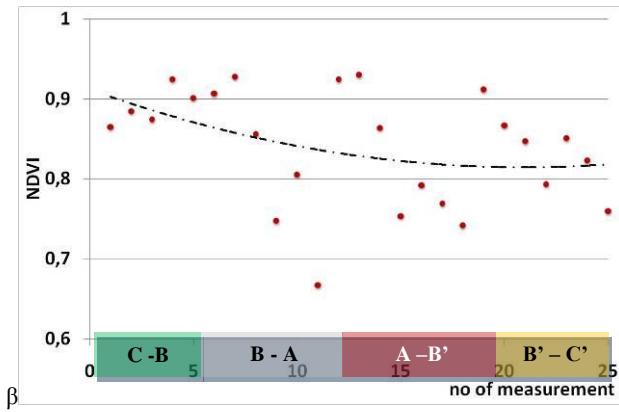
Τα διαγράμματα των NDVI και SR στη θέση Καρατσάνταγλι (Εικόνα 146, α-ζ) δείχνουν ότι στη μαγούλα χαμηλότερες τιμές συναντώνται γύρω από την περιοχή των Σημείων Β και Β'. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές για τις δύο πρώτες τομές Α και Β. Στην τομή Γ' η οποία πάθηκε νοτίως της μαγούλας, δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στις τιμές των δεικτών βλάστησης. Επιπλέον, στο ψηλότερο σημείο της μαγούλας (Σημείο Α) και σε περιοχές εκτός του λοφίσκου της θέσης (Σημείο C) καταγράφονται παρόμοιες τιμές στους δείκτες.

Το διάγραμμα του NDVI στην τομή Α, για τη θέση Αλμυρός ΙΙ (Εικόνα 147, α) δείχνει μια μικρή τροποποίηση του δείκτη τόσο πάνω όσο και σε περιοχές έξω από τη θέση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η τομή Α' πραγματοποιήθηκε λίγο έξω από τη μαγούλα. Παρόλα αυτά, οι άλλες δύο τομές (Εικόνα 147, β-γ) δείχνουν ψηλές τιμές του δείκτη NDVI πάνω από το λοφίσκο της μαγούλας (Σημείο Α), ενώ στις αρχές της θέσης (Σημείο Β') οι τιμές του δείκτη τείνουν να είναι χαμηλότερες. Τα διαγράμματα του δείκτη SR για τις τομές Β' και Γ' (Εικόνα 147, ε-ζ) δείχνουν παρόμοια αποτελέσματα σε σχέση με εκείνα του δείκτη NDVI. Ενδιαφέρον έχει η μελέτη του διαγράμματος SR πάνω από την Α' τομή, αφού καταγράφονται ψηλότερες τιμές στην κορυφή της μαγούλας (Σημείο Α) σε σχέση με το δυτικό άκρο των μετρήσεων (Σημείο Β').

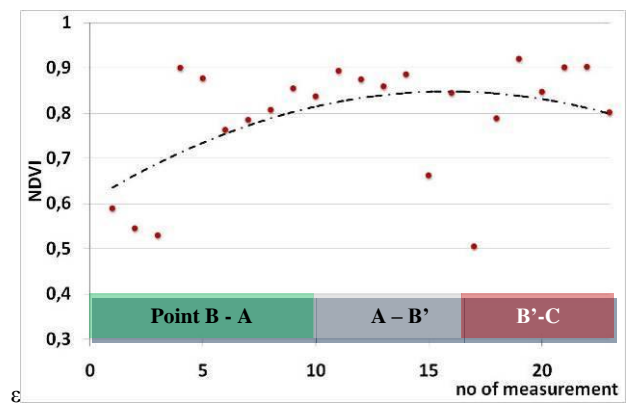
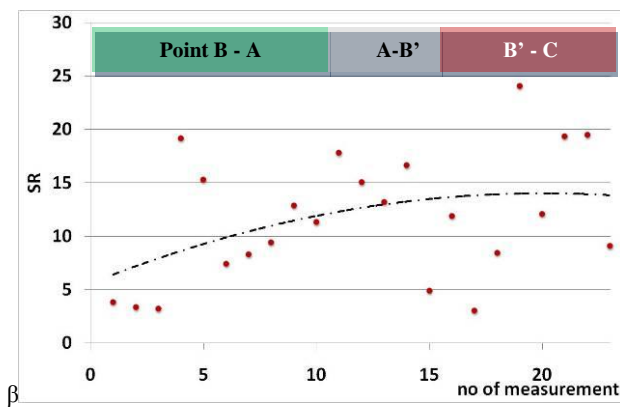
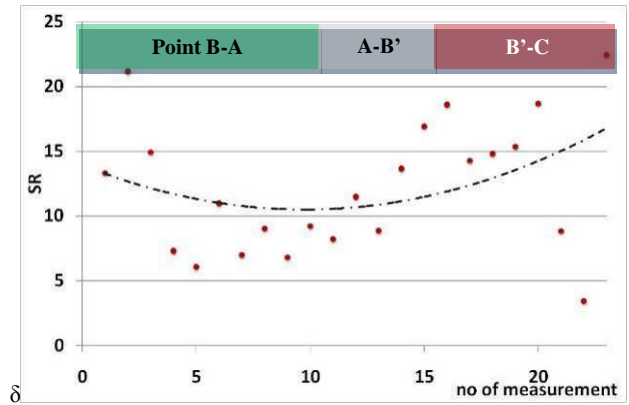
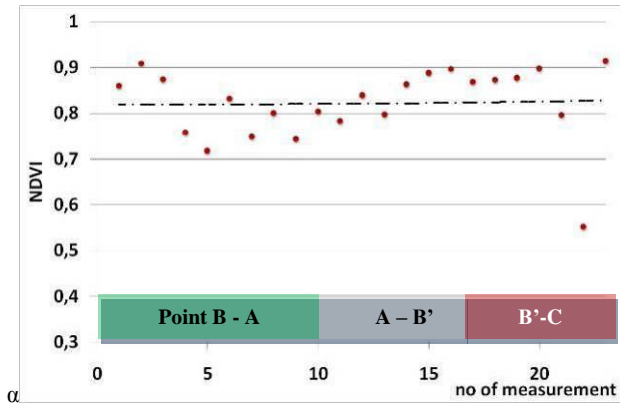


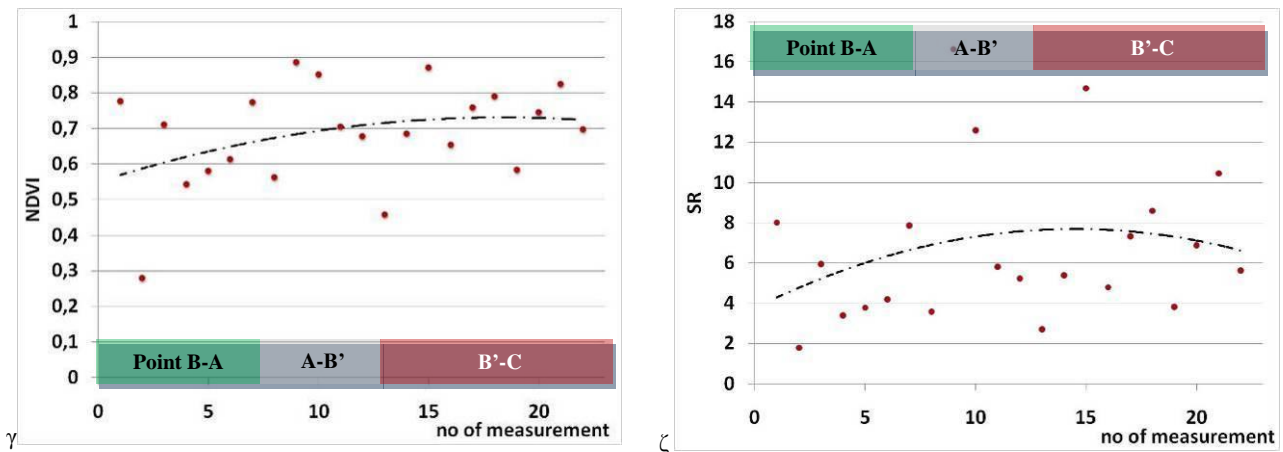
Εικόνα 145: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR για τις τρεις τομές στη θέση Νίκαια 16. Η κεντρική τομή (γ και ζ) δείχνει ένα διαφορετικό πρότυπο για τους δείκτες βλάστησης σε σχέση με το ανάγλυφο.





Εικόνα 146: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR για τις τρεις τομές στη θέση Καρατσάνταγλι σε σχέση με το ανάγλυφο.



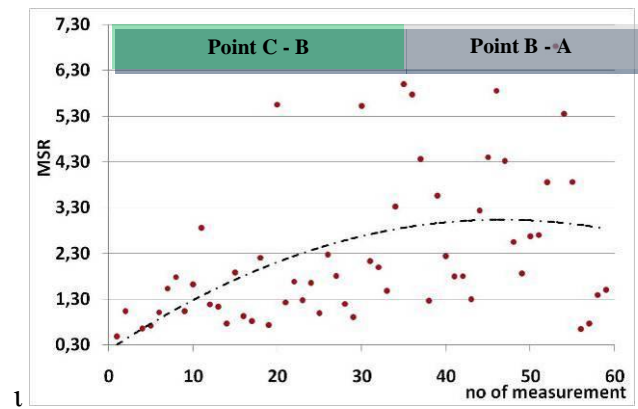
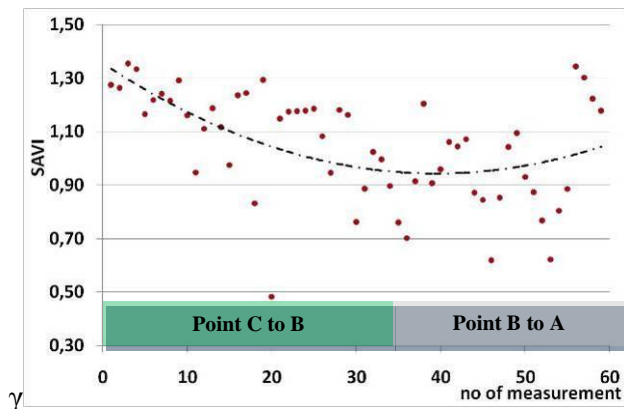
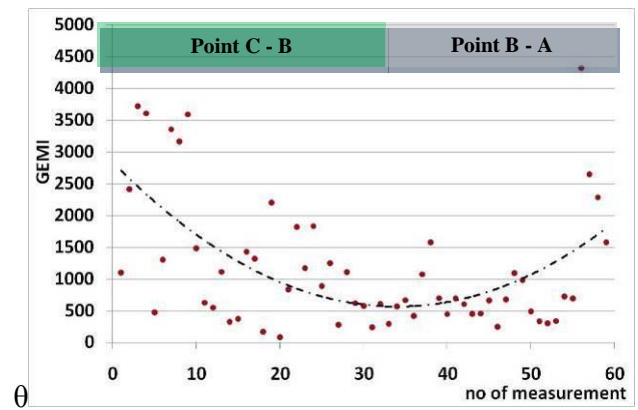
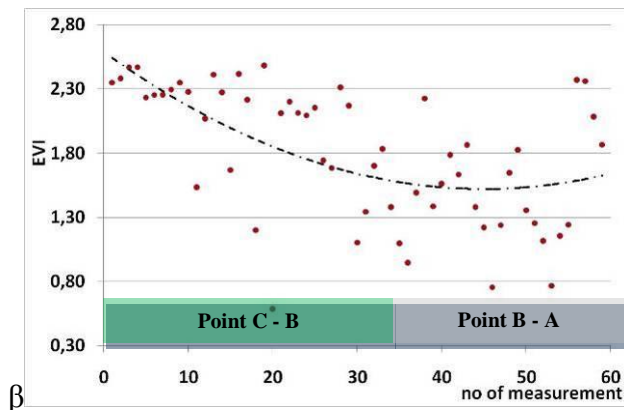
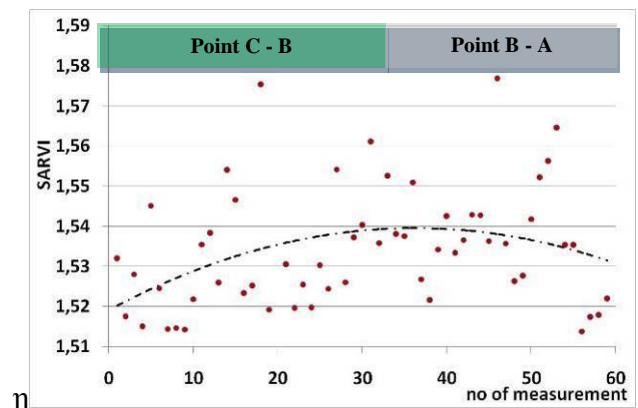
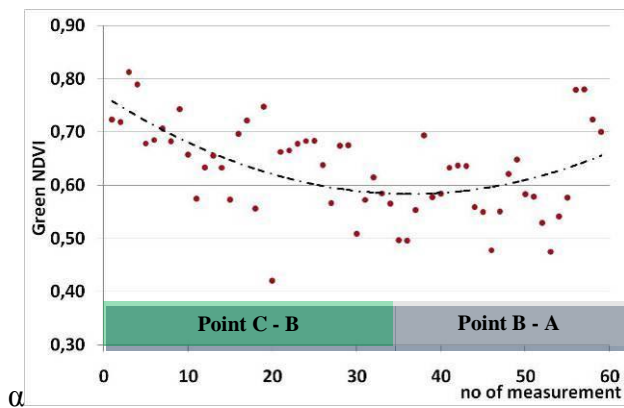


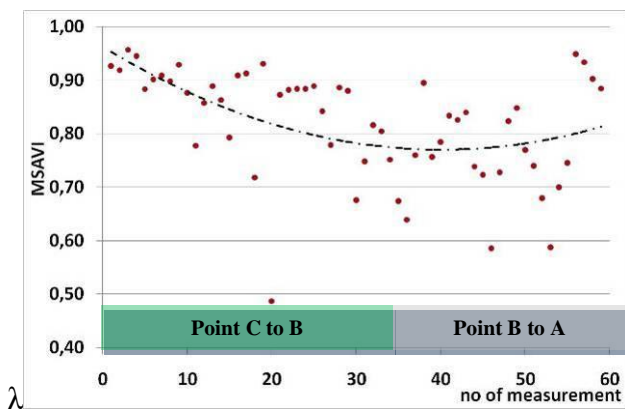
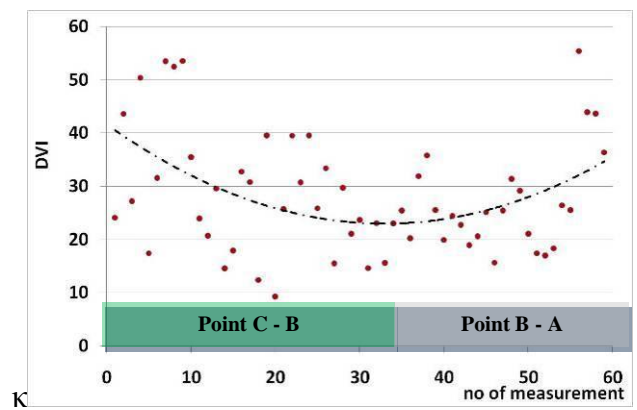
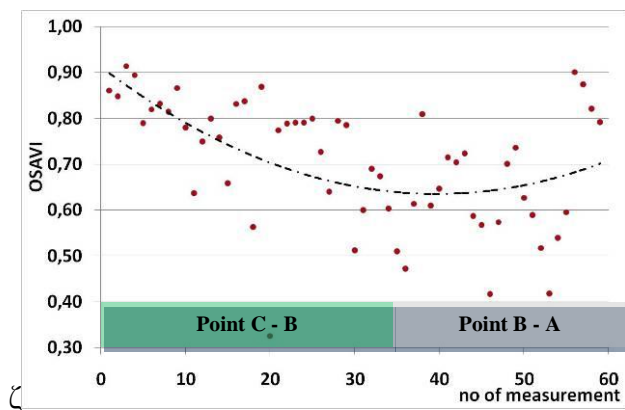
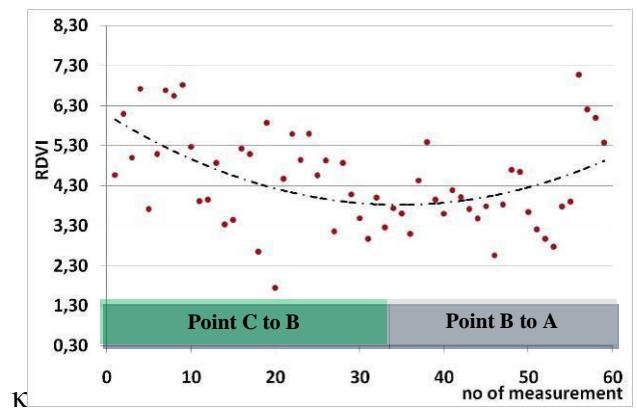
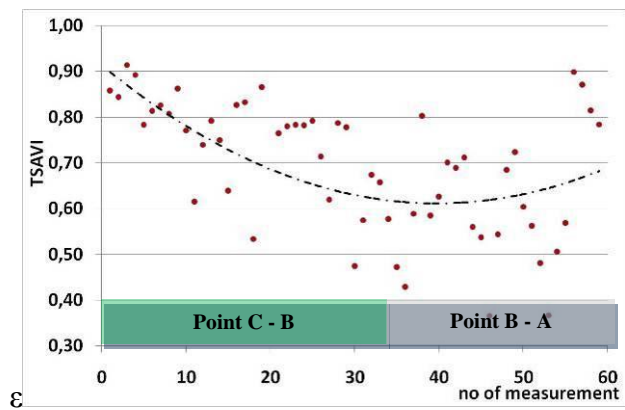
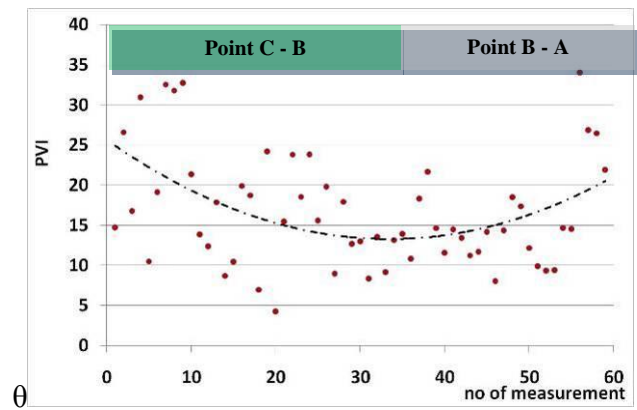
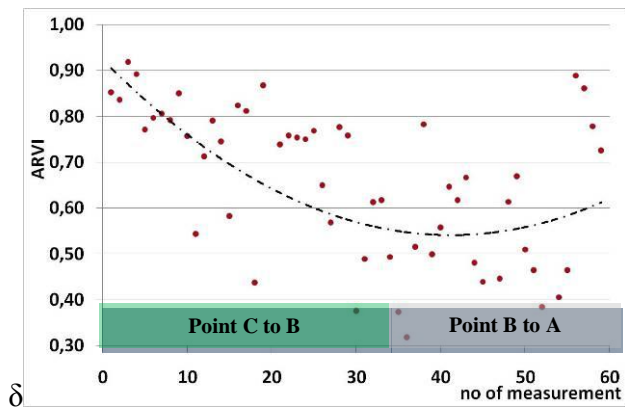
Εικόνα 147: Διάγραμμα των δεικτών βλάστησης (α-γ) NDVI και (δ-ζ) SR για τις τρεις τομές στη θέση Αλμυρός ΙΙ σε σχέση με το ανάγλυφο.

Πέρα από τους δείκτες NDVI και SR μελετήθηκαν και άλλοι δείκτες στο πλαίσιο της διατριβής (Πίνακας 20). Μερικά από τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 148 και Εικόνα 149, τα οποία αφορούν την επεξεργασία των μετρήσεων στις τομές Α' και Β' αντίστοιχα για τη θέση Νίκαια 6. Ανάλογα αποτελέσματα απεικονίζονται και στην Εικόνα 150 για τη θέση Νίκαια 16. Τα διαγράμματα δείχνουν παρόμοιες τάσεις των δεικτών, όπως έχουν καταγραφεί και για τους δείκτες NDVI και SR (βλ. Εικόνα 144 α-β, δ-ε και Εικόνα 145, γ, ζ). Αυτό φανερώνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλοι δείκτες βλάστησης πέρα από τους NDVI και SR για αρχαιολογικές εφαρμογές, μειώνοντας παράλληλα τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις και τις επιδράσεις της ακτινοβολίας του εδάφους. Ιδιαίτερα είναι πολύ σημαντικές οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, όπως έχει καταγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. 5.4 Εκτίμηση ατμοσφαιρικής επίδρασης για αρχαιολογικές εφαρμογές). Από τα διαγράμματα στην Εικόνα 148 φαίνεται ότι ο δείκτης GEMI (διάγραμμα θ) μπορεί να διακρίνει καλύτερα τη μαγούλα και να ενισχύσει την διαφοροποίηση της βλάστησης μεταξύ των περιοχών εκτός μαγούλας (Σημεία Β – C) και το ψηλότερο σημείο της μαγούλας (Σημείο Β). Παρόλα αυτά θα πρέπει να τονιστεί ότι ακόμη και απλοί σε εφαρμογή δείκτες βλάστησης, όπως είναι ο SR και ο DVI, τείνουν να μπορούν να διακρίνουν αρχαιολογικές και μη αρχαιολογικές θέσεις. Μια εκτενέστερη μελέτη όσο αφορά του δείκτες βλάστησης για την περιοχή της Θεσσαλίας θα μπορούσε να δώσει ακόμη περισσότερα χρήσιμα συμπεράσματα.

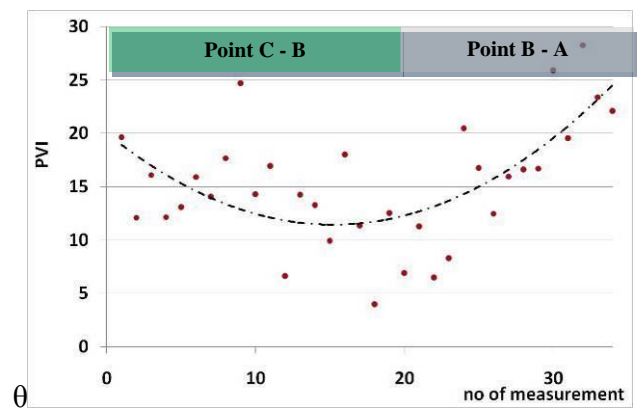
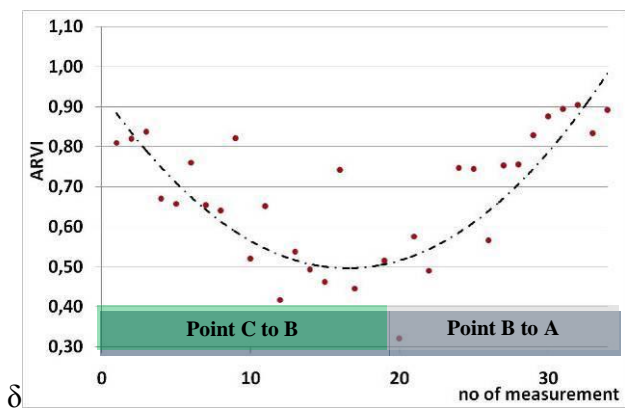
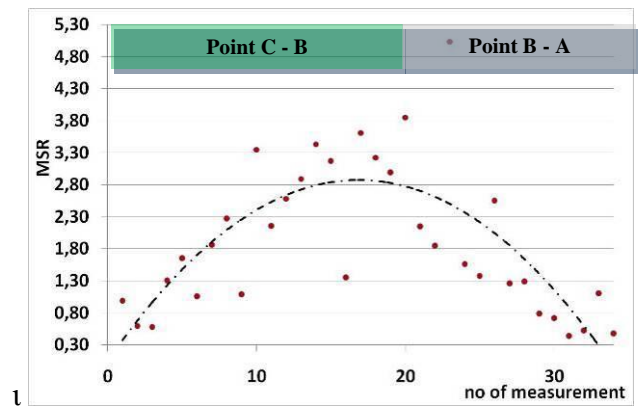
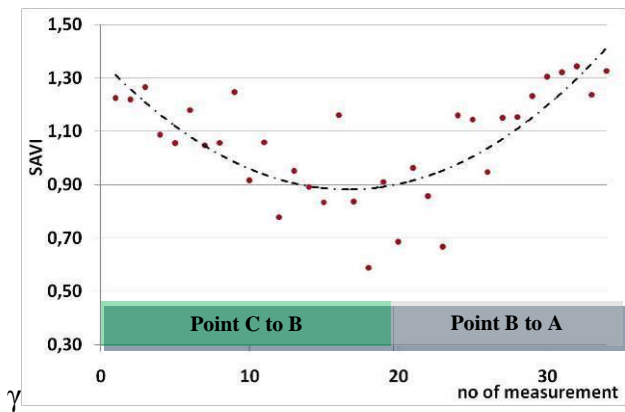
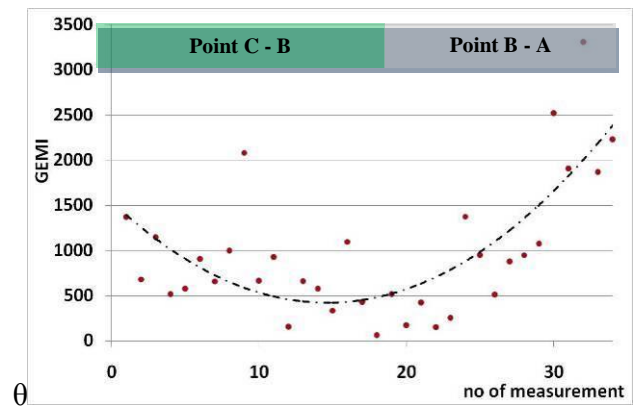
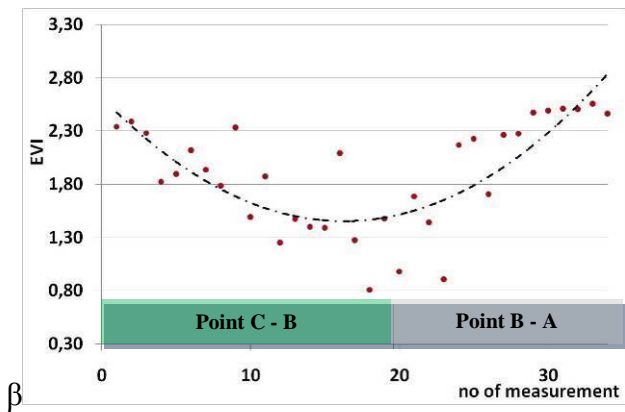
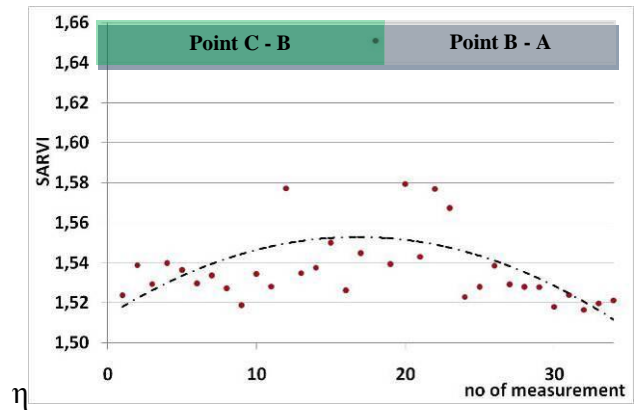
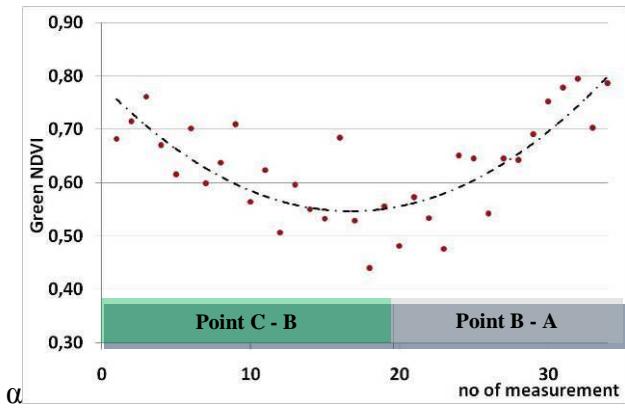
Ομοιότητες αλλά και διαφοροποιήσεις μεταξύ των δεικτών βλάστησης και των φασματικών υπογραφών καταγράφηκαν και για τις μαγούλες της Θεσσαλίας. Οι

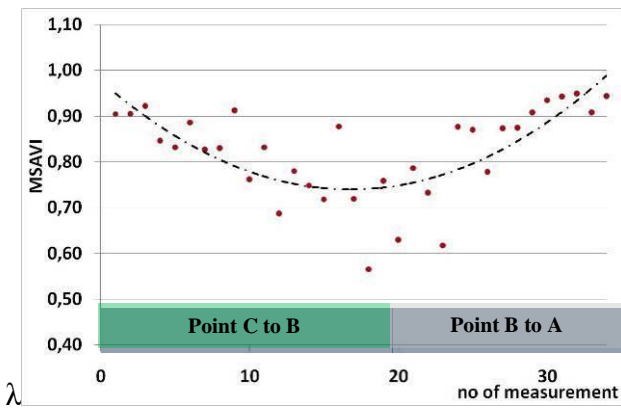
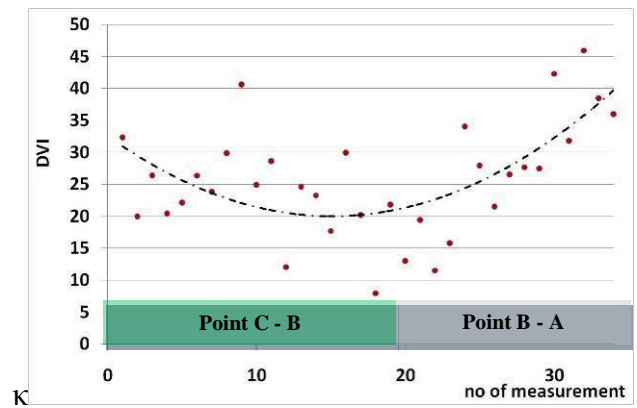
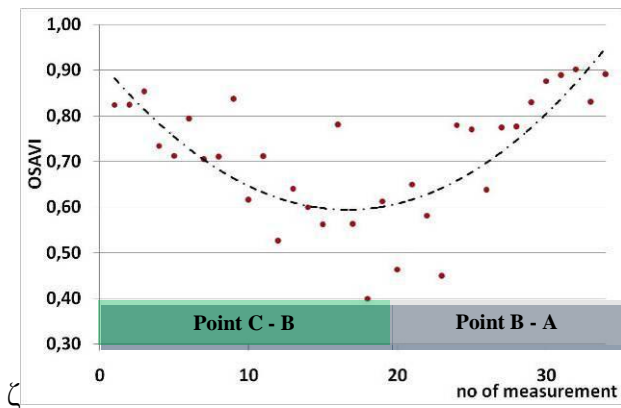
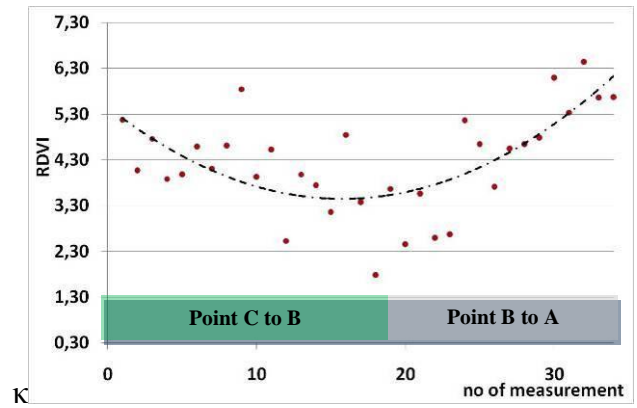
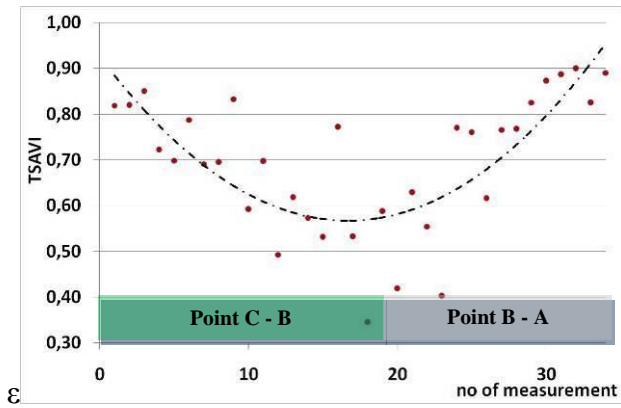
διαφοροποιήσεις ίσως να οφείλονται στο γεγονός ότι η μελέτη των φασματικών υπογραφών δεν μπορούσε να γίνει στο σύνολό τους, αλλά παρά μόνο σε ένα μικρό δείγμα το οποίο και παρουσιάστηκε προηγουμένως. Οι ομοιότητες που υπάρχουν μεταξύ των δεικτών βλάστησης και των φασματικών υπογραφών (π.χ. τομή Γ', Νίκαια 16), τονίζουν το γεγονός ότι οι τελευταίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μια πρώτη εκτίμηση της διαφοροποίησης της βλάστησης πάνω από τις μαγούλες. Αυτό άλλωστε έχει φανεί και από τη μελέτη που έγινε και παρουσιάστηκε από τους Αγαρίου *et al.* (2010).



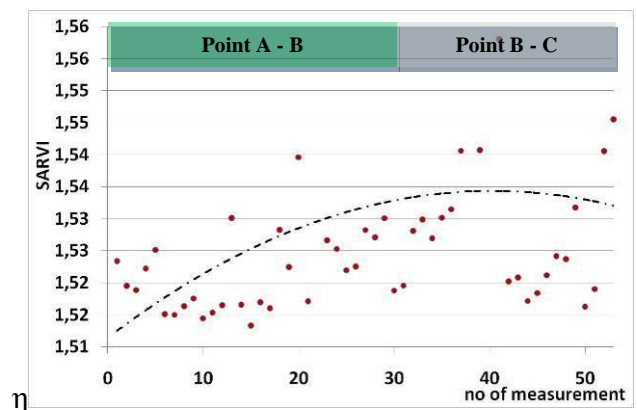
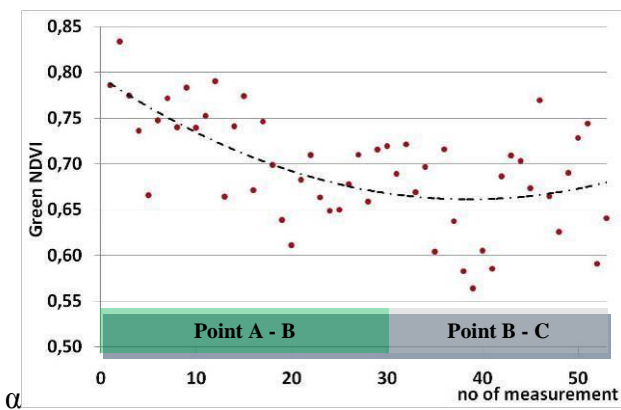


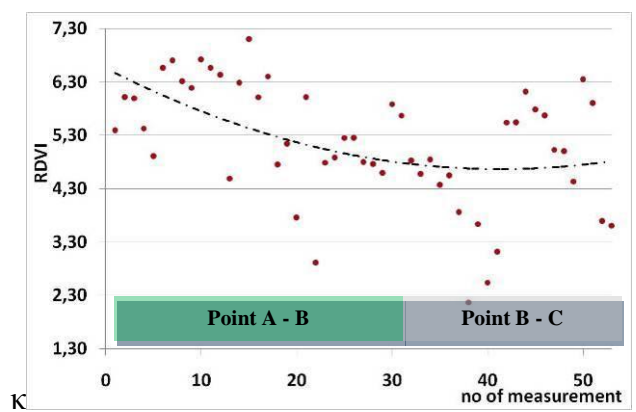
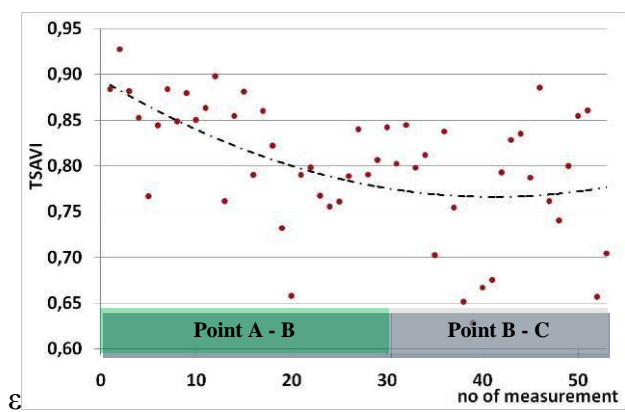
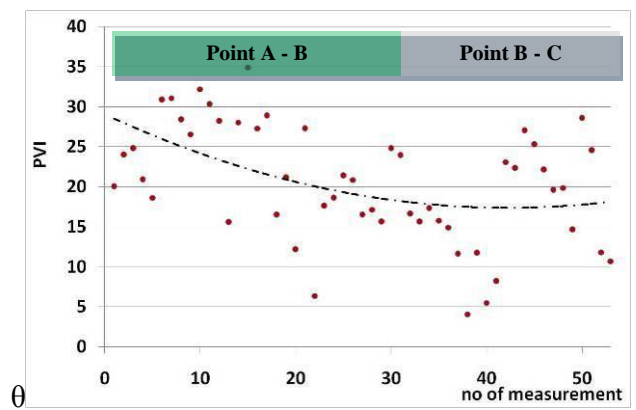
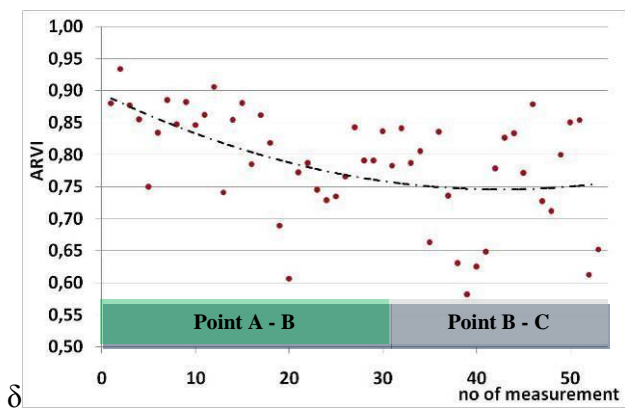
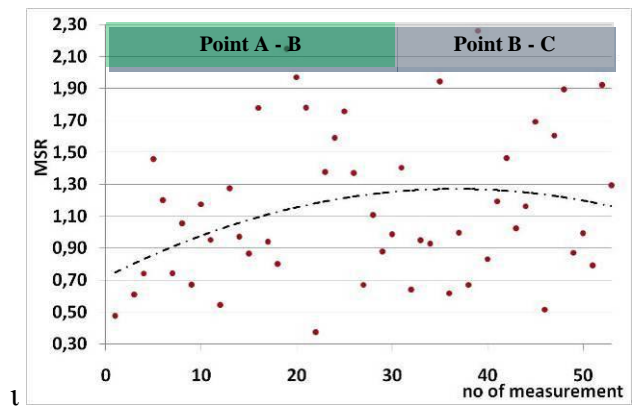
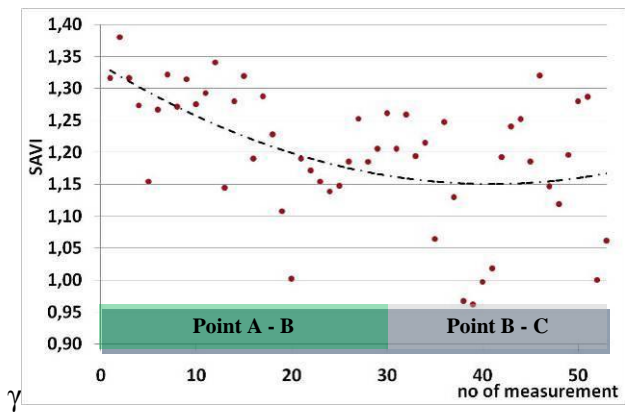
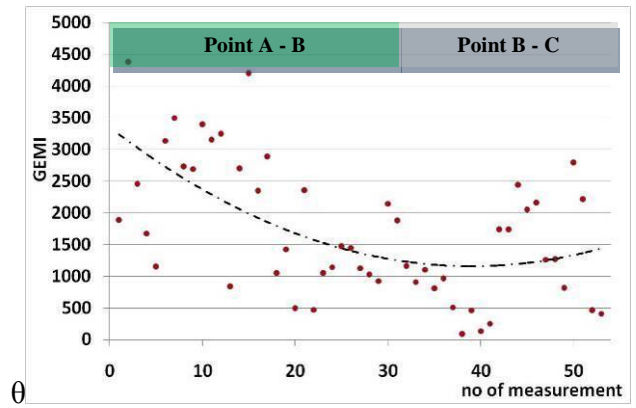
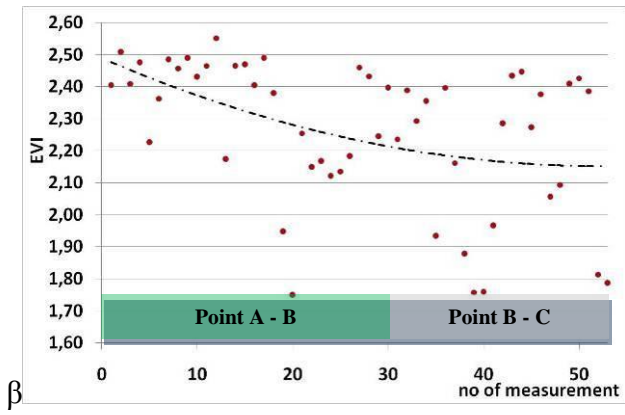
Εικόνα 148: Διάγραμμα δεικτών βλάστησης για την Α' τομή στη θέση Νίκαια 6 σε σχέση με το ανάγλυφο.

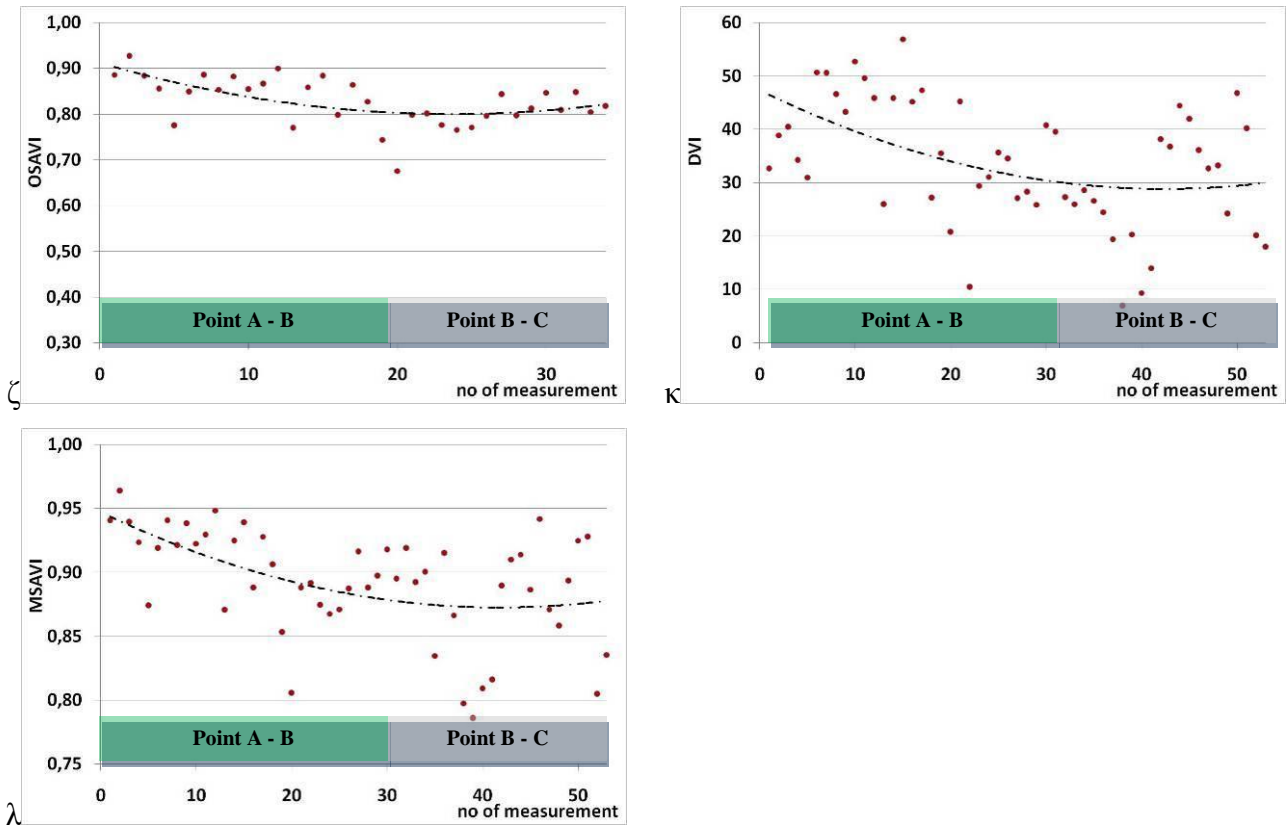




Εικόνα 149: Διάγραμμα δεικτών βλάστησης για την Β' τομή στη θέση Νίκαια 6 σε σχέση με το ανάγλυφο.



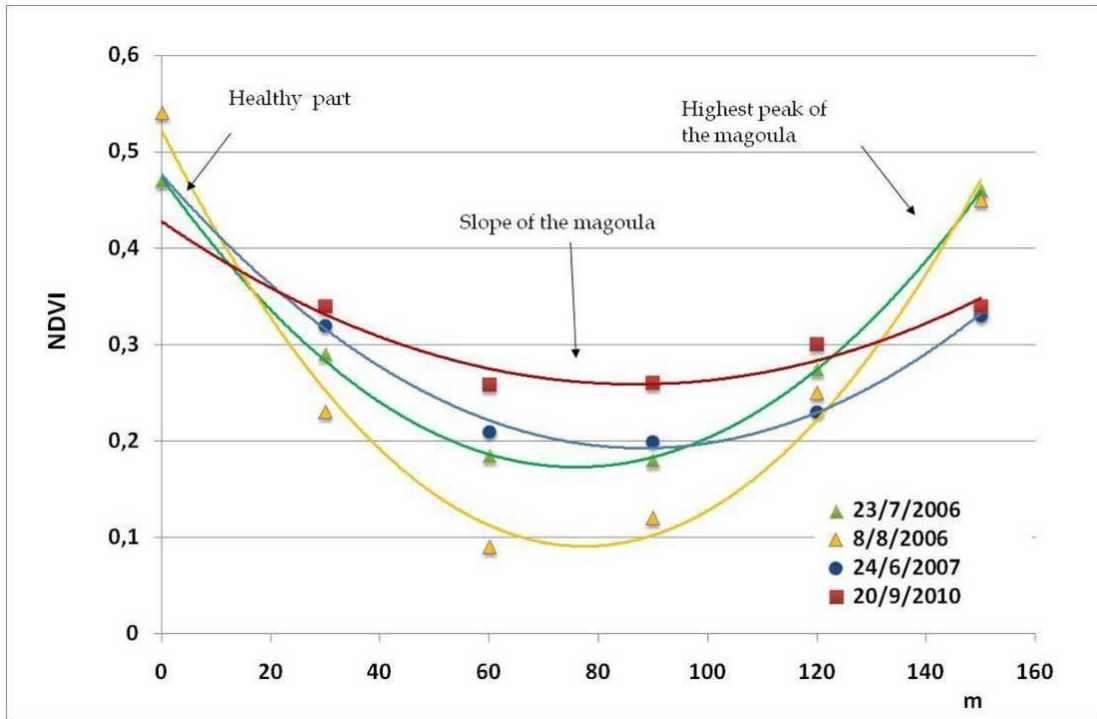




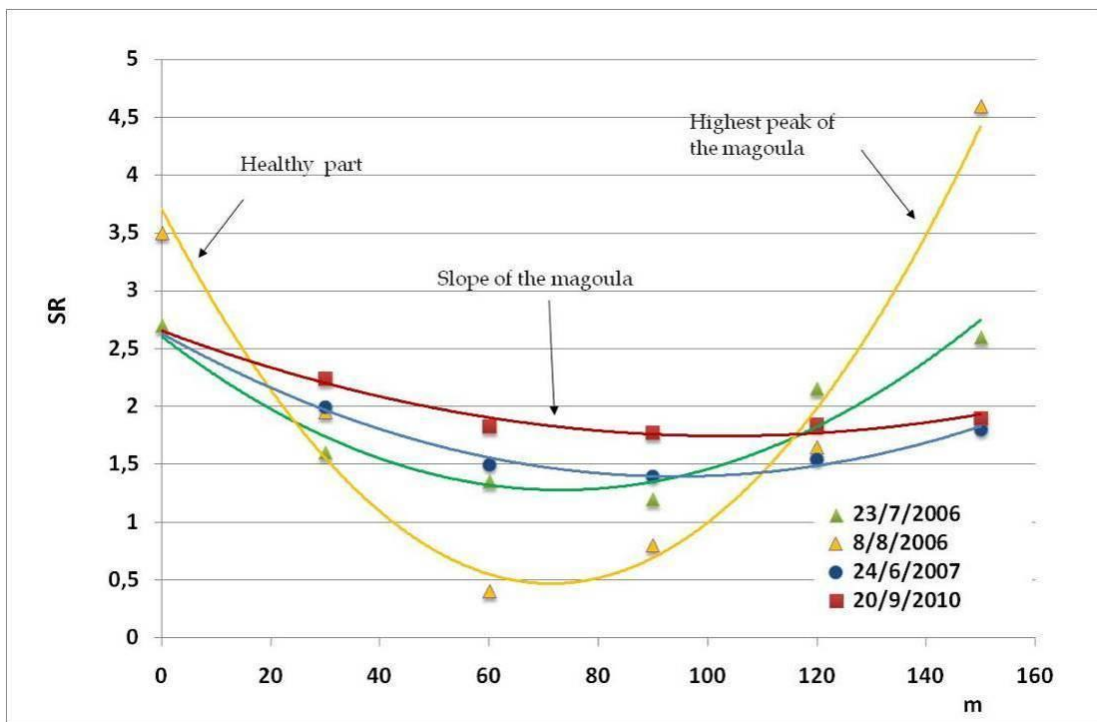
Εικόνα 150: Διάγραμμα δεικτών βλάστησης για την Γ' τομή στη θέση Νίκαια 16 σε σχέση με το ανάγλυφο.

Τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις των επίγειων μετρήσεων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από δορυφορικές εικόνες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη μιας τομής στη θέση Νίκαια 6 με την ανάλυση πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων τύπου Landsat TM/ETM+ (23/07/2006, 08/08/2006, 24/06/2007 και 20/09/2010).

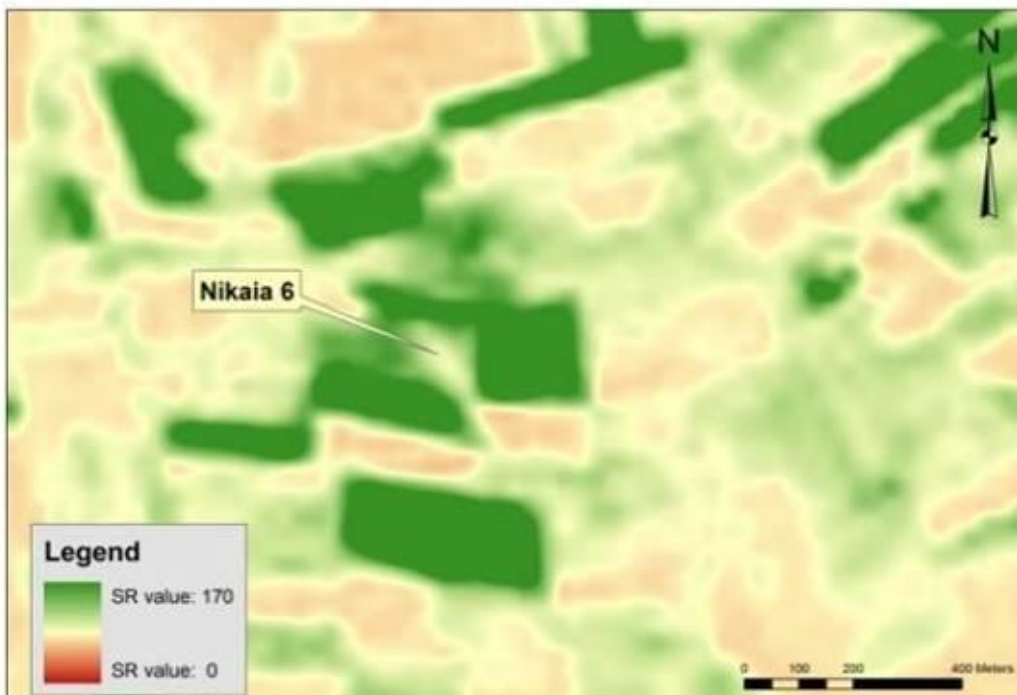
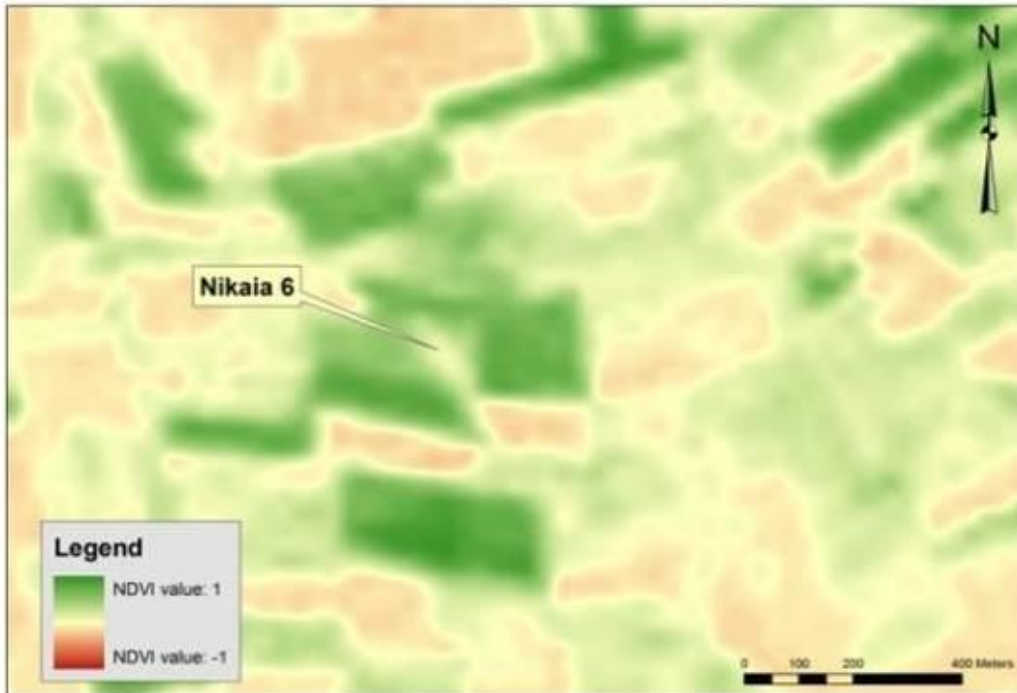
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 151 και στην Εικόνα 152, οι δείκτες NDVI και SR ((Εικόνα 153) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με τις αντίστοιχες επίγειες μετρήσεις (βλ. Εικόνα 144, α και δ). Παρόλη τη χαμηλή χωρική ανάλυση των δορυφορικών εικόνων τύπου Landsat, οι χαρακτηριστικές καμπύλες των δεικτών βλάστησης που έχουν σημειωθεί στις επίγειες μετρήσεις, παρουσιάζονται και στις δορυφορικές εικόνες.



Εικόνα 151: Διάγραμμα NDVI κατά μήκος της θέσης Νίκαια 6 για διάφορες ημερομηνίες



Εικόνα 152: Διάγραμμα SR κατά μήκος της θέσης Νίκαια 6 για διάφορες ημερομηνίες

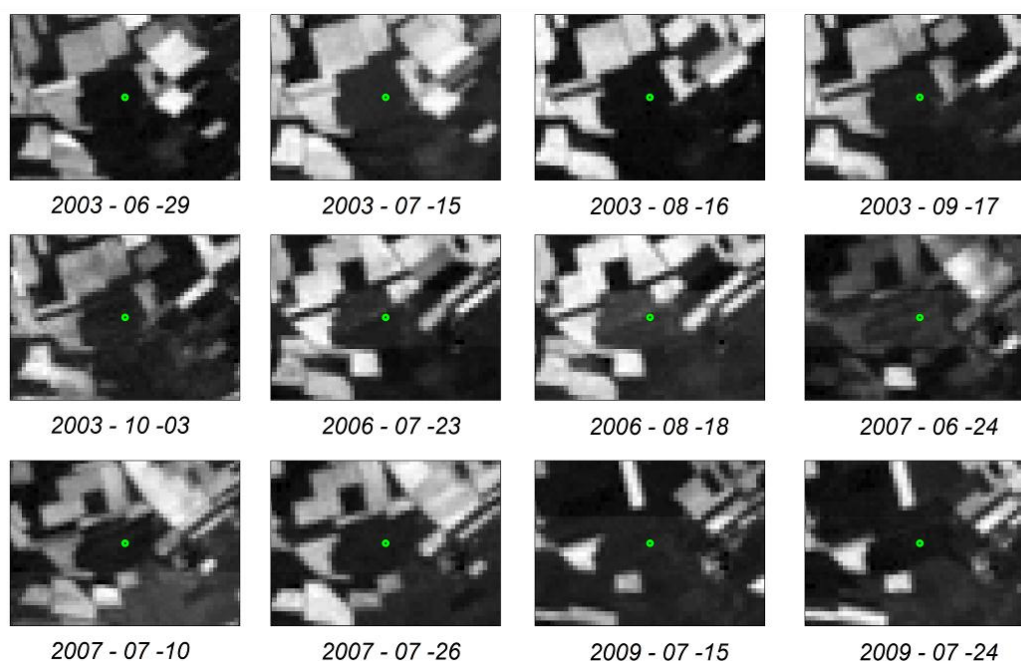


Εικόνα 153: Εφαρμογή δείκτη βλάστησης NDVI (αριστερά) και του δείκτη SR (δεξιά) σε δορυφορική εικόνα τύπου Landsat 5 TM.

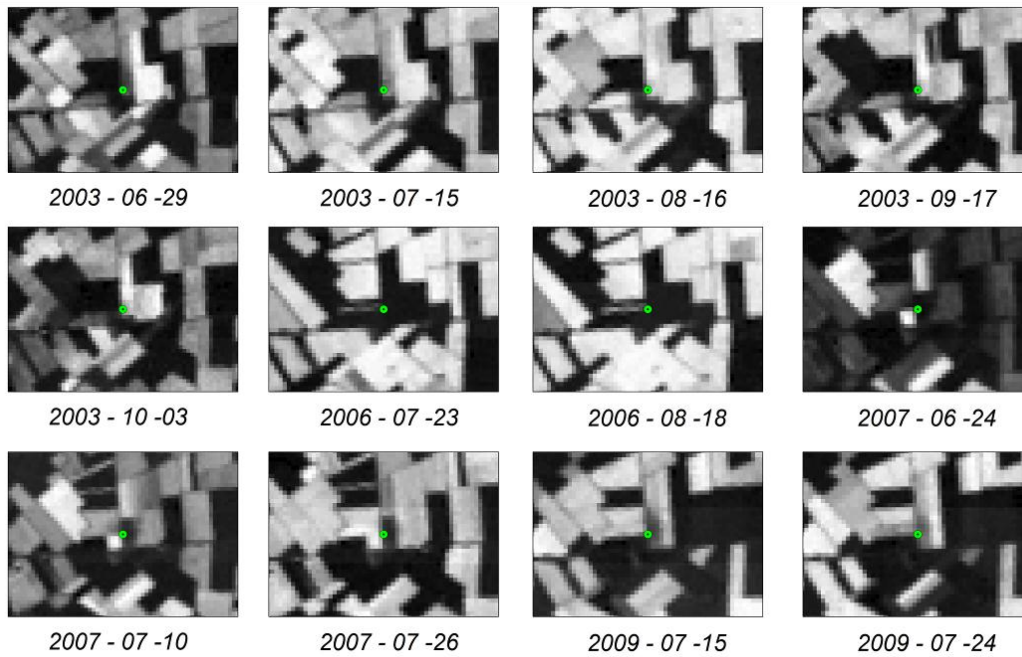
Η σύγκριση των δορυφορικών δεδομένων με τις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις, ανέδειξε τις δυνατότητες των τελευταίων για την αρχαιολογική έρευνα. Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα, τις επίγειες μετρήσεις φαίνεται ότι οι Νεολιθικές θέσεις ακολουθούν ένα συγκεκριμένο πρότυπο το οποίο με τη σειρά του

μπορεί να μοντελοποιηθεί και έτσι μπορεί να εφαρμοστεί ένα μοντέλο πρόβλεψης σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, με σκοπό να εντοπιστούν και άλλες “θέσεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος”. Αυτές οι θέσεις θα ήταν στην πραγματικότητα περιοχές που παρουσιάζουν κοινό πρότυπο με τα επίγεια αποτελέσματα ή/και διαφοροποιήσεις δεικτών βλάστησης. Τονίζεται όμως ότι όλα αυτά θα πρέπει να διερευνηθούν και να συσχετιστούν μέσα από μια συστηματική αρχαιολογική έρευνα της περιοχής μελέτης.

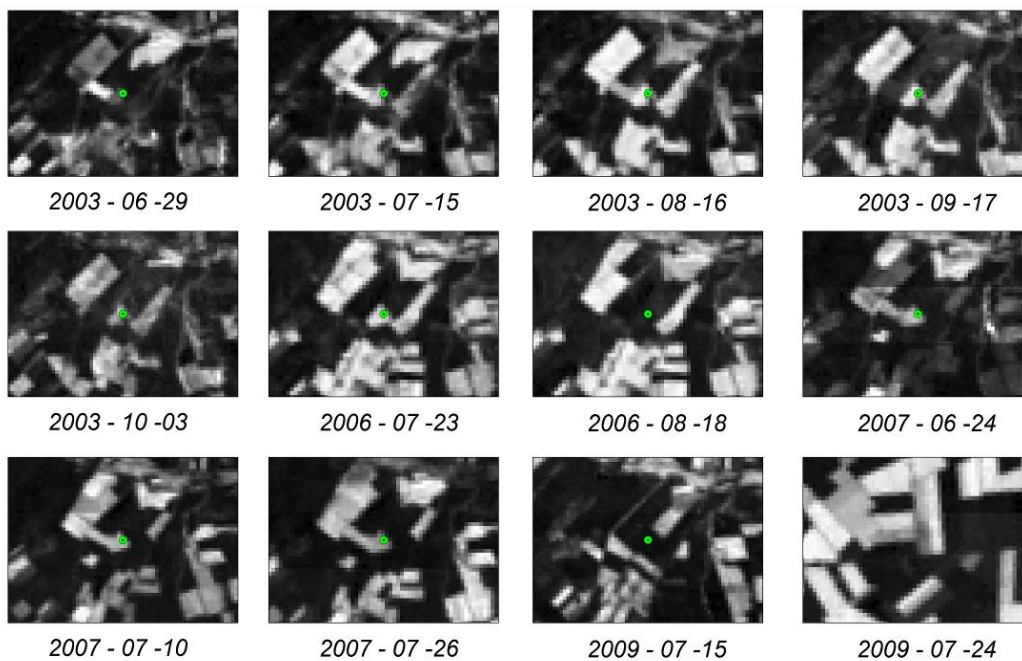
Σε πρόσφατη μελέτη ο Αλεξιάκης (2009) αναφέρει ότι οι δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat είχαν οδηγήσει σε “φτωχά αποτελέσματα” σε αντίθεση με άλλες δορυφορικές εικόνες καλύτερης χωρικής ανάλυσης τύπου ASTER, Hyperion και IKONOS. Αποτελέσματα από την εφαρμογή του δείκτη NDVI μελετήθηκαν και στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής (Αγαρίου *et al.*, 2012b) όπως φαίνεται στην Εικόνα 154 και στην Εικόνα 156. Αν και δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις των μαγούλων σε σχέση με τον ευρύτερο περίγυρο των θέσεων, το οποίο είναι σύμφωνο και με την μελέτη του Αλεξιάκη (2009), εντούτοις τοπικές γραμμικές ενισχύσεις ιστογραμμάτων (Εικόνα 157 - Εικόνα 158) είναι σε θέση να ενισχύσουν την φωτοερμηνευτική ικανότητα της εικόνας σε σχέση με τον εντοπισμό των νεολιθικών θέσεων στην περιοχή της Θεσσαλίας.



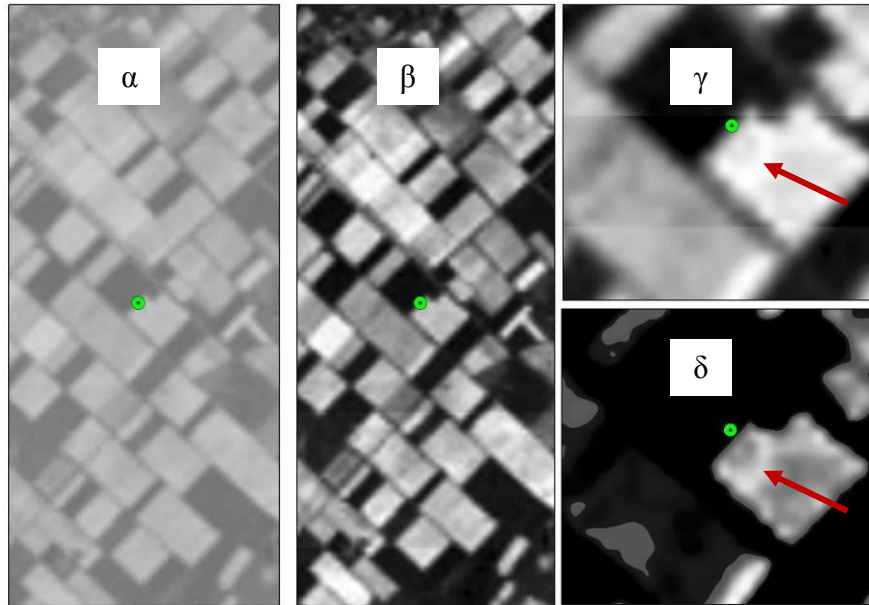
Εικόνα 154: Αποτελέσματα δείκτη NDVI στη θέση Νίκαια 6 (εικόνες Landsat)



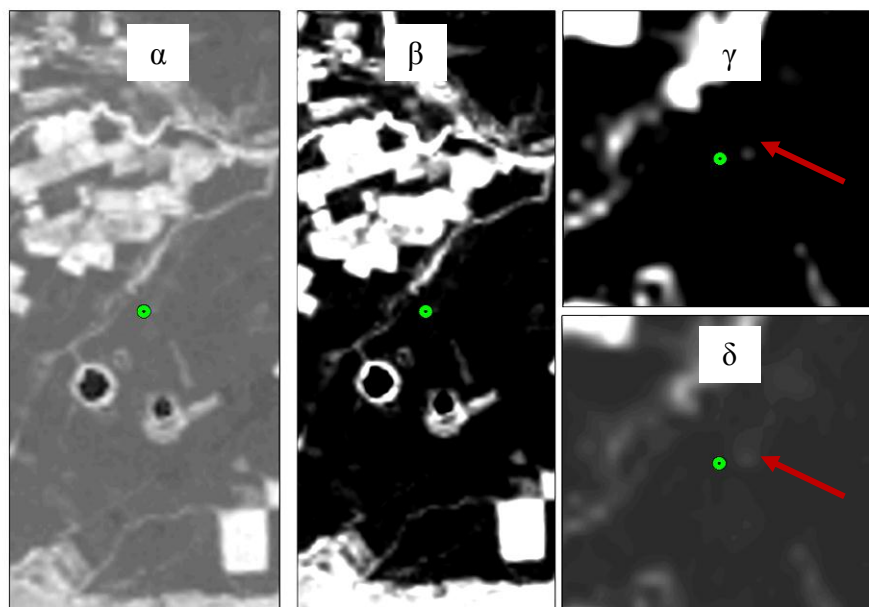
Εικόνα 155: Αποτελέσματα δείκτη NDVI στη θέση Νίκαια 16 (εικόνες Landsat)



Εικόνα 156: Αποτελέσματα δείκτη NDVI στη θέση Αλμυρός II (εικόνες Landsat)



Εικόνα 157: Αποτελέσματα του δείκτη NDVI στη θέση Πρόδρομος II: (α) αρχική εικόνα Landsat χωρίς ραδιομετρική ενίσχυση, (β) εικόνα της περιοχής μετά από γραμμική επέκταση max-min (γ) εικόνα μετά από τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Πρόδρομος II και (δ) τροποποιημένη τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Πρόδρομος II. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η μαγούλα.



Εικόνα 158: Αποτελέσματα δείκτη της θέσης Ζερέλια: (α) αρχική εικόνα Landsat χωρίς ραδιομετρική ενίσχυση, (β) εικόνα της περιοχής μετά από γραμμική επέκταση max-min (γ) εικόνα μετά από τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Ζερέλια και (δ) τροποποιημένη τοπική γραμμική τοπική ενίσχυση max-min στην ευρύτερη περιοχή της θέσης Ζερέλια. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η μαγούλα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν προκύψει από τη χρήση του αλγορίθμου Tasseled Cap (Εικόνα 159 - Εικόνα 160), ο οποίος είναι γνωστός και ως αλγόριθμος K-T (Kauth και Thomas, 1976). Ο αλγόριθμος Tasseled Cap χρησιμοποιείται για να ενισχύσει τη φασματική πληροφορία των εικόνων Landsat και σχεδιάστηκε ειδικά για εφαρμογές με βλάστηση. Ο αλγόριθμος είναι ένας γραμμικός μετασχηματισμός των αρχικών καναλιών της εικόνας Landsat σε νέα κανάλια. Τα πρώτα τρία κανάλια τα οποία προκύπτουν χαρακτηρίζονται ως ακολούθως:

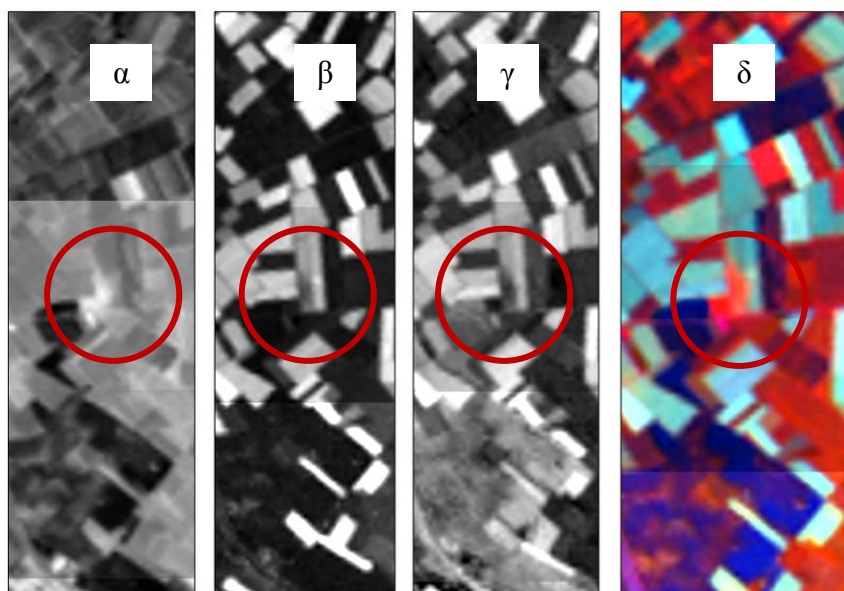
- Κανάλι 1: brightness (για εδάφη)
- Κανάλι 2: greenness (για βλάστηση)
- Κανάλι 3: wetness (σχέση βλάστησης και υγρασίας)

Οι σχέσεις που διέπουν τον αλγόριθμο Tasseled Cap είναι γραμμικές εξισώσεις των πρωτογενών δεδομένων της εικόνας Landsat ως ακολούθως:

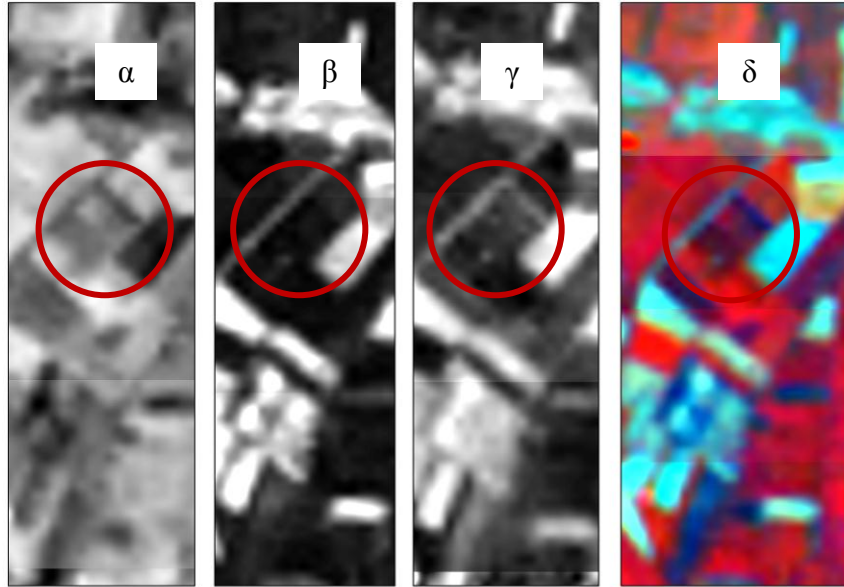
$$\text{Brightness} = 0.3037(\text{TM1}) + 0.2793(\text{TM2}) + 0.4743(\text{TM3}) + 0.5585(\text{TM4}) + 0.5082(\text{TM5}) + 0.1863(\text{TM7})$$

$$\text{Greenness} = -0.2848(\text{TM1}) - 0.2435(\text{TM2}) - 0.5436(\text{TM3}) + 0.7243(\text{TM4}) + 0.0840(\text{TM5}) - 0.1800(\text{TM7})$$

$$\text{Wetness} = 0.1509(\text{TM1}) + 0.1973(\text{TM2}) + 0.3279(\text{TM3}) + 0.3406(\text{TM4}) - 0.7112(\text{TM5}) - 0.4572(\text{TM7})$$



Εικόνα 159: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου Tasseled Cap για τη θέση Νίκαια 16 (σε κύκλο): (α) Brightness, (β) greenness, (γ) wetness και (δ) RGB των τριών πρώτων καναλιών του Tasseled Cap.



Εικόνα 160: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου Tasseled Cap για τη θέση Αλμυρός ΙΙ (σε κύκλο): (α) Brightness, (β) greenness, (γ) wetness και (δ) RGB των τριών πρώτων καναλιών του Tasseled Cap.

6.2.2.3. Φαινολογικός κύκλος

Για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου στην περιοχή της Θεσσαλίας έγινε χρήση μιας μεγάλης βάσης δεδομένων, η οποία αποτελείται από συνολικά 97 δορυφορικές εικόνες μέσης ανάλυσης (Πίνακας 21). Τα δεδομένα αυτά ήταν δορυφορικές εικόνες τύπου Landsat MSS / TM/ ETM+ διαθέσιμες δωρεάν από τη USGS Glovis (βλ. Αγαρίου *et al.*, 2012d).

Πίνακας 21: Δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου στο Θεσσαλικό κάμπο

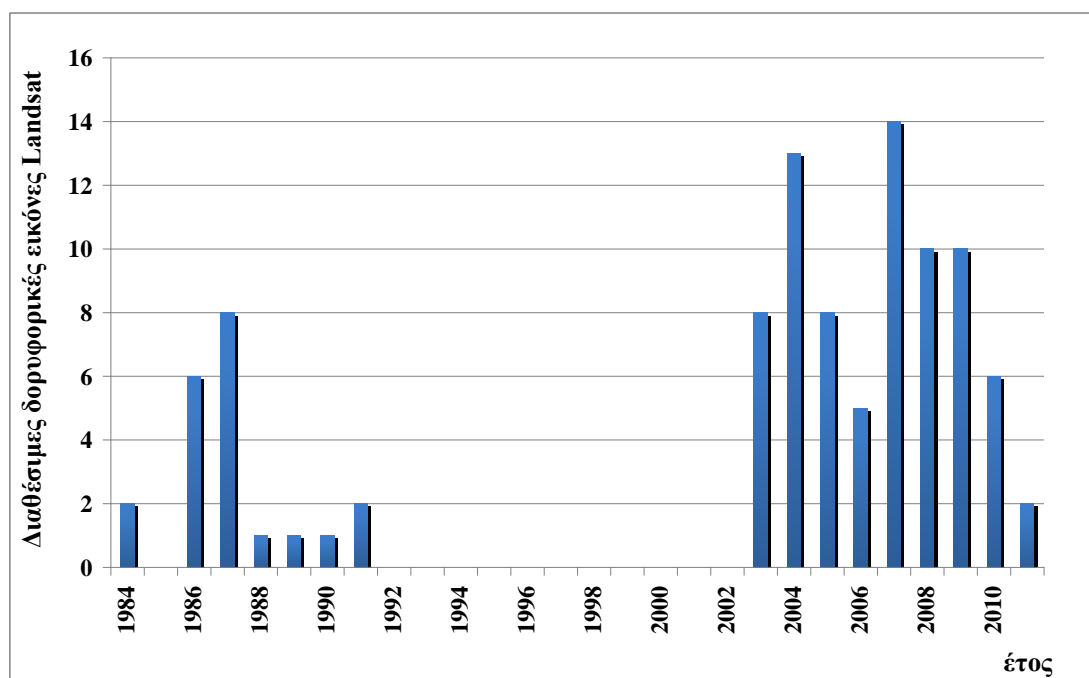
α/α.	Δορυφόρος	Αισθητήρας	Path	Row	Ημερ.	Χωρική ανάλυση
1	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	08-06-1984	30 m
2	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	24-06-1984	30 m
3	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	29-05-1986	30 m
4	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	16-07-1986	30 m
5	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	01-08-1986	30 m
6	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	17-08-1986	30 m
7	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	18-09-1986	30 m
8	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	04-10-1986	30 m
9	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	17-06-1987	30 m

10	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	03-07-1987	30 m
11	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	19-07-1987	30 m
12	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	20-08-1987	30 m
13	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	05-09-1987	30 m
14	Landsat	Thematic Mapper (TM)	183	33	14-09-1987	30 m
15	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	21-09-1987	30 m
16	Landsat	Multispectral Scanner System (MSS)	184	33	18-12-1987	80m
17	Landsat	Multispectral Scanner System (MSS)	184	33	24-04-1988	80m
18	Landsat	Multispectral Scanner System (MSS)	184	33	16-07-1989	80m
19	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	12-08-1990	30 m
20	Landsat	Multispectral Scanner System (MSS)	184	33	06-07-1991	80m
21	Landsat	Multispectral Scanner System (MSS)	184	33	23-08-1991	80m
22	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	29-06-2003	30 m
23	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	15-07-2003	30 m
24	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	16-08-2003	30 m
25	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	17-08-2003	30 m
26	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	02-09-2003	30 m
27	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	03-10-2003	30 m
28	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	04-10-2003	30 m
29	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	21-11-2003	30 m
30	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	29-04-2004	30 m
31	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	31-05-2004	30 m
32	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	16-06-2004	30 m
33	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	02-07-2004	30 m
34	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	18-07-2004	30 m
35	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	03-08-2004	30 m
36	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	19-08-2004	30 m
37	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	04-09-2004	30 m
38	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	20-09-2004	30 m
39	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	22-10-2004	30 m
40	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	07-11-2004	30 m
41	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	23-11-2004	30 m
42	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	25-12-2004	30 m
43	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	10-01-2005	30 m
44	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	27-02-2005	30 m
45	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	15-03-2005	30 m
46	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	02-05-2005	30 m
47	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	19-06-2005	30 m
48	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	05-07-2005	30 m

49	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	25-10-2005	30 m
50	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	26-11-2005	30 m
51	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	23-07-2006	30 m
52	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	08-08-2006	30 m
53	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	25-08-2006	30 m
54	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	15-12-2006	30 m
55	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	31-12-2006	30 m
56	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	16-01-2007	30 m
57	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	01-02-2007	30 m
58	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	05-03-2007	30 m
59	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	08-05-2007	30 m
60	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	09-06-2007	30 m
61	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	24-06-2007	30 m
62	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	25-06-2007	30 m
63	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	10-07-2007	30 m
64	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	26-07-2007	30 m
65	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	28-08-2007	30 m
66	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	13-09-2007	30 m
67	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	29-09-2007	30 m
68	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	16-11-2007	30 m
69	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	02-12-2007	30 m
70	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	03-01-2008	30 m
71	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	20-02-2008	30 m
72	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	24-04-2008	30 m
73	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	10-05-2008	30 m
74	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	27-06-2008	30 m
75	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	13-07-2008	30 m
76	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	29-07-2008	30 m
77	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	14-08-2008	30 m
78	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	30-08-2008	30 m
79	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	02-11-2008	30 m
80	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	10-03-2009	30 m
81	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	13-05-2009	30 m
82	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	14-06-2009	30 m
83	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	30-06-2009	30 m
84	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	15-07-2009	30 m
85	Landsat	Thematic Mapper (TM)	183	33	24-07-2009	30 m
86	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	31-07-2009	30 m
87	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	20-10-2009	30 m

88	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	05-11-2009	30 m
89	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	21-11-2009	30 m
90	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	30-04-2010	30 m
91	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	16-05-2010	30 m
92	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	17-06-2010	30 m
93	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	02-07-2010	30 m
94	Landsat	Thematic Mapper (TM)	184	33	20-09-2010	30 m
95	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	24-11-2010	30 m
96	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	27-01-2011	30 m
97	Landsat	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	183	33	12-02-2011	30 m

Όλα οι εικόνες αυτές έχουν υποστεί την απαραίτητη προεπεξεργασία της ραδιομετρικής διόρθωσης στο λογισμικό ENVI 4.3 με χρήση των μεταδεδομένων κάθε μίας. Η πλειονότητα των δεδομένων είναι εικόνες αρχείου από το 2003 μέχρι το 2011 (78% του συνόλου των εικόνων), ενώ παρατηρείται και ένα κενό δεδομένων για την περίοδο 1991-2003 (βλ. Εικόνα 161).



Εικόνα 161: Συνολικός αριθμός δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη Θεσσαλία ανά έτος.

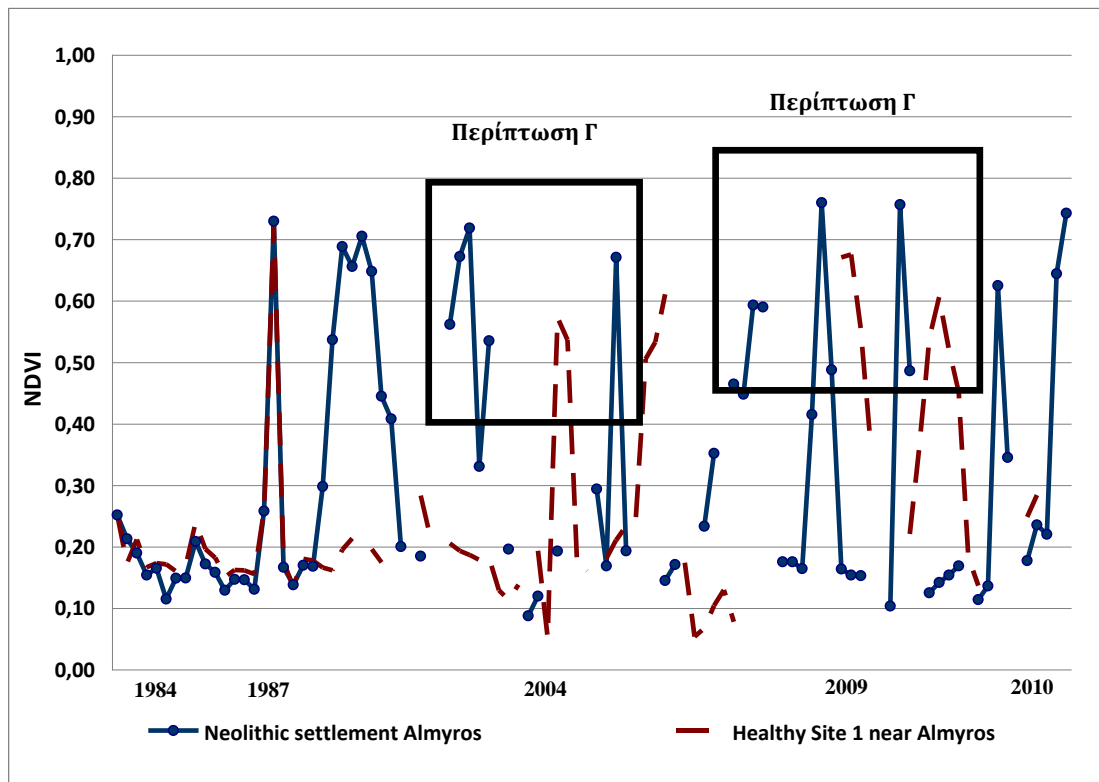
Μετά τη ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση των εικόνων, ο δείκτης βλάστησης NDVI υπολογίστηκε τόσο στην αρχαιολογική θέση Αλμυρός II όσο και σε μη αρχαιολογικές θέσεις. Με σκοπό να μειωθούν οι επιδράσεις της τυπολογίας του

εδάφους αλλά και του κλίματος της περιοχής, επιλέχθηκαν ως μη αρχαιολογικές θέσεις γειτνιάζουσες περιοχές με τη θέση Αλμυρός ΙΙ (θέσεις 1 – 3, βλ. Εικόνα 162). Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις τόσο στην αρχαιολογική θέση Αλμυρός ΙΙ όσο και στις θέσεις 1 και 2.



Εικόνα 162: Θέσεις που επιλέχθηκαν για τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου στη Θεσσαλία. Με κόκκινο η αρχαιολογική θέση (Αλμυρός ΙΙ) και με άσπρο οι μη αρχαιολογικές θέσεις.

Η Εικόνα 163 παρουσιάζει το φαινολογικό κύκλο, για την περίοδο 1984 μέχρι το 2011, στις θέσεις Αλμυρός ΙΙ (συνεχόμενη γραμμή) και θέση 1 (διακεκομμένη γραμμή). Όπως φαίνεται από την εικόνα, ο φαινολογικός κύκλος για τις δύο αυτές περιοχές είναι αρκετά διαφορετικός. Οι ψηλές τιμές στο δείκτη NDVI (Y άξονας) είναι μετατοπισμένες ως προς το χρόνο (X άξονας) και επομένως καταγράφεται μια γενικότερη διαφοροποίηση της βλάστησης στις δύο περιοχές. Αυτή η παρατήρηση αντιστοιχεί στη γενική περίπτωση Γ του φαινολογικού κύκλου (κατά McCloy 2010). Σε τέτοιες περιπτώσεις δεν μπορεί να εξαχθεί καμιά αρχαιολογική πληροφορία, αφού στις δύο υπό εξέταση περιοχές, υπάρχουν διαφορετικές καλλιέργειες.

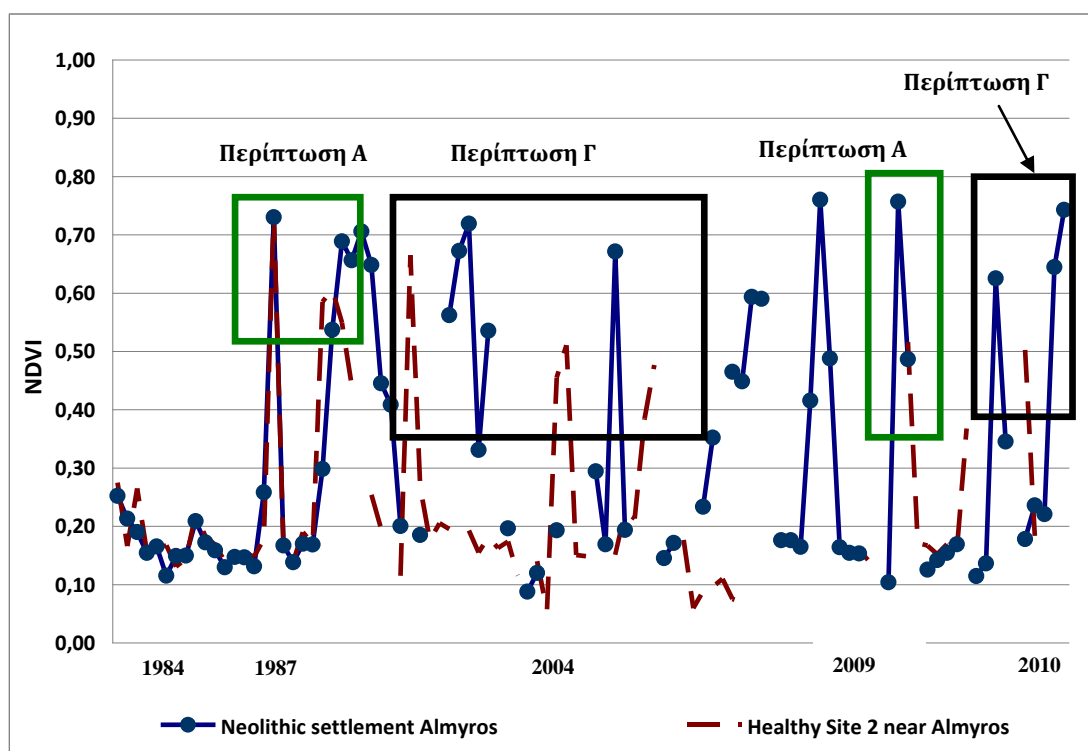


Εικόνα 163: Φαινολογικός κύκλος για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός II και τη μη αρχαιολογική θέση 1 (βλ. Εικόνα 162)

Η Εικόνα 164 παρουσιάζει το φαινολογικό κύκλο για τις θέσεις Αλμυρός II και τη θέση 2. Από τη σύγκριση των δύο περιοχών, τόσο η Περίπτωση Α όσο και η Περίπτωση Γ καταγράφεται μέσα στη χρονική περίοδο 1984 – 2011. Η περίπτωση Α (με πράσινο χρώμα στην εικόνα), καταγράφεται μάλιστα 2 φορές ως μια μικρή διαφοροποίηση της απόλυτης τιμής του δείκτη NDVI, την ίδια χρονική περίοδο, μεταξύ των δύο περιοχών. Αυτή η διαφοροποίηση ίσως να είναι αποτέλεσμα της διαφοροποίησης του εδάφους και της υγρασίας του εδάφους, λόγω της ύπαρξης υπεδάφιων καταλοίπων. Παρόλα αυτά, υπάρχουν γενικότερες δυσκολίες ερμηνείας των αποτελεσμάτων, λόγω των συχνών μετατοπίσεων των ψηλών τιμών NDVI ως προς το χρόνο (Περίπτωση Γ).

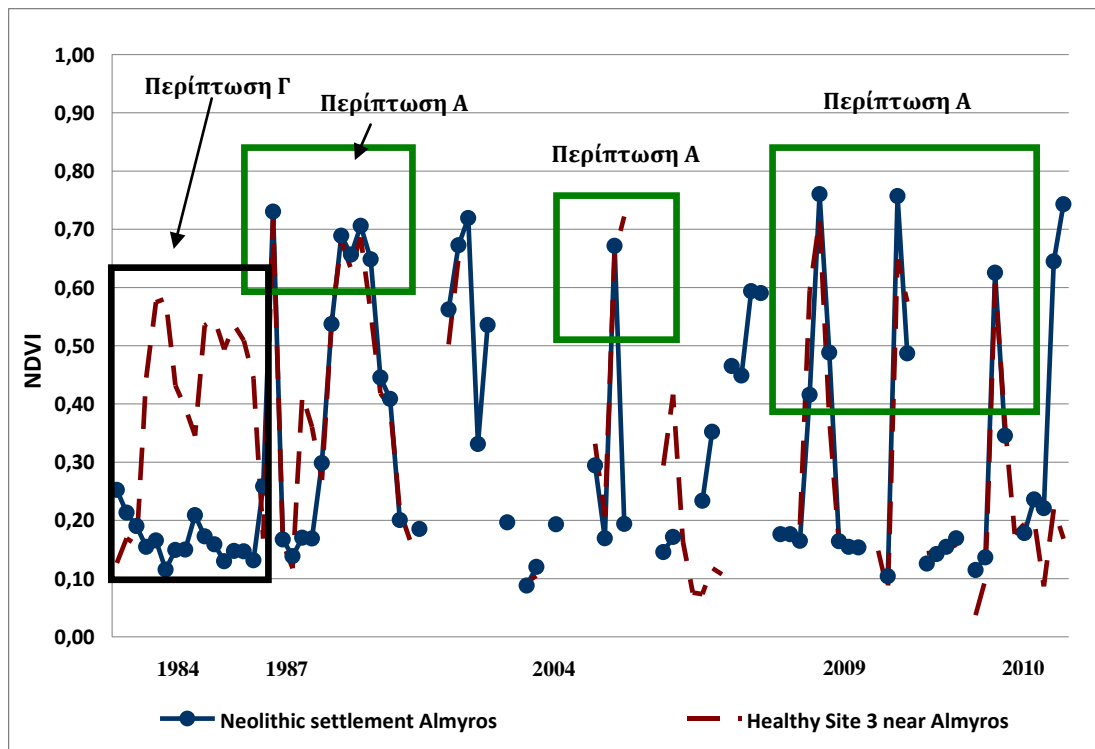
Η εικόνα αυτή διαφοροποιείται στην περίπτωση εξέτασης του φαινολογικού κύκλου για τις θέσεις Αλμυρός II και θέση 3. Πράγματι από την Εικόνα 165, οι περίοδοι όπου καταγράφεται η περίπτωση Α είναι αρκετές, σε σχέση με μια μικρή περίοδο περίπτωσης Γ. Επομένως αυτές οι μικρές αλλαγές του δείκτη NDVI, φαίνεται να είναι αποτέλεσμα ύπαρξης καταλοίπων και δεν είναι τυχαίες, αφού είναι

επαναλαμβανόμενες για αρκετό χρονικό διάστημα. Το έδαφος πάνω από τη μαγούλα Αλμυρός II φαίνεται ότι έχει διαφοροποιηθεί σε σχέση με τον περίγυρό του και αυτό φαίνεται στην αύξηση του δείκτη NDVI. Σημειώνεται ότι τόσο οι κλιματικές συνθήκες είναι οι ίδιες για τις δύο υπό μελέτη περιοχές στην περιοχή (η απόστασή τους είναι μικρότερη των 100 m) όσο και η βλάστηση είναι η ίδια, αφού έχουν παρόμοια φαινολογικά χαρακτηριστικά (ίδια περίοδος σποράς κ.τ.λ.).

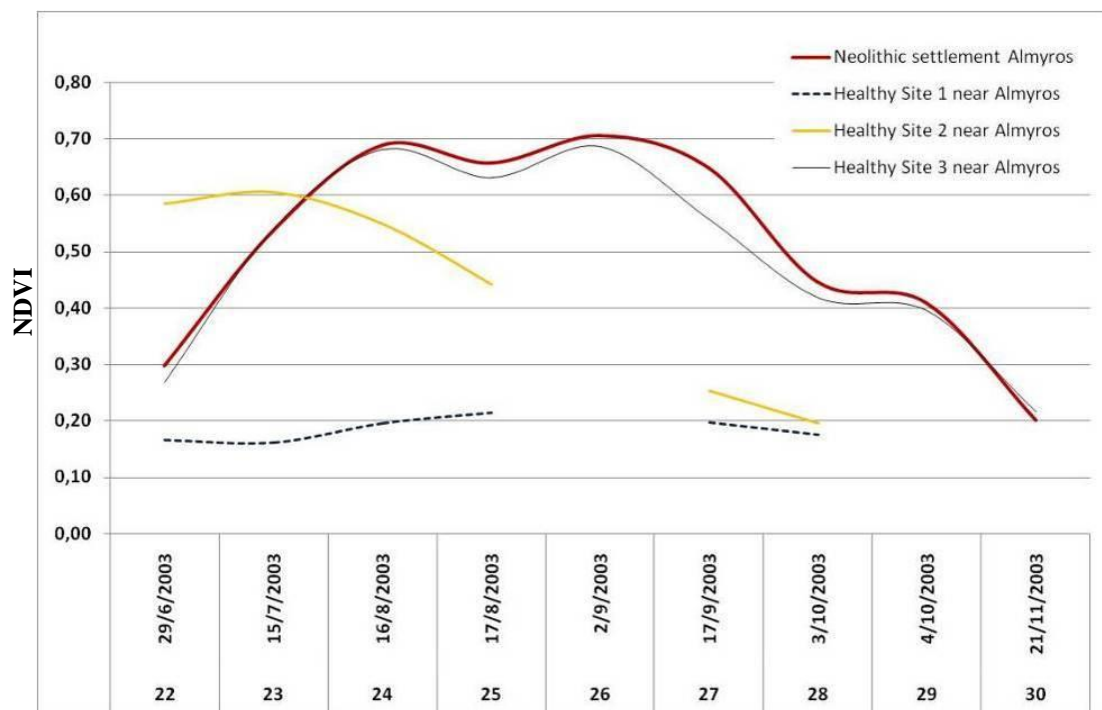


Εικόνα 164: Φαινολογικός κύκλος για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός II και τη μη αρχαιολογική θέση 2 (βλ. Εικόνα 162)

Η Εικόνα 166 δείχνει σε λεπτομέρεια, τον φαινολογικό κύκλο για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός II και τις μη αρχαιολογικές θέσεις (1-3) για μια σύντομη περίοδο από τις 29-6-2003 μέχρι και τις 21-11-2003. Όπως φαίνεται από την εικόνα, οι θέσεις 1 και 2 παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά λόγω διαφορετικών καλλιεργειών σε σχέση με τη θέση Αλμυρός II. Παρόλα αυτά η θέση 3 είναι άμεσα συγκρίσιμη με την αρχαιολογική θέση, αφού ο φαινολογικός κύκλος ξεκινάει την ίδια περίοδο. Η περίπτωση Α καταγράφεται για τις δύο αυτές περιοχές, αφού υπάρχει μια μετατόπιση στο δείκτη NDVI. Όπως προαναφέρθηκε, αυτή η μετατόπιση μπορεί να είναι αποτέλεσμα ύπαρξης υπεδάφινων καταλοίπων. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι η χρήση εικόνων μεγαλύτερης ανάλυσης (< 10m) θα έδινε πιο αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα (π.χ. χρήση διαγραμμάτων με την εμφάνιση τυπικών αποκλίσεων).



Εικόνα 165: Φαινολογικός κύκλος για την αρχαιολογική θέση Αλμυρός ΙΙ και τη μη αρχαιολογική θέση 3 (βλ. Εικόνα 101)



Εικόνα 166: Φαινολογικός κύκλος για τις θέσεις Αλμυρός ΙΙ και θέσεις 1 – 3 για την περίοδο 9-6-2003 μέχρι 21-11-2003.

6.2.3. Ουγγαρία

Σε αρχαιολογικές θέσεις της κεντρικής Ουγγαρίας πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις και σχεδόν ταυτόχρονα γεωφυσικές διασκοπήσεις από το Εργαστήριο Γεωφυσικής - Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (βλ. Sarris *et al.*, 2013; Sarris και Papadopoulos, 2011). Επιπλέον διενεργήθηκαν δειγματοληψίες εδάφους, οι οποίες έγιναν από το Πανεπιστήμιο του Leicester για γεωχημικές αναλύσεις της στρωματογραφίας. Ο συνδυασμός των διαφόρων τεχνικών ήταν εξαιρετικής σημασίας, αφού έδωσε τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις και να εξαχθούν συμπεράσματα για τις δυνατότητες των επίγειων φασματοραδιομέτρων. Δεδομένου ότι η χρήση τους αποτελεί ένα νέο πεδίο στην αρχαιολογική έρευνα. Η περιοχή έρευνας εστιάστηκε στη θέση Vistzu στο πλαίσιο ερευνών του προγράμματος “Koros Regional Archaeological Project- KRAP”. Οι μετρήσεις έγιναν τόσο σε μορφή τομών όσο και σε μορφή κανάβου με παρεμβολή στις σημειακές παρατηρήσεις. Οι μετρήσεις έγιναν στις 03-04-2010, 04-04-2010 και 06-04-2010. Την πρώτη ημέρα πραγματοποιήθηκαν φασματοραδιομετρικές μετρήσεις με τη μορφή τομών στην περιοχή Sceghalom-Kovácsalom tell, τη δεύτερη ημέρα μετρήσεις σε μορφή κανάβου στην θέση Tell Veszto – Magor, ενώ την τελευταία ημέρα έγιναν μετρήσεις σε μορφή κανάβου στη θέση Sceghalom-Kovácsalom tell (Εικόνα 167)



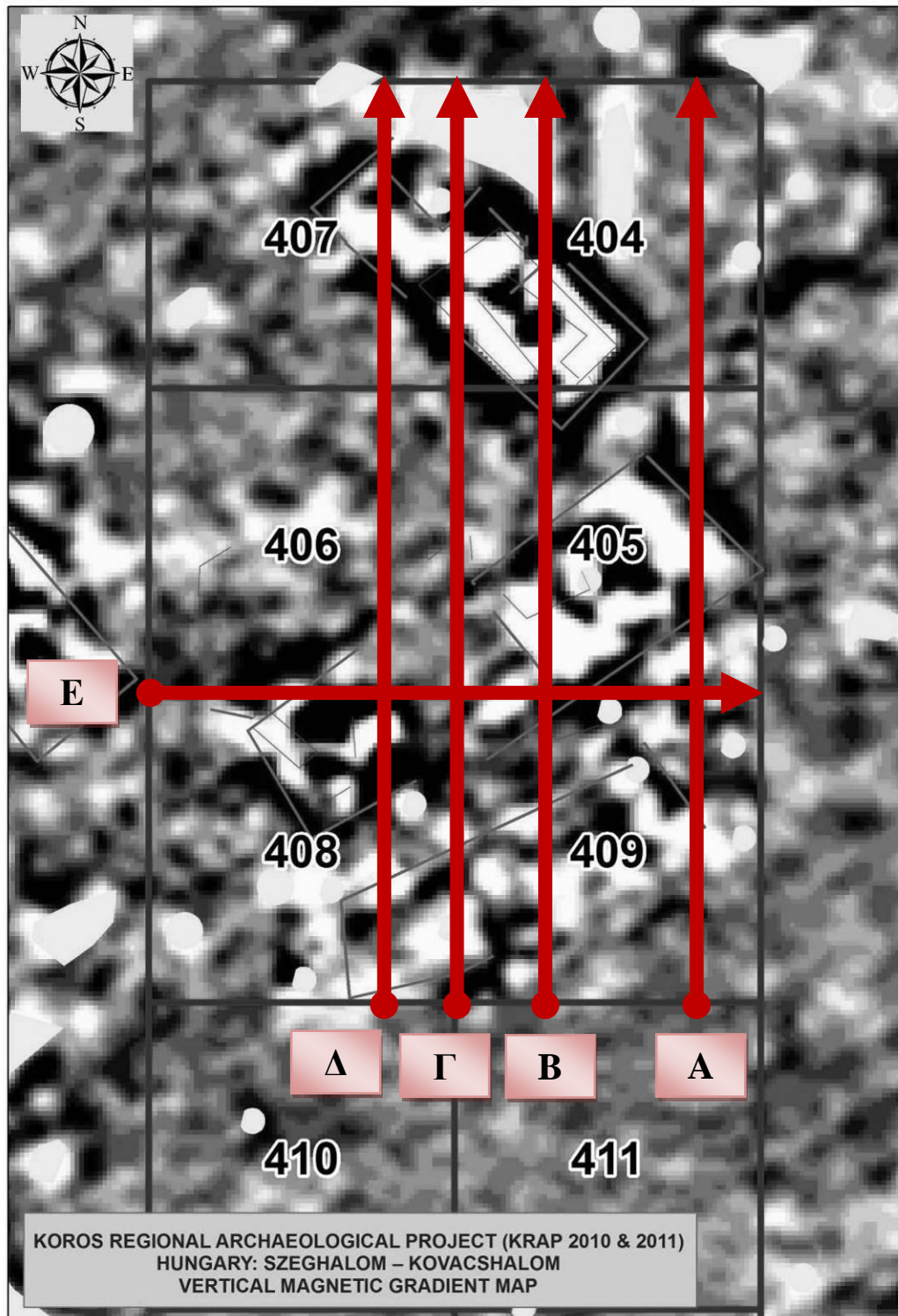
Εικόνα 167: Περιοχές μελέτης στην ευρύτερη περιοχή Vistzu, Ουγγαρία.

6.2.3.1. Φασματικές υπογραφές

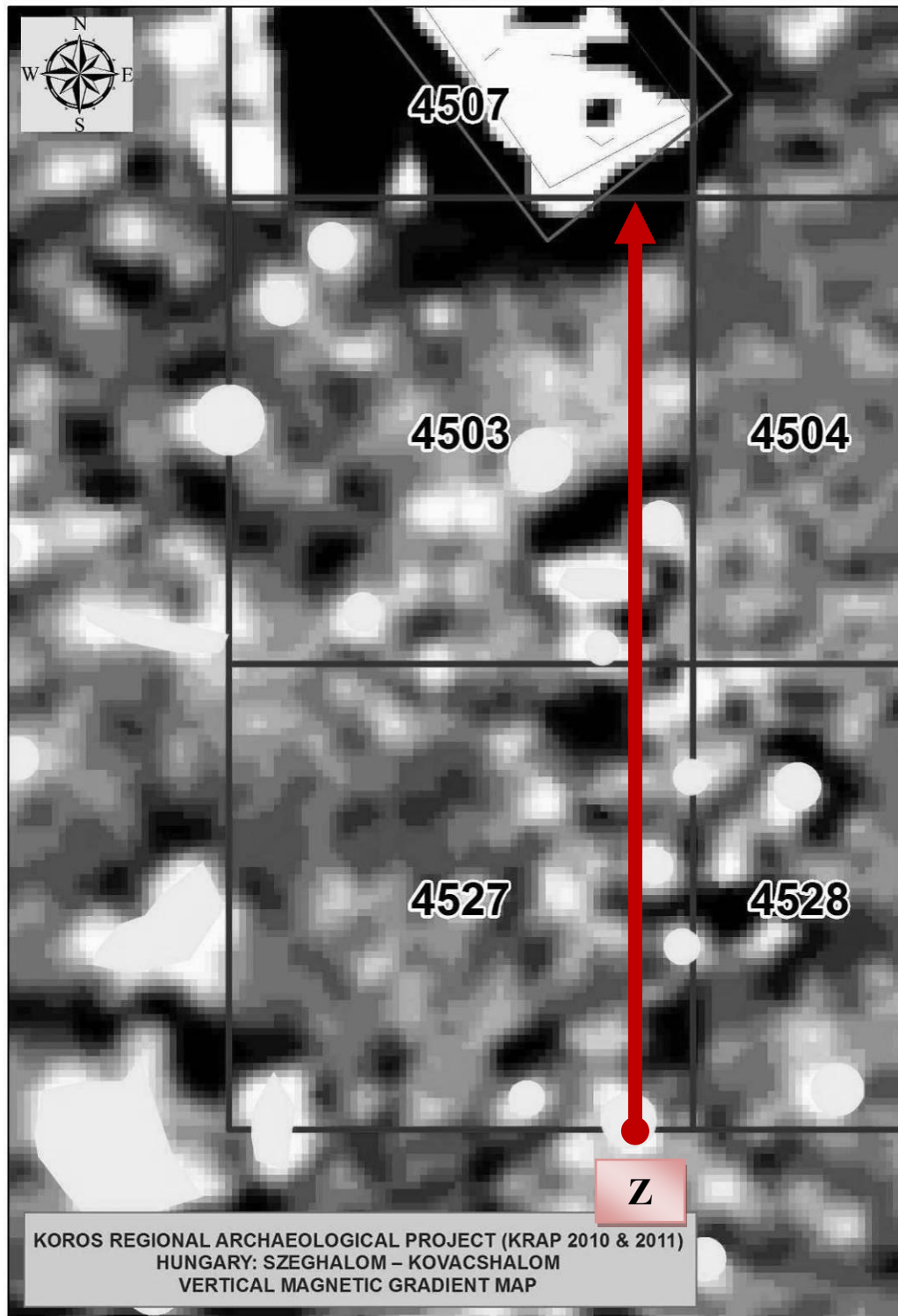
Φασματικές υπογραφές (Εικόνα 168) σε μορφή τομών μετρήθηκαν στα τετράγωνα 404 – 409 στην περιοχή Sceghalom-Konácshalom tell. Ας σημειωθεί ότι η αρίθμηση των τετραγώνων σχετίζεται με το ευρύτερο αρχαιολογικό πλέγμα που υλοποιήθηκε για τους σκοπούς του προγράμματος KRAP. Συνολικά, έγιναν τέσσερις τομές (Τομές Α- Δ) με διεύθυνση Ν – Β και μια με διεύθυνση Δ –Α (Τομή Ε) (βλ. Εικόνα 169). Επιπλέον, άλλη μια τομή (Τομή Ζ) έγινε στα τετράγωνα 4503 και 4527 (βλ. Εικόνα 170) με διεύθυνση Ν-Β. Οι σημειακές μετρήσεις με το φασματοραδιόμετρο έγιναν με βήμα 1 m, ενώ σε κάθε 10 μετρήσεις (< 2 λεπτά) γινόταν βαθμονόμηση των μετρήσεων με το spectralon panel.



Εικόνα 168: Φωτογραφίες από τη διάρκεια λήψης φασματοραδιομετρικών παρατηρήσεων στην περιοχή Vistzu.

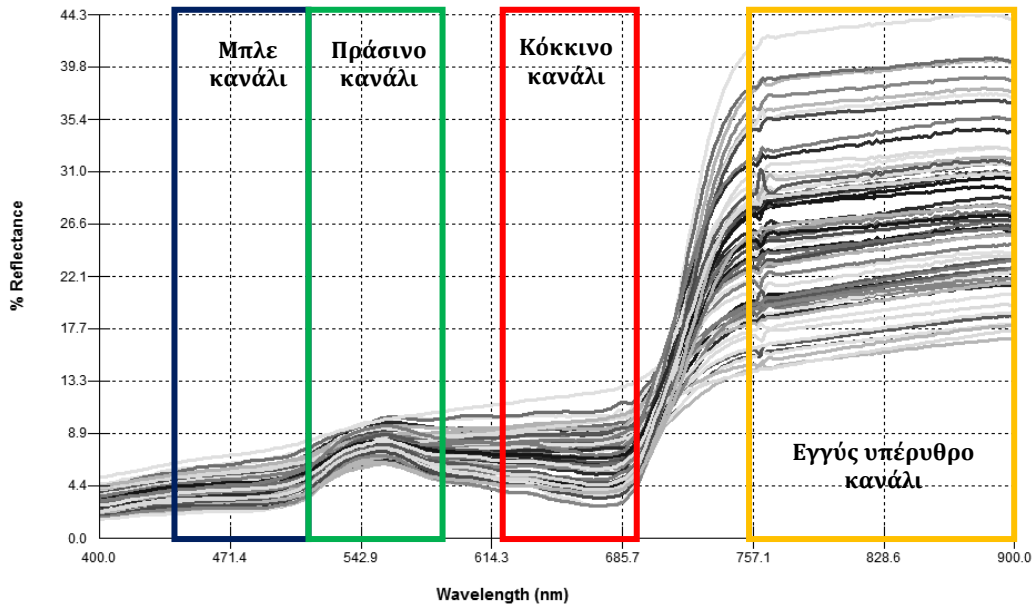


Εικόνα 169: Διαγράμματα τομών που έγιναν στα τετράγωνα 403-409 με επίγεια φασματοραδιόμετρα. Υπόβαθρο: γεωφυσικές ανωμαλίες από αποτελέσματα του ΙΜΣ (από Sarris και Papadopoulos 2011).

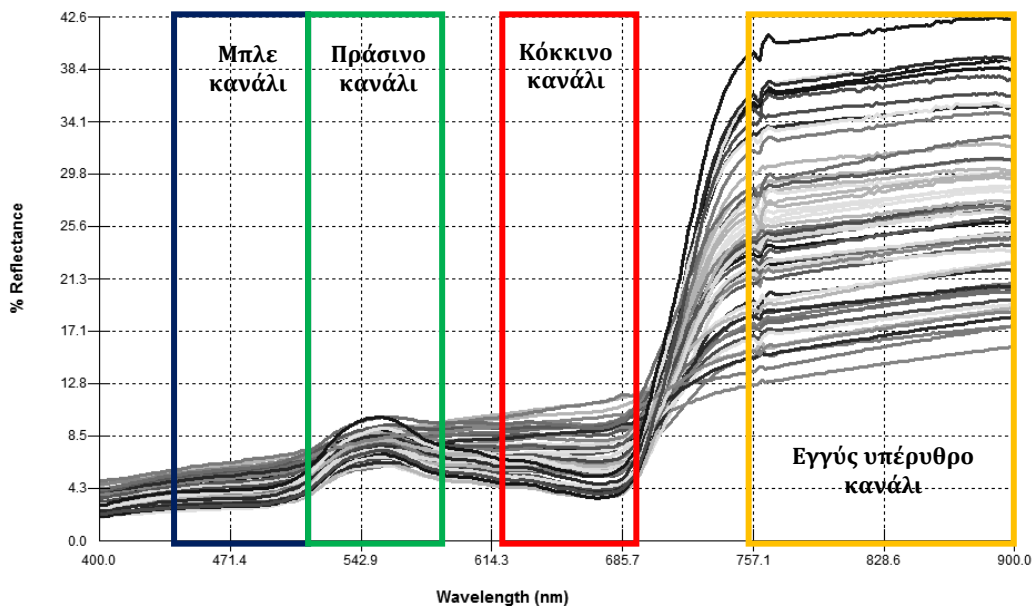


Εικόνα 170: Διάγραμμα τομής που υλοποιήθηκε στα τετράγωνα 4527 και 4503 με επίγεια φασματοραδιόμετρα. Υπόβαθρο: γεωφυσικές ανωμαλίες από αποτελέσματα του ΙΜΣ (από Sarris και Papadopoulos 2011).

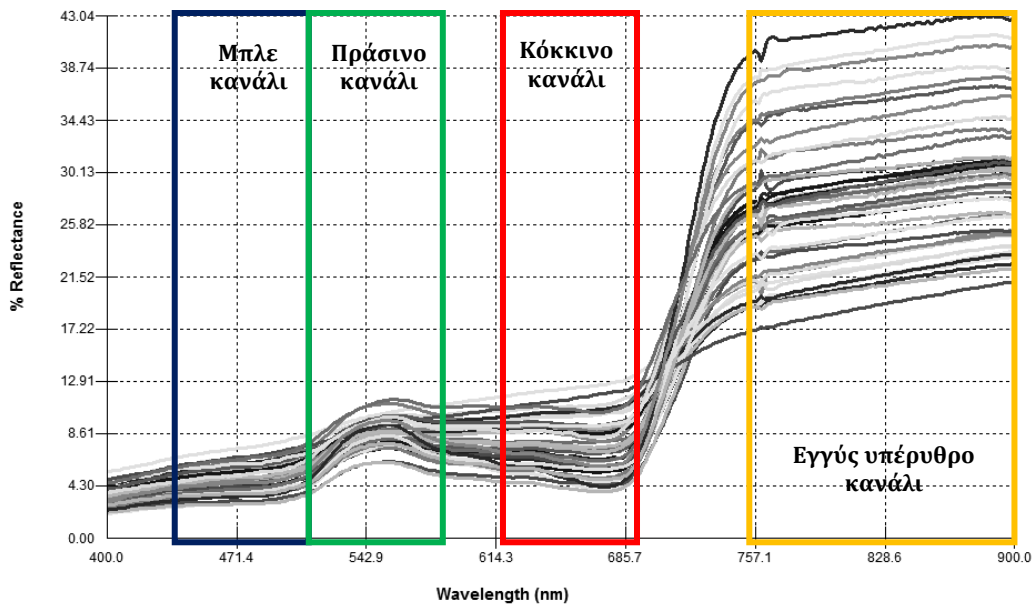
Οι φασματικές υπογραφές για μερικές από τις τομές παρουσιάζονται στις πιο κάτω εικόνες (Εικόνα 171- Εικόνα 174). Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη διαφοροποίηση της βλάστησης είναι εμφανής στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα έναντι όλων των άλλων καναλιών (ορατό φάσμα). Για το λόγο αυτό, πιθανή διαφοροποίηση της βλάστησης λόγω υπεδάφιων καταλοίπων θα είναι εφικτή να καταγραφεί με δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο μήκος κύματος, όπως είναι και ο δείκτης NDVI.



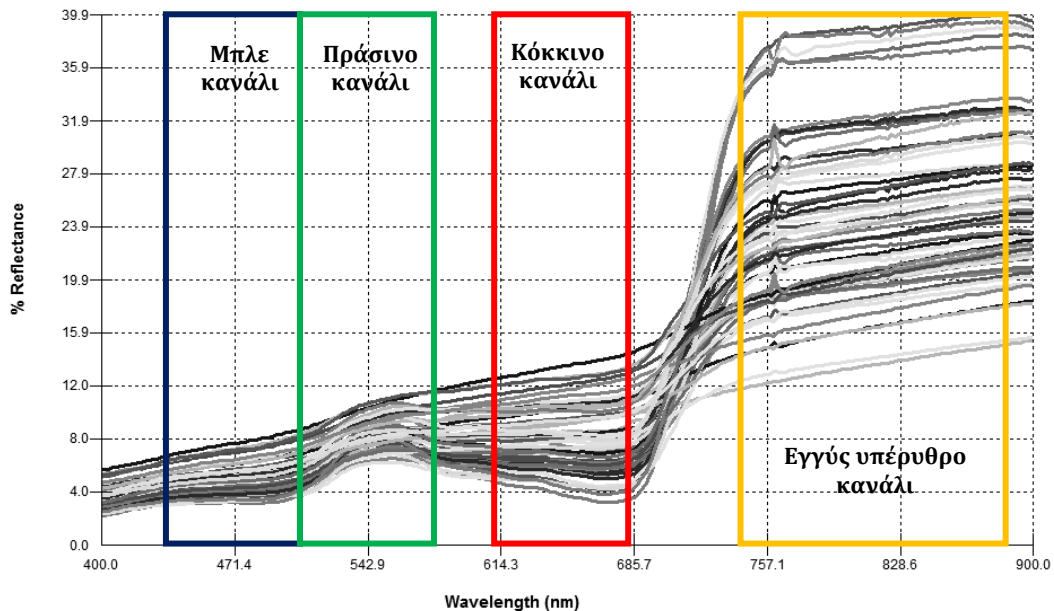
Εικόνα 171: Φασματικές υπογραφές για την τομή Α



Εικόνα 172: Φασματικές υπογραφές για την τομή Β

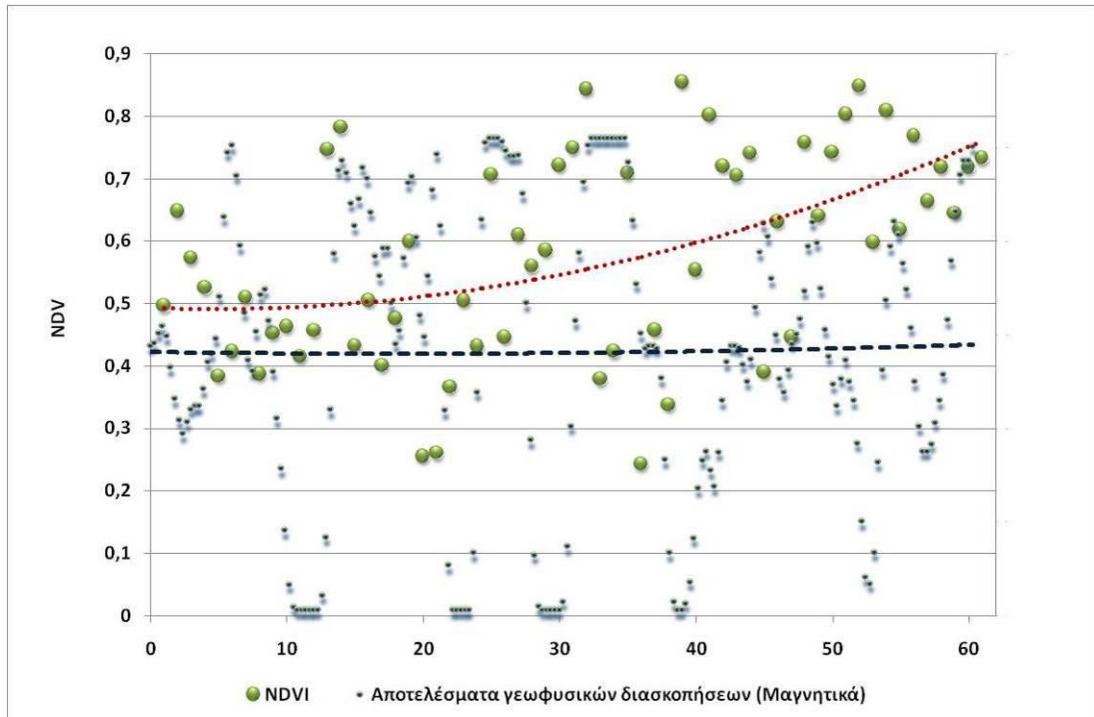


Εικόνα 173: Φασματικές υπογραφές για την τομή E

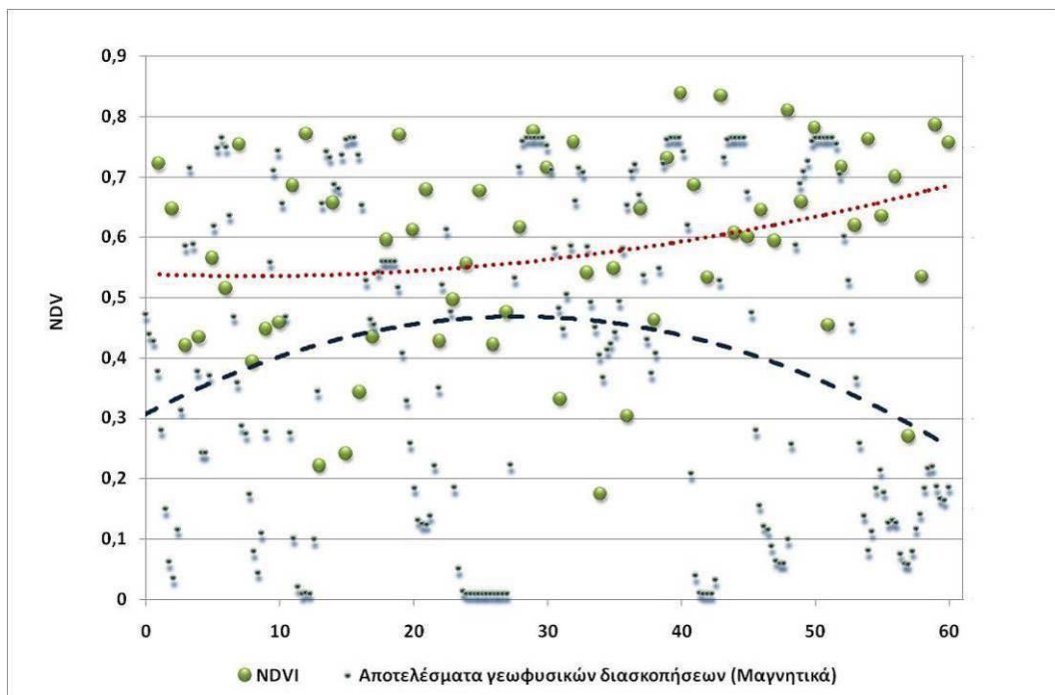


Εικόνα 174: Φασματικές υπογραφές για την τομή Z

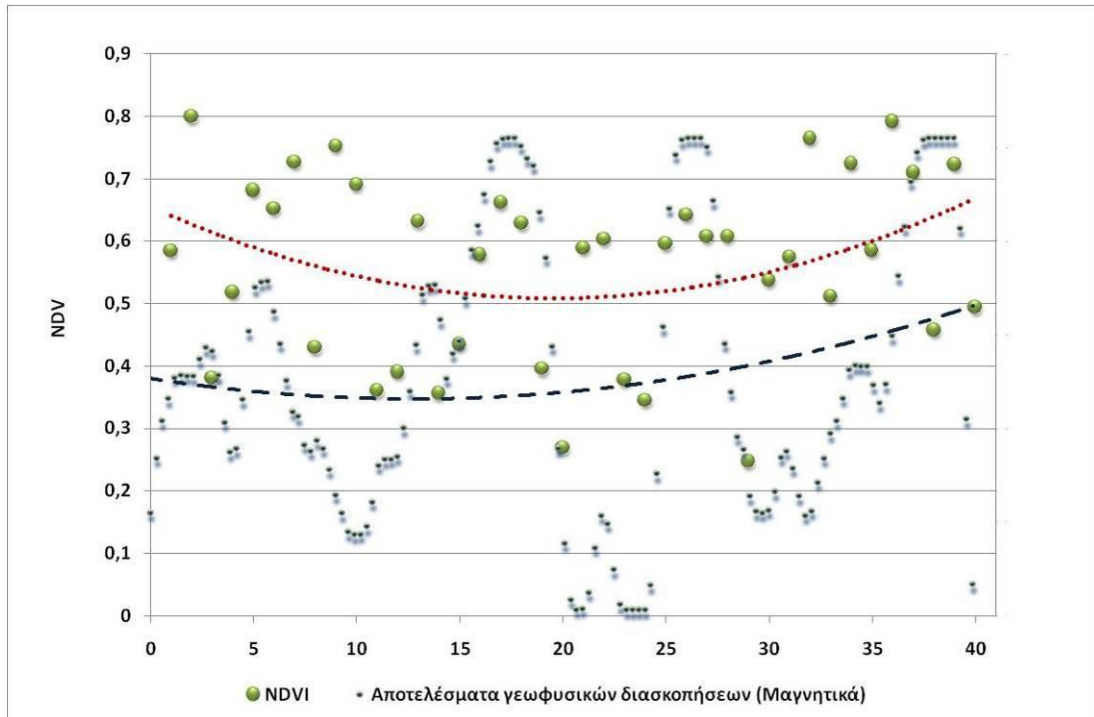
Στο πλαίσιο της διατριβής υπολογίστηκαν διάφοροι δείκτες βλάστησης. Παρακάτω (Εικόνα 175 - Εικόνα 178) παρουσιάζονται μερικά αποτελέσματα από τους δείκτες βλάστησης NDVI και SR. Στις εικόνες αυτές έχουν τοποθετηθεί και τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων από την αντίστοιχη ίδια τομή στα γεωφυσικά αποτελέσματα. Όπως φαίνεται, τόσο στην Εικόνα 175 όσο και στην Εικόνα 176, υπάρχουν διαφοροποιήσεις ως προς τα αποτελέσματα του δείκτη βλάστησης και των γεωφυσικών διασκοπήσεων έναντι των μετρήσεων στην Εικόνα 177 και στην Εικόνα 178.



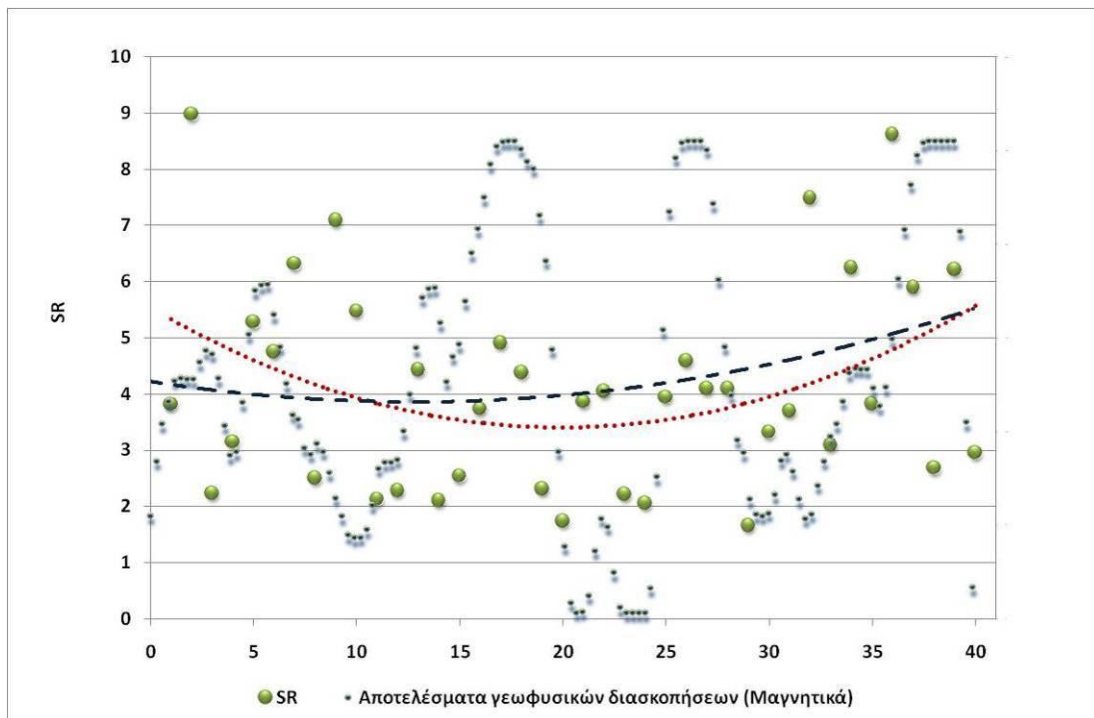
Εικόνα 175: Διάγραμμα NDVI για την τομή Α.



Εικόνα 176: Διάγραμμα NDVI για την τομή Β.



Εικόνα 177: Διάγραμμα NDVI για την τομή Z.



Εικόνα 178: Διάγραμμα SR για την τομή Z.

6.2.3.2. Δείκτες βλάστησης

Πέρα από τις φασματικές υπογραφές, στην περιοχή έχουν δημιουργηθεί θεματικοί χάρτες, τόσο για τη θέση Veszto – Magor όσο και στα τετράγωνα 4509 και στο δυτικό τμήμα του τετραγώνου 4507 στη θέση Sceghalom-Konácshalom tell. Σε αυτές τις περιοχές έχουν εντοπιστεί υπεδάφειες ανωμαλίες από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις του ΙΜΣ.



Εικόνα 179: Φωτογραφίες από τη θέση Veszto – Magor.



Εικόνα 180: Φωτογραφίες από τα τετράγωνα 4509 και 4507

Στη θέση Veszto – Magor έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες από 1200 μετρήσεις. Οι μετρήσεις υλοποιήθηκαν με βήμα 1m στον Y -άξονα και 2 m στον X-άξονα. Η συνολική περιοχή που καλύφθηκε είχε διαστάσεις 100 m x 26 m (2 600 m²). Μετά την απαραίτητη προ-επεξεργασία των μετρήσεων και τη μετατροπή των υπερφασματικών δεδομένων σε πολυφασματικά, υπολογίστηκαν διάφοροι δείκτες βλάστησης (βλ. Πίνακας 22). Μάλιστα, όπως αναφέρει και οι Stagakis *et al.* (2010) στη μελέτη τους, οι δείκτες βλάστησης μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους ή το σκοπό του δείκτη: (α) σε πολυφασματικούς δείκτες, (β) σε υπερφασματικούς δείκτες, (γ) σε δείκτες σχετικά με τις χρωστικές ουσίες στα φυλλώματα (π.χ. Cl-a κ.τ.λ.), (δ) σε δείκτες

καταπόνησης οι οποίοι αναπτύχθηκαν για να εξετάσουν διάφορες συνθήκες καταπόνησης του φυτού και (5) σε δείκτες που σχετίζονται με την έλλειψη νερού στο φυτό.

Πίνακας 22: Δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν στη θέση Vestzo - Magor

Equation no	Vegetation Index	Equation	Reference
Broadband			
[1]	EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2.5 (p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + 6 p_{red} - 7.5 p_{blue} + 1)$	Huete <i>et al.</i> , 1997
[2]	Green NDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{green}) / (p_{NIR} + p_{green})$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
[3]	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + p_{red})$	Rousse <i>et al.</i> (1974)
[4]	SR (Simple Ration)	p_{NIR} / p_{red}	Jordan (1969)
[5]	RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{red}) / (p_{NIR} + p_{red})^{1/2}$	Roujean και Breon, 1995
[6]	PVI (Perpendicular Vegetation Index)	$(p_{NIR} - \alpha p_{red} - b) / (1 + \alpha^2)$ $p_{NIR,soil} = \alpha p_{red,soil} + b$	Richardson και Wiegand, 1977
[7]	TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index)	$[\alpha(p_{NIR} - \alpha p_{red} - b)] / [(p_{red} + \alpha p_{NIR} - \alpha b + 0.08(1 + \alpha^2))]$ $p_{NIR,soil} = \alpha p_{red,soil} + b$	Baret και Guyot, 1991
[8]	MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)	$[2 p_{NIR} + 1 - [(2 p_{NIR} + 1)^2 - 8(p_{NIR} - p_{red})]^{1/2}] / 2$	Qi <i>et al.</i> , 1994
[9]	GEMI (Global Environment Monitoring Index)	$n(1 - 0.25n)(p_{red} - 0.125) / (1 - p_{red})$ $n = [2(p_{NIR}^2 - p_{red}^2) + 1.5 p_{NIR} + 0.5 p_{red}] / (p_{NIR} + p_{red} + 0.5)$	Pinty και Verstraete, 1992
[10]	ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$(p_{NIR} - p_{rb}) / (p_{NIR} + p_{rb})$, $p_{rb} = p_{red} - \gamma (p_{blue} - p_{red})$	Kaufman και Tanre, 1992
[11]	SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$(1 + 0.5)(p_{NIR} - p_{rb}) / (p_{NIR} - p_{rb} + 0.5)$ $p_{rb} = p_{red} - \gamma (p_{blue} - p_{red})$	Kaufman και Tanre, 1992
[12]	DVI (Difference Vegetation Index)	$p_{NIR} - p_{red}$	Tucker, 1979
Narrowband			
[13]	CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index)	$p_{700} \alpha_{670} + p_{670} + b / [p_{670}(\alpha^2 + 1)]^{0.5}$ $\alpha = (p_{700} - p_{550}) / 150$ $b = p_{550} - 550 \alpha$	Kim <i>et al.</i> (1994)
[14]	mNDVI (Modified Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{800} - p_{680}) / (p_{800} + p_{680} - 2 p_{445})$	Sims και Gamon (2002)

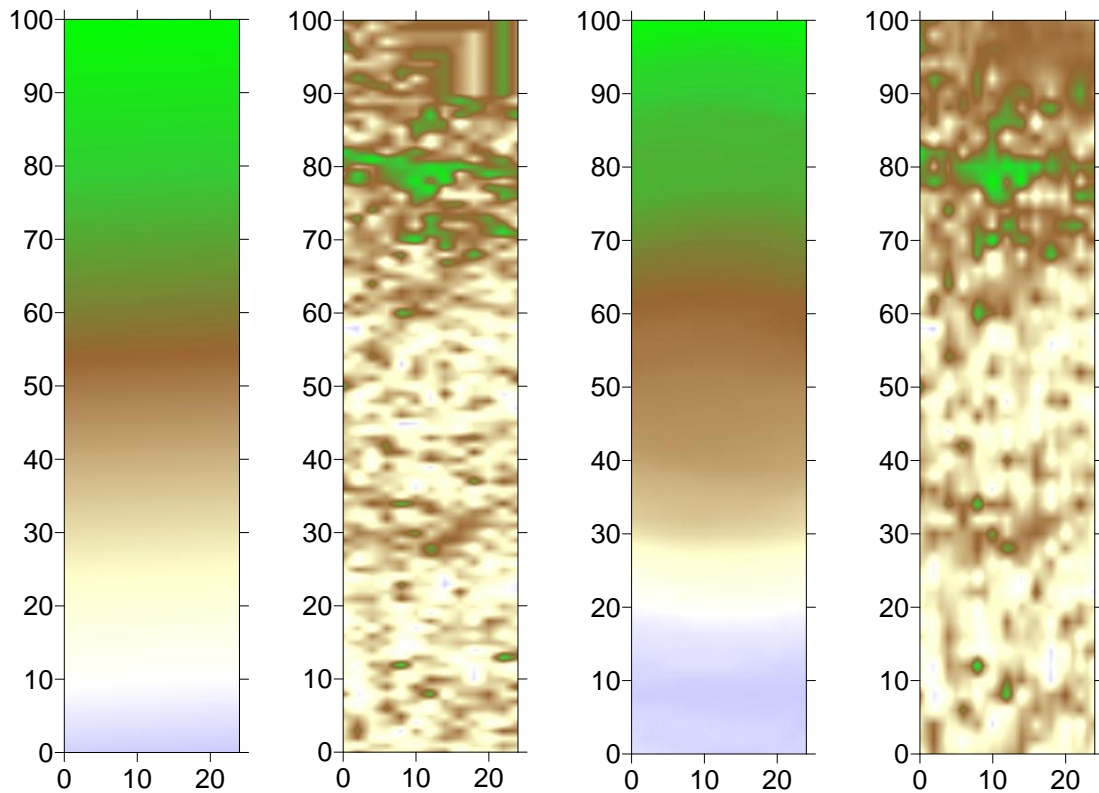
[15]	SR ₇₀₅ (Simple Ratio, Estimation of chlorophyll content)	p_{750} / p_{705}	Castro-Esau <i>et al.</i> , 2006
[16]	MSAVI (Improved Soil Adjusted Vegetation Index)	$[2 p_{800} + 1 - [(2 p_{800} + 1)^2 - 8(p_{800} - p_{670})]^{1/2}] / 2$	Qi <i>et al.</i> (1994)
[17]	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{800} - p_{670}) / (p_{800} + p_{670})$	Rousse <i>et al.</i> (1974)
[18]	NDVI ₂ (Normalized Difference Vegetation Index)	$(p_{750} - p_{705}) / (p_{750} + p_{705})$	Gitelson και Merzlyak (1994)
[19]	SR (Simple Ratio)	p_{800} / p_{680}	Jordan (1969)
[20]	VOG (Vogelmann Indices)	p_{740} / p_{720}	Vogelmann <i>et al.</i> (1993)
[21]	VOG ₂ (Vogelmann Indices)	$(p_{734} - p_{747}) / (p_{715} + p_{726})$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2003)
Leaf pigment			
[22]	ARI (Anthocyanin Reflectance Index)	$(1/p_{550}) - (1/R_{700})$	Gitelson <i>et al.</i> (2001)
[23]	BRI (Blue Red Pigment Index)	p_{450} / p_{690}	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2005)
Stress			
[24]	CI (Curvature Index)	$p_{675} \cdot p_{690} / p_{683}^2$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2003)
[25]	NPCI (Normalized Pigment Chlorophyll index)	$(p_{680} - p_{430}) / (p_{680} + p_{430})$	Peñuelas <i>et al.</i> (1994)
Water			
[26]	fWBI (floating Water Band Index)	$p_{900} / \min p_{920-980}$	Peñuelas <i>et al.</i> (1993)
<p>p_{NIR} is the near infrared reflectance p_{red} is the red reflectance p_{green} is the green reflectance p_{blue} is the blue reflectance p_x is the reflectance at a specific wavelength</p>			

Για να είναι συμβατές οι επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις με τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων της περιοχής, έγινε παρεμβολή των μετρήσεων έτσι ώστε να προκύψουν θεματικοί χάρτες για τον κάθε δείκτη που μελετήθηκε. Οι μέθοδοι παρεμβολής των μετρήσεων μπορεί να διαφέρουν ως προς το κατά πόσο διατηρούν τις καταγεγραμμένες παρατηρήσεις (μέθοδοι παρεμβολής) ή κατά πόσο αλλοιώνουν τις αρχικές παρατηρήσεις (μέθοδοι εξομάλυνσης). Επιπλέον, οι μέθοδοι μπορεί να διακριθούν σε στατιστικές μεθόδους και ντετερμινιστικές. Στη μεν πρώτη κατηγορία, γίνεται χρήση στατιστικών μεθόδων για τον υπολογισμό του χάρτη επιφανείας, ενώ η δεύτερη βασίζεται σε μαθηματικά κριτήρια. Στη

βιβλιογραφία (Wheatley και Gillings 2002, Κουτσόπουλος 2002) υπάρχουν αρκετές μέθοδοι παρεμβολής, όπως είναι για παράδειγμα η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με πολυώνυμα, η μέθοδος πολυωνύμων Lagrange, η μέθοδος προσαρμογής splines και η μέθοδος παρεμβολής Kriging.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για παρεμβολή, είναι η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι η τιμή ενός χαρακτηριστικού σε μια συγκεκριμένη θέση θα προκύψει με βάση τα σημεία τα οποία βρίσκονται στην άμεση γειτονική του περιοχή. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι τυχόν διαφοροποιήσεις που προκύπτουν στην ανακλαστικότητα της βλάστησης, να ερμηνεύονται ως διαφοροποιήσεις σε εκείνη τη “γειτονιά”. Οι τιμές σε κάθε θέση προκύπτει από τον γενικευμένο μέσο όρο των παρατηρήσεων με βάρος το αντίστροφο της απόστασής τους από το σημείο ενδιαφέροντος. Αυτή η μέθοδος ανταποκρίνεται και στη φύση της παρούσας έρευνας, αφού τα ενδεχόμενα υπεδάφια κατάλοιπα αναμένεται να επηρεάσουν άμεσα την επιφανειακή βλάστηση σε εκείνο το σημείο και λιγότερο προς άλλες κατευθύνσεις. Επιπλέον με αυτή τη μέθοδο, διατηρούνται και οι τιμές των αρχικών παρατηρήσεων, ενώ από τις άλλες μεθόδους παρεμβολής χρησιμοποιούνται όλα τα στοιχεία (μετρήσεις) από όλη την επιφάνεια μελέτης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι αρχικές τιμές των μετρήσεων να αλλοιώνονται στην τελική επιφάνεια. Επιπλέον, τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα θα τείνουν να ομαλοποιηθούν ως αποτέλεσμα μικρότερου “στατιστικού σφάλματος” (βλ. Εικόνα 181).

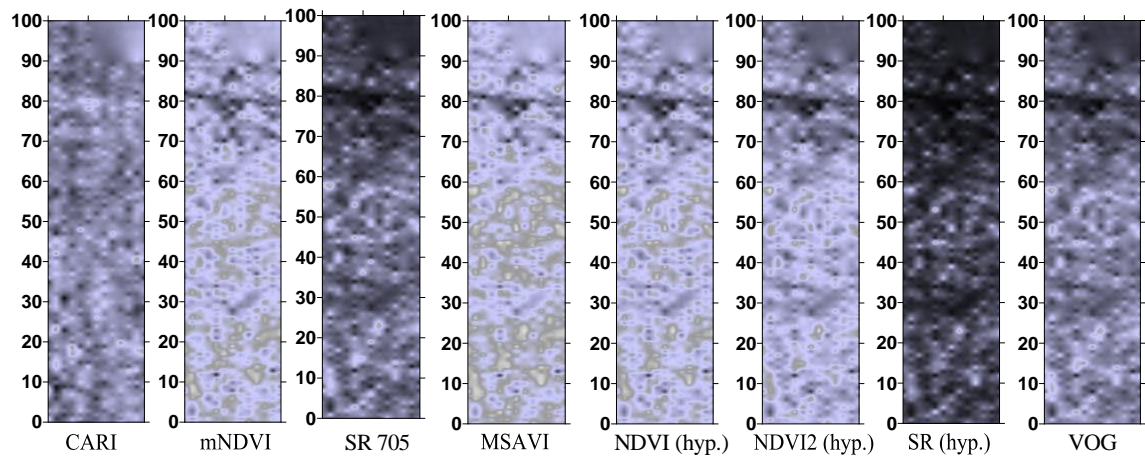
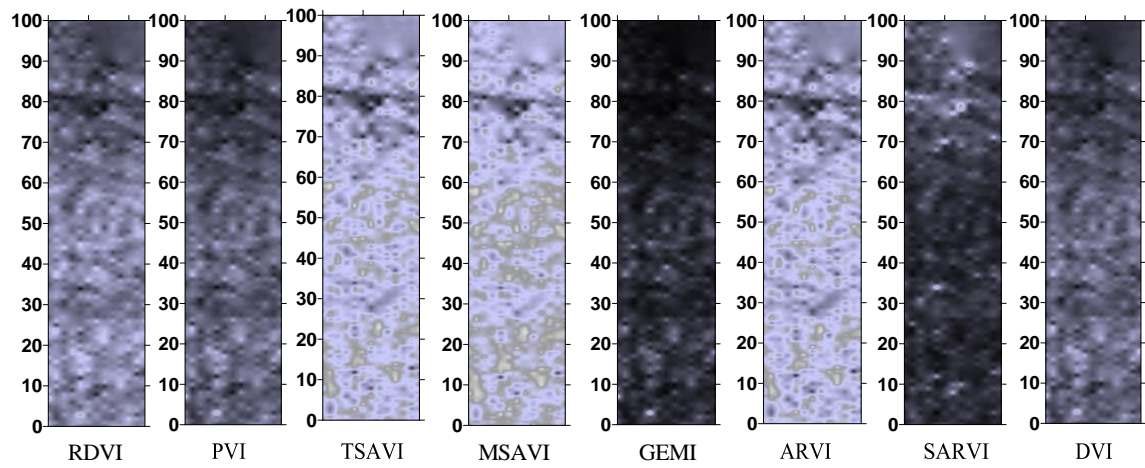
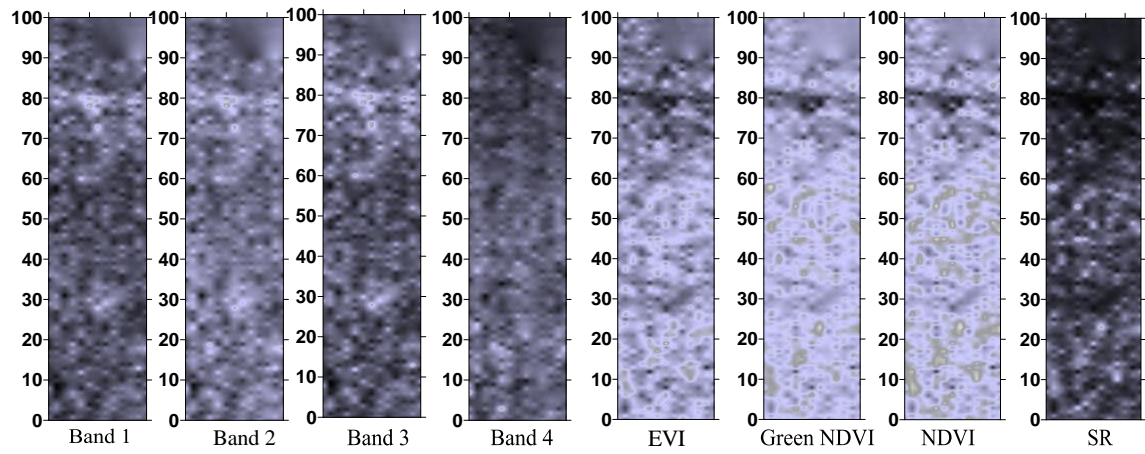
Τα βασικό κριτήριο για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου, είναι να δίνει όσο το δυνατόν πιο πιστή “εικόνα” της πραγματικότητας με την καλύτερη αξιοποίηση των πρωτογενών μετρήσεων. Αυτό ήταν εφικτό, αφού τα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων μπορούσαν άμεσα να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων.

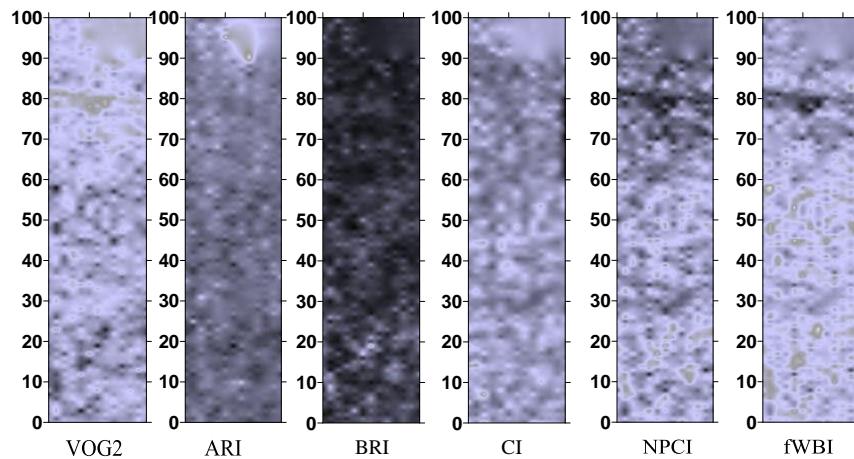


Εικόνα 181: Αποτελέσματα παρεμβολής των σημειακών παρατηρήσεων. Από αριστερά προς δεξιά: μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με πολυώνυμα, μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, μέθοδος προσαρμογής splines και μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (kriging).

Βασική υπόθεση που γίνεται –ασχέτως με τη μέθοδο παρεμβολής– είναι ότι η επιφάνεια που εξετάζεται είναι συνεχής και επομένως, η τιμή σε κάθε θέση μπορεί να προσδιοριστεί αν υπάρχουν ικανοποιητικές μετρήσεις για την επιφάνεια αυτή (Κουτσόπουλος 2002). Δηλαδή, η περιοχή μελέτης θα πρέπει στην παρούσα έρευνα να καλύπτεται ομοιόμορφα με την ίδια βλάστηση, έτσι ώστε οι τιμές ανακλαστικότητας που λαμβάνονται να ανταποκρίνονται στην ίδια επιφάνεια και όχι αλλού.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο κόκκινο (630 – 690 nm) και το εγγύς υπέρυθρο φάσμα (760 – 900 nm). Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 182, παρουσιάζεται μια γραμμική(;) ανωμαλία στα 80 m με διεύθυνση Δ-Α. Αυτή η ανωμαλία έχει εντοπιστεί και στην ανάλυση των δεικτών βλάστησης. Μάλιστα στην Εικόνα 182 έχει εντοπιστεί ακόμη μια γραμμική ανωμαλία γύρω στα 30m.





Εικόνα 182: Αποτελέσματα εφαρμογής διάφορων δεικτών βλάστησης στη θέση Veszto – Magor. Η γεωφυσική ανωμαλία που έχει αναγνωριστεί και από την μετατροπή των επίγειων φασματοραδιομετρικών μετρήσεων σε δείκτες βλάστησης βρίσκεται στα 80m. Μικρότερη ανωμαλία έχει εντοπιστεί και στα 30m.

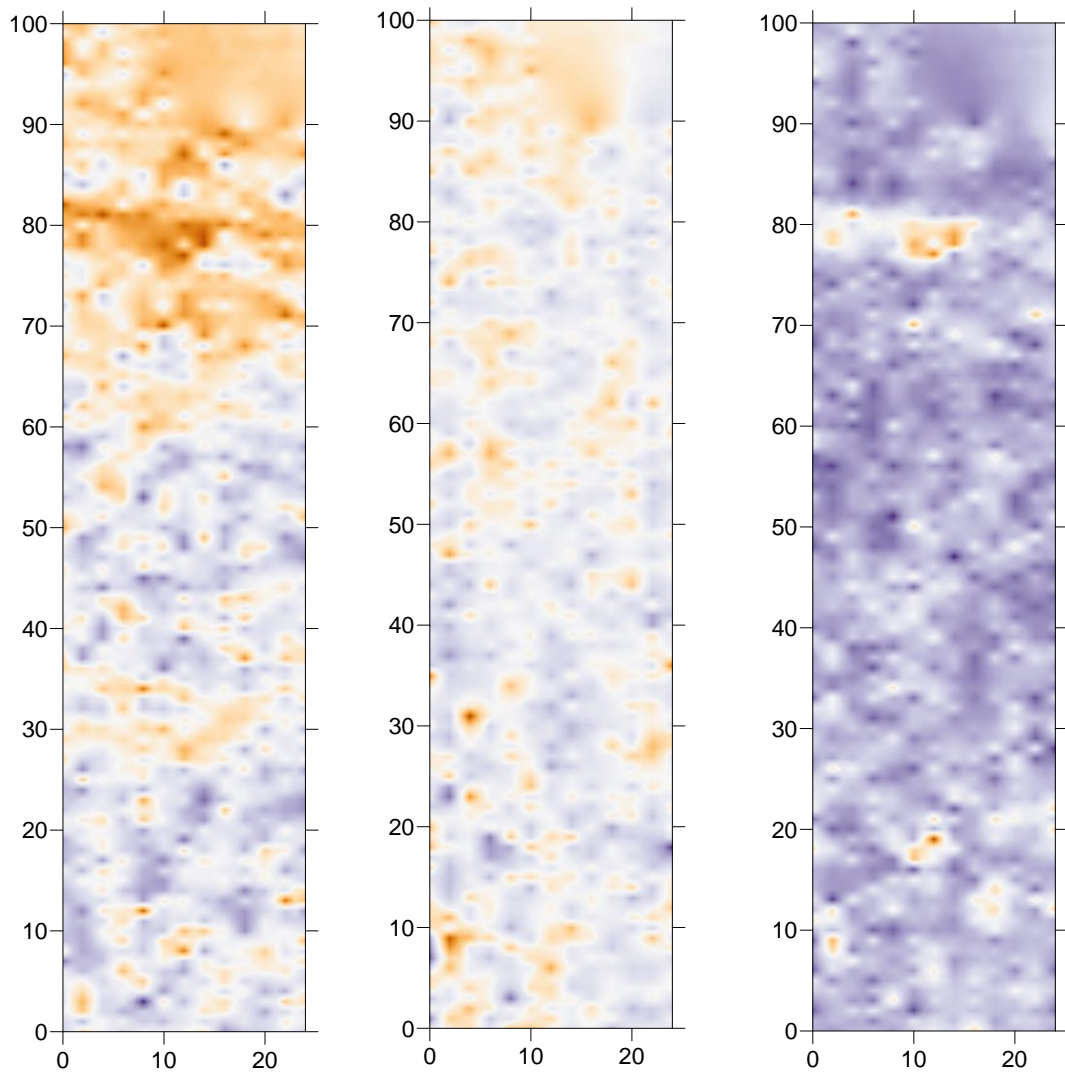
Παράλληλα έγινε και στατιστική ανάλυση με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα. Εφαρμόστηκαν τόσο συντελεστές συσχέτισης (R^2) αλλά και Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA). Η πρώτη ανάλυση έγινε με σκοπό να εξεταστεί εάν υπάρχουν συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών που περιλαμβάνει ο Πίνακας 22 ενώ η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών επιτρέπει να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων με κάποια απώλεια πληροφορίας. Όπως παρουσιάζει και ο Πίνακας 23, εμφανίζεται υψηλή συσχέτιση σε μεγάλο αριθμό δεικτών ανά δύο ($R^2 > 85\%$). Αυτή η συσχέτιση υποδηλώνει ότι αυτοί οι δείκτες είναι ευαίσθητοι σε παρόμοια χαρακτηριστικά του φυτού.

Ένα σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από την πιο πάνω μελέτη, είναι το γεγονός πως ορισμένοι δείκτες καταγράφουν χαμηλές συσχετίσεις μεταξύ τους, δηλαδή, είναι σε θέση να καταγράφουν διαφορετικά χαρακτηριστικά της ίδιας της βλάστησης. Πιθανή καταγραφή ανωμαλίας από μη συσχετισμένους δείκτες θα ενισχύσει την τελική ερμηνεία.

Από την Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών φάνηκε ότι οι τρεις πρώτες συνιστώσες είναι σε θέση να εξηγήσουν πέραν του 88% της συνολικής διασποράς των δεδομένων της θέσης Veszto – Magor. Οι τρεις πρώτες συνιστώσες (PCA1 – PCA3) παρουσιάζονται στην Εικόνα 183. Όπως φαίνεται και από την εικόνα αυτή οι δύο γραμμικές ανωμαλίες είναι ορατές και στην Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών.

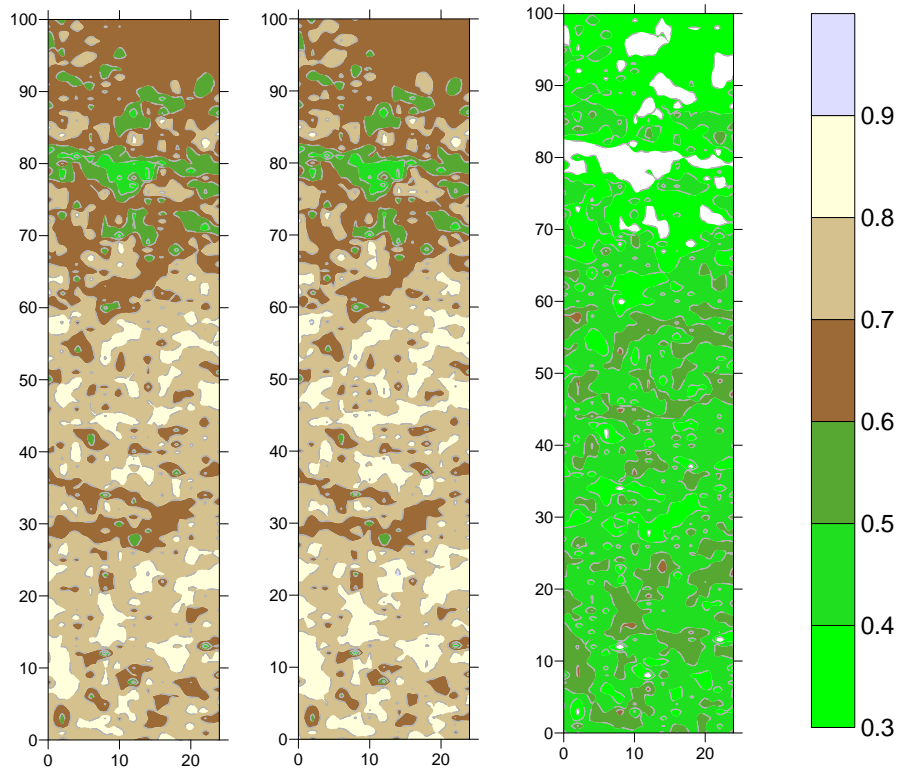
Πίνακας 23: Συσχέτιση μεταξύ των δεικτών του Πίνακα 16. Υψηλή συσχέτιση ($R^2 > 85\%$) καταγράφεται με γκρι χρώμα.

	EVI	Green_NDVI	NDVI	SR	RDVI	PVI	TSAVI	MSAVI	GEMI	ARVI	SARVI	DVI	CARI	mNDVI	SR705	mNDVI2	MSAVI	NDVI	NDVI2	OSAVI	RDVI	SR	VOG	VOG2	ARI	BRI	CRI	CI	NPCI	fWBI	
EVI	1,00	,92	,97	,90	,85	,75	,97	,96	,72	,98	-,72	,72	-,15	,98	,92	,95	,96	,97	,95	,97	,86	,89	,89	-,71	-,57	,67	,68	,06	-,84	,87	
Green_NDVI	,92	1,00	,98	,88	,85	,74	,97	,97	,71	,96	-,74	,71	-,25	,91	,94	,96	,96	,96	,98	,96	,85	,86	,93	-,74	-,38	,44	,70	,06	-,61	,80	
NDVI	,97	,98	1,00	,89	,87	,76	1,00	1,00	,72	1,00	-,77	,73	-,17	,97	,93	,96	,99	1,00	,98	1,00	,88	,88	,91	-,72	-,48	,53	,70	,07	-,71	,84	
SR	,90	,88	,89	1,00	,81	,73	,88	,85	,78	,90	-,59	,70	-,15	,83	,96	,89	,85	,88	,91	,88	,81	,99	,91	-,70	-,54	,60	,73	,06	-,79	,81	
RDVI	,85	,85	,87	,81	1,00	,98	,87	,87	,93	,87	-,86	,97	,26	,83	,84	,85	,87	,87	,87	,88	1,00	,81	,81	-,63	-,67	,42	,46	,06	-,58	,81	
PVI	,75	,74	,76	,73	,98	1,00	,76	,75	,97	,76	-,82	1,00	,41	,71	,75	,74	,75	,76	,76	,76	,76	,98	,73	,72	-,55	-,68	,36	,34	,06	-,50	,74
TSAVI	,97	,97	1,00	,88	,87	,76	1,00	1,00	,72	1,00	-,77	,73	-,17	,97	,93	,96	1,00	1,00	,98	1,00	,88	,88	,90	-,72	-,47	,53	,69	,07	-,71	,84	
MSAVI	,96	,97	1,00	,85	,87	,75	1,00	1,00	,70	,99	-,79	,72	-,17	,97	,90	,96	1,00	,99	,97	,99	,87	,84	,89	-,70	-,46	,50	,67	,07	-,68	,83	
GEMI	,72	,71	,72	,78	,93	,97	,72	,70	1,00	,72	-,70	,96	,35	,66	,77	,71	,69	,72	,73	,72	,93	,78	,72	-,55	-,65	,41	,37	,06	-,55	,71	
ARVI	,98	,96	1,00	,90	,87	,76	1,00	,99	,72	1,00	-,75	,73	-,17	,98	,94	,97	,99	1,00	,98	1,00	,87	,89	,91	-,72	-,51	,58	,70	,07	-,76	,85	
SARVI	-,72	-,74	-,77	-,59	-,86	-,82	-,77	-,79	-,70	-,75	1,00	-,82	-,27	-,73	-,66	-,75	-,79	-,76	-,75	-,77	-,86	-,58	-,65	,48	,60	-,29	-,31	-,04	,39	-,69	
DVI	,72	,71	,73	,70	,97	1,00	,73	,72	,96	,73	-,82	1,00	,45	,68	,72	,71	,72	,73	,73	,73	,97	,70	,69	-,52	-,69	,34	,30	,06	-,47	,72	
CARI	-,15	-,25	-,17	-,15	,26	,41	-,17	-,17	,35	-,17	-,27	,45	1,00	-,16	-,23	-,25	-,15	-,16	-,23	-,15	,27	-,12	-,27	,28	-,41	-,16	-,42	,02	,13	-,01	
mNDVI	,98	,91	,97	,83	,83	,71	,97	,97	,66	,98	-,73	,68	-,16	1,00	,87	,92	,98	,98	,93	,98	,84	,84	,84	-,66	-,49	,62	,65	,08	-,80	,83	
SR705	,92	,94	,93	,96	,84	,75	,93	,90	,77	,94	-,66	,72	-,23	,87	1,00	,96	,89	,92	,97	,92	,84	,95	,97	-,78	-,53	,59	,73	,06	-,74	,84	
mNDVI2	,95	,96	,96	,89	,85	,74	,96	,96	,71	,97	-,75	,71	-,25	,92	,96	1,00	,95	,95	1,00	,95	,85	,87	,96	-,78	-,52	,58	,68	,05	-,70	,85	
MSAVI	,96	,96	,99	,85	,87	,75	1,00	1,00	,69	,99	-,79	,72	-,15	,98	,89	,95	1,00	1,00	,96	1,00	,87	,84	,87	-,69	-,46	,51	,66	,07	-,70	,83	
NDVI	,97	,96	1,00	,88	,87	,76	1,00	,99	,72	1,00	-,76	,73	-,16	,98	,92	,95	1,00	1,00	,97	1,00	,88	,88	,89	-,70	-,48	,54	,69	,07	-,73	,84	
NDVI2	,95	,98	,98	,91	,87	,76	,98	,97	,73	,98	-,75	,73	-,23	,93	,97	1,00	,96	,97	1,00	,97	,87	,89	,96	-,78	-,51	,55	,70	,06	-,70	,85	
OSAVI	,97	,96	1,00	,88	,88	,76	1,00	,99	,72	1,00	-,77	,73	-,15	,98	,92	,95	1,00	1,00	,97	1,00	,88	,88	,89	-,71	-,49	,54	,69	,07	-,73	,84	
RDVI	,86	,85	,88	,81	1,00	,98	,88	,87	,93	,87	-,86	,97	,27	,84	,84	,85	,87	,88	,87	,88	1,00	,81	,80	-,62	-,67	,44	,46	,07	-,60	,82	
SR	,89	,86	,88	,99	,81	,73	,88	,84	,78	,89	-,58	,70	-,12	,84	,95	,87	,84	,88	,89	,88	,81	1,00	,89	-,67	-,55	,61	,73	,07	-,80	,82	
VOG	,89	,93	,91	,91	,81	,72	,90	,89	,72	,91	-,65	,69	-,27	,84	,97	,96	,87	,89	,96	,89	,80	,89	1,00	-,79	-,49	,55	,69	,05	-,67	,81	
VOG2	-,71	-,74	-,72	-,70	-,63	-,55	-,72	-,70	-,55	-,72	,48	-,52	,28	-,66	-,78	-,78	-,69	-,70	-,78	-,71	-,62	-,67	-,79	1,00	,37	-,43	-,60	-,04	,52	-,63	
ARI	-,57	-,38	-,48	-,54	-,67	-,68	-,47	-,46	-,65	-,51	,60	-,69	-,41	-,49	-,53	-,52	-,46	-,48	-,51	-,49	-,67	-,55	-,49	,37	1,00	-,55	-,20	-,03	,57	-,60	
BRI	,67	,44	,53	,60	,42	,36	,53	,50	,41	,58	-,29	,34	-,16	,62	,59	,58	,51	,54	,55	,54	,44	,61	,55	-,43	-,55	1,00	,41	,02	-,86	,58	
CRI	,68	,70	,70	,73	,46	,34	,69	,67	,37	,70	-,31	,30	-,42	,65	,73	,68	,66	,69	,70	,69	,46	,73	,69	-,60	-,20	,41	1,00	,07	-,57	,54	
CI	,06	,06	,07	,06	,06	,07	,07	,06	,07	,07	-,04	,06	,02	,08	,06	,05	,07	,07	,06	,07	,07	,07	,05	-,04	-,03	,02	,07	1,00	-,07	,04	
NPCI	-,84	-,61	-,71	-,79	-,58	-,50	-,71	-,68	-,55	-,76	,39	-,47	,13	-,80	-,74	-,70	-,70	-,73	-,70	-,73	-,60	-,80	-,67	,52	,57	-,86	-,57	-,07	1,00	-,72	
fWBI	,87	,80	,84	,81	,81	,74	,84	,83	,71	,85	-,69	,72	-,01	,83	,84	,85	,83	,84	,85	,84	,84	,82	,81	-,63	-,60	,58	,54	,04	-,72	1,00	

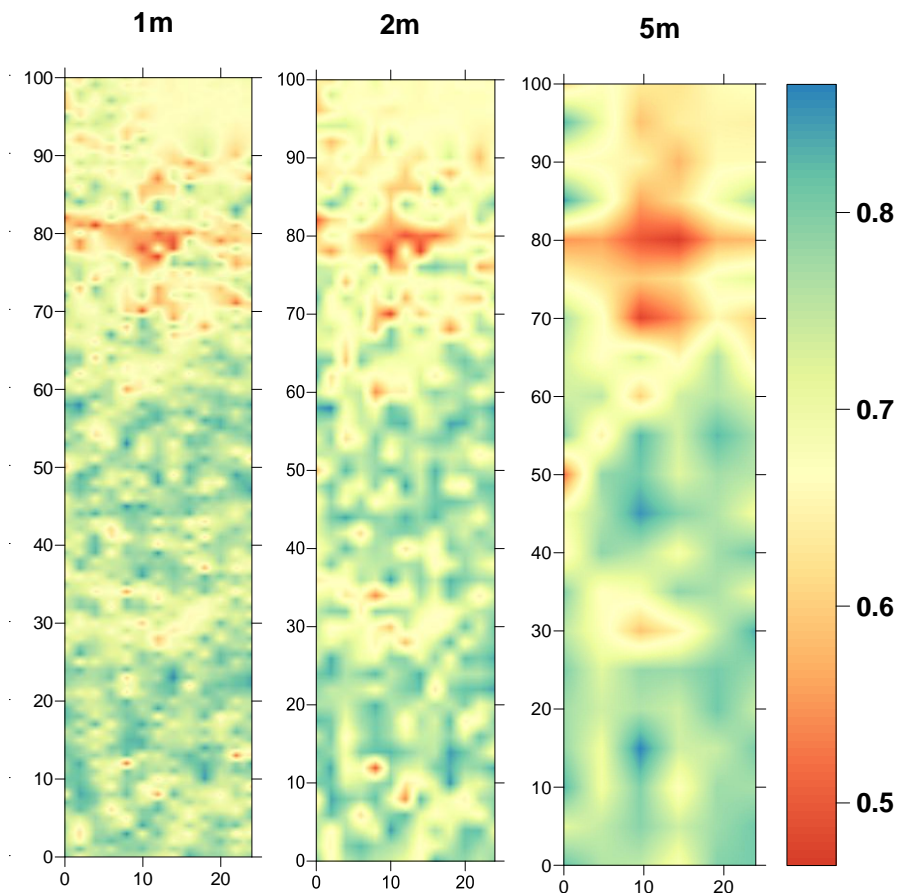


Εικόνα 183: Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών για τη θέση Veszto – Magor. Από αριστερά προς δεξιά PCA1 - PCA3.

Μια σύγκριση μεταξύ δεικτών βλάστησης που χρησιμοποιούν το ίδιο μήκος κύματος και κανονικοποιούν το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 184. Όπως φαίνεται, οι παραλλαγές του δείκτη NDVI (βλ. εξισώσεις 3; 17; 18 στον Πίνακα 16) παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα. Σε όλες τις περιπτώσεις είναι δυνατό να εντοπιστούν οι γραμμικές ανωμαλίες στα 30 και 80 m. Επιπλέον, λόγω των πολλών μετρήσεων που λήφθηκαν στην περιοχή (περισσότερες από 1200), έγινε μια προσπάθεια μείωσης των δεδομένων με μεγαλύτερο βήμα δειγματοληψίας. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 185, η ανωμαλία στα 80 m με επαναδειγματοληψία μετρήσεων ανά 5 m είναι ακόμα πιο εμφανής.



Εικόνα 184: Πολυφασματικός δείκτης NDVI (αριστερά) και υπερφασματικοί δείκτες NDVI και NDVI12 (κέντρο και δεξιά) αντίστοιχα για τη θέση Veszto – Magor.



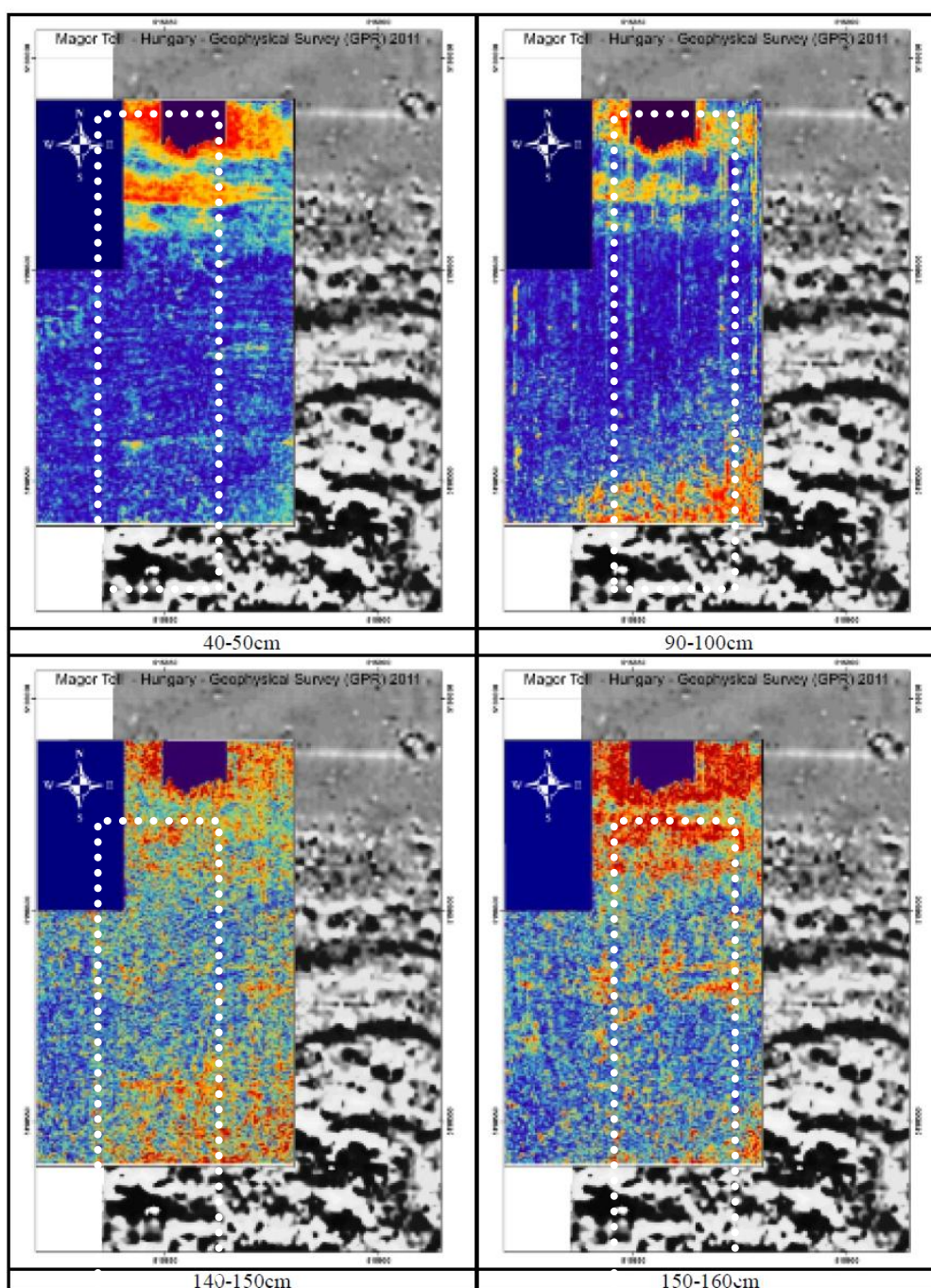
Εικόνα 185: Ο δείκτης NDVI με βάση τις μετρήσεις όπως λήφθηκαν στο ύπαιθρο με διάστημα 1m (μέση) και πιο πυκνά βήματα (2m και 5m).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων που έγιναν στην περιοχή από το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών (βλ. Sarris και Papadopoulos, 2011) αφού αυτά θα μπορεί να αντιπαρατεθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με το γεωραντάρ και των μαγνητικών διασκοπήσεων απεικονίζονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 186. Η κοινή περιοχή των γεωφυσικών διασκοπήσεων και των μετρήσεων του φασματοραδιομέτρου είναι μόνο ένα μικρό τμήμα, εντούτοις, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μπορεί να δώσει χρήσιμα στοιχεία για τις δυνατότητες των φασματοραδιομέτρων για αρχαιολογικές έρευνες. Συγκρίνοντας την Εικόνα 185 και την Εικόνα 186, παρατηρείται ότι, η γραμμική ανωμαλία που εντοπίστηκε περίπου στα 80 m είναι εμφανής σε όλες τις μεθόδους. Μάλιστα με βάση την Εικόνα 186 φαίνεται ότι η ανωμαλία είναι ανιχνεύσιμη σε βάθος τουλάχιστον 0.4 – 0.5 m γεγονός που υποδηλώνει ότι τα αρχαιολογικά κατάλοιπα σε αυτό το βάθος έχουν καταπονήσει τη βλάστηση, όπως καταγράφηκε άλλωστε μέσα από τις μετρήσεις με το φασματοραδιόμετρο.

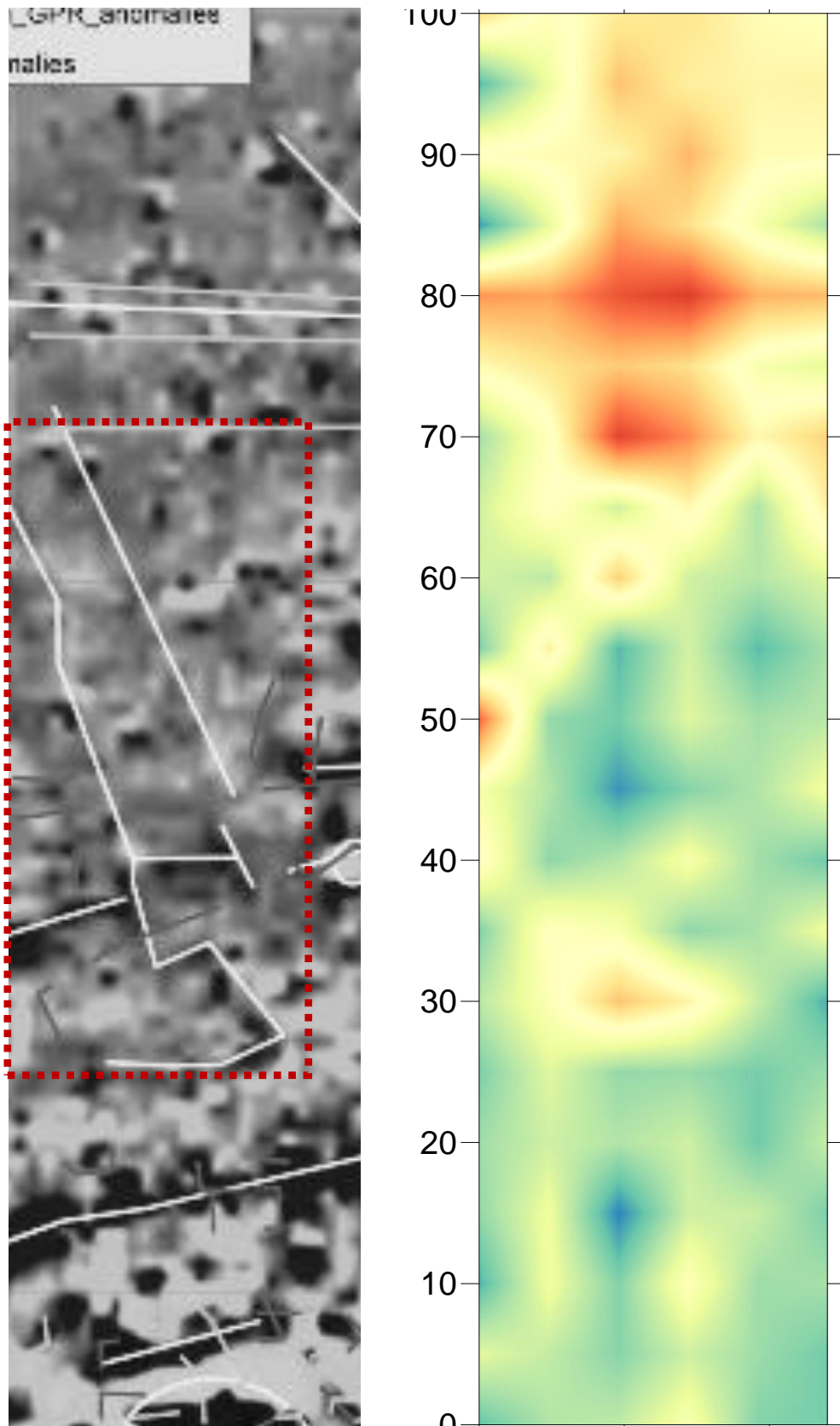
Η ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων από τους ερευνητές του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (βλ. εκτενέστερα Sarris και Papadopoulos 2011) και τα αποτελέσματα των επίγειων μετρήσεων με φασματοραδιόμετρο (Εικόνα 187 και Εικόνα 188) δείχνουν ότι οι υπεδάφεις ανωμαλίες στα 30 και 80 μέτρα ήταν ανιχνεύσιμες και με τις δύο επιστημονικές μεθόδους. Μια λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις, δείχνει ότι τα κατάλοιπα που εντοπίστηκαν σε βάθος μεγαλύτερο του 1.3 m δεν ήταν δυνατό να εντοπιστούν και να καταγραφούν από την ανάλυση των μετρήσεων με τα φασματοραδιόμετρα (βλ. γεωφυσικές ανωμαλίες στο πράσινο περίγραμμα Εικόνα 187 και Εικόνα 188). Μάλιστα σύμφωνα με την ερμηνεία των γεωφυσικών διασκοπήσεων, που παρατίθεται στη συνέχεια, τα αποτελέσματα είναι απολύτως σύμφωνα με τα αποτελέσματα των φασματοραδιομετρικών παρατηρήσεων.

Σύμφωνα με την ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων, οι γραμμικές ανωμαλίες θα πρέπει μάλλον να συνδεθούν με το βόρειο όριο ενός παλιού μοναστηριού (Sarris 2006). Αυτή η υπεδάφια ανωμαλία φαίνεται να έχει δύο γραμμικά στοιχεία τα οποία αναπτύσσονται παράλληλα, σε απόσταση 2 m με διεύθυνση Δ – Α. Ακόμη μια γραμμική ανωμαλία παράλληλη με την πρώτη, βρίσκεται πιο νότια. Σημάδια από τις

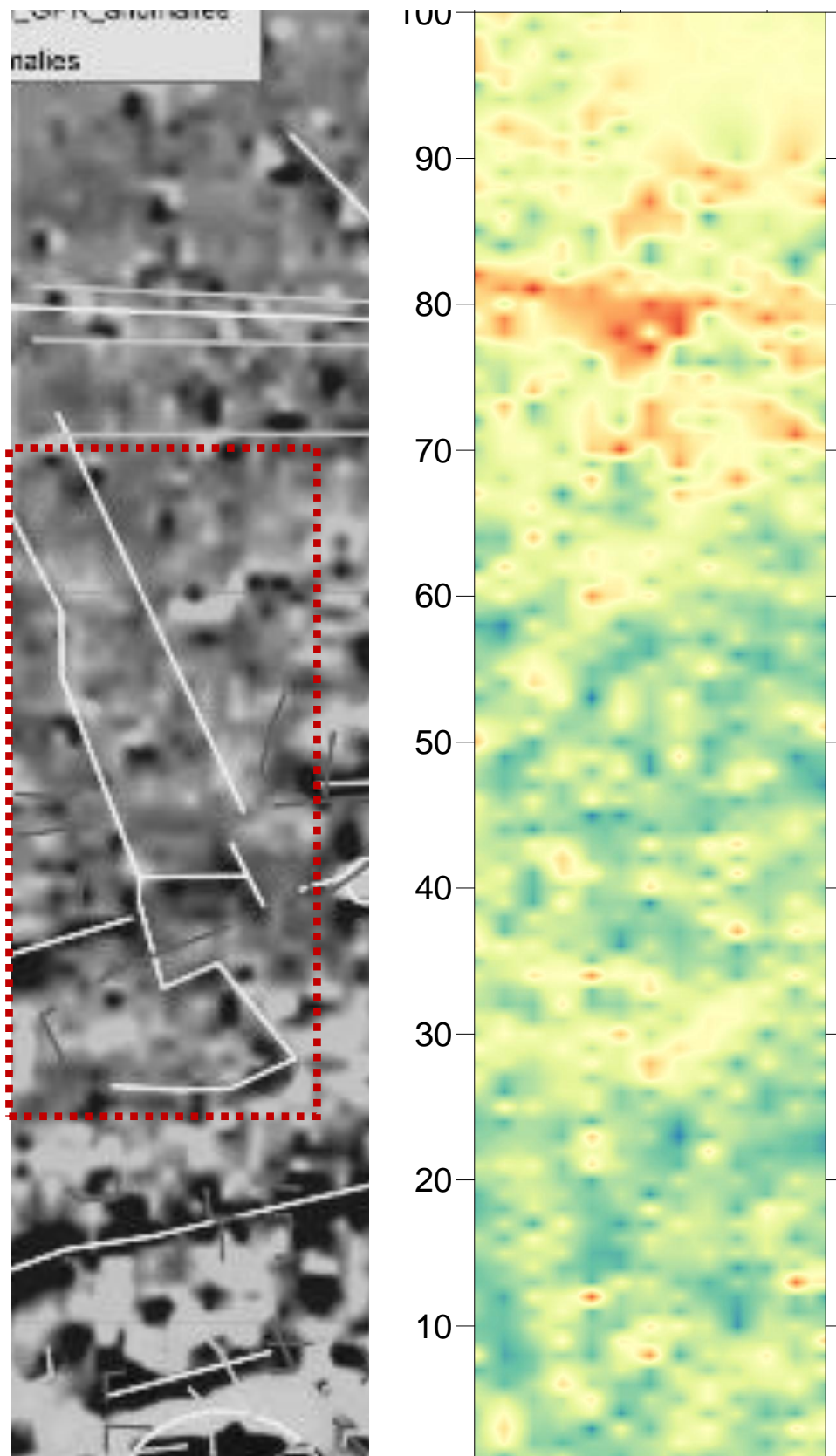
τάφρους που περιέβαλλαν το tell είναι εμφανή από βάθη 1.2 – 1.3 μέχρι και 1.7 – 1.8m και καταγράφονται από τις μαγνητικές διασκοπήσεις, αλλά όχι από τα φασματοραδιόμετρα. Προχωρώντας προς τα νότια, προς το tell, εμφανίζονται και άλλες ανωμαλίες σε βάθος 70-80 cm οι οποίες όμως δύσκολα μπορεί να ερμηνευτούν, αφού εκτιμάται ότι ενδεχομένως πρόκειται για παλαιότερες ανασκαφές στην περιοχή ή άλλες σύγχρονες επεμβάσεις στο χώρο (Sarris και Papadopoulos, 2011).



Εικόνα 186: Αποτελέσματα μετρήσεων γεωραντάρ και μαγνητικών διασκοπήσεων στην περιοχή Vészto-Mágor (Εικ. 6.20, Sarris και Papadopoulos, 2011). Στο άσπρο ορθογώνιο απεικονίζεται η κοινή περιοχή με τις επίγειες φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις.

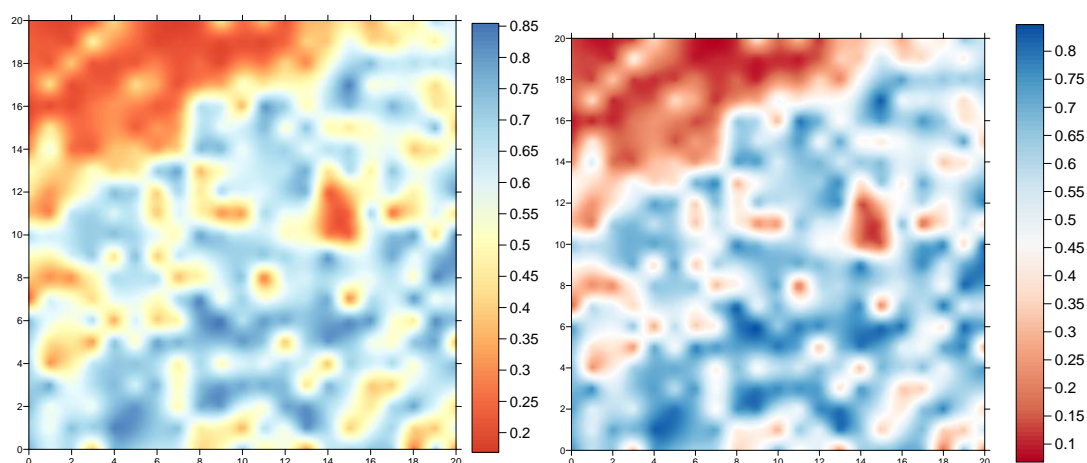


Εικόνα 187: Αποτελέσματα γεωφυσικών διασκοπήσεων (αριστερά, Εικ. 6.21, Sarris και Papadopoulos 2011) και εφαρμογή δείκτη NDVI (με βήμα 5 m) με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων. Στην κόκκινη περιοχή τα υπεδάφια κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί σε βάθος πέραν του 1.3 m.

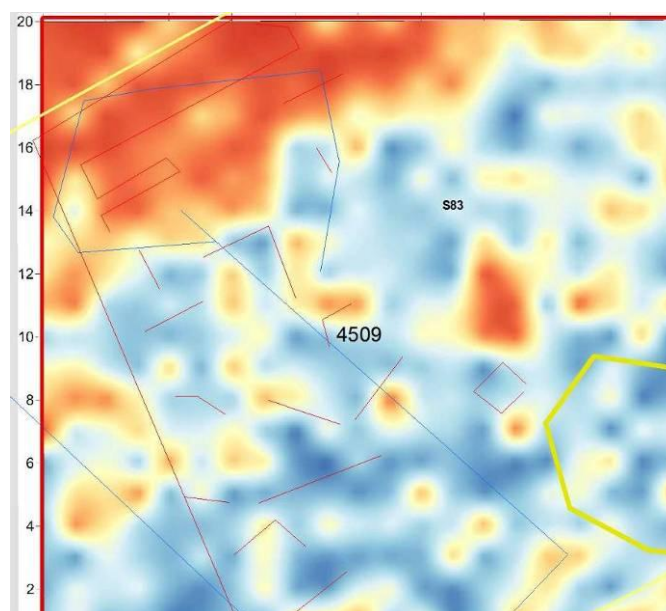


Εικόνα 188: Αποτελέσματα γεωφυσικών διασκοπήσεων (αριστερά, Εικ. 6.21, Sarris και Papadopoulos 2011) και εφαρμογή δείκτη NDVI (με βήμα 1 m) με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων. Στην κόκκινη περιοχή τα υπεδάφια κατάλοιπα που έχουν εντοπιστεί σε βάθος πέραν του 1.3 m.

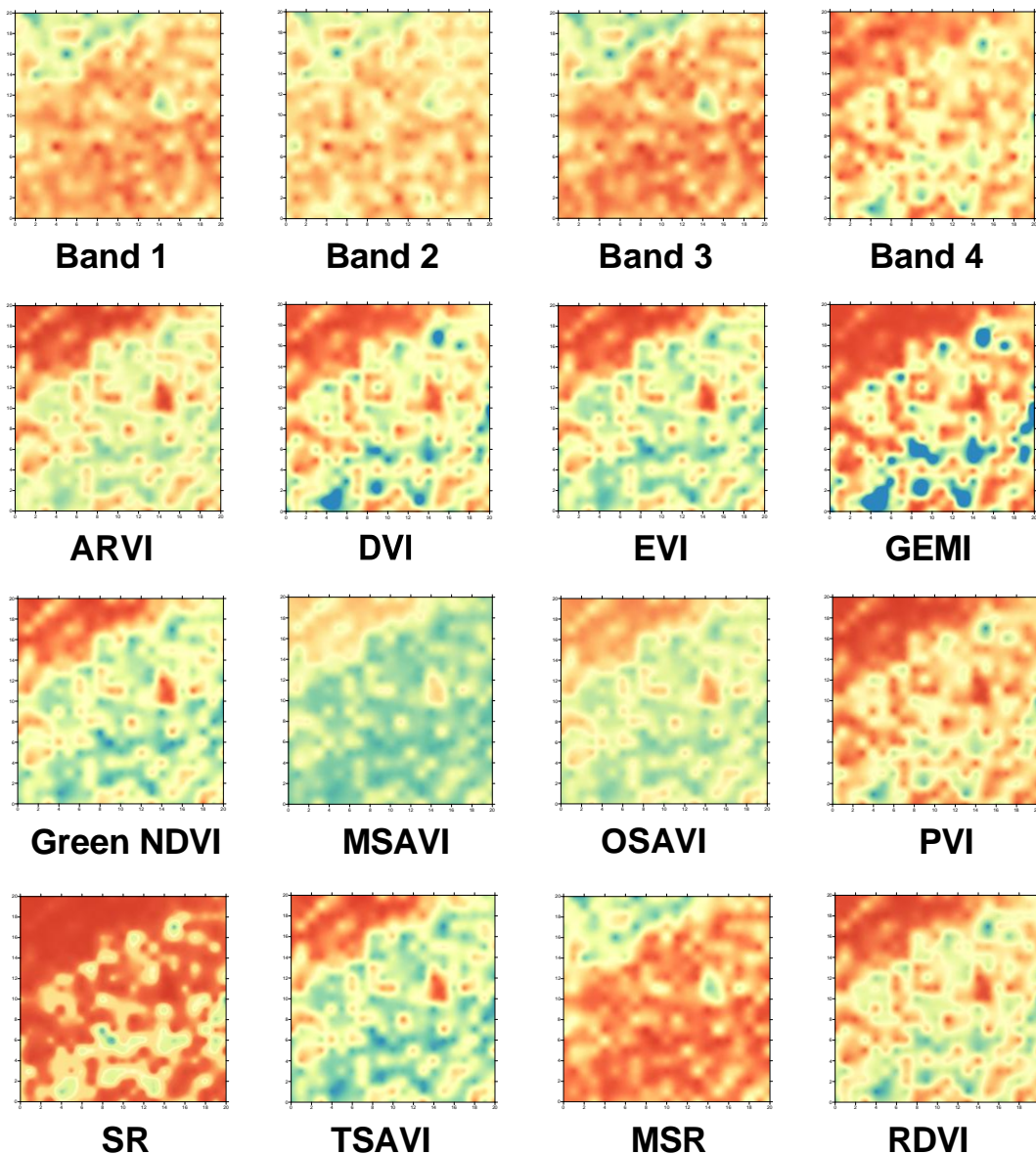
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεικτών βλάστησης NDVI και TSAVI στο τετράγωνο 4509 (βλ. Εικόνα 189) είναι δύσκολο να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα όπως προκύπτουν από την επεξεργασία των επίγειων φασματοραδιομέτρων, δεν είναι σύμφωνα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων (βλ. Εικόνα 190). Άλλοι δείκτες που έχουν και αυτοί εφαρμοστεί στην ίδια περιοχή (βλ. Εικόνα 191) έχουν δώσει αντίστοιχα αποτελέσματα με την Εικόνα 189.



Εικόνα 189: Εφαρμογή δείκτη NDVI (αριστερά) και του δείκτη TSAVI (δεξιά) στο τετράγωνο 4509.

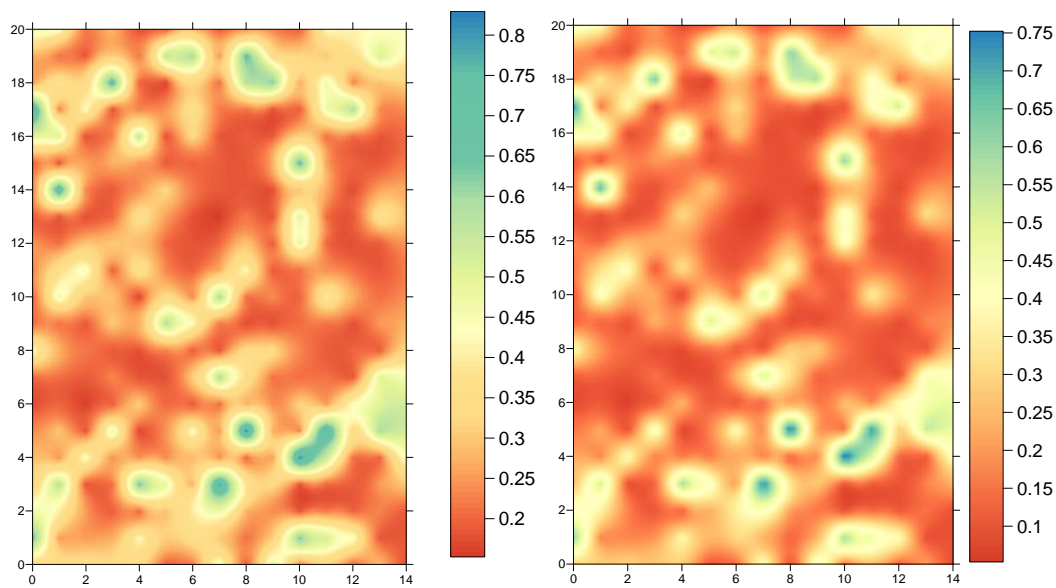


Εικόνα 190: Σύγκριση αποτελεσμάτων γεωφυσικών διασκοπήσεων (γραμμικές ενδείξεις) και του δείκτη NDVI (υπόβαθρο εικόνας) για το τετράγωνο 4509.



Εικόνα 191: Ανακλαστικότητα στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο κανάλι (πρώτη σειρά) και αποτελέσματα από την εφαρμογή διαφόρων δεικτών βλάστησης στο τετράγωνο 4509.

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στο άλλο τετράγωνο της περιοχής (4507). Οι μετρήσεις των επίγειων φασματοραδιομέτρων μετά την επεξεργασία των πρωτογενών παρατηρήσεων (βλ. Εικόνα 192), δεν ήταν σύμφωνες με τα αποτελέσματα και την ερμηνεία των γεωφυσικών διασκοπήσεων της περιοχής.



Εικόνα 192: Δείκτης NDVI (αριστερά) και TSAVI (δεξιά) στο τετράγωνο 4507

Η μη ταύτιση των φασματοραδιομετρικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα γεωφυσικά, για τα τετράγωνα 4507, 4509 και 403-409, θα πρέπει να αποδοθεί κυρίως στο γεγονός ότι η βλάστηση που επικρατούσε στην περιοχή δεν ήταν πυκνή με αποτέλεσμα οι επίγειες φασματοραδιομετρικές μετρήσεις της βλάστησης να περιελάμβαναν σημαντική αλλοίωση από την ακτινοβολία του εδάφους. Αυτό ήταν εμφανές, ιδιαίτερα για τα τετράγωνα 4507 και 4509 και σε λιγότερο βαθμό στα τετράγωνα 403-409, 4527, 4503.

Πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η ασυμφωνία των αποτελεσμάτων υπάρχει και σε σχέση με τις γεωφυσικές διασκοπήσεις και τις εργαστηριακές αναλύσεις του εδάφους (Σαρρής Α., προσωπική επικοινωνία). Αντίθετα στην περίπτωση του Vésztd-Mágor η βλάστηση ήταν πυκνή και ομοιογενής (βλ. Εικόνα 193) οπότε η ανακλαστικότητα των μετρήσεων από τα επίγεια φασματοραδιόμετρα δεν έχει επηρεαστεί από τέτοιους παράγοντες, με αποτέλεσμα οι επίγειες φασματοραδιομετρικές παρατηρήσεις να συμφωνούν με τις γεωφυσικές διασκοπήσεις.



Εικόνα 193: Εικόνα 194: Φωτογραφίες βλάστησης από τις θέσεις Vészto-Mágor (1η και 2η σειρά), που φαίνεται η ομοιομορφία της βλάστησης σε σχέση με τα τετράγωνα 403-409, 4527, 4503 (3η σειρά) και 4507, 4509 (4η σειρά). Η πυκνότητα της βλάστησης σε αυτά τα τετράγωνα δεν επέτρεψε την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, αλλά παράλληλα διατυπώνονται και άλλοι προβληματισμοί που προέκυψαν από την εκπόνηση της διατριβής. Στο κεφάλαιο αρχικά παρατίθενται εν συντομία οι πιθανές χρήσεις που μπορεί να έχουν οι επίγειες φασματικές υπογραφές για την αρχαιολογική έρευνα. Αυτό κρίθηκε αναγκαίο αφού η καταγραφή των δυνατοτήτων των επίγειων φασματοραδιομέτρων για την Αρχαιοτηλεπισκόπηση δεν είχε διερευνηθεί μέχρι στιγμής.

Ακολούθως το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και πρόταση ενός Αρχαιολογικού Δείκτη, ο οποίος θα χρησιμοποιεί τα βέλτιστα φασματικά κανάλια που θα είναι σε θέση να ενισχύσει τις διαφοροποιήσεις της βλάστησης που παρατηρούνται σε δορυφορικές εικόνες. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση των επίγειων μετρήσεων στα δύο ελεγχόμενα πεδία και ακολούθησε η στατιστική ανάλυση. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από την πιο πάνω ανάλυση εφαρμόστηκε και σε υπερφασματικές εικόνες HYPERION στην περιοχή της Θεσσαλίας.

Κατόπιν γίνεται μια εκτενής διερεύνηση με στόχο να μελετηθούν οι φασματικές ευαισθησίες κοινών δορυφορικών αισθητήρων. Αν και η φασματική ευαισθησία εξετάστηκε σε άλλες εφαρμογές (βλ. Trishchenko *et.al.*, 2002, Trishchenko 2009, Teillet *et al.*, 2007), η σύγκριση πολυφασματικών δεδομένων που προκύπτουν από διαφορετικούς αισθητήρες, με διαφορετική φασματική ανάλυση, δεν έχει ακόμη μελετηθεί για αρχαιολογικές έρευνες. Σκοπός της μελέτης, είναι να εξεταστεί η επίδραση της φασματικής ευαισθησίας των δεκτών αυτών σε διάφορους δείκτες βλάστησης (Agariou *et al.*, 2012e).

Τέλος, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την διερεύνηση για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περιόδου για την παρακολούθηση των διαφοροποιήσεων της βλάστησης μέσα από τηλεπισκοπικά δεδομένα.

7.1. Χρήση φασματοραδιομέτρων στην Αρχαιολογία

Όπως έδειξαν οι επίγειες μετρήσεις στα ελεγχόμενα πεδία αλλά και στους αρχαιολογικούς χώρους, μπορεί να χρησιμοποιηθούν τόσο οι φασματικές υπογραφές όσο και οι δείκτες βλάστησης, για να εντοπιστούν αρχαιολογικά κατάλοιπα.

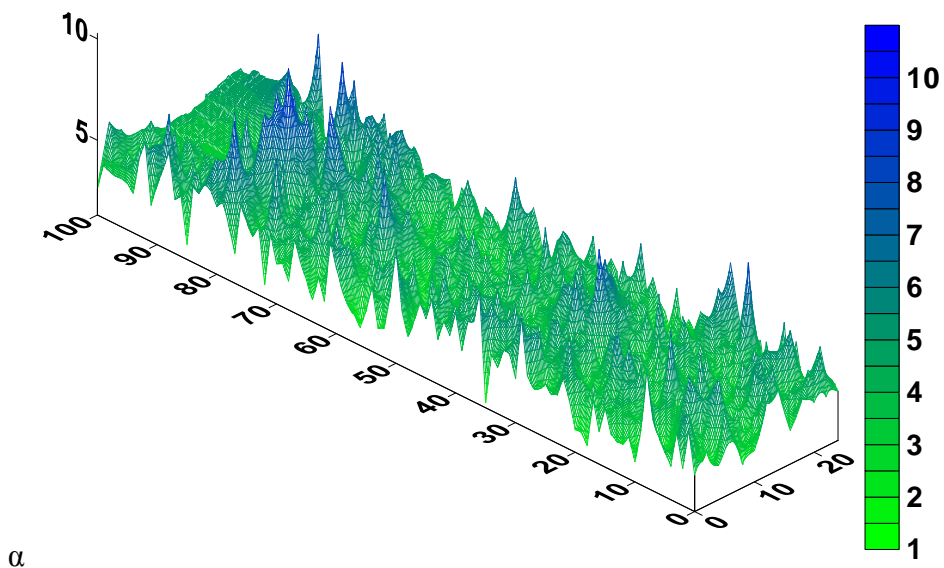
Τα δεδομένα αυτά, όπως προκύπτουν από τα φασματοραδιόμετρα, δύναται να χρησιμοποιηθούν χρονικά πριν, μετά ή ακόμη και ταυτόχρονα με την στιγμή λήψης των δορυφορικών εικόνων. Στην πρώτη περίπτωση, οι φασματικές υπογραφές και οι δείκτες βλάστησης μπορεί να χρησιμοποιηθούν με στόχο να εντοπιστούν διαφοροποιήσεις της βλάστησης οι οποίες θα είναι ανιχνεύσιμες και σε δορυφορικές απεικονίσεις (βλ. περίπτωση Θεσσαλίας, Αγαρίου *et al.*, 2012). Στη δεύτερη περίπτωση, τα επίγεια δεδομένα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση των δορυφορικών αποτελεσμάτων (βλ. περίπτωση Παλαιάφου, Αγαρίου και Hadjimitsis, 2011). Τέλος, δεδομένα κατά τη στιγμή λήψης της εικόνας, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για ραδιομετρικές – ατμοσφαιρικές διορθώσεις των δορυφορικών απεικονίσεων.

Με μια συστηματική μελέτη των επίγειων δεδομένων, ο ερευνητής μπορεί να κατανοήσει πώς η βλάστηση συμπεριφέρεται σε μικροκλίμακα. Τα ευρήματα που προκύπτουν, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μια ευρύτερη αρχαιολογική περιοχή (μακροκλίμακα) με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει πολλά οφέλη, αφού αφενός θα μπορεί να τεκμηριωθεί ποια είναι η βέλτιστη χωρική αλλά και η φασματική ανάλυση των δορυφορικών εικόνων που απαιτούνται για μια περιοχή μελέτης και αφετέρου θα μειωθεί το οικονομικό κόστος, αφού θα γίνει η αγορά των βέλτιστων δορυφορικών εικόνων.

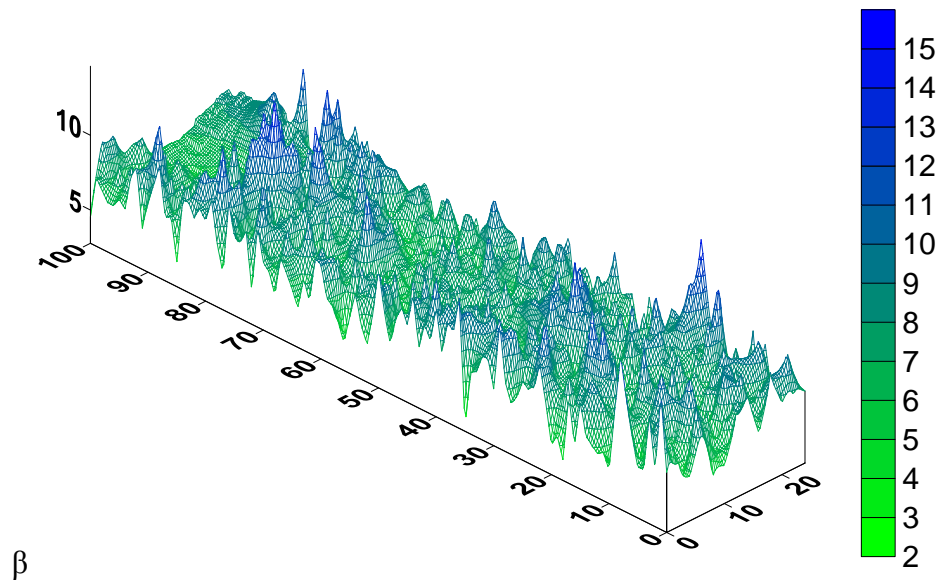
Παρόλα αυτά, οι φασματικές υπογραφές και οι δείκτες βλάστησης που εξετάστηκαν έδειξαν ότι αυτές οι παρατηρήσεις θα είναι καλύτερα να επαληθεύονται και με άλλες έρευνες σε μια περιοχή, όπως είναι οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, επιφανειακές έρευνες, αρχαιολογικές ανασκαφές κ.ά., με στόχο να περιορίζονται οι λάθος ερμηνείες. Τόσο τα επίγεια δεδομένα όσο και τα δορυφορικά δεδομένα, θα πρέπει να επαληθεύονται και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, με στόχο να μειώνονται οι

τυχαίες επιδράσεις των ιδιοτήτων του εδάφους και του μικροκλίματος της περιοχής στη βλάστηση.

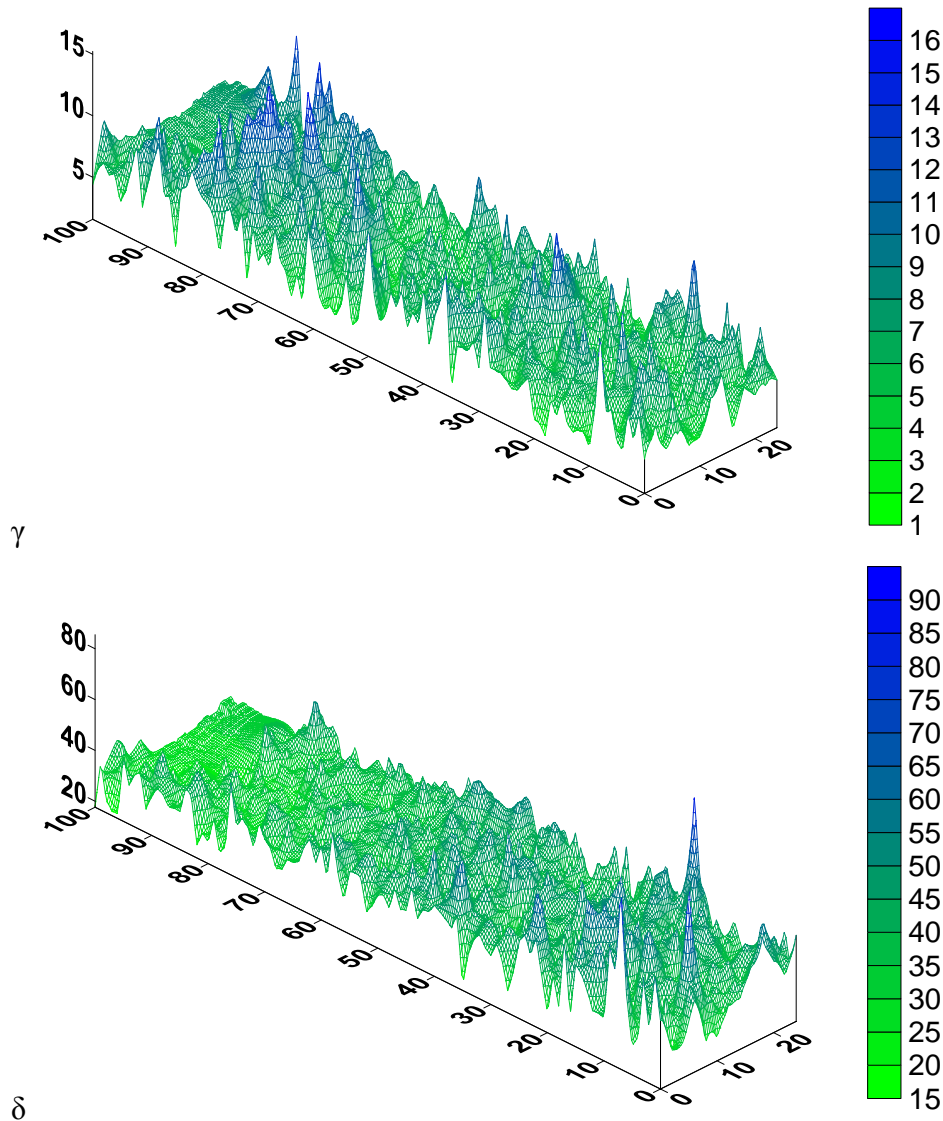
Οι ίδιες οι φασματικές υπογραφές σε μικροκλίμακα έχουν μεγάλες διακυμάνσεις ιδιαίτερα σε περιόδους όπου η βλάστηση είναι σε διαδικασία φωτοσύνθεσης. Ενδεικτικές διακυμάνσεις φασματικών υπογραφών σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του κριθαριού παρουσιάζονται στην Εικόνα 99 και στην Εικόνα 100, ενώ διακυμάνσεις της ακτινοβολίας, την ίδια ημέρα, για τη θέση Veszto – Magor φαίνονται στην Εικόνα 195.



α



β



Εικόνα 195: Διακυμάνσεις της ακτινοβολίας στα κανάλια 1-4 (α-δ)στη θέση Veszto – Magor

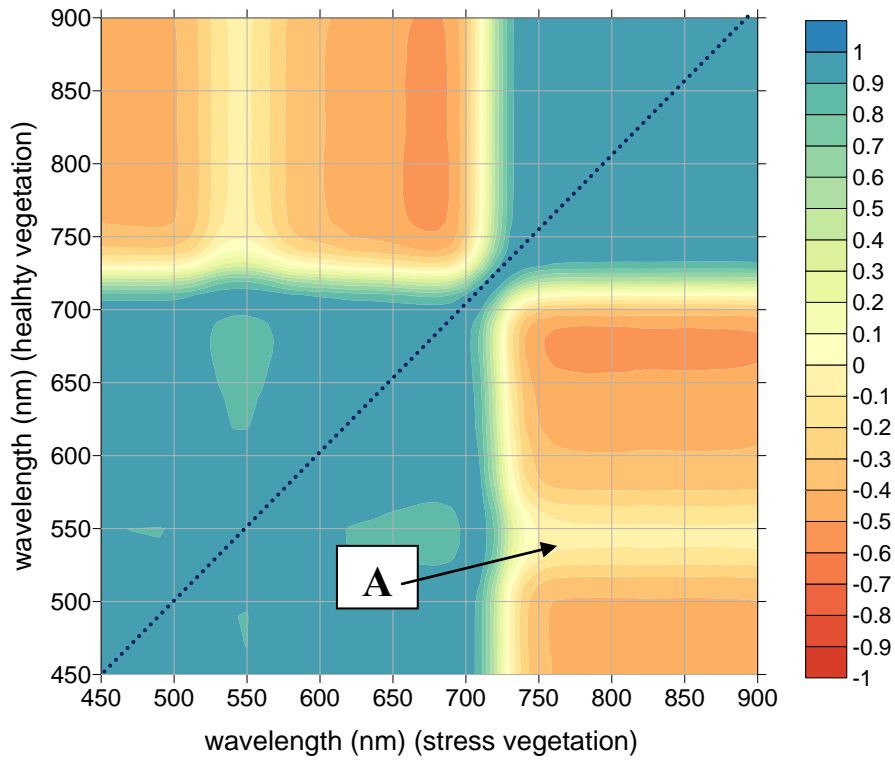
Για την πλήρη κατανόηση των φασματικών υπογραφών της βλάστησης (κριθάρι και σιτάρι) σε αρχαιολογικούς χώρους, έγινε μια συστηματική καταγραφή κατά τη διάρκεια ολόκληρου του φαινολογικού κύκλου σε δύο περιοχές μελέτης (Αλάμπρα και Αχέλεια). Η καταγραφή αυτή γίνεται για πρώτη φορά με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων (“ground truth”) και τα αποτελέσματά της δύνανται να ενσωματωθούν σε ψηφιακές βιβλιοθήκες (digital libraries) λογισμικών επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων. Η χρήση τέτοιων δεδομένων θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με παρόμοιες περιβαλλοντολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά με τις πιο πάνω περιοχές. Οι ψηφιακές βιβλιοθήκες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ταξινομήσεων.

7.2. Ανάπτυξη Αρχαιολογικού Δείκτη

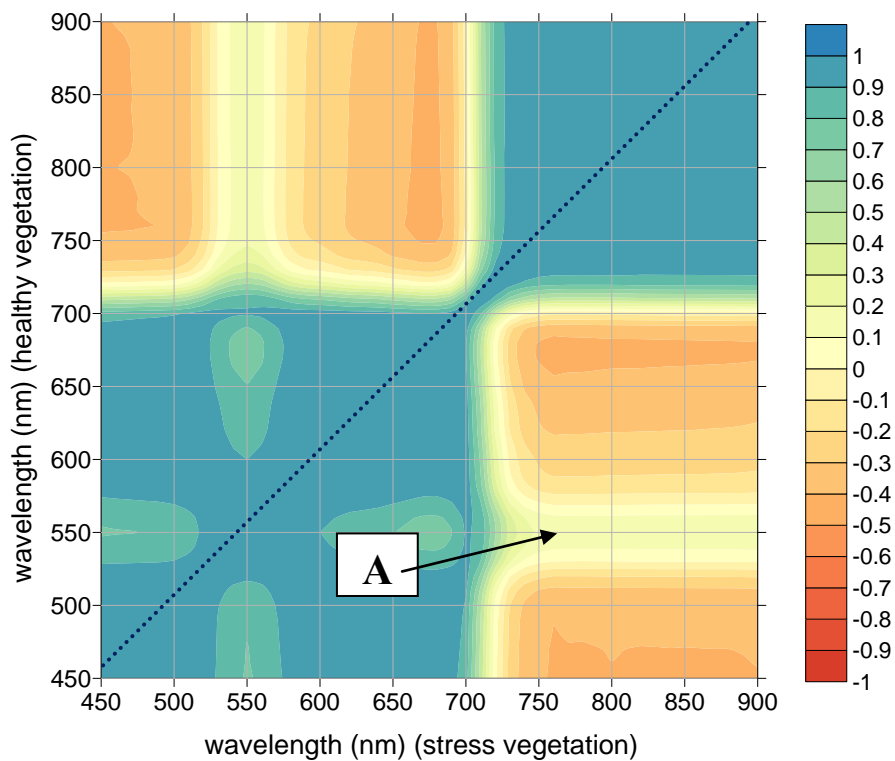
Τα αποτελέσματα όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6, κάνουν χρήση ενός μεγάλου όγκου δεδομένων σε ένα μεγάλο σχετικά φασματικό εύρος (από 450 – 900 nm). Πολλές φορές είναι αναγκαίο όμως να μειωθεί και να συμπιεστεί όλος αυτός ο όγκος δεδομένων, χωρίς όμως να αλλοιώνεται σημαντικά η πρωτογενής πληροφορία. Αυτό μπορεί να έχει πολλαπλά οφέλη αφού ο ερευνητής μπορεί να εστιάσει την προσοχή του σε μικρότερο όγκο δεδομένων, δηλαδή σε πιο συγκεκριμένα μήκη κύματος για αντίστοιχες μελέτες. Παράλληλα, η διερεύνηση αυτή προσδιορίζει και τα φασματικά χαρακτηριστικά τα οποία θα ήταν επιθυμητό να έχει ένας δορυφορικός ή επίγειος δέκτης καταγραφής ακτινοβολίας, έτσι ώστε να είναι σε θέση να καταγράψει τη διαφοροποίηση της βλάστησης σε όλο το φαινολογικό κύκλο. Σκοπός αυτής της διερεύνησης, είναι να εντοπιστούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί υπερφασματικών καναλιών για τη μελέτη των υπεδάφιων καταλοίπων, ανεξαρτήτως της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν τα αποτελέσματα, τόσο από την περιοχή Αχέλειας όσο και από την περιοχή Αλάμπρας (Agariou *et al.*, 2012f).

7.2.1. Συσχετίσεις ανακλαστικότητας

Ένας απλός τρόπος να εξεταστούν όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, είναι να συσχετιστεί η ανακλαστικότητα για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος σε σχέση με το υπόλοιπο φάσμα (από 450 – 900 nm, ορατό – εγγύς υπέρυθρο). Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης (R^2) για κάθε μήκος κύματος (βήμα 1nm) από τις συνολικές μετρήσεις στα δύο ελεγχόμενα πεδία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 196 και στην Εικόνα 197, εντοπίζεται μια χαμηλή συσχέτιση των τιμών της ακτινοβολίας μεταξύ του εύρους 750 - 900 nm και 530 -570 nm, η οποία και αντιστοιχεί στην περιοχή Α στα διαγράμματα. Η Εικόνα 196 δείχνει επιπλέον ότι το μήκος κύματος κοντά στην περιοχή της κόκκινης ακμής (βλ. Εικόνα 198), έχει σχεδόν “μηδενική συσχέτιση” με όλο το ορατό μήκος κύματος. Οι πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 24- Πίνακας 25) παρουσιάζουν τις συσχετίσεις όπως αυτές έχουν υπολογιστεί με βήμα 50nm.



Εικόνα 196: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αλάμπρας, Λευκωσία (n = 1897).



Εικόνα 197: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αχέλειας, Πάφου (n = 569).

Πίνακας 24: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αλάμπρας, Λευκωσία (n = 1897 παρατηρήσεις).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	1,00									
500	1,00	1,00								
550	0,90	0,90	1,00							
600	0,99	0,99	0,93	1,00						
650	0,99	0,99	0,86	0,99	1,00					
700	0,98	0,98	0,94	1,00	0,98	1,00				
750	-0,37	-0,37	-0,02	-0,35	-0,45	-0,29	1,00			
800	-0,41	-0,41	-0,08	-0,39	-0,49	-0,34	1,00	1,00		
850	-0,41	-0,41	-0,09	-0,39	-0,49	-0,34	0,99	1,00	1,00	
900	-0,40	-0,40	-0,08	-0,38	-0,48	-0,33	0,99	1,00	1,00	1,00

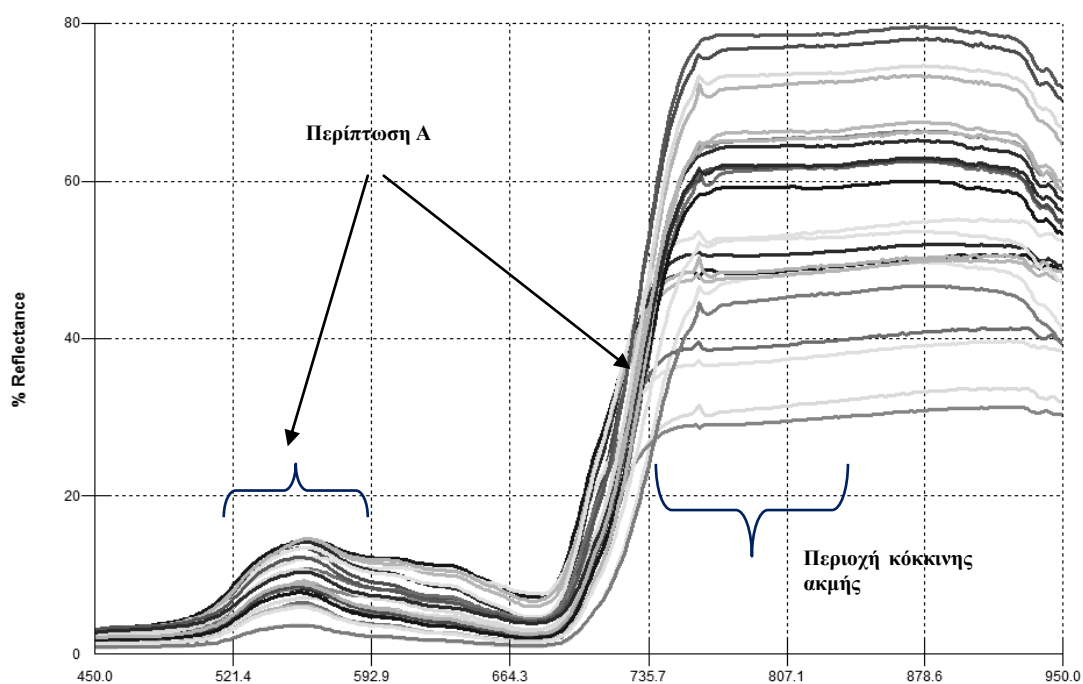
Πίνακας 25: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) (450-900 nm) των τιμών ανακλαστικότητας της βλάστησης πάνω από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα (άξονας X) και της υγιούς βλάστησης (άξονας Y). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ελεγχόμενο πεδίο της Αχέλειας, Πάφου (n = 569 παρατηρήσεις).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	1,00									
500	0,99	1,00								
550	0,79	0,82	1,00							
600	0,95	0,97	0,90	1,00						
650	0,96	0,98	0,80	0,98	1,00					
700	0,85	0,89	0,91	0,96	0,93	1,00				
750	-0,39	-0,36	0,18	-0,22	-0,36	-0,06	1,00			
800	-0,40	-0,38	0,16	-0,23	-0,37	-0,07	1,00	1,00		
850	-0,41	-0,38	0,16	-0,23	-0,37	-0,06	0,99	0,99	1,00	
900	-0,40	-0,37	0,16	-0,22	-0,36	-0,05	0,99	0,99	1,00	1,00

Μελετώντας τα πιο πάνω αποτελέσματα σε σχέση με μια τυπική φασματική υπογραφή της βλάστησης, όπως αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 198, φαίνεται ότι η περίπτωση Α αναφέρεται στα φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, κοντά στο

εγγύς υπέρυθρο και στο πράσινο μήκος κύματος. Μια τυπική φασματική υπογραφή της βλάστησης αναμένεται να έχει ανακλαστικότητα πολύ χαμηλή στις μπλε και κόκκινες περιοχές του μήκους κύματος, λίγο υψηλότερη στην πράσινη περιοχή και υψηλή στο κοντινό υπέρυθρο.

Η χαμηλή συσχέτιση στο εγγύς υπέρυθρο και το πράσινο μήκος κύματος, φανερώνει ότι ακόμη και αν το φυτό εξακολουθεί να είναι πράσινο, όπως φαίνεται στο ανθρώπινο μάτι, αυτό μπορεί να παρουσιάζει χαμηλές ή ψηλές τιμές ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο (αφού αυτά είναι “ασυσχέτιστα” μεταξύ τους). Επομένως, σε περίπτωση που η φυσιολογική διαδικασία ανάπτυξης ενός φυτού έχει διαταραχθεί όταν περνά μια περίοδο καταπόνησης, αυτό μπορεί να μην εντοπιστεί έγκαιρα με χρήση ορατού μήκους κύματος ή με απλές επιτόπιες παρατηρήσεις του φυτού. Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά από τους Καλαϊτζίδη και Μανάκο (2012) όταν ένα φυτό καταπονείται, συνήθως αυτό εκφράζεται με ορισμένα ορατά συμπτώματα, αλλά και άλλα που δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι.



Εικόνα 198: Χαρακτηριστικές φασματικές υπογραφές της βλάστησης.

7.2.2. Διαχωριστικότητα φασματικών καναλιών

Σε μια προσπάθεια εντοπισμού φασματικών καναλιών που είναι ικανά να διακρίνουν τις φασματικές διαφοροποιήσεις της βλάστησης λόγω αρχαιολογικών καταλοίπων, εφαρμόστηκαν διάφοροι δείκτες (αλγόριθμοι) διαχωριστικότητας (seperability

indices). Σκοπός αυτών των δεικτών είναι να εντοπίζουν γενικά, αν μια ομάδα παρατηρήσεων X είναι διαχωρίσιμη από μια άλλη ομάδα παρατηρήσεων Y.

Στη συνέχεια, καταγράφονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό, καθώς και τα συγκεντρωτικά τους αποτελέσματα για τις δύο περιοχές μελέτης στην Αλάμπρα και Αχέλεια.

- **Ευκλείδεια απόσταση:** Η μέθοδος αυτή απλώς υπολογίζει την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ ενός ζεύγους παρατηρήσεων. Η μαθηματική εξίσωση που εκφράζει το παραπάνω είναι (Hastie και Tibshirani, 1996):

$$d = (p_x - q_x)$$

όπου:

d = ευκλείδεια απόσταση

p_x = ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος για την 1^η ομάδα παρατηρήσεων

q_x = ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος για την 2^η ομάδα παρατηρήσεων

- **Απόσταση Mahalanobis:** Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με την ευκλείδεια απόσταση αλλά παράλληλα λαμβάνει υπόψη και τον πίνακα συμμεταβλητότητας μεταξύ των στοιχείων. Η μαθηματική εξίσωση που εκφράζει τα παραπάνω είναι (De Maesschalck *et al.*, 2000):

$$d_{\text{mahalanobis}} = (p_x - q_x)C^{-1}$$

όπου:

$d_{\text{mahalanobis}}$ = απόσταση Mahalanobis

C = πίνακας συμμεταβλητότητας

p_x = ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος για την 1^η ομάδα παρατηρήσεων

q_x = ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος για την 2^η ομάδα παρατηρήσεων

- **Ομοιότητα συνημίτονου:** Η ομοιότητα συνημίτονου είναι ένα μέτρο που υπολογίζει την ομοιότητα ανάμεσα σε δύο διανύσματα, υπολογίζοντας το συνημίτονο της γωνίας ϕ που σχηματίζουν. Η ομοιότητα συνημίτονου δίνεται από τη σχέση (Kruse *et al.*, 1993):

$$d_{\text{ομοιότητας συνημίτονου}} = \text{συν}(\varphi) = 1 - (\mathbf{p}_x \cdot \mathbf{q}_x^T) / ((\mathbf{p}_x \cdot \mathbf{p}_x^T) (\mathbf{q}_x \cdot \mathbf{q}_x^T))^{0.5}$$

όπου:

$d_{\text{ομοιότητας συνημίτονου}}$ = ομοιότητα συνημίτονου

p_x = ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος για την 1^η ομάδα παρατηρήσεων

q_x = ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος για την 2^η ομάδα παρατηρήσεων

Σημειώνεται ότι οι πιο πάνω δείκτες διαχωριστικότητας χρησιμοποιούνται ευρέως σε ταξινομήσεις δορυφορικών εικόνων. Η ευκλείδεια απόσταση χρησιμοποιείται κυρίως σε ταξινομήσεις με τη μέθοδο της ελάχιστης απόστασης, η απόσταση Mahalanobis σε ταξινομήσεις με τη μέθοδο του παραλληλεπίπεδου και μέγιστης πιθανοφάνειας, ενώ τέλος η ομοιότητα συνημίτονου σε ταξινομήσεις τύπου Spectral Angle Mapper (SAM).

Πίνακας 26: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ευκλείδεια απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0									
500	1,5	0,0								
550	6,0	4,6	0,0							
600	6,0	4,5	0,1	0,0						
650	5,8	4,4	0,2	0,1	0,0					
700	9,4	8,0	3,4	3,5	3,6	0,0				
750	27,9	26,5	22,0	22,1	22,2	18,7	0,0			
800	31,0	29,5	25,0	25,1	25,2	21,7	3,1	0,0		
850	31,9	30,4	26,0	26,0	26,1	22,7	4,0	0,9	0,0	
900	32,1	30,7	26,2	26,3	26,4	22,9	4,2	1,2	0,2	0,0

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0									
500	1,5	0,0								
550	5,2	3,7	0,0							
600	7,7	6,2	2,5	0,0						
650	8,7	7,2	3,5	1,0	0,0					

700	11,5	10,1	6,3	3,8	2,9	0,0				
750	23,3	21,8	18,0	15,6	14,6	11,7	0,0			
800	26,0	24,5	20,8	18,3	17,3	14,5	2,7	0,0		
850	27,0	25,5	21,8	19,3	18,4	15,5	3,8	1,0	0,0	
900	27,6	26,2	22,4	20,0	19,0	16,1	4,4	1,6	0,6	0,0

Πίνακας 27: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την απόσταση Mahalanobis για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0									
500	0,5	0,0								
550	1,9	1,4	0,0							
600	2,0	1,6	0,1	0,0						
650	1,9	1,4	0,0	0,1	0,0					
700	3,2	2,7	1,3	1,1	1,3	0,0				
750	2,9	2,6	1,7	1,7	1,7	1,8	0,0			
800	2,6	2,4	2,1	2,2	2,1	2,7	1,0	0,0		
850	2,7	2,5	2,2	2,2	2,2	2,7	1,0	0,1	0,0	
900	2,8	2,5	2,1	2,2	2,1	2,6	0,8	0,3	0,2	0,0

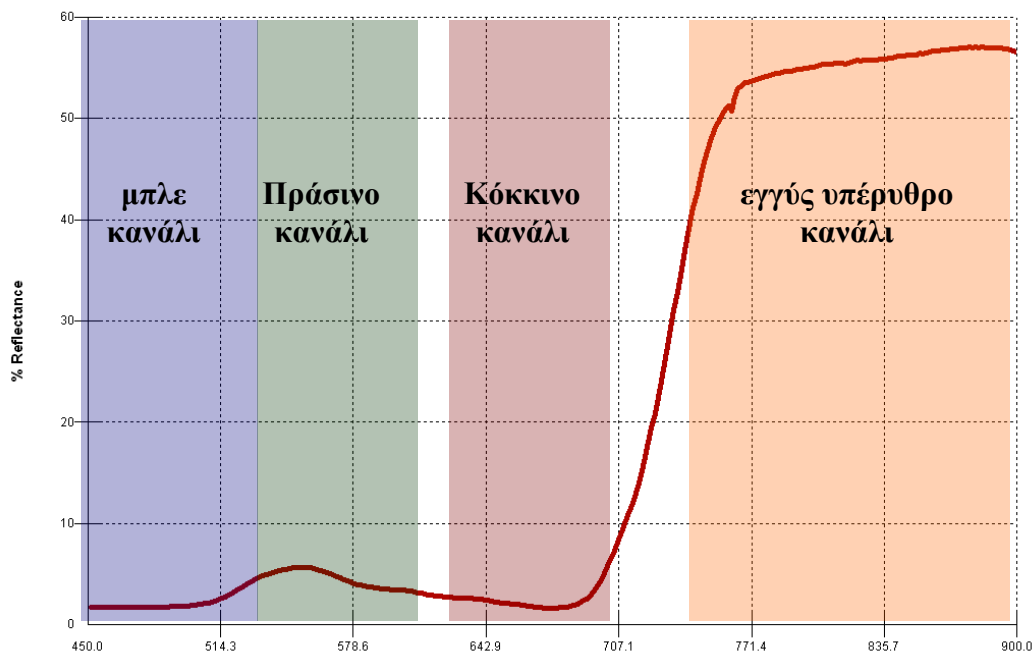
μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0									
500	0,5	0,0								
550	1,4	0,9	0,0							
600	2,6	2,1	1,2	0,0						
650	3,0	2,5	1,6	0,4	0,0					
700	3,6	3,2	2,2	1,0	0,6	0,0				
750	2,7	2,4	1,8	1,9	2,1	2,3	0,0			
800	2,8	2,5	2,1	2,3	2,5	2,7	0,4	0,0		
850	2,9	2,6	2,2	2,3	2,5	2,7	0,4	0,1	0,0	
900	3,1	2,8	2,2	2,2	2,4	2,6	0,4	0,4	0,2	0,0

Πίνακας 28: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ομοιότητα συνημίτονου απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0000									
500	0,0000	0,0000								
550	0,0001	0,0000	0,0000							
600	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000						
650	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000					
700	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0000				
750	0,0119	0,0108	0,0101	0,0103	0,0093	0,0123	0,0000			
800	0,0162	0,0149	0,0141	0,0143	0,0131	0,0166	0,0003	0,0000		
850	0,0141	0,0129	0,0121	0,0123	0,0112	0,0145	0,0001	0,0001	0,0000	
900	0,0162	0,0149	0,0141	0,0143	0,0131	0,0166	0,0003	0,0000	0,0001	0,0000

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,00									
500	0,0000	0,00								
550	0,0000	0,0000	0,00							
600	0,0000	0,0000	0,0000	0,00						
650	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00					
700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00				
750	0,0005	0,0005	0,0004	0,0007	0,0008	0,0006	0,00			
800	0,0006	0,0006	0,0006	0,0008	0,0009	0,0008	0,0000	0,00		
850	0,0006	0,0007	0,0006	0,0008	0,0009	0,0008	0,0000	0,0000	0,00	
900	0,0006	0,0006	0,0005	0,0008	0,0009	0,0007	0,0000	0,0000	0,0000	0,00

Από την εξέταση των πιο πάνω αποτελεσμάτων, φαίνεται ότι οι διαφοροποιήσεις της βλάστησης είναι πιο διακριτές -ανεξάρτητα από τη μέθοδο ή την περιοχή μελέτης- με τη συσχέτιση του εγγύς υπέρυθρου και του μπλε μήκους κύματος (~450-520nm με 760-900 nm). Επίσης υψηλές τιμές διαχωριστικότητας καταγράφονται και με τη συσχέτιση του εγγύς υπέρυθρου και κόκκινου μήκους κύματος (~630-690nm με 760-900 nm). Για σκοπούς σύγκρισης των πιο πάνω αποτελεσμάτων η Εικόνα 199 παρουσιάζει μια τυπική φασματική υπογραφή υγιούς βλάστησης σε σχέση με το μήκος κύματος.



Εικόνα 199:Χαρακτηριστική φασματική υπογραφή υγιούς βλάστησης σε σχέση με το μήκος κύματος (φάσμα). Ο άξονας των X αντιπροσωπεύει το μήκος κύματος (από 450-900nm) και ο άξονας των Y την ανακλαστικότητα (%).

Αν και η δεύτερη περίπτωση είναι αναμενόμενη (βλ. Εικόνα 199: εγγύς υπέρυθρο με κόκκινο κανάλι bands), αφού αυτά είναι τα χαρακτηριστικά που εκμεταλλεύονται οι διάφοροι δείκτες βλάστησης, η πρώτη περίπτωση χρήζει περισσότερης διερεύνησης (βλ. Εικόνα 199: εγγύς υπέρυθρο με μπλε κανάλι). Το μπλε κανάλι έχει εμμέσως χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση βλάστησης μέσα από εξειδικευμένους δείκτες (π.χ. ARVI, SARVI, ARI κ.τ.λ.), αλλά η χρήση του αναδεικνύει μόνο την ατμοσφαιρική επίδραση στην εικόνα. Η σκέδαση είναι ένα φαινόμενο ιδιαίτερα έντονο στα μικρότερα μήκη κύματος λόγω της ισχυρότερης σκέδασης Rayleigh. Για αυτό το λόγο μη ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες αναμένεται να έχουν μεγάλο θόρυβο, ιδιαίτερα σε μη καθαρές ατμοσφαιρικά ημέρες (hazy).

Για να μειωθεί τυχόν θόρυβος των πιο πάνω δεδομένων λόγω της ανεπιθύμητης καταγραφής ανακλαστικότητας από το έδαφος, που καταγράφεται στα πρώτα στάδια ανάπτυξης του φυτού, έγινε ανάλυση των φασματικών υπογραφών για το διάστημα όπου η βλάστηση έχει αναπτυχθεί πλήρως. Τα αποτελέσματα διαχωριστικότητας για την περίοδο Ιανουαρίου – Μαρτίου για την περιοχή Αλάμπρας και Φεβρουαρίου – Απριλίου για την περιοχή της Αχέλειας φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες. Μια σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προηγούμενων πινάκων δείχνει ότι σε

περιόδους όπου η βλάστηση είναι σε άνθηση, η διαχωριστικότητα των φασματικών υπογραφών ενισχύεται σημαντικά.

Πίνακας 29: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ευκλείδεια απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0									
500	0,9	0,0								
550	7,8	7,0	0,0							
600	5,2	4,4	2,8	0,0						
650	3,2	2,4	5,0	2,2	0,0					
700	9,5	8,6	2,1	4,3	6,4	0,0				
750	54,9	54,1	47,4	50,3	52,4	46,4	0,0			
800	61,9	61,2	54,6	57,4	59,6	53,6	7,3	0,0		
850	63,4	62,7	56,1	58,9	61,1	55,1	8,7	1,5	0,0	
900	63,6	62,9	56,3	59,1	61,3	55,3	8,9	1,8	0,5	0,0

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,00									
500	0,85	0,00								
550	6,23	5,38	0,00							
600	4,96	4,11	1,31	0,00						
650	3,86	3,00	2,43	1,13	0,00					
700	8,49	7,64	2,28	3,53	4,66	0,00				
750	45,08	44,23	38,86	40,15	41,27	36,62	0,00			
800	50,78	49,94	44,56	45,85	46,98	42,33	5,71	0,00		
850	52,01	51,16	45,79	47,07	48,20	43,55	6,93	1,22	0,00	
900	52,25	51,40	46,03	47,32	48,44	43,79	7,17	1,47	0,26	0,0

Πίνακας 30: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την απόσταση Mahalanobis για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω). Με γκρι καταγράφονται οι ψηλότερες τιμές.

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0									
500	0,3	0,0								

550	1,7	1,4	0,0							
600	1,6	1,4	0,1	0,0						
650	1,4	1,1	0,3	0,3	0,0					
700	2,8	2,5	1,2	1,2	1,4	0,0				
750	2,7	2,5	1,7	1,8	2,0	1,9	0,0			
800	2,4	2,3	2,1	2,2	2,2	2,8	1,1	0,0		
850	2,5	2,4	2,1	2,2	2,2	2,7	0,9	0,2	0,0	
900	2,6	2,5	2,1	2,2	2,2	2,5	0,7	0,4	0,3	0,0

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,00									
500	0,43	0,00								
550	1,49	1,07	0,00							
600	2,40	1,98	0,93	0,00						
650	2,69	2,27	1,22	0,30	0,00					
700	3,41	2,99	1,93	1,01	0,73	0,00				
750	2,98	2,65	1,88	1,80	1,90	2,02	0,00	0,76		
800	2,71	2,47	1,98	2,23	2,41	2,68	0,76	0,00		
850	2,71	2,48	2,04	2,32	2,50	2,78	0,85	0,10	0,00	
900	2,92	2,66	2,07	2,20	2,34	2,54	0,54	0,29	0,37	0,00

Πίνακας 31: Αποτελέσματα διαχωριστικότητας με βάση την ομοιότητα συνημίτονου απόσταση για την περιοχή Αλάμπρας (πάνω) και Αχέλειας (κάτω).

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0000									
500	0,0021	0,0000								
550	0,0012	0,0001	0,0000							
600	0,0131	0,0047	0,0062	0,0000						
650	0,0304	0,0166	0,0194	0,0036	0,0000					
700	0,0138	0,0052	0,0067	0,0000	0,0033	0,0000				
750	0,0219	0,0374	0,0335	0,0682	0,1026	0,0698	0,0000			
800	0,0296	0,0471	0,0428	0,0811	0,1181	0,0828	0,0006	0,0000		
850	0,0287	0,0460	0,0418	0,0796	0,1164	0,0813	0,0005	0,0000	0,0000	
900	0,0273	0,0442	0,0401	0,0773	0,1136	0,0790	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000

μήκος κύματος (nm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
450	0,0000									
500	0,0000	0,0000								
550	0,0004	0,0004	0,0000							
600	0,0000	0,0000	0,0005	0,0000						
650	0,0004	0,0003	0,0015	0,0003	0,0000					
700	0,0000	0,0000	0,0002	0,0001	0,0006	0,0000				
750	0,0033	0,0035	0,0015	0,0038	0,0060	0,0029	0,0000			
800	0,0037	0,0039	0,0018	0,0042	0,0065	0,0033	0,0000	0,0000		
850	0,0038	0,0040	0,0018	0,0043	0,0066	0,0033	0,0000	0,0000	0,0000	
900	0,0037	0,0038	0,0017	0,0041	0,0064	0,0032	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Ένα σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από τους πιο πάνω πίνακες, είναι το γεγονός πως η δημιουργία ενός ενιαίου ειδικού δείκτη βλάστησης για αρχαιολογικές εφαρμογές είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα. Αυτό άλλωστε φανερώνεται μέσα από την ποικιλία δεικτών βλάστησης που έχουν δημιουργηθεί κατά καιρούς. Όπως αναφέρεται στην μελέτη των Stagakis *et al.* (2010), η ανακλαστικότητα της βλάστησης επηρεάζεται όχι μόνο από τη δομή του ίδιου του φυτού αλλά και από τις βιοχημικές του ιδιότητες. Επιπλέον όσο αφορά τη μελέτη της βλάστησης από τις δορυφορικές εικόνες θα πρέπει να προστεθούν και τα σφάλματα που προκύπτουν από τους δορυφορικούς δέκτες και την ατμόσφαιρα.

Με βάση τα ευρήματα της ανάλυσης που έχει προηγηθεί, φαίνεται ότι οι πολυφασματικοί δέκτες οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος είναι σε θέση να καταγράψουν τις διαφοροποιήσεις της βλάστησης, λόγω ύπαρξης αρχαιολογικών καταλοίπων. Σημαντικές διαφοροποιήσεις -εξαιρουμένου του μπλε μήκους κύματος- φαίνεται να υπάρχουν στην περιοχή γύρω από τα 800nm με 700nm (εγγύς υπέρυθρο με κόκκινη ακμή).

Επομένως, ένας γενικός δείκτης, ο οποίος θα είναι σε θέση να καταγράψει διαφοροποιήσεις της βλάστησης λόγω αρχαιολογικών καταλοίπων, θα πρέπει να εστιάζει στα φασματικά χαρακτηριστικά κοντά στα 800nm με 700nm. Ο δείκτης αυτός θα πρέπει να ακολουθεί την πιο κάτω γενική μορφή:

$$\mathbf{A.I} = f(p_{\approx 800}, p_{\approx 700})$$

Όπου

A.I. = αρχαιολογικός δείκτης (Archaeological Index, A.I.)

$p_{\approx 800}$ = ακτινοβολία περίπου στα 800 nm

$p_{\approx 700}$ = ακτινοβολία περίπου στα 700 nm

Ο αρχαιολογικός δείκτης μπορεί να εκφραστεί πλέον και μαθηματικά ως η διαφορά ανακλαστικότητας ανάμεσα σε αυτά τα δύο υπερφασματικά κανάλια (Simple Archaeological Index, S.A.I.) ή ακόμη να εκφραστεί και ως ο λόγος των δύο καναλιών (Normalized Difference Archaeological Index, N.D.A.I.), όπως φαίνεται στη συνέχεια

$$\mathbf{Simple\ A.I.} = p_{800} - p_{700}$$

$$\mathbf{Normalized\ Difference\ A.I.} = (p_{800} - p_{700}) / (p_{800} + p_{700})$$

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, ο κάθε χρήστης πλέον θα είναι σε θέση εκ των προτέρων να αναγνωρίζει ποιους από τους διαθέσιμους δείκτες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία δύναται να χρησιμοποιεί για τον εντοπισμό υπεδάφιων καταλοίπων (δείκτες με χρήση στο κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο φάσμα, π.χ. NDVI). Σε περίπτωση μελέτης υπερφασματικών δορυφορικών δεδομένων τότε ο χρήστης θα μπορεί να εφαρμόσει τον αρχαιολογικό δείκτη απευθείας στην εικόνα. Πρέπει να τονιστεί ότι ο αρχαιολογικός δείκτης είναι σύμφωνος και με την πρόσφατη έρευνα των Bennett *et al.*, (2012) όπου προσδιόρισαν το βέλτιστο φασματικό εύρος στο 711 nm. Σημειώνεται ότι η ανάλυση αυτή αφορά μόνο περιοχές με κάλυψη από βλάστηση. Παράλληλα οι δορυφορικές εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να έχουν τύχει ατμοσφαιρικής διόρθωσης αφού η επίδραση της ατμόσφαιρας διαφοροποιεί σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα, όπως άλλωστε έχει δείξει και η έρευνα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5.4.

7.2.3. Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Επιπλέον έγινε μια προσπάθεια συμπίεσης όλων των φασματικών υπογραφών που έχουν παρθεί από δύο ελεγχόμενα πεδία. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόστηκε η μέθοδος Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών (PCA). Η τεχνική αυτή συμπιέζει την αρχική

πληροφορία, σε λιγότερες συνιστώσες, μειώνοντας έτσι τον πλεονασμό από συσχετίσεις μεταξύ των καναλιών που χαρακτηρίζει κυρίως τα υπερφασματικά δεδομένα. Οι παραγόμενες συνιστώσες ταξινομούνται με φθίνουσα σειρά περιεχόμενης πληροφορίας. Έτσι οι πρώτες συνιστώσες (PCA 1, PCA 2 κ.ο.κ.) εμπεριέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό της πληροφορίας και είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους.

Για τις δυο περιοχές μελέτης προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζει ο Πίνακας 32. Αυτό που καταγράφεται, είναι ότι οι δύο πρώτες κύριες συνιστώσες (PCA 1 και PCA 2) μπορεί να “εξηγήσουν” ποσοστό μεγαλύτερο από 90% της μεταβλητότητας όλων των δεδομένων. Δηλαδή, κάποιος χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PCA σε δορυφορικές και υπερφασματικές εικόνες αναμένεται να μπορεί να συμπίσει την πρωτογενή εικόνα χωρίς σημαντικές απώλειες πληροφορίας. Μάλιστα πρόσφατα οι Aquino *et al.* (2012) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τεχνική PCA μπορεί να βοηθήσει σημαντικά για τον εντοπισμό υπεδάφινων στόχων μέσα από τη χρήση υπερφασματικών δεδομένων.

Πίνακας 32: Αποτελέσματα ανάλυσης κύριων συνιστωσών για την περιοχή Αχέλειας και Αλάμπρας.

Περιοχή Αχέλειας			Περιοχή Αλάμπρας		
	Ολική μεταβλητότητα (%)	αθροιστική ολικής μεταβλητότητα (%)		Ολική μεταβλητότητα (%)	αθροιστική ολικής μεταβλητότητα (%)
PCA 1	75,4		PCA 1	72,9	
PCA 2	19,9	95,3	PCA 2	18,6	91,5
PCA 3	2,2	97,4	PCA 3	2,8	94,3

Μια λεπτομερέστερη ανάλυση των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών δείχνει τόσο ο Πίνακας 33 όσο και ο Πίνακας 34 για την περιοχή Αχέλειας και Αλάμπρας αντίστοιχα. Οι δύο πίνακες παρουσιάζουν τους συντελεστές του γραμμικού μετασχηματισμού για τις πρώτες 7 κύριες συνιστώσες. Παρόλα αυτά, όπως φάνηκε και πιο πάνω, αρκούν οι δύο πρώτες κύριες συνιστώσες για να εξηγήσουν ποσοστό πέραν του 90% της διασποράς των αρχικών αποτελεσμάτων. Όπως φαίνεται στους πίνακες, μεγαλύτερος συντελεστής βαρύτητας υπάρχει στο

εγγύς υπέρυθρο φάσμα (από 750 – 900 nm) για την πρώτη κύρια συνιστώσα (PCA 1) και ακολουθεί το κόκκινο μήκος κύματος (600 -700 nm). Αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των φασματικών υπογραφών της βλάστησης στα δύο ελεγχόμενα πεδία. Μάλιστα, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 200 αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε περιπτώσεις με υψηλή ανακλαστικότητα της βλάστησης στο εγγύς υπέρυθρο, δηλαδή, όταν τα φυτά είναι σε πλήρη άνθηση. Στην Εικόνα 201 και Εικόνα 202 απεικονίζεται οπτικά το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης PCA για τις δύο περιοχές μελέτης. Όπως φαίνεται μετά τις δύο πρώτες κύριες συνιστώσες, υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ των νέων αξόνων που δημιουργήθηκαν, πράγμα που δικαιολογείται με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζει ο Πίνακας 32.

Πίνακας 33: Συντελεστές για την κάθε κύρια συνιστώσα από δεδομένα της περιοχής Αχέλειας

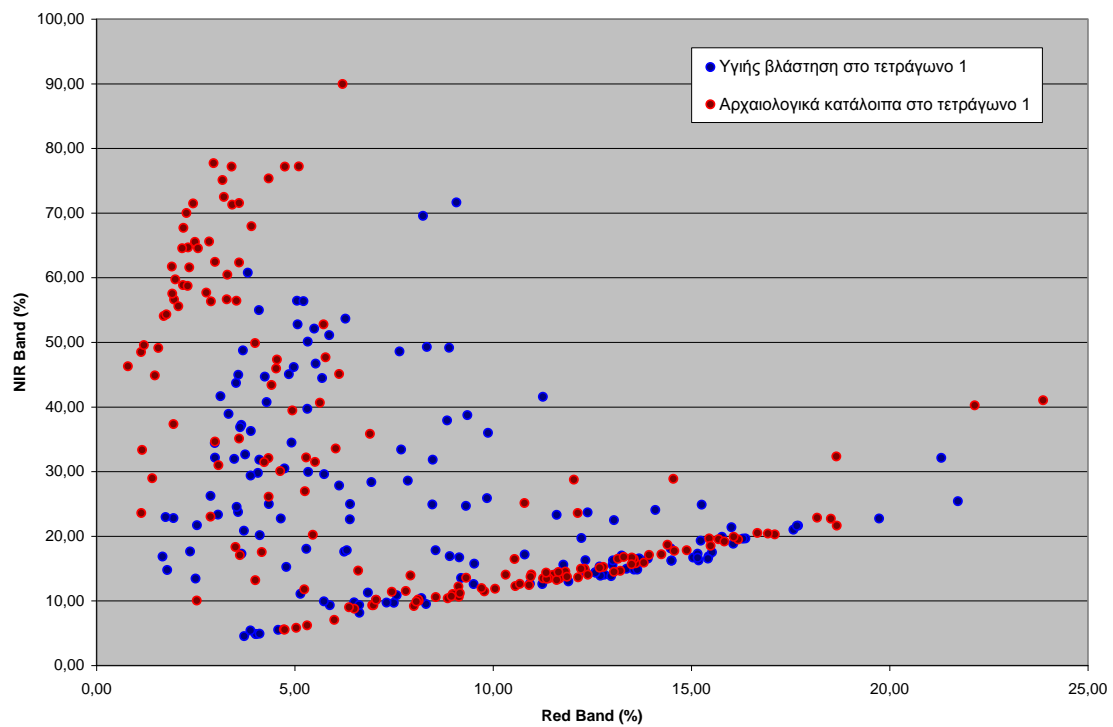
Περιοχή Αχέλειας							
μήκος κύματος (nm)	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 5	PCA 6	PCA 7
450	0,02	0,10	0,04	0,20	0,20	-0,18	0,01
460	0,02	0,10	0,04	0,19	0,18	-0,18	0,07
470	0,02	0,11	0,04	0,19	0,19	-0,18	-0,01
480	0,02	0,11	0,05	0,17	0,18	-0,18	0,08
490	0,03	0,12	0,05	0,17	0,18	-0,19	0,06
500	0,03	0,12	0,05	0,16	0,21	-0,17	-0,02
510	0,02	0,13	0,03	0,13	0,23	-0,15	0,04
520	0,02	0,13	-0,03	0,13	0,22	-0,10	0,10
530	0,01	0,13	-0,11	0,15	0,16	0,00	-0,09
540	0,01	0,14	-0,16	0,17	0,10	0,08	-0,19
550	0,01	0,15	-0,18	0,16	0,04	0,15	-0,05
560	0,01	0,16	-0,17	0,16	-0,02	0,21	0,09
570	0,02	0,18	-0,13	0,13	-0,01	0,25	-0,05
580	0,03	0,19	-0,06	0,09	0,02	0,24	-0,13
590	0,04	0,20	-0,02	0,06	0,00	0,21	0,08
600	0,04	0,20	0,00	0,04	-0,03	0,19	0,14
610	0,04	0,21	0,03	0,03	-0,04	0,17	0,09
620	0,05	0,22	0,07	0,01	-0,03	0,12	-0,03
630	0,05	0,22	0,08	-0,01	-0,03	0,09	-0,04
640	0,05	0,22	0,10	-0,02	-0,08	0,09	0,04
650	0,06	0,23	0,14	-0,04	-0,12	0,04	0,08

660	0,06	0,23	0,18	-0,05	-0,16	-0,04	-0,07
670	0,07	0,23	0,23	-0,07	-0,22	-0,20	-0,13
680	0,07	0,24	0,26	-0,11	-0,25	-0,28	-0,12
690	0,06	0,24	0,21	-0,18	-0,12	-0,16	0,09
700	0,04	0,24	0,00	-0,27	0,10	0,08	-0,03
710	0,00	0,22	-0,25	-0,29	0,08	0,12	0,05
720	-0,04	0,19	-0,40	-0,29	0,04	-0,07	0,16
730	-0,11	0,14	-0,44	-0,19	-0,06	-0,27	-0,13
740	-0,17	0,09	-0,32	-0,02	-0,15	-0,35	-0,12
750	-0,21	0,06	-0,16	0,15	-0,23	-0,20	-0,09
760	-0,23	0,04	-0,07	0,19	-0,31	-0,08	0,72
770	-0,24	0,04	-0,01	0,23	-0,21	0,07	-0,46
780	-0,24	0,03	0,02	0,19	-0,18	0,05	-0,04
790	-0,24	0,03	0,04	0,14	-0,12	0,05	0,03
800	-0,24	0,03	0,05	0,10	-0,07	0,05	0,00
810	-0,24	0,03	0,07	0,05	-0,01	0,07	0,00
820	-0,24	0,04	0,07	0,00	0,02	0,07	-0,02
830	-0,24	0,04	0,07	-0,02	0,04	0,06	0,01
840	-0,24	0,04	0,08	-0,04	0,07	0,04	-0,03
850	-0,24	0,03	0,09	-0,06	0,10	0,02	0,01
860	-0,24	0,03	0,10	-0,09	0,13	0,01	0,00
870	-0,25	0,04	0,10	-0,11	0,15	0,03	-0,03
880	-0,25	0,04	0,10	-0,14	0,18	0,02	0,00
890	-0,24	0,04	0,10	-0,16	0,20	0,02	-0,01
900	-0,24	0,04	0,10	-0,22	0,20	0,01	0,03

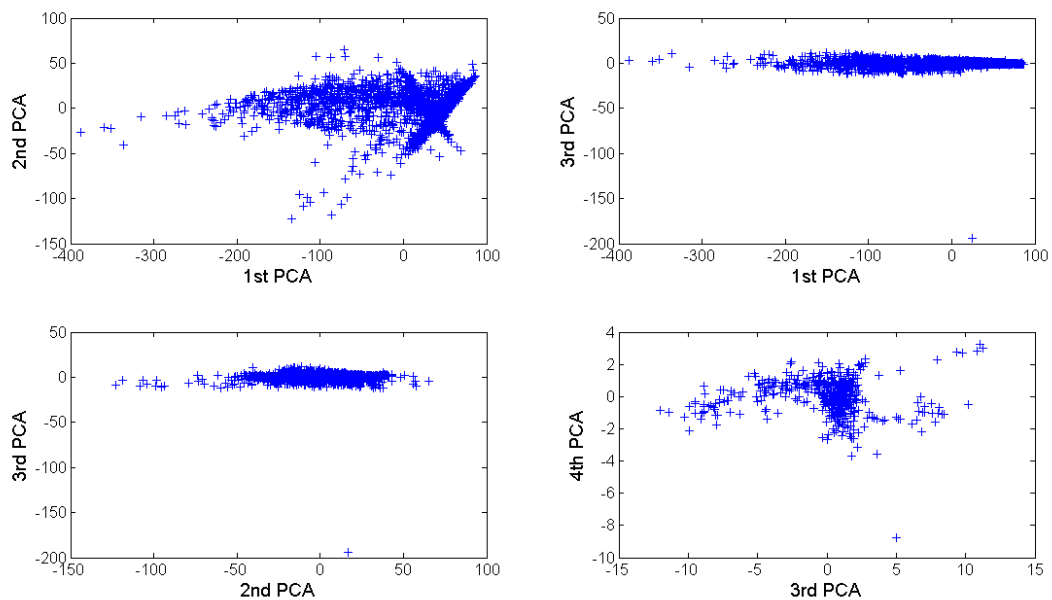
Πίνακας 34: Συντελεστές για την κάθε κύρια συνιστώσα από δεδομένα της περιοχής Αλάμπρας

Περιοχή Αλάμπρας							
μήκος κύματος (nm)	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 5	PCA 6	PCA 7
450	0,01	-0,11	0,01	0,10	0,19	-0,24	0,11
460	0,02	-0,11	0,01	0,10	0,19	-0,22	0,11
470	0,02	-0,12	0,01	0,11	0,17	-0,23	0,11
480	0,02	-0,13	0,01	0,11	0,16	-0,22	0,13
490	0,02	-0,13	0,01	0,11	0,15	-0,22	0,12
500	0,02	-0,14	0,00	0,10	0,14	-0,23	0,10
510	0,01	-0,14	0,01	0,07	0,14	-0,22	0,06
520	0,01	-0,14	0,02	0,03	0,17	-0,18	0,01

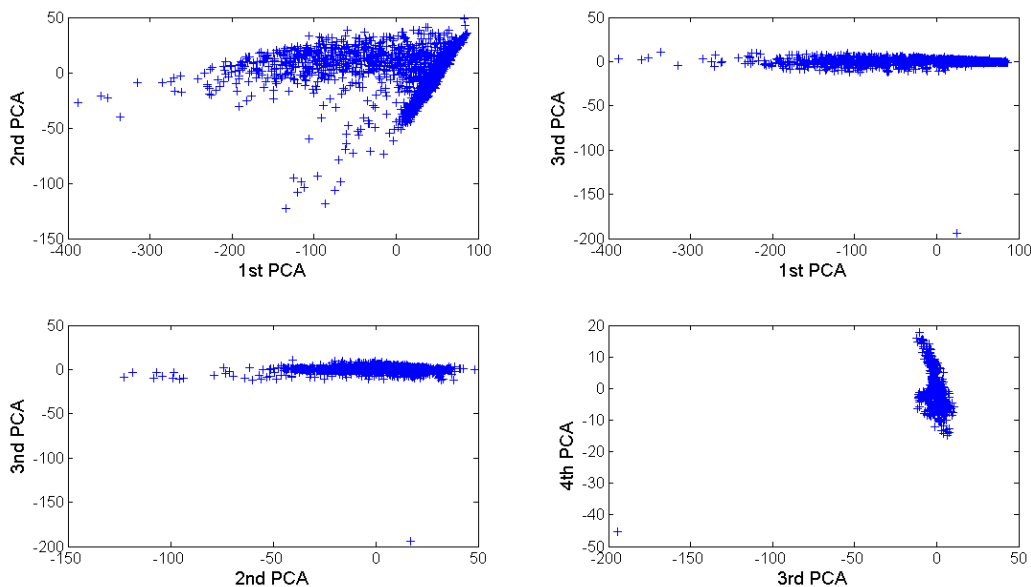
530	0,00	-0,14	0,04	-0,03	0,23	-0,10	-0,04
540	0,00	-0,14	0,05	-0,06	0,25	-0,02	-0,10
550	-0,01	-0,15	0,05	-0,08	0,25	0,06	-0,15
560	-0,01	-0,15	0,05	-0,08	0,24	0,14	-0,18
570	0,00	-0,17	0,04	-0,05	0,18	0,14	-0,21
580	0,01	-0,18	0,02	-0,02	0,12	0,11	-0,22
590	0,01	-0,19	0,01	0,00	0,08	0,11	-0,19
600	0,01	-0,20	0,00	0,00	0,05	0,12	-0,16
610	0,02	-0,21	0,00	0,02	0,01	0,12	-0,13
620	0,02	-0,22	-0,01	0,04	-0,04	0,10	-0,10
630	0,02	-0,22	-0,02	0,05	-0,07	0,09	-0,08
640	0,02	-0,23	-0,03	0,06	-0,09	0,12	-0,03
650	0,03	-0,24	-0,04	0,10	-0,13	0,12	0,05
660	0,03	-0,25	-0,04	0,13	-0,15	0,13	0,13
670	0,03	-0,25	-0,05	0,16	-0,17	0,11	0,24
680	0,03	-0,26	-0,06	0,17	-0,21	0,09	0,28
690	0,03	-0,26	-0,07	0,08	-0,28	-0,03	0,15
700	0,01	-0,24	-0,04	-0,14	-0,26	-0,14	-0,15
710	-0,03	-0,20	0,00	-0,37	-0,15	-0,08	-0,19
720	-0,07	-0,16	0,03	-0,52	-0,01	-0,03	0,07
730	-0,13	-0,10	0,33	-0,40	-0,11	-0,15	0,18
740	-0,18	-0,05	0,32	-0,23	0,00	0,02	0,33
750	-0,21	-0,02	0,29	-0,01	0,05	0,13	0,22
760	-0,23	0,00	0,05	0,03	0,25	0,45	0,30
770	-0,24	0,00	0,25	0,18	0,00	0,04	-0,06
780	-0,24	0,00	0,24	0,19	-0,04	0,01	-0,11
790	-0,24	0,00	0,25	0,20	-0,10	-0,06	-0,17
800	-0,24	-0,01	0,27	0,21	-0,17	-0,14	-0,24
810	-0,24	-0,01	0,15	0,16	-0,11	-0,08	-0,18
820	-0,24	-0,01	-0,18	0,01	0,15	0,16	0,05
830	-0,24	-0,01	-0,19	0,00	0,11	0,11	0,04
840	-0,24	-0,01	-0,19	-0,01	0,08	0,05	0,03
850	-0,25	-0,01	-0,20	-0,01	0,04	0,00	0,01
860	-0,25	-0,01	-0,21	-0,02	0,01	-0,04	-0,01
870	-0,25	-0,01	-0,22	-0,03	-0,02	-0,08	-0,01
880	-0,25	-0,01	-0,22	-0,04	-0,05	-0,12	-0,02
890	-0,25	-0,02	-0,23	-0,05	-0,07	-0,14	-0,01
900	-0,25	-0,02	-0,23	-0,06	-0,10	-0,16	-0,03



Εικόνα 200: Ανακλαστικότητα του υπεδάφινου καταλοίπου (κόκκινο χρώμα) και υγιούς βλάστησης (μπλε χρώμα) στα κανάλια 3 και 4 του δορυφόρου Landsat TM/ETM+.



Εικόνα 201: Γραφική αναπαράσταση των τελικών αποτελεσμάτων από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για την περιοχή Αχέλειας.

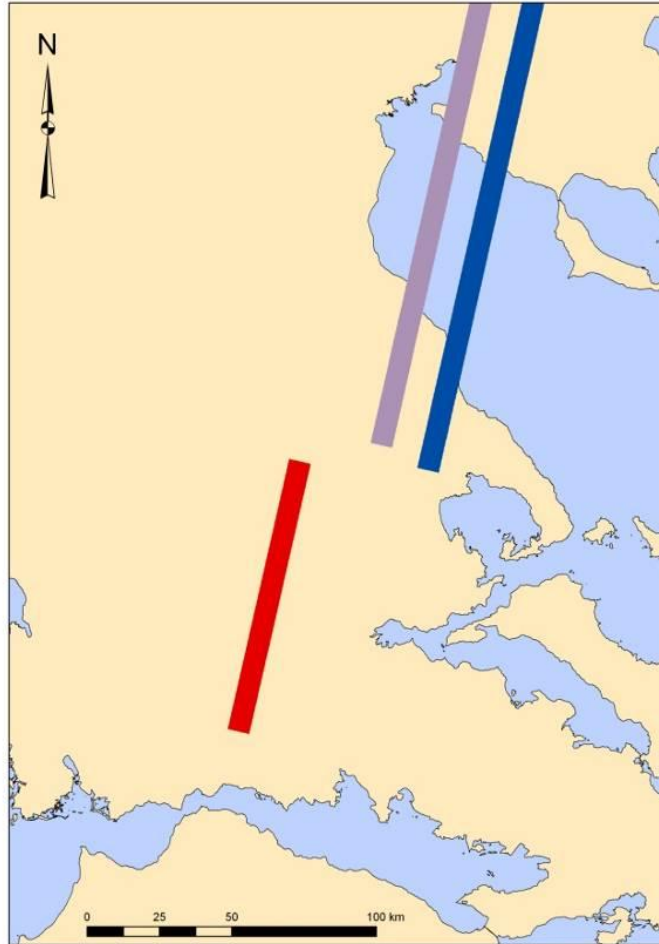


Εικόνα 202: Γραφική αναπαράσταση των τελικών αποτελεσμάτων από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για την περιοχή Αλάμπρας.

7.2.4. Εφαρμογή Αρχαιολογικού Δείκτη σε υπερφασματικές δορυφορικές εικόνες

Με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα έγινε προσπάθεια εκτίμησης της καταλληλότητας του αρχαιολογικού δείκτη (υπό μορφή κανονικοποιημένου δείκτη), όπως έχει προκύψει από την προηγούμενη ανάλυση, σε μια σειρά από υπερφασματικές δορυφορικές εικόνες EO-1, Hyperion στην περιοχή της Θεσσαλίας. Για το σκοπό αυτό υπέστησαν επεξεργασία τρεις διαφορετικές εικόνες της περιοχής, και συγκεκριμένα οι 03-09-2001, 19-09-2001 και 25-07-2004. Η περιοχή κάλυψης των εικόνων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 203.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε διάφορες μαγούλες της Θεσσαλίας, μετά από επεξεργασία των παραπάνω δορυφορικών εικόνων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι έγχρωμα σύνθετα όπως προκύπτουν από τα υπερφασματικά κανάλια του δορυφόρου καθώς επίσης και υπερφασματικοί δείκτες βλάστησης. Επίσης παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα εφαρμογής του αρχαιολογικού δείκτη.

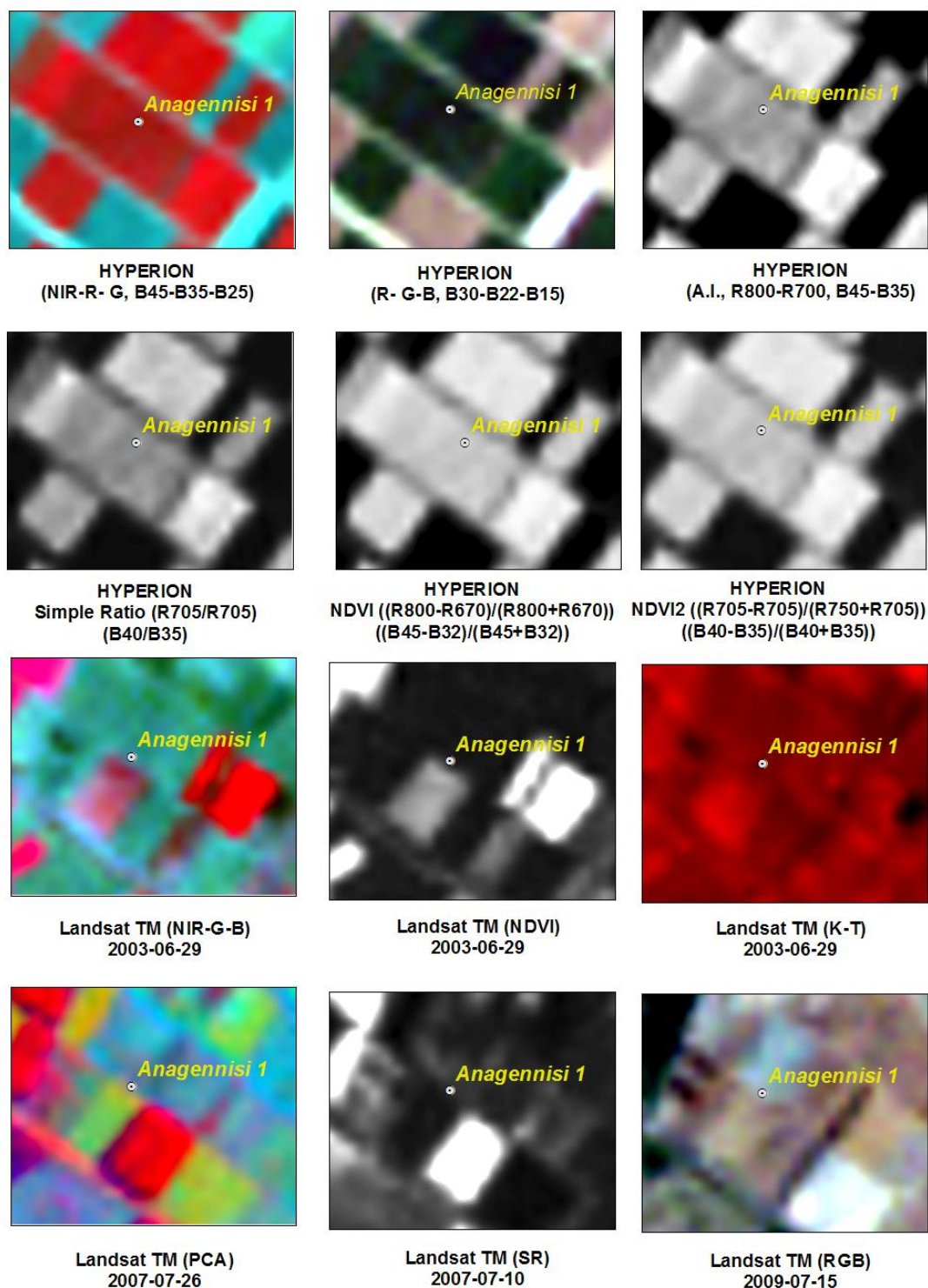


Εικόνα 203: Περιοχή κάλυψης εικόνων HYPERION στο Θεσσαλικό κάμπο

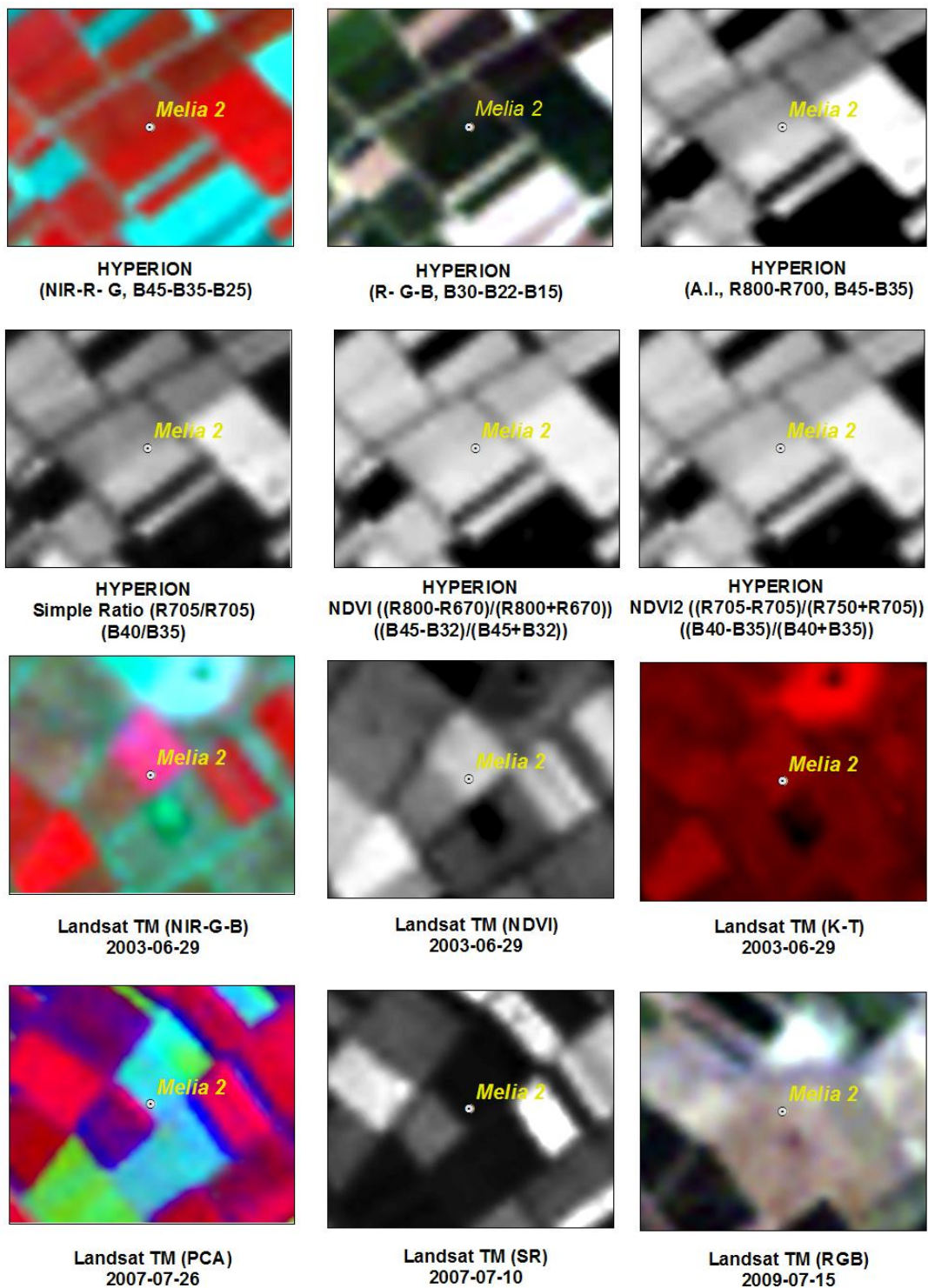
Όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν, η εφαρμογή του αρχαιολογικού δείκτη είναι σε θέση να αναδείξουν καλύτερα τη μαγούλα Αναγέννηση 1 σε σχέση με άλλους δείκτες ή έγχρωμα σύνθετα της ίδιας εικόνας (Εικόνα 204). Η μαγούλα γίνεται πιο ευδιάκριτη μετά την εφαρμογή του δείκτη, ενώ σε μερικές περιπτώσεις (έγχρωμα σύνθετα και εικόνα NDVI) η μαγούλα δεν μπορεί να εντοπιστεί. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στη θέση Μελιά 2 (Εικόνα 205). Αντίθετα στην περίπτωση όπου η περιοχή της μαγούλας δεν καλύπτεται από βλάστηση, όπως στην περίπτωση που φαίνεται στην Εικόνα 206, τότε τα τελικά αποτελέσματα είναι πολύ φτωγά.

Παράλληλα, η μαγούλα είναι ευδιάκριτη στην υπερφασματική εικόνα HYPERION σε αντίθεση με διάφορες πολυφασματικές εικόνες τύπου Landsat TM, που εξετάστηκαν για το σκοπό αυτό. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 204, τόσο η επεξεργασία

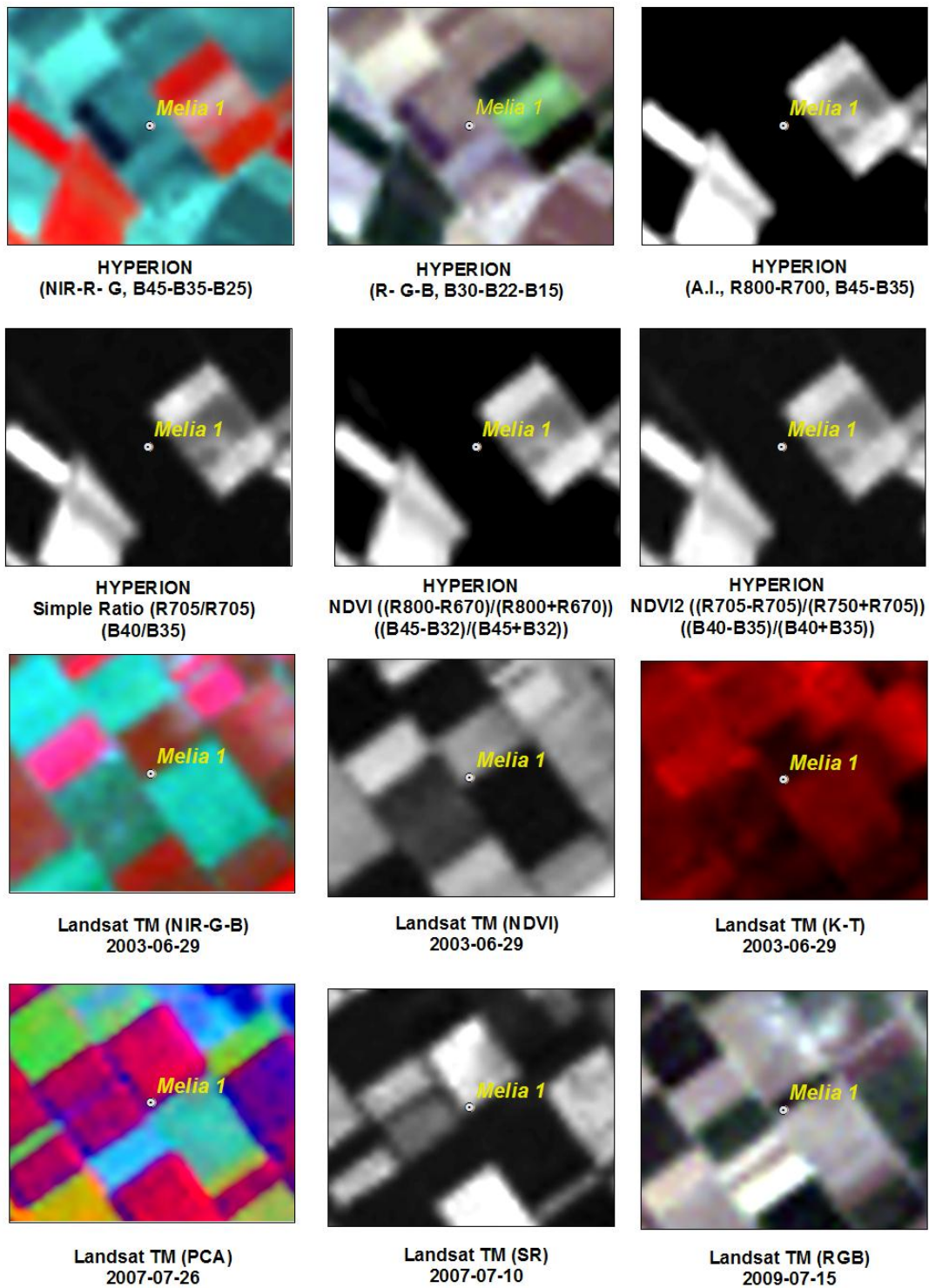
δεδομένων από πολυφασματικούς δέκτες όσο και άλλοι αλγόριθμοι (PCA, Tasseled Cap) έδωσαν πολύ φτωχά αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι η χωρική ανάλυση των δύο δορυφόρων είναι η ίδια.



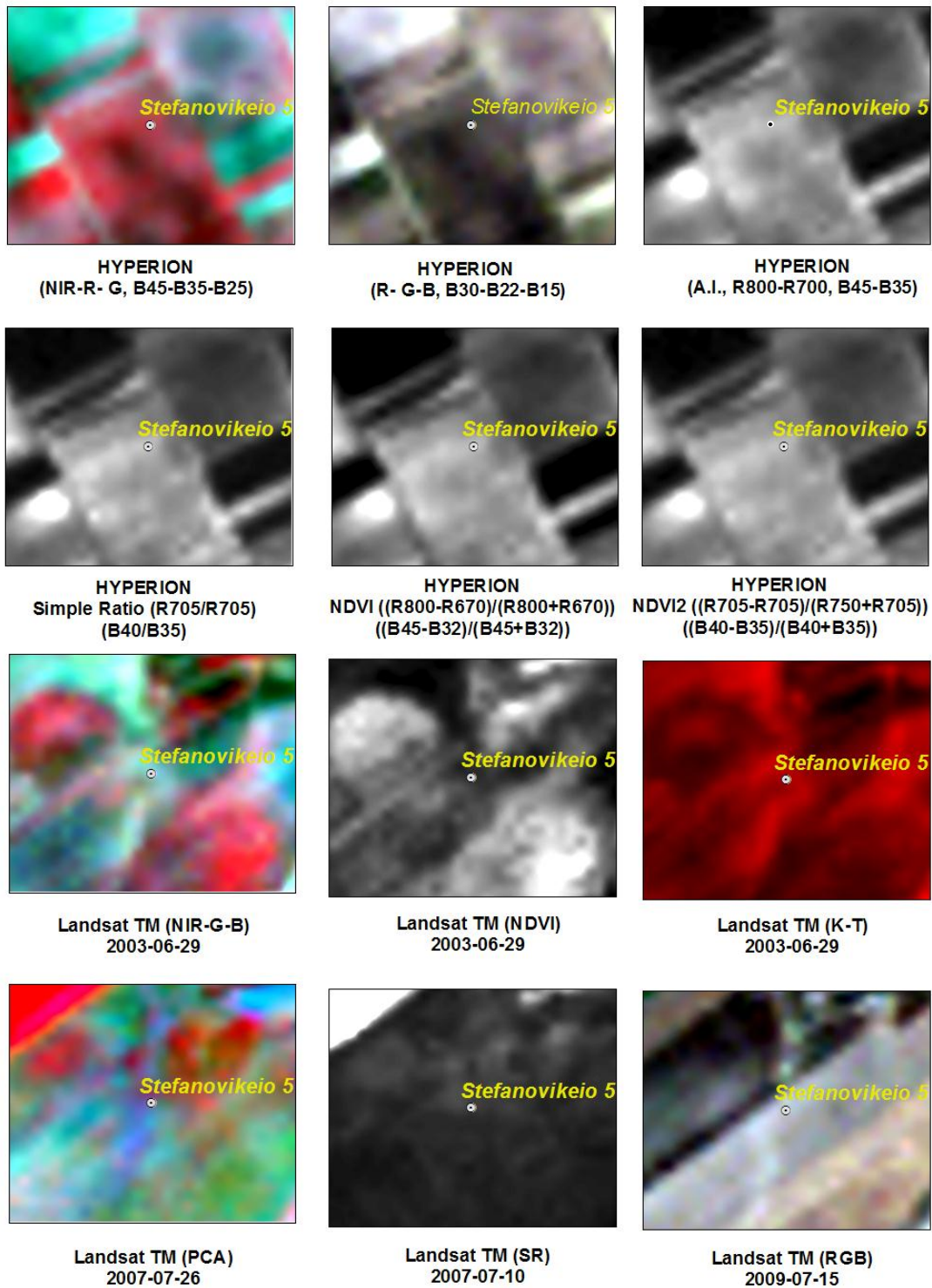
Εικόνα 204: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (03-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009) , στη θέση Αναγέννηση 1. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Αναγέννηση 1 μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.)



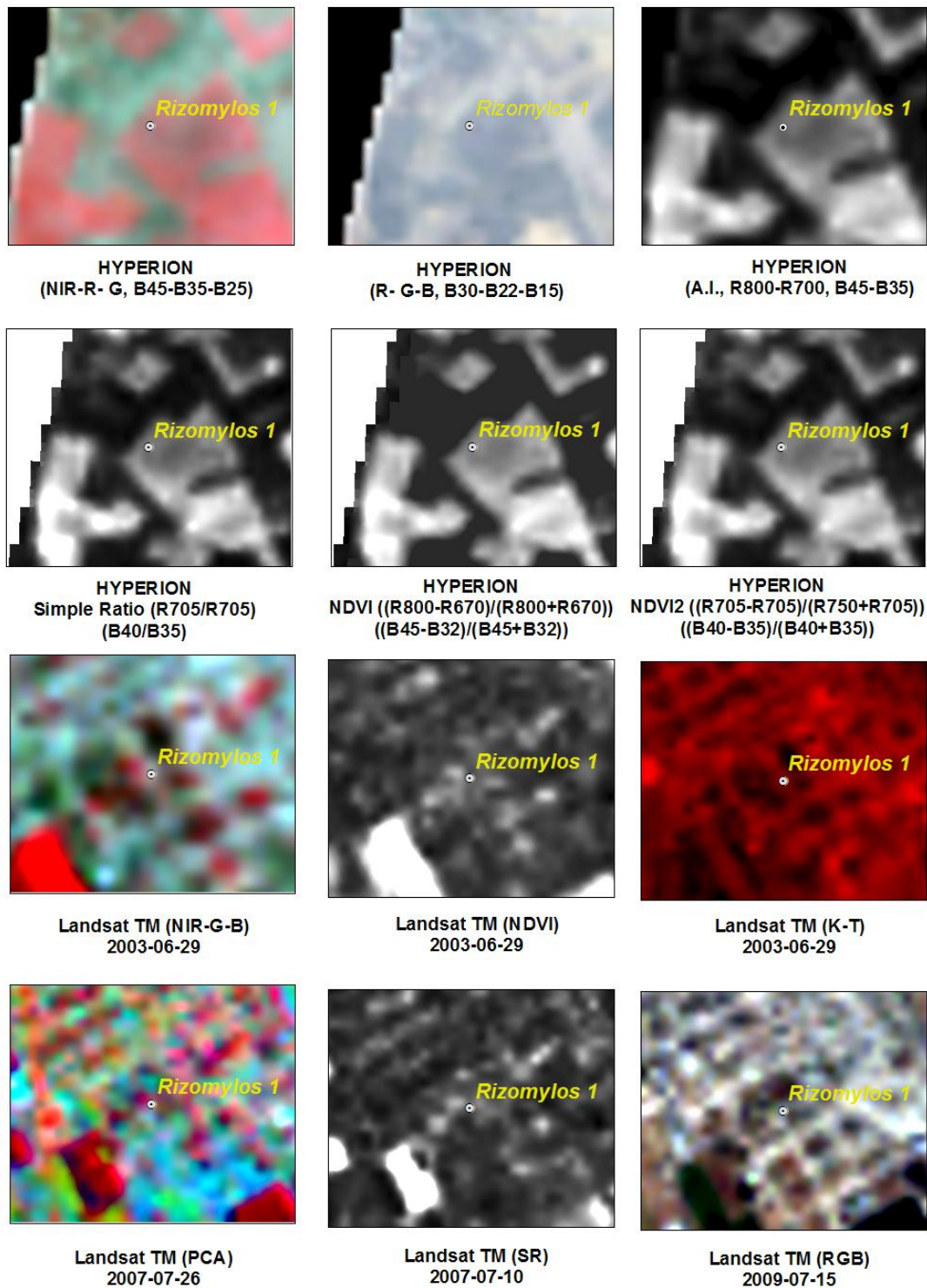
Εικόνα 205: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (03-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009), στη θέση Μελιά 2. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Μελία 2 μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.)



Εικόνα 206: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (03-09-2001) και Landsat TM (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009), στη θέση Μελιά 1. Η μη αναγνώριση διαφοροποιήσεων βλάστησης στη συγκεκριμένη αρχαιολογική θέση θα πρέπει να αποδοθεί στην απουσία βλάστησης.



Εικόνα 207: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας **HYPERION** (19-09-2001) και **Landsat TM** (29-06-2003 / 10-07-2007 / 26-07-2007 / 15-07-2009), στη θέση **Στεφανοβίκειο 5**. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα **Στεφανοβίκειο 5**, μετά την εφαρμογή του **Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.)**



Εικόνα 208: Αποτελέσματα επεξεργασίας δορυφορικής εικόνας HYPERION (19-09-2001) στη θέση Ριζόμυλος 1. Στην πρώτη γραμμή, τρίτη στήλη, απεικονίζεται η μαγούλα Ριζόμυλος 1, μετά την εφαρμογή του Αρχαιολογικού Δείκτη (Archaeological Index, A.I.)

Σε περισσότερες εφαρμογές που έγιναν και στις άλλες υπερφασματικές εικόνες HYPERION, σε άλλες μαγούλες, φαίνεται η δυνατότητα του νέου αρχαιολογικού δείκτη, όπως αυτός αναπτύχθηκε και περιγράφηκε στο πλαίσιο της παρούσας

διατριβής (βλ. Κεφ. 7.2). Επιπλέον φαίνεται ότι οι μαγούλες είναι ευδιάκριτες σε υπερφασματικές δορυφορικές εικόνες. Στην Εικόνα 207, η θέση Στεφανοβίκειο 5, είναι ευδιάκριτη μόνο στην εικόνα του αρχαιολογικού δείκτη και του Simple Ratio, όπως επίσης και στον κανονικοποιημένο δείκτη NDVI. Στις πολυφασματικές εικόνες τα αποτελέσματα δεν κρίνονται ικανοποιητικά. Στη θέση Ριζόμυλος 1 (Εικόνα 208), η μαγούλα είναι αμυδρώς διακριτή στους υπερφασματικούς δείκτες βλάστησης και τον αρχαιολογικό δείκτη και καθόλου στα έγχρωμα σύνθετα.

7.2.5. Ευαισθησία Αρχαιολογικού Δείκτη

Για σκοπούς αξιολόγησης του προτεινόμενου αρχαιολογικού δείκτη, έγινε μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης της ενίσχυσης που επιτυγχάνεται με τη χρήση του. Για τον σκοπό αυτόν, έγινε μια στατιστική επεξεργασία της ευαισθησίας του προτεινόμενου δείκτη. Ο εντοπισμός των διαφοροποιήσεων της βλάστησης επιτυγχάνεται μέσα από την οπτική διαφορά της βλάστησης πάνω από τα υπεδάφια κατάλοιπα σε σχέση με τον περίγυρο αυτής της συγκεκριμένης περιοχής. Επομένως το ποσοστό διαφοροποίησης μπορεί να εκδηλωθεί με τον πιο κάτω μαθηματικό τρόπο:

$$\text{Sensitivity} = | (\text{Value}_{\text{crop marks}} - \text{Value}_{\text{healthy crops}} / \text{Value}_{\text{healthy crops}}) | * 100$$

Όπου:

Sensitivity: το ποσοστό διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας του δείκτη στην περιοχή με αρχαιολογικό ενδιαφέρον με τον περίγυρο της. Το πρόσημο στην ανωτέρω σχέση είναι + για θετική ένδειξη (positive crop marks) και – για αρνητική ένδειξη (negative crop marks).

$\text{Value}_{\text{crop marks}}$: τιμή ανακλαστικότητας / δείκτη στην περιοχή με αρχαιολογικό ενδιαφέρον

$\text{Value}_{\text{healthy crops}}$: τιμή ανακλαστικότητας / δείκτη στην περιοχή με υγιή βλάστηση

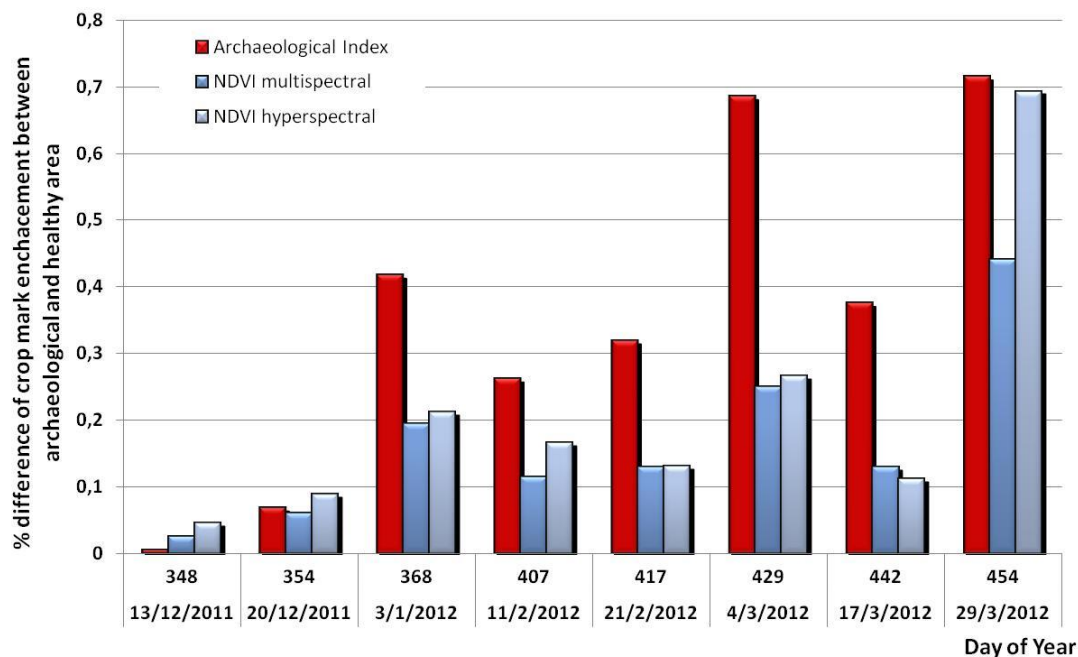
Ο υπολογισμός της ευαισθησίας του αρχαιολογικού δείκτη έγινε με βάση τις μετρήσεις στις περιοχές Αλάμπρας και Αχέλειας και έγινε σύγκριση με τις

αντίστοιχες διαφοροποιήσεις του πολυφασματικού δείκτη NDVI και του αντίστοιχου υπερφασματικού δείκτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 209 και Εικόνα 210. Όπως φαίνεται, για την περιοχή της Αλάμπρας, σε όλη τη διάρκεια του φαινολογικού κύκλου όπου το κριθάρι είναι σε άνθηση, ο αρχαιολογικός δείκτης είναι σε θέση να ενισχύσει περισσότερο από άλλους δείκτες τις θέσεις με τα υπεδάφια κατάλοιπα.

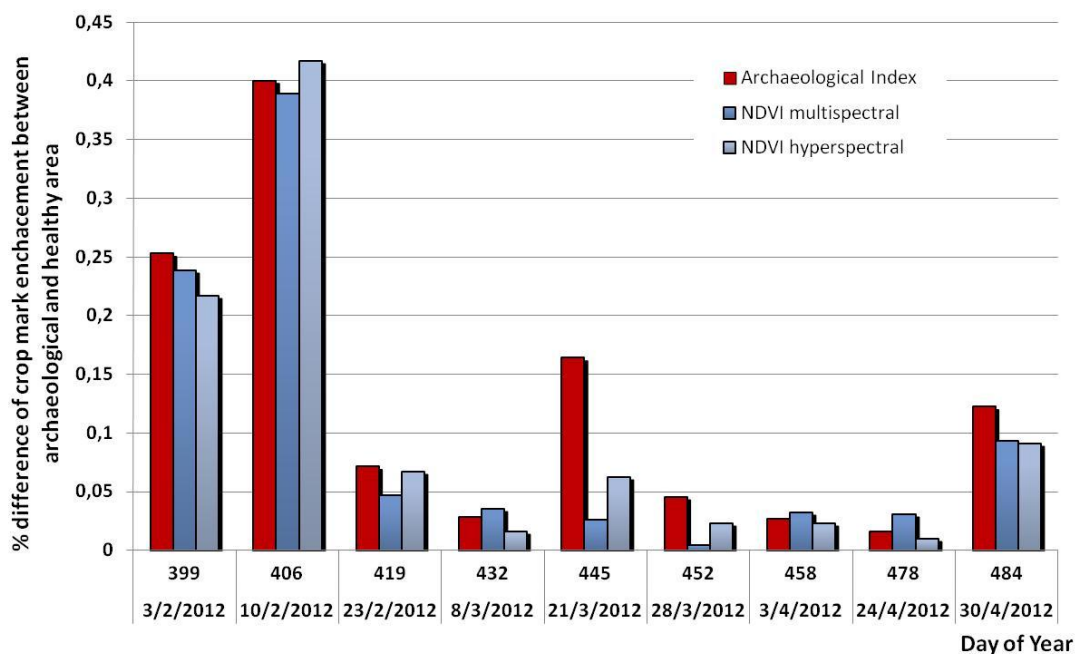
Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και για την περιοχή της Αχέλειας, όπου, αν και οι διαφοροποιήσεις είναι σαφώς μικρότερες, ο αρχαιολογικός δείκτης ήταν σε θέση να ενισχύσει περισσότερο και να αναδείξει αυτήν την διαφοροποίηση σε σχέση με τους άλλες δείκτες. Αυτή η ενίσχυση είναι σημαντική κατά τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο, περίοδο κατά την οποία το κριθάρι και σιτάρι είναι σε πλήρη άνθηση (Μάρτιος – Απρίλιος).

Επιπλέον σημειώνεται ότι η αντίθεση που καταγράφηκε όσο αφορά τις νεολιθικές θέσεις στην περιοχή της Θεσσαλίας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος Αρχαιολογικός Δείκτης κατέγραψε την μεγαλύτερη σχετική διαφορά αντίθεσης – contrast- της ίδιας της μαγούλας σε σχέση με τον περιβάλλον χώρο της ίδιας της μαγούλας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα ποσοστά αυτά είναι της τάξης των 27% και 60% για τις θέσεις *Αναγέννηση 1* (βλ. Εικόνα 204) και *Στεφανοβικείο 5* (βλ. Εικόνα 207).

Αντίθετα άλλοι δείκτες έδωσαν χαμηλότερα ποσοστά αντίθεσης όπως είναι για παράδειγμα ο δείκτης SR με 14% και 18% αντίστοιχα, ο δείκτης NDVI_{hyperspectral} με ποσοστά 8% και 44% και ο δείκτης NDVI_{2 hyperspectral} με ποσοστά αντίθεσης της τάξης των 11% και 33% για τις πιο πάνω μαγούλες. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τις εικόνες Landsat δεν υπολογίστηκαν γιατί η διαδικασία της φωτοερμηνείας και ο εντοπισμός των ίδιων των μαγούλων ήταν ένα εξαιρετικό δύσκολο εγχείρημα.



Εικόνα 209: Ενίσχυση της διαφοροποίησης της βλάστησης με τη χρήση του αρχαιολογικού δείκτη και του πολυφασματικού - υπερφασματικού δείκτη NDVI $((\rho_{800}-\rho_{670}) / (\rho_{800}+\rho_{670}))$ για το ελεγχόμενο πεδίο Αλάμπρας (κριθάρι)



Εικόνα 210: Ενίσχυση της διαφοροποίησης της βλάστησης με τη χρήση του αρχαιολογικού δείκτη και του πολυφασματικού - υπερφασματικού δείκτη NDVI $((\rho_{800}-\rho_{670}) / (\rho_{800}+\rho_{670}))$ για το ελεγχόμενο πεδίο Αχέλειας (σιτάρι)

7.3. Φασματική ευαισθησία δορυφορικών δεκτών για την παρακολούθηση της βλάστησης

Πέρα από την ανάπτυξη ενός νέου αρχαιολογικού δείκτη έγινε προσπάθεια εκτίμησης της καταλληλότητας διάφορων δορυφορικών δεκτών που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Αρχαιολογία. Η μελέτη αυτή αποσκοπούσε να καταδείξει τυχόν διαφοροποιήσεις που πιθανώς να καταγράφονται από τους διαφορετικούς δέκτες ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας με τον Αρχαιολογικό Δείκτη που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα.

7.3.1. Φασματικά χαρακτηριστικά δορυφορικών δεκτών

Όπως επισημαίνουν οι Chander *et al.* (2009), ο εντοπισμός και η ποσοτικοποίηση αλλαγών (π.χ. διαφοροποιήσεις της βλάστησης) μέσα από δορυφορικές εικόνες, εξαρτώνται πρωτίστως από τα ίδια τα χαρακτηριστικά του δέκτη του δορυφόρου, δηλαδή την χωρική και την φασματική του ανάλυση. Οι Teillet *et al.* (2007) αναφέρουν μάλιστα, ότι τα δορυφορικά δεδομένα τα οποία προκύπτουν από διαφορετικούς αισθητήρες, πρέπει να βαθμονομούνται ραδιομετρικά έτσι ώστε να βρίσκονται σε ένα κοινό σύστημα. Επιπλέον οι Trishchenko *et.al.* (2002) αναφέρουν ότι όλες οι σχετικές αβεβαιότητες της ραδιομετρικής βαθμονόμησης υπολογίζονται περίπου στο 5% σε κάθε αισθητήρα. Μάλιστα η ραδιομετρική βαθμονόμηση του αισθητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους (Teillet *et al.*, 2007):

- πριν από την εκτόξευση του δορυφόρου ή ακόμη και κατά τη διάρκεια περιφοράς του δορυφόρου στο διάστημα με τη χρήση ειδικών πηγών φωτός ή της ίδιας της ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. Markham *et al.*, 1997), ή
- μέσα από την προσομοίωση της ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση μοντέλων υπολογισμού ακτινοβολίας, radiative codes (π.χ. Trishchenko *et.al.*, 2002), ή
- από τις ίδιες τις δορυφορικές εικόνες οι οποίες λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. Teillet *et al.*, 2007).

Επιπλέον, δεν πρέπει να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι οι δορυφορικές απεικονίσεις θα πρέπει να διορθώνονται τόσο ατμοσφαιρικά όσο και γεωμετρικά πριν από οποιαδήποτε τεχνική μετά-επεξεργασίας (Lillesand *et al.*, 2004). Άλλες διορθώσεις

που θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη, είναι η γωνία του ήλιου, το υψόμετρο της περιοχής, η ημερομηνία λήψης της εικόνας κ.ά. (Campbell, 2002).

Απώτερος στόχος αυτής της έρευνας ήταν, να εξεταστούν τα φασματικά χαρακτηριστικά 7 διαφορετικών δορυφορικών αισθητήρων μέσα από την σύγκριση με τις επίγειες φασματικές υπογραφές, που έχουν προκύψει από το ελεγχόμενο πεδίο στην Αλάμπρα. Ο τελικός στόχος αυτής της μελέτης ήταν να αξιολογήσει την ευαισθησία των δεκτών για τον εντοπισμό των διαφοροποιήσεων στη βλάστηση.

Η αναγωγή των επίγειων σημειακών φασματοραδιομετρικών μετρήσεων σε εικονοστοιχεία ενός δορυφορικού δέκτη, έχει απασχολήσει στο παρελθόν τους Wu και Liang Li (2009), Milton *et al.* (2009) και Curran και Williamson (1986). Επιπλέον η αναγωγή των δεδομένων από μια κλίμακα σε άλλη με αλλαγή του μεγέθους του εικονοστοιχείου (scaling technique), έχει μελετηθεί διεξοδικά από τους Malenovský *et al.* (2007). Η προσέγγιση bottom-up για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την πληροφορία από μεγαλύτερες σε μικρότερες κλίμακες (π.χ. από μετρήσεις με τα επίγεια φασματοραδιόμετρα σε δορυφορικές εικόνες). Όμως, όπως επισημαίνει ο Jarvis (1995), η αναγωγή δεδομένων μέσα από την αλλαγή της κλίμακας παρατήρησης, αποτελεί μια πραγματική επιστημονική πρόκληση, λόγω του μη-γραμμικού χαρακτήρα μεταξύ των διεργασιών και των μεταβλητών που παρατηρούνται στα αντικείμενα, αλλά και στην ετερογένεια των χαρακτηριστικών τους.

Η επιλογή του αλγόριθμου αναγωγής στην παρούσα διερεύνηση έχει στηριχθεί σε πολλούς παράγοντες. Ο απώτερος σκοπός της έρευνας δεν ήταν να προσομοιώσει όλες τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν κατά τη στιγμή λήψης του δορυφόρου, αλλά να μελετήσει ειδικά τις φασματικές δυνατότητες των αισθητήρων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η φασματική ευαισθησία, τα φίλτρα RSR, του κάθε αισθητήρα. Τέτοιες μετατροπές έχουν γίνει και σε άλλες έρευνες (βλ. Tran *et al.*, 2011; Marceau *et al.*, 1994; Papadavid *et al.*, 2011c).

Η μελέτη περιλαμβάνει επτά δορυφορικούς δέκτες μεσαίας, υψηλής και πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας. Τέτοιοι δορυφορικοί αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τον εντοπισμό υπεδάφίων αρχαιολογικών καταλοίπων,

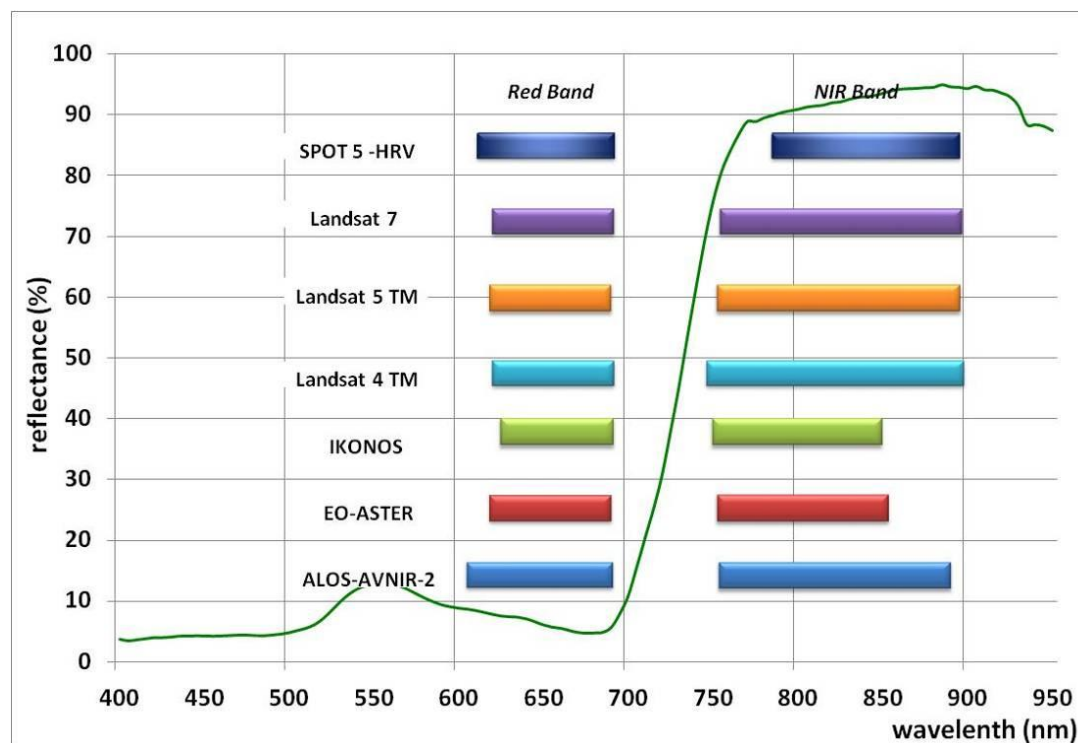
χρησιμοποιώντας το κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο φασματικό κανάλι. Ο Πίνακας 35 παρουσιάζει τη φασματική και χωρική ανάλυση των δορυφορικών αισθητήρων που μελετήθηκαν:

Πίνακας 35: Χαρακτηριστικά αισθητήρων που μελετήθηκαν για την φασματική τους ευαισθησία.

Δορυφορικός αισθητήρας	Φασματική ανάλυση		Χωρική ανάλυση	
	Κανάλι	Μήκος κύματος		
ALOS-AVNIR-2	1	Μπλε	0.42-0.50 (μm)	10m
	2	Πράσινο	0.52-0.60 (μm)	
	3	Κόκκινο	0.61-0.69 (μm)	
	4	Εγγύς υπέρυθρο	0.76-0.89 (μm)	
EO-ASTER	1	Πράσινο	0.52-0.60 (μm)	15m
	2	Κόκκινο	0.63 - 0.69 (μm)	
	3	Εγγύς υπέρυθρο	0.76 - 0.86 (μm)	
IKONOS	1	Μπλε	0.445-0.516 μm	4m
	2	Πράσινο	0.506-0.595 μm	
	3	Κόκκινο	0.632-0.698 μm	
	4	Εγγύς υπέρυθρο	0.757-0.853 μm	
Landsat 4 TM Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+	1	Μπλε	0.45-0.52 (μm)	30m
2	Πράσινο	0.52-0.60 (μm)		
3	Κόκκινο	0.63-0.69 (μm)		
4	Εγγύς υπέρυθρο	0.75-0.90 (μm)		
SPOT 5 -HRV	1	Πράσινο	0.50-0.59 (μm)	10m
	2	Κόκκινο	0.61 - 0.68 (μm)	
	3	Εγγύς υπέρυθρο	0.78 - 0.89 (μm)	

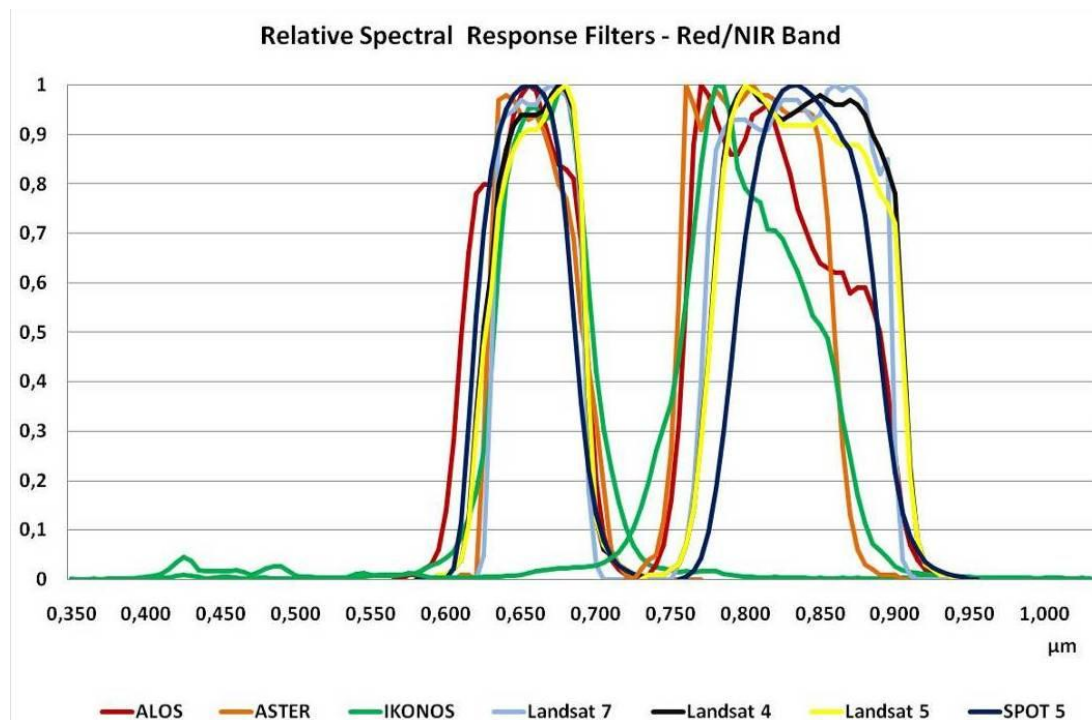
Η Εικόνα 211 παρουσιάζει το φασματικό εύρος των αισθητήρων ALOS-AVNIR-2, EO-ASTER, IKONOS, Landsat 4 and 5 TM/ 7 ETM+, και SPOT 5 –HRV σε σχέση με μια τυπική φασματική υπογραφή της βλάστησης. Διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο φασματικό εύρος των πιο πάνω δεκτών, ιδιαίτερα στο εγγύς υπέρυθρο: ο δορυφόρος IKONOS έχει εύρος της τάξης των 0.096 μm σε αντίθεση με τους άλλους αισθητήρες που καταλαμβάνουν εύρος από 0.100 έως 0.150 μm. Όπως φαίνεται μάλιστα, όλοι οι δέκτες έχουν παρόμοια, άλλα όχι ίδια, φασματική ανάλυση (εκτός των δεκτών Landsat). Σημειώνεται ότι, αν και η χωρική ανάλυση δεν έχει μελετηθεί

σε αυτή την έρευνα, εντούτοις αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τον εντοπισμό υπεδάφίων στόχων.



Εικόνα 211: Φασματικό εύρος του κόκκινο και εγγύς υπέρυθρου καναλιού των δορυφορικών δεκτών του Πίνακας 35. Με πράσινη γραμμή η φασματική υπογραφή υγιούς βλάστησης.

Η Εικόνα 212 δείχνει τα φίλτρα RSR για τους αισθητήρες των ALOS-AVNIR-2, EO-ASTER, IKONOS, Landsat 4, 5 TM/ 7 ETM+, και SPOT 5 -HRV για το κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Αυτά τα φίλτρα καλύπτουν ένα εύρος φάσματος στα μήκη κύματος περίπου από τα 0.550 μέχρι και τα 0.950 μm . Αν και, όπως φαίνεται τόσο στην Εικόνα 211 όσο και στην Εικόνα 212, η φασματική ανάλυση των δορυφόρων ποικίλλει, εντούτοις στη βιβλιογραφία, πολύ συχνά αναφέρονται με το ίδιο όνομα (Red band, NIR band) χωρίς να γίνεται αντιληπτή η διαφορετική φασματική τους ανάλυση.











Εικόνα 212: RSR φίλτρα για το κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο κανάλι όλων των αισθητήρων του Πίνακας 35.

7.3.2. Επίγειες μετρήσεις

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν οκτώ (8) φασματικές υπογραφές από το πεδίο ελέγχου της Αλάμπρας, όπως δείχνει και ο Πίνακας 36. Αυτές οι φασματικές υπογραφές έχουν παρθεί σε διαφορετικές επισκέψεις στο χώρο με τη χρήση του φασματοραδιομέτρου GER 1500. Συνολικά ο Πίνακας 36, παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τις οκτώ επισκέψεις στο ελεγχόμενο πεδίο μεταξύ του Νοεμβρίου 2010 και Μαρτίου 2011

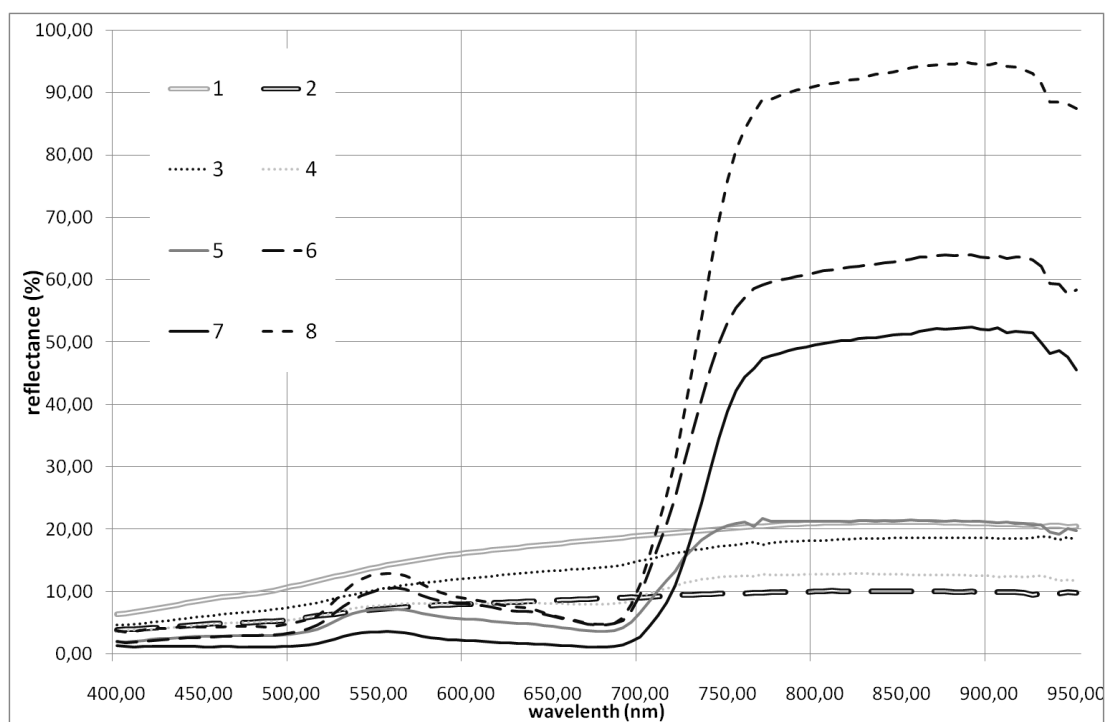
Πίνακας 36: Συλλογή επίγειων δεδομένων από την περιοχή Αλάμπρας

α/α	Περιγραφή	Ημερομηνία μετρήσεων	Φωτογραφία πεδίου
1	Στεγνό έδαφος	24-11-2010	

2	Βρεγμένο έδαφος	15-12-2010	
3	Κριθάρι σε μη αρχαιολογικό χώρο (5cm ύψος / 70% κάλυψη εδάφους)	26-12-2010	
4	Κριθάρι σε αρχαιολογικό χώρο (τετράγωνο 1) (5cm ύψος / 70% κάλυψη εδάφους)	26-12-2010	
5	Κριθάρι σε μη αρχαιολογικό χώρο (40cm ύψος / 100% κάλυψη εδάφους)	26-01-2011	
6	Κριθάρι σε αρχαιολογικό χώρο (τετράγωνο 1) (40cm ύψος / 100% κάλυψη εδάφους)	26-01-2011	
7	Κριθάρι σε μη αρχαιολογικό χώρο (60cm ύψος / 100% κάλυψη εδάφους)	13-03-2011	
8	Κριθάρι σε αρχαιολογικό χώρο (τετράγωνο 1) (60cm ύψος / 100% κάλυψη εδάφους)	13-03-2011	

Η φασματική υπογραφή κάθε στόχου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 213, υποδηλώνει τα φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης: μεγάλη ανακλαστικότητα

στο εγγύς υπέρυθρο και πράσινο μήκος κύματος σε αντίθεση με το μπλε και κόκκινο (αρ. 5 - 8, Πίνακας 36). Από την άλλη, οι φασματικές υπογραφές του εδάφους (αρ. 1 και 2, Πίνακας 36), έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις περιπτώσεις χαμηλής και αραιής βλάστησης (αρ. 3 και 4, Πίνακας 36), που οφείλονται στο ότι η βλάστηση δεν πραγματοποιεί φωτοσύνθεση (Herold *et al.*, 2004).



Εικόνα 213: Φασματικές υπογραφές της βλάστησης και του εδάφους όπως τις εμφανίζει ο Πίνακας 36

Μετά τη συλλογή των φασματικών υπογραφών υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές στα κανάλια του κόκκινου και εγγύς υπέρυθρου για τους αισθητήρες ALOS-AVNIR-2, EO-ASTER, IKONOS, Landsat 4, 5 TM/ 7 ETM+ και SPOT 5 –HRV με τη χρήση των αντίστοιχων φίλτρων RSR. Με αυτό τον τρόπο οι υπερφασματικές επίγειες μετρήσεις μετατράπηκαν σε αντίστοιχες από πολυφασματικά κανάλια δορυφορικών δεκτών.

7.3.3. Ανάλυση μετρήσεων

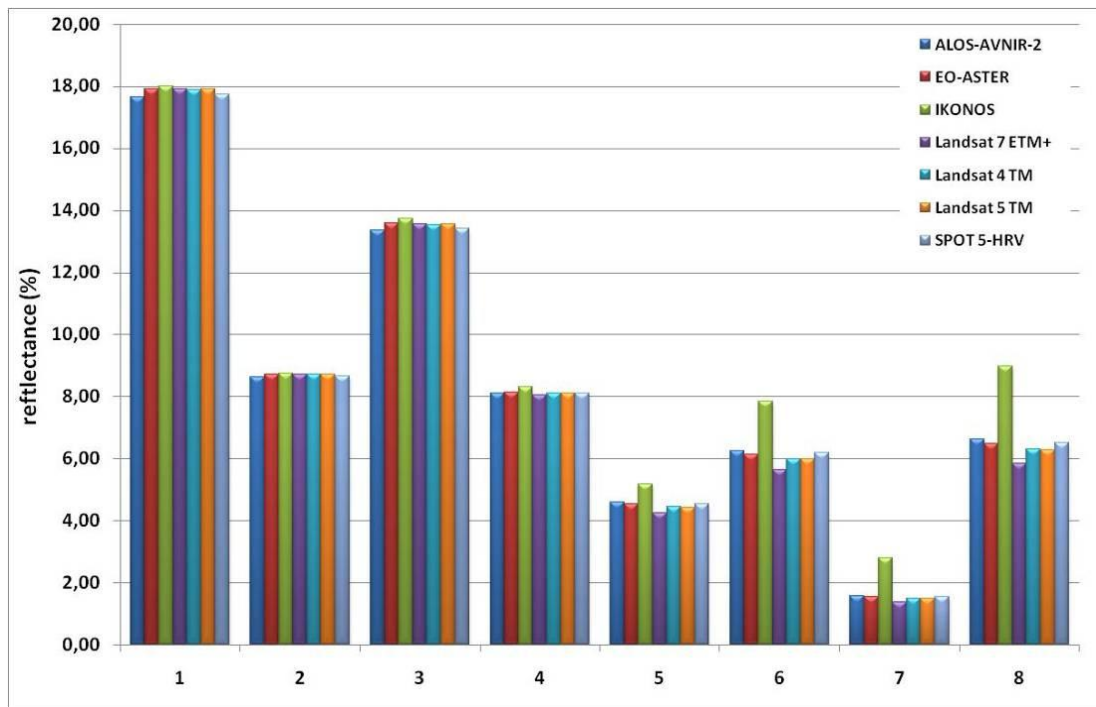
Στο πρώτο μέρος της ανάλυσης των μετρήσεων γίνεται η σύγκριση των φασματικών υπογραφών ανά κανάλι και αισθητήρα, ενώ στο δεύτερο μέρος γίνεται αξιολόγηση των αισθητήρων σε σχέση με τους δείκτες βλάστησης NDVI, SAVI και SR.

7.3.3.1. Φασματικές υπογραφές

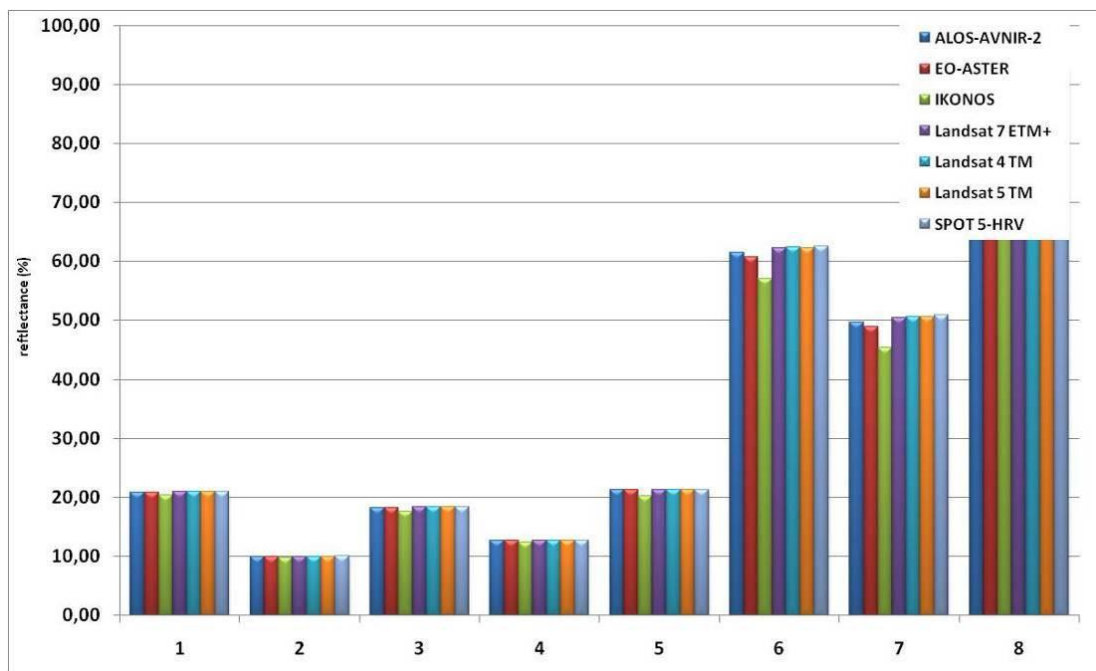
Η Εικόνα 214 και η Εικόνα 215 παρουσιάζουν το αποτέλεσμα της καταγραφής της ακτινοβολίας στο κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο κανάλι αντίστοιχα. Παρατηρούνται μόνο μικρές διαφορές για όλους τους αισθητήρες με μεγαλύτερη διαφοροποίηση στον δορυφόρο IKONOS.

Συγκεκριμένα οι φασματικές υπογραφές του εδάφους (τόσο στο στεγνό όσο και στο βρεγμένο έδαφος), είναι παρόμοιες και οι σχετικές τους διαφορές είναι της τάξης των 0.8 – 1.3%. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι το βρεγμένο έδαφος έχει μικρότερες διακυμάνσεις σε αντίθεση με το στεγνό. Επιπρόσθετα, όταν το κριθάρι ξεκινάει το φαινολογικό του κύκλο (περιπτώσεις 3 και 4, Πίνακας 36), η ακτινοβολία παραμένει η ίδια για όλους τους αισθητήρες, εκτός από τον δορυφόρο IKONOS. Μάλιστα αυτή η διαφορά αρχίζει να μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου (περιπτώσεις 5 και 6, Πίνακας 36) και μεγιστοποιείται, όταν η βλάστηση φθάσει περίπου τα 60cm (περιπτώσεις 7 και 8, Πίνακας 36).

Σε όλο αυτό τον κύκλο, ο δορυφόρος IKONOS, τείνει να καταγράφει χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι (σχετικές διαφορές 1% - 8%) και ψηλότερες τιμές στο ορατό κόκκινο κανάλι (σχετικές διαφορές 0.5% - 3%). Αυτό φαίνεται να οφείλετε σε χαρακτηριστικά των φασματικών φίλτρων RSR του συγκεκριμένου δορυφόρου (βλ. Εικόνα 212). Πράγματι στο κόκκινο μήκος κύματος το εύρος του φίλτρου RSR για τον δορυφορικό δέκτη IKONOS επεκτείνεται στα άκρα σε σχέση με τους άλλους δορυφόρους, ενώ αντίθετα στο εγγύς υπέρυθρο, το φίλτρο RSR καταλαμβάνει κυρίως την περιοχή της κόκκινης ακμής (red edge). Σε αυτή την περιοχή του μήκους κύματος καταγράφονται γενικότερα χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας σε σχέση με το εγγύς υπέρυθρο σε στόχους βλάστησης.



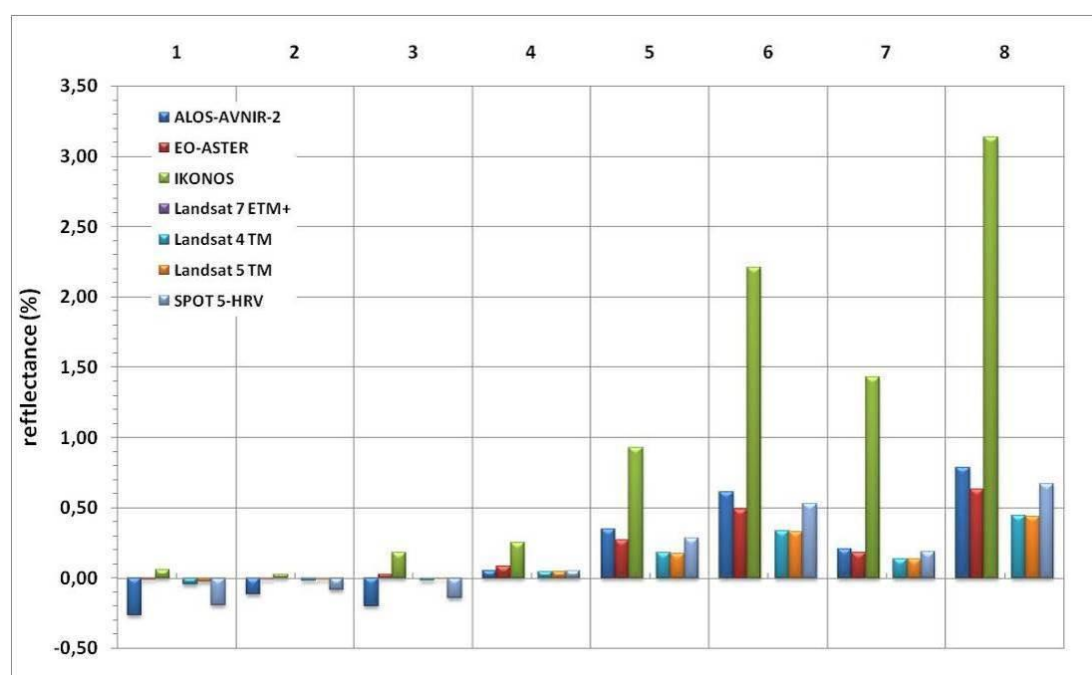
Εικόνα 214: Φασματική υπογραφή στο κόκκινο κανάλι για κάθε αισθητήρα σε κάθε μέτρηση (βλ. Πίνακας 36)



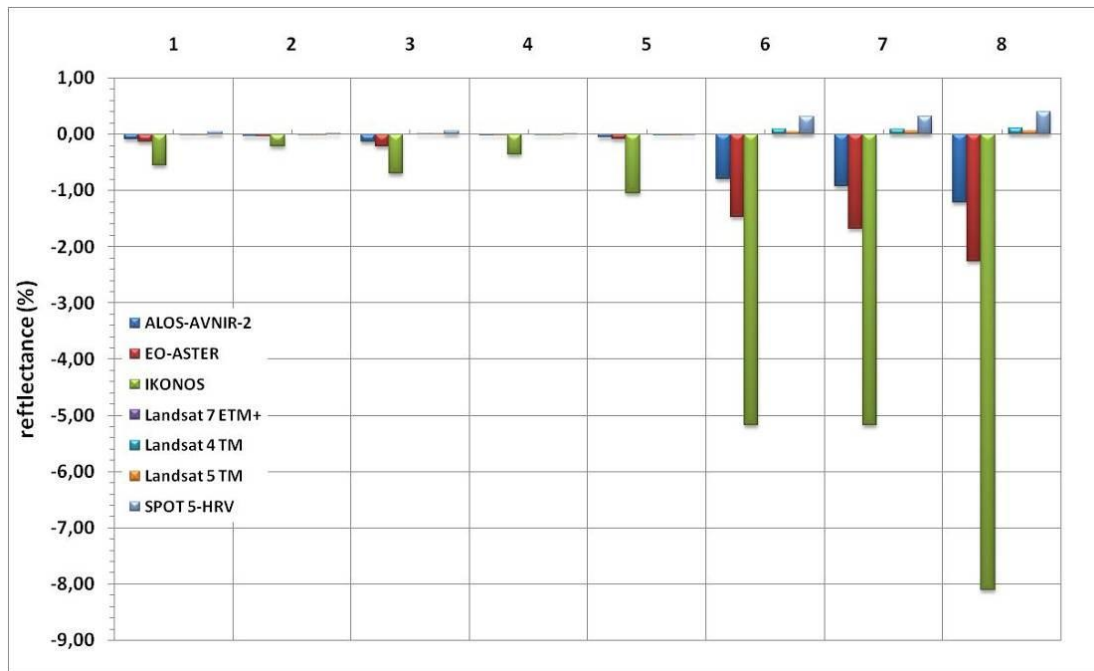
Εικόνα 215: : Φασματική υπογραφή στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι για κάθε αισθητήρα σε κάθε μέτρηση (βλ. Πίνακας 17)

Η Εικόνα 216 και η Εικόνα 217 παρουσιάζουν τις σχετικές διαφορές των πιο πάνω ακτινοβολιών σε σχέση με τον αισθητήρα Landsat ETM+, ο οποίος επιλέχθηκε ως δορυφόρος αναφοράς. Ο αισθητήρας του δορυφόρου IKONOS τείνει να δίνει

ψηλότερες σχετικές τιμές ανακλαστικότητας (μέχρι και 3%) στα σιτηρά (περιπτώσεις 3 - 8, Πίνακας 36) για το κόκκινο μήκος κύματος και χαμηλότερες τιμές ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο (μέχρι και -8%). Οι υπόλοιποι αισθητήρες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα και οι σχετικές τους διαφορές είναι μικρότερες από 1% στο κόκκινο και εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Αυτή η διαφοροποίηση του IKONOS σε σχέση με τους άλλους αισθητήρες θα πρέπει να αποδοθεί στα φασματικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Είναι προφανές ότι οι μικρές διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στα φασματικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων (βλ. Εικόνα 211 και Εικόνα 212) μπορεί να αλλοιώσουν σημαντικά την ακτινοβολία που καταγράφεται για τον ίδιο στόχο. Με βάση αυτές τις εκτιμήσεις, ιδιαίτερη σημασία αποκτά και η μελέτη των δεικτών βλάστησης, που πολύ συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τον εντοπισμό υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων.



Εικόνα 216: Σχετικές διαφορές αισθητήρων στο κόκκινο κανάλι ως προς τον Landsat 7 ETM+.



Εικόνα 217: Σχετικές διαφορές αισθητήρων στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι ως προς τον Landsat 7 ETM+.

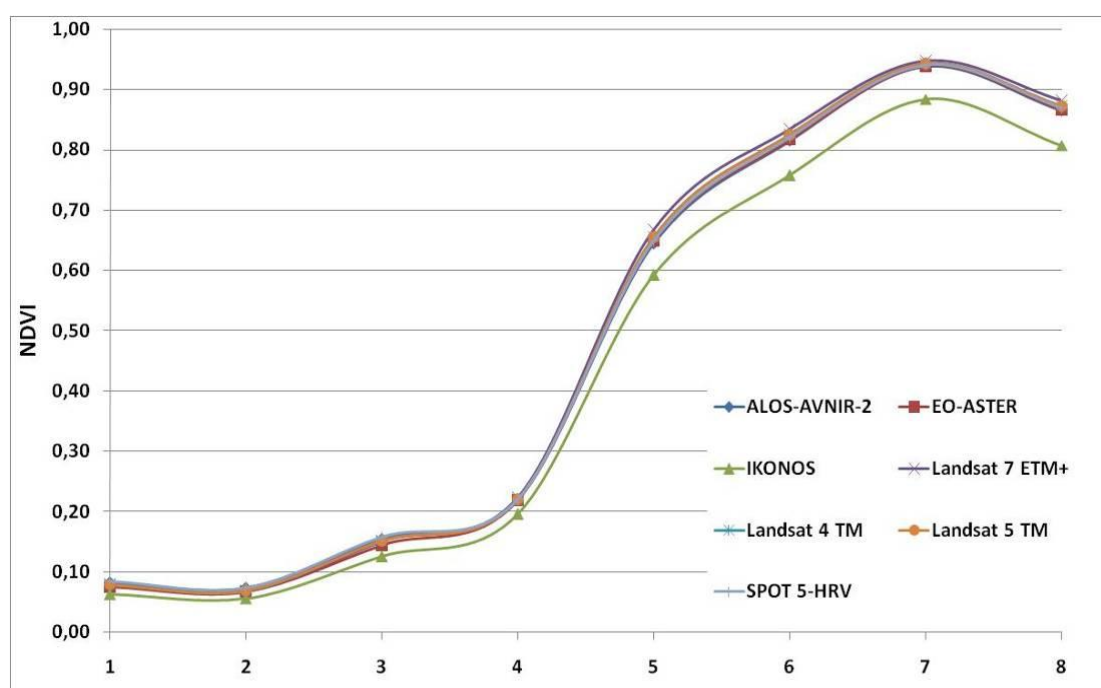
7.3.3.2. Δείκτες βλάστησης

Στις τρεις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 218 - Εικόνα 220) παρουσιάζονται οι δείκτες βλάστησης NDVI, SAVI και SR αντίστοιχα για όλους τους αισθητήρες. Οι δείκτες αυτοί, αναμένεται να δίνουν ψηλότερες τιμές σε συνθήκες υγιούς βλάστησης λόγω φωτοσύνθεσης. Αντίστοιχα οι επόμενοι σχετικοί Πίνακες (Πίνακας 37 - Πίνακας 38) παρουσιάζουν τις απόλυτες τιμές του NDVI και ο Πίνακας 39 τις αντίστοιχες τιμές για το δείκτη SR. Οι μετρήσεις στις περιπτώσεις 1-4 (Πίνακας 36) δεν παρουσιάζουν κάποια σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των αισθητήρων. Σε αντίθεση οι τιμές του δορυφόρου IKONOS τείνουν να δίνουν χαμηλότερες τιμές. Αυτές οι διαφοροποιήσεις του αισθητήρα IKONOS ισχύουν και για τις περιπτώσεις 5-8 (Πίνακας 36). Ποσοτικά οι διαφορές των NDVI - SAVI για τον IKONOS κυμαίνεται από 0.06-0.10 (6-7%) λιγότερο από τους υπόλοιπους δείκτες.

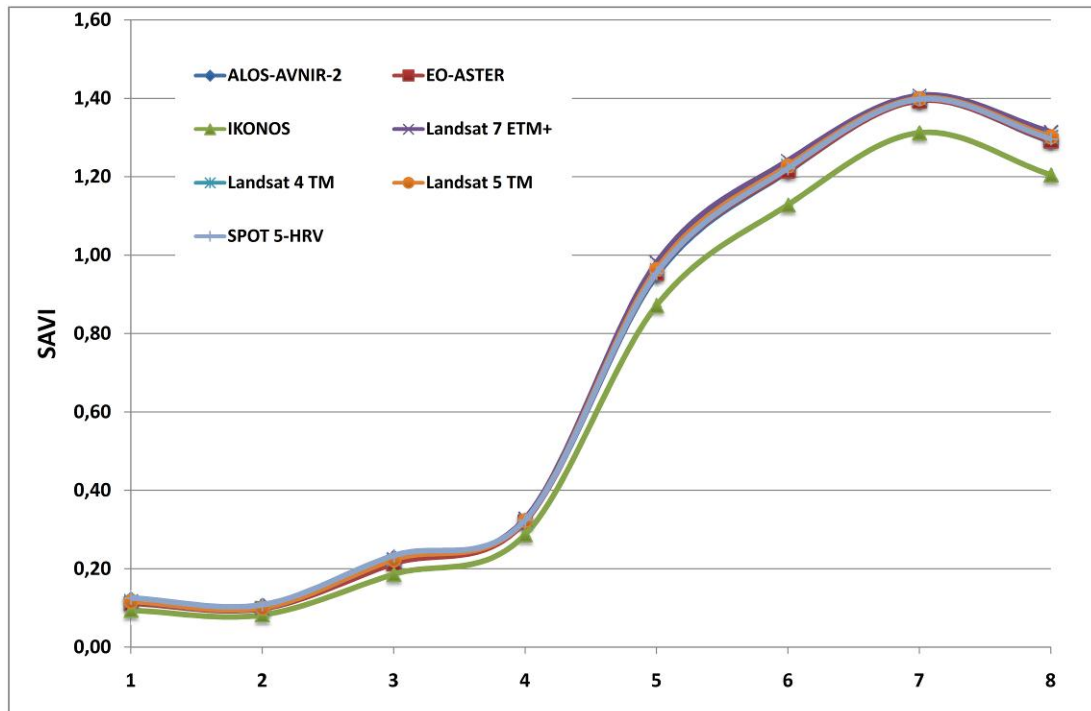
Οι δορυφόροι Landsat (4 – 5 και 7) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με πολύ μικρές διακυμάνσεις στο δείκτη NDVI (± 0.01 NDVI/SAVI ή 1% σχετική διαφορά) και επομένως η χρήση εικόνων αρχείου και νέων εικόνων αυτού του τύπου μπορούν άμεσα να συγκριθούν μεταξύ τους, εφόσον τηρούνται και όλα τα στάδια της προεπεξεργασίας. Αυτή η εικόνα δεν είναι η ίδια στην περίπτωση του δείκτη SR αφού ο δείκτης αυτός δεν είναι κανονικοποιημένος. Με το δείκτη SR, καταγράφονται

σημαντικές διαφορές την άνοιξη στη βλάστηση, στον αρχαιολογικό και μη αρχαιολογικό χώρο.

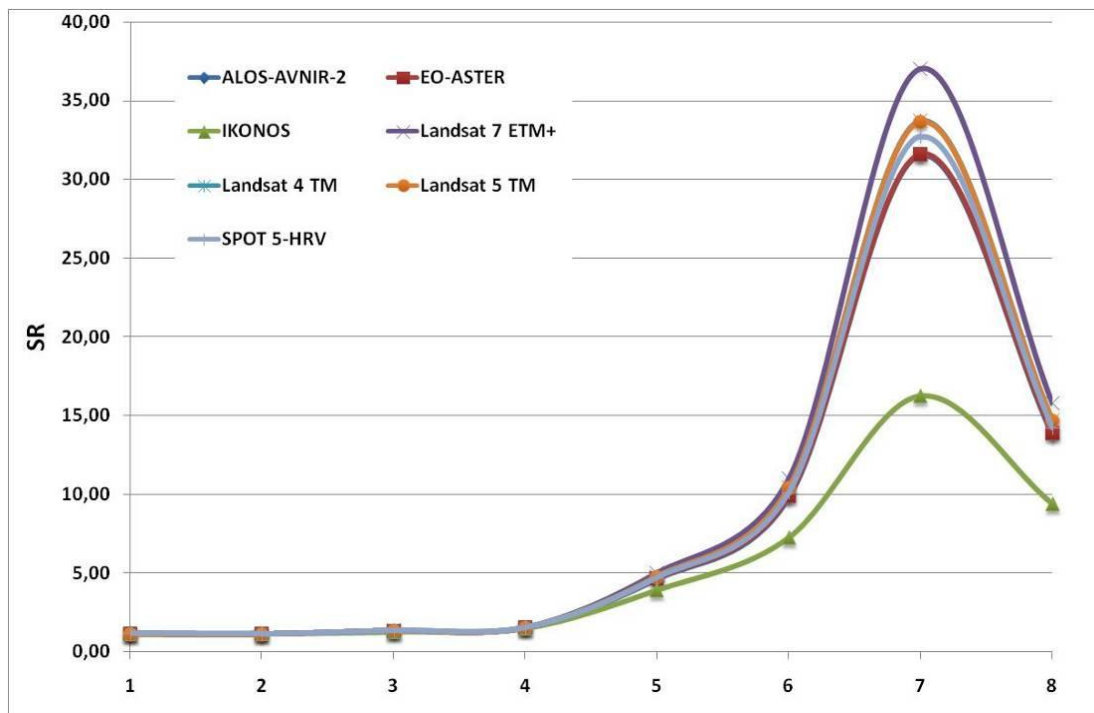
Αυτή η διαφοροποίηση αναδεικνύει τις δυνατότητες του συγκεκριμένου δείκτη για αρχαιολογικές έρευνες. Οι σχετικές διαφοροποιήσεις του δείκτη NDVI και SAVI στις περιπτώσεις 3-4, 5-6 και 7-8 (Πίνακας 36) δείχνουν μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ των αρχαιολογικών και μη αρχαιολογικών περιοχών, το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην αναγνώριση των υπεδάφινων στόχων. Ο δορυφόρος IKONOS και πάλι, έδειξε ότι έχει τη μεγαλύτερη σχετική διαφορά για όλες τις μετρήσεις.



Εικόνα 218: Ο δείκτης βλάστησης NDVI όπως υπολογίστηκε με βάση όλες τις φασματικές υπογραφές (βλ. Πίνακας 36).



Εικόνα 219: Ο δείκτης SAVI όπως υπολογίστηκε με βάση όλες τις φασματικές υπογραφές (βλ. Πίνακας 17)



Εικόνα 220: Ο δείκτης βλάστησης SR όπως υπολογίστηκε με βάση όλες τις φασματικές υπογραφές (βλ. Πίνακας 17)

Πίνακας 37: Τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI για όλους τους αισθητήρες και φασματικές υπογραφές

Αισθητήρας	Τιμές βλάστησης NDVI για τις φασματικές υπογραφές							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ALOS-AVNIR-2	0.08	0.07	0.16	0.22	0.64	0.82	0.94	0.86
EO-ASTER	0.08	0.07	0.14	0.22	0.65	0.82	0.94	0.87
IKONOS	0.06	0.06	0.13	0.20	0.59	0.76	0.88	0.81
Landsat 7 ETM+	0.08	0.07	0.15	0.22	0.67	0.83	0.95	0.88
Landsat 4 TM	0.08	0.07	0.15	0.22	0.66	0.82	0.94	0.87
Landsat 5 TM	0.08	0.07	0.15	0.22	0.66	0.82	0.94	0.87
SPOT 5-HRV	0.09	0.07	0.16	0.22	0.65	0.82	0.94	0.87

Πίνακας 38: Τιμές του δείκτη SAVI για όλους τους αισθητήρες και φασματικές υπογραφές

Αισθητήρας	Τιμές βλάστησης SAVI για τις φασματικές υπογραφές							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ALOS-AVNIR-2	0.12	0.11	0.23	0.32	0.95	1.21	1.39	1.29
EO-ASTER	0.11	0.10	0.21	0.32	0.95	1.22	1.39	1.29
IKONOS	0.09	0.08	0.19	0.29	0.87	1.13	1.31	1.20
Landsat 7 ETM+	0.12	0.10	0.22	0.33	0.98	1.24	1.41	1.31
Landsat 4 TM	0.12	0.10	0.23	0.32	0.96	1.23	1.40	1.30
Landsat 5 TM	0.12	0.10	0.22	0.32	0.96	1.23	1.40	1.30
SPOT 5-HRV	0.13	0.11	0.23	0.32	0.95	1.22	1.40	1.30

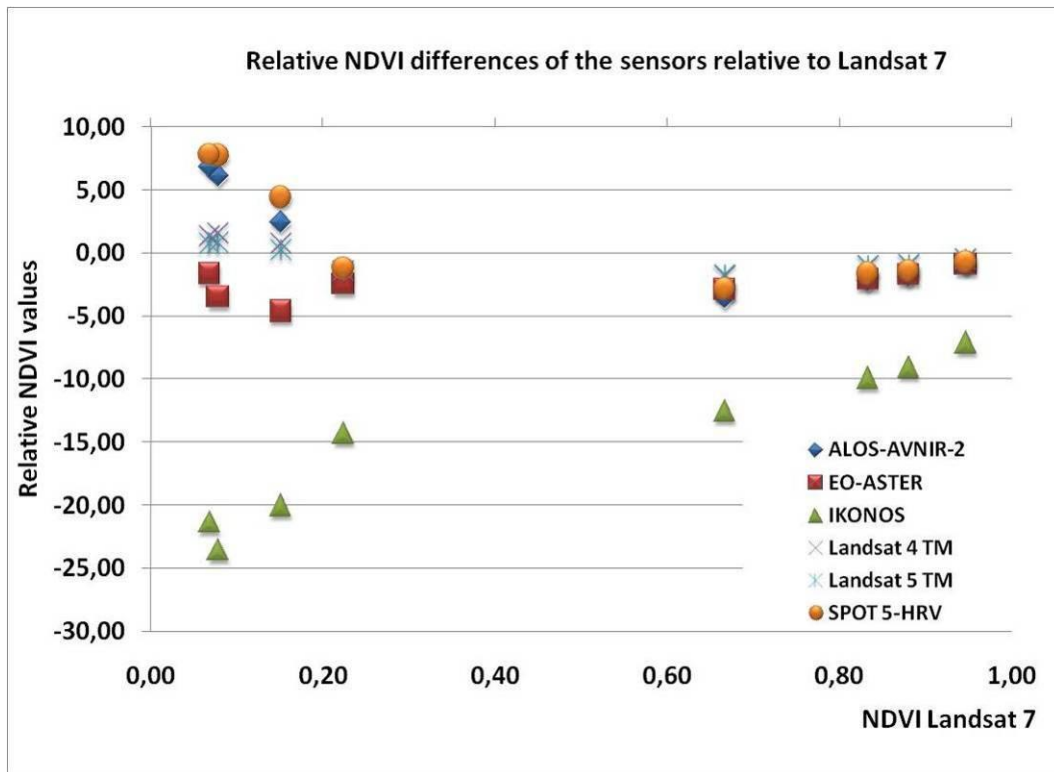
Πίνακας 39: Τιμές του δείκτη SR για όλους τους αισθητήρες και φασματικές υπογραφές

Αισθητήρας	Τιμές βλάστησης SR για τις φασματικές υπογραφές							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ALOS-AVNIR-2	1.18	1.16	1.37	1.57	4.62	9.82	31.52	13.75
EO-ASTER	1.16	1.14	1.34	1.56	4.69	9.90	31.61	13.92
IKONOS	1.14	1.12	1.29	1.49	3.91	7.27	16.24	9.39
Landsat 7 ETM+	1.17	1.15	1.36	1.58	5.01	11.03	37.04	15.82
Landsat 4 TM	1.17	1.15	1.36	1.57	4.80	10.42	33.70	14.71
Landsat 5 TM	1.17	1.15	1.36	1.57	4.80	10.43	33.67	14.72
SPOT 5-HRV	1.19	1.16	1.38	1.57	4.69	10.13	32.72	14.25

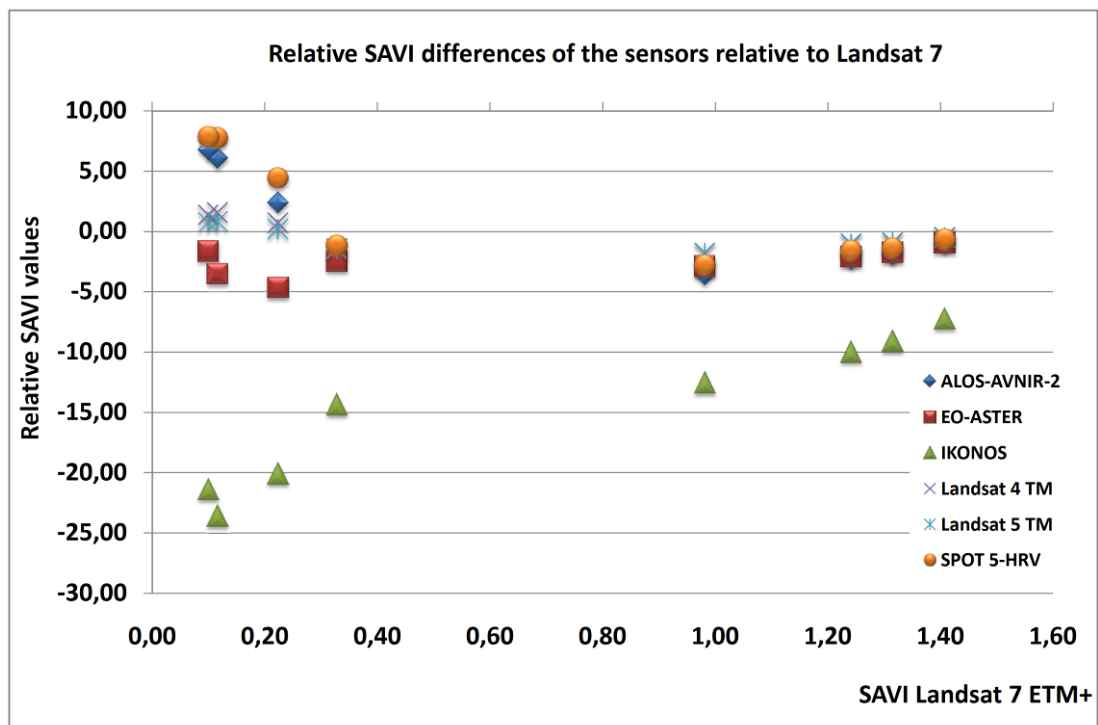
Η Εικόνα 221, η Εικόνα 222, ο Πίνακας 40 και ο Πίνακας 41 δείχνουν τις σχετικές διαφορές των δεικτών NDVI και SAVI, αντίστοιχα όλων των αισθητήρων σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές NDVI / SAVI του Landsat ETM+. Τιμές κοντά στο μηδέν αναμένονται στις περιπτώσεις όπου η ευαισθησία του αισθητήρα είναι παρόμοια με το δέκτη του Landsat ETM+. Όπως φαίνεται στις δύο εικόνες, οι σχετικές διαφοροποιήσεις των αισθητήρων ALOS-AVNIR-2, EO-ASTER, Landsat 4 and 5 TM και SPOT 5 -HRV ποικίλλουν από -0.05 έως 0.08 σε σχέση με το δορυφόρο Landsat ETM+. Οι σχετικές διαφορές του δορυφόρου IKONOS είναι μεγαλύτερες και κυμαίνονται από -0.05 έως -0.15 για τη βλάστηση και -0.15 έως -0.25 για τα εδάφη.

Επιπλέον, η χρήση της βέλτιστης γραμμικής προσαρμογής ή προσαρμογής 2ου βαθμού πολυωνύμου μεταξύ των αποτελεσμάτων NDVI/SAVI για κάθε αισθητήρα και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του Landsat ETM+ δείχνει μια ισχυρή συσχέτιση για όλους του αισθητήρες ($R^2 > 0.78$) εκτός από το δέκτη ASTER ($R^2 = 0.50$). Η χαμηλή συσχέτιση με το δέκτη ASTER πρέπει να οφείλεται στο μικρότερο εύρος κατάληψης του φίλτρου RSR στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος (0.76 – 0.86 μm) σε σχέση με το δορυφόρο Landsat ETM+ (0.76 – 0.90 μm).

Η χρήση μεγαλύτερου βαθμού πολυωνύμου προσαρμογής αποφεύχθηκε λόγω του μικρού δείγματος φασματικών υπογραφών (8 διαφορετικές φασματικές υπογραφές βλάστησης). Με σκοπό να εξεταστεί κατά πόσο ο κάθε συντελεστής του πολυωνύμου μπορεί να συμβάλει ή όχι στη γενική εξίσωση που προτείνεται με βάση τις επίγειες μετρήσεις διενεργήθηκαν έλεγχοι σημαντικότητας (t-test, διάστημα εμπιστοσύνης 95%, βαθμοί ελευθερίας = 7). Σκοπός τους ήταν να εντοπιστούν τυχόν παράμετροι που πιθανόν δεν συμβάλλουν στην εξίσωση με απώτερο σκοπό να εξαιρεθούν από αυτή. Ο Πίνακας 40, ο Πίνακας 41 και ο Πίνακας 42 δείχνουν τις τελικές εξισώσεις μετά από τον έλεγχο σημαντικότητας.



Εικόνα 221: Σχετικές διαφορές του δείκτη NDVI ως προς τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+



Εικόνα 222: Σχετικές διαφορές του δείκτη SAVI ως προς τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+

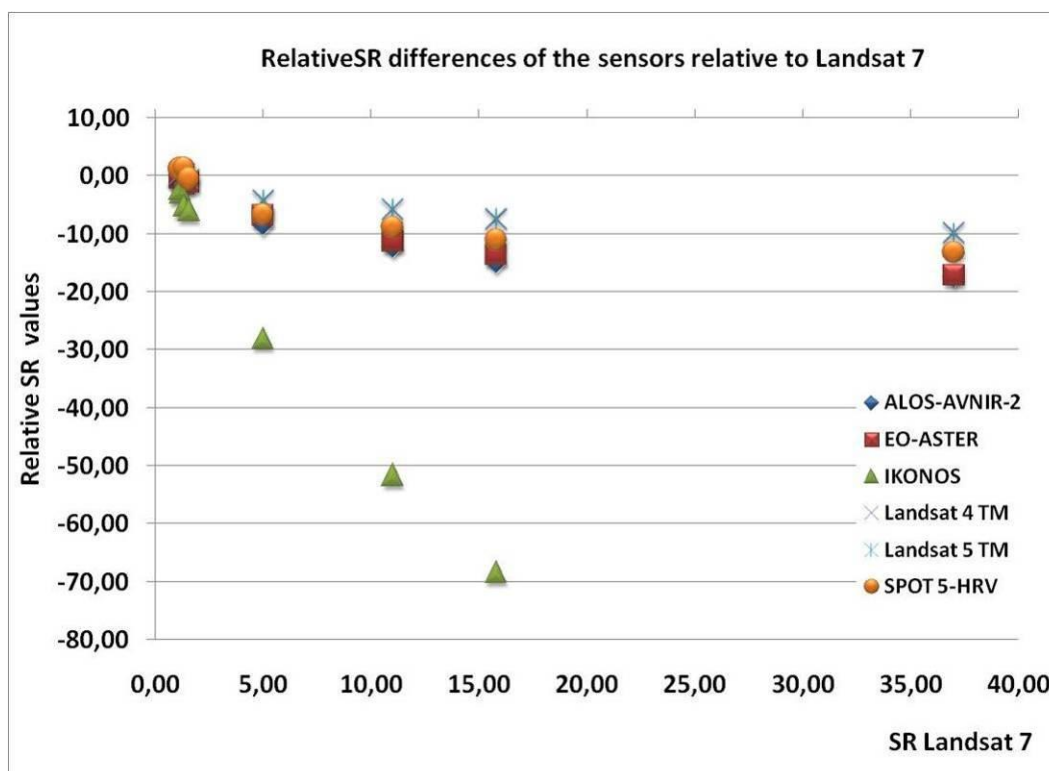
Πίνακας 40: Προσαρμογή 2ου βαθμού πολυωνύμου στις σχετικές διαφορές NDVI της Εικόνα 221. Το y στην εξίσωση 2^{ου} βαθμού αντιπροσωπεύει την τιμή NDVI για τον κάθε δέκτη ενώ η τιμή X αφορά την τιμή NDVI όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ETM+.

Αισθητήρας	Εξίσωση 2 ^{ου} βαθμού πολυωνύμου	R ²
ALOS-AVNIR-2	$y = 39,49x^2 - 46,97x + 8,908$	0.926
IKONOS	$y = 15,166x - 22,078$	0.897
Landsat 4 TM	$y = 14,55x^2 - 16,65x + 2,449$	0.884
Landsat 5 TM	$y = 7,934x^2 - 9,347x + 1,202$	0.787
SPOT 5-HRV	$y = 39,79x^2 - 48,40x + 10,40$	0.911

Πίνακας 41: Προσαρμογή 2ου βαθμού πολυωνύμου στις σχετικές διαφορές SAVI της Εικόνα 222. Το y στην εξίσωση 2^{ου} βαθμού αντιπροσωπεύει την τιμή SAVI για τον κάθε δέκτη ενώ η τιμή X αφορά την τιμή SAVI όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ETM+.

Αισθητήρας	Εξίσωση 2 ^{ου} βαθμού πολυωνύμου	R ²
ALOS-AVNIR-2	$y = 17,66x^2 - 31,26x + 8,801$	0.922
IKONOS	$y = 10,155x - 22,060$	0,896
Landsat 4 TM	$y = 6,509x^2 - 11,07x + 2,413$	0.879
Landsat 5 TM	$y = 5,402x^2 - 8,983x + 1,581$	0.888
SPOT 5-HRV	$y = 17,84x^2 - 32,28x + 10,31$	0.907

Η Εικόνα 223 και ο Πίνακας 42 δείχνει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το δείκτη SR. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 223, παρατηρούνται αρκετές διαφοροποιήσεις για τους περισσότερους αισθητήρες. Ο αισθητήρας IKONOS δίνει μια διαφορά της τάξης των 20 - 70% σε περιπτώσεις καταγραφής της βλάστησης. Η μεγάλη διαφορά για τον IKONOS οφείλεται αφενός στα φασματικά χαρακτηριστικά του φίλτρου RSR αλλά αφετέρου και στην μη κανονικοποιημένη μορφή του δείκτη SR. Τα αποτελέσματα δίνουν και πάλι μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ όλων των αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένου και το ASTER, με το Landsat ETM+ ($R^2 > 0.90$) για το δείκτη SR. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στη απλή μορφή του δείκτη.



Εικόνα 223: Σχετικές διαφορές του δείκτη SR ως προς τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+

Πίνακας 42: Προσαρμογή 2ου βαθμού πολωνύμου στις σχετικές διαφορές SR της Εικόνα 223. Το y στην εξίσωση 2^{ου} βαθμού αντιπροσωπεύει την τιμή SR για τον κάθε δέκτη ενώ η τιμή X αφορά την τιμή SR όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ETM+.

Αισθητήρας	Εξίσωση 2 ^{ου} βαθμού πολωνύμου	R ²
ALOS-AVNIR-2	$y = 0,029x^2 - 1,632x$	0.968
EO-ASTER	$y = 0,022x^2 - 1,303x$	0.988
IKONOS	$y = -3,530x - 3,930$	0.977
Landsat 4 TM	$y = 0,012x^2 - 0,75x$	0.967
Landsat 5 TM	$y = 0,011x^2 - 0,724x$	0.971
SPOT 5-HRV	$y = 0,022x^2 - 1,245x$	0.950

Όπως φάνηκε πιο πάνω, η φασματική ευαισθησία των δορυφορικών δεκτών είναι σχεδόν κοινή για όλους τους δορυφόρους. Η ανίχνευση υπεράφαιων καταλοίπων με τη χρήση της τηλεπισκόπησης, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του κόκκινου και εγγύς υπέρυθρου φάσματος. Ο αισθητήρας IKONOS φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητος στη βλάστηση κατά 1% - 8%, σε σχέση με τους άλλους αισθητήρες. Οι

μεγαλύτερες τιμές διαφοροποίησης του δείκτη IKONOS παρατηρούνται σε περιόδους πλήρους άνθησης της βλάστησης και είναι μεγαλύτερη από τις σχετικές αβεβαιότητες της ραδιομετρικής βαθμονόμησης των δορυφορικών αισθητήρων (5%, βλ. Trishchenko *et.al.*, 2002). Επιπλέον φάνηκε ότι, ακόμη και απλοί αλγόριθμοι βλάστησης, όπως είναι ο SR μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό υπεδάφια καταλοίπων. Η περίπτωση της διαφοροποίησης του δορυφορικού δείκτη IKONOS έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από την ανάπτυξη του Αρχαιολογικού Δείκτη, αφού όπως φαίνεται και από τα φίλτρα RSR (βλ. Εικόνα 212) ο δορυφόρος IKONOS είναι πιο ευαίσθητος στην περιοχή των 700 και 800 nm.

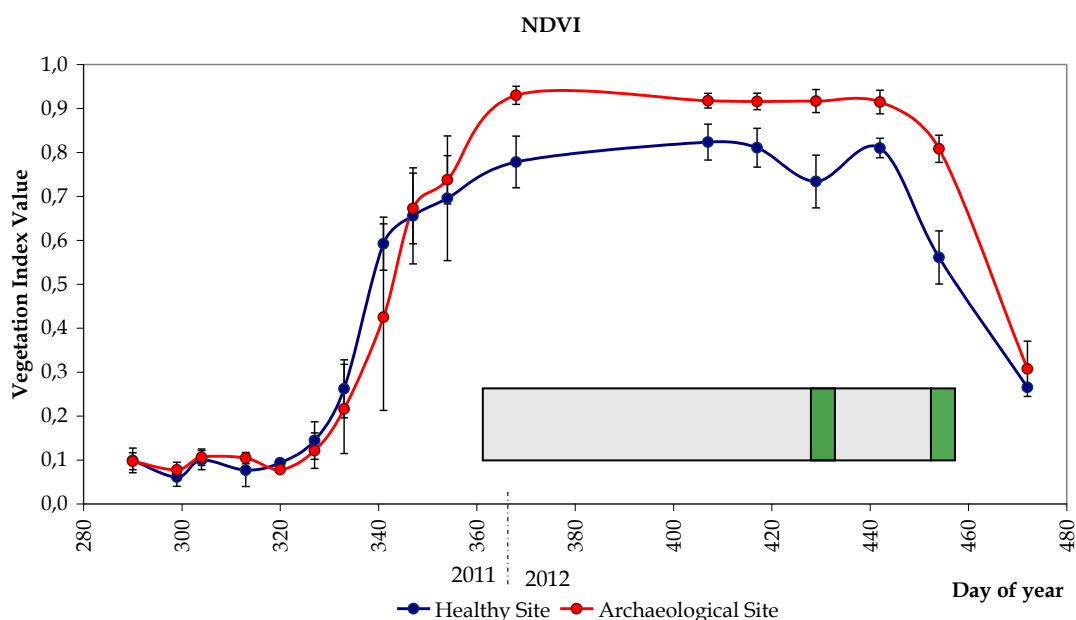
Με βάση τα πολυώνυμα, όπως αυτά έχουν υπολογιστεί και παρουσιάζονται στους σχετικούς πίνακες (Πίνακας 40 - Πίνακας 42) κάθε χρήστης μπορεί να συγκρίνει τις μετασχηματισμένες τιμές των δεικτών βλάστησης (NDVI, SAVI και SR) από ένα δορυφόρο σε ένα άλλο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να συγκρίνουν άμεσα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη σύνθεση διαφορετικών δεκτών με στόχο την εξαγωγή κάποιου αποτελέσματος. Παράλληλα είναι δυνατή και η αξιοποίηση μιας μεγάλης χρονοσειράς δεδομένων από διάφορους δορυφόρους τα οποία είναι σήμερα διαθέσιμα δωρεάν (π.χ. σειρά δορυφορικών αισθητήρων Landsat: TM / ETM+) ή με ένα σχετικά χαμηλό κόστος (π.χ. ASTER). Ανοικτό παραμένει το ζήτημα ανάπτυξης ενός ενιαίου δείκτη βλάστησης ο οποίος δεν θα επηρεάζεται από τις μικρές φασματικές διαφορές των δορυφορικών δεικτών.

7.4. Εντοπισμός βέλτιστης περιόδου για την παρακολούθηση διαφοροποιήσεων βλάστησης

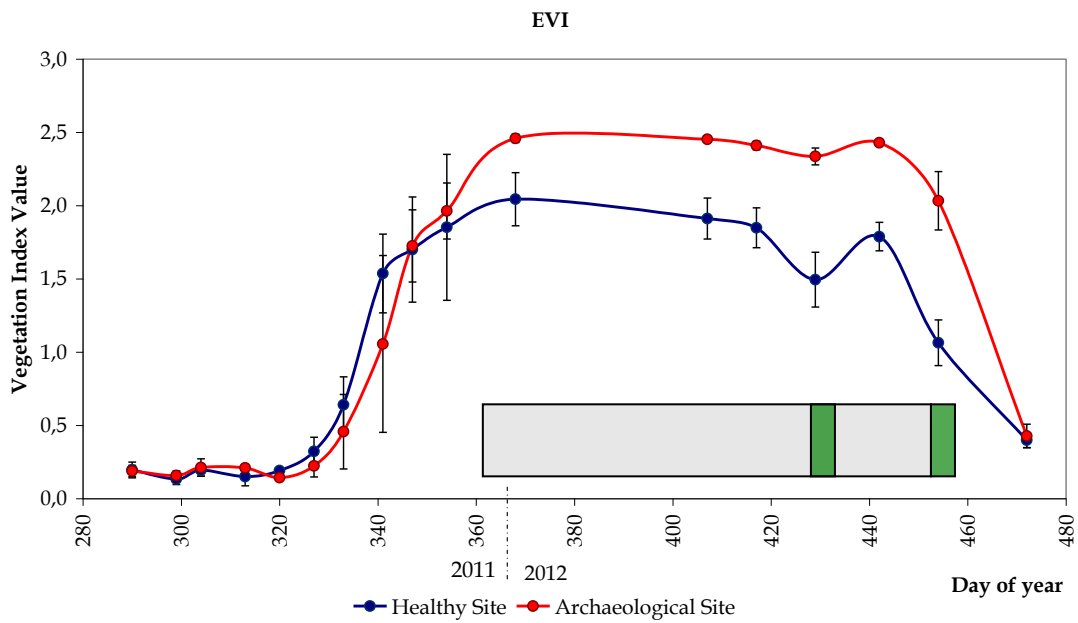
Από τη συστηματική καταγραφή επίγειων μετρήσεων στην περιοχή Αλάμπρας φάνηκε ότι οι διαφοροποιήσεις της βλάστησης είναι μέγιστες όταν οι καλλιέργειες είναι σε άνθηση (βλ. Κεφ. 0) και ιδιαίτερα στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος. Ο εντοπισμός της βέλτιστης περιόδου για την παρακολούθηση των διαφοροποιήσεων έγινε μέσα από την επεξεργασία του φαινολογικού κύκλου των σιτηρών στα δύο ελεγχόμενα πεδία. Αν και ο φαινολογικός κύκλος παρουσιάζεται συνήθως ως η εποχιακή διακύμανση των τιμών του δείκτη βλάστησης NDVI, εντούτοις κρίθηκε

σκόπιμο να μελετηθούν και άλλοι δείκτες οι οποίοι μπορεί να εφαρμοστούν σε δορυφορικά δεδομένα.

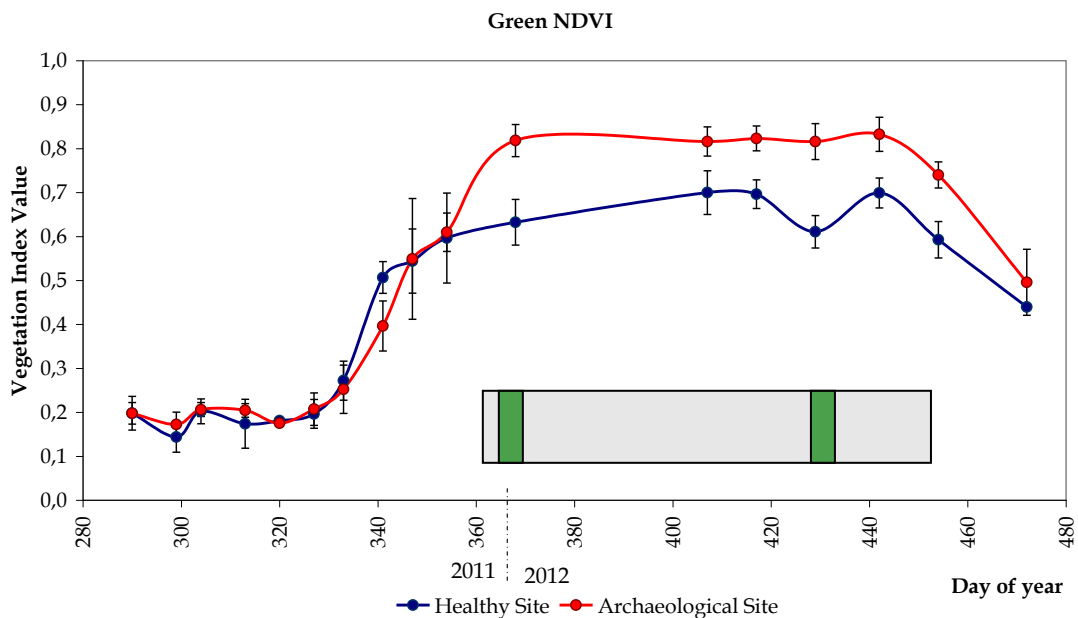
Ο φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας, όπως φαίνεται και στις σχετικές εικόνες (Εικόνα 224 - Εικόνα 229), απεικονίζει το χρονικό παράθυρο στο οποίο είναι εφικτή η διάκριση της περιοχής με υπεδάφια κατάλοιπα σε σχέση με τον περίγυρό της. Το χρονικό παράθυρο διαρκεί από τις 5 Ιανουαρίου (ένδειξη στον άξονα των X = 370) μέχρι και το τέλος Μαρτίου (ένδειξη στον άξονα των X = 450). Όπως φαίνεται από τα πιο κάτω διαγράμματα η γενική εικόνα των δεικτών βλάστησης στο αρχαιολογικό και μη αρχαιολογικό περιβάλλον παραμένει σχεδόν η ίδια. Ένα σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από τη μελέτη του φαινολογικού κύκλου είναι ότι το βέλτιστο χρονικό παράθυρο είναι την περίοδο όπου εμφανίζονται τα πρώτα στάχυα στο κριθάρι (Εικόνα 195). Όσο αφορά τα αποτελέσματα στην περιοχή Αχέλειας (Εικόνα 231 - Εικόνα 233), έδειξαν και πάλι ότι το βέλτιστο χρονικό παράθυρο, είναι την περίοδο της εμφάνισης των πρώτων καρπών του σιταριού (Εικόνα 234). Αν και οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται όπως φαίνεται και στα διαγράμματα είναι πολύ μικρές, εντούτοις έχουν βρεθεί να είναι οριακά στατιστικώς σημαντικές μετά από έλεγχο Student που έγινε. Σε εκείνη την περίοδο τα σιτηρά (κριθάρι και σιτάρι) βρίσκονται σε πλήρη σπαργή, στο φαινολογικό στάδιο της 'καρπόδεσης'.



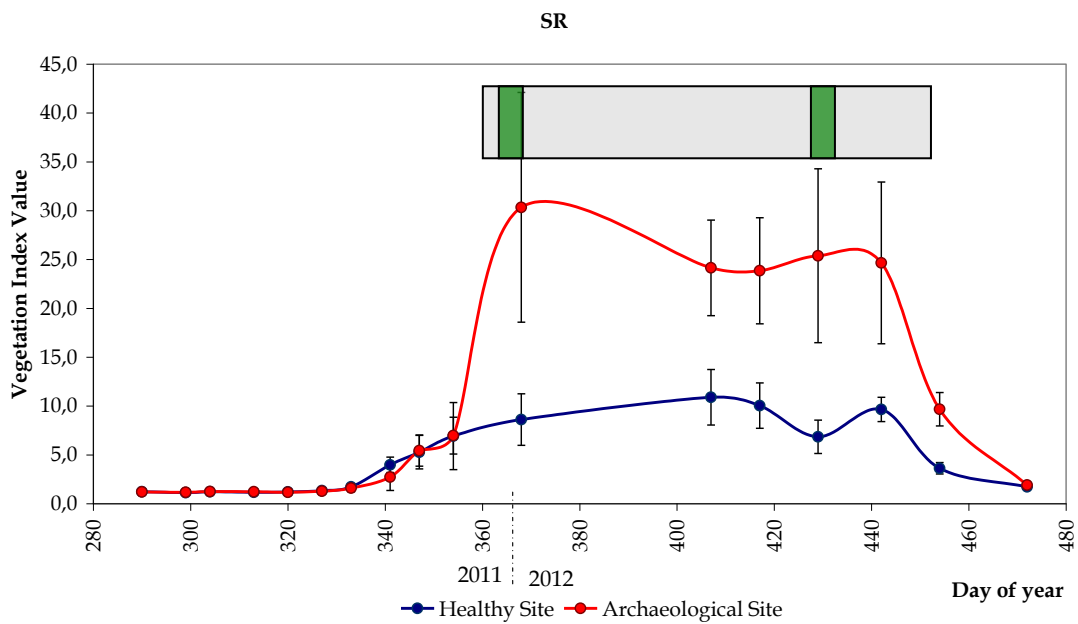
Εικόνα 224: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης NDVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



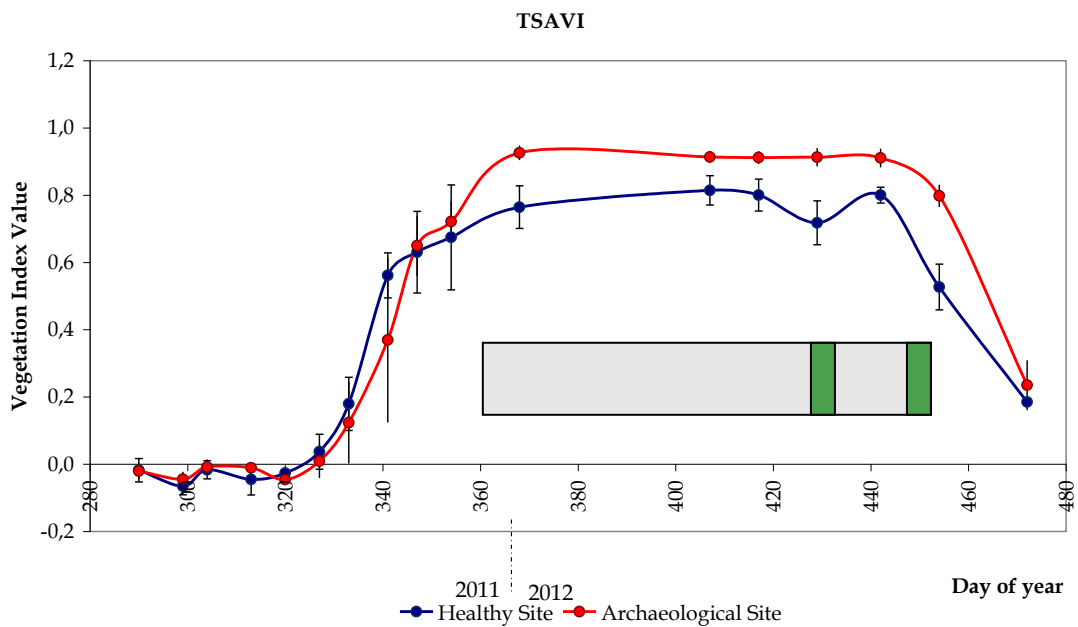
Εικόνα 225: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης EVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



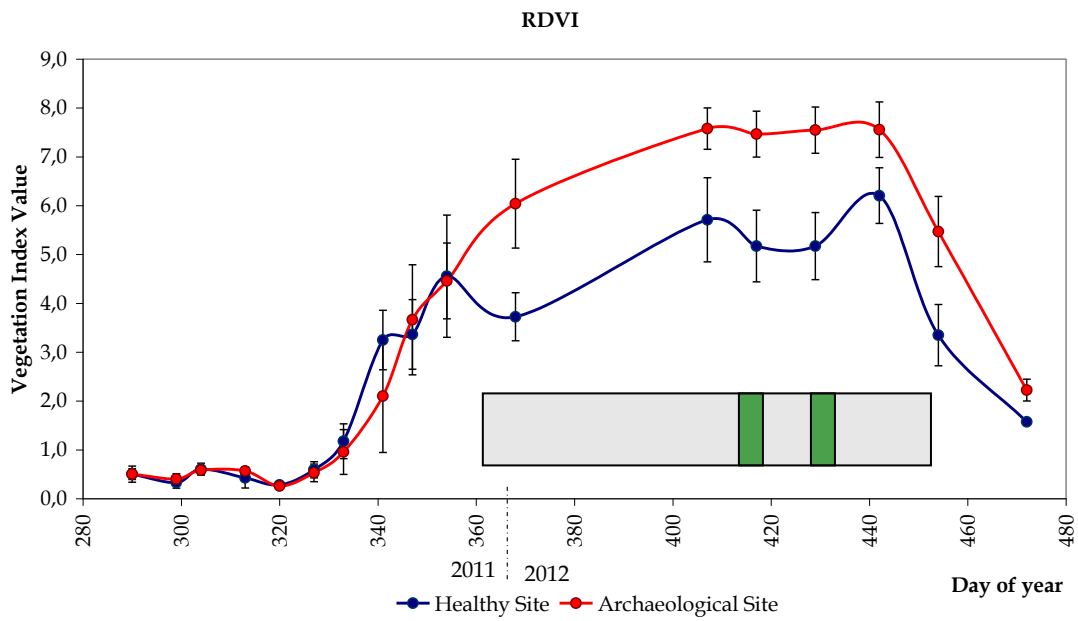
Εικόνα 226: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης Green NDVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



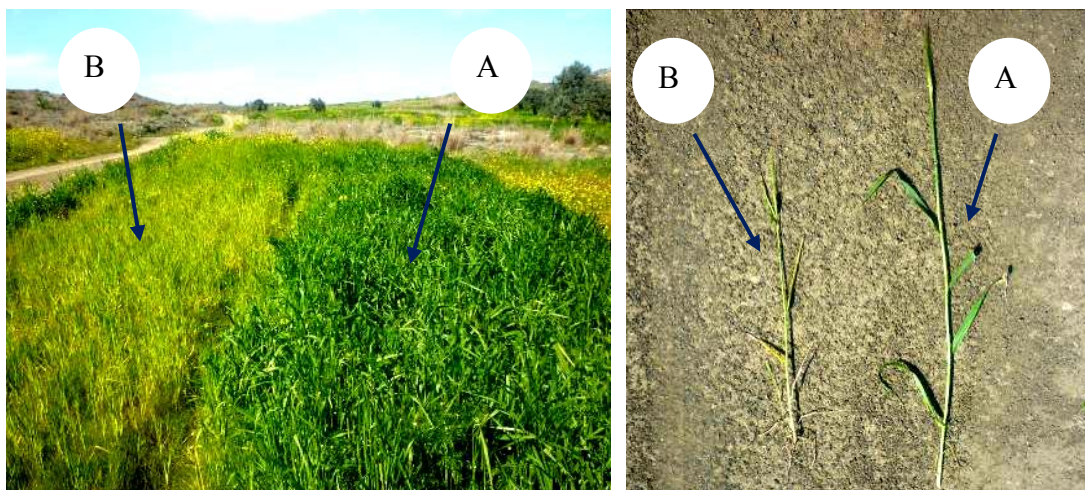
Εικόνα 227: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης SR. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



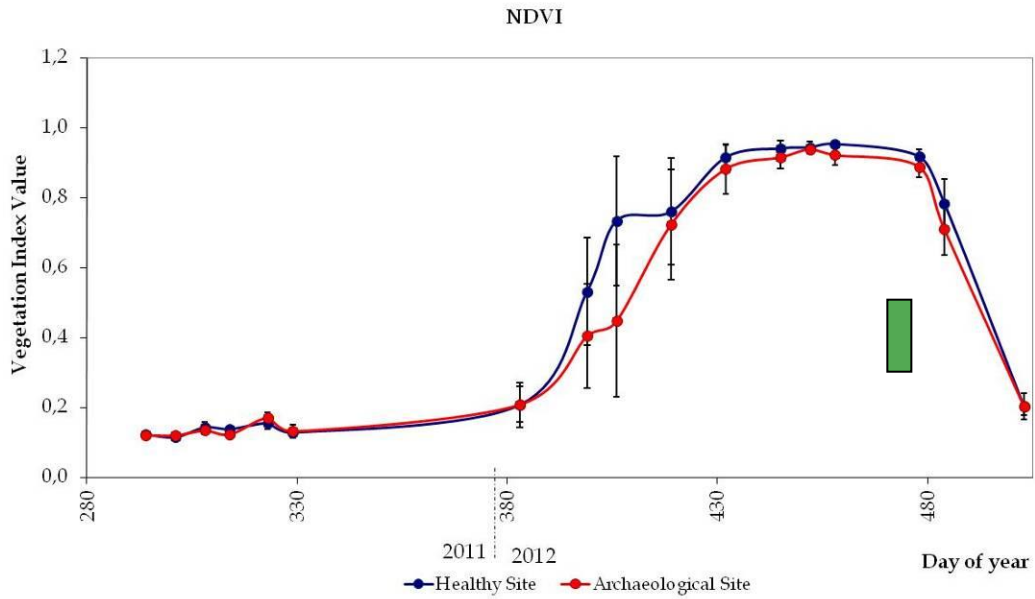
Εικόνα 228: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης TSAVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



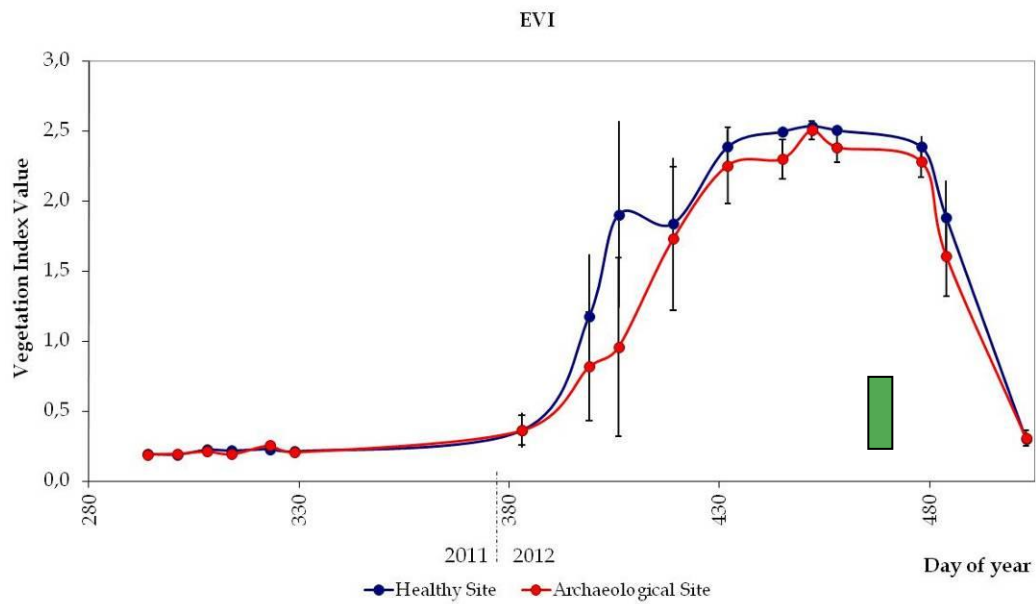
Εικόνα 229: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αλάμπρας με το δείκτη βλάστησης RDVI. Σε γκριζο πλαίσιο το χρονικό παράθυρο όπου είναι εφικτή η διάκριση της διαφοροποίησης και με πράσινο πλαίσιο οι δύο βέλτιστες χρονικές στιγμές όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



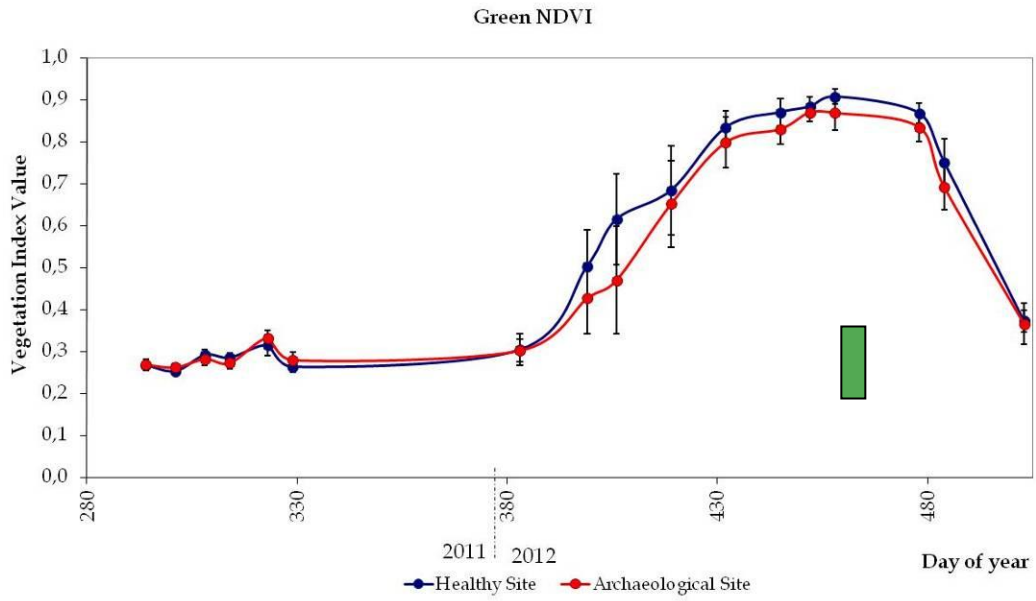
Εικόνα 230: Φωτογραφίες πεδίου κατά την εμφάνιση καρπών στο κριθάρι στην περιοχή Αλάμπρας (αριστερά). Στην δεξιά φωτογραφία κριθάρι που βρίσκεται πάνω από την αρχαιολογική περιοχή (A) και την μη αρχαιολογική περιοχή (B).



Εικόνα 231: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αχέλειας με το δείκτη βλάστησης NDVI. Με πράσινο πλαίσιο η βέλτιστη χρονική στιγμή όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



Εικόνα 232: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αχέλειας με το δείκτη βλάστησης EVI. Με πράσινο πλαίσιο η βέλτιστη χρονική στιγμή όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



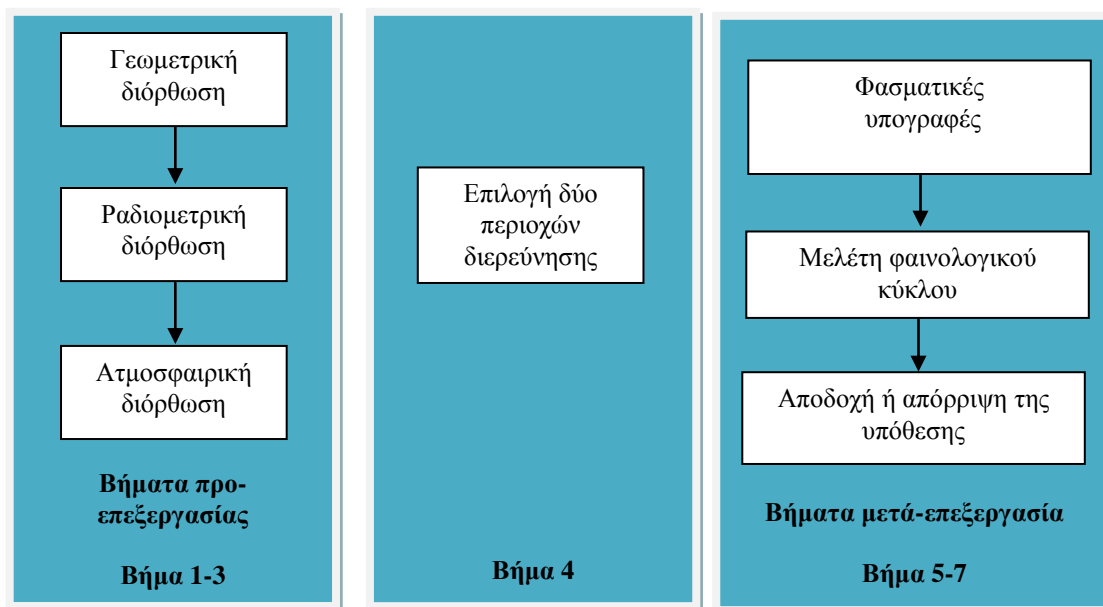
Εικόνα 233: Φαινολογικός κύκλος στην περιοχή Αχέλειας με το δείκτη βλάστησης Green NDVI. Με πράσινο πλαίσιο η βέλτιστη χρονική στιγμή όπου η διαφοροποίηση αυξάνεται σημαντικά.



Εικόνα 234: Φωτογραφίες πεδίου κατά την εμφάνιση καρπών στο σιτάρι στην περιοχή Αχέλειας.

8. Ανάπτυξη προτεινόμενης μεθόδολογίας

Τα σημαντικά συμπεράσματα της παρούσας διατριβής που εκτέθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου που προτείνεται να εφαρμόζεται για τον εντοπισμό υπεδάφίων αρχαιολογικών καταλοίπων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Στόχος της μεθόδου είναι να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοσδήποτε περιοχές με τη χρήση όσο το δυνατό ολιγότερων πρόσθετων βοηθητικών στοιχείων και δεδομένων, εκτός φυσικά από την ίδια την δορυφορική εικόνα. Αυτή η μεθοδολογία αναπτύχθηκε με γνώμονα κυρίως την αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων των οποίων η χωρική ανάλυση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων μέσα από τις έως τώρα εφαρμοζόμενες φωτοερμηνευτικές διαδικασίες. Η προτεινόμενη μέθοδος (Agariou *et al.*, 2013) βασίζεται στη χρήση διαχρονικών δορυφορικών εικόνων, οι οποίες πρέπει να καλύπτουν έναν -ή και περισσότερους- πλήρεις φαινολογικούς κύκλους. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει συνολικά επτά βήματα, τα οποία ο χρήστης καλείται να εφαρμόσει αφού επιλέξει στη δορυφορική εικόνα τις δύο περιοχές διερεύνησης (π.χ. Περιοχή Α και Περιοχή Β). Η μεθοδολογία απεικονίζεται διαγραμματικά στην Εικόνα 235. Τα πρώτα τρία βήματα (1-3), περιγράφουν τα βασικά βήματα προεπεξεργασίας του συνόλου των εικόνων, ενώ το επόμενο στάδιο (Βήμα 4) επικεντρώνεται στην επιλογή των δύο περιοχών διερεύνησης. Τα τελευταία τρία βήματα (5-7) αφορούν τη μετά-επεξεργασία των εικόνων.



Εικόνα 235: Βήματα προτεινόμενης μεθοδολογίας

8.1.1. Βήματα μεθοδολογίας

- **Βήμα 1: Γεωμετρική διόρθωση.** Το πρώτο βήμα είναι η γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων, η οποία αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο της προ-επεξεργασίας. Οι αρχικές εικόνες, συνήθως περιέχουν σημαντικά γεωμετρικά σφάλματα που επιδρούν αρνητικά στην ακρίβεια. Αυτά τα σφάλματα, μπορεί να προέρχονται από την κίνηση του δορυφόρου, την καμπυλότητα της γης, την εκτροπή λόγω αναγλύφου κ.ά. (Lillesand, *et al.*, 2004). Τα συστηματικά σφάλματα συνήθως διορθώνονται με τη χρήση των επίγειων σημείων ελέγχου (Ground Control Points, GCP) γνωστών συντεταγμένων. Τα σημεία αυτά, θα πρέπει να έχουν καλή κατανομή στην περιοχή μελέτης και προφανώς να είναι αναγνωρίσιμα και στις ίδιες τις δορυφορικές εικόνες. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σχετική γεωμετρική διόρθωση μεταξύ των εικόνων στην προτεινόμενη μεθοδολογία, με τη χρήση μιας εικόνας ως εικόνας αναφοράς για τη γεωμετρική διόρθωση. Η διαδικασία αυτή έχει σχεδόν αυτοματοποιηθεί σε πολλά λογισμικά επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων που είναι εύκολα στη χρήση (π.χ.. Han *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2011).

Βήμα 2: Ραδιομετρική διόρθωση. Η ραδιομετρική διόρθωση είναι απαραίτητη στις δορυφορικές εικόνες λόγω των μεταβολών της ακτινοβολίας (π.χ. εποχιακή μεταβολή απόσταση της γης και ήλιου) και των αλλαγών στη γεωμετρία και τον προσανατολισμό λήψης μιας εικόνας (π.χ. διόρθωση λόγω γωνίας ύψους του ήλιου). Η ραδιομετρική διόρθωση περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια: αρχικά τη μετατροπή των ψηφιακών τιμών σε τιμές ακτινοβολίας και ακολούθως σε τιμές ανακλαστικότητας.

Βήμα 3: Ατμοσφαιρική διόρθωση. Η ατμοσφαιρική διόρθωση ακολουθεί τη ραδιομετρική διόρθωση και είναι το τελευταίο βήμα της προεπεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων. Όπως φάνηκε και μέσα από την παρούσα διατριβή, η εφαρμογή τεχνικών ατμοσφαιρικής διόρθωσης που κάνουν χρήση δεδομένων μέσα από την ίδια την εικόνα, όπως είναι η μέθοδος darkest pixel (DP), μπορεί να εφαρμοστούν εύκολα, ακόμη και σε εικόνες αρχείου ή με τον συνδυασμό μετρήσεων από επίγεια ραδιόμετρα.

Βήμα 4: Επιλογή περιοχών διερεύνησης. Το βήμα 4 θεωρείται το πιο σημαντικό στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στο στάδιο αυτό θα πρέπει να επιλεγθούν δύο περιοχές μελέτης: η πρώτη είναι αρχαιολογική περιοχή ενδιαφέροντος (Περιοχή Α) ενώ η δεύτερη είναι μια αγροτική περιοχή (Περιοχή Β) με παρόμοια χαρακτηριστικά ως προς την βλάστηση. Τα βασικά κριτήρια τα οποία θα πρέπει να πληρούνται για την επιλογή των περιοχών διερεύνησης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Βήμα 5: Φασματικές υπογραφές. Η μελέτη των φασματικών υπογραφών στις δύο περιοχές μελέτης είναι το πρώτο στάδιο της μετά-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων. Σκοπός αυτού του βήματος είναι να εντοπιστούν τυχόν φασματικές διαφοροποιήσεις στις δύο περιοχές διερεύνησης. Τέτοιες διαφοροποιήσεις -εάν υπάρχουν- είναι εύκολα αναγνωρίσιμες, ιδιαίτερα στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος. Όπως φάνηκε από σχετικές μελέτες που έγιναν (Αγαρίου *et al.*, 2010; 2012; Αγαρίου και Hadjimitsis, 2011) στο πλαίσιο της διατριβής, οι φασματικές υπογραφές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση περιοχών με υγιή βλάστηση και περιοχών με καταπονημένη βλάστηση, που ίσως να οφείλονται σε υπεδάφια αρχαιολογικά κατάλοιπα.

Βήμα 6: Φαινολογικός κύκλος. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τη λεπτομερή μελέτη του φαινολογικού κύκλου για την Περιοχή Α, αλλά και την Περιοχή Β. Βασισμένος στους έξι βασικούς φαινολογικούς δείκτες (βλ. Εικόνα 102), ο χρήστης μπορεί να διακρίνει ανάμεσα στα άλλα, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης, την περίοδο σποράς και θερισμού, αλλαγές στον κύκλο λόγω κάποιας καταπόνησης, ενδεχομένως από αρχαιολογικά κατάλοιπα, αλλά ακόμη και κλιματικές αλλαγές.

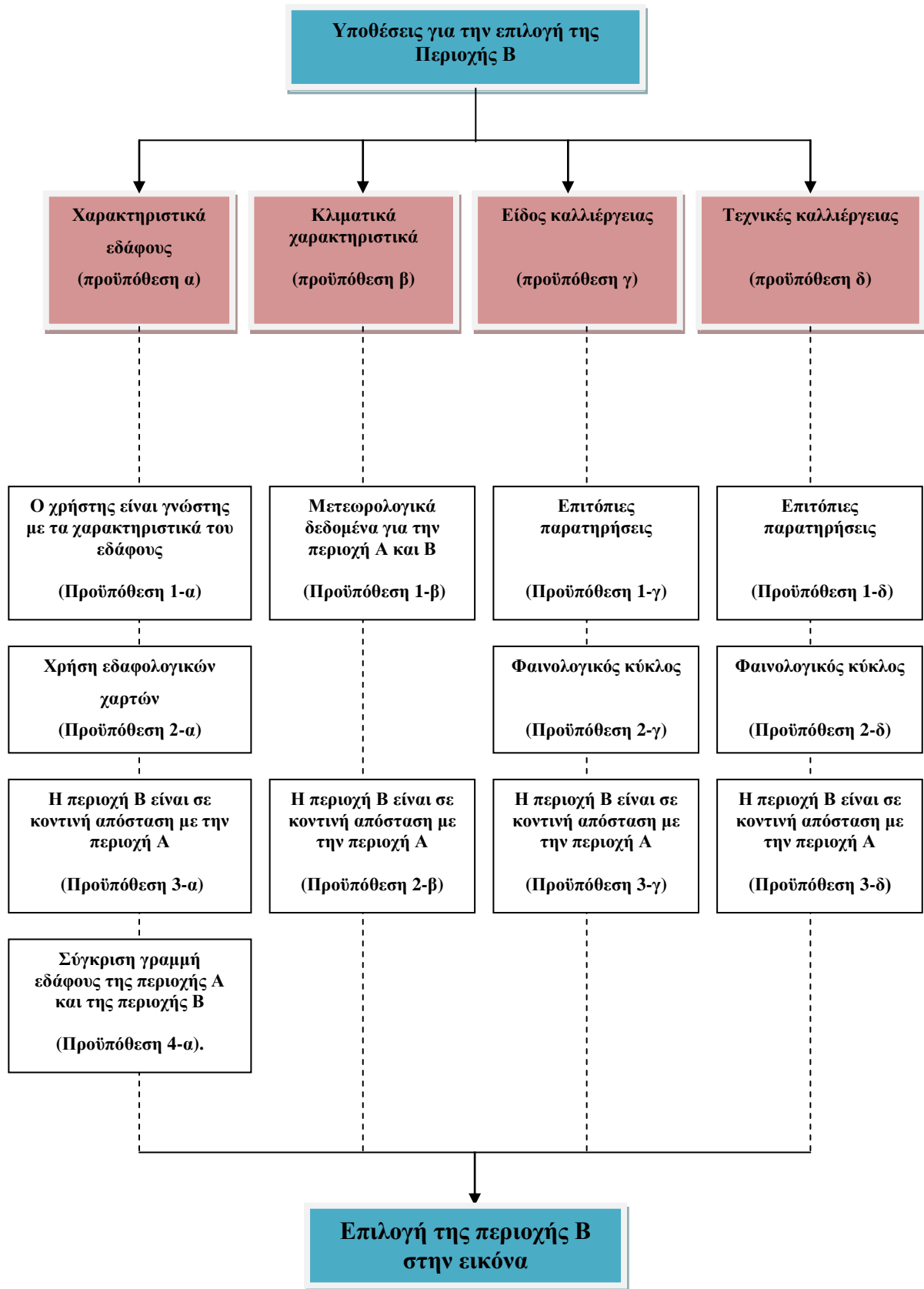
Βήμα 7: Αποδοχή ή απόρριψη της υπόθεσης. Το τελικό στάδιο αφορά την αποδοχή ή την απόρριψη της υπόθεσης, εάν δηλαδή στην Περιοχή Α μπορεί να υπάρχουν υπεδάφια κατάλοιπα με αρκετή αξιοπιστία ή όχι.

8.1.2. Κριτήρια για την επιλογή των δύο περιοχών διερεύνησης (Βήμα 4)

Ένα σημαντικό στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η επιλογή των δύο περιοχών διερεύνησης (Βήμα 4). Αφού οι δύο περιοχές μελέτης συγκρίνονται άμεσα μεταξύ τους ως προς τα φασματικά τους χαρακτηριστικά, θα πρέπει να ισχύουν

τέσσερις βασικές προϋποθέσεις (α-δ) για αυτές. Και οι δύο περιοχές μελέτης θα πρέπει να έχουν (α) τα ίδια χαρακτηριστικά εδάφους, (β) τα ίδια κλιματικά χαρακτηριστικά, (γ) το ίδιο είδος καλλιέργειας και (δ) τις ίδιες τεχνικές καλλιέργειας.

Οι προϋποθέσεις αυτές δεν είναι δύσκολο να ισχύουν, αν σκεφτεί κανείς ότι οι περιοχές θα είναι κατά τεκμήριο γειτονικές και καλλιεργούμενες. Τα πιο πάνω χαρακτηριστικά μπορεί να μελετηθούν αντλώντας πληροφορίες είτε μέσα από τη ίδια την εικόνα είτε από άλλες βοηθητικές πληροφορίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 236. Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι προϋποθέσεις αλλά και τις μεθόδους με τις οποίες μπορεί ο ερευνητής να χρησιμοποιήσει έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει τις επιδράσεις από τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά αλλά και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της βλάστησης.



Εικόνα 236: Κριτήρια για την επιλογή της περιοχής Β.

8.1.2.1. Προϋπόθεση α: ίδια χαρακτηριστικά εδάφους

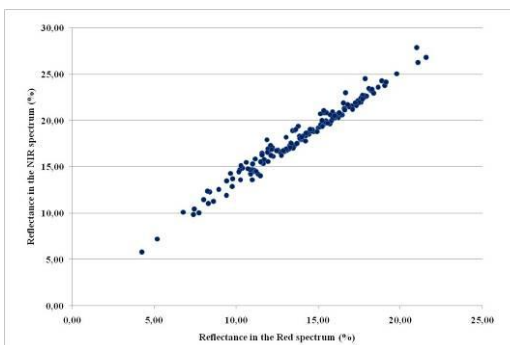
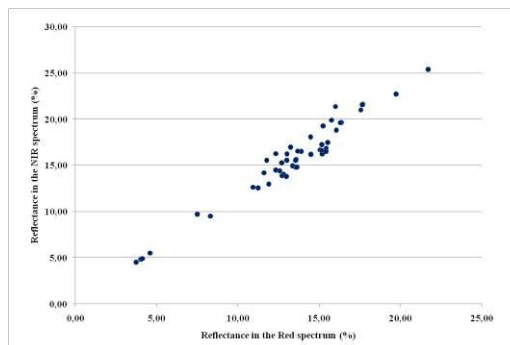
Διαφορετικά χαρακτηριστικά εδάφους (π.χ. θρεπτικά συστατικά) στις περιοχές Α και Β, θα έχουν διαφορετική επίδραση στην ανάπτυξη του φυτού. Για να εντοπιστούν περιοχές διερεύνησης με ίδια χαρακτηριστικά εδάφους, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μια (ή περισσότερες) από τις τέσσερις μεθόδους που αναπτύσσονται σύντομα στη συνέχεια:

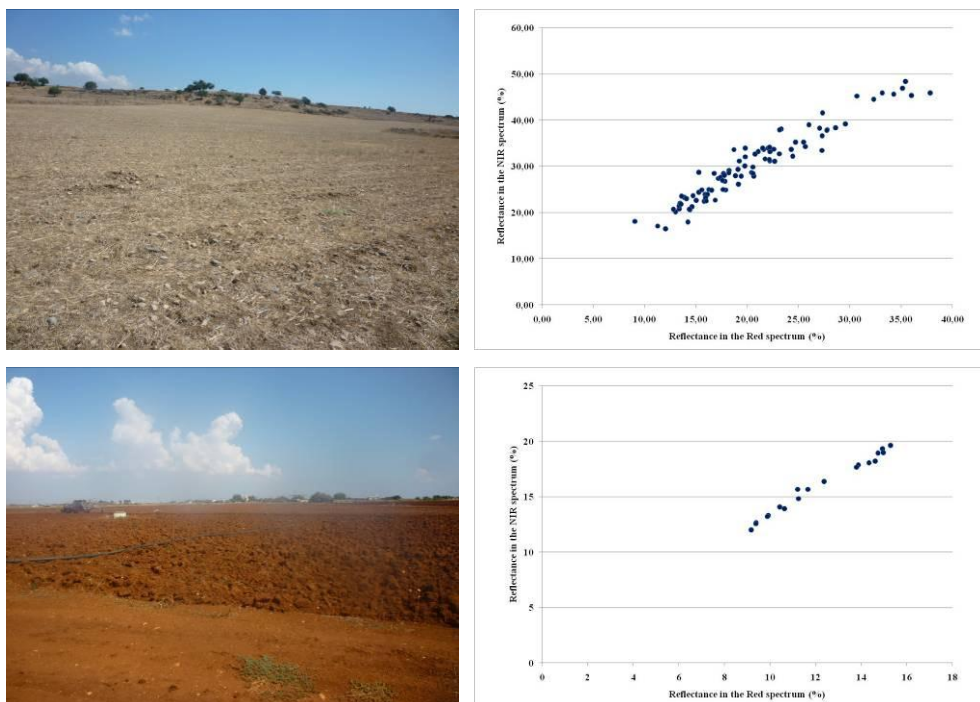
Προϋπόθεση 1-α: Ο χρήστης είναι γνώστης της περιοχής μελέτης (περιοχές Α και Β) και επομένως υπάρχει μια γνώση εκ των προτέρων για τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

Προϋπόθεση 2-α: Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει λεπτομερείς εδαφολογικούς χάρτες της περιοχής με σκοπό να συγκρίνει τα χαρακτηριστικά των περιοχών

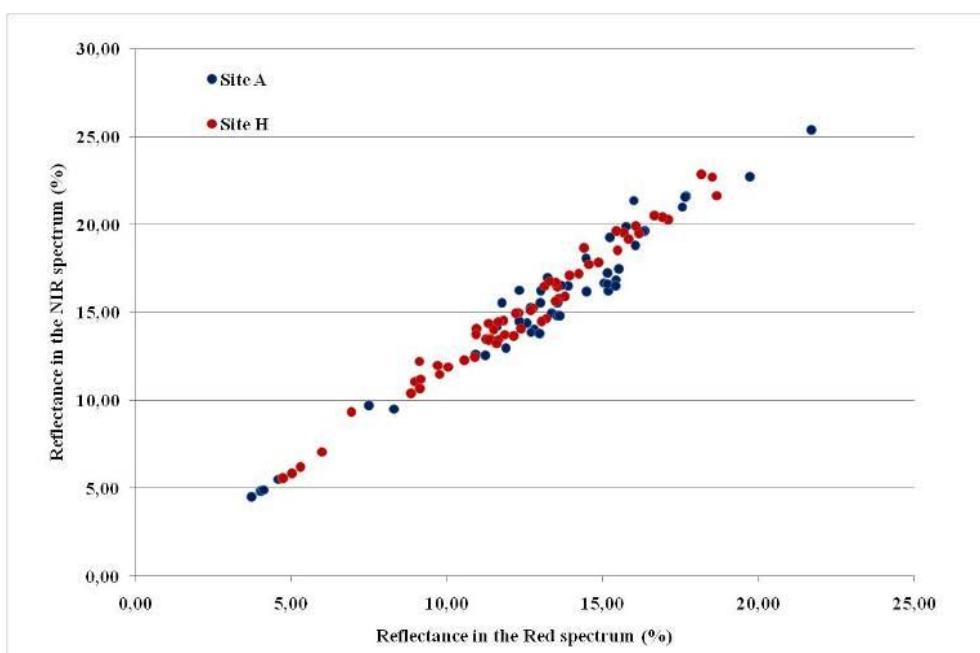
Προϋπόθεση 3-α: Ο χρήστης επιλέγει δύο περιοχές (Α και Β) σε κοντινή απόσταση και υποθέτει ότι το έδαφος δεν έχει αλλάξει τη σύστασή του (π.χ. γειτνιάζουσες περιοχές)

Προϋπόθεση 4-α: Ο χρήστης χρησιμοποιεί τις γραμμές εδάφους (soil lines), όπως αυτές προκύπτουν από στεγνά και βρεγμένα εικονοστοιχεία (wet-dry pixels) και από τις δύο περιοχές μελέτης όπως φαίνεται στην Εικόνα 237 και Εικόνα 238.





Εικόνα 237: Παράδειγμα γραμμών εδάφους από τέσσερις διαφορετικές περιοχές (Αλάμπρα, Αχέλεια, Κούκλια, Κοκκινοχώρια)



Εικόνα 238: Έλεγχος σύμπτωσης γραμμών εδάφους για δύο περιοχές διερεύνησης.

8.1.2.2. Προϋπόθεση β: ίδια κλιματικά χαρακτηριστικά

Διαφορές στις κλιματικές συνθήκες (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία) στις δύο περιοχές διερεύνησης Α και Β αναμένεται να έχουν άμεσο αντίκτυπο στην εξέλιξη

της βλάστησης στις περιοχές αυτές. Τέτοιες δυσμενείς επιδράσεις μπορεί να περιοριστούν χρησιμοποιώντας μια από τις δύο πιο κάτω μεθόδους:

Προϋπόθεση 1-β: Ο χρήστης έχει κλιματολογικά δεδομένα και για τις δύο περιοχές μελέτης (Α και Β) από γειτονικό μετεωρολογικό σταθμό.

Προϋπόθεση 2-β: Οι περιοχές Α και Β βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και επομένως δεν αναμένονται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στο μικροκλίμα της περιοχής.

8.1.2.3. Προϋπόθεση γ: ίδια καλλιέργεια

Οι περιοχές Α και Β θα πρέπει να καλύπτονται από την ίδια καλλιέργεια, έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν τόσο οι φασματικές υπογραφές, όσο και ο φαινολογικός κύκλος. Για να εντοπιστούν περιοχές με την ίδια καλλιέργεια στην εικόνα, ο χρήστης μπορεί να ακολουθήσει μια από τις τρεις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια:

Προϋπόθεση 1-γ: Διενέργεια επιτόπιων επισκέψεων στο πεδίο

Προϋπόθεση 2-γ: χρήστης μελετά το φαινολογικό κύκλο για τις περιοχές Α και Β. Ίδιες καλλιέργειες αναμένεται να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά στο φαινολογικό κύκλο, όπως είναι για παράδειγμα, η διάρκεια φωτοσύνθεσης, η έναρξη και το τέλος του, χαρακτηριστικές τιμές δεικτών βλάστησης (π.χ. NDVI) κ.ά.

Προϋπόθεση 3-γ: Ο χρήστης επιλέγει περιοχές μελέτης σε κοντινή απόσταση, αφού σε αρκετές περιπτώσεις το είδος της καλλιέργειας δεν ποικίλλει από ένα τεμάχιο στο άλλο. Μάλιστα, αυτό ευσταθεί ιδιαίτερα σε παραδοσιακές αγροτικές εκτάσεις.

8.1.2.4. Προϋπόθεση δ: ίδιες τεχνικές καλλιέργειας

Ίδιες τεχνικές καλλιέργειας μπορεί να εντοπιστούν στην εικόνα με παρόμοια μεθοδολογία όπως την υπόθεση γ:

Προϋπόθεση 1-δ: Διενέργεια επιτόπιων επισκέψεων στο πεδίο

Προϋπόθεση 2-δ: Εξέταση του φαινολογικού κύκλου

Προϋπόθεση 3-δ: Επιλογή περιοχών μελέτης σε κοντινή απόσταση.

Αυτές, οι πιο πάνω τέσσερις βασικές προϋποθέσεις, επιτρέπουν την επιλογή των περιοχών διερεύνησης και έτσι τη μελέτη των φασματικών τους υπογραφών (Βήμα 5) και του φαινολογικού τους κύκλου (Βήμα 6).

Η πιο πάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της διατριβής, τόσο με τη χρήση δορυφορικών εικόνων (βλ. περίπτωση Θεσσαλίας και Παλαιπάφου) όσο και με τη χρήση επίγειων φασματοραδιομετρικών μετρήσεων (βλ. περίπτωση Αλάμπρας και Αχέλειας). Αυτό όμως που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η γνώση της περιοχής με επιτόπιες επισκέψεις βοήθησε σημαντικά στον επιτυχή εντοπισμό υπεδάφια καταλοίπων με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Σημαντικό στοιχείο επίσης αποτελεί η αρχαιολογική γνώση μιας περιοχής αλλά και η ιστορία της έρευνας που έγινε. Με αυτό τον τρόπο η μεθοδολογία επικυρώνεται σε συγκεκριμένες περιοχές και όχι σε όλη την έκταση της δορυφορικής εικόνας. Σε περίπτωση όμως όπου ο στόχος της έρευνας είναι ο εντοπισμός νέων αρχαιολογικών θέσεων –και επομένως θα διερευνηθεί μια μεγάλη έκταση-, προτείνεται όπως μετά τα αποτελέσματα που προκύπτουν (περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος), να ακολουθεί και ένας επιτόπιος έλεγχος.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, η πιο πάνω μεθοδολογία, μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε είδος δορυφορικών εικόνων ή ακόμη και αποκλειστικά με τη χρήση φασματοραδιομέτρων, ενώ μπορεί να επεκταθεί και στη μελέτη περισσότερων του ενός φαινολογικού κύκλων. Επιπλέον, ο χρήστης, μπορεί να επιλέξει περισσότερες περιοχές ενδιαφέροντος Β, δηλαδή περιοχές με βλάστηση για σκοπούς σύγκρισης με την περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (περιοχή Α), με στόχο την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του.

9. Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας διατριβής. Η διατριβή εξελίχθηκε σε διάφορους αρχαιολογικούς χώρους και ελεγχόμενα πεδία. Τα αποτελέσματα των ερευνών έρχονται να επιβεβαιώσουν γνωστές υπεδάφιας ανωμαλίες, αλλά κυρίως να προτείνουν νέα μέθοδο για τον εντοπισμό υπεδάφιας καταλοίπων.

9.1. Συμβολή διατριβής

Η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε έδειξε ότι η χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι σε θέση να βοηθήσει σημαντικά τις αρχαιολογικές έρευνες όσον αφορά τον εντοπισμό υπεδάφιας αρχαιολογικών καταλοίπων. Σήμερα καταγράφεται μια πληθώρα από διαθέσιμους τηλεπισκοπικούς δέκτες οι οποίοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, ενώ επίσης παράλληλα αποτυπώνεται και η ραγδαία ανάπτυξη της διαστημικής τεχνολογίας με αποτέλεσμα σήμερα αρκετοί νέοι δορυφόροι να σχεδιάζονται για ειδικούς σκοπούς και εφαρμογές.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έχει επιπλέον δείξει ότι η χρήση ειδικευμένων δεικτών βλάστησης περιορίζεται σήμερα σε μερικούς μόνο δείκτες –με κυριότερο το δείκτη NDVI. Η έρευνα της παρούσας διατριβής, έρχεται να ανατρέψει αυτή την εικόνα και να εφαρμόσει μια σειρά από υφιστάμενους πολυφασματικούς και υπερφασματικούς δείκτες, με στόχο να μελετηθεί η δυνατότητα χρήσης τους για αρχαιολογικές εφαρμογές. Η περίπτωση της αρχαιολογικής θέσης στην Ουγγαρία δείχνει ότι πολλοί δείκτες δύναται να συνδυαστούν έτσι ώστε να ενισχυθεί το τελικό αποτέλεσμα στην εικόνα.

Η χρήση επίγειων φασματοραδιομέτρων ως ένα νέο εργαλείο για τον εντοπισμό υπεδάφιας καταλοίπων τεκμηριώθηκε επαρκώς μέσα από τις συστηματικές έρευνες που έγιναν. Η χρήση τους μπορεί να βοηθήσει τόσο στην προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων (π.χ. ατμοσφαιρική διόρθωση), αλλά και στη μετά-επεξεργασία τους (δείκτες βλάστησης, ταξινομήσεις κτλ.). Τυπικές φασματικές υπογραφές, καθόλη τη διάρκεια ανάπτυξης του φυτού, μπορεί να χρησιμοποιηθούν

μετά από την κατάλληλη αναγωγή για οποιοδήποτε δορυφορικό αισθητήρα (πολυφασματικό – υπερφασματικό) όπως διεξοδικά περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 7.3.

Η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι οι πλείστες εφαρμογές της αρχαιοτηλεπισκόπησης μέχρι σήμερα κάνουν χρήση δορυφορικών εικόνων “κατάλληλης” διακριτικής ικανότητας. Στην παρούσα διατριβή, μέσα από την εισαγωγή της παρακολούθησης του φαινολογικού κύκλου της βλάστησης, γίνεται πλέον κατορθωτή η χρήση δεδομένων με μικρότερη ανάλυση από την εκτιμώμενη (βλ. περίπτωση Παλαιπάφου και Θεσσαλίας). Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, ένας μεγάλος όγκος δορυφορικών δεδομένων που είναι διαθέσιμα σήμερα δωρεάν, να αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για την αρχαιολογική έρευνα. Όπως φάνηκε μέσα από εκτενείς μελέτες που έγιναν στο πλαίσιο της διατριβής, ο φαινολογικός κύκλος είναι σε θέση να δώσει πολύτιμες πληροφορίες στον ερευνητή, ενώ παράλληλα μπορεί να εντοπίσει διαφοροποιήσεις στο φυσιολογικό κύκλο ανάπτυξης του φυτού, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε υπεδάφια αρχαιολογικά κατάλοιπα.

Τέλος δόθηκε έμφαση και στην προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, αφού η ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών δεδομένων απουσιάζει στην πλειονότητα των αρχαιολογικών εφαρμογών. Για το σκοπό αυτό, η παρούσα διατριβή τεκμηρίωσε μέσα από την ανάλυση δεδομένων, την αναγκαιότητα εφαρμογής της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, κάνοντας χρήση στοιχείων μόνο μέσα από την ίδια την εικόνα.

9.2. Καινοτομία διατριβής

Η παρούσα διατριβή προχώρησε σε εκτεταμένες μελέτες των φασματικών χαρακτηριστικών της βλάστησης (κριθάρι και σιτάρι) σε διάφορες θέσεις. Η καινοτομία της παρούσας διατριβής συγκεντρώνεται στα πιο κάτω σημεία:

- **Ανάπτυξη Νέας Μεθοδολογίας:** Μέσα από τη διατριβή έχει αναπτυχθεί μια νέα μεθοδολογία για τον εντοπισμό υπεδάφιων στόχων, χρησιμοποιώντας στοιχεία από την ίδια την εικόνα (image-based approach). Η μέθοδος που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε με επιτυχία σε δύο διαφορετικές γεωγραφικά αρχαιολογικές θέσεις (Παλαιάφου και Θεσσαλία), ενώ επιπρόσθετα έχει επαρκώς τεκμηριωθεί σε δύο ελεγχόμενα πεδία (Αλάμπρας και Αχέλειας).

Η μέθοδος αυτή μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα ή και επικουρικά με άλλες υφιστάμενες μεθόδους για ενίσχυση των τελικών αποτελεσμάτων ερμηνείας της αρχαιολογικής έρευνας, ενώ είναι ανεξάρτητη από το δορυφορικό δέκτη που χρησιμοποιείται. Η μέθοδος, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 8, αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο εντοπισμού περιοχών με αρχαιολογικό ενδιαφέρον. Η προτεινόμενη μέθοδος, έρχεται να καλύψει ένα σημαντικό κενό στη βιβλιογραφία που έχει να κάνει κυρίως με την περιορισμένη δυνατότητα των δορυφορικών εικόνων πριν την αυγή του 21^{ου} αι. Πράγματι, αν και την τελευταία δεκαετία οι χρήστες έχουν στη διάθεσή τους εικόνες με μεγάλη ανάλυση, εντούτοις στην αρχαιολογική έρευνα και αναζήτηση, η αρχαιακή πληροφορία παραμένει εξίσου σημαντική και ανεκτίμητη. Η νέα μέθοδος που αναπτύχθηκε δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να εξερευνήσουν και να εκμεταλλευτούν ένα μεγάλο όγκο δορυφορικών δεδομένων με στόχο την ανίχνευση υπεδάφιας αρχαιολογικών καταλοίπων.

- **Ανάπτυξη Αρχαιολογικού Δείκτη:** Η ανάπτυξη ενός αρχαιολογικού δείκτη, ο οποίος θα είναι σε θέση να εντοπίζει αρχαιολογικά κατάλοιπα από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων, δεν έχει ακόμη διερευνηθεί. Η παρούσα διατριβή δίνει μέσα από την εκτεταμένη καταγραφή φασματικών υπογραφών και μέσα από αναλύσεις διαχωριστικότητας των φασματικών διαύλων (Separability Indices) τη γενική μορφή η οποία θα πρέπει να διέπει αυτόν τον δείκτη. Μάλιστα, όπως φάνηκε και από το Κεφάλαιο 7.3, τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τις αναλύσεις φασματικής ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν και την εφαρμογή του σε υπερφασματικές εικόνες HYPERION στην περιοχή της Θεσσαλίας (Κεφάλαιο 7.2.4).

- **Καθορισμός βέλτιστης περιόδου για την παρακολούθηση διαφοροποιήσεων της βλάστησης:** Για πρώτη φορά διεξάγεται μια συστηματική μελέτη για τον εντοπισμό των διαφοροποιήσεων της βλάστησης σε ολόκληρο το φαινολογικό κύκλο της βλάστησης. Η εκτενής μελέτη και έρευνα που έγινε σε δύο διαφορετικές περιοχές μελέτης, ήταν σε θέση να καθορίσουν το χρονικό παράθυρο, όπου αυτή η διαφοροποίηση της βλάστησης αναμένεται να είναι πιο ευδιάκριτη μέσα από τη χρήση και επεξεργασία δορυφορικών εικόνων (στο φαινολογικό στάδιο της 'καρπόδεσης'). Αυτό το χρονικό παράθυρο περιορίζεται σε μόλις 15 ημέρες. Αυτός ο χρονικός καθορισμός είναι μεγάλης σημασίας για αρχαιολογικές έρευνες, αφού

δίνεται πλέον η δυνατότητα στους ερευνητές να προγραμματίσουν νέες λήψεις δορυφορικών δεκτών ή να αναζητήσουν αρχαιακό υλικό σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο, στο οποίο αναμένεται να υπάρχει μεγαλύτερη διαφοροποίηση. Επιπλέον το χρονικό παράθυρο, όπως προσδιορίστηκε από τη διατριβή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μικρές μεταβολές και σε άλλες Μεσογειακές χώρες που έχουν παρόμοια κλιματικά και γεωργικά χαρακτηριστικά.

- **Πειραματική Αρχαιοτηλεπισκόπηση:** Η συνηθισμένη πρακτική για την ανίχνευση υπεδάφια καταλοίπων με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων, γίνεται με τον εντοπισμό γραμμικών διαφοροποιήσεων της βλάστησης. Όμως, μέχρι σήμερα, όλες οι εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί, παρουσιάζουν μια κοινή αφετηρία: η πραγματική γνώση για τα υπεδάφια κατάλοιπα γίνεται εκ των υστέρων μετά από ανασκαφή. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα, η επιβεβαίωση των δορυφορικών αποτελεσμάτων από αρχαιολογικές έρευνες, απλώς απουσιάζει. Η πλήρης κατανόηση του φαινομένου του σχηματισμού των διαφοροποιήσεων της βλάστησης ή του εδάφους δεν έχει πλήρως μελετηθεί. Σημαντικές λεπτομέρειες της Αρχαιοτηλεπισκόπησης (π.χ. το βάθος των υπεδάφια στόχων, ποιες καλλιέργειες θεωρούνται καταλληλότερες για τον εντοπισμό αρχιτεκτονικών καταλοίπων, ποια είναι τα χρονικά παράθυρα για παρακολούθηση της καλλιέργειας κ.ά) δεν έχουν μελετηθεί διεξοδικά μέχρι στιγμής και μάλλον αυτό θα είναι αδύνατο να γίνει με τις συνήθεις πρακτικές. Με την Πειραματική Αρχαιοτηλεπισκόπηση θα είναι δυνατό να συλλέγουν σε ελεγχόμενα πεδία μια σειρά από μετρήσεις, οι οποίες τα οποία θα βοηθήσουν αφενός στην πλήρη κατανόηση του φαινομένου των διαφοροποιήσεων της βλάστησης και αφετέρου θα βοηθήσουν ουσιαστικά τις αρχαιολογικές έρευνες.

9.3. Μέλλοντικές εργασίες

Τα αποτελέσματα εφαρμογών της δορυφορικής τηλεπισκόπησης για αρχαιολογικές εφαρμογές, που έχουν γίνει κατά καιρούς, έχουν δείξει ότι η χρήση τέτοιων τεχνικών μπορεί να βοηθήσει σημαντικά την αρχαιολογική έρευνα και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι τεχνολογίες που παρέχει σήμερα η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης είναι μη καταστρεπτικές και λειτουργούν εξ αποστάσεως, το οποίο είναι απαραίτητο χαρακτηριστικό για την εφαρμογή τους στην Αρχαιολογία.

Παράλληλα οι τεχνικές της τηλεπισκόπησης ποικίλλουν από τους δορυφορικούς δέκτες, στις αερομεταφερόμενες ή ακόμη και επίγειες μετρήσεις. Αυτό, δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να επιβεβαιώσουν υπεδάφειες ανωμαλίες με διαφορετικές τεχνικές (π.χ. συνδυασμός δορυφορικών εικόνων και γεωφυσικών διασκοπήσεων), έτσι ώστε να ενισχύσουν το τελικό αποτέλεσμα. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι σε θέση να χαρτογραφηθεί και να συνδυαστεί με άλλες πληροφορίες, όπως είναι η επιφανειακή επισκόπηση, γραπτές πηγές, δειγματοληψία εδάφους κ.ά.

Μελλοντική έρευνα, δύναται να εστιαστεί σε διάφορα θέματα της αρχαιοτηλεπισκόπησης. Σαν άμεση συνέχεια της παρούσας έρευνας θα μπορούσε να αναφερθεί η μελέτη και άλλων καλλιεργειών έτσι ώστε να εξεταστεί η καταλληλότητα τους για τον εντοπισμό υπεδάφειων στόχων. Η μελέτη περισσότερων δεικτών βλάστησης αποτελεί επίσης ένα σημαντικό κενό στη σημερινή βιβλιογραφία. Ήδη μια πρώτη προσπάθεια που έγινε (Agariou *et al.*, 2012g) δείχνει ότι και διάφοροι δείκτες βλάστησης μπορεί να εφαρμοστούν με επιτυχία στην αρχαιολογική έρευνα.

Σε αυτό το πλαίσιο η έρευνα δύναται να εστιαστεί και στην επιστήμη της φυτοαρχαιολογίας, δηλαδή τον εντοπισμό χαρακτηριστικών φυτών τα οποία συνδέονται με υπεδάφια κατάλοιπα. Πέρα από τη μελέτη της βλάστησης κρίνεται σκόπιμο να γίνει και μια αντίστοιχη μελέτη των διαφοροποιήσεων του εδάφους (soil marks) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αρχαιολογικών θέσεων με σκωρία ή αρχαία μεταλλεία..

Η συλλογή επίγειων δεδομένων θα μπορεί να ενισχύσει τα οποιαδήποτε αποτελέσματα αλλά παράλληλα θα μπορεί να βοηθήσει σημαντικά και σε άλλες πτυχές της τηλεπισκόπησης όπως είναι οι τεχνικές un-mixing. Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι οι φασματικές υπογραφές θεωρούνται τα “βέλτιστα δείγματα” τα οποία μπορεί να έχει ο ερευνητής για να καθορίσει τα endmember. Οι τεχνικές unmixing μπορεί να μελετηθούν σε βάθος (linear unmixing, constrained unmixing, non-linear unmixing κτλ.) σε διάφορους αισθητήρες κυρίως υπερφασματικούς σε συνδυασμό με επίγειες τεχνικές γεωφυσικών διασκοπήσεων. Οι τεχνικές αυτές απουσιάζουν σημαντικά στο επιστημονικό πεδίο της Αρχαιοτηλεπισκόπησης.

Η μελέτη αρχαιολογικών θέσεων σε άλλο τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (π.χ. θερμοκάμερα, radar), οι έρευνες σε άλλες περιοχές μελέτης, η χρησιμότητα νέων δορυφόρων, η μελέτη των διαφοροποιήσεων της βλάστησης σε δορυφόρους πλάγιας λήψης (off nadir) κ.ά. είναι μερικά άλλα θέματα τα οποία χρήζουν διερεύνησης.

Όλα τα πιο πάνω, σε συνδυασμό με τη συνεχή τεχνολογική ανάπτυξη των δορυφορικών δεκτών, μέσα από την εκτόξευση νέων δορυφόρων, δείχνουν την τάση που αναμένεται να επικρατήσει τα επόμενα χρόνια. Η εξειδίκευση μάλιστα δορυφόρων για συγκεκριμένες εφαρμογές είναι πλέον μια πραγματικότητα. Νέοι δορυφόροι με μεγαλύτερη χωρική και φασματική ανάλυση έχουν βοηθήσει και αναμένεται να ωθήσουν περαιτέρω την έρευνα σε πολλούς τομείς. **Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του πρώτου αρχαιολογικού δορυφόρου** αποτελεί σήμερα μια επιτακτική ανάγκη και ένα σημαντικό πεδίο μελλοντικής έρευνας. Αυτό όμως δε μειώνει τη σημασία που αποκτούν οι ίδιες οι αρχαιολογικές έρευνες. Το τελικό συμπέρασμα της Αρχαιοτηλεπισκόπησης, θα είναι πάντοτε μια **“υπεδάφια ανωμαλία”** και θα αναμένει την αρχαιολογική σκαπάνη να την επιβεβαιώσει ή να την απορρίψει. Η αμφίδρομη σχέση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ της Αρχαιοτηλεπισκόπησης και της ίδιας της Αρχαιολογίας αποτελεί μονόδρομο για την σωστή ερμηνεία και ανάλυση των “ψηφιακών συμπερασμάτων”.

Βιβλιογραφία

Abduwasit G., Zhao-Liang L., Qiming Q., Hamid Y., Jihua W., 2008. Estimating crop water stress with ETM+ NIR and SWIR data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148:1679-1695

Adhav R. S., 1963. Wide angle spectroradiometer, *Journal of Scientific Instruments*, 40 (9), 455-456.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D., 2013. Development of an image-based method for the detection of archaeological buried relics using multi-temporal satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*.

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Nisantzi A., Alexakis D. D., Themistocleous K., Papadavid G., Papoutsas C., 2012a. Variability of field spectroradiometric measurements using nearly Lambertian surfaces and auxiliary Lidar observations, *Proceedings of the 32nd EARSeL Symposium 2012, Mykonos, Greece, 21-24/05/2012* (in press).

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Sarris A., Georgopoulos A., Alexakis D. D., 2012b. Linear Spectral Unmixing for the detection of Neolithic Settlements in the Thessalian Plain, *Proceedings of the 32nd EARSeL Symposium 2012, Mykonos, Greece, 21-24/05/2012* (in press).

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D., Sarris, A., 2012c. Observatory validation of Neolithic tells ("Magoules") in the Thessalian plain, central Greece, using hyperspectral spectro-radiometric data, *Journal of Archaeological Science*, 39 (5), 1499–1512. doi.org/10.1016/j.jas.2012.01.001.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D., Papadavid G., 2012d. Examining the Phenological Cycle of Barley Crops for the detection of buried archaeological remains, *GIScience & Remote Sensing* (in press).

Agapiou A., Alexakis D., Hadjimitsis D. G., 2012e. Evaluation of spectral sensitivity of ALOS, ASTER, IKONOS, LANDSAT and SPOT satellite sensors intended for the detection of archaeological crop marks, *Digital Earth*, DOI:10.1080/17538947.2012.674159.

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Georgopoulos A., Sarris A., Alexakis D. D., 2012f. Towards to an Archaeological Index: Identify the Spectral Regions of Stress Vegetation due to Buried Archaeological Remains, LNCS , M. Ioannides et al. (Eds.): *EuroMed 2012*, 7616, pp. 129--138. Springer, Heidelberg.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., Alexakis D. D. 2012g. Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks, *Remote Sensing*, , 4, 3892-3919.

Agapiou A., Hadjimitsis D. G., 2011. Detection of possible Archaeological Crop Marks in Cyprus Using Vegetation Indices and Field Spectroradiometric Measurements: Verification under area surveyed with geophysical campaigns, *Journal of Applied Remote Sensing* 5, 053554, doi:10.1117/1.3645590

Agapiou A., Sarris, A., Hadjimitsis D.G., Georgopoulos A., 2011a. Exploring Ground Spectroscopy for the Detection of Sub-Surfaces Architectural Remains: the Methodological Context, *Proceedings XVI Congress of the UISPP (International Union for Prehistoric and Protohistoric Sciences)*, 4 - 10 September, Florianopolis, Brazil, *BASOR* (in press).

Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Papoutsis C., Alexakis D.D., Papadavid G. 2011b. The Importance of Accounting for Atmospheric Effects in the Application of NDVI and Interpretation of Satellite Imagery Supporting Archaeological Research: The Case Studies of Palaepaphos and Nea Paphos Sites in Cyprus. *Remote Sensing*, 3(12),2605-2629.

Agapiou A., Hadjimitsis G. D., Sarris A, Georgopoulos A., 2010a. Macro-scale archaeological perspectives: Remote Sensing techniques for investigating archaeological sites in Cyprus, *Archaeolingua*, 263-268, ISBN 978-963-9911-16-1,

Proceedings 3rd International Euro-Mediterranean Conference (EuroMed), 8-13 November 2010, Limassol, Cyprus.

Agapiou A., Iacovou M., Sarris A., 2010b. Spatial analysis of the archaeological sites of the Palaepaphos region (northwest Cyprus), during the 3rd and 2nd millennium B.C. using GIS, XXXVIII Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA 2010, Granada, Spain, 6-9 April 2010 (in press).

Agapiou A., Hadjimitsis G. D., Sarris A., Themistocleous K., Papadavid G., 2010c. Hyperspectral ground truth data for the detection of buried architectural remains, LNCS 6436, 318–331, 2010. Proceedings 3rd International Euro-Mediterranean Conference (EuroMed), 8-13 November 2010, Limassol, Cyprus.

Agapiou A., Hadjimitsis D., Themistocleous K., Papadavid G., Toullos L. 2010d. Detection of archaeological crop marks in Cyprus using field spectroscopy measurements, Proceedings of SPIE,. 7831, 78310V.

Αλεξιάκης Δ., 2009. Η συμβολή της γεωμορφολογίας με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στη χαρτογράφηση αρχαιολογικών θέσεων. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Alexakis A., Sarris A., Astaras T., Albanakis K., 2009. Detection of Neolithic Settlements in Thessaly (Greece) Through Multispectral and Hyperspectral Satellite Imagery. *Sensors*, 9, 1167-1187.

Alexakis A., Sarris A., Astaras T., Albanakis K., 2011. Integrated GIS, remote sensing and geomorphologic approaches for the reconstruction of the landscape habitation of Thessaly during the neolithic period. *Journal of Archaeological Science*, 38, 89-100.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes, D., Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56.

Altaweel M., 2005. The use of ASTER satellite imagery in archaeological contexts. *Archaeological Prospection*, 12, 151–166.

Aqduş S. A., Hanson W. S., Drummond J., 2007. A Comparative Study for Finding Archaeological Crop Marks using Airborne Hyperspectral, Multispectral and Digital Photographic Data. In *Proceedings of the 2007, Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society*, Newcastle University, Oct. 11-15, 2007

Aqduş, S. A., Drummond, J., Hanson, W. S. 2008. Discovering archaeological cropmarks: a hyperspectral approach. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII. Part B5.

Aqduş S. A., Hanson W. S., Drummond J., 2012. The potential of hyperspectral and multi-spectral imagery to enhance archaeological cropmark detection: a comparative study. *Journal of Archaeological Science*, 39 (7), 1915–1924.

Bagheri S., Nearshore Water Quality Estimation Using Atmospherically Corrected AVIRIS Data. *Remote Sens.*, 2011, 3(2), 257-269; doi:10.3390/rs3020257

Bánffy E., 1994. Transdanubia and Eastern Hungary in the Early Copper Age. *A Jóna András Múzeum Évkönyve*, XXXVI:291-296.

Bánffy E., 1995. South-West Transdanubia as a Mediating Area. On the Cultural History of the Early and Middle Chalcolithic. In *Archaeology and Settlement History in the Hahót Basin, SW-Hungary*, *ANTAEUS: Communicationes ex Instituto Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 22, 157-196.

Bannari, A., Morin, D., Huette, A. R., Bonn, F., 1995: A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, 13, 95–120.

Baret F., Guyot G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35 (2-3), 161-173.

Barlindhaug, S. Holm-Olsen, I. M. Tommervik, H., 2007. Monitoring archaeological sites in a changing landscape-using multitemporal satellite remote sensing as an 'early warning' method for detecting regrowth processes. *Archaeological Prospection*, 14(4), 231-244.

Bassani C., Cavalli R. M., Goffredo R., Palombo A., Pascucci S., Pignatti S. 2009. Specific Spectral Bands for Different Land Cover Contexts to Improve the Efficiency of Remote Sensing Archaeological Prospection. The Arpi case study. *Journal of Cultural Heritage*, 10, 41-48.

Bastiaanssen W.G.M., Molden D. J., Makin, I. W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46, 137 – 155.

Beck A. 2007. Archaeological site detection: the importance of contrast. 2007 Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society, Newcastle University, Sept. 11-14, 2007.

Beck A., Wilkinson K., Philip G., 2007. Some techniques for improving the detection of archaeological features from satellite imagery. *International Society for Optical Engineering , Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology VII* , 17-20 September 2007, Florence, Italy, vol. 6749, 674903.1-674903.12.

Bennett R., Welham K., Hill A. R., Ford L. J. A., 2012. The application of vegetation indices for the prospection of archaeological features in grass-dominated environments. *Archaeological Propsection*, doi: 10.1002/arp.1429.

Benz U.C., Hofmann P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 58, 239– 258

Bewley R., Donoghue D., Gaffney V., van Leusen M., Wise A., 1999. Archiving aerial photography and remote sensing data : a guide to good practice. *Archaeology Data Service*, Oxbow, UK

Birth G. S., McVey G. R., 1968. Measuring the colour of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60, 640-643.

Bitelli G, Girelli V.A., 2009. Metrical use of declassified satellite imagery for an area of archaeological interest in Turkey. *Journal of Cultural Heritage*, 10 (1), e35-e40.

Βουζαξάκης Κ., 2009. Γεωγραφικά πρότυπα και θεωρίες του διακοινοτικού χώρου στη Νεολιθική Θεσσαλία. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ιστορίας και Αρχαιολογίας, Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Brach, E. J., Wiggins, B. W. E., 1967. A portable spectrophotometer for environmental studies of plants. *Laboratory Practise*, 16, 302–309.

Bradley A. B, Jacob W. R., Hermance F. J., Mustard F. J., 2007. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 106 (2), 137-145.

Bulpitt T. H., Coulter M. W., Hamner K.C., 1965. A Spectroradiometer for the Spectral Region of Biological Photosensitivity, *Applied Optics*, 4 (7), 793-797.

Γαλλής Ι. Κ., 1992. Άτλας Προϊστορικών οικισμών της Ανατολικής Θεσσαλικής πεδιάδας. Έκδοση Εταιρείας Ιστορικών Ερευνών Θεσσαλίας, Λάρισα

Canadell J., Jackson RB, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze E-D, 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108, 583-595.

Campbell, J. B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. London and New York..

Capper J. E., 1907. Photographs of Stonehenge as seen from a war balloon, *Archaeologia* 60, 571.

Castro-Esau K.L., Sánchez-Azofeifa G.A., Rivard B., 2006. Comparison of spectral indices obtained using multiple spectroradiometers. *Remote Sensing of Environment*, 103, 276–288.

Cavalli R. S., Colosi F., Palomb A., Pignatti S., Poscolieri M., 2007. Remote hyperspectral imagery as a support to archaeological prospection. *Journal of Cultural Heritage* 8, 272e283.

Chander G., Markham, L. B., Helder L.D., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893–903.

Chapman J., 1983. The “Secondary Products Revolution” and the Limitations of the Neolithic. *Bulletin of the Institute of Archaeology, University of London*, 19, 107- 22.

Che N., Price J. C., 1992. Survey of Radiometric calibration results and methods for visible and near infrared channels of NOAA-7, -9, and -11 AVHRRs. *Remote Sensing of Environment*, 41, 19 – 27.

Chen, X., Vierling, L. A., 2006. Spectral mixture analyses of hyperspectral data acquired using a tethered balloon. *Remote Sensing of Environment*, 103, 338–350.

Chrysoulakis N., Abrams M., Feidas H., Arai K., 2010. Comparison of Atmospheric Correction Methods Using ASTER Data for the Area of Crete: The ATMOSAT Project. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31, 6347–6385

Ciminale M., Gallo D., Lasaponara R., Masini N. 2009, A Multiscale Approach for Reconstructing Archaeological Landscapes: Applications in Northern Apulia (Italy), *Archaeological Prospection*, 16, 143–153.

Comfort A., 1997. Satellite remote sensing and archaeological survey on the Euphrates, *Aerial Archaeology Research Group News*, 14, 39-46.

Conghe S., Woodcock E. C., 2003. Monitoring Forest Succession With Multitemporal Landsat Images: Factors of Uncertainty, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (11), 2557 -2567.

Courault D., Seguin B., Olioso A, 2003. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use of

mesoscale atmospheric models. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions, 17 Sept. 2003.

Crawford O. G.S. 1923. Stonehenge from air: course and meaning of 'The Avenue', Observer 13.

Curran P. J., Williamson H. D., 1986. Sample Size for Ground and Remotely Sensed Data, Remote Sensing of Environment, 20, 31–41.

De Maesschalck R., Jouan-Rimbaud D., Massart D.L., 2000. The Mahalanobis distance. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 50(1-4), 1-18, ISSN 0169-7439, 10.1016/S0169-7439(99)00047-7.

Deering D.W., 1986. A Sphere-Scanning Radiometer for Rapid Directional Measurements of Sky and Ground Radiance. Remote Sensing of Environment 19: 1-24.

Duggin M. J., Piwinski D. 1984. Recorded radiance indices for vegetation monitoring using NOAA AVHRR data; atmospheric and other effects in multitemporal data sets. Applied Optics, 23, 2620 – 2623.

Endeine B., 1956. Une method pratique pour la detection aeriene des sites archaeologiques, en particulier par la photographie sur films en couleurs et sur films infrarouges. Bulletin de la Societe Prehistorique Fraçaise, 53, 540-6.

Eppelbaum L., 2009. Near-surface temperature survey: An independent tool for delineation of buried archaeological targets. Journal of Cultural Heritage 10S, e93–e103.

FAO, 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Forster C. B., 1984. Derivation of atmospheric correction procedures for LANDSAT MSS with particular reference to urban data. International Journal of Remote Sensing, 5, 799-817.

Fowler M., Curtis H., 1995. Stonehenge from 230 kilometers. *Aerial Archaeology Research Group News*, 11, 8-16.

Fowler M. J. F., Fowler M.Y, 2005. Detection of archaeological crop marks on declassified CORONA KH-4B intelligence satellite photography of Southern England. *Archaeological Prospection* 12, 257-264.

Funk C., Budde, E. M., 2009. Phenologically-tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe. *Remote Sensing of Environment*, 113 (1), 115-125.

Gallo D., Ciminale M., Becker H., Masini N., 2009. Remote sensing techniques for reconstructing a vast Neolithic settlement in Southern Italy, *Journal of Archaeological Science* 36, 43–50.

Garrison T.G., Houston S.D., Golden C., Inomata T., Nelson Z., Munson J., 2008. Evaluating the use of IKONOS satellite imagery in lowland Maya settlement archaeology. *Journal of Archaeological Science* 35, 2770–2777.

Garrison, T.G., 2007. *Ancient Maya Territories, Adaptive Regions, and Alliances: Contextualizing the San Bartolo-Xultun Intersite Survey*. Ph.D. dissertation, Harvard University, Cambridge. University Microfilms, Ann Arbor.

Gillani G., 2007. The roman city of Uxama Argeala (Soria, Spain) and its study by means of remote sensing and digital cartography. 21nd CIPA Symposium, 2007, Athens

Gimbutas M., 1979. The three waves of the Kurgan people into old Europe, 4500-2500 BC. *Archives Suisses d'Anthropologie Générale*, 43 (2), 113–137.

Gimbutas M., 1980. The Kurgan wave 2 (c. 3400–3200 BC): Into Europe and the following transformations of culture. *Journal of Indo-European Studies*, 8, 273–315.

Gitelson, A., Merzlyak, M. N., 1994. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 22, 247–252.

Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N., 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58 (3), 289-298.

Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., Chivkunova, O. B., 2001. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 74, 38–45.

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L. & Nelson, S. G., 2008. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors*, 8, 2136-2160.

Glueck N. 1965. *Deities and Dolphins: the story of the Nabataean.*, New York, Farrar, Straus and Gioroux.

Goetz, A. F. H., 1975. Portable field reflectance spectrometer. JPL Technical Report, Pasadena, California Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 183–188.

Goossens R., De Wulf A., Bourgeois J., Gheyle W., Willems T., 2006. Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains. *Journal of Archaeological Science* 33(6), 745-755.

Gouranga K., Harsh N. V., 2005. Phenology based irrigation scheduling and determination of crop coefficient of winter maize in rice fallow of eastern India. *Agricultural Water Management*, 75 (3), 169-183.

Grosse G., Schirmer L., Kunitsky V.V., Hubberten H. W., 2005. The use of CORONA images in remote sensing of periglacial geomorphology: an illustration from the NE Siberian coast. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(2), 163-172.

Hadjimitsis D. G., Papadavid G., Agapiou A., Themistocleous K., Hadjimitsis M. G., Retalis A., Michaelides S., Chrysoulakis N., Toullos L., Clayton C. R. I., 2010.

Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 89-95, doi:10.5194/nhess-10-89-2010.

Hadjimitsis D.G., Themistocleous K., Agapiou A., Clayton C. R. I., 2009. Multi-temporal study of archaeological sites in Cyprus using atmospheric corrected satellite remotely sensed data. *International Journal of Architectural Computing*, 7 (1), 121-138.

Hadjimitsis D.G., Themistocleous K., Ioannides M., Clayton C.R.I, 2008. Integrating satellite remote sensing and spectro-radiometric measurements for monitoring archaeological site landscapes. In 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, VSMM 2008, 20-25/10/2008, Limassol, Cyprus.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., 2007. The application of the covariance matrix statistical method for removing atmospheric effects from satellite remotely sensed data intended for environmental applications. In *Proceedings of SPIE*, 2004, 6749, 674936, doi:10.1117/12.751887.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., 2008. The use of an improved atmospheric correction algorithm for removing atmospheric effects from remotely sensed images using an atmosphere-surface simulation and meteorological data. *Meteorological Applications Journal*, 15 (3), 381-387. DOI: 10.1002/met.80.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., 2011. Field Spectroscopy for Assisting Water Quality Monitoring and Assessment in Water Treatment Reservoirs Using Atmospheric Corrected Satellite Remotely Sensed Imagery. *Remote Sens.* 3, 362-377.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S., 2004a. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 3651-3674.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Retalis A., 2004b. Darkest pixel atmospheric correction algorithm: a revised procedure for environmental applications of satellite remotely sensed imagery. Proceedings 10th International Symposium on Remote Sensing, 5239, 464. doi: 10.1117/12.511520.

Hadjimitsis D. G., Clayton C. R. I., Hope V. S., 2000. The Importance of Accounting for Atmospheric Effects in Satellite Remote Sensing: A Case Study from the Lower Thames Valley Area, UK . Proceedings ASCE Conference-Space and Robotics 2000, February 2000, New Mexico, USA, sponsored by the ASCE and co-sponsored by NASA and SANDIA National Laboratories, 194-201. ISBN 0-7844-0479-8.

Han K. Y., Byun G. Y., Chol W. J., Han Y. D., Kim I. Y., 2012. Automatic registration of high-resolution images using local properties of features. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 78 (3): 211-221.

Hantson S., Chuvieco E., 2011. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13 (5), 691-700.

Hastie T., Tibshirani, R., 1996. Discriminant adaptive nearest neighbor classification. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(6), 607–615.96

Hatfield, J.L., Prueger, J.H., 2010. Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. Remote Sensing 2, 562-578.

Hatfield, J.L., Gitelson, A.A., Schepers, J.S., Walthall, C.L., 2008. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. Agron. J. 100, S-117-S-131.

Hejcman, M.; Smr, Z, 2010. Cropmarks in stands of cereals and winter rape indicate sub-soil archaeological features in the agricultural landscape of Central Europe. Agriculture, Ecosystems and Environment, 138, 348-354.

Herold M., Roberts A. D., Gardner E. M., Dennison E. P. 2004. Spectrometry for urban area remote sensing: Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm, *Remote Sensing of Environment*, 91 (3-4), 30, 304-319.

Hogarth D. G., 1889. *Devia Cypria. Notes of an Archaeological Journey in Cyprus in 1888.* London.

Honkavaara E., Arbiol R., Markelin L., Martinez L., Cramer M., Bovet S., Chandelier L., Ilves R., Klonus R., Marshal P, Schläpfer D., Tabor M., Thom C., Veje N., 2009. Digital Airborne Photogrammetry—A New Tool for Quantitative Remote Sensing?—A State-of-the-Art Review On Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images. *Remote Sensing*, 1(3), 577-605; doi:10.3390/rs1030577.

Huete A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.

Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., Leeuwen van W., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59, 440–451

Hunt, G., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42 (3), 501–513.

Hunt, G., 1979. Near-infrared (1.3-2.4 μm) spectra of alteration minerals- Potential for use in remote sensing. *Geophysics* 44 (12), 1974–1986.

Ιακώβου Μ., 2010. Ανασκαφικό πρόγραμμα στην Παλαίπαφο: Η αστική τοπογραφία της αρχαίας Πάφου (2006-2010): Πανεπιστήμιο Κύπρου. Ετήσια Έκθεση προς το Τμήμα Αρχαιοτήτων Κύπρου.

Iacovou M., 2008. “The Palaepaphos Urban Landscape Project”: Theoretical Background and Preliminary Report 2006-2007. *RDAC* 263-289.

Iacovou, M. 2012. From Regional Gateway to Cypriot Kingdom. Copper Deposits and Copper Routes in the Chora of Paphos. In *Eastern Mediterranean Metallurgy and Metalwork in the Second Millennium BC. A conference in honour of James D. Muhly*. V. Kassianidou and G. Papasavvas (eds). Oxford: Oxbow

Iacovou M., Stylianidis E., Sarris A., Agapiou A., 2009. A long-term response to the need to make modern development and the preservation of the archaeo-cultural record mutually compatible operations: the GIS contribution, In *Proceedings of the 22nd CIPA Symposium, Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage* October 11-15, Kyoto, Japan.

Ιακώβου Μ., Σατράκη Α., Αγαπίου Α., 2010. Έρευνες πεδίου του Πανεπιστημίου Κύπρου στην Παλαίπαφο. *Χρονικό, Πολίτης, Τεύχος 118*, 2010.

Irons R. J., Dwyer L. J., Barsi A. J. 2012. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission, *Remote Sensing of Environment*, 122, 11-21, ISSN 0034-4257, 10.1016/j.rse.2011.08.026.

Jackson, R. D., Huete, A. R., 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11, 185-200.

Jonson, K. J., 2006. *Remote Sensing in Archaeology. An explicitly North America Perspective*. The University of Alabama Press.

Jordan C.F., 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.

Jovanov B., 1982. *Rudna Glava: The Oldest Copper Mining in the Central Balkans*. Institute of Archaeology, Bor-Beograd.

Justice C.O., Townshend J.R.G., Holben, B.N., Tucker, C.J., 1984. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 6 (8), 1271–1318.

Kaimaris D., Georgoula O., Patias P., Stylianidis E., 2011. Comparative analysis on the archaeological content of imagery from Google Earth. *Journal of Cultural Heritage* 12 (3), 263-269.

Kaimaris D., Georgoula O., Karadedos G., Patias P., 2009. Aerial and remote sensing archaeology in eastern Macedonia, Greece. 22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan.

Καλαϊτζίδης X., Μανάκος Ι., 2012. Τηλεπισκόπηση και GIS στη γεωργία. European Association of Remote Sensing Laboratories, <http://www.seos-project.eu/modules/agriculture/agriculture-c00-p02.gr.html>

Karageorghis V., 1983. Palaepaphos-Skales. An Iron Age cemetery in Cyprus, Nicosia.

Karageorghis V., 1990. Tombs at Palaepaphos. 1. Teratsoudhia. 2. Eliomylia. Nicosia

Kardoulas N.G., Bird A.C., Lawan A.I., 1996. Geometric Correction of SPOT and Landsat Imagery: A Comparison of Map and GPS-Derived Control Points. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (10), 1173-1177.

Kaufman Y. J., Sendra C., 1988. Algorithm for automatic corrections to visible and near -IR satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1357 – 1381.

Kaufman Y.J., Tanré D.μ 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). *IEEE Geosci. Remote Sensing*, 30, 261–270.

Kauth R. J., Thomas G. S., 1976. The Tasselled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. In *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University of West Lafayette, Indiana, 1976, 4B,44-51.

Kelong T., Yuqing W., Lin Y. Riping Z., Wei C., Yaobao M., 2008. A new archaeological remote sensing technology. *The International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII.
Part B7. Beijing 2008

Keneddy A., 1925. Petra: Its history and monuments. London, Country Life.

Keneddy D., 2002. Aerial photography in the Middle East: the role of the military: past, present...and future?, στο R.H.Brewley and R. Raczkowski (επιμ.) Aerial Archaeology: Developing Future Practice, NATO Science book series, vol. 1, Amsterdam, IOS Press.

Kim, M. S., Daughtry, C. S. T., Chappelle, E. W., McMurtrey, J. E. III, Walthall, C. L., 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR). 6th symposium on physical measurements and signatures in Remote Sensing, Val D'Isere, France.

Kostka R. 2002. The world mountain Damavand: documentation and monitoring of human activities using remote sensing data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57 (1-2), 5-12.

Kriebel K. T., 1978. Average Variability of the Radiation Reflected by Vegetated Surfaces due to Differing Irradiations. Remote Sensing of Environment 7, 81–83.

Kross A., Fernandes R., Seaquist J., Beaubien E., 2011. The effect of the temporal resolution of NDVI data on season onset dates and trends across Canadian broadleaf forests. Remote Sensing of Environment, 115 (6), 1564-1575.

Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. B., Heidebrecht K. B., Shapiro A. T., Barloon P. J., Goetz A. F. H., 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. Remote Sensing of the Environment, 44, 145-163

Laet V., Paulissen E., Waelkens M., 2007. Methods for the extraction of archaeological features from very high-resolution Ikonos-2 remote sensing imagery, Hisar (southwest Turkey), Journal of Archaeological Science 34, 830e841.

Lasaponara R., Masini N., 2011. Satellite remote sensing in archaeology: past, present and future perspectives. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 1995-2002.

Lasaponara R., Masini N., 2007a. Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. *Journal of Archaeological Science*, 34, 214-221.

Lasaponara R., Masini N., 2007b. Improving satellite QuickBird-based identification of landscape archaeological features through Tasseled Cap Transformation and PCA. 21nd CIPA Symposium, 2007, Athens

Lasaponara, R., Masini, N. 2006. Identification of archaeological buried remains based on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from Quickbird satellite data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3 (3), 325-328.

Lasaponara, R. Masini, N. 2005. QuickBird-based analysis for the spatial characterization of archaeological sites: case study of the Monte Serico Medioeval village. *Geophysical Research Letter*, 32 (12),L12313.

Levin, N., 1999. *Fundamental of Remote Sensing*, Tel Aviv University, Israel.

Lieth, H., 1974. Purposes of a phenology book. In *Phenology and seasonality modelling*. Springer-Verlag, New York, NY, Ecological Studies 8.

Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W., 2004. *Remote Sensing and image interpretation*, Wiley International Edition.

Lock G., 2003. *Using Computers in Archaeology, towards virtual pasts*. Routledge, Taylor and Francis Group, London and New York.

Lu D., Mausel P. , Brondizio E. , Moran E. , 2002. Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (13), 2651–2671.

Maier F.G., 1979. Excavations at Kouklia (Palaepaphos). Tenth preliminary report: Seasons 1977 and 1988. *RDAC*, 168 – 176.

Maier F.G., 1981. Excavations at Kouklia (Palaepaphos). Eleventh preliminary report: Seasons 1979 and 1980. RDAC, 101-5.

Maier F. G., Wartburg M. L., 1995. Excavating at Palaepaphos 1966 – 1984. Στο Karageorghis (επιμ.) 1995, 142-172.

Maier F. G., Hadjisavvas S., Wartburg M. L., 2004. Guide to Palaipaphos (Kouklia), Bank of Cyprus Cultural Foundation. Department of Antiquities, Nicosia.

Malenovský Z., Bartholomeus M. H., Acerbi-Junior W. F., Schopfer T. J., Painter H. T., Epema F. G., Bregt K. A., 2007. Scaling dimensions in spectroscopy of soil and vegetation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9 (2), 137-164.

Marceau J. D., Gratton J. D., Fournier A. R., Fortin, J.-P., 1994. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 2. The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 49 (2), 105-117.

Markham B. L., Boncyk W. C., Helder D. L., Barker J. L. 1997. Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus Radiometric Calibration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(4), 318–332.

Markham B. L., Barker J. L. 1985. Spectral characterization of the LANDSAT Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 6 (5), 697-716.

Martonchik J. V., Bruegge C. J., Strahler A. H., 2000. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 19, 9–20.

Masini N., Lasaponara R., Orefici G., 2009. Addressing the challenge of detecting archaeological adobe structures in Southern Peru using QuickBird imagery. *Journal of Cultural Heritage* 10S, e3–e9.

Masini N., Lasaponara R., 2007. Investigating the Spectral Capability of QuickBird Data to Detect Archaeological Remains Buried under Vegetated and Not Vegetated

Areas. *Journal of Cultural Heritage*, 8,53-60.

McCauley, J.F., Schaber, G.G., Breed, C.S., Grolier, M.J., Haynes, C.V., Issawi, B., Elachi, C., Blom, R., 1982. Subsurface valleys and geoarchaeology of the eastern Sahara revealed by Shuttle Radar. *Science* 218, 1004-1020.

McClatchey R. A., Fenn W. S., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S., 1971. Optical properties of the atmosphere, Rep. AFCr1-71-0279, 85, Air Force Cambridge Res. Lab., Bedford Mass.

McCloy K. R., 2010. Development and Evaluation of Phenological Change Indices Derived from Time Series of Image Data. *Remote Sensing*, 2, 2442-2473.

Merkurjev D., Rahmani S., Strait M., Adviser F., Wittman T., 2007. Evaluation of Pan-Sharpener Methods, *IEEE Transactions on Geo-Science & Remote Sensing*, 45, 1-6.

Milisauskas S., Kruk J., 1991. Utilization of Cattle for Traction During the Later Neolithic in Southeastern Poland. *Antiquity* 65, 562-66.

Mills, J., Palmer R., 2007. *Populating clay landscapes*. Tempus, Stroud.

Milton, E. J., 1987. Principles of Field Spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 8 (12), 1807-1827.

Milton E. J., Rollin E. M., 2006. Estimating the irradiance spectrum from measurements in a limited number of spectral bands. *Remote Sensing of Environment* 100, 348-355.

Milton E. J., Schaepman M. E., Anderson K., Kneubühler M., Fox N., 2009. Progress in Field Spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 113, 92-109.

Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., Vidal, A.A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49, 246–263.

Moshier S. O, El-Kalani A., 2008. Late Bronze Age paleogeography along the ancient Ways of Horus in Northwest Sinai, Egypt. *Geoarchaeology* 23(4), 450-473.

Negria S., Leucci G., 2006. Geophysical investigation of the Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey). *Journal of Archaeological Science*, 33 (11), 1505-1513.

Nicodemus F. F., Richmond J. C., Hsia J. J., Ginsberg I.W., Limperis T. L., 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *National Bureau of Standards Monograph*, 160, Washington, D.C U.S. Govt. Printing Office.

Oh J., Toth K.C., Grenjer-Brzezlniska A.D. 2011. Automaric georeferencing of aerial images using stereo high-resolution satellite image. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77 (11): 1157-1168.

O'Leary, G. J., Connort, D. J., White D. H., 1985. A Simulation Model of the Development, Growth and Yield of the Wheat Crop. *Agricultural Systems* 17, 1-26.

Παπαδαυβίδ Γ., 2011. Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών Κύπρου, Προσωπική επικοινωνία.

Παπαζαφειρίου Γ. Ζ., 1999. Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Papadavid G., Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Themistocleous K. 2009a. Estimating Evapotranspiration of spring potatoes in Paphos, Cyprus using remote sensing, spectroradiometric and meteorological data. *Proceedings of RSPSoc 2009 Annual conference*, September, Leicester, UK, p. 289-295.

Papadavid G., Agapiou A., Themistocleous K., Hadjimitsis D. G., 2009b. The integration of Remote Sensing and meteorological data for monitoring irrigation demand in Cyprus, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 2009-2014.

Papadavid G., Hadjimitsis D.G., Themistocleous K., Toullos L. 2010. Spectral vegetation indices from field spectroscopy intended for evapotranspiration purposes for spring potatoes in Cyprus. *Proceedings of SPIE Vol. 7824*, 782410.

Papadavid G., Hadjimitsis D.G., Perdikou S., Michaelides S., Toullos L., Seraphides N. 2011a. Use of field spectroscopy for exploring the impact of atmospheric effects on Landsat 5 TM / 7 ETM+ satellite images intended for hydrological purposes in Cyprus, *GIScience and Remote Sensing*, 48, No 2, p. 280—298, DOI: 10.2747/1548-1603.48.2.280.

Papadavid G., Hadjimitsis D., Agapiou A., Alexakis A., Papoutsas C., 2011b. Water management using geoinformatics and remote sensing techniques: the case study of Mandria, SW Cyprus. In *Proceedings of the VI International Symposium - EWRA 2011, Water Engineering and Management in a Changing Environment*, June 29 - July 2, 2011, Catania, Italy.

Papadavid G., Hadjimitsis D.G, Toullos L., Michaelides S., 2011. Mapping potato crop height and leaf area index through vegetation indices using remote sensing in Cyprus, *Journal of Applied Remote Sensing*, 5, 053526.

Papadopoulos G. N., Sarris A., Salvi C. M., 2011. Reconstruction of the archaeological landscape around the area of the Magoula “Zerelia” in Almyros (Volos, NE Greece). In *Proceedings of the 9th International Conference on Archaeological Prospection*, September 19 – 24, 2011 Izmir-Turkey (in press).

Papoutsas C., Hadjimitsis D.G., Alexakis D., 2011. Characterizing the spectral signatures and optical properties of dams in Cyprus using field spectroradiometric measurements. In *Proceedings of SPIE*, 2011, 8174, 817419 (2011); doi:10.1117/12.898353.

Parcak, S. H. 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, Routledge Taylor and Francis Group, London and New York.

Parkinson W.A., 2011. Early Village Social Dynamics: Prehistoric Settlement Nucleation on the Great Hungarian Plain. Annual Report for Period:09/2010 - 08/2011, Annual Report: 0911336, Field Museum of Natural History.

Parkinson W.A., 2002. Integration, Interaction, and Tribal 'Cycling': The Transition to the Copper Age on the Great Hungarian Plain. *The Archaeology of Tribal Societies*, Ed. W. Parkinson, 391-438. *International Monographs in Prehistory*.

Parkinson W.A., Gyucha A., Yerkes R.W. 2002. The Neolithic-Copper Age transition on the Great Hungarian Plain: Recent excavations at the Tiszapolgár culture settlement of Vésztő-Bikeri. *Antiquity*, 76 (293), 619–620.

Parkinson W.A., Gyucha A., Yerkes R.W., Hardy M., Morris M. 2004a. Settlement reorganization at the end of the Neolithic in Central Europe: Recent research in the Körös River valley, Southeastern Hungary. *Journal of Eurasian Prehistory*, 2 (2), 57–73.

Parkinson, W.A., Yerkes, R.W., Gyucha, A. 2004b. The transition from the Neolithic to the Copper Age: Excavations at Vésztő-Bikeri, Hungary, 2000–2002. *Journal of Field Archaeology*, 29, 101–121.

Parkinson W.A., Peacock E., Palmer R.A., Xia Y., Carlock B., Gyucha A., Yerkes R.W., Galaty M.L., 2010. Elemental analysis of ceramic incrustation indicates long-term cultural continuity in the Prehistoric Carpathian Basin, *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 38 (2), 64-70.

Parkinson W.A., 2011. Early Village Social Dynamics: Prehistoric Settlement Nucleation on the Great Hungarian Plain, Annual Report, Field Museum of Natural History.

Peltoniemi J. I., Kaasalainen S., Naranen J., Rautiainen M., Stenberg P., Smolander H., Smolander S., Voipio P., 2005. BRDF measurement of understory vegetation in pine forests: dwarf shrubs, lichen, and moss. *Remote Sensing of Environment*, 94: 343–354

Penndorf R., 1956. Luminous and spectral reflectance as well as colors of natural objects. U.S. Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Massachusetts.

Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., Savé, R., 1993. The reflectance at the 950–970 Nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887–1905.

Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., Field, C. B., 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135–146

Pinty B., Verstraete M. M., 1992. GEMI: A nonlinear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101(1), 15–20.

Price J. C., 1994. How unique are spectral signatures. *Remote Sensing of Environment*, 49, 181-186.

Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48 (2), 119-126.

Qi, J., Huete, A. R., Moran, M. S., Chehbouni, A., Jackson, R. D. 1993, Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images, *Remote Sens. Environ.* 44:89-101.

Raj U., Poonacha K. P., Diga S., 2005. Ruins of Hampi from high resolution remote sensing data – a case study. Tripathi (επμ.) *Remote Sensing and Archaeology*, Sundeep Prakashan, New Delhi, 90- 98.

Rajani M. B., Patra K. S., Verma M., 2009. Space observation for generating 3D perspective views and its implication to the study of the archaeological site of Badami in India. *Journal of Cultural Heritage* 10S, e20–e26.

Renfrew, C., Bahn P. 2001. *Αρχαιολογία, Θεωρίες, Μεθοδολογία και Πρακτικές Εφαρμογές*, Ινστιτούτο του Βιβλίου-Α. Καρδαμίτσα, Αθήνα.

Richardson, A.J., Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, 43, 15-41.

Riley D. N., 1979. Factors in the Development of Crop Marks. *Aerial Archaeology*, 4, 28-32.

Riley, D. N, 1987. *Air photography and archaeology*. Duckworth, London.

Ritter X. G., Urcid G., 2011. A lattice matrix method for hyperspectral image unmixing. *Information Sciences*, 181 (10), 1787-1803.

Robinson, B.F., Biehl L.L., 1979. Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. *Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 196, 16-26.

Rondeaux G., Steven M., Baret F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55 (2), 95-107.

Roujean, J. L., Breon, F. M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51 (3), 375-384.

Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Harlan J. C., 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation (greenwave effect) of nature vegetation. *NASA/GSFC Final Report, Greenbelt*.

Rowlands A., Sarris A., 2007. *Detection of Exposed and Subsurface Archaeological*

Remains using Multi-Sensor Remote Sensing. *Journal of Archaeological Science*, 34, 795-803.

Sabins, F., 1997. *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. W.H. Freeman and Company, New York.

Sakamoto T., Yokozawa M., Toritani H., Shibayama M., Ishitsuka N., Ohno H., 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96 (3-4), 366-374.

Sarris, A., 2006. Geophysical Prospection Survey at Vésztő-Mágor (Vésztő 15) and Okány 16 –Futas, Vizstu, Hungary (2006), Technical Report, Laboratory of Geophysical-Satellite Remote Sensing & Archaeo-environment, Institute for Mediterranean Studies - Foundation of Research & Technology (F.O.R.T.H.), Rethymno, Crete, September 10.

Σαρρής Α., Παπαδόπουλος Ν., 2010. Τεχνική έκθεση των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην Παλαίπαφο (2010). Εργαστήριο Γεωφυσικής – Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας. Ρέθυμνο, Κρήτη.

Sarris A., Papadopoulos N., Agapiou A., Salvia M.C., Hadjimitsis D.G., Parkinson A.W., Yerkes W.R., Gyucha A., Duffy R.P., 2013. Fusion of geophysical surveys, ground hyperspectral measurements, aerial and satellite imagery for archaeological prospection of Neolithic sites: the case study of Vésztő-Mágor Tell, Hungary. *Journal of Archaeological Science*, 40, 1454-1470.

Sarris A., Papadopoulos N., Salvi M.C., Seferou E., Agapiou A., Iacovou M., 2011. Mapping the Archaeological Landscape of Palaepaphos through Remote Sensing Techniques, *Proceedings XVI Congress of the UISPP (International Union for Prehistoric and Protohistoric Sciences)*, 4 - 10 September, Florianopolis, Brazil (in press).

Sarris A., Papadopoulos N., 2011. Technical Report, Geophysical Investigations at Szeghalom - Kovácsshalom & Vészto-Mágor, Viztu, Hungary (KRAP 2011), Laboratory of Geophysical - Satellite Remote Sensing & Archaeo-environment, Institute for Mediterranean Studies, Foundation of Research & Technology, Hellas (F.O.R.T.H.), Rethymno, Crete.

Sarris A., Kokkinou E., Soupios P., Papadopoulos E., Trigkas V., Sepsa U., Gionis D., Iacovou M., Agapiou A., Satraki A., Stylianides St., 2008. Geophysical Investigations at Palaepaphos, Cyprus, 36th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA, 2008 “On the Road to Reconstructing the Past”, Budapest (in press).

Sarris A., Galaty M.L., Yerkes R.W., Parkinson W.A., Gyucha A., Billingsley D., Tate R. 2004. Geophysical prospection and soil chemistry at the Early Copper Age settlement of Vészto-Bikeri, Southeastern Hungary. *Journal of Archaeological Science*, 31 (7), 927–939.

Schaepman-Strub G., Schaepman M. E., Painter T. H., Dangel S., Martonchik, J. V. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing-Definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103, 27–42.

Schmid T., Koch M., DiBlasi M., Hagos M., 2008. Spatial and spectral analysis of soil surface properties for an archaeological area in Aksum, Ethiopia, applying high and medium resolution data. *Catena* 75, 93–101.

Sharp, L., 2004. Geophysical, geochemical and arable crop responses to archaeological sites in the Upper Clyde Valley, Scotland. PhD thesis, University of Glasgow.

Shaykewich C. F., 1994. An appraisal of cereal crop phenology modelling, *Canadian Journal of Plant Science*, 75: 329-341

Sherratt A., 1981. Plough and Pastoralism: Aspects of the Secondary Products Revolution. In *Pattern of the Past: Studies in Honour of David Clarke*. Cambridge University Press.

Sherratt A., 1983. The Secondary Exploitation of Animals in the Old World. *World Archaeology*, 15, 90-104.

Sims, D. A., Gamon, J. A., 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81, 337–354.

Song J., Duanjun L., Wesely M.L., 2003. A simplified Atmospheric Correction Procedure for the Normalized Difference Vegetation Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 521–528.

Stagakis, S., Markos, N., Sykioti, O.& Kyparissis, A., 2010. Monitoring canopy biophysical and biochemical parameters in ecosystem scale using satellite hyperspectral imagery: An application on a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using multiangular CHRIS/PROBA observations. *Remote Sensing of Environment*, 114, 977–994.

Stanjek, H., Fabinder J. W. E., 1995 Soil Aspects Affecting Archaeological Details in Aerial Photographs. *Archaeological Prospection*, 2(1), 91-101.

Teillet P.M., Fedosejevs G., Thome K.J, Barker, J. L. 2007. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. *Remote Sensing of Environment*, 110 (3), 393-409.

Thuillier, G., Hershe, M., Labs, D., et al., The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions. *Solar Phys.* 214, 1–22, 2003.

Thomas C. D., Kidd J. F., Nikolovski S., Zipfel C., 2008. The archaeological sites of Afghanistan in Google Earth. *AARGnews* 37.

Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2000. Έργο Νότιου Αγωγού. Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Λευκωσία, Κύπρος.

Tran, D. – B. T., Puissant A., Badariotti D., Weber, C., 2011. Optimizing Spatial Resolution of Imagery for Urban Form Detection—The Cases of France and Vietnam, *Remote Sensing*, 3, 2128-2147.

Trishchenko P. A., Cihlar, J., Zhanqing, Li 2002. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 81 (1), 1-18.

Trishchenko P. A. 2009. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors: Extension to AVHRR NOAA-17, 18 and METOP-A. *Remote Sensing of Environment*, 113 (2), 335-341.

Tripathi A., 2005a: Remote Sensing: an Introduction. Tripathi (επιμ.) *Remote Sensing and Archaeology*, Sundeep Prakashan, New Delhi, 1-10.

Tripathi A. 2005b: Identification of Dvaraka through satellite remote sensing. Tripathi (επιμ.) *Remote Sensing and Archaeology*, Sundeep Prakashan, New Delhi, 78-86.

Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8 (2), 127-150.

Τσουντας, Χρ. 1908. Αι Προϊστορικά Ακροπόλεις Διμηνίου και Σέσκλου. Αθήνα.

Ur J., 2003. CORONA satellite photography and ancient road networks: a Northern Mesopotamian case study. *Antiquity* 77, 102–115.

Van Bussel L.G.J., Ewert F., Leffelaar P.A., Effects of data aggregation on simulations of crop phenology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142 (1-2), 75-84.

Vaughn S., Crawford T., 2009. A predictive model of archaeological potential: An example from northwestern Belize. *Applied Geography* 29(4), 542-555.

Ventera, M. L., Thompson, V. D., Reynolds, M. D., Waggoner, J. C., 2006. Integrating shallow geophysical survey: archaeological investigations at Totogal in the Sierra de los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 33 (6), 767-777.

Vogelmann, J. E., Rock, B. N., Moss, D. M., 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1563–1575.

Wace, A.J.B., Thompson, M.S. 1912. *Prehistoric Thessaly*. Cambridge University Press, Cambridge. Reprinted AMS edition in 1979.

Wilkinson K. N., Beck A. R., Philip G., 2006. Satellite imagery as a resource in the prospection for archaeological sites in central Syria. *Geoarchaeology* 21 (7), 735-750

Winton, H. and Horne, P., 2010. National archives for national survey programmes: NMP and the English heritage aerial photograph collection. In *Landscapes through the Lens. Aerial Photographs and Historic Environment*. Aerial Archaeology Research Group No. 2, 7-18

Wheatley D., Gillings M., 2002. *Spatial technology and Archaeology. The archaeological applications of GIS*. Taylor and Francis. ISBN 0-415-24640-7.

White D. C., Williams M., Barr S. L., 2008. Detecting sub-surface soil disturbance using hyperspectral first derivative band ratios of associated vegetation stress. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008, pp. 243 – 248

Wu X., Sullivan T. J., Heidinger K. A., 2010. Operational calibration of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) visible and near-infrared channels. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36 (5), 602–616.

Wu H., Liang Li Z., 2009. Scale Issues in Remote Sensing: A Review on Analysis, Processing and Modeling. *Sensors*, 9, 1768-1793.

Yerkes R., Sarris A., Parkinson W., Gyucha A., Hardy M., Catonoso L. 2007. Geophysical and geochemical investigations at two early Copper Age settlements in the Körös River valley, Southeastern Hungary. *Geoarchaeology*, 22, 845–871.

Yuan J., Niu Z., 2007. Classification Using EO-1 Hyperion Hyperspectral and ETM+ Data. Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007), 0-7695-2874-0/07.

Zarco-Tejada, P. J., Pushnik, J. C., Dobrowski, S., & Ustin, S. L., 2001. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment*, 84, 283–294.

Zarco-Tejada, P. J., Berjón, A., López-Lozano, R., Miller, J. R., Martín, P., Cachorro, V., González, M. R., de Frutos, A., 2005. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 99, 271–287.

