



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Σχολή Μηχανικής και
Τεχνολογίας

Πτυχιακή εργασία

**Συγχώνευση τηλεπισκοπικών δεδομένων για την ανίχνευση
υπεδάφιων αρχαιολογικών καταλοίπων**

Μάνος Παπαγεωργίου

Λεμεσός, Μάιος 2018

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

Πτυχιακή εργασία

Συγχώνευση τηλεπισκοπικών δεδομένων για την ανίχνευση
υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων

του

Μάνου Παπαγεωργίου

Επιβλέπων Καθηγητές

Καθ. Διόφαντος Χατζημιτσής και Δρ. Άθως Αγαπίου

Λεμεσός, Μάιος 2018

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Μάνος Παπαγεωργίου, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Αντιπρύτανη του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου (ΤΕΠΑΚ), Καθ. Διόφαντο Χατζημιτσή, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα πτυχιακής μελέτης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Άθω Αγαπίου του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του ΤΕΠΑΚ, για την άρτια συνεργασία του, για το χρόνο που μου αφιέρωσε, για τη βοήθεια που μου παρείχε και για τις διορθώσεις και τις κατευθύνσεις που μου υπέδειξε για την επιτυχή ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους φίλους μου και τους συμφοιτητές μου οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου δίνοντας μου δύναμη, ευχάριστες στιγμές και προσφέροντας μου απλόχερα τη βοήθεια τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εν λόγω πτυχιακή εργασία ερευνά τα επιφανειακά στρώματα ενός αρχαιολογικού τοπίου βασισμένη στην συγχώνευση διάφορων τηλεπισκοπικών τεχνικών. Συγκεκριμένα σε αυτή τη μελέτη εξετάζονται τρεις κύριες τεχνολογίες, το γεωραντάρ, η επίγεια ραδιομετρία και οι πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες. Η μελέτη σκοπεύει στο να εντοπίσει μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ επίγειων και δορυφορικών σετ δεδομένων η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια μορφή συγχώνευσης που ενισχύει τις οπτικές δορυφορικές εικόνες τηλεπισκόπησης για σκοπούς ανίχνευσης υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων. Για το σκοπό αυτό διάφορα μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης έχουν εξεταστεί για την προσπάθεια εντοπισμού μιας συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων ενός Γεωραντάρ και ενός φασματοραδιόμετρου. Επίσης διάφορες τεχνικές ανάλυσης εικόνων έχουν εφαρμοστεί πάνω σε εικόνες που αναπαριστούν δείκτες βλάστησης. Η συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αποτελείται από επτά βήματα. Αρχικά 11 μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης έχουν εξεταστεί για 6 διαφορετικούς δείκτες βλάστησης και τις τιμές των 4 καναλιών και των 3 συντελεστών Crop mark, Vegetation και Soil μιας εικόνας GeoEye σε σχέση με τις μετρήσεις ενός γεωραντάρ (Βήμα 1-3). Παράλληλα διάφορες τεχνικές ανάλυσης εικόνων, κυρίως ταξινομήσεις, έχουν εφαρμοστεί σε 18 εικόνες που αναπαριστούν δείκτες βλάστησης (Βήμα 4-5). Τα τελικά αποτελέσματα αξιολογήθηκαν και μερικά από τα μοντέλα παλινδρόμησης που είχαν εξεταστεί εφαρμόστηκαν σε μια υψηλής ανάλυσης πολυφασματική δορυφορική εικόνα (Βήμα 6-7). Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε μια σειρά από δεδομένα πεδίου τα οποία συλλέχθηκαν από το Vészto-Mágor Tell, το οποίο βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της Ουγγαρίας, και σε μια δορυφορική εικόνα GeoEye που καλύπτει την περιοχή αυτή. Τα συνολικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η εφαρμογή μοντέλων συγχώνευσης μεταξύ διαφόρων ειδών τηλεπισκοπικά δεδομένα, που συχνά χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη αρχαιολογικών ερευνών, μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω τις υφιστάμενες δυνατότητες και εφαρμογές για την ανίχνευση υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων.

Λέξεις κλειδιά: ενίσχυση; συγχώνευση; επίγεια ραδιομετρία; γεωραντάρ; πολυφασματικές εικόνες; τηλεπισκόπηση στην αρχαιολογία; ταξινόμηση;

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the superficial layers of an archaeological landscape based on the integration of various remote sensing techniques. In this study three main technologies are examined, namely ground-penetrating radar (GPR), ground spectroscopy, and multispectral satellite imagery. The study aims to identify a strong correlation between ground based and satellite datasets, which may lead to a form of integration that enhances optical remote sensing satellite images intended for archaeological research. For this task, different regression models have been examined between the measurements of a ground spectroradiometer and a GPR. Also, various image analysis techniques have been applied to images that represent vegetation indices. The overall methodology that was followed consisted of seven steps. Firstly, several regression models were examined for 6 different vegetation indices and the first 4 bands and 3 coefficients Crop mark, Vegetation and Soil of a GeoEye image in relation with the measurements of a GPR (Step 1-3). At the same time, various image analysis techniques, mainly classifications, have been applied to 18 images that represent vegetation indices (Step 4-5). The final outcomes were evaluated and some of the regression models that have been examined were projected to a high-resolution multispectral satellite image (Step 6-7). The proposed methodology was evaluated with a series of field data collected from the Vészto-Mágor Tell, located in the eastern part of Hungary, and a GeoEye multispectral satellite image that covers the area. The overall results indicate that fusion models between various types of remote sensing datasets frequently used to support archaeological research can further expand the current capabilities and applications for the detection of buried archaeological remains.

Keywords: enhancement; fusion; ground spectroscopy; ground-penetrating radar (GPR); GeoEye; remote sensing archaeology; classification;

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT.....	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	x
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xx
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ	xxi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Δορυφορική τηλεπισκόπηση.....	2
1.2 Επίγεια ραδιομετρία ή Φασματοσκοπία	3
1.3 Γεωφυσικές Διασκοπήσεις.....	4
1.3.1 Βασικές μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων.....	6
1.3.1.1 Βαρυτική Μέθοδος.....	6
1.3.1.2 Μαγνητική Μέθοδος	7
1.3.1.3 Σεισμική Μέθοδος.....	8
1.3.1.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	8
1.3.1.5 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος.....	9
1.3.1.6 Μέθοδος του Υπεδάφιου Radar ή Γεωραντάρ (GPR – Ground penetrating radar).....	10
1.4 Συγχώνευση Δεδομένων (Fusion of Data).....	11
1.4.1 Παραδοσιακές προσεγγίσεις ερμηνείας με συγχώνευση η οποία χρησιμοποιεί απλές γραφικές υπερθέσεις των διανυσματικών ανωμαλιών	14
1.4.2 Γραφικοί μέθοδοι οι οποίοι κυμαίνονται από υπερθέσεις μέχρι δημιουργίες έγχρωμων σύνθετων και ημιδιαφανών επιπέδων δεδομένων.....	15

1.4.2.1	Γραφικές υπερθέσεις (<i>Graphic overlays</i>).....	15
1.4.2.2	Έγχρωμα σύνθετα <i>RGB</i>	16
1.4.3	Διακριτές μέθοδοι που χρησιμοποιούν διάφορες προσεγγίσεις όπως μεθόδους Boolean και τεχνικές ομαδοποίησης	18
1.4.3.1	Ενώσεις <i>Boolean</i>	19
1.4.3.2	Τομές <i>Boolean</i>	19
1.4.3.3	Διαδικό Άθροισμα (<i>Binary Sum</i>).....	20
1.4.3.4	Μέθοδοι ανάλυσης ομαδοποίησης (<i>Cluster Analysis Methods</i>).....	21
1.4.3.5	Reed-Xiaoli Detector (RXD).....	24
1.4.4	Απλές μαθηματικές πράξεις όπως άθροισμα, πηλίκο κτλ.	25
1.4.4.1	Άθροισμα δεδομένων (<i>Data Sum</i>).....	26
1.4.4.2	Αναλογίες μεταξύ δεδομένων (<i>Data Ratios</i>)	27
1.4.5	Πολυπαραγοντικές μεθόδους όπως η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών και αναλύσεις συσχετίσεων	27
1.4.5.1	Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (<i>PCA</i>)	27
1.4.5.2	Ανάλυση παραγόντων (<i>Factor Analysis</i>).....	30
1.4.6	Ευφυείς αλγόριθμοι που βασίζονται στη γνώση από προηγμένες μηχανές μάθησης και έμπειρα συστήματα.....	31
1.4.6.1	Support Vector Machines (SVMs)	31
1.5	Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου.....	32
2	Μεθοδολογία Έρευνας.....	34
3	Περιοχή μελέτης: Vészto-Mágor Tell.....	37
4	Αποτελέσματα.....	39
4.1	Αποτελέσματα μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης.....	39
4.1.1	Διαχωρισμός μετρήσεων σε κλάσεις	43
4.1.2	Συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil.....	45

4.1.3	Principal Components Analysis.....	50
4.1.4	Συνολικά αποτελέσματα	62
4.2	Αποτελέσματα τεχνικών ανάλυσης εικόνας	64
4.2.1	Έγχρωμα Σύνθετα (RGB Composites).....	67
4.2.2	Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....	74
4.2.3	Επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....	77
4.2.4	Support Vector Machine Classification.....	79
4.2.5	RX Anomaly Detection	81
4.3	Αποτελέσματα εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye	83
5	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	87
5.1	Σχολιασμός αποτελεσμάτων μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης	88
5.2	Σχολιασμός αποτελεσμάτων τεχνικών ανάλυσης εικόνας.....	89
5.2.1	Έγχρωμα σύνθετα (RGB composites)	90
5.2.2	Επιβλεπόμενη VS μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση	90
5.2.3	Support Vector Machine Classification.....	91
5.2.4	RX Anomaly Detection	91
5.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye	92
6	Συμπεράσματα	93
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Γενικά χαρακτηριστικά Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Γεωραντάρ (GPR) και Επίγειας ραδιομετρίας για αρχαιολογικές έρευνες.	33
Πίνακας 2: Γενικές μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου παλινδρόμησης μεταξύ των μετρήσεων του φασματοραδιόμετρου (X) και των μετρήσεων του GPR στα διάφορα βάθη (Y).	39
Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση των ισχυρότερων συσχετίσεων που εντοπίστηκαν μεταξύ των μετρήσεων του φασματοραδιόμετρου και των μετρήσεων του GPR στα διάφορα βάθη χρησιμοποιώντας τα μαθηματικά μοντέλα του Πίνακα 2.	62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Οριζόντια τομογραφική απεικόνιση για υψόμετρο των 93 μέτρων του λόφου Καστά.....	5
Εικόνα 2: Ψευδο-τριδιάστατος όγκος δεδομένων γεωραντάρ. Ο άξονας X και Y αντιπροσωπεύουν τον κάνναβο (αποστάσεις σε μέτρα) της περιοχή στην επιφάνεια της γης όπου διεξάχθηκαν οι μετρήσεις ενώ ο άξονας Z το βάθος σε μέτρα. Το χρώμα αντιπροσωπεύει τα σχετικά πλάτη της αντανάκλασης του σήματος. (Corbeanu et al., 2001).....	11
Εικόνα 3: Ερμηνευτικά διανύσματα επικαλυπτόμενα πάνω σε γεωφυσικά δεδομένα και μεταξύ τους. Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει διαφορετική πληροφορία: κίτρινο = ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, πράσινο = γεωραντάρ, κυανό = μαγνητική βαθμίδωση, λευκό = μαγνητική επιδεκτικότητα, κόκκινο = ηλεκτρική αντίσταση, ματζέντα = θερμικό υπέρυθρο, έντονες-ανθεκτικές ανωμαλίες = συμπαγή φωτεινά χρώματα, δύσκολες στην περιγραφή και ανάλυση ανωμαλίες = επικαλυπτόμενες γραμμές σκίασης ή θαμπού χρώματος διανύσματα. (Limp, F. et al., 2006)	15
Εικόνα 4: Εντοπισμός ανωμαλιών από αεροφωτογραφίες. (A) Ορθοφωτογραφία, (B) πιθανά χαρακτηριστικά με πολιτιστικό ενδιαφέρον. (Asăndulesei, 2017).....	15
Εικόνα 5: Συγχώνευση δεδομένων με γραφική υπέρθεση. Γραμμές ίσου μεγέθους ηλεκτρομαγνητικής αγωγιμότητας (άσπρες) επικαλυπτόμενες πάνω σε ένα έγχρωμο raster με τιμές ηλεκτρικής αντίστασης πάνω από μια σκιασμένη επιφάνεια μαγνητικής επιδεκτικότητας. (Limp, F. et al., 2006)	16
Εικόνα 6: Δορυφορική εικόνα QuickBird που καλύπτει το δυτικό μέρος του αρχαιολογικού χώρου Ίλις, Πελοπόννησος. (a) Έγχρωμο σύνθετο RGB, (b) NIR-R-G έγχρωμο σύνθετο, (c) γραμμικός μετασχηματισμός ψευδέχρωμου RGB, (d) πρώτος παράγοντας γραμμικός μετασχηματισμός, (e) δεύτερος παράγοντας γραμμικός μετασχηματισμός, (f) τρίτος παράγοντας γραμμικός μετασχηματισμός, (g) δείκτης NDVI, (h) έγχρωμο σύνθετο του PCA, (i) πρώτος παράγοντας του PCA, (j) δεύτερος παράγοντας του PCA και (k) τρίτος παράγοντας του PCA (Agariou et al., 2015).....	17
Εικόνα 7: Δυναμική αναπαράσταση γεωφυσικών ανωμαλιών. α) ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, b) GPR, c) μαγνητική βαθμίδωση, d) μαγνητική επιδεκτικότητα, e)	

ηλεκτρική αντίσταση, f) θερμικό υπέρυθρο. Το μαύρο χρώμα υπονοεί την ύπαρξη μιας ανωμαλίας ενώ αντίθετα το άσπρο χρώμα υπονοεί την απουσία μιας ανωμαλίας σε κάθε σημείο του χάρτη.	18
Εικόνα 8: Ένωση Boolean των δυαδικών αναπαραστάσεων των γεωφυσικών χαρακτηριστικών που αναφέρονται στην εικόνα 4. Στην νέα αυτή εικόνα φαίνονται όλες οι μαυρισμένες περιοχές από όλες τις αναπαραστάσεις των διάφορων συνόλων δεδομένων σε δυαδική μορφή.....	19
Εικόνα 9: Τομή Boolean των δυαδικών αναπαραστάσεων των γεωφυσικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στην εικόνα 4. Στην νέα αυτή εικόνα φαίνονται οι περιοχές οι οποίες είναι μαυρισμένες σε όλες τις αναπαραστάσεις.	20
Εικόνα 10: Δυαδικό Άθροισμα των δυαδικών αναπαραστάσεων των γεωφυσικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στην εικόνα 4. Στην νέα αυτή εικόνα κάθε χρώμα αναπαριστά πόσες φορές μια περιοχή παρουσιάστηκε ως μαύρη, δηλαδή κωδικοποιήθηκε ως “1” και υποδεικνύει μια ανωμαλία, ανάμεσα σε όλες τις δυαδικές αναπαραστάσεις των γεωφυσικών συνόλων δεδομένων που υλοποιήθηκαν. (Limp, F. et al., 2006)	21
Εικόνα 11: Οι εικόνες (c) και (d) αποτελούν το αποτέλεσμα της εφαρμογής του αλγόριθμου ISODATA στις εικόνες (a) και (b) αντίστοιχα. (Lasaronara et al., 2016) .	22
Εικόνα 12: Αποτελέσματα εφαρμογής μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε 2D εικόνα έντασης που δημιουργήθηκε από 3D πληροφορίες (νέφος σημείων). Η εικόνα απεικονίζει ένα εσωτερικό τοίχο ενός ναού που βρίσκεται στα ερείπια του μοναστηριού του Santo Domingo, στην καρδιά της πόλης Pontevedra, Galicia (Ισπανία). Σκοπός της έρευνας ήταν η μελέτη των ζημιών στα πετρώδη υλικά από τα οποία αποτελούνται ιστορικά κτίρια. (A) αρχική εικόνα, (B) η εικόνα μετά από εφαρμογή ταξινόμησης που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της μεθόδου k-means (8 κλάσεις). (Armesto-González et al., 2010)	23
Εικόνα 13: (a) Αεροφωτογραφία με επικαλυπτόμενη την τοποθεσία θαμμένων αρχαιολογικών καταλοίπων που εντοπίστηκαν με γεωφυσικές διασκοπήσεις, (b) σκιασμένη εικόνα που προέρχεται από δεδομένα Lidar, (c) αποτέλεσμα εφαρμογής του αλγόριθμου Reed-Χιαολί σε εικόνα CASI και (d) αποτέλεσμα εφαρμογής του αλγόριθμου Reed-Χιαολί σε εικόνα ATM. Τα χαρακτηριστικά A1- A4 αποτελούν ανωμαλίες που	

παρουσιάστηκαν μετά από την εφαρμογή του αλγόριθμου. (Rowlands and Sarris, 2007).	25
Εικόνα 14: Μεγάλο κτίριο ιδιαίτερης σημασίας στον αρχαιολογικό χώρο της Ρωμαϊκής πόλης Carnuntum του ανατολικού τμήματος της Αυστρίας. Η περιοχή διερευνήθηκε με γεωφυσικές μαγνητικές έρευνες και μετρήσεις αντίστασης το 1996 (Neubauer and Eder-Hinterleitner 1997). (M) Μαγνητόγραμμα, (R) Χαρτογράφηση αντίστασης, (M+R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από πρόσθεση, (M-R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από αφαίρεση, (M*R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από πολλαπλασιασμό, (M/R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από διαίρεση.	26
Εικόνα 15: Δύο παραδείγματα Κύριων Συνιστωσών που προέρχονται από ίδιο σετ δεδομένων εικόνων. Πρώτη σειρά: τέσσερα κανάλια με χαμηλή συσχέτιση και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις τρεις πρώτες εικόνες. Δεύτερη σειρά: οι τέσσερις κύριες συνιστώσες που παράγονται από τα κανάλια της πρώτης σειράς και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις τρεις πρώτες συνιστώσες. Τρίτη σειρά: τέσσερα κανάλια με υψηλή συσχέτιση και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις πρώτες τρεις εικόνες. Τέταρτη σειρά: οι τέσσερις κύριες συνιστώσες που παράγονται από τις εικόνες της τρίτης σειράς και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις πρώτες τρεις συνιστώσες. (Richards, 2013).....	29
Εικόνα 16: Ανάλυση Παραγόντων των δεδομένων της Army City. a) Παράγοντας 1. b) Παράγοντας 2. c) Έγχρωμο σύνθετο των δύο παραγόντων με τον Παράγοντα 1 να αποδίδεται στο μπλε και τον Παράγοντα 2 στο πράσινο. (Limp, F. et al., 2006)	30
Εικόνα 17: (a) Περίπτωση όπου οι κλάσεις διαχωρίζονται γραμμικά (b) Περίπτωση όπου οι κλάσεις διαχωρίζονται μη γραμμικά. Το ξ μετρά το σφάλμα προσαρμογής του ορίου. (Τζώτσος, K. A., 2014).....	32
Εικόνα 18: Συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσπάθεια ενίσχυσης μιας δορυφορικής εικόνας και τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων μέσω της εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης σε μετρήσεις ενός GPR και ενός φασματοραδιόμετρου καθώς και διάφορων τεχνικών ανάλυσης σε εικόνες που αναπαριστούν δείκτες βλάστησης.	35

Εικόνα 19: Περιοχή μελέτης: Vészto-Mágor Tell. Τα γκρίζα και το μπλε πολύγωνο υποδεικνύουν τις περιοχές όπως διεξάχθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις ενώ το κόκκινο την περιοχή όπου έγινε συλλογή φασματοραδιομετρικών μετρήσεων. Η όλη περιοχή καλύπτεται από μια εικόνα GeoEye.	38
Εικόνα 20: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.242 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b0) = 716.551, b1 = -0.002, b2 = 6.086E-008 και b3 = 6.748E-011.....	40
Εικόνα 21: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.20-0.40m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Η υψηλότερη συσχέτιση τους εντοπίζεται μέσω των μαθηματικών μοντέλων Cubic και Quadratic. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 και στις δύο περιπτώσεις είναι ίσος με 0.157 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου Cubic: Constant (b0) = 720.696, b1 = -0.001, b2 = 4.644E-008 και b3 = 3.306E-010. Παράμετροι μοντέλου Quadratic: Constant (b0) = 720.515, b1 = 1.507E-005, b2 = -9.337E-007.	41
Εικόνα 22: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Η υψηλότερη συσχέτιση τους τνοπίστηκε μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.220 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b0) = 720.819, b1 = -0.001, b2 = -4.182E-006 και b3 = 2.208E-009.	42
Εικόνα 23: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές δείκτη βλάστησης NVDI από 0.34 έως 0.5. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.43 και το p-value ίσο με 0.001. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b0) = 713.393, b1 = -0.003, b2 = -1.523E-006 και b3 = -4.214E-010.	44
Εικόνα 24: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι	

μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Crop mark από -0.19 έως -0.1. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.378 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.209, b_1 = -0.001, b_2 = 1.112E-006 και b_3 = 3.151E-010..... 46

Εικόνα 25: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Crop mark από -0.19 έως -0.1. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.422 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 720.156, b_1 = 0.006, b_2 = -1.720E-005 και b_3 = 7.491E-009. 47

Εικόνα 26: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Vegetation από -2 έως 6. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.331 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 713.489, b_1 = -0.006, b_2 = -2.475E-006 και b_3 = -4.454E-010. 48

Εικόνα 27: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Soil από -20 έως -10. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.379 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.214, b_1 = 0, b_2 = 2.159E-006 και b_3 = 5.071E-010..... 49

Εικόνα 28: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -3.5 έως -1 της πρώτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.416 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.478, b_1 = 0.002, b_2 = 3.387E-006 και b_3 = 8.187E-010. 51

Εικόνα 29: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -3.8 έως -1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.396 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 714.362, b_1 = -0.003, b_2 = -5.708E-008 και b_3 = 8.958E-011. 52

Εικόνα 30: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -1 έως -0.5 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.36 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 714.824, b_1 = -0.005, b_2 = -7.543E-007 και b_3 = 8.146E-011..... 53

Εικόνα 31: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 0.8 έως 4.3 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.329 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.674, b_1 = 0, b_2 = -7.060E-007 και b_3 = 4.000E-010. 54

Εικόνα 32: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 1 έως 4.3 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.41 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.493, b_1 = -5.499E-005, b_2 = 4.931E-008 και b_3 = 1.569E-011. 55

Εικόνα 33: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 1 έως 4.3 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.442 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.660, $b_1 = 0$, $b_2 = -1.128E-006$ και $b_3 = 6.463E-010$ 56

Εικόνα 34: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 1 έως 2.6 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.448 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.660, $b_1 = 0$, $b_2 = -1.068E-006$ και $b_3 = 5.993E-010$ 57

Εικόνα 35: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης SARVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -4 έως -1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.408 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 1.556, $b_1 = 1.893E-005$, $b_2 = -7.577E-009$ και $b_3 = -4.367E-012$ 58

Εικόνα 36: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης SARVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -4 έως -1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.491 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 1.541, $b_1 = 0$, $b_2 = 2.500E-007$ και $b_3 = -1.097E-010$ 59

Εικόνα 37: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης SARVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Inverse. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 0.5 έως 1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.467 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b0) = 1.506, b1 = -42.693.. 60

Εικόνα 38: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.20-0.40m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 0.5 έως 1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.444 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b0) = 734.926, b1 = 0.064, b2 = 9.675E-005 και b3 = 5.102E-008. 61

Εικόνα 39: Τα 18 κανάλια της εικόνας των δεικτών βλάστησης. HIGH: μέγιστη τιμή εικονοστοιχείων, LOW: ελάχιστη τιμή εικονοστοιχείων. 65

Εικόνα 40: Εικόνες των μετρήσεων του GPR για βάθη 0-0.60m και συνδυασμοί έγχρωμων συνθέτων τους. 66

Εικόνα 41: Έγχρωμα σύνθετα 1-5 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. 68

Εικόνα 42: Έγχρωμα σύνθετα 6-10 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. 68

Εικόνα 43: Έγχρωμα σύνθετα 11-15 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. 69

Εικόνα 44: Έγχρωμα σύνθετα 16-20 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. 69

Εικόνα 45: Έγχρωμα σύνθετα 21-25 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. 70

Εικόνα 46: Έγχρωμα σύνθετα 26-30 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. 70

Εικόνα 47: Έγχρωμα σύνθετα 31-35 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0-0.20m.	71
Εικόνα 48: Έγχρωμα σύνθετα 36-40 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0-0.20m.	71
Εικόνα 49: Έγχρωμα σύνθετα 41-45 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.20-0.40m.	72
Εικόνα 50: Έγχρωμα σύνθετα 46-50 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.20-0.40m.	72
Εικόνα 51: Έγχρωμα σύνθετα 51-55 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.40-0.60m.	73
Εικόνα 52: Έγχρωμα σύνθετα 56-60 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.40-0.60m.	73
Εικόνα 53: Αποτέλεσμα της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης με 6 κλάσεις στις 18 εικόνες των δεικτών βλάστησης.	75
Εικόνα 54: Αποτέλεσμα της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης με 10 κλάσεις στις 18 εικόνες των δεικτών βλάστησης.	75
Εικόνα 55: Αποτελέσματα μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (2, 3, 4, 5 και 6 κλάσεις) στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.	76
Εικόνα 56: Αποτελέσματα μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (8, 10, 15, 20 και 25 κλάσεις) στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.	76
Εικόνα 57: Αποτελέσματα επιβλεπόμενων ταξινομήσεων στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 3 διαφορετικούς αλγόριθμους.	78
Εικόνα 58: Αποτελέσματα επιβλεπόμενων ταξινομήσεων στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 3 διαφορετικούς αλγόριθμους και περιοχές εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κλάση.	78
Εικόνα 59: Αποτελέσματα ταξινομήσεων χρησιμοποιώντας SVMs στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 4 διαφορετικούς αλγόριθμους.	80
Εικόνα 60: Αποτελέσματα ταξινομήσεων χρησιμοποιώντας SVMs στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 4 διαφορετικούς αλγόριθμους.	80

Εικόνα 61: Αποτελέσματα ταξινόμησης χρησιμοποιώντας SVMs στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 4 διαφορετικούς αλγόριθμους και περιοχές εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κλάση.....	81
Εικόνα 62: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου RXD στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.....	82
Εικόνα 63: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου UTD στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.....	82
Εικόνα 64: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου RXD-UTD στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.....	83
Εικόνα 65: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye με ανάλυση 50cm η οποία καλύπτει την περιοχή Vészto-Mágor Tell. (α) Έγχρωμο σύνθετο RGB, (β) δείκτης SARVI, (γ-ε) αποτελέσματα εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στις τιμές των εικονοστοιχείων της εικόνας του δείκτη SARVI τα οποία τον συσχετίζουν με τις μετρήσεις του GPR σε βάθη 0-20m, 0.20-0.40m και 0.40-0.60m αντίστοιχα.	85
Εικόνα 66: Έγχρωμο σύνθετο (R (Band 3:Εικόνα 65ε) - G (Band 2:Εικόνα 65δ) - B (Band 1:Εικόνα 65γ)) και της εικόνας η οποία δημιουργήθηκε από την ένωση των τριών νέων εικόνων που προέκυψαν από την εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στην εικόνα του δείκτη SARVI.....	86
Εικόνα 67: Εστίαση στην περιοχή ενδιαφέροντος.....	87

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

MSE.:	Mean square error
RGB.:	Red, green, blue
κτλ.:	Και τα λοιπά
GPR.:	Ground penetrating radar
PCA.:	Principal Components Analysis
PCT.:	Principal Components Transformation
Radar.:	Radio Detecting and Ranging
km ² .:	Square kilometer
m ² .:	Square meter
cm.:	Centimeters
π.χ.:	Παραδείγματος χάριν
Hz.:	Hertz
USGS.:	United States Geological Survey
ESA.:	European Space Agency
ERDC.:	U.S. Army Engineer Research and Development Center
CERL.:	Construction Engineering Research Laboratory
SERDP.:	Strategic Environmental Research and Development Program
π.Χ.:	προ Χριστού
μ.Χ.:	μετά Χριστόν
ISODATA.:	Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique
RXD.:	Reed-Xiaoli Detector
UTD.:	Uniform Target Detector

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

SSE	Άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων
k-means	κ-μέσα
RGB	κόκκινο, πράσινο, μπλε
Boolean	Μπούλιαν
GPR	Γεωραντάρ
PCA	Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών
PCT	Μετασχηματισμός Κύριων Συνιστωσών
Radar	ραντάρ
km ²	τετραγωνικό χιλιόμετρο
m ²	τετραγωνικό μέτρο
cm	εκατοστόμετρα
Point	σημειακό
Raster	ράστερ
Open data	Ανοικτά δεδομένα
Graphic overlays	Γραφικές υπερθέσεις
Decision Tree	Δενδροδιάγραμμα αποφάσεων
ground truth data	επίγεια αληθή δεδομένα
Binary Sum	Δυαδικό Άθροισμα
Cluster Analysis Methods	Μέθοδοι ανάλυσης ομαδοποίησης
Data Ratios	Αναλογίες δεδομένων
Data Maximum	Μέγιστες τιμές δεδομένων
Data Sum	Άθροισμα δεδομένων
Data variance	Διακύμανση δεδομένων
Factor Analysis	Ανάλυση παραγόντων

1 Εισαγωγή

Πολλές αρχαιολογικές έρευνες τα τελευταία χρόνια επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι οι διάφοροι αισθητήρες και τεχνικές της τηλεπισκόπησης έχουν να προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες κατά τη διεξαγωγή μιας αρχαιολογικής έρευνας (Rowlands and Sarris, 2007; Neubauer and Eder-Hinterleitner 1997; Themistocleous, 2015; Asăndulesei, 2017; Lasaponara et al., 2016). Παρά την ευρεία τους χρήση όμως, οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται και μελετώνται συνήθως ξεχωριστά.

Ένα θέμα το οποίο έχει προσελκύσει πρόσφατα το ενδιαφέρον των μελετητών είναι η συγχώνευση διαφόρων ειδών δεδομένων τηλεπισκόπησης. (Limp, F. et al., 2006; Agariou et al., 2017). Η συγχώνευση δεδομένων από διάφορες πηγές όπως πολυφασματικές εικόνες, φασματοραδιόμετρα, γεωραντάρ και άλλα τηλεπισκοπικά μέσα μπορεί να βελτιώσει τις δυναμικές αξίες και την ερμηνεία των δεδομένων αυτών πηγής. Μέσα από διάφορες τεχνικές συγχώνευσης μπορούμε να οδηγηθούμε στην παραγωγή μιας υψηλής ποιότητας ορατή αναπαράσταση τους. Επομένως η συγχώνευση δεδομένων από διάφορα τηλεσκοπικά μέσα, ως μια από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων τηλεπισκόπησης, στοχεύει στο να συνδυάσει πληροφορίες που πάρθηκαν με διαφορετικές χωρικές και φασματικές αναλύσεις από αισθητήρες τοποθετημένους σε δορυφόρους, αεροσκάφη και επίγειες πλατφόρμες. Το αποτέλεσμα μια τέτοιας ανάλυσης είναι η παραγωγή συγχωνευμένων δεδομένων τα οποία περιέχουν συνδυασμένες πληροφορίες από τα δεδομένα πηγής που συλλέχτηκαν ξεχωριστά από το κάθε διαφορετικό τηλεσκοπικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή δεδομένων σε μια μελέτη.

Στόχος λοιπόν αυτής της μελέτης είναι να ερευνηθεί περαιτέρω η πιθανότητα ύπαρξης κάποιας ικανοποιητικής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων που προέρχονται από πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες και φασματοραδιόμετρα σε σχέση με τις μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που καταγράφει ένα γεωραντάρ. Ο απώτερος σκοπός αυτής της μελέτης είναι η συγχώνευση τηλεπισκοπικών δεδομένων για την ανίχνευση υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων. Η προσπάθεια αυτή έγινε μέσα από μια ποικιλία παραδειγμάτων εφαρμογής μεθόδων συγχώνευσης και ανάλυσης εικόνων πάνω σε δεδομένα που συλλέχτηκαν σε έναν αρχαιολογικό χώρο στην κεντρική Ευρώπη (Ουγγαρία) όπου έγιναν μετρήσεις με φασματοραδιόμετρο και γεωφυσικές διασκοπήσεις

με γεωραντάρ. Προτού ξεκινήσει όμως η επεξεργασία των δεδομένων αυτών μελετήθηκε το κάθε τηλεπισκοπικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή τους ξεχωριστά και εντοπίστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Επίσης διερευνήθηκαν οι διάφορες μέθοδοι συγχώνευσης και τεχνικές ανάλυσης τηλεπισκόπησης.

1.1 Δορυφορική τηλεπισκόπηση

Τις τελευταίες δεκαετίες η εφαρμογή της τηλεπισκόπησης παρουσίασε ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα της αρχαιολογίας. Οι σύγχρονοι αρχαιολόγοι έχουν το προτέρημα της εύκολης πρόσβασης σε δορυφορικές εικόνες. Χρησιμοποιούν μια ποικιλία από ολοένα και πιο εξελιγμένες τεχνικές για τον εντοπισμό, τον προσδιορισμό και την ανάλυση των αρχαιολογικών χώρων και του περιγύρου τους. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες ακόμη και σε πειραματικό στάδιο. Καθιστούν πλέον οικονομικά εφικτό για αυτούς να διεξάγουν αρχαιολογικές έρευνες σε περιοχές δύσβατες ή και ακόμη αδύνατες σε πρόσβαση από τους ανθρώπους. Με τη χρήση των τηλεσκοπικών μέσων οι έρευνες αυτές επίσης κοστίζουν λιγότερο και η όλη διαδικασία τους αποτελεί μια λιγότερο επεμβατική μέθοδος.

Τα δορυφορικά δεδομένα μπορούν να καλύψουν τις περιοχές ενδιαφέροντος χωρίς κανένα περιορισμό. Έχουν τη δυνατότητα συνοπτικής κάλυψης μιας περιοχής και συνεχής ενημέρωσης των πληροφοριών τους λόγω της δυνατότητας που έχουν οι δορυφόροι να μπορούν να πραγματοποιούν λήψεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το σημαντικότερο τους πλεονέκτημα όμως είναι ότι παρέχονται σε πολύ καλές προσιτές τιμές, ή ακόμη και δωρεάν (open data), σε ψηφιακή μορφή. Στο διαδίκτυο υπάρχουν πολλές ιστοσελίδες οργανισμών από χώρες σε όλο τον κόσμο, όπως του USGS και της ESA, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν σε οποιονδήποτε χρήστη πρόσφατες και υψηλής ποιότητας δορυφορικές εικόνες.

Συνήθως, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν υποψίες ως προς την ύπαρξη αρχαίων καταλοίπων σε μια περιοχή ενδιαφέροντος έτσι ώστε οι αρχαιολόγοι να έχουν έναν βαθμό βεβαιότητας, ως προς τις μορφές και τις θέσεις που θα ερευνήσουν, προτού οδηγηθούν σε μια επεμβατική και δαπανηρή ανασκαφή στην υπό μελέτη περιοχή. Γενικότερα, οι τηλεπισκοπικές απεικονίσεις αποκαλύπτουν τις σχέσεις μιας αρχαιολογικής περιοχής με το φυσικό της περιβάλλον. Με τις δορυφορικές εικόνες οι αρχαιολόγοι μπορούν να μελετήσουν ευρύτερες περιοχές σε σύγκριση με τις

αεροφωτογραφίες. Καθιστάτε γι' αυτούς πιο εύκολος ο σχεδιασμός μιας αρχαιολογικής αποστολής αφού όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι δορυφορικές εικόνες τους επιτρέπουν ως ερευνητές να σχηματίσουν μια πιο ολοκληρωμένη άποψη για την υπό μελέτη περιοχή τους και για άλλες πληροφορίες απαραίτητες για την οργάνωση και την πραγματοποίηση της αρχαιολογικής ανασκαφής τους (Παρχαρίδης, 2015).

1.2 Επίγεια ραδιομετρία ή Φασματοσκοπία

Η επίγεια ραδιομετρία ή φασματοσκοπία είναι μια τεχνική θεμελιώδους σημασίας στην τηλεπισκόπηση, τόσο σε επίπεδο πρωτογενών ερευνών όσο και σε λειτουργικών εφαρμογών. Ασχολείται με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και των αντικειμένων στο φυσικό περιβάλλον. Περιλαμβάνει τη μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων αυτών σε συνάρτηση με τις φυσικές τους ιδιότητες. Είναι χρήσιμη για τη βαθμονόμηση αερομεταφερόμενων και δορυφορικών αισθητήρων καθώς ενεργεί ως μια γέφυρα συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων φασματικής ανακλαστικότητας που συλλέγονται σε εργαστήρια και στο πεδίο. Παρέχει ένα εργαλείο για την ανάπτυξη και τη βελτίωση μοντέλων που συσχετίζουν βιοφυσικά χαρακτηριστικά με δεδομένα τηλεπισκόπησης. Ταυτόχρονα, είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη των βέλτιστων φασματικών καναλιών (Milton 1987).

Οι διάφορες τεχνικές της τηλεπισκόπησης, συμπεριλαμβανομένων και των επίγειων φασματοραδιομετρικών δεδομένων, προσφέρουν νέες προοπτικές στις αρχαιολογικές έρευνες. Οι υψηλής ανάλυσης πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες υποδεικνύουν ότι οι αλλαγές στις φασματικές υπογραφές της βλάστησης μπορεί να προκύπτουν από την ύπαρξη θαμμένων αρχιτεκτονικών καταλοίπων. Τα τελευταία χρόνια τα υπερφασματικά δορυφορικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε αρκετές μελέτες προκειμένου να εντοπιστούν αρχιτεκτονικά κατάλοιπα. Παρόλα αυτά, εάν η κάλυψη του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφη τότε η χρήση τους μπορεί να καταλήξει προβληματική (Pargak, 2009). Το πρόβλημα αυτό όμως μπορεί να αποφευχθεί εάν υπάρχουν επίγεια υπερφασματικά δεδομένα. Η χρήση επίγειων φασματοραδιόμετρων μπορεί να ελαχιστοποιήσει τέτοιου είδους σφάλματα, συμπεριλαμβανομένης της ατμοσφαιρικής απορρόφησης, της σκέδασης κτλ.. Τα δεδομένα από τα επίγεια φορητά ραδιόμετρα αποκαλούνται πολύ συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία και ως “ground truth data” (επίγεια αληθή δεδομένα), για το λόγο ότι συλλέγονται σε σχετικά κοντινή απόσταση από το

αντικείμενο και έτσι οι οποιεσδήποτε επιδράσεις είναι σχεδόν μηδαμινές. Υπόκεινται όμως και αυτά σε σφάλματα τα οποία οι ερευνητές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους.

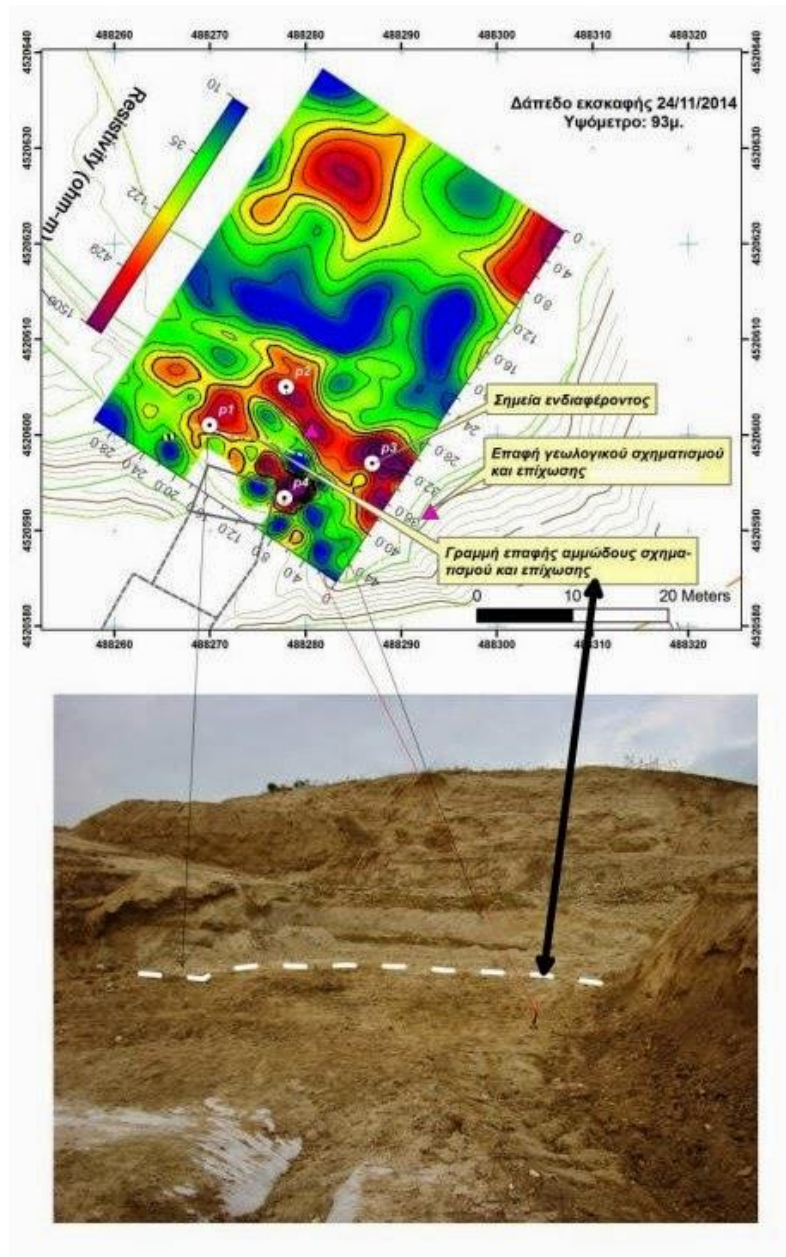
1.3 Γεωφυσικές Διασκοπήσεις

Η Γεωφυσική αποτελεί η επιστήμη στην οποία μελετώνται οι φυσικές ιδιότητες της Γης από τον πυρήνα της έως και την εξωτερική της ατμόσφαιρα, εξάγοντας πολύτιμα συμπεράσματα για την εσωτερική της δομή και κατάσταση. Χωρίζεται σε δύο βασικούς κλάδους, την Κλασική Γεωφυσική, στην οποία τα συμπεράσματα των ερευνών της αποτελούν σημαντικά εφόδια για τη γνώση του τρόπου γέννησης, εξέλιξης και συμπεριφοράς της Γης, και την Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, στην οποία εφαρμόζονται οι αρχές της Κλασικής Γεωφυσικής για την αποτύπωση του υπεδάφους και τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι αποτελούν τον στερεό φλοιό της γης.

Κατά την Εφαρμοσμένη Γεωφυσική διεξάγονται έρευνες οι οποίες περιλαμβάνουν τη συλλογή, την επεξεργασία και την ερμηνεία των γεωφυσικών παρατηρήσεων με σκοπό την αποκάλυψη της εσωτερικής κατανομής των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους που έχουν ως αποτέλεσμα την λήψη συγκεκριμένων μετρήσεων κατά την εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων. Υπάρχουν πολλές γεωφυσικές μέθοδοι και σε κάθε μια από αυτές εξετάζεται διαφορετική χαρακτηριστική φυσική ιδιότητα του υπεδάφους. Καταλήγουν σε συμπεράσματα σχετικά με το τι βρίσκεται κάτω από το έδαφος μελετώντας τη χωρική ή και χρονική μεταβολή της συγκεκριμένης αυτής ιδιότητας (Λεονταράκης, 2011).

Παραδείγματα εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων παρατηρούνται συχνά σε περιπτώσεις αρχαιολογικών ερευνών όπως για παράδειγμα στην Αμφίπολη της Ελλάδας. Η γεωφυσική διασκόπηση και η γεωλογική χαρτογράφηση του λόφου Καστά πραγματοποιήθηκε στα τέλη 2014. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη δημιουργία του μοντέλου του εδάφους της εποχής, πριν πραγματοποιηθεί η παρέμβαση για την ανέγερση της θόλου. Για το σκοπό αυτό λοιπόν πραγματοποιήθηκαν γεωλογικές και τεκτονικές παρατηρήσεις καθώς και αριθμός ηλεκτρικών τομογραφιών. Η διασκόπηση σε ορισμένους χώρους πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και σε πολύ μικρή έκταση τους με τη χρήση του γεωραντάρ. Η γεωφυσική διασκόπηση έδωσε απεικονίσεις του εσωτερικού του λόφου όπου εντοπίστηκαν

αντιστατικές δομές οι οποίες διερευνήθηκαν περαιτέρω. Σε μία περίπτωση βόρεια της θόλου, η αφαίρεση των χωμάτων αποκάλυψε ότι η υπεδάφια δομή που απεικονίστηκε με τις ηλεκτρικές τομογραφίες ήταν φακός άμμου, δηλαδή φυσικός σχηματισμός. Στην οριζόντια τομογραφική απεικόνιση για υψόμετρο των 93 μέτρων, τα θερμά χρώματα δείχνουν τις περιοχές με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση και αντίστοιχα τα ψυχρά χρώματα τις περιοχές με χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Οριζόντια τομογραφική απεικόνιση για υψόμετρο των 93 μέτρων του λόφου Καστά.

1.3.1 Βασικές μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων

Παρακάτω επεξηγούνται μερικές από τις βασικότερες μεθόδους γεωφυσικών διασκοπήσεων.

1.3.1.1 Βαρυτική Μέθοδος

Αντικειμενικός σκοπός της Βαρυτικής μεθόδου είναι ο καθορισμός των μεταβολών της πυκνότητας του υπεδάφους συλλέγοντας μετρήσεις της έντασης του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Δηλαδή, γίνεται μια προσπάθεια να εντοπιστούν δομές που παρουσιάζουν αντίθεση στην πυκνότητα τους, είτε θετική είτε αρνητική, με το γύρο περιβάλλον τους. Στηρίζεται στο νόμο της παγκόσμιας έλξης (βαρύτητας) του Νεύτωνα, ο οποίος καθορίζει την ελκτική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο σωμάτων ορισμένης μάζας, που βρίσκονται σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους.

Τα όργανα μέτρησης του πεδίου βαρύτητας ονομάζονται βαρυτόμετρα και η αρχή της λειτουργίας τους στηρίζεται στην ύπαρξη ενός ελατηρίου, στην άκρη του οποίου βρίσκεται κρεμασμένο ένα σώμα ορισμένης μάζας. Στα σημερινά βαρυτόμετρα γίνεται χρήση των λεγόμενων ελατηρίων «μηδενικού μήκους», στα οποία μια αρχική δύναμη συγκρατεί τις σπείρες του ελατηρίου σε επαφή. Είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα όργανα καθώς επηρεάζονται από τις μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται μέσα σε θήκες, όπου η θερμοκρασία και η πίεση διατηρούνται σταθερές με διάφορες τεχνικές. Επίσης ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις μεταβολές των ελαστικών ιδιοτήτων των ελατηρίων, η αποφυγή των οποίων όμως είναι πολλές φορές δύσκολη καθώς δεν μπορούν να προβλεφθούν εύκολα.

Κατά τη διαδικασία συλλογής μετρήσεων αρχικά ορίζεται ένας σταθμός βάσης και ένα δίκτυο άλλων σημείων που αποτελούν ένα κανονικό κάρναβο ή ισαπέχουν σε μία τομή. Στη συνέχεια οι μετρούμενες τιμές του πεδίου βαρύτητας, πριν υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία και ερμηνευτούν, θα πρέπει να υποστούν τις κατάλληλες αναγωγές και διορθώσεις.

Σε σχέση με την μαγνητική μέθοδο γεωφυσικής διασκόπησης υπερτερεί στην ερμηνεία των μετρήσεων καθώς οι παρατηρούμενες ανωμαλίες μεγιστοποιούνται ή ελαχιστοποιούνται ακριβώς πάνω από την υπεδάφια δομή που προκαλεί το ανώμαλο βαρυτικό πεδίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι βαρυτικές ανωμαλίες εξαρτώνται

μόνο από την κατανομή της πυκνότητας της δομής. (Μόδης και Σταματάκη, 2015; Gaffney et al., 2002)

1.3.1.2 Μαγνητική Μέθοδος

Η Μαγνητική μέθοδος στοχεύει στην ανίχνευση της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους λόγω της παρουσίας δομών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διεξαγωγή μιας μαγνητικής διασκόπησης μετριέται το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης σε κάποια απόσταση κάτω από την επιφάνεια της. Το βάθος στο οποίο διεισδύει το έδαφος κυμαίνεται από 0.5 μέτρα, στην περίπτωση εντοπισμού θαμμένων αρχαίων καταλοίπων, έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα κάτω από το τοπογραφικό ανάγλυφο μιας περιοχής, στην περίπτωση εντοπισμού ανωμαλιών που σχετίζονται με τη γεωλογία της περιοχής. Τα συνηθέστερα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου είναι μαγνητόμετρα μέτρησης της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου (πρωτονιακά μαγνητόμετρα) ή διαφορικά μαγνητόμετρα (πρωτονιακά ή ροής), τα οποία μετρούν την κατακόρυφη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου.

Οι μαγνητικές ιδιότητες που έχουν διάφοροι υπεδάφειοι στόχοι μπορεί να διαφέρουν από αυτές του γύρο περιβάλλοντος τους, μεταβάλλοντας έτσι σε μικρό ή μεγάλο βαθμό το τοπικό μαγνητικό πεδίο. Οι παραμορφώσεις που προκαλούν στο μαγνητικό πεδίο παρατηρούνται σαν "ανωμαλίες" στις μετρήσεις, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικά αίτια και διαφοροποιούνται βάση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και του γεωμετρικού τους σχήματος. Οι μαγνητικές αυτές ανωμαλίες εξαρτώνται επίσης από τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης και από τη διεύθυνση της μαγνήτισης. Για το λόγο αυτό είναι κυρίως διπολικού χαρακτήρα. Σχετίζονται άμεσα με τη μαγνητική επιδεκτικότητα του εδάφους καθώς η ύπαρξη αρχαιολογικών ερειπίων στο υπέδαφος συνοδεύεται συνήθως από μια αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας στο υπέδαφος και προκαλούν ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλει το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης.

Το μαγνητικό πεδίο της γης όμως δεν είναι κάτι σταθερό. Μεταβάλλεται συνέχεια με το πέρασμα του χρόνου και ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην καθημερινή μεταβολή του. Παρόλο που δεν είναι προβλέψιμες, οι παροδικές αυτές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη καθ' όλο το διάστημα διεξαγωγής μιας

μαγνητικής διασκόπησης αφού επηρεάζουν τις μετρήσεις που συλλέγονται στην ύπαιθρο. (Μόδης και Σταματάκη, 2015; Robinson et al., 2008; Gaffney et al., 2002)

1.3.1.3 Σεισμική Μέθοδος

Οι σεισμικές μέθοδοι διερεύνησης του υπεδάφους βασίζονται στην αρχή ότι τα ελαστικά κύματα τα οποία δημιουργούνται τεχνητά κινούνται μέσα στο υπέδαφος με ταχύτητα η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Η ταχύτητα διάδοσης τους μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης υπολογίζεται με μετρήσεις των χρόνων διαδρομής τους μέσα σε αυτά και την εφαρμογή των νόμων της Φυσικής στους οποίους υπακούει η διάδοση αυτή.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, παράγονται τεχνητά κύματα (με εκρήξεις, πτώση βαρών, κλπ) στην επιφάνεια της Γης, ή σε μικρό βάθος μέσα σ' αυτή (10-80 m), και αφού διαδοθούν μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης επιστρέφουν στην επιφάνεια της και καταγράφονται σε διάφορες αποστάσεις από σεισμόμετρα. Με βάση τις αναγραφές τους κατασκευάζονται γραφικές παραστάσεις των χρόνων διαδρομής τους σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση και υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης τους σε συνάρτηση με το βάθος. Έτσι γνωρίζοντας τη μεταβολή της ταχύτητας αυτής μπορούμε να εντοπίσουμε γεωλογικές δομές που μας ενδιαφέρουν.

Η σεισμική μέθοδος είναι από τις πιο ακριβείς μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και τα δεδομένα της ερμηνεύονται ευκολότερα από τα δεδομένα άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Παρόλα αυτά αποτελεί μια πολυδάπανη μέθοδος και για το λόγο αυτό εφαρμόζεται μόνο για λεπτομερή μελέτη των γεωλογικών δομών. (Μόδης και Σταματάκη, 2015; Gaffney et al., 2002)

1.3.1.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Σκοπός των ηλεκτρικών μεθόδων αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής του, πραγματοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης. Παράλληλα στοχεύουν στο να προσδιορίσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Υπάρχουν διάφορες ηλεκτρικές μέθοδοι όπως για παράδειγμα η μέθοδος φυσικού δυναμικού και η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας. Η πιο διαδεδομένη όμως από αυτές είναι της

ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία βασίζεται στην ύπαρξη διαφορών στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στηρίζεται στη χρησιμοποίηση τεσσάρων ηλεκτροδίων. Δύο από αυτά για την εισαγωγή ρεύματος στο υπέδαφος ενώ τα άλλα δύο για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια αυτά τοποθετούνται σε μικρή απόσταση κάτω από το έδαφος, περίπου 10 cm, και σε αποστάσεις που κυμαίνονται από μερικά έως μερικές εκατοντάδες μέτρα. Επειδή η Γη είναι ανομοιογενής και ανισότροπη, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρικής διάταξης των ηλεκτροδίων.

Ανάλογα με το γεωλογικό πρόβλημα που θα επιλυθεί, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για την εφαρμογή της μεθόδου. Ο πρώτος τρόπος είναι η γεωηλεκτρική χαρτογράφηση η οποία εφαρμόζεται προκειμένου να εντοπιστούν ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών. Ο δεύτερος τρόπος, είναι η γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση η οποία εφαρμόζεται για τη διερεύνηση της αλλαγής της σύστασης του υπεδάφους με βάση το βάθος. (Μόδης και Σταματάκη, 2015; Robinson et al., 2008; Gaffney et al., 2002)

1.3.1.5 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

Οι ηλεκτρομαγνητικές ή επαγωγικές μέθοδοι διασκόπησης βασίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής σύμφωνα με το οποίο ένα μεταβαλλόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που εισέρχεται στο υπέδαφος έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού επαγωγικού ρεύματος και δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου. Σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους με βάση τις ιδιότητες του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, οι οποίες εξαρτώνται από τη δομή του υπεδάφους.

Σύμφωνα λοιπόν με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενα ηλεκτρομαγνητικά ρεύματα, σε συχνότητες που κυμαίνονται από 1.000-10.000 Hz, τα οποία επάγονται στη γη χωρίς τη χρήση ηλεκτροδίων. Σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές μεθόδους μπορούν να εφαρμοστούν και σε περιπτώσεις όπου το έδαφος έχει μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση και επομένως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ηλεκτρική σύνδεση. Παρόλα αυτά όμως δεν μπορούν να εφαρμοστούν για τον εντοπισμό αγωγίμων σωμάτων σε μεγάλα βάθη όταν το επιφανειακό τμήμα του εδάφους είναι εξαιρετικά αγωγίμο. (Μόδης και Σταματάκη, 2015; Robinson et al., 2008; Gaffney et al., 2002)

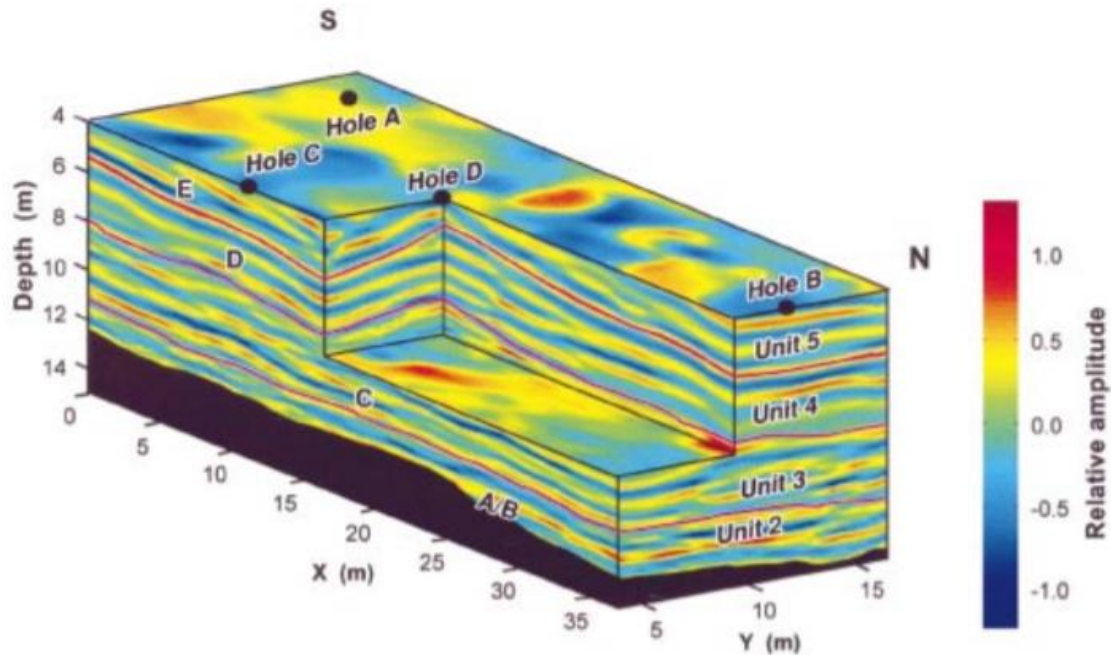
1.3.1.6 Μέθοδος του Υπεδάφιου Radar ή Γεωραντάρ (GPR – Ground penetrating radar)

Το Γεωραντάρ είναι μια υψηλής ανάλυσης ηλεκτρομαγνητική τεχνική η οποία εφαρμόζεται στη χαρτογράφηση των στρωμάτων σε εδάφη και πετρώματα και στον εντοπισμό υπόγειων δομών στηριζόμενη στις διαφορές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών. Είναι μια γεωφυσική τεχνική η οποία εξαρτάται από το χρόνο και μπορεί να προσφέρει μια ψευδο-τριδιάστατη εικόνα του υπεδάφους, συμπεριλαμβανομένης της τέταρτης διάστασης του χρώματος. Επίσης μπορεί να παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις για το βάθος στο οποίο βρίσκονται υπεδάφια αντικείμενα και, υπό ευνοϊκές συνθήκες, ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη φύση θαμμένων αντικειμένων. Ιδιαίτερη εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται στην Αρχαιομετρία για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών λειψάνων.

Το GPR εφαρμόζει την αρχή της σκέδασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων. Στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής συχνότητας στο υπέδαφος και στην καταγραφή των κυμάτων που επιστρέφουν. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που διαδίδεται στο υπέδαφος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητές του, δηλαδή τη διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα του. Βασικά, η μέθοδος στηρίζεται κυρίως στην καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων σε επιφάνειες που παρουσιάζουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με τη μέθοδο, ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής συχνότητας και μικρής διάρκειας παράγεται και διοχετεύεται στο έδαφος. Η ταχύτητα με την οποία κινείται μέσα σε αυτό καθορίζεται κυρίως από τη διαπερατότητα των υλικών που υπάρχουν στο υπέδαφος. Το κύμα εξαπλώνεται και ταξιδεύει προς τα κάτω μέχρι να χτυπήσει ένα αντικείμενο, που έχει διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες από το γύρο περιβάλλον του, και διασκορπίζεται. Ένα μέρος της ενέργειας του κύματος αντανακλάται πίσω στην επιφάνεια της γης, ενώ το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας του συνεχίζει να ταξιδεύει προς τα κάτω. Το κύμα που ανακλάται στην επιφάνεια συλλαμβάνεται από μια κεραία λήψης και καταγράφεται σε μια ψηφιακή συσκευή αποθήκευσης για μεταγενέστερη ερμηνεία. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου παλμού εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης του κατά μήκος της διαδρομής που αυτός ακολούθησε. Ο χρόνος αυτός μπορεί να μετρηθεί και αν η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι γνωστή μπορεί να υπολογιστεί το βάθος του ανακλαστήρα. Δημιουργείται

λοιπόν μία τομή η οποία προσομοιάζει την αληθινή ηλεκτρική τομή του υπεδάφους, δηλαδή της αποτύπωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σε σχέση με το βάθος. (Gaffney et al., 2002; Corbeanu et al., 2001; Daniels, 2000)



Εικόνα 2: Ψευδο-τριδιάστατος όγκος δεδομένων γεωραντάρ. Ο άξονας X και Y αντιπροσωπεύουν τον κάνναβο (αποστάσεις σε μέτρα) της περιοχή στην επιφάνεια της γης όπου διεξάχθηκαν οι μετρήσεις ενώ ο άξονας Z το βάθος σε μέτρα. Το χρώμα αντιπροσωπεύει τα σχετικά πλάτη της αντανάκλασης του σήματος. (Corbeanu et al., 2001)

1.4 Συγχώνευση Δεδομένων (Fusion of Data)

Σύμφωνα με τους Khaleghia et al. (2013) η συγχώνευση δεδομένων αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία για διάφορους λόγους. Οι λόγοι αυτοί προκύπτουν κυρίως από τα δεδομένα που πρόκειται να συγχωνευτούν, τις ατέλειες και την ποικιλομορφία των τεχνολογιών των αισθητήρων, καθώς και τη φύση του περιβάλλοντος εφαρμογής. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα πηγής που καταγράφει ο κάθε αισθητήρας επηρεάζονται από κάποια σφάλματα και αβεβαιότητες στις μετρήσεις. Για τα σφάλματα αυτά και για τις αβεβαιότητες αυτές πρέπει οι διάφοροι αλγόριθμοι συγχώνευσης να είναι σε θέση να μπορούν να τα λαμβάνουν υπόψη και να ελαχιστοποιούν την επίδραση τους, όπως επίσης και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις ασάφειες και τις ασυνέπειες του περιβάλλοντος στο οποίο συλλέχτηκαν τα δεδομένα πηγής. Με ιδιαίτερη προσοχή από

τους αλγόριθμους πρέπει να αντιμετωπίζονται και τα ετερογενή δεδομένα έτσι ώστε να αποφεύγονται λανθασμένα αποτελέσματα και ερμηνείες. Επίσης οποιεσδήποτε συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχών λάθη στα αποτελέσματα. Τα ομογενή ή ετερογενή δεδομένα που μπορεί να συλλέξουν τα διάφορα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να αντιμετωπίζονται και στις δύο περιπτώσεις με ένα σύστημα συγχώνευσης δεδομένων ενώ πριν από κάθε συγχώνευση τους είναι αναγκαία η κανονικοποίηση και ο μετασχηματισμός τους σε ένα κοινό πλαίσιο όπως και η καταγραφή τους για την επιτυχή ανάπτυξη των συστημάτων συγχώνευσης στην πράξη. Επιπλέον η παρακολούθηση πολλαπλών στόχων παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα στα συστήματα συγχώνευσης, σε σύγκριση με την περίπτωση παρακολούθησης ενός στόχου, και δυσκολίες όπως το πρόβλημα της συσχέτισης μεταξύ δεδομένων. Ακόμα ένας παράγοντας που καθιστά την συγχώνευση δεδομένων ως μια δύσκολη διαδικασία είναι οι διαστάσεις των δεδομένων. Η προεπεξεργασία των μετρούμενων δεδομένων θα μπορούσε να εφαρμοστεί είτε σε τοπικό επίπεδο, για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, είτε σε καθολικό επίπεδο, κατά τη διαδικασία της συγχώνευσης, έτσι ώστε να συμπιεστούν σε δεδομένα λιγότερων διαστάσεων υποθέτοντας όμως πάντοτε ότι η απώλεια που προέρχεται από τη συμπίεση αυτή επιτρέπεται ως ένα ορισμένο επίπεδο. Το στάδιο της προεπεξεργασίας είναι σημαντικό αφού μπορεί να περιορίσει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο της συγχώνευσης στην περίπτωση της καθολικής προεπεξεργασίας. Εν τέλει, τα φαινόμενα που παρατηρούνται μπορεί να είναι στατικά, δηλαδή αμετάβλητα στο χρόνο, ή δυναμικά, δηλαδή μεταβάλλονται διαρκώς με το πέρασμα του χρόνου. Στην περίπτωση δυναμικών δεδομένων είναι αναγκαίο ο αλγόριθμος συγχώνευσης να ενσωματώνει ένα πρόσφατο ιστορικό μετρήσεων στη όλη διαδικασία του. Παρόλο που πολλά από αυτά τα προβλήματα έχουν εντοπιστεί και ερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό κανένας αλγόριθμος συγχώνευσης δεδομένων δεν βρίσκεται σε θέση να αντιμετωπίσει όλες τις προαναφερθείσες προκλήσεις μαζί.

Οι μέθοδοι συγχώνευσης δεδομένων εκτείνονται σε μια μεγάλη ποικιλία από προσεγγίσεις και υπολογιστικούς τομείς. Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται μπορούν να υλοποιηθούν διαφορετικοί στόχοι ή οφέλη. Στον τομέα των γεωφυσικών ανασκοπήσεων, πολλοί από αυτούς προσφέρουν βελτιωμένους τρόπους για την απεικόνιση του συνόλου των υπεδάφινων στοιχείων, απεικονίζοντας πολλαπλές γεωφυσικές διαστάσεις ταυτόχρονα. Μερικοί βοηθούν στο να περιγράφονται σαφέστερα

οι ανωμαλίες ενώ άλλοι στη βελτίωση της θεωρητικής κατανόησης των σχέσεων μεταξύ των διάφορων γεωφυσικών μεθόδων και αρχαιολογικών καταθέσεων, μέσω γραφικών και στατιστικών μέσων. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις κάποιοι βελτιώνουν τον προσδιορισμό του είδους του αρχαιολογικού χαρακτηριστικού που αντιπροσωπεύεται από μια ανωμαλία, γεγονός που συμβάλλει στη διαδικασία της ερμηνείας. Ορισμένες τεχνικές μπορούν να ενισχύσουν την αναζήτηση ευρημάτων, καθιστώντας σαφείς νέες ανωμαλίες οι οποίες δεν ήταν ορατές σε κανένα σύνολο δεδομένων. Υπάρχουν μέθοδοι οι οποίοι είναι σχετικά πολύ εύκολοι στην κατανόηση και την εφαρμογή τους ενώ κάποιοι άλλοι έχουν εξαιρετικά πολύπλοκους αλγόριθμους. Για τη δημιουργία μιας τάξης, οι μέθοδοι αυτοί έχουν ομαδοποιηθεί σε επτά βασικούς τομείς συγχώνευσης οι οποίοι περιλαμβάνουν τις εξής μεθόδους:

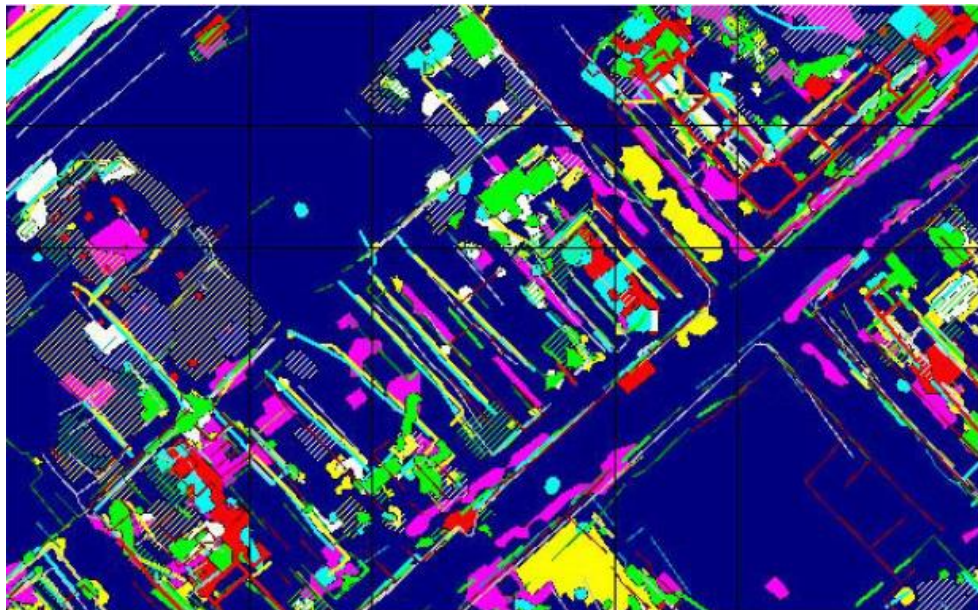
1. Υπέρθυση δεδομένων που αποτελεί την παραδοσιακή προσέγγιση ερμηνείας
2. Δημιουργία έγχρωμων σύνθετων (RGB / HIS κτλ.) σε συνδυασμό με την υπέρθεση δεδομένων.
3. Boolean άλγεβρα και τεχνικές ομαδοποίησης.
4. Απλές μαθηματικές πράξεις, όπως αθροίσματα, πηλίκο κτλ.
5. Πολυπαραγοντικές μέθοδοι όπως η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών και αναλύσεις συσχετίσεων.
6. Ευφυείς αλγόριθμοί που βασίζονται στη γνώση από προηγμένες μηχανής μάθησης.
7. Έμπειρα συστήματα.

Πολλοί από τους μεθόδους συγχώνευσης που εμπίπτουν στους επτά αυτούς βασικούς τομείς εφαρμόστηκαν σε δεδομένα που συλλέχτηκαν στον αρχαιολογικό χώρο Army City (Fort Riley, Kansas), από το Κέντρο Προηγμένων Χωρικών Τεχνολογιών, το Τμήμα Ανθρωπολογίας του Πανεπιστημίου του Αρκάνσας, το ERDC CERL και το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Marshall της NASA στο πλαίσιο του προγράμματος SERDP CS-1263 (Limp, F. et al., 2006). Για τους σκοπούς της έρευνας του συγκεκριμένου προγράμματος εφαρμόστηκαν επίγειες γεωφυσικές, εναέριας και δορυφορικές τεχνολογίες. Οι μελέτες που διεξάχθηκαν στον χώρο αυτό περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων μαγνητικές διασκοπήσεις, ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, μαγνητική επιδεκτικότητα και ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους, μετρήσεις με γεωραντάρ και λήψεις υψηλής ανάλυσης πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων. Επίσης πολλοί από αυτούς τους

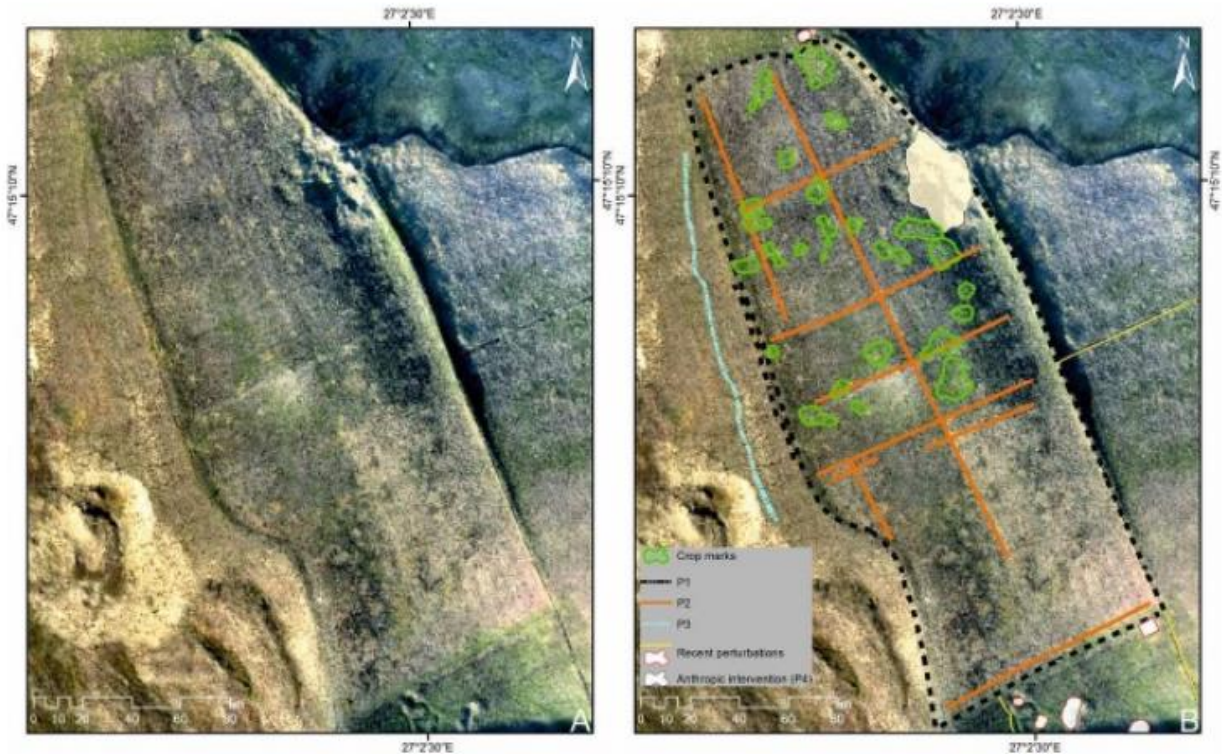
μεθόδους έχουν εφαρμοστεί και σε δεδομένα που συλλέχθηκαν στον αρχαιολογικό χώρο της Ρωμαϊκής πόλης Carnuntum του ανατολικού τμήματος της Αυστρίας το 1996 (Neubauer and Eder-Hinterleitner 1997) όπως επίσης και σε πολλές άλλες τηλεπισκοπικές έρευνες που σχετίζονται με την αρχαιολογία (Themistocleous, 2015; Armesto-González et al., 2010; Asăndulesei, 2017; Lasaponara et al., 2016; Agariou, et al., 2017; Rowlands and Sarris, 2007). Παρακάτω αναφέρετε η επεξήγηση των βασικότερων μεθόδων συγχώνευσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διάφορα παραδείγματα εφαρμογής τους στα δεδομένα που συλλέχθηκαν στις διάφορες αυτές περιπτώσεις αρχαιολογικών ερευνών.

1.4.1 Παραδοσιακές προσεγγίσεις ερμηνείας με συγχώνευση η οποία χρησιμοποιεί απλές γραφικές υπερθέσεις των διανυσματικών ανωμαλιών

Αποτελεί τη μετατροπή συνεχόμενων δεδομένων τύπου raster σε διακεκριμένα σημειακά, γραμμικά και επιφανειακά διανύσματα που αναπαριστούν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Για κάθε έρευνα που πραγματοποιείται δημιουργείται ένας ξεχωριστός χάρτης που εμφανίζει ερμηνευμένες τις ανωμαλίες που εντοπίστηκαν. Εάν οι χάρτες αυτοί συνδυαστούν και επικαλυφθούν αντιπροσωπεύουν μια μορφή συγχώνευσης δεδομένων.



Εικόνα 3: Ερμηνευτικά διανύσματα επικαλυπτόμενα πάνω σε γεωφυσικά δεδομένα και μεταξύ τους. Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει διαφορετική πληροφορία: κίτρινο = ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, πράσινο = γεωραντάρ, κυανό = μαγνητική βαθμίδωση, λευκό = μαγνητική επιδεκτικότητα, κόκκινο = ηλεκτρική αντίσταση, ματζέντα = θερμικό υπέρυθρο, έντονες-ανθεκτικές ανωμαλίες = συμπαγή φωτεινά χρώματα, δύσκολες στην περιγραφή και ανάλυση ανωμαλίες = επικαλυπτόμενες γραμμές σκίασης ή θαμπού χρώματος διανύσματα. (Limp, F. et al., 2006)



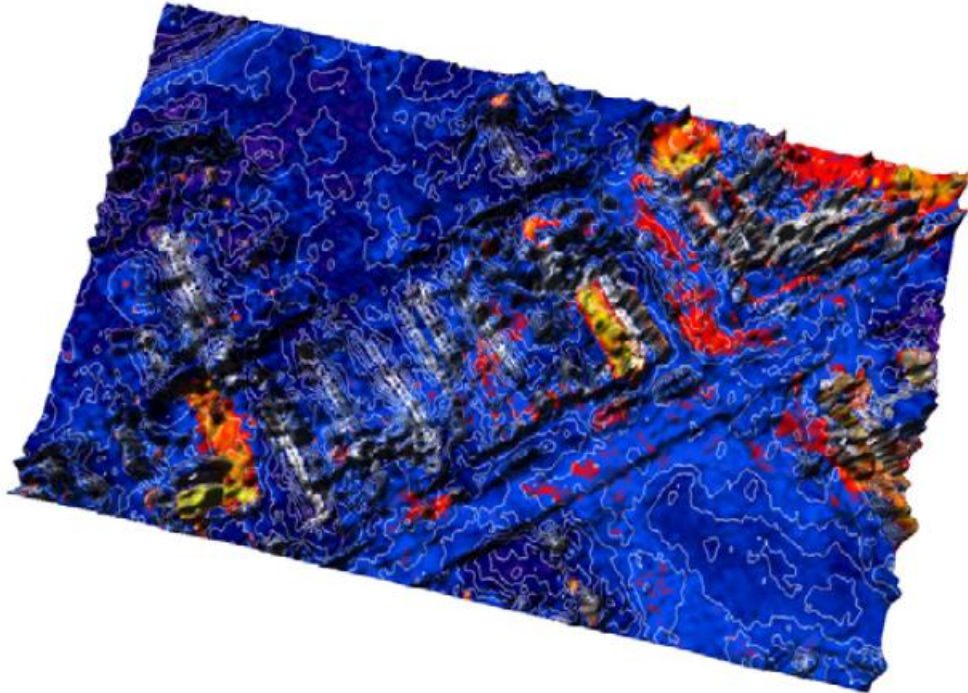
Εικόνα 4: Εντοπισμός ανωμαλιών από αεροφωτογραφίες. (Α) Ορθοφωτογραφία, (Β) πιθανά χαρακτηριστικά με πολιτιστικό ενδιαφέρον. (Asăndulesei, 2017)

1.4.2 Γραφικοί μέθοδοι οι οποίοι κυμαίνονται από υπερθέσεις μέχρι δημιουργίες έγχρωμων σύνθετων και ημιδιαφανών επιπέδων δεδομένων

1.4.2.1 Γραφικές υπερθέσεις (*Graphic overlays*)

Μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση συνεχών δεδομένων που υπάρχουν σε χάρτες είναι τα περιγράμματα με γραμμές που αναπαριστούν μετρήσεις με ίσες τιμές, διαβαθμίσεις του γκρι ή αποχρώσεων που εκφράζουν το μέγεθος των μετρήσεων, σκίαση που υποδεικνύει την απότομη κλίση σε τρισδιάστατες επιφάνειες και ψευδο-τρειςδιάστατες προβολές όπου ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει το μέγεθος των

μετρήσεων. Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρουσιάσει ένα σύνολο δεδομένων. Μπορούμε όμως να παρουσιάσουμε ταυτόχρονα πολλά σύνολα δεδομένων με την επικάλυψη τους, έχοντας έτσι ένα αποτέλεσμα συγχώνευσης δεδομένων.

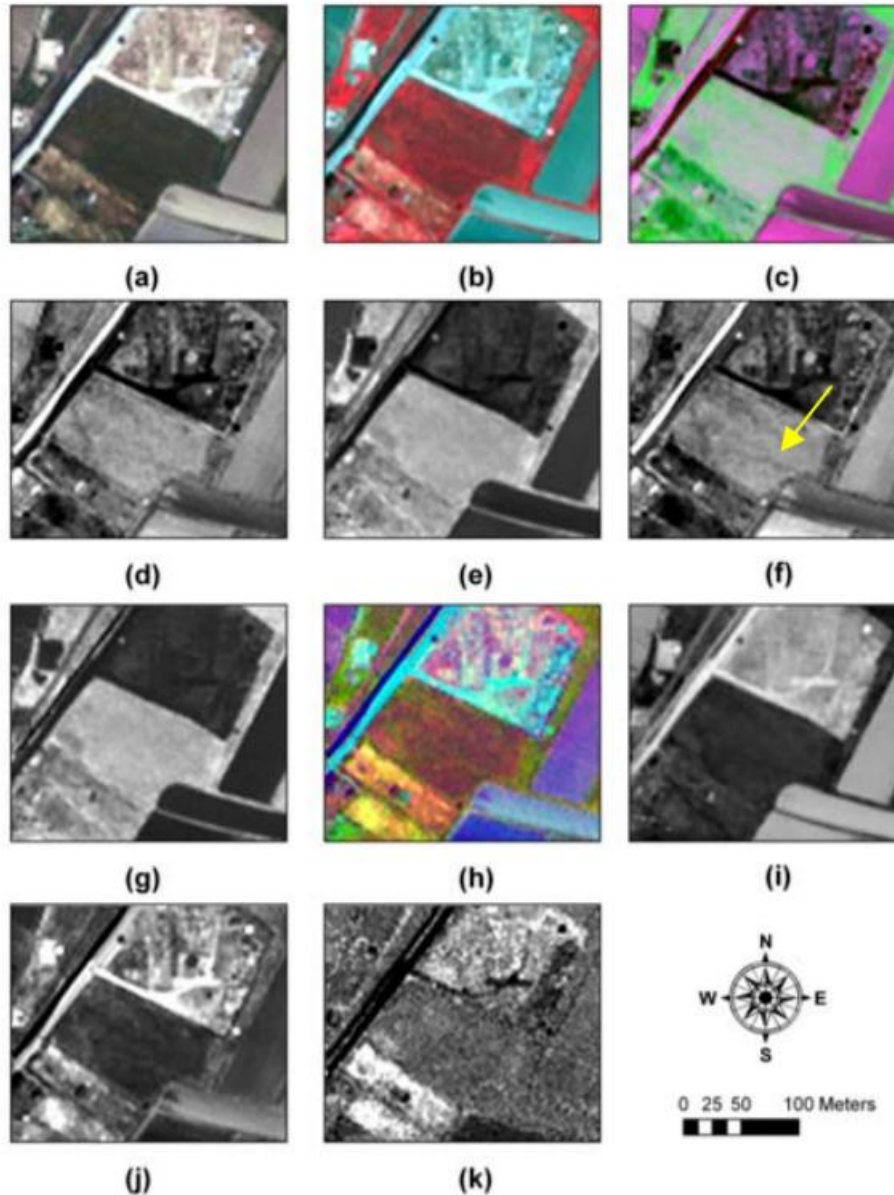


Εικόνα 5: Συγχώνευση δεδομένων με γραφική υπέρθεση. Γραμμές ίσου μεγέθους ηλεκτρομαγνητικής αγωγιμότητας (άσπρες) επικαλυπτόμενες πάνω σε ένα έγχρωμο raster με τιμές ηλεκτρικής αντίστασης πάνω από μια σκιασμένη επιφάνεια μαγνητικής επιδεκτικότητας. (Limp, F. et al., 2006)

1.4.2.2 Έγχρωμα σύνθετα RGB

Τα έγχρωμα σύνθετα RGB αποτελούν μια τυπική μορφή απεικόνισης των δορυφορικών εικόνων εδώ και πολλά χρόνια. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο σε τρία σύνολα δεδομένων ανατίθεται ένα βασικό χρώμα. Ακολουθώντας οι εικόνες που παράγονται συνδυάζονται για να δημιουργηθούν έγχρωμα σύνθετα που καλύπτουν πλήρως το οπτικό φάσμα. (Εικόνα 5b, 5h) Σε περιπτώσεις με περισσότερες από τρεις διαστάσεις χρησιμοποιούνται περισσότερα χρώματα και το καθένα αποφέρει διαφορετικές πληροφορίες. Η επικάλυψη περισσότερων χρωμάτων από τα τρία του RGB, δηλαδή περισσότερων διαστάσεων δεδομένα, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης διαφανειών. Σε κάθε ομάδα ενός συνόλου δεδομένων ανατίθεται διαφορετικό χρώμα. Στην συνέχεια όλες οι ομάδες, εκτός από μια, γίνονται διαφανείς εικόνες και επικαλύπτονται πάνω στην εικόνα της ομάδας η

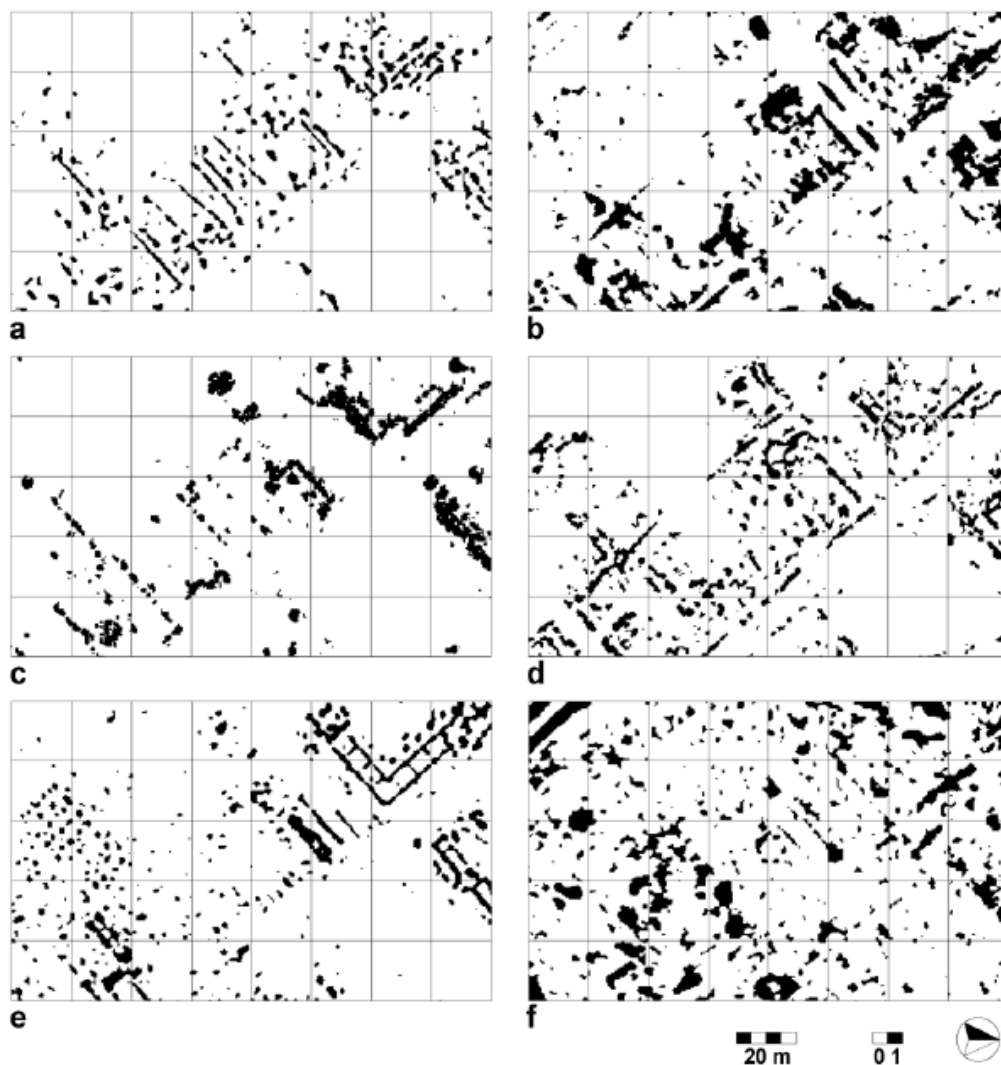
οποία παραμένει αδιαφανές εικόνα. Έτσι καταλήγουμε σε μια καλύτερη απεικόνιση των δεδομένων σε σύγκριση με τα τρισδιάστατα έγχρωμα σύνθετα του RGB. Για να έχουμε όμως πιο καθαρά αποτελέσματα προτιμούμε την επικάλυψη μόνο τριών ή και μέχρι τεσσάρων εικόνων.



Εικόνα 6: Δορυφορική εικόνα QuickBird που καλύπτει το δυτικό μέρος του αρχαιολογικού χώρου Ίλις, Πελοπόννησος. (a) Έγχρωμο σύνθετο RGB, (b) NIR-R-G έγχρωμο σύνθετο, (c) γραμμικός μετασχηματισμός ψευδέχρωμου RGB, (d) πρώτος παράγοντας γραμμικός μετασχηματισμός, (e) δεύτερος παράγοντας γραμμικός μετασχηματισμός, (f) τρίτος παράγοντας γραμμικός μετασχηματισμός, (g) δείκτης NDVI, (h) έγχρωμο σύνθετο του PCA, (i) πρώτος παράγοντας του PCA, (j) δεύτερος παράγοντας του PCA και (k) τρίτος παράγοντας του PCA (Agariou et al., 2015).

1.4.3 Διακριτές μέθοδοι που χρησιμοποιούν διάφορες προσεγγίσεις όπως μεθόδους Boolean και τεχνικές ομαδοποίησης

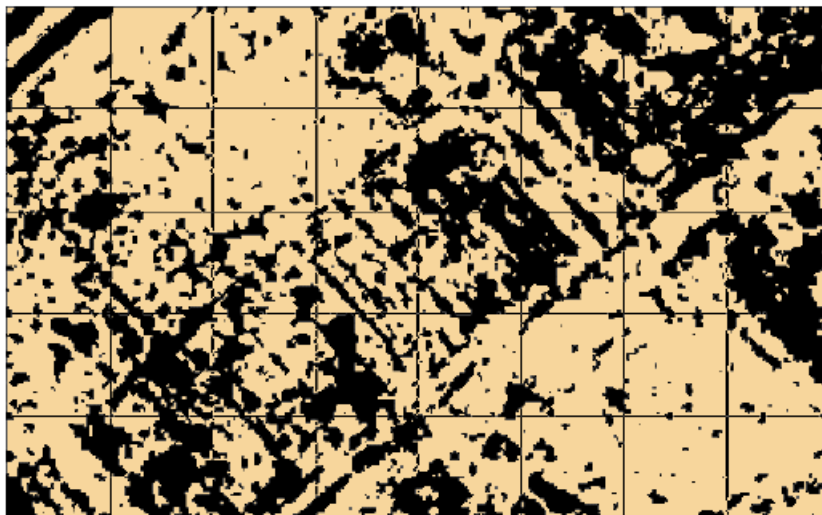
Οι μέθοδοι Boolean αποτελούν ένα κύριο εργαλείο για τη συγχώνευση δεδομένων. Αυτές οι προσεγγίσεις απαιτούν από τα συνεχή δεδομένα που συλλέχθηκαν από διάφορες πηγές, χωρίς κάποια προεπεξεργασία, να ταξινομηθούν σε μια δυαδική κατάσταση. Συγκεκριμένα, το “1” μπορεί να αντιπροσωπεύει την ύπαρξη ενώ το “0” την απουσία μιας ανωμαλίας. Αυτή η δυαδική αναπαράσταση επιτυγχάνεται επιλέγοντας κατάλληλα κατώτατα όρια κοντά στα άκρα μιας στατιστικής κατανομής και τη χαρτογράφηση μόνο των περιοχών με πιο ακραίες τιμές ως μια ενότητα.



Εικόνα 7: Δυαδική αναπαράσταση γεωφυσικών ανωμαλιών. α) ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) GPR, γ) μαγνητική βαθμίδωση, δ) μαγνητική επιδεκτικότητα, ε) ηλεκτρική αντίσταση, ς) θερμικό υπέρυθρο. Το μαύρο χρώμα υπονοεί την ύπαρξη μιας ανωμαλίας ενώ αντίθετα το άσπρο χρώμα υπονοεί την απουσία μιας ανωμαλίας σε κάθε σημείο του χάρτη.

1.4.3.1 Ένώσεις Boolean

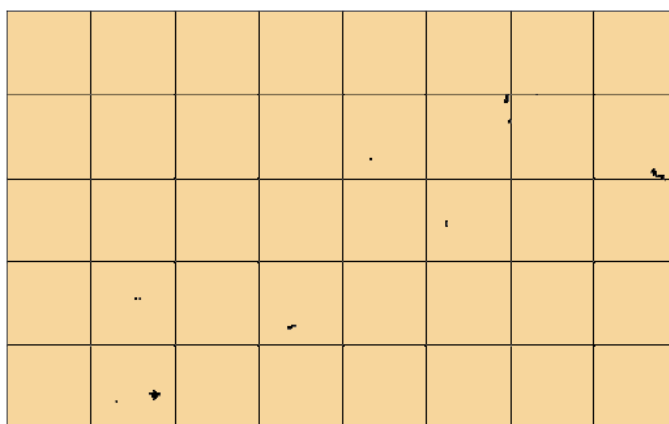
Μια ένωση Boolean προκύπτει όταν τουλάχιστον ένα από τα σύνολα δεδομένων που εισάγονται κωδικοποιείται ως “1”, δηλαδή εντοπίζονται ανωμαλίες στο χάρτη. Η χαρτογράφηση της παρουσιάζει όλα τα μέρη του χάρτη όπου οι ανωμαλίες υποδεικνύονται με περισσότερες από μια μεθόδους. Ταυτόχρονα υποδεικνύει τις τοποθεσίες όλων των μεγάλων ανωμαλιών που εμφανίζονται από όλα τα σύνολα δεδομένων. Ως εκ τούτου, το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου συγχώνευσης δεδομένων είναι η παραγωγή ενός γενικού κύριου χάρτη ενδιαφέροντος.



Εικόνα 8: Ένωση Boolean των δυαδικών αναπαραστάσεων των γεωφυσικών χαρακτηριστικών που αναφέρονται στην εικόνα 4. Στην νέα αυτή εικόνα φαίνονται όλες οι μαυρισμένες περιοχές από όλες τις αναπαραστάσεις των διάφορων συνόλων δεδομένων σε δυαδική μορφή.

1.4.3.2 Τομές Boolean

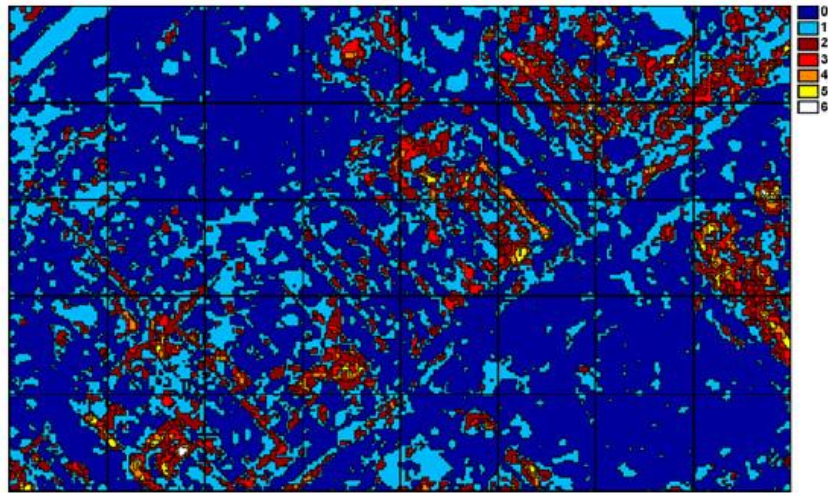
Επίσης ενδιαφέρουσες αποτελούν και οι τομές Boolean, καθώς αποκαλύπτουν μέρη όπου καθορισμένες ανωμαλίες εμφανίζονται ταυτόχρονα σε όλα τα σύνολα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Με άλλα λόγια, δημιουργείται ένας χάρτης στον οποίο οι μαυρισμένες περιοχές είναι αυτές οι οποίες έχουν ερμηνευτεί ως “1”, δηλαδή ότι υπάρχει ανωμαλία σε αυτές, σε όλους τους χάρτες των δεδομένων πηγής που εισάγονται στη διαδικασία της μεθόδου.



Εικόνα 9: Τομή Boolean των δυαδικών αναπαραστάσεων των γεωφυσικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στην εικόνα 4. Στην νέα αυτή εικόνα φαίνονται οι περιοχές οι οποίες είναι μαυρισμένες σε όλες τις αναπαραστάσεις.

1.4.3.3 Δυαδικό Άθροισμα (Binary Sum)

Σε σύγκριση με άλλες λειτουργίες των μεθόδων Boolean ένα άθροισμα δυαδικών χαρτών μπορεί να προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα. Έχοντας λοιπόν n σύνολα δεδομένων εισόδου, το αποτέλεσμα θεωρητικά μπορεί να έχει από 0 έως n λύσεις, αποδίδοντας $n+1$ τάξεις. Το μηδέν παρουσιάζεται σε περιοχές όπου τα δυαδικά σύνολα δεδομένων εισόδου είναι κωδικοποιημένα ως μηδέν ενώ η μέγιστη τιμή n σε όλα τα δεδομένα εισόδου που κωδικοποιήθηκαν ως “1” σε όλες τις περιπτώσεις. Συνεπώς, μέσα σε αυτή τη μέθοδο ενσωματώνονται οι ενώσεις και οι τομές Boolean. Το άθροισμα μπορεί επίσης να παρουσίαση μια κατάταξη των ανωμαλιών ανάλογα με το πόσες φορές εντοπίζονται σε n περιπτώσεις συνόλων δεδομένων (από 0 έως n). Ως εκ τούτου, μπορεί να ερμηνευτεί ως ένας χάρτης όπου οι υψηλές τιμές υποδεικνύουν που βρίσκονται ανωμαλίες οι οποίες έχουν εντοπισθεί με περισσότερες από μια μεθόδους. Επόμενος ο συγκεκριμένος χάρτης είναι πιο πλούσιος σε περιεχόμενο και λεπτομέρεια από μια ένωση ή μια τομή Boolean. Αποτελεί μια πολύ απλή μέθοδος ενώ η προσέγγιση της αποδίδει δυαδικά αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στην περίπτωση μιας ένωσης ή μιας τομής Boolean. Με άλλα λόγια, μπορεί να απόδοση στο αποτέλεσμα της περισσότερες πληροφορίες από ότι μπορούν να αποδώσουν μια ένωση και μια τομή Boolean μαζί.

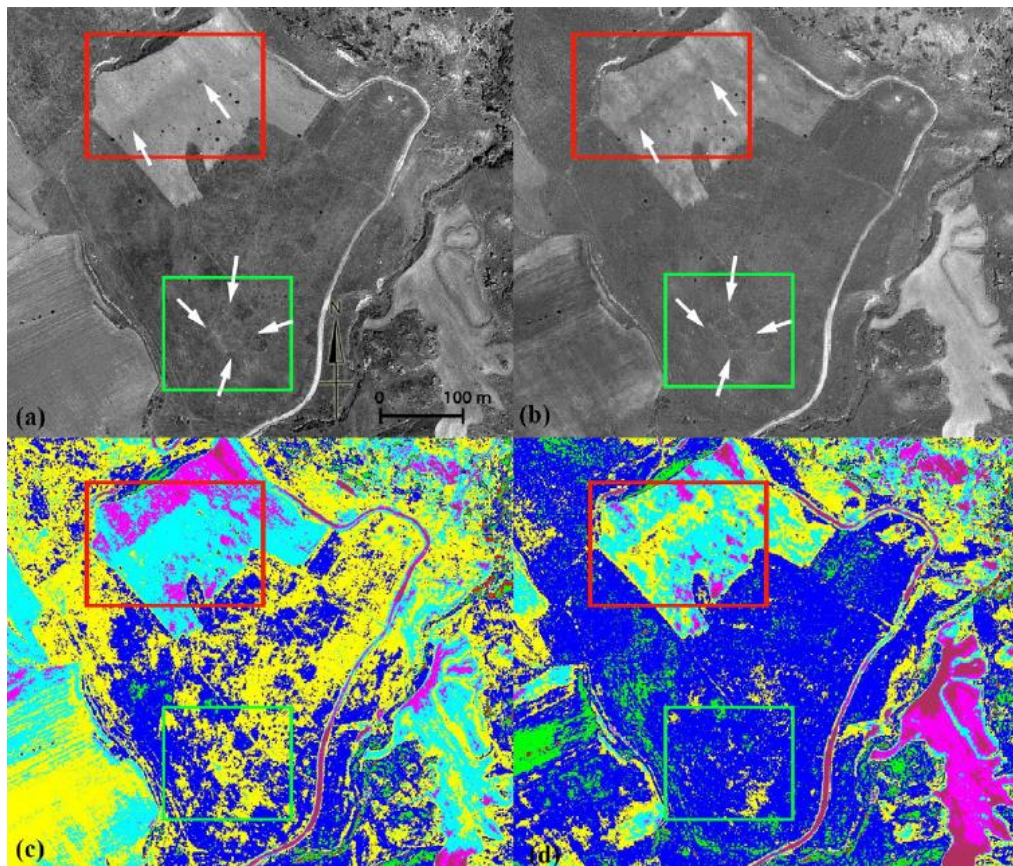


Εικόνα 10: Δυαδικό Άθροισμα των δυαδικών αναπαραστάσεων των γεωφυσικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στην εικόνα 4. Στην νέα αυτή εικόνα κάθε χρώμα αναπαριστά πόσες φορές μια περιοχή παρουσιάστηκε ως μαύρη, δηλαδή κωδικοποιήθηκε ως “1” και υποδεικνύει μια ανωμαλία, ανάμεσα σε όλες τις δυαδικές αναπαραστάσεις των γεωφυσικών συνόλων δεδομένων που υλοποιήθηκαν. (Limp, F. et al., 2006)

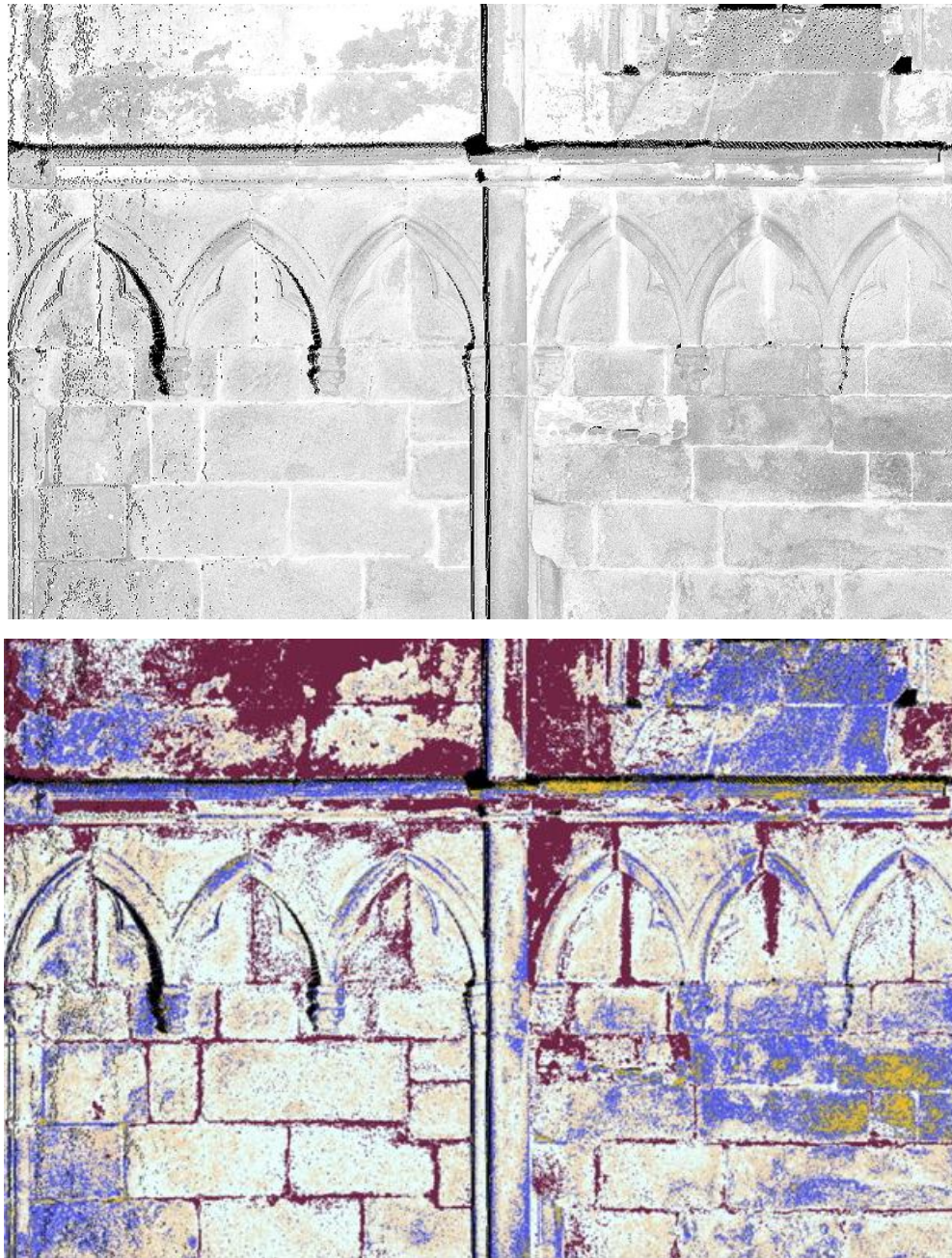
1.4.3.4 Μέθοδοι ανάλυσης ομαδοποίησης (Cluster Analysis Methods)

Οι μέθοδοι ανάλυσης ομαδοποίησης αναφέρονται σε μια σειρά από αλγόριθμους οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να αναγνωρίζουν φυσικές ομαδοποιήσεις σε ένα σύνολο δεδομένων με πολλαπλές μεταβλητές. Αυτές οι ομαδοποιήσεις γίνονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε κάθε μια από αυτές να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο ή περισσότερο ομοιογενής και διαφορετική από τις υπόλοιπες ομάδες. Παραδείγματος χάρη η μέθοδος k-means, η οποία χαρακτηρίζεται ευέλικτη στην επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων, ξεκινά με ένα έναν αριθμό k ομάδων τον οποίο επιλέγει ο χρήστης. Στην συνέχεια ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί τοποθετεί k κέντρα αυθαίρετα εντός του πολυδιάστατου χώρου των μετρήσεων. Ακολουθώς υπολογίζει την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ κάθε σημείου και του κοντινότερου του κέντρου, το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων από τα αντίστοιχα κέντρα και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) των αποστάσεων. Σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος μετακινεί συνεχόμενα τα k κέντρα, μέσα στο χώρο των μετρήσεων, μέχρι το MSE να ελαχιστοποιηθεί, πράγμα που υποδεικνύει ότι ο βέλτιστος διαχωρισμός σε k ομάδες επιτυγχάνεται με την αντιστοίχιση της κάθε περίπτωσης στο κοντινότερο της κέντρο ομαδοποίησης. Ο αλγόριθμος k-means τείνει να αποδίδει καλύτερα σε σφαιρικές ομαδοποιήσεις με την ίδια διακύμανση, δηλαδή για ομοιογενείς δεδομένα.

Παρομοίως με το αλγόριθμο k-means, ο αλγόριθμος ταξινόμησης ISODATA ακολουθεί περίπου την ίδια διαδικασία ομαδοποίησης των δεδομένων. Η μέθοδος απαιτεί ελάχιστες πληροφορίες. Χρειάζεται να γνωρίζει τη μέγιστη φασματική απόσταση που μπορεί να απέχει μια ψηφίδα από το κέντρο της ομάδας στην οποία ανήκει, το μέγιστο πλήθος των ομάδων που πρέπει να ορισθούν από τον αλγόριθμο και το μέγιστο ποσοστό των ψηφίδων το οποίο επιτρέπεται να μην αλλάζει ομάδα μεταξύ των επαναλήψεων. Και οι δύο αλγόριθμοι αποτελούν επαναληπτικές διαδικασίες με τη μόνη διαφορά ότι ο αλγόριθμος ISODATA αναθέτει το διαφορετικό αριθμό των ομάδων “δυναμικά”. Ο αλγόριθμος ISODATA διαιρεί μια ομάδα στα δύο εάν η τυπική απόκλιση της υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο ή όταν ο αριθμός των εικονοστοιχείων της είναι διπλάσιος από το κατώτατο όριο. Ο ISODATA θεωρείται πιο ευέλικτος σε σύγκριση με τον αλγόριθμο της μεθόδου k-means, αλλά απαιτεί την εμπειρική επιλογή πολλών άλλων παραμέτρων.



Εικόνα 11: Οι εικόνες (c) και (d) αποτελούν το αποτέλεσμα της εφαρμογής του αλγόριθμου ISODATA στις εικόνες (a) και (b) αντίστοιχα. (Lasaponara et al., 2016)



Εικόνα 12: Αποτελέσματα εφαρμογής μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε 2D εικόνα έντασης που δημιουργήθηκε από 3D πληροφορίες (νέφος σημείων). Η εικόνα απεικονίζει ένα εσωτερικό τοίχο ενός ναού που βρίσκεται στα ερείπια του μοναστηριού του Santo Domingo, στην καρδιά της πόλης Pontevedra, Galicia (Ισπανία). Σκοπός της έρευνας ήταν η μελέτη των ζημιών στα πετρώδη υλικά από τα οποία αποτελούνται ιστορικά κτίρια. (A) αρχική εικόνα, (B) η εικόνα μετά από εφαρμογή ταξινόμησης που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της μεθόδου k-means (8 κλάσεις). (Armesto-González et al., 2010)

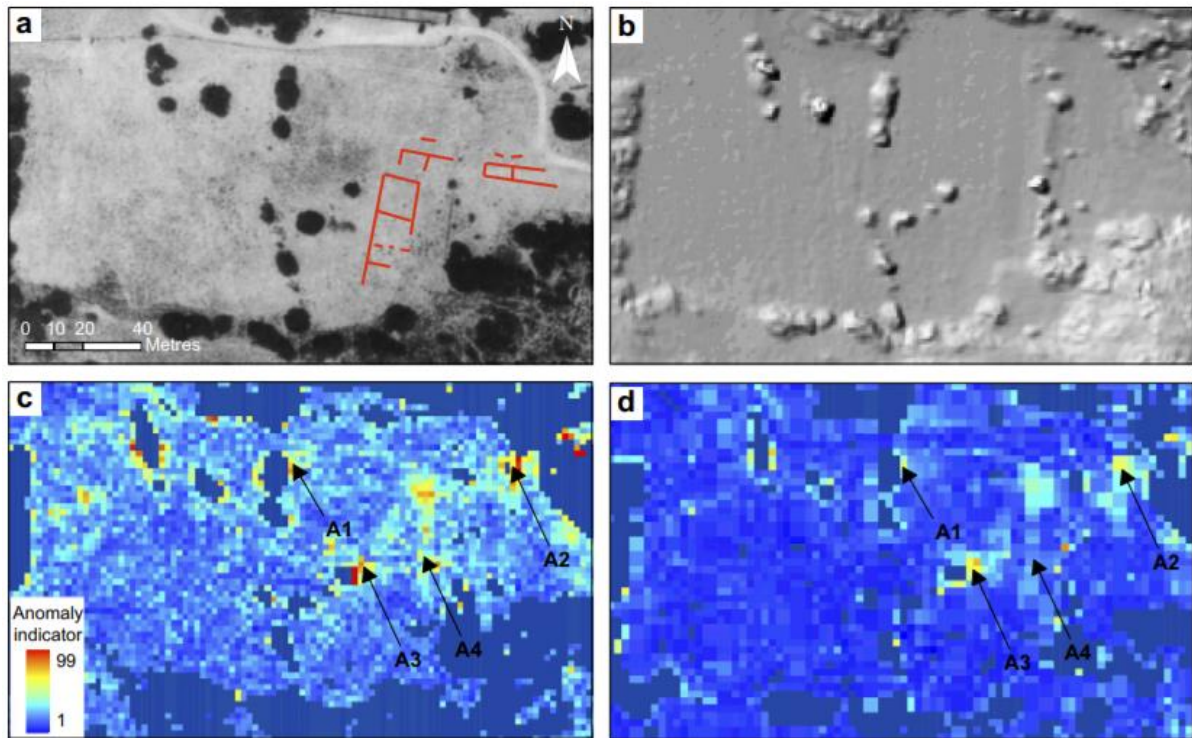
1.4.3.5 Reed-Xiaoli Detector (RXD)

Ο αλγόριθμος RXD χρησιμοποιείται για την ανίχνευση φασματικών ή χρωματικών διαφορών μεταξύ μιας περιοχής που εξετάζεται και των γειτονικών της εικονοστοιχείων ή με ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων. Ο αλγόριθμος εξάγει από μια εικόνα στόχους οι οποίοι είναι φασματικά διαφορετικοί από την υπόλοιπη εικόνα. Για την αποτελεσματική εφαρμογή του αλγόριθμου, χρειάζεται οι στόχοι αυτοί να είναι αρκετά μικροί σε σχέση με το υπόβαθρο της εικόνας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του RXD είναι ξεκάθαρα και έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικά στην ανίχνευση διακριτών φασματικών χαρακτηριστικών. Η τυπικός αλγόριθμος RXD έχει ως εξής:

$$\delta_{RXD}(r) = (r - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu)$$

Όπου r αποτελεί το διάνυσμα του δείγματος, μ ο μέσος όρος του δείγματος, και $K_{L \times L}$ ο πίνακας συνδιακύμανσης του δείγματος.

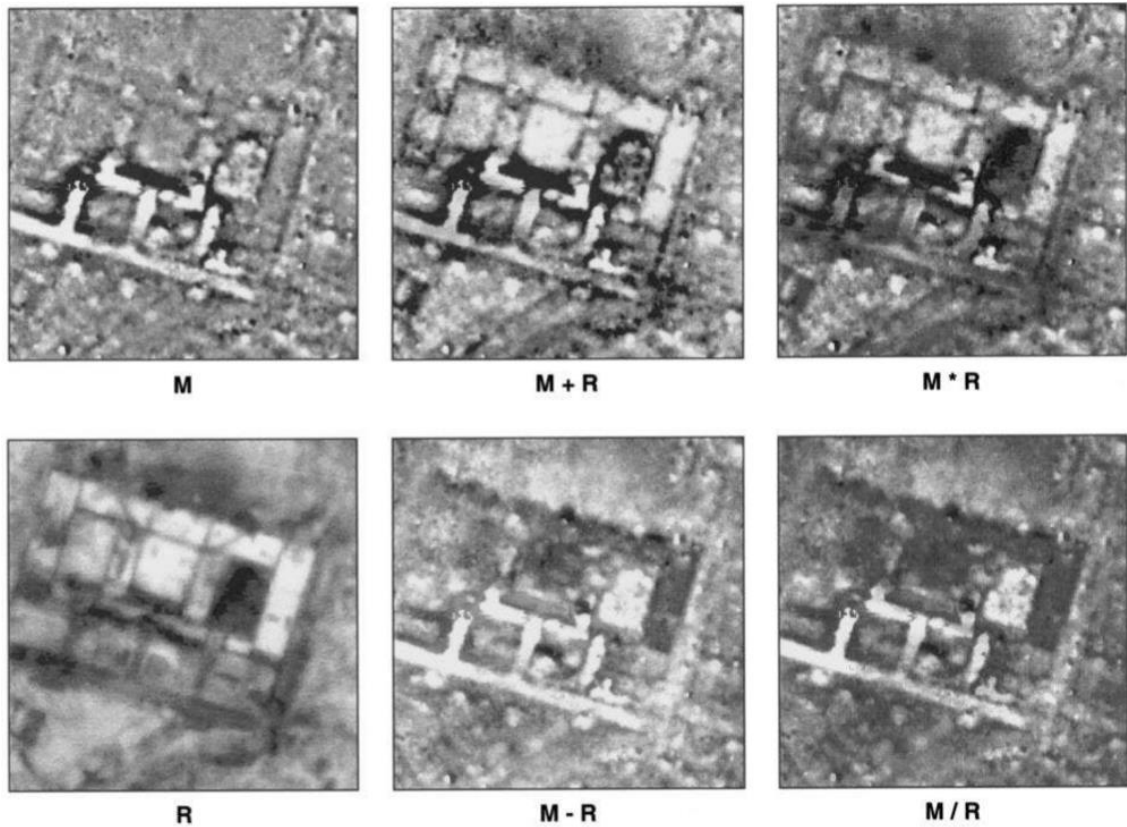
Εφαρμόζεται συνήθως σε πολυφασματικές και υπερφασματικές εικόνες. (Εικόνα 13) Λανθασμένα εικονοστοιχεία και γραμμές εμφανίζονται ως ανωμαλίες χωρίς να επηρεάζουν όμως τον εντοπισμό άλλων έγκυρων ανωμαλιών. Όπως με κάθε άλλο αλγόριθμο, αφαιρώντας από τους υπολογισμούς τα προβληματικά κανάλια, αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά όμως ο αλγόριθμος δεν μπορεί να διαφοροποιήσει τις ανωμαλίες που εντοπίζει μεταξύ τους.



Εικόνα 13: (a) Αεροφωτογραφία με επικαλυπτόμενη την τοποθεσία θαμμένων αρχαιολογικών καταλοίπων που εντοπίστηκαν με γεωφυσικές διασκοπήσεις, (b) σκιασμένη εικόνα που προέρχεται από δεδομένα Lidar, (c) αποτέλεσμα εφαρμογής του αλγόριθμου Reed-Xiaoli σε εικόνα CASI και (d) αποτέλεσμα εφαρμογής του αλγόριθμου Reed-Xiaoli σε εικόνα ATM. Τα χαρακτηριστικά A1- A4 αποτελούν ανωμαλίες που παρουσιάστηκαν μετά από την εφαρμογή του αλγόριθμου. (Rowlands and Sarris, 2007).

1.4.4 Απλές μαθηματικές πράξεις όπως άθροισμα, πηλίκο κτλ.

Οι απλοί μαθηματικοί μετασχηματισμοί προσφέρουν μια πλούσια σειρά από μεθόδους για την συγχώνευση οποιουδήποτε αριθμού συνόλων δεδομένων. Οι διακριτές μέθοδοι που βασίζονται σε δυαδικά δεδομένα, ως πλεονέκτημα τους, προσφέρουν πιο σαφείς χάρτες που παρουσιάζουν την ύπαρξη ή την απουσία ανωμαλιών. Από την άλλη, η συγχώνευση συνεχή δεδομένων επιτρέπει στις ανωμαλίες με ευκολία και με δυσκολία στον εντοπισμό να ερμηνεύονται ταυτόχρονα. Έτσι καταλήγει στην δημιουργία σύνθετων εικόνων με μεγαλύτερο περιεχόμενο πληροφοριών.



Εικόνα 14: Μεγάλο κτίριο ιδιαίτερης σημασίας στον αρχαιολογικό χώρο της Ρωμαϊκής πόλης Carnuntum του ανατολικού τμήματος της Αυστρίας. Η περιοχή διερευνήθηκε με γεωφυσικές μαγνητικές έρευνες και μετρήσεις αντίστασης το 1996 (Neubauer and Eder-Hinterleitner 1997). (M) Μαγνητόγραμμα, (R) Χαρτογράφηση αντίστασης, (M+R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από πρόσθεση, (M-R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από αφαίρεση, (M*R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από πολλαπλασιασμό, (M/R) Σύνθετη εικόνα κανονικοποιημένων δεδομένων μετά από διαίρεση.

1.4.4.1 Άθροισμα δεδομένων (Data Sum)

Παρόμοιο με τις ενώσεις Boolean, το άθροισμα κανονικοποιημένων δεδομένων απεικονίζει ανωμαλίες από όλες τις πηγές ταυτόχρονα, συμπεριλαμβανομένων αυτών με μεγάλο και μικρό μέγεθος. Μπορούν να προσφέρουν ένα καλύτερο αποτέλεσμα διακρίνοντας και άλλες ανωμαλίες με δυσκολίες στην ανάλυση και την περιγράφει τους οι οποίες προσφέρουν επιπλέον πληροφορίες (Εικόνα 14 M+R). Παραλλαγές της μεθόδου αυτής είναι εφικτές αλλάζοντας το βάρος των δεδομένων του κάθε αισθητήρα κατά τη διαδικασία του αθροίσματος.

1.4.4.2 Αναλογίες μεταξύ δεδομένων (Data Ratios)

Η αναλογία μεταξύ δύο σετ δεδομένων μπορεί παρέχει επιπρόσθετες πληροφορίες στο αποτέλεσμα καθώς επιτρέπει σε κάποιον να φέρει σε αντίθεση ή να τονίσει τις ομοιότητες και τις διαφορές που έχουν μεταξύ τους (Εικόνα 14 M/R). Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι ικανή να ενσωματώσει πληροφορίες μόνο από δύο σετ δεδομένων, περιορίζοντας έτσι τη χρησιμότητα της.

1.4.5 Πολυπαραγοντικές μεθόδους όπως η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών και αναλύσεις συσχετίσεων

Οι πολυπαραγοντικοί στατιστικοί μέθοδοι προσφέρουν ένα ισχυρό μέσο για την συγχώνευση δεδομένων από διάφορες πηγές και παρέχουν πληροφορίες για τη δομή και τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαστάσεων τους. Υπάρχουν πολλοί τέτοιοι μέθοδοι και χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στις μεθόδους που μειώνουν τον αριθμό των διαστάσεων και στις μεθόδους ταξινόμησης. Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν βασικά στοιχεία και παραγοντικές αναλύσεις που παράγουν γραμμικούς συνδυασμούς των δεδομένων πηγής. Τα σημαντικά στοιχεία που έχουν ως αποτέλεσμα είναι λιγότερα σε αριθμό από τις αρχικές μεταβλητές και αντιπροσωπεύουν συγχωνεύσεις δεδομένων βασισμένες σε στατιστικές συσχετίσεις. Από την άλλη οι μέθοδοι ταξινόμησης προσπαθούν να ορίσουν ομάδες ή κλάσεις για συστήματα δεδομένων μέσω δύο διαφορετικών μεθόδων, της μη επιβλεπόμενης και της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Στην μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση ο αλγόριθμος εντοπίζει κλάσεις οι οποίες προκύπτουν φυσικά μέσα σε δεδομένα πολλαπλών μεταβλητών. Αντίθετα, στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση αναπτύσσονται λειτουργίες από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων που παρέχει ο ίδιος ο χρήστης.

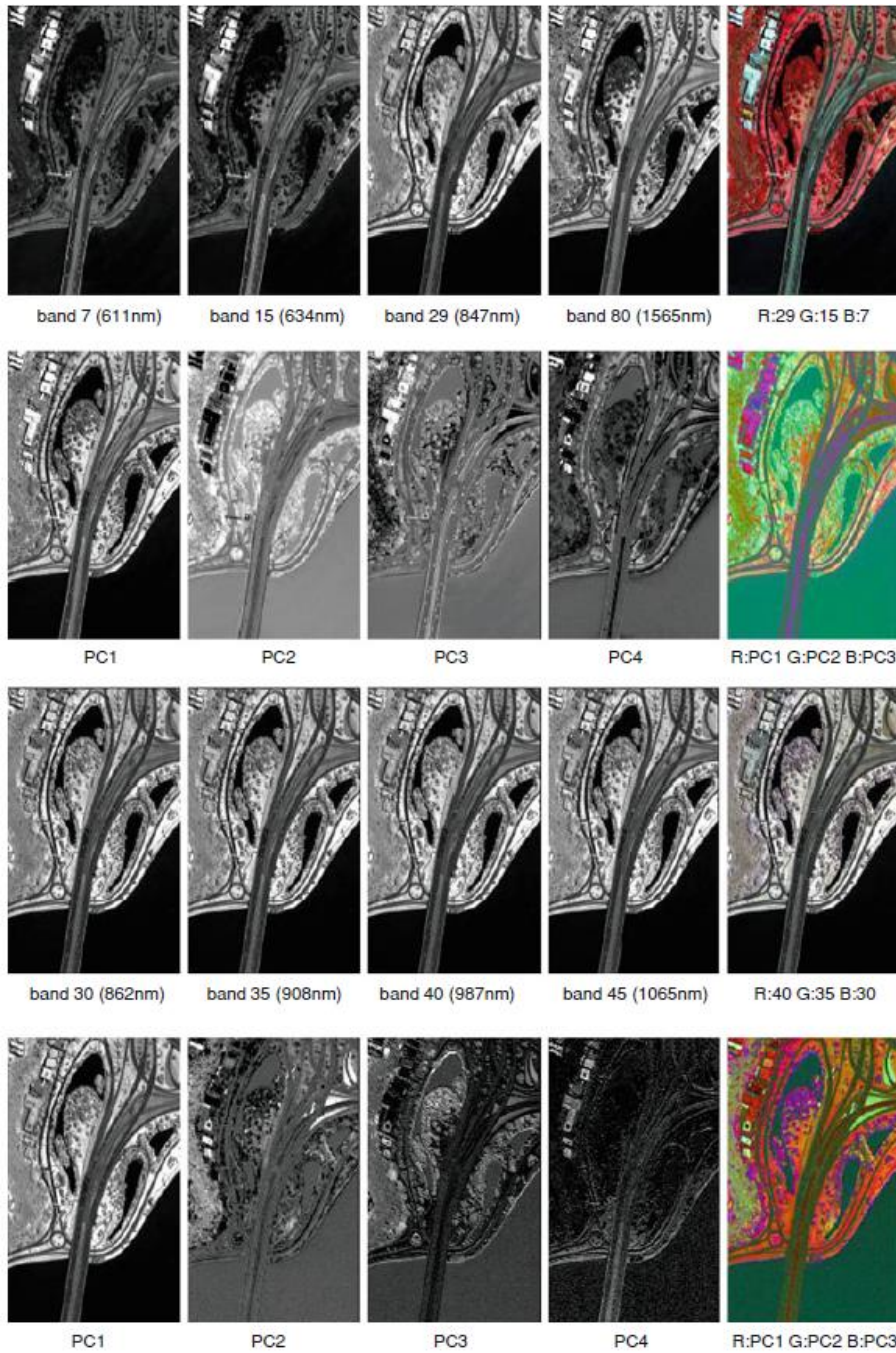
1.4.5.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA)

Η Ανάλυση των Κύριων Συνιστωσών αποτελεί ένας γραμμικός συνδυασμός πολυμεταβλητών δεδομένων βάση της δομής συσχέτισης μεταξύ k μεταβλητών. Οι k συνιστώσες που προκύπτουν είναι ασυσχέτιστες και διατάσσονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η πρώτη να αντιπροσωπεύει περισσότερο τη συνολική διακύμανση των δεδομένων από τη δεύτερη, η δεύτερη περισσότερο από την τρίτη και ούτω καθεξής. Όταν κανονικοποιηθούν κάθε μεταβλητή συνεισφέρει μια διακύμανση της ενότητας, και οι

πρώτες συνιστώσες αντιπροσωπεύουν συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του περιεχομένου πληροφοριών που υπάρχει στα περισσότερα σύνολα δεδομένων.

Ο μετασχηματισμός των πολυφασματικών εικόνων στις κύριες συνιστώσες (Principal Components Transformation, PCT) ερμηνεύει τη δομή των πολυφασματικών δεδομένων με τον πίνακα συμμεταβλητότητας των αρχικών δεδομένων. Είναι θεμελιώδους σημασίας για την ανάπτυξη του μετασχηματισμού αυτού να ερωτηθεί αν υπάρχει ένα νέο σύστημα συντεταγμένων στο φασματικό χώρο, στο οποίο τα δεδομένα μπορούν να εκπροσωπούνται χωρίς συσχετισμό, με άλλα λόγια, έτσι ώστε ο πίνακας συνδιακύμανσης στις νέες συντεταγμένες να είναι διαγώνιος. Οι κύριες συνιστώσες είναι τα ιδιοανύσματα του πίνακα συμμεταβλητότητας. Αποτελεί μία στατιστική τεχνική η οποία εφαρμόζεται στη διαδικασία βελτίωσης των εικόνων, με σκοπό τη συμπίεσή τους. Σε αυτή την περίπτωση ο όρος συμπίεση χρησιμοποιείται με την έννοια ότι με την εφαρμογή της μεθόδου PCT τα δεδομένα από έναν πολυδιάστατο χώρο των εντάσεων, μετασχηματίζονται σε ένα χώρο λιγότερων διαστάσεων χωρίς να χάσουν τις ατομικές εσωτερικές τους σχέσεις, πράγμα που αποτρέπει κάποια απώλεια πληροφορίας. Το όφελος από τη συμπίεση αυτή είναι ότι μικραίνει το πρόβλημα της πολυπλοκότητας των πολλών διαστάσεων μεταβλητών. (Εικόνα 15)

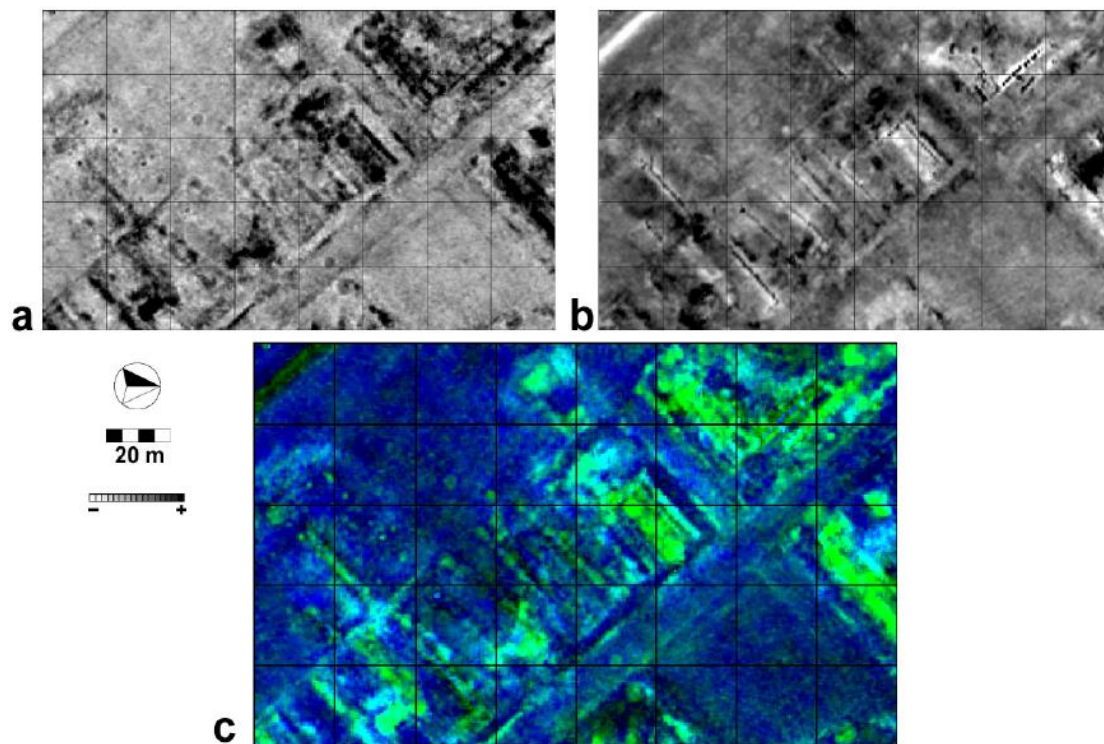
Χρησιμοποιώντας την Ανάλυση των Κύριων Συνιστωσών στην πράξη, ο χρήστης δεν εμπλέκεται σε μεγάλο βαθμό στην όλη διαδικασία. Υπάρχουν μόνο τρία αναγκαία βήματα. Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία του πίνακα συνδιακύμανσης της εικόνας που πρόκειται να μετασχηματιστεί. Το δεύτερο βήμα είναι ο προσδιορισμός των ιδιοτιμών και των ιδιοανυσμάτων του πίνακα συνδιακύμανσης. Οι ιδιοτιμές σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η κατανομή της διακύμανσης των δεδομένων σε σχέση με τις αντίστοιχες συνιστώσες. Το τελικό βήμα είναι η διαμόρφωση των συνιστωσών χρησιμοποιώντας τα ιδιοανύσματα του πίνακα συνδιακύμανσης ως τους σταθμισμένους συντελεστές.



Εικόνα 15: Δύο παραδείγματα Κύριων Συνιστωσών που προέρχονται από ίδιο σετ δεδομένων εικόνων. Πρώτη σειρά: τέσσερα κανάλια με χαμηλή συσχέτιση και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις τρεις πρώτες εικόνες. Δεύτερη σειρά: οι τέσσερις κύριες συνιστώσες που παράγονται από τα κανάλια της πρώτης σειράς και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις τρεις πρώτες συνιστώσες. Τρίτη σειρά: τέσσερα κανάλια με υψηλή συσχέτιση και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις πρώτες τρεις εικόνες. Τέταρτη σειρά: οι τέσσερις κύριες συνιστώσες που παράγονται από τις εικόνες της τρίτης σειράς και το έγχρωμο σύνθετο που σχηματίζεται από τις πρώτες τρεις συνιστώσες. (Richards, 2013)

1.4.5.2 Ανάλυση παραγόντων (Factor Analysis)

Οι κύριες συνιστώσες που αναφέρθηκαν προηγούμενος παρέχουν πολλές πληροφορίες. Παρόλα αυτά όμως η διακύμανση που αντιπροσωπεύουν μπορεί να κατανεμηθεί καλύτερα στις συνιστώσες μέσω της ανάλυσης των παραγόντων. Η μέθοδος εκτελεί μια ορθογώνια περιστροφή των σημαντικότερων συνιστωσών που βρίσκονται μέσα στο χώρο των μετρήσεων των διάφορων διαστάσεων για να κατανείμει ισόποσα τη διακύμανση που αντιπροσωπεύουν (Εικόνα 17). Έτσι τα βάρη με τις αρχικές μεταβλητές μεταβάλλονται καθώς οι μεταβλητές με υψηλά βάρη κατανέμονται πιο δίκαια μεταξύ των παραγόντων. Το αποτέλεσμα είναι οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύονται σε κάθε παράγοντα να μπορούν να αλλάξουν καταλήγοντας σε μια βελτίωση της ερμηνείας.



Εικόνα 16: Ανάλυση Παραγόντων των δεδομένων της Army City. a) Παράγοντας 1. b) Παράγοντας 2. c) Έγχρωμο σύνθετο των δύο παραγόντων με τον Παράγοντα 1 να αποδίδεται στο μπλε και τον Παράγοντα 2 στο πράσινο. (Limp, F. et al., 2006)

1.4.6 Ευφυείς αλγόριθμοι που βασίζονται στη γνώση από προηγμένες μηχανές μάθησης και έμπειρα συστήματα

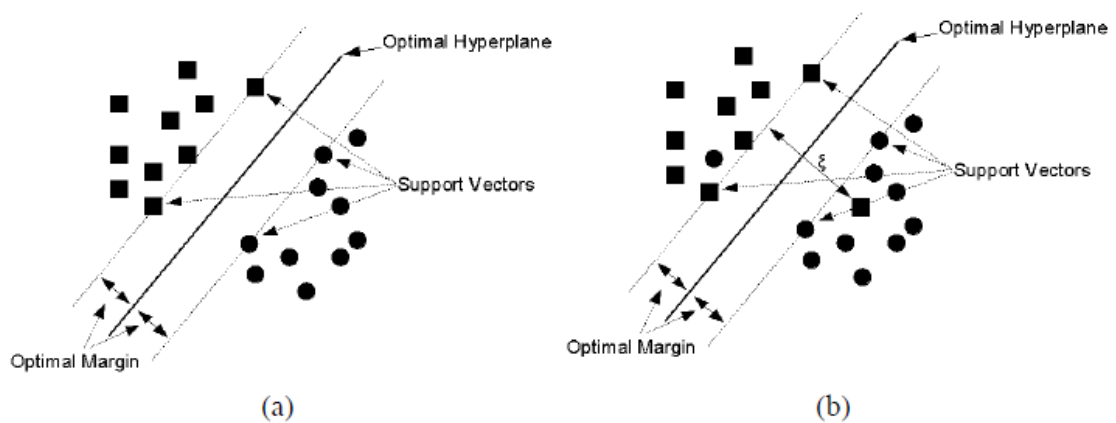
Τα έμπειρα συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά στην τηλεπισκόπηση όπως και σε άλλες περιοχές εφαρμογών. Βασίζονται σε γνώσεις και κανόνες που προκύπτουν από τους ειδικούς. Η γνώση αυτή μετατρέπεται σε ένα σύστημα που η λογική του βασίζεται σε κανόνες και που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν υπολογιστή. Στην περίπτωση μιας αρχαιολογικής έρευνας, ένα γενικό έμπειρο σύστημα ικανό να διακρίνει αρχαιολογικά στοιχεία σε ένα σύνολο πολυδιάστατων γεωφυσικών δεδομένων απαιτεί γνώση από πολλούς τομείς που αφορούν και επηρεάζουν τα δεδομένα αυτά, όπως για παράδειγμα η γεωλογία και οι μεταβολές του κλίματος της περιοχής στην οποία συλλέγηκαν. Ακολούθως οι πληροφορίες από κάθε τομέα πρέπει να μετατραπούν σε γνώση χρήσιμη για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το τι μπορεί να βρίσκεται κάτω από το έδαφος.

Η λειτουργία των έμπειρων συστημάτων είναι διαφορετική από αυτή των συμβατικών αλγορίθμων των υπολογιστών που είναι εξαρχής ενσωματωμένοι με γνώση από τους ειδικούς. Σε αυτά τα συστήματα η γνώση αποθηκεύεται σε μια βάση δεδομένων (π.χ., ως κανόνες παραγωγής) όπου μπορεί στην συνέχεια να ανακτηθεί για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Αποτελούν ευρετικά (heuristic) συστήματα αυξάνοντας έτσι το επίπεδο της ευφυΐας των μηχανών. Στα παραδοσιακά εμπειρικά συστήματα οι ειδικοί καθορίζουν τους κανόνες ρητά. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ημιαυτόματες τεχνικές για την εξαγωγή των κανόνων από τους ειδικούς ενώ σε περιπτώσεις όπως τα δέντρα απόφασης (Decision Trees) γίνεται αυτόματα.

1.4.6.1 Support Vector Machines (SVMs)

Τα SVMs αποτελούν μια επιβλεπόμενη στατιστική τεχνική μάθησης χωρίς παραμέτρους. Επομένως, εφαρμόζοντας την τεχνική δεν γίνεται καμιά παραδοχή σχετικά με την υποκείμενη κατανομή των δεδομένων. Η τεχνική προσεγγίζεται με ιδιαίτερη προσοχή ως μια μέθοδος ταξινόμησης. Σύμφωνα λοιπόν με τη μέθοδο αυτή, γίνεται μια προσπάθεια να εντοπιστεί το βέλτιστο διαχωριστικό όριο μεταξύ των κλάσεων έχοντας υπόψη κάποιες συγκεκριμένες περιοχές εκπαίδευσης. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται “support vectors” ενώ αντίθετα οποιεσδήποτε άλλες περιοχές εκτός από αυτές απορρίπτονται από τους υπολογισμούς εντοπισμού του ορίου. Ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα μοντέλο που

αναθέτει κάθε νέα περιοχή σε μια από τις πιθανές κλάσεις. Με αυτό τον τρόπο επιλέγεται το βέλτιστο διαχωριστικό όριο χρησιμοποιώντας αποτελεσματικότερα λιγότερα δείγματα εκπαίδευσης, επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στην ταξινόμηση με μικρά σύνολα εκπαίδευσης. Εκτός από γραμμικές ταξινομήσεις τα SVMs μπορούν να εκτελέσουν αποτελεσματικά και μη γραμμικές ταξινομήσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου τα δεδομένα δεν διαχωρίζονται γραμμικά, μπορεί να διατυπωθεί μια συνάρτηση η οποία να συνδυάζει τη μεγιστοποίηση του περιθωρίου του ορίου και την ελαχιστοποίηση του σφάλματος της ταξινόμησης χρησιμοποιώντας ένα σετ μεταβλητών που ονομάζονται “slack variables”. Παράδειγμα τέτοιας συνάρτησης που ως αποτέλεσμα εφαρμογής της είναι η χαρτογράφηση των δεδομένων εισόδου σε ένα μεγαλύτερων διαστάσεων χώρο είναι η συνάρτηση Kernel.



Εικόνα 17: (α) Περίπτωση όπου οι κλάσεις διαχωρίζονται γραμμικά (β) Περίπτωση όπου οι κλάσεις διαχωρίζονται μη γραμμικά. Το ξ μετρά το σφάλμα προσαρμογής του ορίου. (Τζώτσος, Κ. Α., 2014)

1.5 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου

Η σύνθεση και η ερμηνεία των συνολικών αποτελεσμάτων από τους διάφορους τηλεπισκοπικούς αισθητήρες βοηθά τους ερευνητές να εντοπίζουν “hot spots” τα οποία μπορούν να είναι πιθανοί αρχαιολογικοί στόχοι. Στον πίνακα 1 συνοψίζονται ορισμένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα και περιορισμούς των τριών μεθόδων τηλεπισκόπησης με τις οποίες θα ασχοληθούμε σε αυτή τη μελέτη και που χρησιμοποιήθηκαν για αρχαιολογικές έρευνες στην περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε: (α) δορυφορικά σύνολα δεδομένων, (β) Γεωραντάρ (GPR) και (γ) Επίγεια ραδιομετρία. Ο

πίνακας παρουσιάζει τις βασικές ιδιότητες των μεθόδων αυτών που αφορούν τη χωρική τους ανάλυση, το φασματικό τους εύρος τη χωρική έκταση που μπορούν να καλύψουν, τη δυνατότητα τους εξαγωγής τρισδιάστατων πληροφοριών του υπεδάφους, το αν μπορούν να διεισδύσουν στο έδαφος και αν αποτελέσουν αρχειοθετημένα δεδομένα. Μελετώντας τις ιδιότητες αυτές καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι καμία από αυτές τις τεχνολογίες δεν μπορεί να θεωρηθεί "ιδανική" για τη διεξαγωγή μιας αρχαιολογικής έρευνας. Για παράδειγμα, οι πολυφασματικές εικόνες υψηλής ανάλυσης μπορούν να δουν πέρα από το ορατό τμήμα του φάσματος. Αυτό έχει ως συνέπεια να μπορούν να ανιχνεύουν ανωμαλίες της βλάστησης. Ταυτόχρονα όμως η χωρική τους ανάλυση μπορεί να είναι προβληματική για την ταυτοποίηση μικρής κλίμακας θαμμένων χαρακτηριστικών. Αντίθετα, η επίγεια ραδιομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή "ακριβών" φασματικών υπογραφών (ground truth data) για μικρούς στόχους με περιορισμένη χωρική έκταση. Από τις τρεις αυτές μεθόδους η μέθοδος του γεωραντάρ είναι η μόνη που μπορεί να διαπεράσει τα ανώτερα στρώματα της επιφάνειας του εδάφους και να παράγει μια τρισδιάστατη αναπαράσταση των υπόγειων στόχων με αυξημένη χωρική ανάλυση.

Πίνακας 1: Γενικά χαρακτηριστικά Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Γεωραντάρ (GPR) και Επίγεια ραδιομετρίας για αρχαιολογικές έρευνες.

Χαρακτηρίστηκα	Δορυφορική Τηλεπισκόπηση	Γεωραντάρ (GPR)	Επίγεια ραδιομετρία
Χωρική Ανάλυση	Medium – High	High – Very High (adjustable)	High – Very High (adjustable)
Φασματικό εύρος	Vis- NIR (Multispectral)	Microwave	Vis- NIR (Hyperspectral)
Χωρική έκταση	Μερικά km ²	Μερικά εκτάρια	Μερικά m ²
3D απεικόνιση	OXI	NAI	OXI
Διείσδυση στο έδαφος	OXI	NAI	OXI
Αρχειοθετημένα δεδομένα	NAI	OXI	OXI
Είδος δεδομένων	Raster	Point	Raster

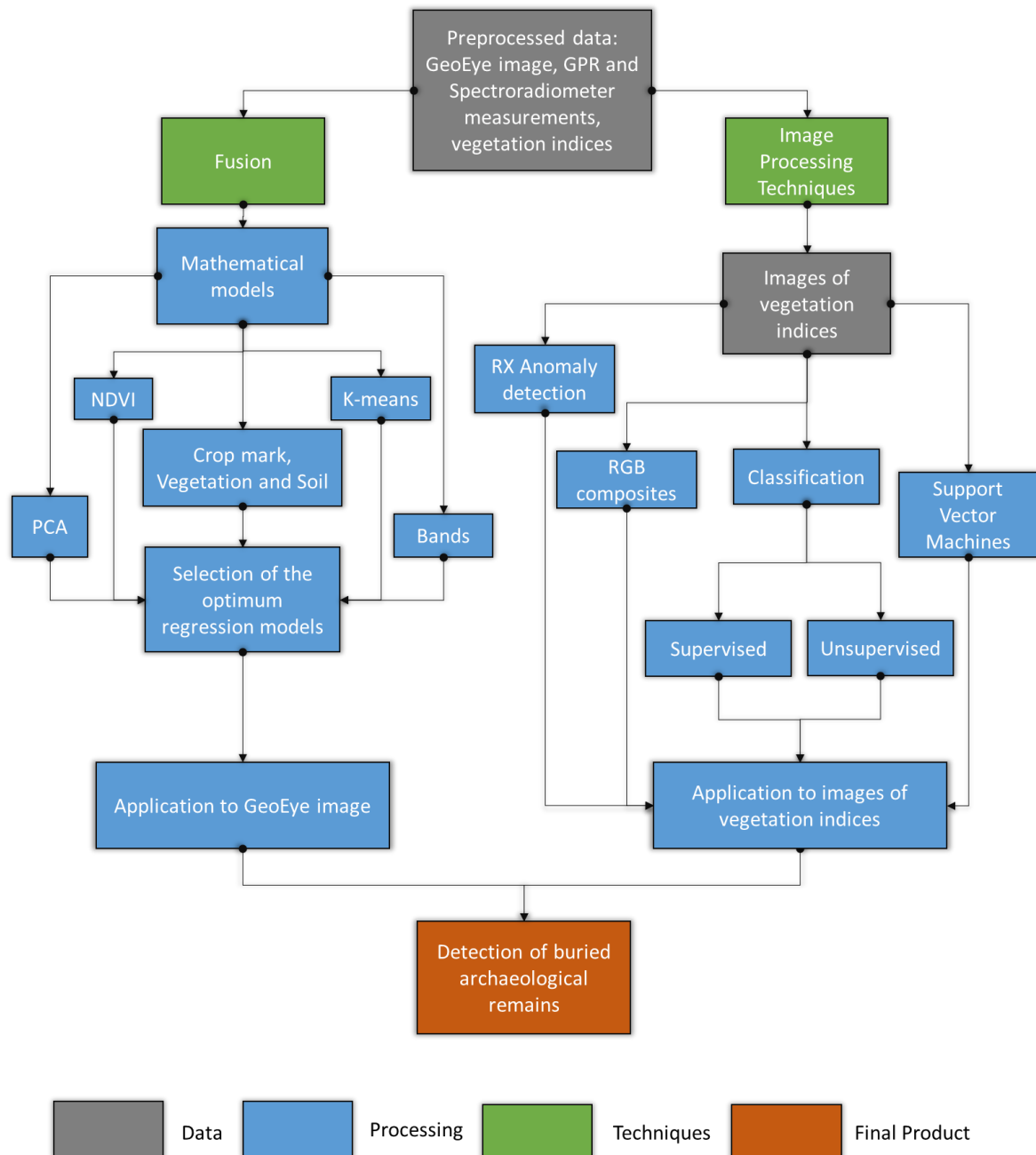
Τα ερευνητικά ερωτήματα που θέτονται, λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου, είναι το αν μπορεί να υπάρξει μια μορφή συγχώνευσης μεταξύ των τριών αυτών διαφορετικών σετ τηλεπισκοπικών δεδομένων που να δημιουργεί μια συσχέτιση μεταξύ τους η οποία βοηθά στην καλύτερη ανίχνευση υπεδάφίων αρχαιολογικών καταλοίπων. Δηλαδή, θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε ταυτόχρονα τα διαφορετικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η κάθε μια από αυτές τις μεθόδους, και επίσης, θα μπορούσαμε με κάποια βεβαιότητα να εκτιμήσουμε τι υπάρχει κάτω από το έδαφος σε μια περιοχή χωρίς τη διεξαγωγή γεωφυσικών διασκοπήσεων σε αυτή, αλλά μόνο μέσω της κάλυψης της με μια πολυφασματική δορυφορική εικόνα. Μια πρώτη προσπάθεια έχει γίνει σε μια πρόσφατη μελέτη (Agariou et al., 2017) εφαρμόζοντας 15 διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης σε 71 διαφορετικούς δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν από μετρήσεις φασματοραδιόμετρου και σε μετρήσεις GPR που συλλέχτηκαν από τον αρχαιολογικό χώρο “Vésztó-Mágor Tell” στην Ουγγαρία. Η παρούσα μελέτη αποτελεί μια προσπάθεια προέκτασης της μελέτης αυτής με στόχο να διερευνηθούν περαιτέρω οι τεχνικές συγχώνευσης των δεδομένων.

2 Μεθοδολογία Έρευνας

Η προσπάθεια για τον εντοπισμό μιας συσχέτισης μεταξύ των τριών αυτών διαφορετικών σετ δεδομένων με σκοπό την ενίσχυση των εικόνων και τον καλύτερο εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων βασίστηκε στην εξερεύνηση των εξής τριών διαφορετικών σετ δεδομένων: (α) μια υψηλής ανάλυσης δορυφορική εικόνα GeoEye με ανάλυση 50cm, (β) επίγειες υπερφασματικές υπογραφές οι οποίες συλλέχτηκαν από ένα φασματοραδιόμετρο GER-1500 (Spectral Vista Corporation, New York, NY, USA) με φασματικό εύρος 350-1050 nm (Visible-Near Infrared φάσμα) και (γ) μετρήσεις GPR με αντένα συχνότητας 250 MHz. Οι μετρήσεις του GER-1500 και του GPR συλλέχτηκαν κατά μήκος παράλληλων τμημάτων με 0,5 m απόσταση μεταξύ τους και με δειγματοληψία κάθε 5 cm κατά μήκος των γραμμών αυτών. Οι μετρήσεις τους χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μιας συγχώνευσης με μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης ενώ δεκαοκτώ διαφορετικοί δείκτες βλάστησης οι οποίοι υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις του GER-1500 χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία εικόνων και την εφαρμογή σε αυτές διάφορων τεχνικών ανάλυσης.

Όλα τα σετ δεδομένων είχαν ήδη υποστεί τα απαραίτητα αρχικά βήματα προεπεξεργασία: στην εικόνα GeoEye εφαρμόστηκε γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση και κατά την

διάρκεια συλλογής των φασματικών υπογραφών η προσπίπτουσα ακτινοβολία του ήλιου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα βαθμονομημένο spectralon panel. Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά IBM SPSS Statistics 20, ENVI 5.0 και ArcMap 10.2. Τα βήματα της συνολικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε περιγράφονται στο Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Συνολική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσπάθεια ενίσχυσης μιας δορυφορικής εικόνας και τον εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων μέσω της εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης σε μετρήσεις ενός GPR και ενός φασματοραδιόμετρου καθώς και διάφορων τεχνικών ανάλυσης σε εικόνες που αναπαριστούν δείκτες βλάστησης.

Το πρώτο βήμα (Βήμα 1) της μελέτης έχει να κάνει σχέση με την προσπάθεια που έγινε να συσχετιστούν 6 δείκτες βλάστησης (Green NDVI, NDVI, NDVI2, SARVI, RDVI και REP), οι τιμές των 4 καναλιών (Band 1, Band 2, Band 3 και Band 4) και των 3 συντελεστών (Crop mark, Vegetation και Soil) της εικόνας GeoEye με το σύνολο των μετρήσεων του GPR στα υψηλότερα επίπεδα του εδάφους (βάθος 0-0.6m), μέσα από μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης. Εξετάστηκαν μέσα από συνολικά 11 διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης με τη βοήθεια του λογισμικού SPSS Statistics 20 (Linear, Logarithmic, Inverse, Quadratic, Cubic, Power, Compound, S (S-curve), Logistic, Growth και Exponential). Στο επόμενο στάδιο της μελέτης (Βήμα 2) εξετάστηκαν υποσύνολα των μετρήσεων του GPR. Οι συνολικά 769 μετρήσεις χωρίστηκαν σε ομάδες βάση των αντίστοιχων τιμών τους του NDVI, του Band 4, των συντελεστών Crop mark, Vegetation και Soil και των 6 Κύριων συνιστωσών των δύο PCA που έγιναν για τις μετρήσεις του GPR στα υψηλότερα επίπεδα του εδάφους (βάθος 0-0.6m) και για τους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Επίσης χωρίστηκαν σε ομάδες εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο ομαδοποίησης K-means. Βάση της ανάλυσης αυτής εντοπίστηκαν τα βέλτιστα μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης (Βήμα 3). Ακολούθως (Βήμα 4) για την εφαρμογή των τεχνικών ανάλυσης εικόνων, δημιουργήθηκαν εικόνες για 18 διαφορετικούς δείκτες βλάστησης και για τις μετρήσεις του GPR που αντιστοιχούν σε βάθος 0-0.60m. Εισάγοντας τις μετρήσεις μέσα στο λογισμικό ArcMap 10.2, σε μορφή σημείων με τις ίδιες συντεταγμένες με τα σημεία στα οποία έγινε η μέτρηση τους στο πεδίο, δημιουργήθηκαν οι εικόνες εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο IDW (output cell size: 1, power: 2) και κάνοντας εξαγωγή το αποτέλεσμα που παραγόταν σε εικόνα τύπου tiff. Στην συνέχεια με την εντολή Composite bands οι εικόνες ενώθηκαν σε μια «γενική» εικόνα με 18 διαφορετικά κανάλια. Η ίδια διαδικασία έγινε και για τις μετρήσεις του GPR που αντιστοιχούν στα υψηλότερα επίπεδα του εδάφους (βάθος 0-0.6m). Το επόμενο βήμα (Βήμα 5) ήταν η επεξεργασία και η εφαρμογή τεχνικών ανάλυσης στην «γενική» αυτή εικόνα. Μέσο του λογισμικού ENVI 5.0 δημιουργήθηκαν 60 διαφορετικοί συνδυασμοί έγχρωμων σύνθετων (RGB) και εφαρμόστηκε με διάφορους αριθμούς κλάσεων μη επιβλεπόμενη και επιβλεπόμενη ταξινόμηση, με 3 διαφορετικούς αλγόριθμους ταξινόμησης (Minimum Distance, Maximum Likelihood, Spectral Angle Mapper). Επιπλέον εφαρμόστηκαν στην εικόνα οι αλγόριθμοι RXD και UTD και εκτελέστηκαν επιβλεπόμενες ταξινομήσεις με τη χρήση των Support Vector machines εφαρμόζοντας 4 διαφορετικούς τύπους μαθηματικών

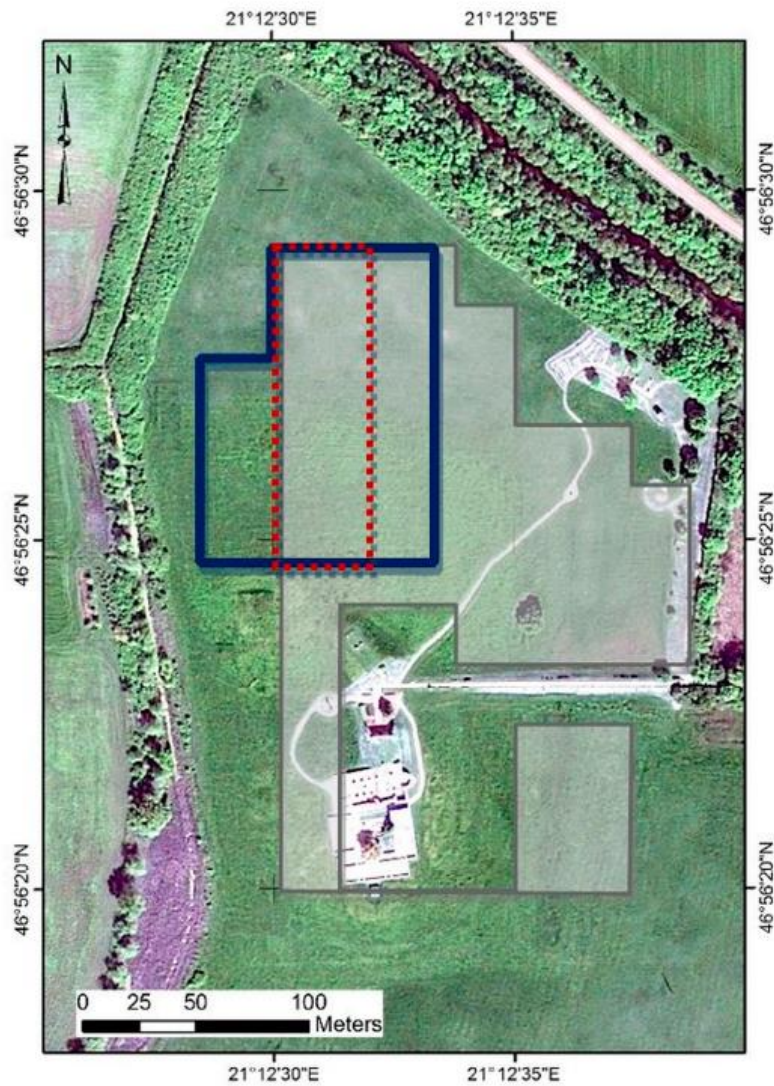
μοντέλων Kernel (Linear, Polynomial, Radial Basis Function και Sigmoid). Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των δεδομένων σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και εξήχθησαν κάποια συμπεράσματα (Βήμα 6). Τέλος (Βήμα 7) μερικά από τα καλύτερα μοντέλα παλινδρόμησης που εντοπίστηκαν κατά τα πρώτα τρία στάδια της μελέτης εφαρμόστηκαν στην δορυφορική εικόνα GeoEye που καλύπτει την περιοχή μελέτης.

3 Περιοχή μελέτης: Vészto-Mágor Tell

Το Vészto-Mágor Tell βρίσκεται στη νοτιοανατολική Μεγάλη Πεδιάδα της Ουγγαρίας με γεωγραφικό πλάτος 46°56'24.36" και γεωγραφικό μήκος 21°12'32.67" (WGS84). Καλύπτει μια έκταση 4.25 εκταρίων και φτάνει σε υψόμετρο 9 μέτρων πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. (Εικόνα 15) Στην κορυφή του υπάρχει ένα μοναστήρι το οποίο αποτελεί το επίκεντρο των αρχαιολογικών ανασκαφών που ξεκίνησαν το 1968. Οι ανασκαφές αποκάλυψαν πολιτιστικά στρώματα τα οποία χρονολογούνται από την Ύστερη Μέση Νεολιθική περίοδο και συνεχίζονται μέχρι την Ύστερη Νεολιθική περίοδο (περίπου 5000-4600 π.Χ.). Μετά την ύστερη νεολιθική περίοδο η περιοχή εγκαταλείφθηκε και στην συνέχεια ανακατασκευαστεί κατά την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού. Η κατοίκηση του οικισμού συνεχίστηκε μέχρι την Πρώιμη / Μέση Εποχή του Χαλκού με μια μικρή διακοπή κατά τη διάρκεια της Μέσης Εποχής του Χαλκού. Γύρο στον 11ο αιώνα μ.Χ. ιδρύθηκε μια εκκλησία και έπειτα ένα μοναστήρι. Η μονή λειτούργησε μέχρι τα τέλη του 14ου αιώνα ενώ οι δύο πύργοι της εκκλησίας παρέμειναν όρθιοι μέχρι το 1798. Στις αρχές του 19ου αιώνα, το μοναστήρι που κατασκευάστηκε στο νότιο τμήμα του καταστράφηκε ολοσχερώς από τις εργασίες που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής μιας οйнаποθήκης. Από τη δεκαετία του '80 η περιοχή αποτελεί ένα από τα εθνικά πάρκα της Ουγγαρίας.

Κατά τα προηγούμενα έτη η περιοχή έχει διερευνηθεί εντατικά ως μέρος του Περιφερειακού Αρχαιολογικού Προγράμματος Kögös με διάφορες μη επεμβατικές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν εντατικές επιφανειακές συλλογές σε πλέγμα καθώς και μαγνητομετρία, μετρήσεις με γεωραντάρ και υπερφασματικά φασματοραδιόμετρα, τομογραφία ηλεκτρικής αντίστασης και στοιχεία για τη χημεία του εδάφους της περιοχής. Βάση της ιδιομορφίας των κεραμικών που ανακαλύφθηκαν στην περιοχή, φαίνεται ότι πιθανόν να είχε κατοικηθεί για αρκετούς αιώνες κατά τη Νεολιθική περίοδο.

Στην εικόνα 19 παρατηρούμε με κόκκινο πολύγωνο την περιοχή στην οποία έγιναν μετρήσεις με φασματοραδιόμετρα ενώ οι περιοχές όπου εκτελέστηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις με γεωραντάρ και μαγνητικές μεθόδους φαίνονται με μπλε και γκρίζο χρώμα.



Εικόνα 19: Περιοχή μελέτης: Vészto-Mágor Tell. Τα γκρίζα και το μπλε πολύγωνο υποδεικνύουν τις περιοχές όπως διεξάχθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις ενώ το κόκκινο την περιοχή όπου έγινε συλλογή φασματοραδιομετρικών μετρήσεων. Η όλη περιοχή καλύπτεται από μια εικόνα GeoEye.

4 Αποτελέσματα

4.1 Αποτελέσματα μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης

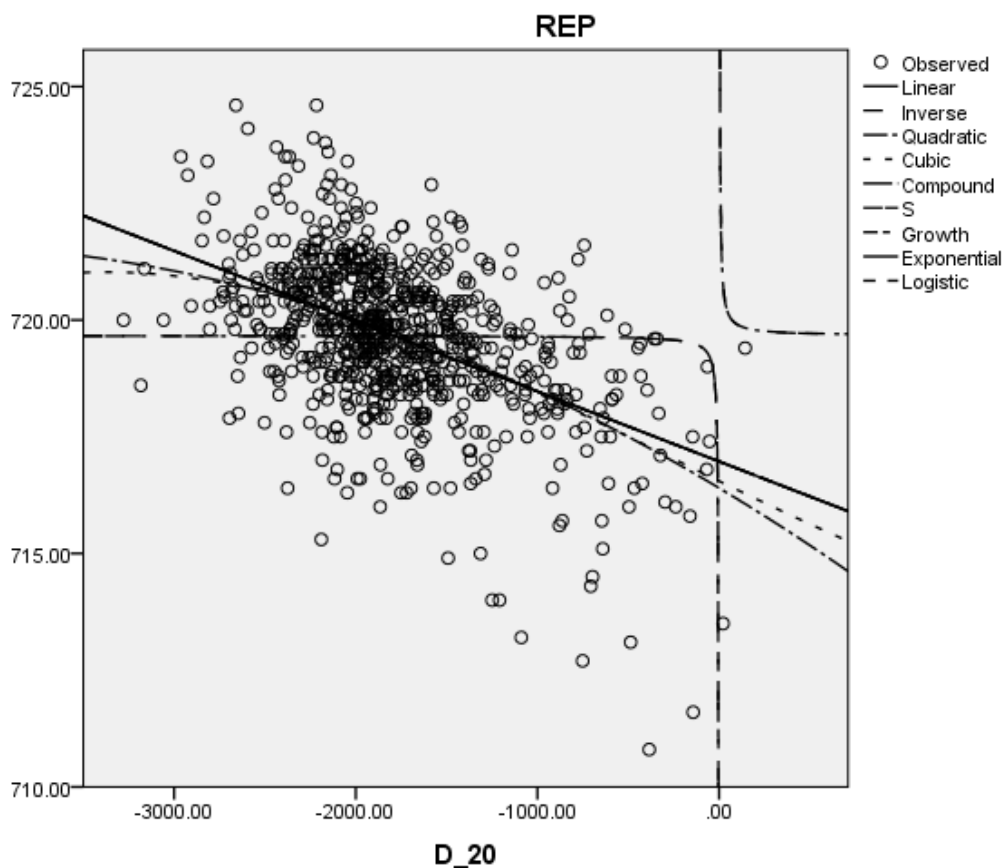
Κατά την προσπάθεια εντοπισμού του βέλτιστου μαθηματικού μοντέλου παλινδρόμησης μεταξύ των μετρήσεων του φασματοραδιόμετρου και του GPR έλαβαν μέρος στους υπολογισμούς μόνο οι μετρήσεις του GPR οι οποίες αντιστοιχούν στα πρώτα τρία ανώτερα στρώματα του εδάφους με βάθος 0-0.20m, 0.20-0.40m και 0.40-0.60m. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα 11 μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να συσχετιστούν οι μετρήσεις του GPR, οι διάφοροι δείκτες βλάστησης, οι τιμές των 4 καναλιών και των 3 συντελεστών Crop mark, Vegetation και Soil της εικόνας GeoEye.

Πίνακας 2: Γενικές μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου παλινδρόμησης μεταξύ των μετρήσεων του φασματοραδιόμετρου (X) και των μετρήσεων του GPR στα διάφορα βάθη (Y).

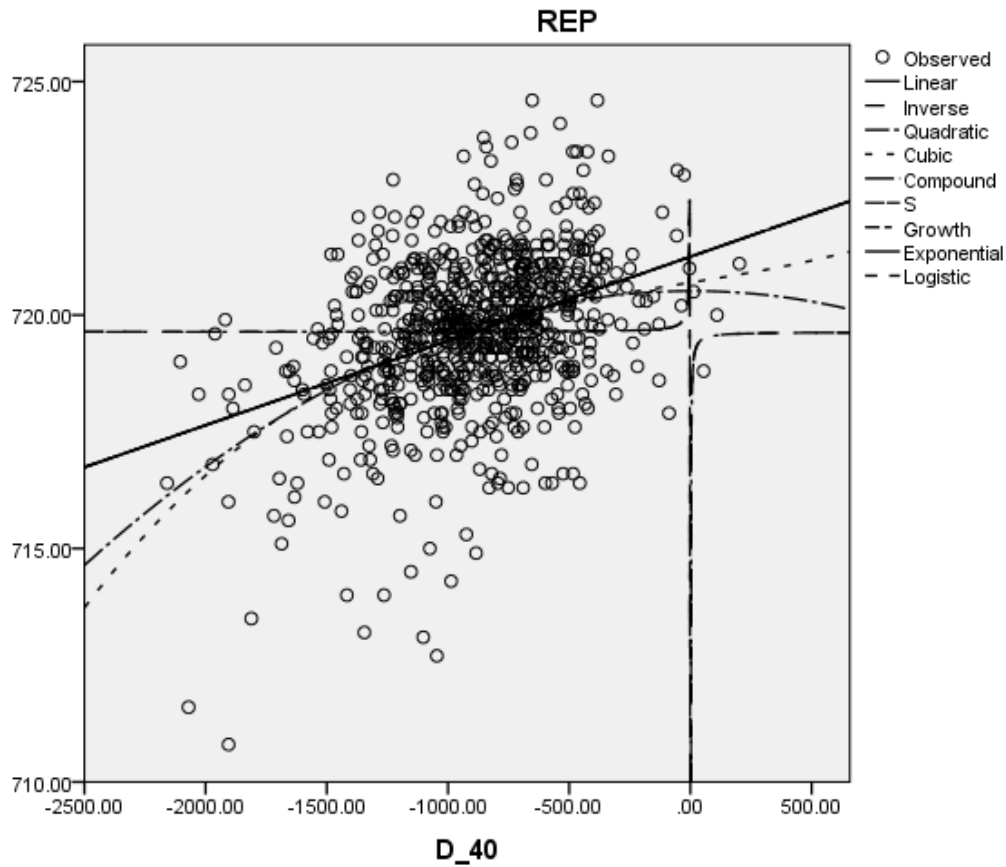
A/A	Γενικές εξισώσεις	Όνομα
1.	$Y = b_0 + (b_1 * X)$	Linear
2.	$Y = b_0 + (b_1 * \ln(X))$	Logarithmic
3.	$Y = b_0 + (b_1 / X)$	Inverse
4.	$Y = b_0 + (b_1 * X) + (b_2 * X^2)$	Quadratic
5.	$Y = b_0 + (b_1 * X) + (b_2 * X^2) + (b_3 * X^3)$	Cubic
6.	$Y = b_0 * (X^{b_1})$ ή $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * \ln(X))$	Power
7.	$Y = b_0 * (b_1^X)$ ή $\ln(Y) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * X)$	Compound
8.	$Y = e^{(b_0 + (b_1/X))}$ ή $\ln(Y) = b_0 + (b_1/X)$	S (S-curve)
9.	$Y = 1 / (1/u + (b_0 * (b_1^X)))$ ή $\ln(1/Y-1/u) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * X)$	Logistic
10.	$Y = e^{(b_0 + (b_1 * X))}$ ή $\ln(Y) = b_0 + (b_1 * X)$	Growth
11.	$Y = b_0 * e^{(b_1 * X)}$ ή $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * X)$	Exponential

Ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) R^2 , ο οποίος υποδεικνύει πόσο κοντά είναι τα δεδομένα στην προσαρμοσμένη γραμμή παλινδρόμησης, καθώς και η πιθανότητα p-value (Significance) υπολογίστηκαν για κάθε διαφορετικό συνδυασμό που εξετάστηκε μεταξύ των μαθηματικών μοντέλων και των δεδομένων (3 τομές μετρήσεων GPR * 6 δείκτες βλάστησης, 4 φασματικά κανάλια, 3 συντελεστές * 11 μαθηματικά μοντέλα).

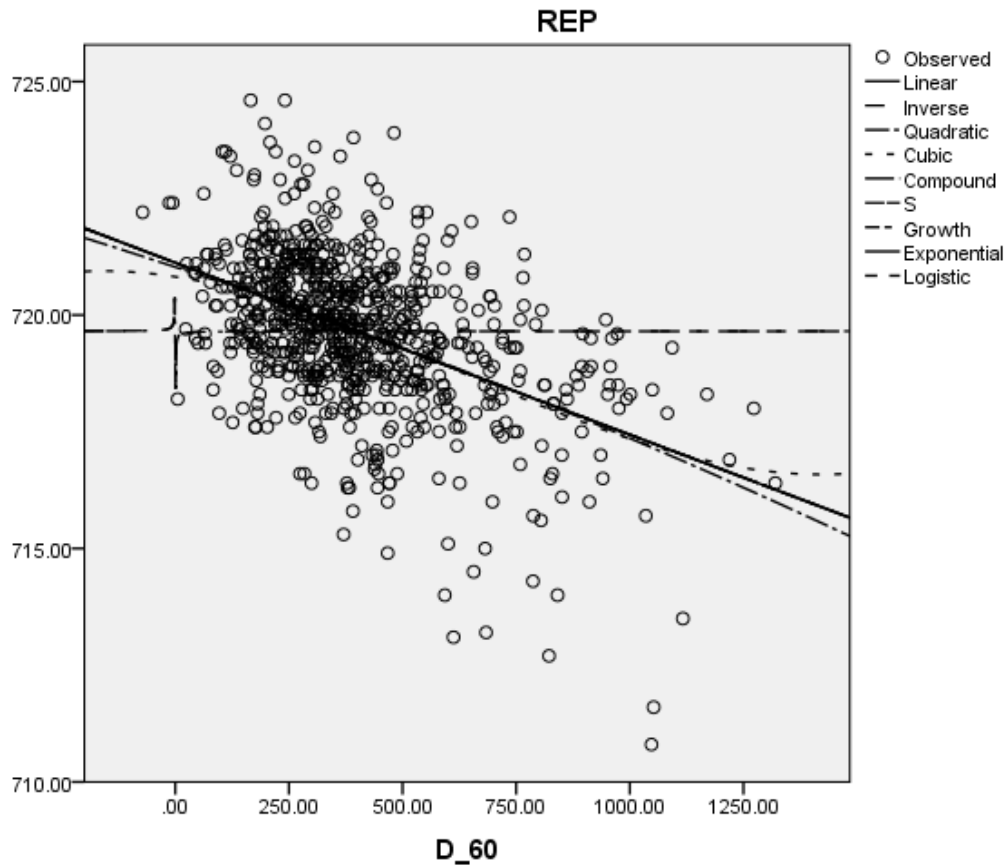
Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων εξετάστηκε όλο το σύνολο των 769 μετρήσεων του GPR που συλλέχτηκε στην περιοχή μελέτης. Από τους 6 δείκτες βλάστησης που ερευνήθηκαν, σε όλες τις περιπτώσεις ο REP παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές συντελεστή προσδιορισμού R^2 μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Συγκεκριμένα η ισχυρότερη συσχέτιση του που παρουσιάστηκε ήταν σε σχέση με τις μετρήσεις του GPR στην πρώτη τομή του εδάφους η οποία αντιστοιχεί σε βάθος 0-0.2m. Ο λόγος για τον οποίο που οι μετρήσεις του GPR οι οποίες αντιστοιχούν στις κατώτερες τομές του εδάφους με βάθος 0.6 έως 2 μέτρα δεν εξετάστηκαν περαιτέρω είναι επειδή παρουσίασαν πολύ χαμηλές συσχετίσεις στο αρχικό αυτό στάδιο της επεξεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων του GPR στα μικρότερα βάθη (0-0.60m) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (Εικόνα 20, 21, 22).



Εικόνα 20: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.242 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.551, b_1 = -0.002, b_2 = 6.086E-008 και b_3 = 6.748E-011.



Εικόνα 21: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.20-0.40m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Η υψηλότερη συσχέτιση τους εντοπίζεται μέσω των μαθηματικών μοντέλων Cubic και Quadratic. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 και στις δύο περιπτώσεις είναι ίσος με 0.157 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου Cubic: Constant (b_0) = 720.696, b_1 = -0.001, b_2 = 4.644E-008 και b_3 = 3.306E-010. Παράμετροι μοντέλου Quadratic: Constant (b_0) = 720.515, b_1 = 1.507E-005, b_2 = -9.337E-007.

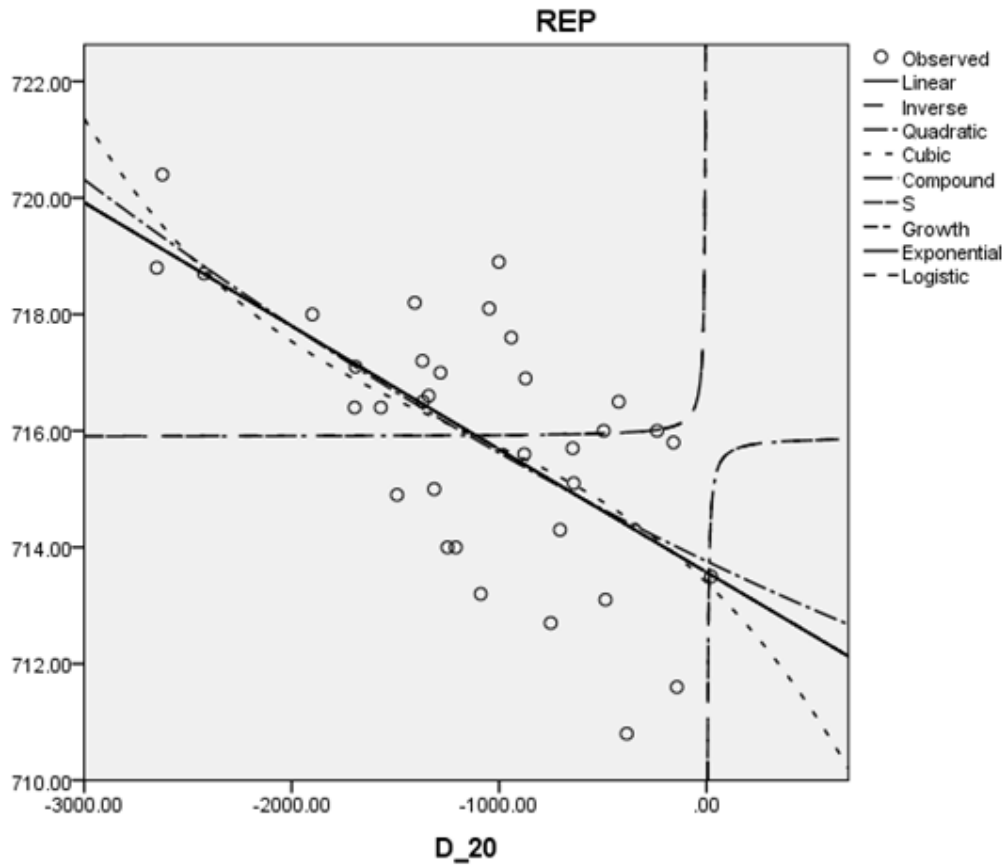


Εικόνα 22: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Η υψηλότερη συσχέτιση τους τνοπίστηκε μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.220 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 720.819, b_1 = -0.001, b_2 = -4.182E-006 και b_3 = 2.208E-009.

4.1.1 Διαχωρισμός μετρήσεων σε κλάσεις

Με σκοπό να εξεταστούν οι μετρήσεις περαιτέρω, διαχωρίστηκαν σε ομάδες βάση του δείκτη βλάστησης NDVI, των τιμών του καναλιού 4 της εικόνας GeoEye και εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο ομαδοποίησης K-means. Με τους διάφορους διαχωρισμούς αυτούς προέκυψαν περιπτώσεις με αρκετά υψηλότερες τιμές συντελεστή προσδιορισμού R^2 . Στις περισσότερες όμως από αυτές ο αριθμός των μετρήσεων που συμμετείχαν στο μοντέλο παλινδρόμησης ήταν αρκετά μικρός. Οπότε δεν μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι όντως παρουσιάστηκε μια ισχυρότερη συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων.

Στην εικόνα 23 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ισχυρότερης συσχέτισης που εντοπίστηκε διαχωρίζοντας τις μετρήσεις βάση του δείκτη βλάστησης NDVI. Σε αυτή την περίπτωση ο δείκτης βλάστησης REP και το μοντέλο Cubic ήταν ο καλύτερος συνδυασμός. Ικανοποιητικό αποτέλεσμα εκτός του Cubic έδωσαν και τα υπόλοιπα μαθηματικά μοντέλα εκτός το Inverse και το S (S-curve). Ο διαχωρισμός των μετρήσεων σε ομάδες βάση των τιμών του καναλιού 4 και η εφαρμογή του αλγόριθμου K-means για το διαχωρισμό των μετρήσεων σε 3 και 4 ομάδες δεν κατέληξε σε κάποιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα καθώς οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης R^2 σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν αρκετά χαμηλές.



Εικόνα 23: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές δείκτη βλάστησης NVDI από 0.34 έως 0.5. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.43 και το p-value ίσο με 0.001. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 713.393, $b_1 = -0.003$, $b_2 = -1.523E-006$ και $b_3 = -4.214E-010$.

4.1.2 Συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil

Οι επόμενοι παράγοντες με τους οποίους οι μετρήσεις του GPR εξετάστηκαν σαν σύνολο αλλά και σαν σε ομάδες ήταν οι συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Το σύνολο όλων των μετρήσεων, διαχωρίζοντας το ακόμη και σε ομάδες, έδωσε αρκετά χαμηλές συσχετίσεις σε σχέση με τους τρεις αυτούς συντελεστές. Οι ομάδες όμως των μετρήσεων που προέκυψαν διαχωρίζοντας τις βάση των τριών αυτών συντελεστών παρουσίασαν κάποια ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε σχέση με τους δείκτες βλάστησης. Παρόλα αυτά όμως οι συσχετίσεις και σε αυτές τις περιπτώσεις εξακολουθούν να μην είναι ισχυρές αφού επίσης αφορούν ένα πολύ μικρό αριθμό του δείγματος των μετρήσεων.

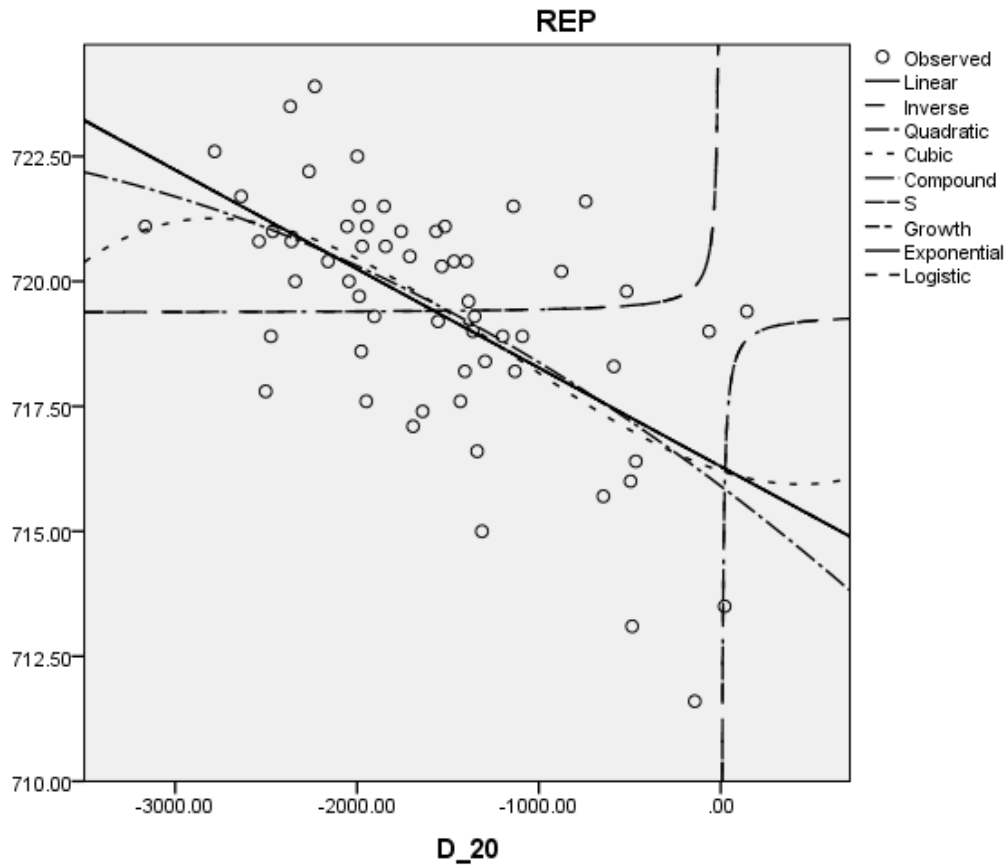
Οι γραμμικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών Crop mark, Vegetation και Soil της εικόνας GeoEye είναι οι εξής (Agariou, 2013):

$$\text{Crop mark}_{GeoEye-1} = -0.39 \cdot \rho_{\text{blue}} - 0.73 \cdot \rho_{\text{green}} + 0.17 \cdot \rho_{\text{red}} - 0.54 \cdot \rho_{\text{NIR}} \quad (1)$$

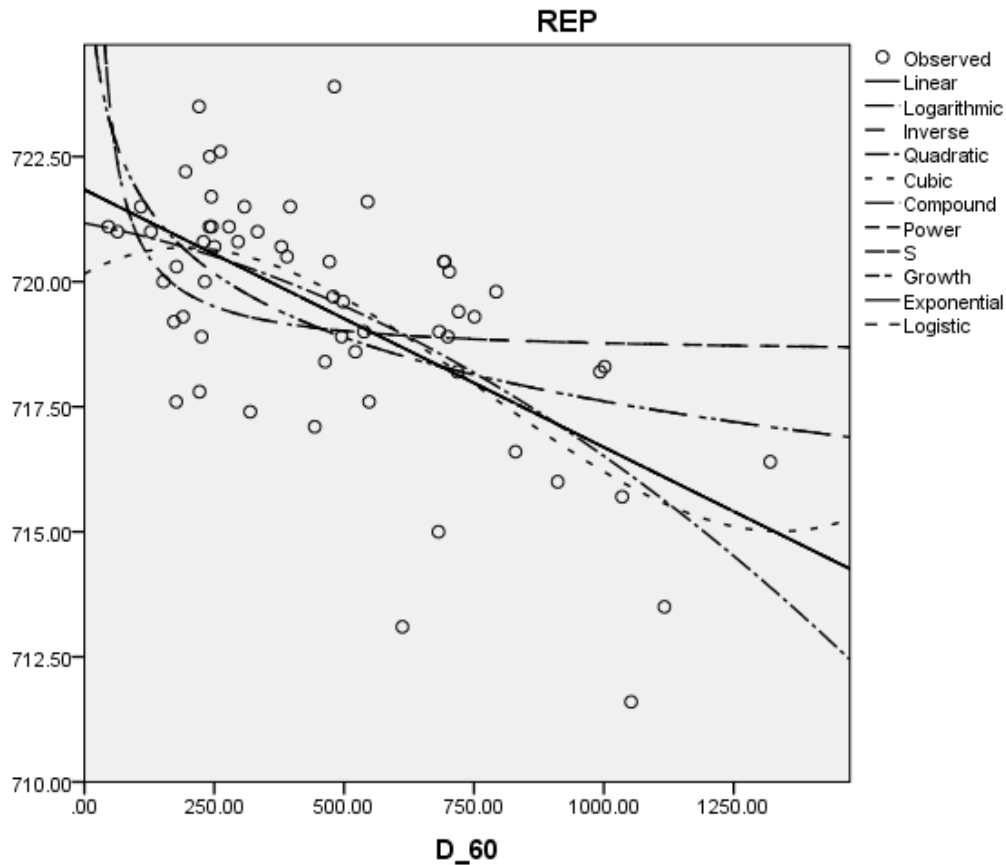
$$\text{Vegetation}_{GeoEye-1} = -0.35 \cdot \rho_{\text{blue}} - 0.37 \cdot \rho_{\text{green}} - 0.68 \cdot \rho_{\text{red}} + 0.54 \cdot \rho_{\text{NIR}} \quad (2)$$

$$\text{Soil}_{GeoEye-1} = 0.08 \cdot \rho_{\text{blue}} + 0.27 \cdot \rho_{\text{green}} - 0.71 \cdot \rho_{\text{red}} - 0.65 \cdot \rho_{\text{NIR}} \quad (3)$$

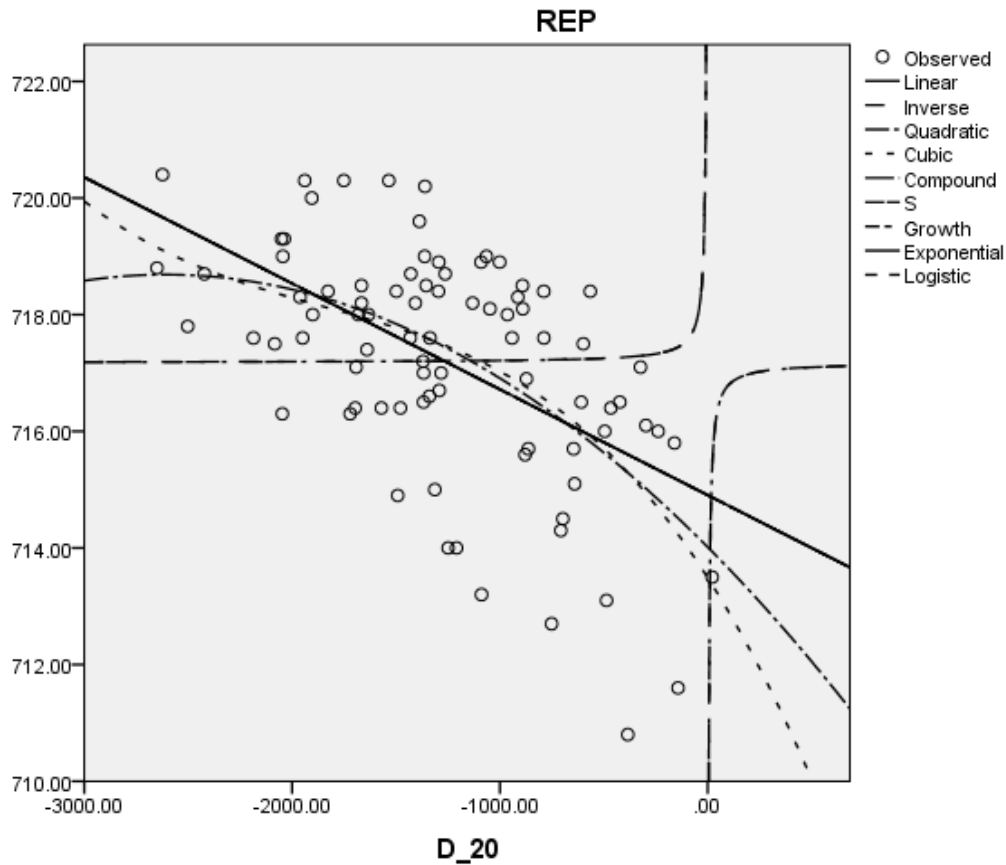
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των ισχυρότερων συσχετίσεων που εντοπίστηκαν διαχωρίζοντας τις μετρήσεις σε ομάδες βάση των τριών αυτών συντελεστών (Εικόνα 24, 25, 26 και 27). Σε αυτές τις περιπτώσεις ο συνδυασμός του μοντέλου Cubic με το δείκτη REP οδήγησε και πάλι στα καλύτερα αποτελέσματα.



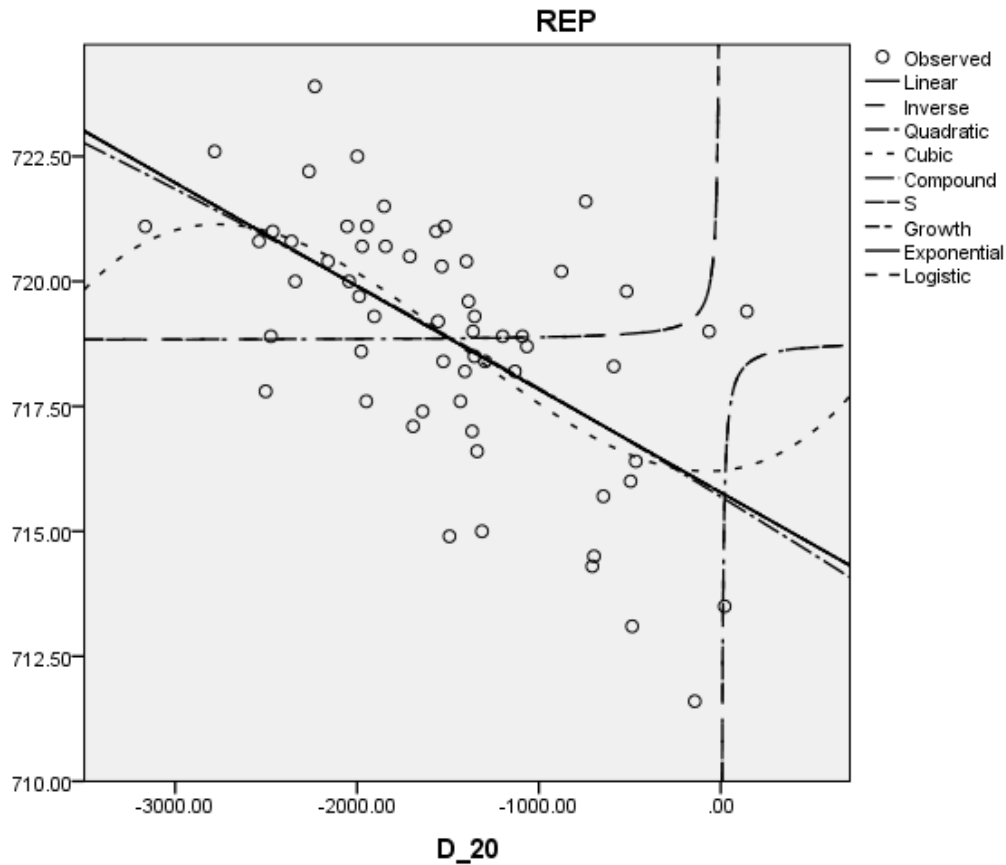
Εικόνα 24: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Crop mark από -0.19 έως -0.1. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.378 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.209, b_1 = -0.001, b_2 = 1.112E-006 και b_3 = 3.151E-010.



Εικόνα 25: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Crop mark από -0.19 έως -0.1. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.422 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 720.156, $b_1 = 0.006$, $b_2 = -1.720E-005$ και $b_3 = 7.491E-009$.



Εικόνα 26: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Vegetation από -2 έως 6. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.331 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 713.489, $b_1 = -0.006$, $b_2 = -2.475E-006$ και $b_3 = -4.454E-010$.

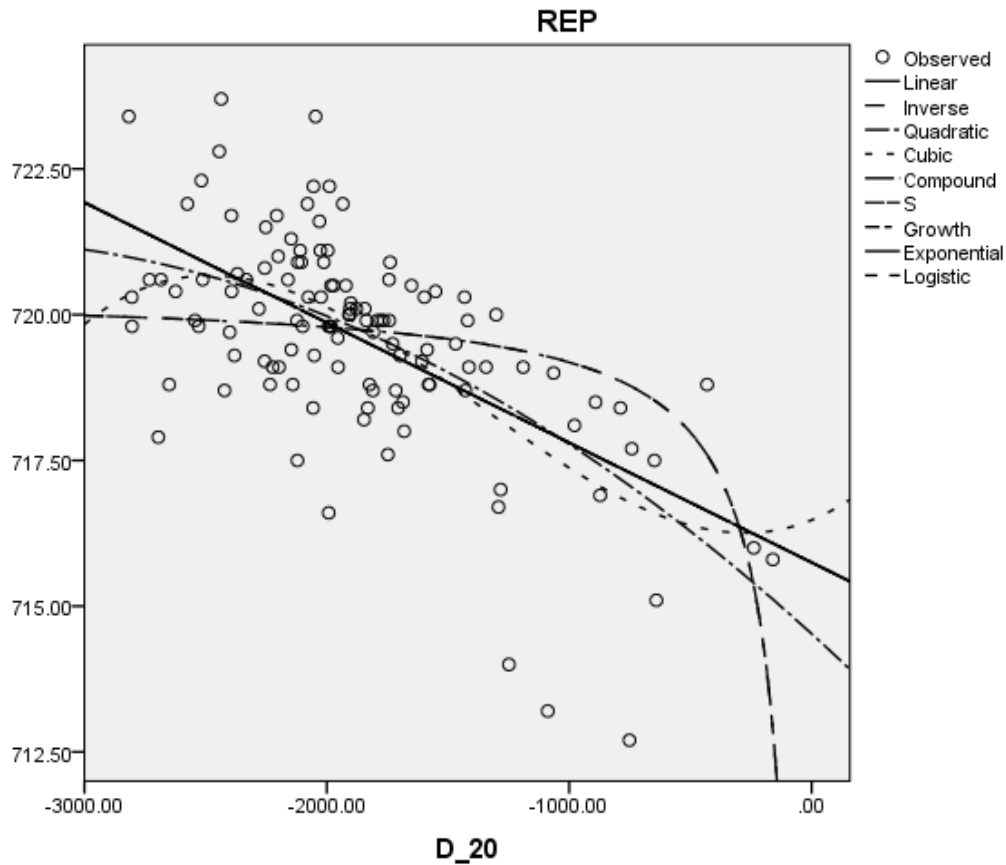


Εικόνα 27: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές του συντελεστή Soil από -20 έως -10. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.379 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.214, $b_1 = 0$, $b_2 = 2.159E-006$ και $b_3 = 5.071E-010$.

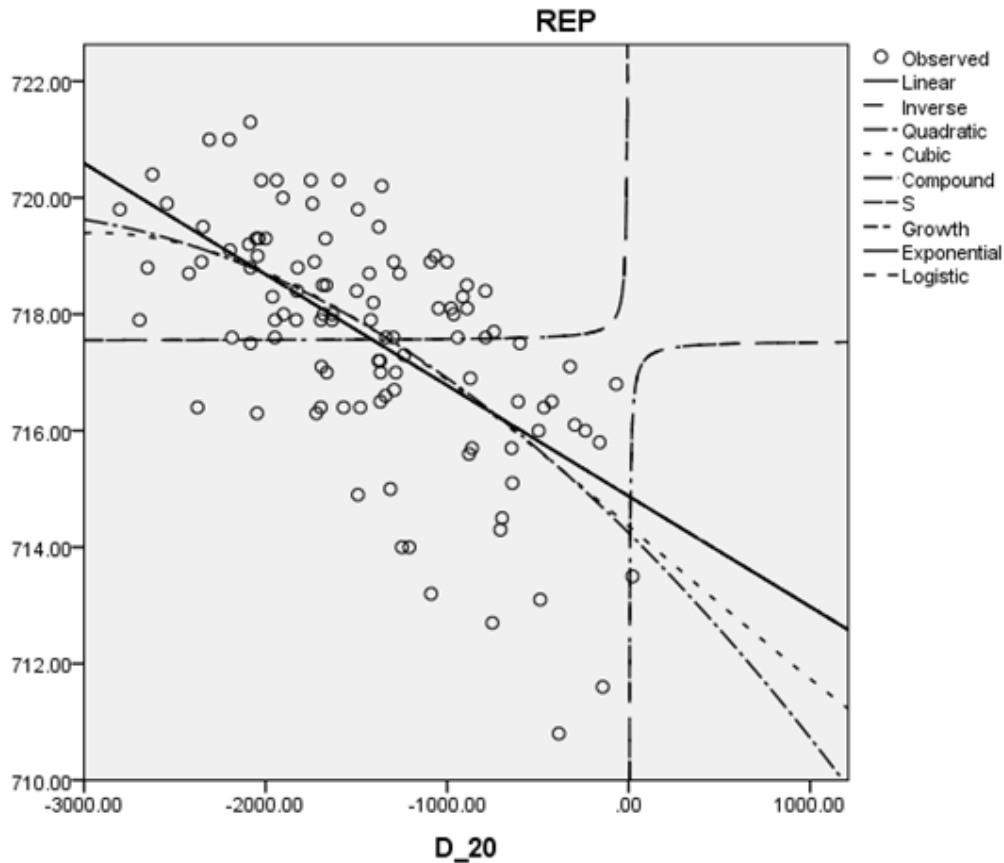
4.1.3 Principal Components Analysis

Η τελευταία προσπάθεια που έγινε για να εντοπιστεί μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του GPR στα διάφορα βάθη και του φασματοραδιόμετρου έγινε μέσω της χρήσης του μετασχηματισμού Ανάλυσης των Κύριων Συνιστωσών (PCT). Ο μετασχηματισμός των Κύριων Συνιστωσών εφαρμόστηκε δύο φορές δημιουργώντας τρεις Κύριες Συνιστώσες σε κάθε περίπτωση. Στην πρώτη του εκτέλεση συμμετείχαν οι τρεις συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil, ενώ στην δεύτερη οι μετρήσεις του GPR που αντιστοιχούν σε βάθη από 0-0.60m. Οι μετρήσεις εξετάστηκαν σαν σύνολο αλλά και σαν ομάδες σε σχέση με τις 3 Κύριες συνιστώσες που προέκυψαν από την κάθε περίπτωση. Δυστυχώς όμως και σε αυτή την προσπάθεια δεν παρουσιάστηκε κάποια ισχυρή συσχέτιση. Παρόλα αυτά, οι ομάδες των μετρήσεων που προέκυψαν από το διαχωρισμό τους βάση των τριών Κύριων Συνιστωσών της κάθε περίπτωσης παρουσίασαν αρκετά καλές συσχετίσεις με τους δείκτες βλάστησης REP, GREEN NDVI και SARVI. Το μαθηματικό μοντέλο Cubic ήταν αυτό που ξεχώρισε και πάλι δημιουργώντας τα καλύτερα μοντέλα παλινδρομήσεις. Αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα όμως έδωσαν και τα μαθηματικά μοντέλα Inverse και Quadratic.

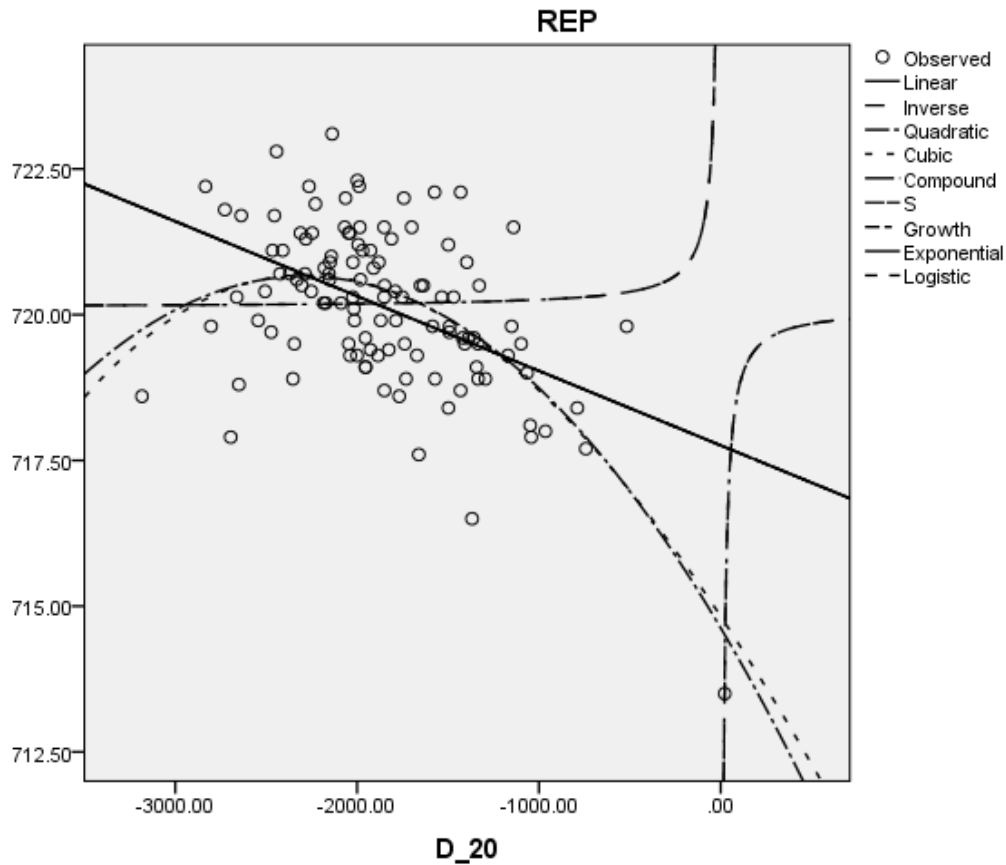
Στις εικόνες (Εικόνα 28 έως 38) που ακολουθούν παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των ισχυρότερων συσχετίσεων που εντοπίστηκαν μεταξύ των μετρήσεων διαχωρίζοντας τις σε ομάδες βάση των 6 Κύριων Συνιστωσών που προέκυψαν από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil και τις μετρήσεις του GPR σε βάθος 0-0.60m.



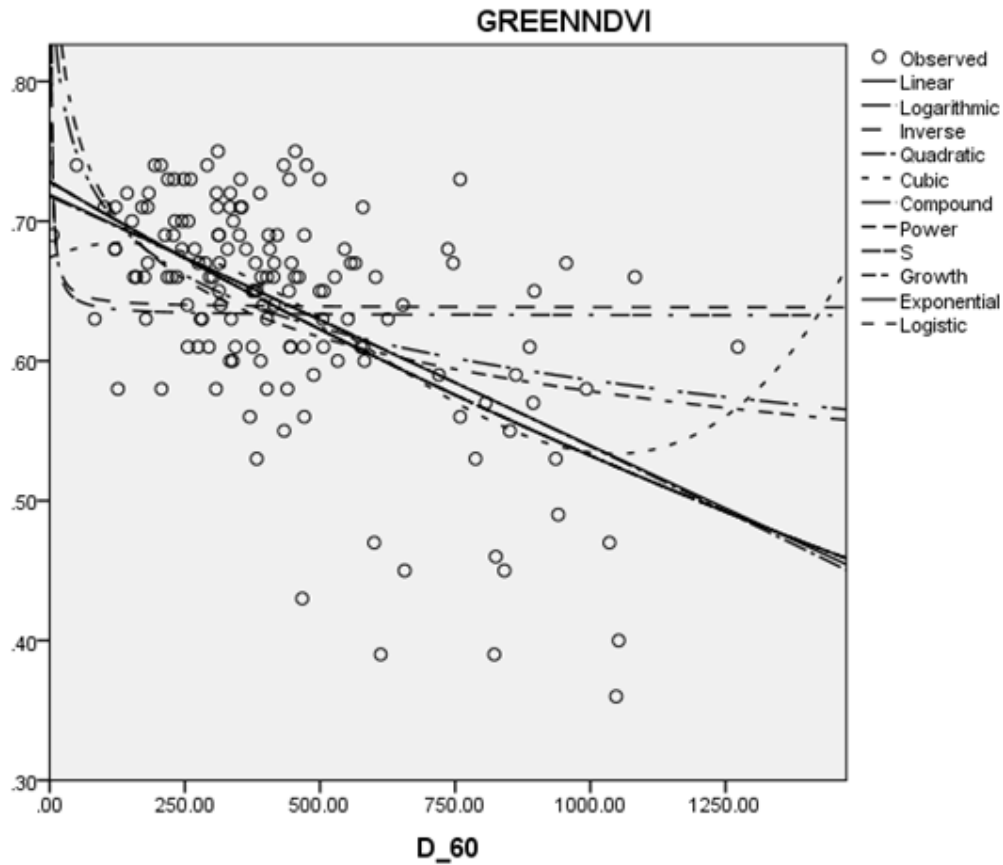
Εικόνα 28: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -3.5 έως -1 της πρώτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.416 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 716.478, $b_1 = 0.002$, $b_2 = 3.387E-006$ και $b_3 = 8.187E-010$.



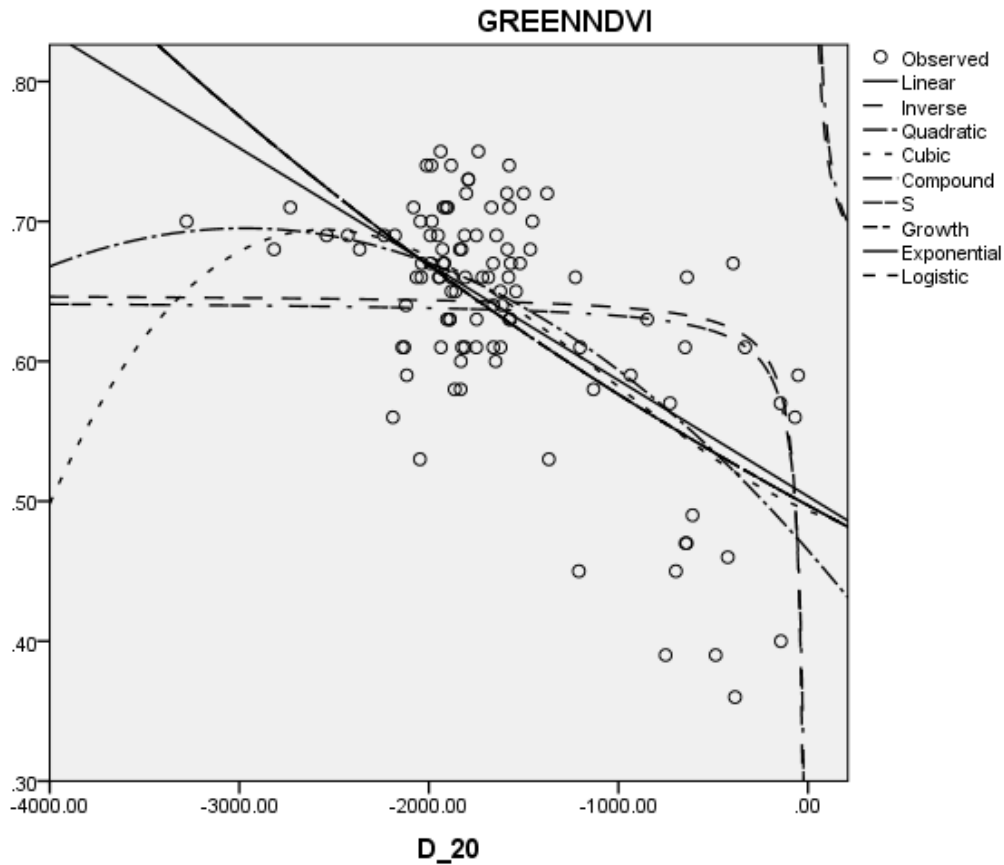
Εικόνα 29: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -3.8 έως -1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.396 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 714.362, b_1 = -0.003, b_2 = -5.708E-008 και b_3 = 8.958E-011.



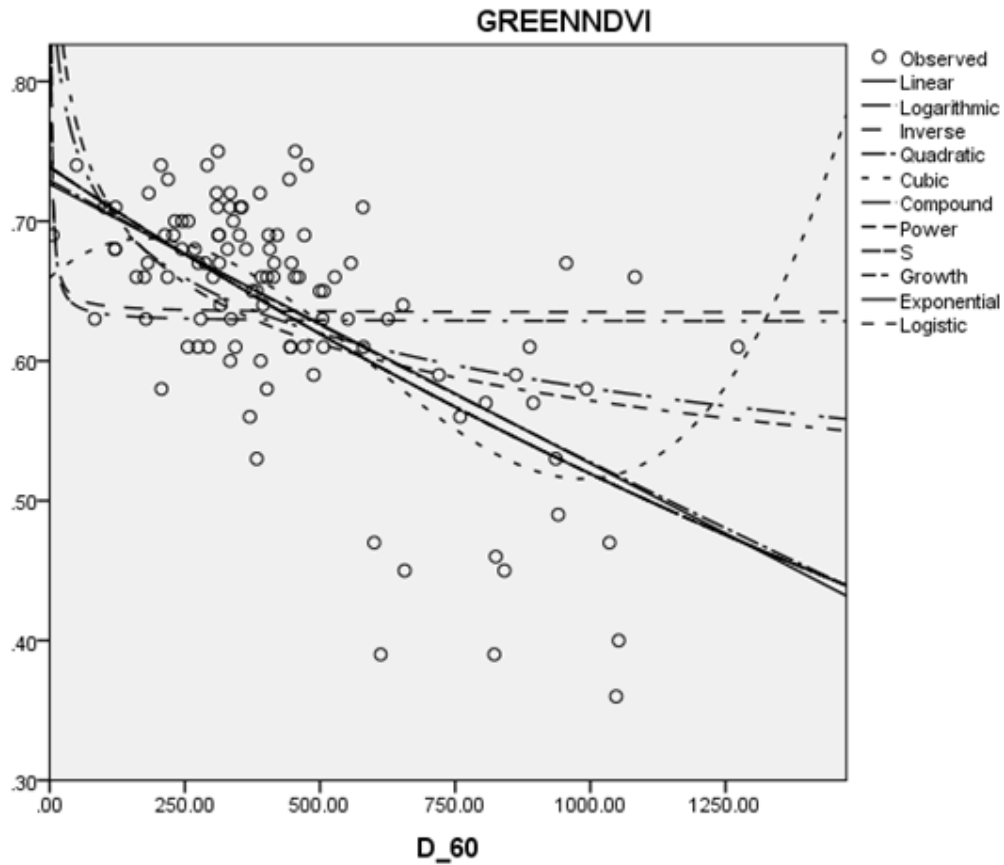
Εικόνα 30: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -1 έως -0.5 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.36 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 714.824, b_1 = -0.005, b_2 = -7.543E-007 και b_3 = 8.146E-011.



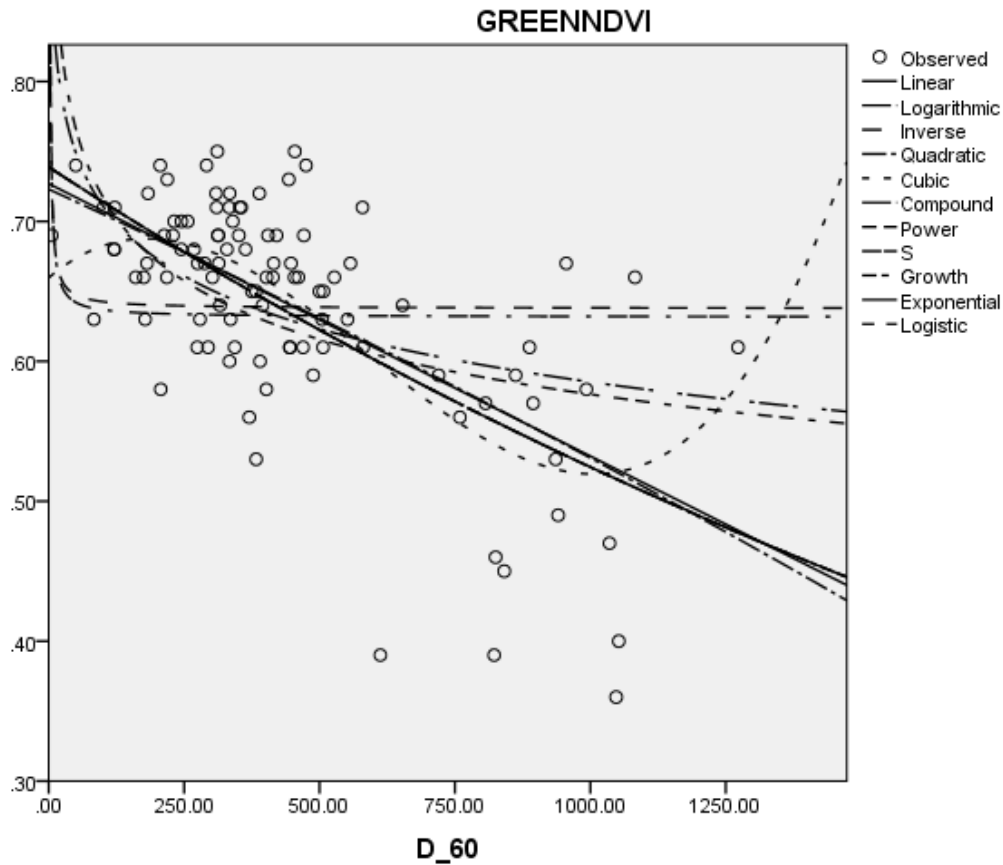
Εικόνα 31: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 0.8 έως 4.3 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.329 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.674, $b_1 = 0$, $b_2 = -7.060E-007$ και $b_3 = 4.000E-010$.



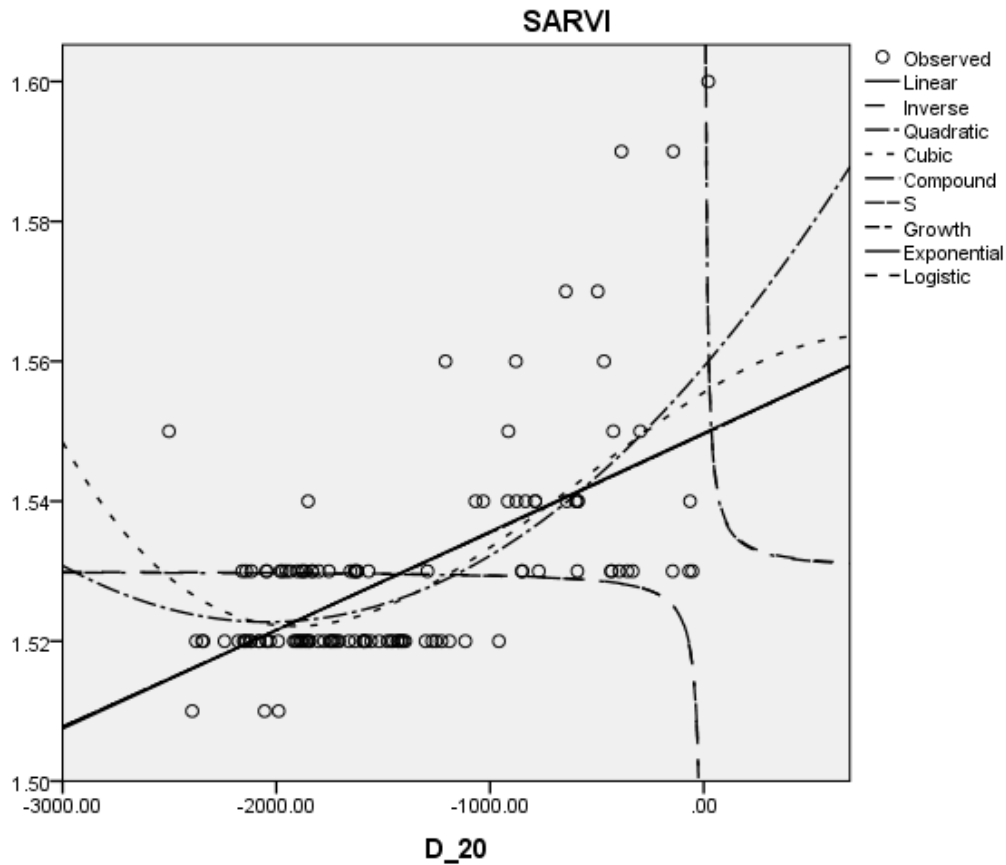
Εικόνα 32: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 1 έως 4.3 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.41 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.493, b_1 = -5.499E-005, b_2 = 4.931E-008 και b_3 = 1.569E-011.



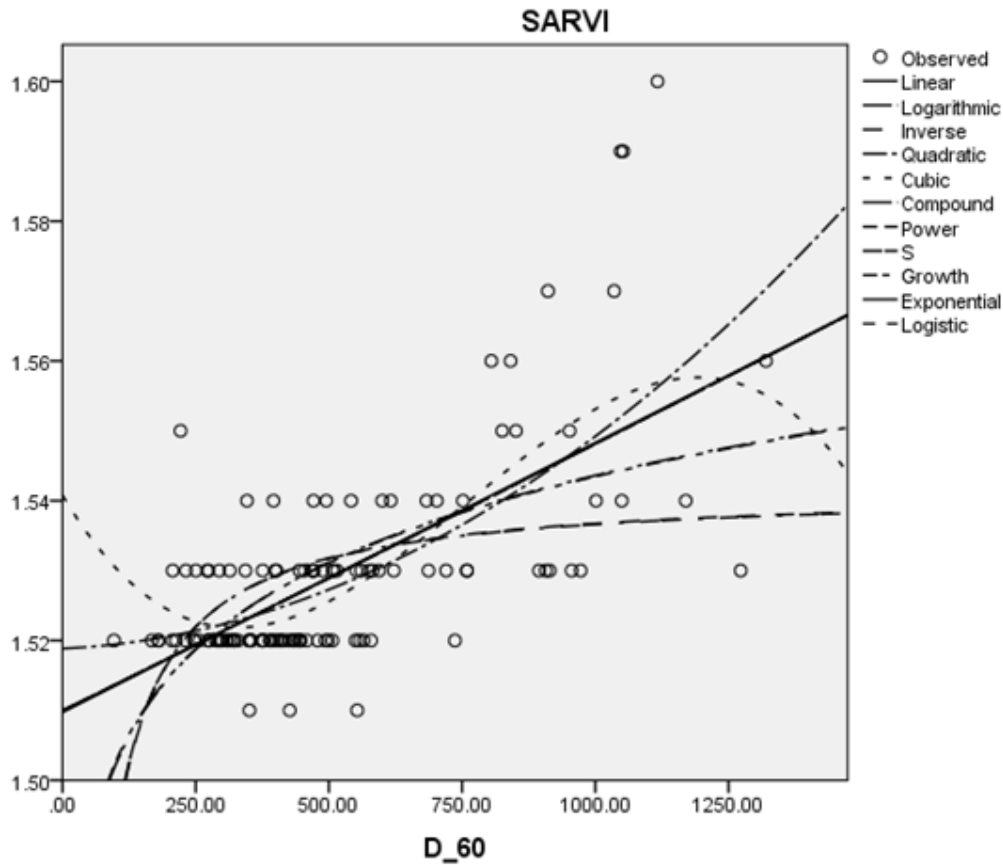
Εικόνα 33: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 1 έως 4.3 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.442 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.660, $b_1 = 0$, $b_2 = -1.128E-006$ και $b_3 = 6.463E-010$.



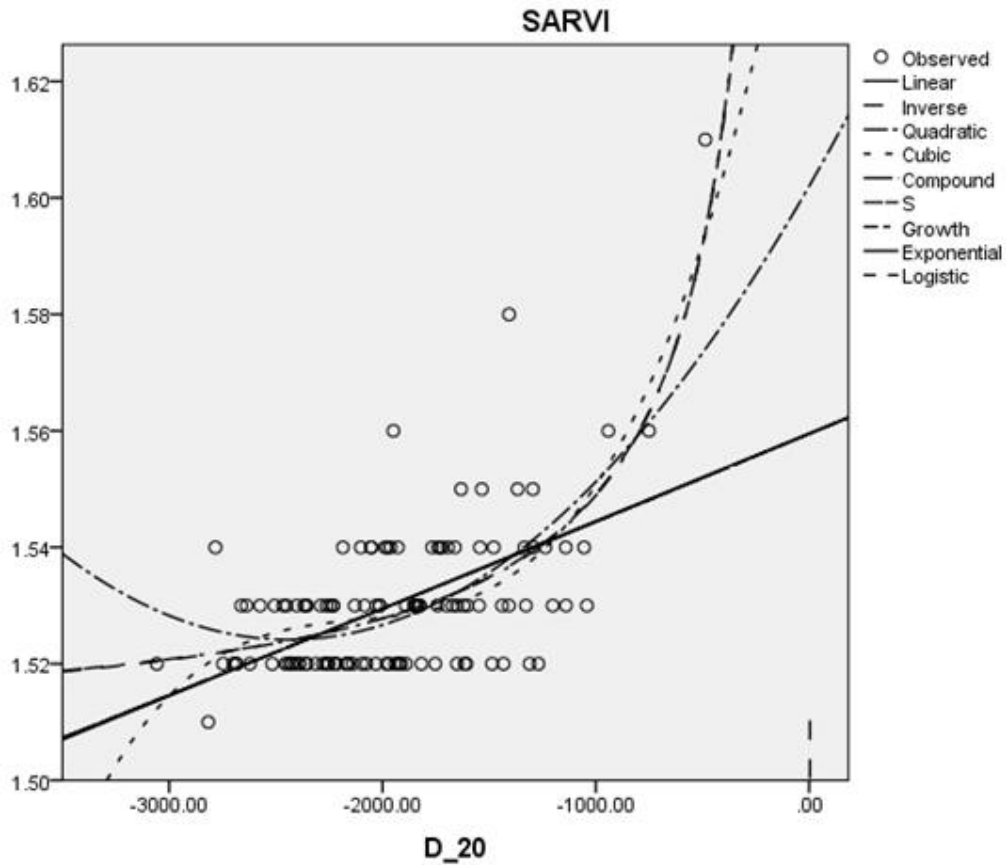
Εικόνα 34: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης GREEN NDVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 1 έως 2.6 της τρίτης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.448 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 0.660, $b_1 = 0$, $b_2 = -1.068E-006$ και $b_3 = 5.993E-010$.



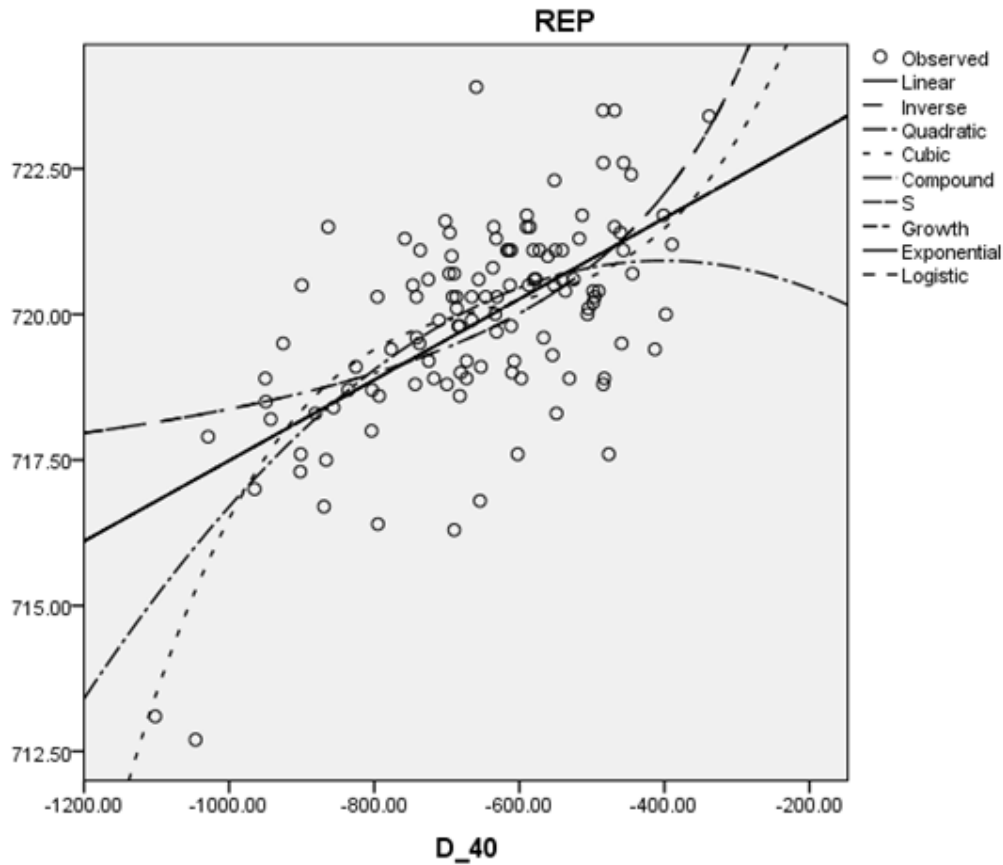
Εικόνα 35: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης SARVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -4 έως -1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.408 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 1.556, $b_1 = 1.893E-005$, $b_2 = -7.577E-009$ και $b_3 = -4.367E-012$.



Εικόνα 36: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.40-0.60m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης SARVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από -4 έως -1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.491 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 1.541, $b_1 = 0$, $b_2 = 2.500E-007$ και $b_3 = -1.097E-010$.



Εικόνα 37: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0-0.20m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης SARVI (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Inverse. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 0.5 έως 1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.467 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 1.506, b_1 = -42.693.



Εικόνα 38: Γραφική παράσταση των μετρήσεων του GPR σε βάθος 0.20-0.40m (άξονας των x) σε σχέση με το δείκτη βλάστησης REP (άξονας των y). Παρουσίασαν την υψηλότερη συσχέτιση μέσω του μαθηματικού μοντέλου Cubic. Στη διαδικασία συμμετείχαν μόνο οι μετρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε τιμές από 0.5 έως 1 της δεύτερης Κύριας Συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR για βάθη από 0-0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίσος με 0.444 και το p-value ίσο με 0. Παράμετροι μοντέλου: Constant (b_0) = 734.926, $b_1 = 0.064$, $b_2 = 9.675E-005$ και $b_3 = 5.102E-008$.

4.1.4 Συνολικά αποτελέσματα

Η διαδικασία της επεξεργασίας των μετρήσεων και εξέτασης κάθε διαφορετικής περίπτωσης συνδυασμού μαθηματικού μοντέλου και παραγόντων που συμμετείχαν στο μοντέλο της παλινδρόμησης αποτέλεσε μια χρονοβόρα διαδικασία με αρκετά αρνητικά αποτελέσματα και ελάχιστα θετικά. Ο εντοπισμός μια ισχυρής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων που εξετάζει η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί μια δύσκολη προσπάθεια που οδήγησε σε πολλές αποτυχίες. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι οι διάφορες τεχνικές τηλεπισκόπησης που εφαρμόζονται είναι ικανές να προσδώσουν διαφορετικά χαρακτηριστικά για την υπο-μελέτη περιοχή χωρίς κατ' ανάγκη να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν αποσπασματικά από κάθε τεχνική. Η ερμηνεία δηλαδή και η κατανόηση των υπεδάφινων στόχων αποτελεί ένα puzzle όπου ή κάθε τεχνική συνεισφέρει από μόνη της (ή μερικές φορές και συνδυαστικά) στην κατανόηση μέρους του συνόλου.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα καλύτερα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της επεξεργασίας των μετρήσεων με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης. Στο ψηφιακό Παράρτημα 1 εμπεριέχεται το σύνολο των αποτελεσμάτων, αρνητικά και θετικά, όλων των συνδυασμών που εξετάστηκαν κατά τη διαδικασία αυτή.

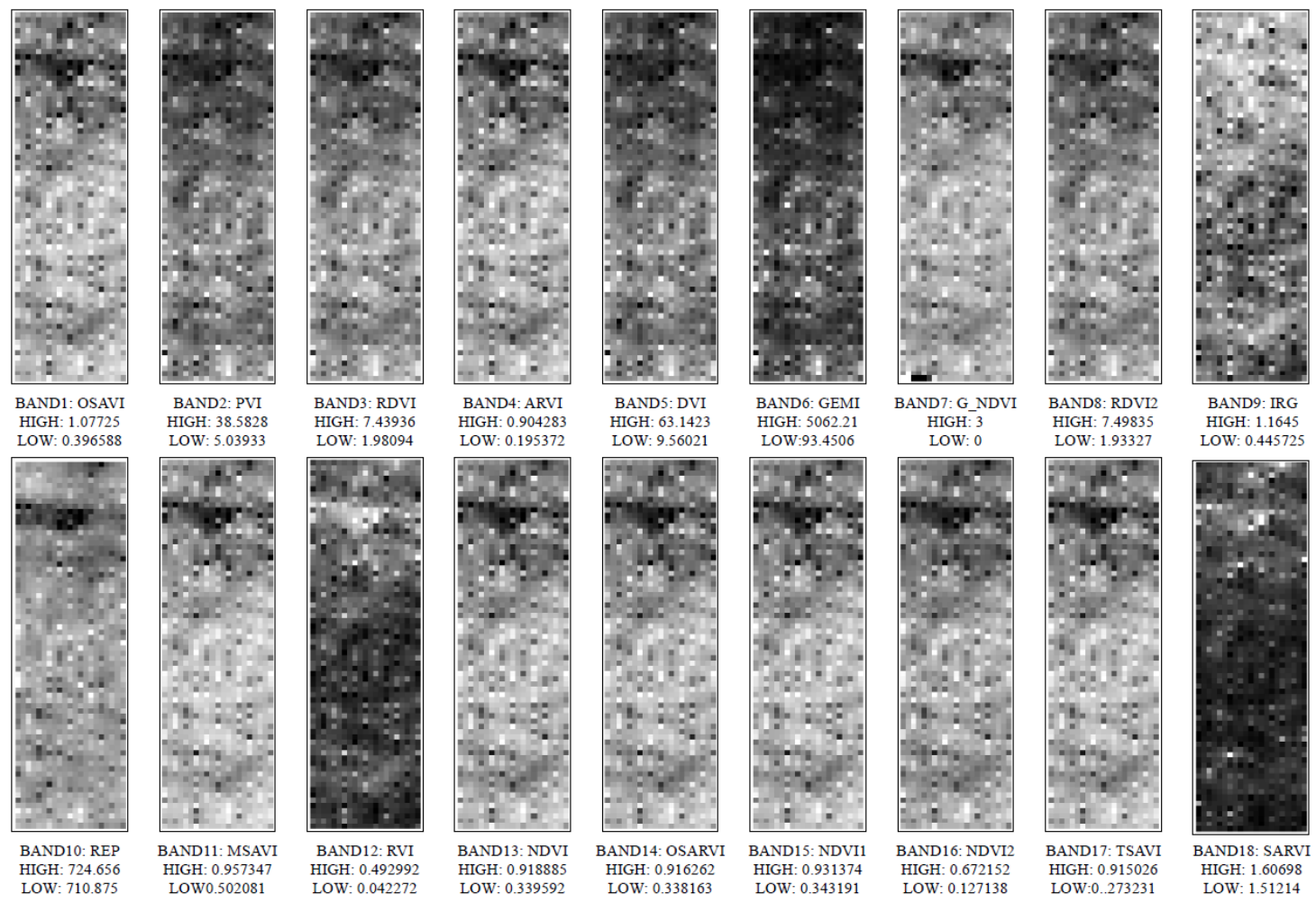
Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση των ισχυρότερων συσχετίσεων που εντοπίστηκαν μεταξύ των μετρήσεων του φασματοραδιόμετρου και των μετρήσεων του GPR στα διάφορα βάθη χρησιμοποιώντας τα μαθηματικά μοντέλα του Πίνακα 2.

Διαχωρισμός βάση:	Διάστημα τιμών	Αριθμός μετρήσεων	Άξονας X	Άξονας Y	Μοντέλο	R ²	p- value
NDVI	(0.34, 0.5)	34	D20	REP	Cubic	0.43	0.001
Cropmark	(-0.19, -0.1)	59	D60	REP	Cubic	0.422	0.000
Cropmark	(-0.19, -0.1)	59	D20	REP	Cubic	0.378	0.000
Vegetation	(-2, 6)	85	D20	REP	Cubic	0.331	0.000
Soil	(-20, -10)	60	D20	REP	Cubic	0.379	0.000
PCA1 (Cropmark, Vegetation, Soil)	(-3.5, -1)	119	D20	REP	Cubic	0.416	0.000

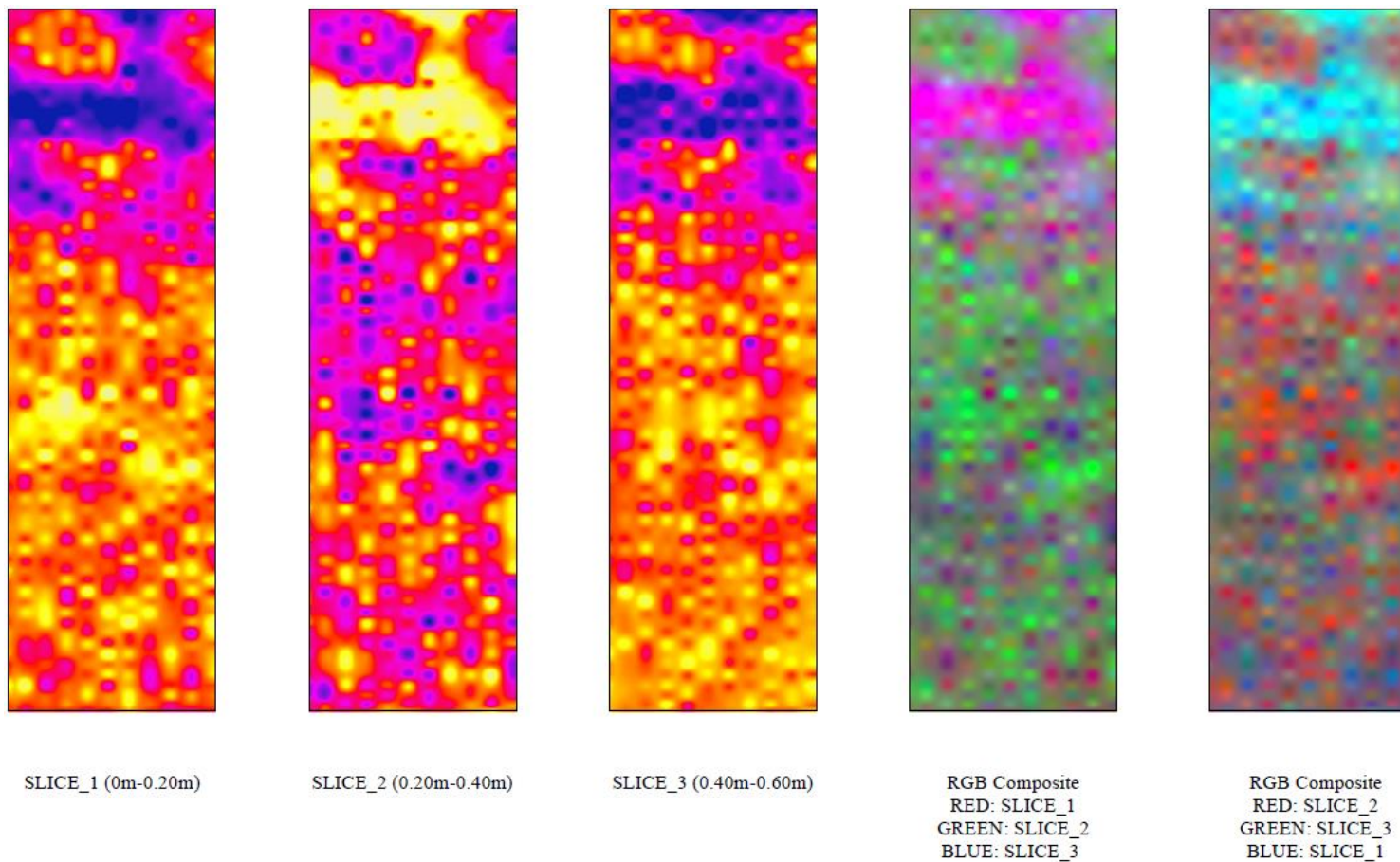
PCA2 (Cropmark, Vegetation, Soil)	(-3.8, -1)	108	D20	REP	Cubic	0.396	0.000
PCA3 (Cropmark, Vegetation, Soil)	(-1, -0.5)	116	D20	REP	Cubic	0.36	0.000
PCA3 (Cropmark, Vegetation, Soil)	(0.8, 4.3)	150	D60	GREEN NDVI	Cubic	0.329	0.000
PCA3(Cropmark, Vegetation, Soil)	(1, 4.3)	107	D60	GREEN NDVI	Cubic	0.442	0.000
PCA3 (Cropmark, Vegetation, Soil)	(1, 4.3)	107	D20	GREEN NDVI	Cubic	0.41	0.000
PCA3 (Cropmark, Vegetation, Soil)	(1, 2.6)	101	D60	GREEN NDVI	Cubic	0.448	0.000
PCA2 (D20,40,60)	(-4, -1)	122	D20	SARVI	Cubic	0.408	0.000
PCA2 (D20,40,60)	(-4, -1)	122	D60	SARVI	Cubic	0.491	0.000
PCA2 (D20,40,60)	(0.5, 1)	119	D20	SARVI	Inverse	0.467	0.000
PCA2 (D20,40,60)	(0.5, 1)	119	D40	REP	Cubic	0.444	0.000

4.2 Αποτελέσματα τεχνικών ανάλυσης εικόνας

Με τα μαθητικά μοντέλα παλινδρόμησης να μην καταλήγουν σε κάποια ικανοποιητικά αποτελέσματα σύμφωνα με τους σκοπούς της μελέτης, η επεξεργασία των δεδομένων ακολούθησε μια διαφορετική προσέγγιση. Μια σειρά από τεχνικές ανάλυσης εικόνων έχουν εφαρμοστεί πάνω σε εικόνες που δημιουργήθηκαν από τις μετρήσεις του GPR σε βάθος από 0-0.60m και τις τιμές 18 δεικτών βλάστησης που υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις του φασματοραδιόμετρου στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε και προηγούμενος, στην περιοχή με κόκκινο πολύγωνο του Διαγράμματος 19 έχουν εκτελεσθή μετρήσεις με GRP και φασματοραδιόμετρο. Οι συντεταγμένες των σημείων όπου έγιναν μετρήσεις στην περιοχή αυτή είναι γνωστές. Οπότε, εισάγοντας τα σημεία αυτά μέσα στο λογισμικό ArcMap με την κατάλληλη επεξεργασία δημιουργήθηκαν 18 διαφορετικές εικόνες για 18 δείκτες βλάστησης (Εικόνα 39) καθώς και 3 διαφορετικές εικόνες για τις μετρήσεις του GPR οι οποίες αντιστοιχούν στα πρώτα τρία ανώτερα στρώματα του εδάφους με βάθος 0-0.20m, 0.20-0.40m και 0.40-0.60m (Εικόνα 40). Ανάλογα με το τι αντιπροσωπεύει η κάθε εικόνα η τιμή ενός εικονοστοιχείου μπορεί να αντιστοιχεί στην τιμή ενός από τους δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκε από τη μέτρηση του φασματοραδιόμετρου ή με την μέτρηση του GPR για συγκεκριμένο βάθος που έγινε στο συγκεκριμένο σημείο-εικονοστοιχείο. Οι εικόνες και οι διάφορες τεχνικές ανάλυσης δεν βοήθησαν στον εντοπισμό κάποιας συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων. Παρόλα αυτά όμως, με την οπτική ερμηνεία των μετρήσεων παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα στα δύο σετ δεδομένων εντοπίζοντας τις ίδιες ανωμαλίες στην περιοχή μελέτης βοηθώντας έτσι στην περαιτέρω κατανόηση τους.



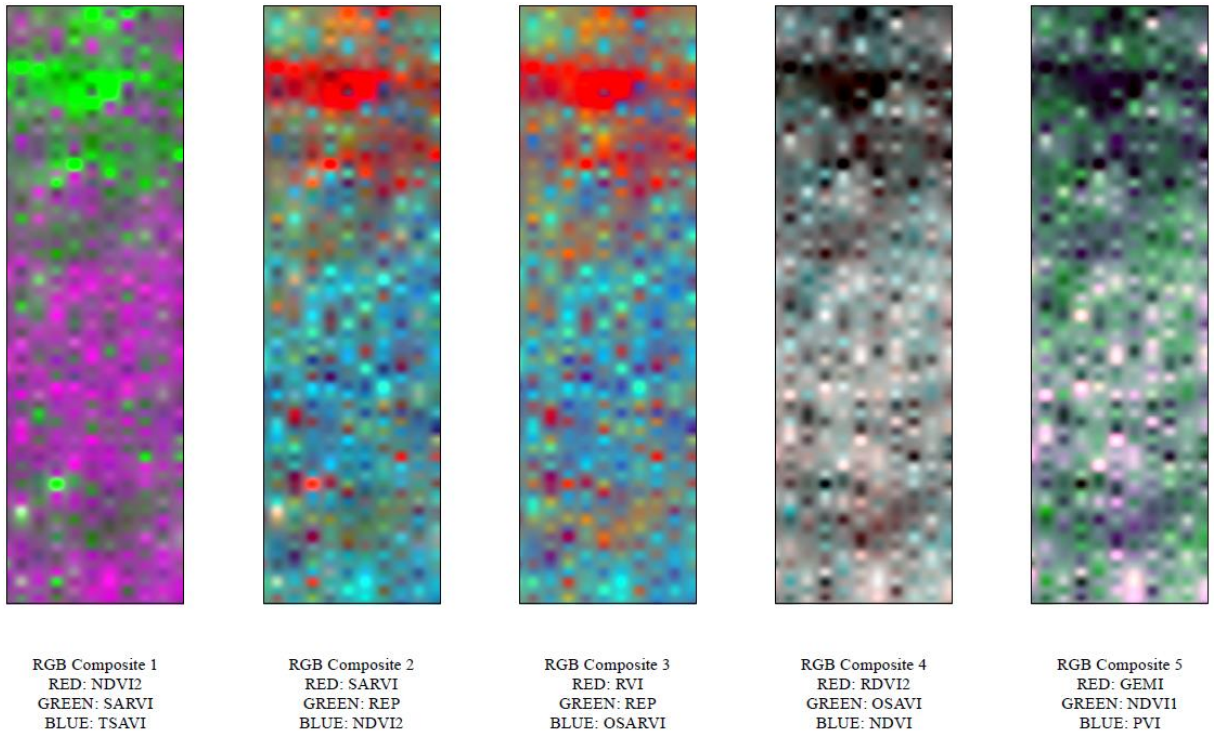
Εικόνα 39: Τα 18 κανάλια της εικόνας των δεικτών βλάστησης. HIGH: μέγιστη τιμή εικονοστοιχείων, LOW: ελάχιστη τιμή εικονοστοιχείων.



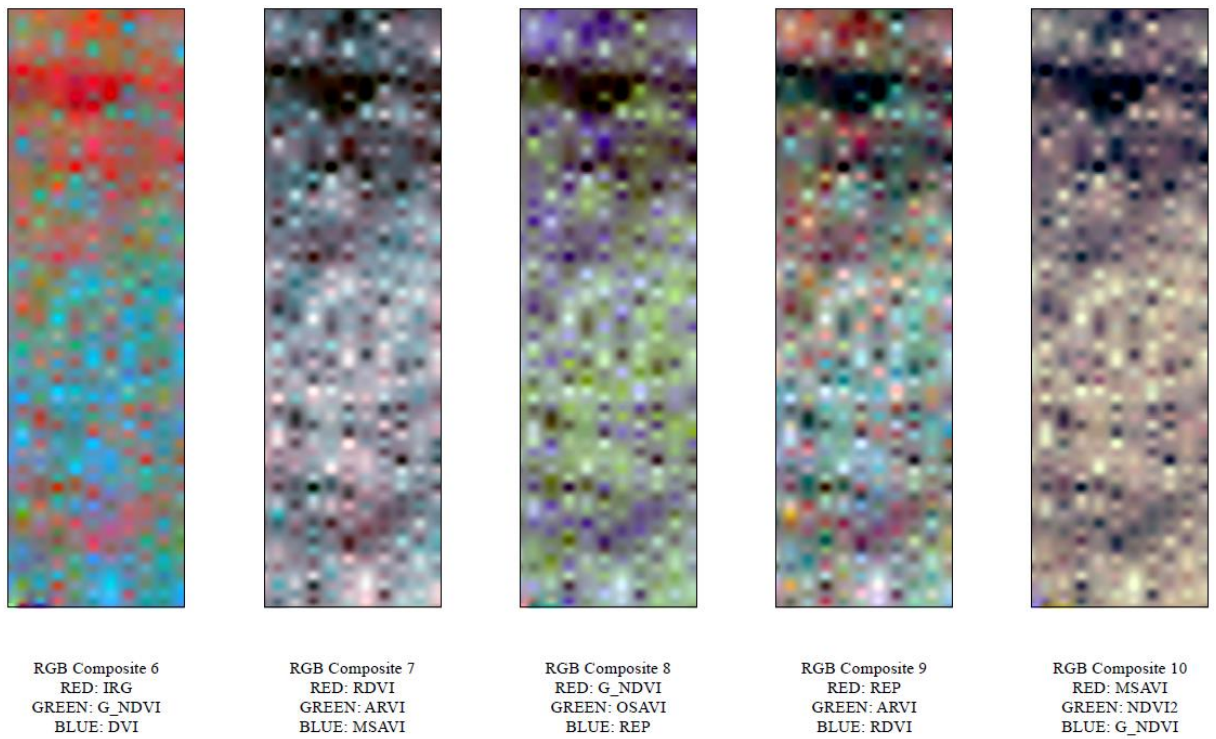
Εικόνα 40: Εικόνες των μετρήσεων του GPR για βάθη 0-0.60m και συνδυασμοί έγχρωμων συνθέτων τους.

4.2.1 Έγχρωμα Σύνθετα (RGB Composites)

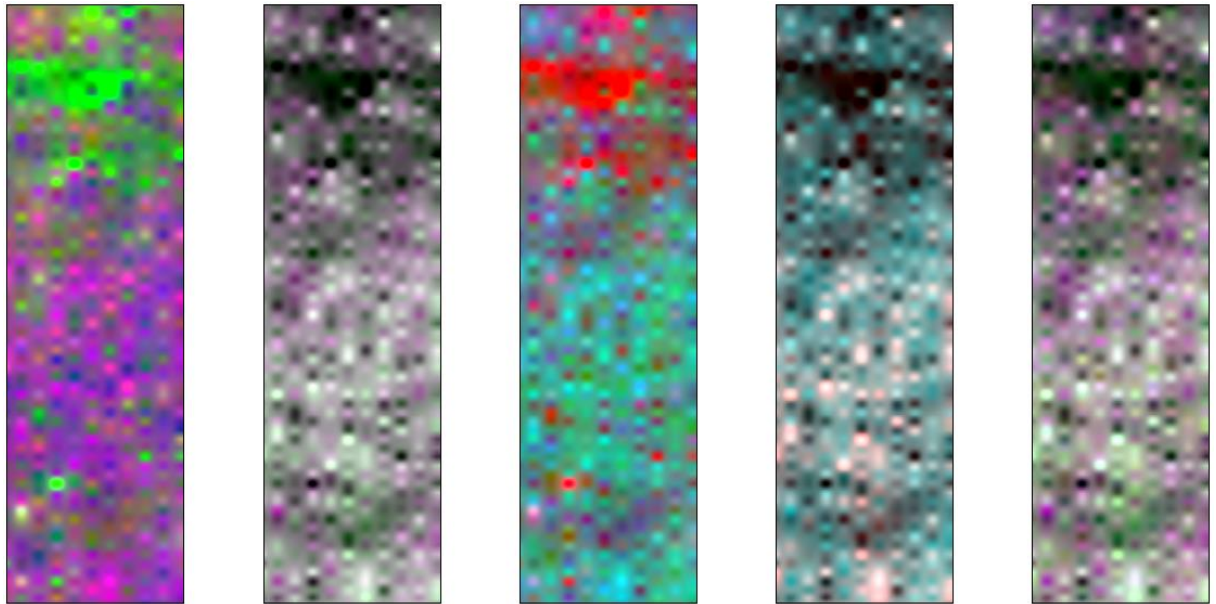
Η πρώτη τεχνική ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση του αποτελέσματος των εικόνων που δημιουργήθηκαν και τον καλύτερο εντοπισμό τυχόν ανωμαλιών που μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή μελέτης ήταν τα έγχρωμα σύνθετα. Συνολικά δημιουργήθηκαν 60 διαφορετικά έγχρωμα σύνθετα με διάφορους συνδυασμούς των 18 εικόνων των δεικτών βλάστησης και των 3 εικόνων των μετρήσεων του GPR. Η εκτέλεση τους έγινε μέσα στο λογισμικό ArcMap και σε κάθε περίπτωση συνδυάζονται μεταξύ τους τρεις διαφορετικοί παράγοντες (R-G-B). Επίσης για την καλύτερη ερμηνεία και επανασύσταση των εικόνων εφαρμόστηκε στα εικονοστοιχεία τους η κυβική παρεμβολή. Κατά τη διάρκεια της δημιουργία τους έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν όλες οι εικόνες έστω και μία φορά, έτσι ώστε να μπορέσουν να εξεταστούν και να συγκριθούν όλες μεταξύ τους. Εκ πρώτης όψεως τα αποτελέσματα φαίνονται σχεδόν ίδια σε όλες τις περιπτώσεις και παρόμοια με τις αρχικές εικόνες. Η ανωμαλία που εντοπίστηκε στις αρχικές εικόνες φαίνεται να τονίζεται χωρίς να παρουσιάζονται κάποιες νέες. Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 41 έως 52) παρουσιάζονται οι εικόνες όλων των έγχρωμων συνθέτων που δημιουργήθηκαν.



Εικόνα 41: Έγχρωμα σύνθετα 1-5 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης.



Εικόνα 42: Έγχρωμα σύνθετα 6-10 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης.



RGB Composite 11
 RED: REP
 GREEN: SARVI
 BLUE: TSAVI

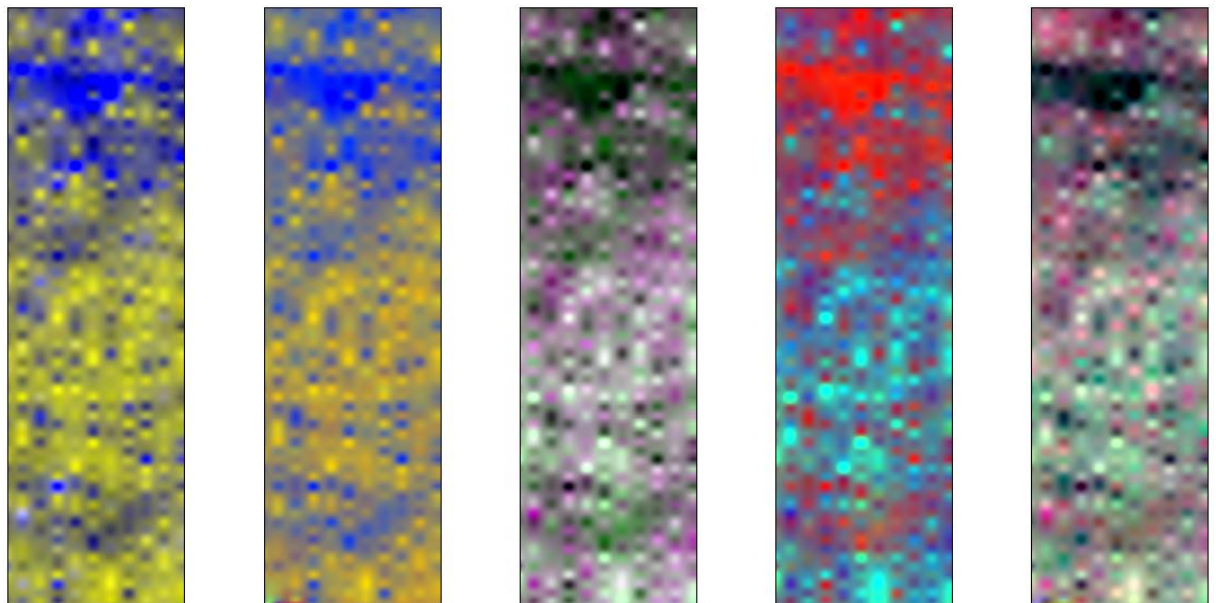
RGB Composite 12
 RED: NDVI
 GREEN: RDVI2
 BLUE: OSARVI

RGB Composite 13
 RED: SARVI
 GREEN: OSAVI
 BLUE: REP

RGB Composite 14
 RED: GEMI
 GREEN: NDVI1
 BLUE: TSAVI

RGB Composite 15
 RED: OSAVI
 GREEN: PVI
 BLUE: NDVI2

Εικόνα 43: Έγχρωμα σύνθετα 11-15 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης.



RGB Composite 16
 RED: OSARVI
 GREEN: OSAVI
 BLUE: SARVI

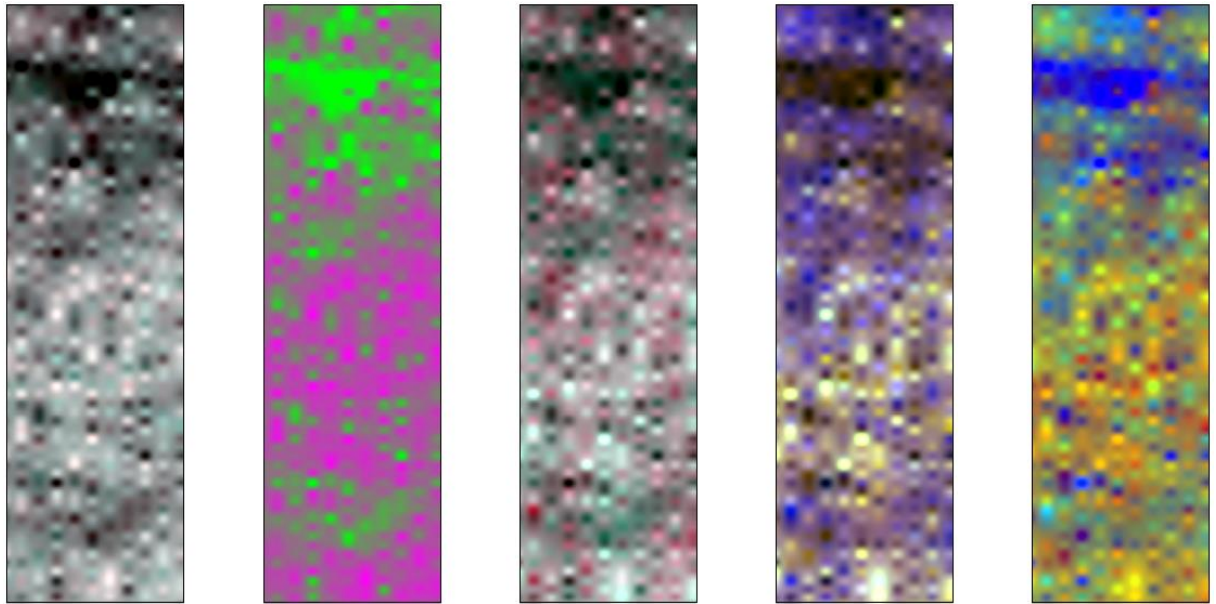
RGB Composite 17
 RED: TSAVI
 GREEN: G_NDVI
 BLUE: RVI

RGB Composite 18
 RED: NDVI
 GREEN: DVI
 BLUE: ARVI

RGB Composite 19
 RED: RVI
 GREEN: GEMI
 BLUE: NDVI2

RGB Composite 20
 RED: REP
 GREEN: RDVI
 BLUE: G_NDVI

Εικόνα 44: Έγχρωμα σύνθετα 16-20 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης.



RGB Composite 21
RED: NDVI2
GREEN: OSAVI
BLUE: TSAVI

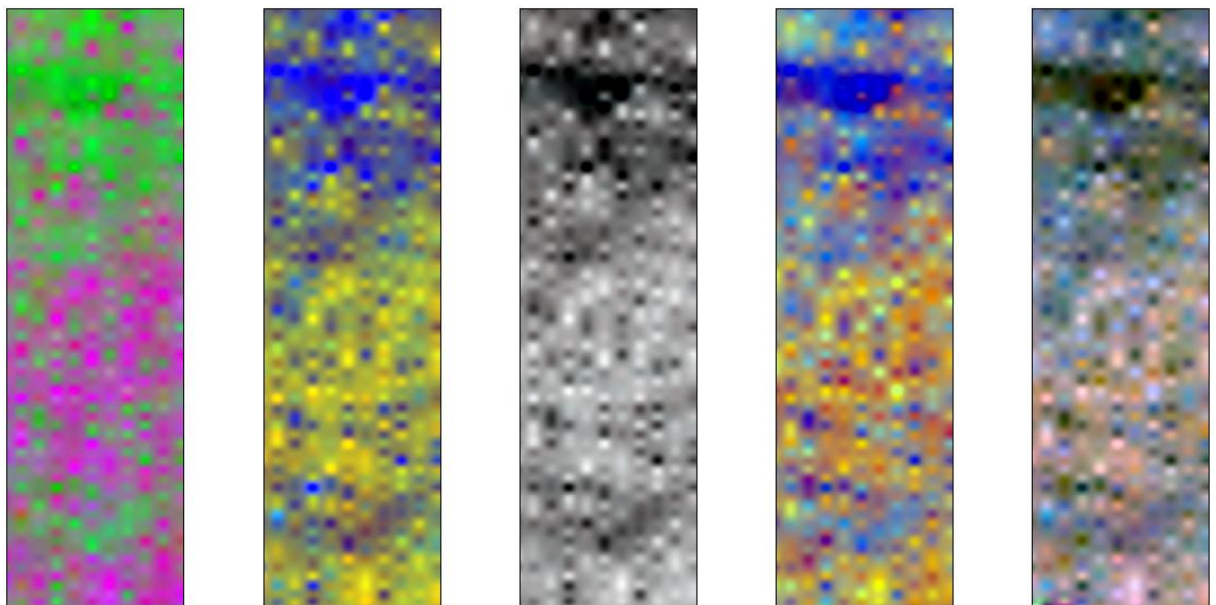
RGB Composite 22
RED: MSAVI
GREEN: RVI
BLUE: NDVI

RGB Composite 23
RED: OSAVI
GREEN: PVI
BLUE: RDVI

RGB Composite 24
RED: DVI
GREEN: GEMI
BLUE: REP

RGB Composite 25
RED: RDVI
GREEN: REP
BLUE: SARVI

Εικόνα 45: Έγχρωμα σύνθετα 21-25 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης.



RGB Composite 26
RED: NDVI1
GREEN: IRG
BLUE: RDVI2

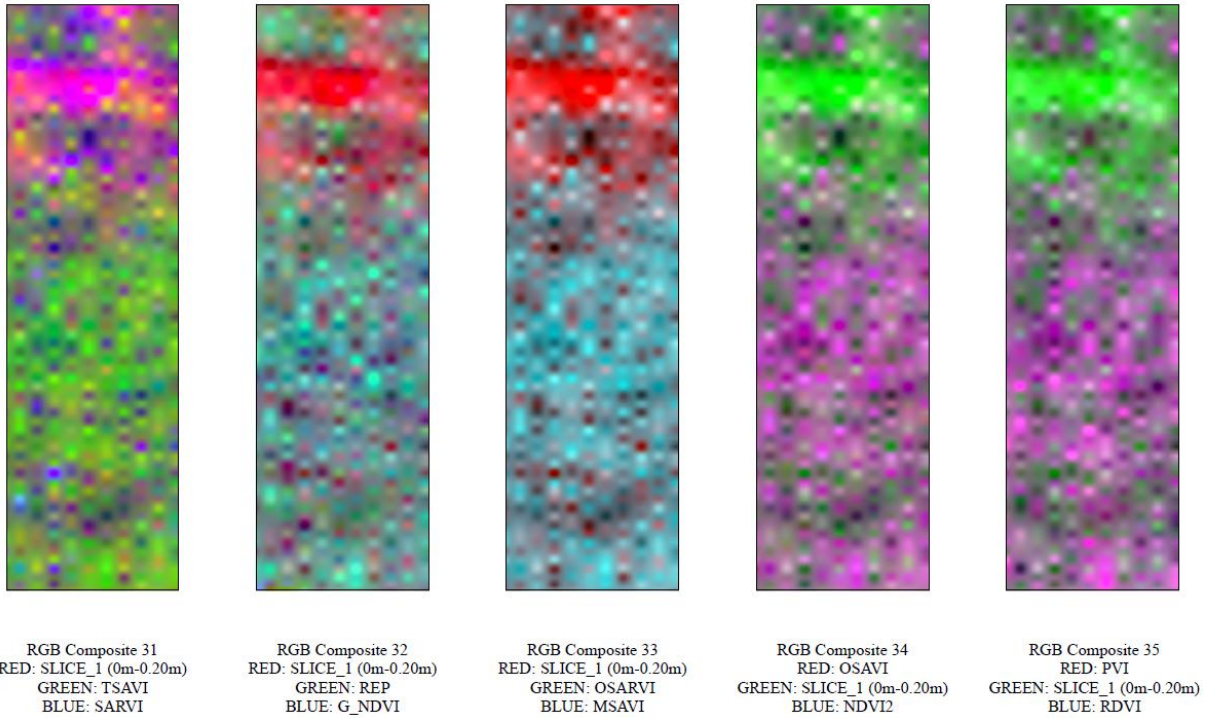
RGB Composite 27
RED: RDVI2
GREEN: OSAVI
BLUE: SARVI

RGB Composite 28
RED: TSAVI
GREEN: NDVI1
BLUE: OSAVI

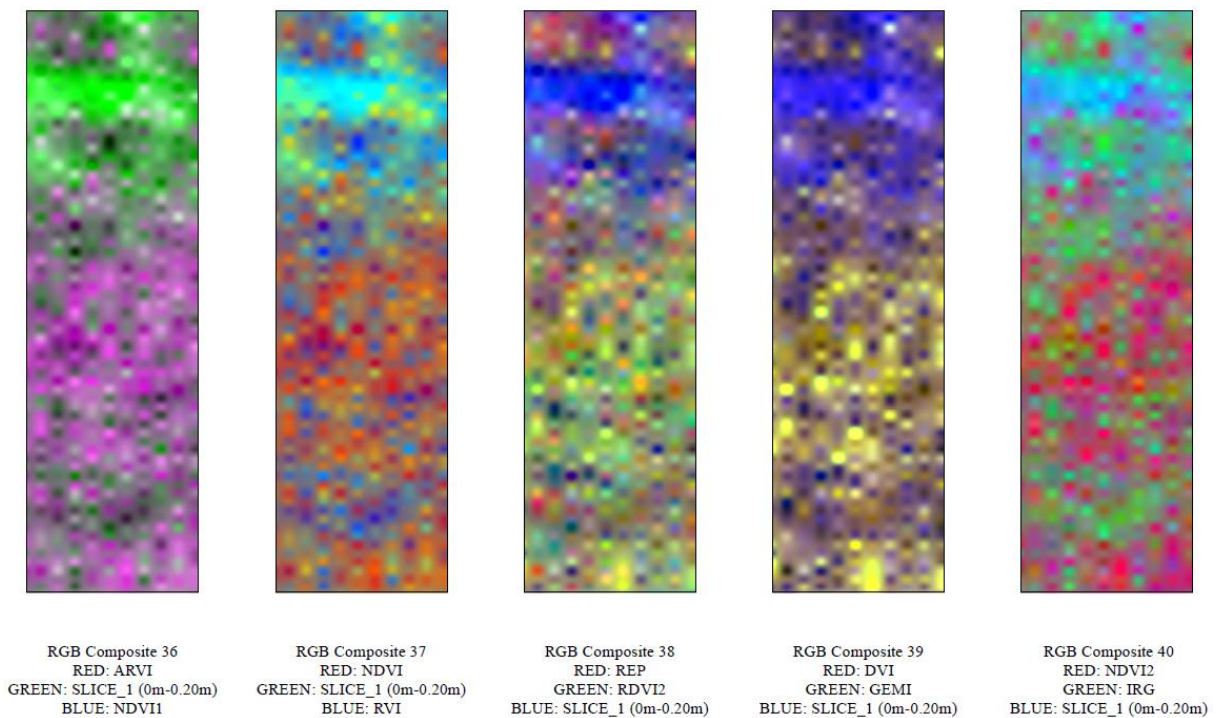
RGB Composite 29
RED: MSAVI
GREEN: REP
BLUE: IRG

RGB Composite 30
RED: RDVI2
GREEN: G_NDVI
BLUE: REP

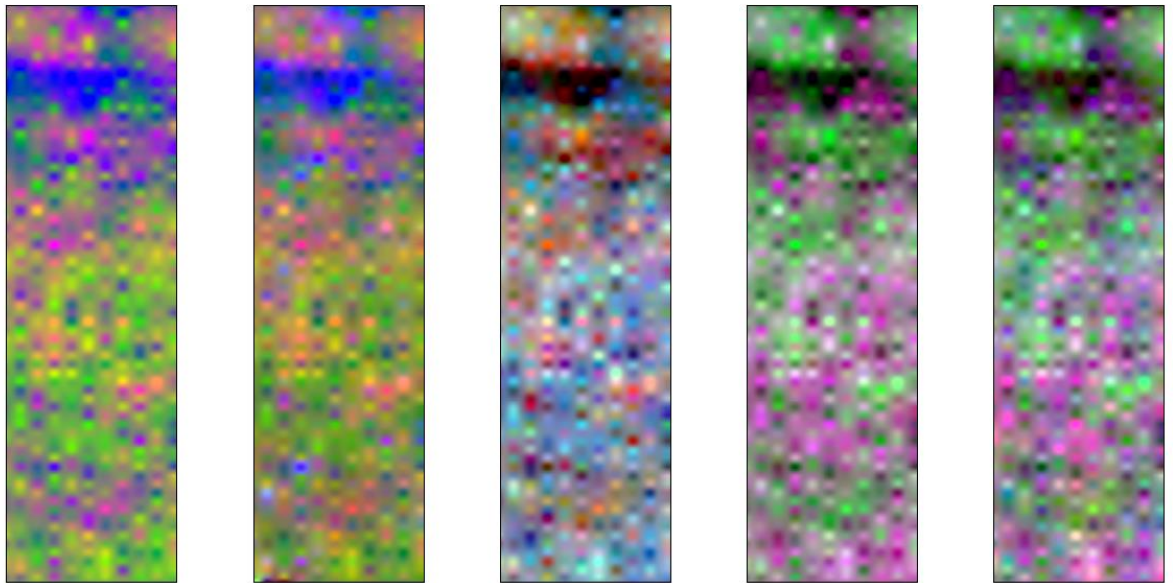
Εικόνα 46: Έγχρωμα σύνθετα 26-30 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης.



Εικόνα 47: Έγχρωμα σύνθετα 31-35 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0-0.20m.

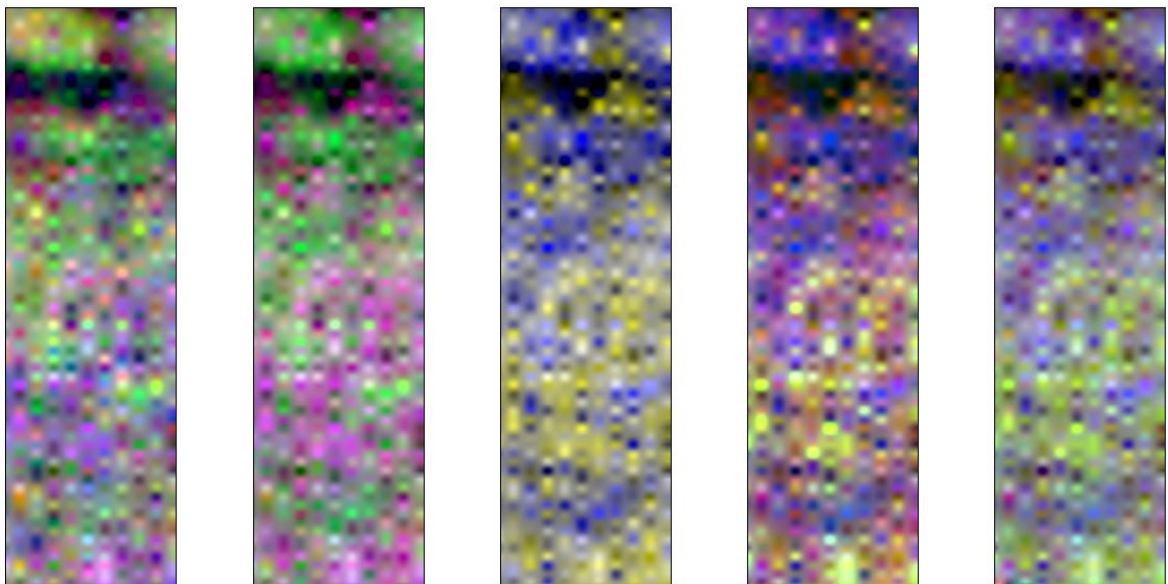


Εικόνα 48: Έγχρωμα σύνθετα 36-40 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0-0.20m.



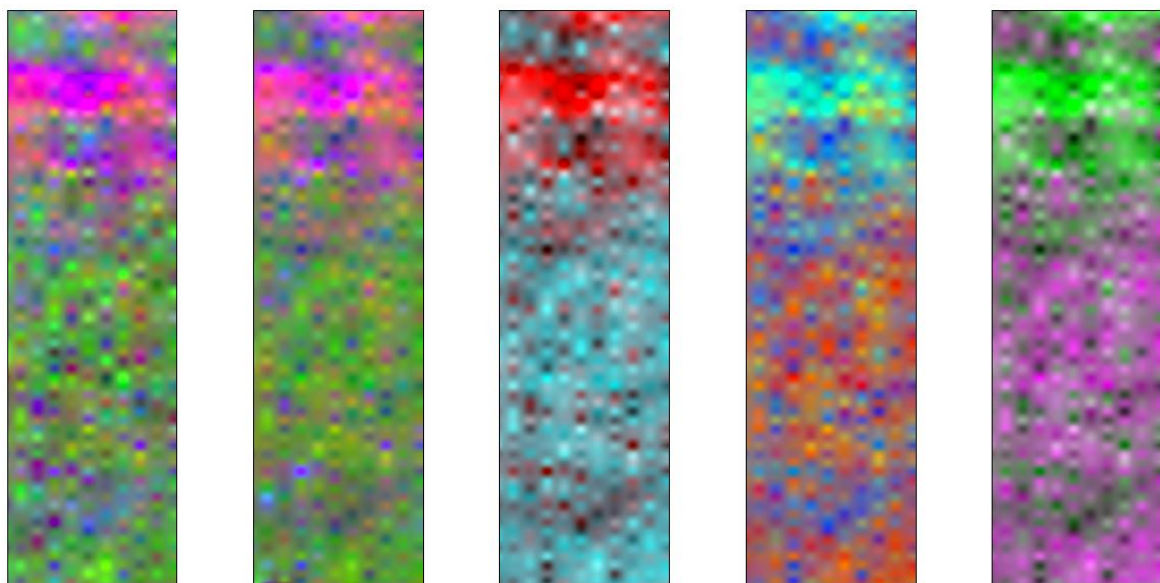
RGB Composite 41 RED: SLICE_2 (0.20m-0.40m) GREEN: TSAVI BLUE: RVI	RGB Composite 42 RED: SLICE_2 (0.20m-0.40m) GREEN: G_NDVI BLUE: SARVI	RGB Composite 43 RED: SLICE_2 (0.20m-0.40m) GREEN: REP BLUE: MSAVI	RGB Composite 44 RED: OSAVI GREEN: SLICE_2 (0.20m-0.40m) BLUE: NDVI2	RGB Composite 45 RED: PVI GREEN: SLICE_2 (0.20m-0.40m) BLUE: ARVI
---	--	---	---	--

Εικόνα 49: Έγχρωμα σύνθετα 41-45 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.20-0.40m.



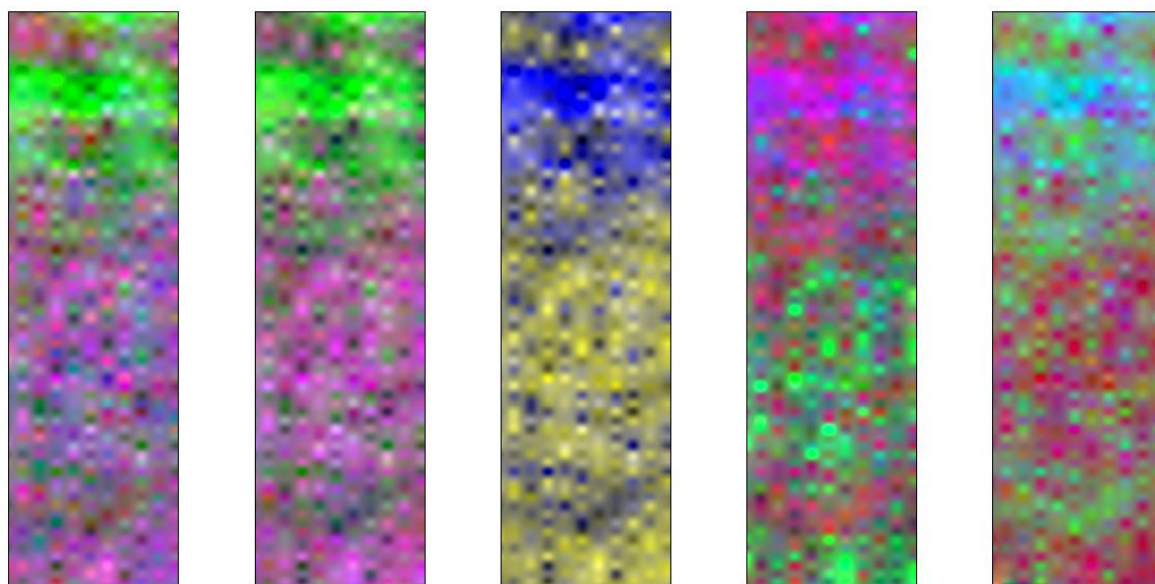
RGB Composite 46 RED: REP GREEN: SLICE_2 (0.20m-0.40m) BLUE: DVI	RGB Composite 47 RED: TSAVI GREEN: SLICE_2 (0.20m-0.40m) BLUE: RDVI	RGB Composite 48 RED: OSARVI GREEN: NDVI BLUE: SLICE_2 (0.20m-0.40m)	RGB Composite 49 RED: NDVI1 GREEN: GEMI BLUE: SLICE_2 (0.20m-0.40m)	RGB Composite 50 RED: G_NDVI GREEN: RDVI2 BLUE: SLICE_2 (0.20m-0.40m)
---	--	---	--	--

Εικόνα 50: Έγχρωμα σύνθετα 46-50 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.20-0.40m.



<p>RGB Composite 51 RED: SLICE_3 (0.40m-0.60m) GREEN: REP BLUE: RVI</p>	<p>RGB Composite 52 RED: SLICE_3 (0.40m-0.60m) GREEN: G_NDVI BLUE: SARVI</p>	<p>RGB Composite 53 RED: SLICE_2 (0.40m-0.60m) GREEN: TSAVI BLUE: MSAVI</p>	<p>RGB Composite 54 RED: OSAVI GREEN: SLICE_3 (0.40m-0.60m) BLUE: IRG</p>	<p>RGB Composite 55 RED: NDVI GREEN: SLICE_3 (0.40m-0.60m) BLUE: ARVI</p>
--	---	--	--	--

Εικόνα 51: Έγχρωμα σύνθετα 51-55 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.40-0.60m.

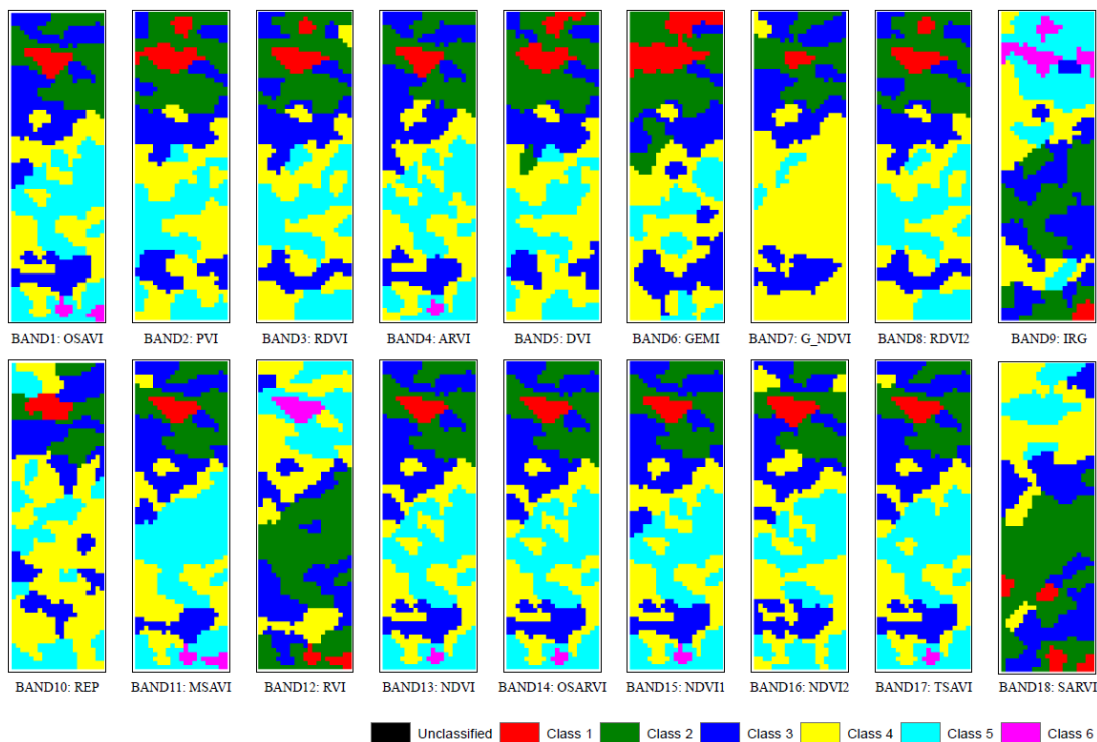


<p>RGB Composite 56 RED: REP GREEN: SLICE_3 (0.40m-0.60m) BLUE: TSAVI</p>	<p>RGB Composite 57 RED: TSAVI GREEN: SLICE_3 (0.40m-0.60m) BLUE: RDVI</p>	<p>RGB Composite 58 RED: OSARVI GREEN: NDVI BLUE: SLICE_3 (0.40m-0.60m)</p>	<p>RGB Composite 59 RED: IRG GREEN: GEMI BLUE: SLICE_3 (0.40m-0.60m)</p>	<p>RGB Composite 60 RED: G_NDVI GREEN: IRG BLUE: SLICE_3 (0.40m-0.60m)</p>
--	---	--	---	---

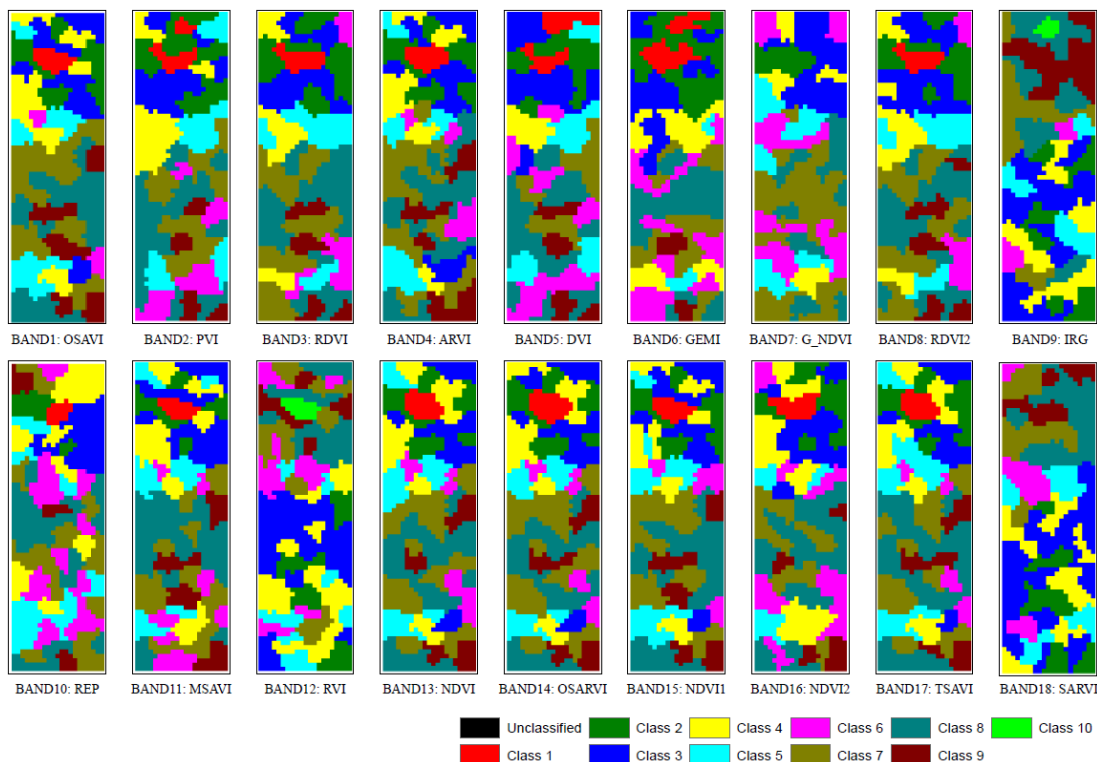
Εικόνα 52: Έγχρωμα σύνθετα 56-60 συνδυάζοντας τις εικόνες των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR για βάθος 0.40-0.60m.

4.2.2 Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

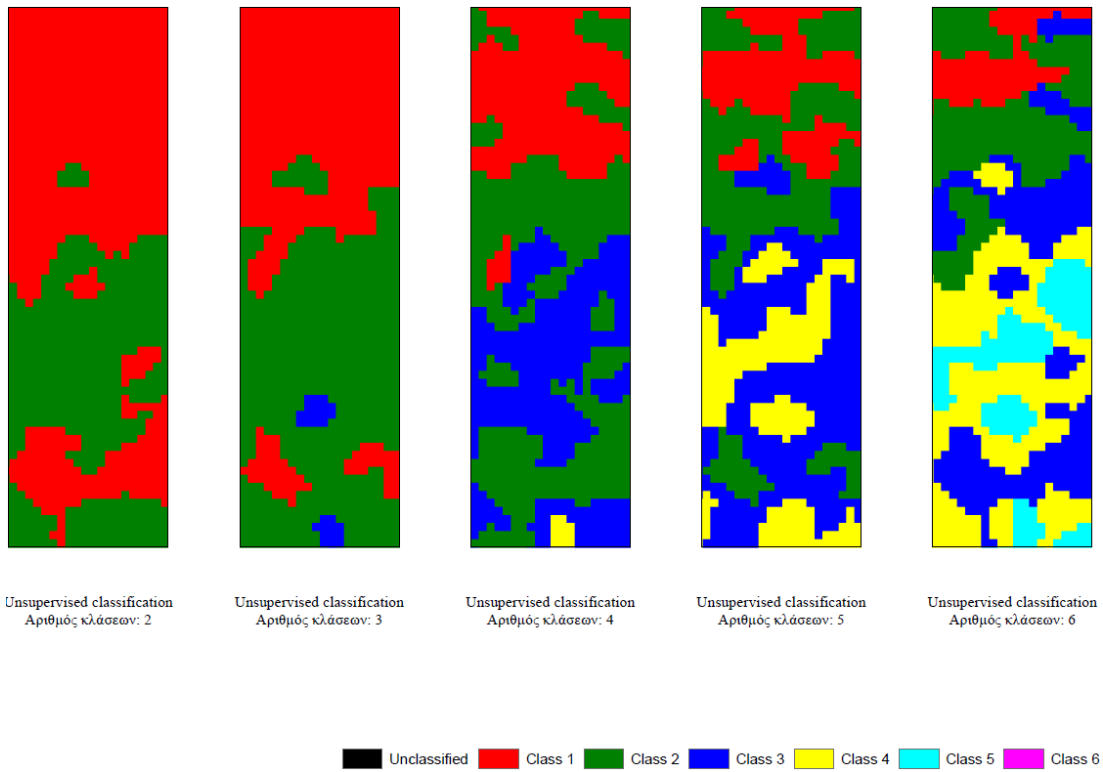
Η δεύτερη τεχνική ανάλυσης εικόνων που εφαρμόστηκε πάνω στις 18 εικόνες των δεικτών βλάστησης ήταν η ταξινόμηση, επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη. Αρχικά εφαρμόστηκε η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση η οποία ομαδοποιεί τα δεδομένα βάση στατιστικών μόνο χωρίς να χρειάζεται να θέσουμε περιοχές εκπαίδευσης. Εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε μια από τις 18 εικόνες των δεικτών βλάστησης αλλά και στην «γενική» εικόνα με τα 18 κανάλια (όλες οι εικόνες των δεικτών βλάστησης μαζί). Η εφαρμογή της έγινε μέσω του λογισμικού ENVI το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ISODATA για την εκτέλεση μιας μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (ISODATA unsupervised classification). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο αλγόριθμο, αρχικά υπολογίστηκαν τα κέντρα των κλάσεων που κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο. Στην συνέχεια με μια επαναληπτική διαδικασία ομαδοποιήθηκαν τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία, χρησιμοποιώντας τεχνικές που βασίζονται στην ελάχιστη απόσταση. Σε κάθε επανάληψη τα κέντρα των κλάσεων υπολογίζονταν ξανά αναγκάζοντας έτσι τα εικονοστοιχεία να ομαδοποιηθούν ξανά βάση των νέων αυτών κέντρων. Η διαδικασία της επανάληψης συνεχίστηκε μέχρι να εντοπιστούν τα βέλτιστα κέντρα. Στις εικόνες εφαρμόστηκαν πολλές μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις με διαφορετικό αριθμό κλάσεων κάθε φορά. Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 53 έως 56) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης ISODATA.



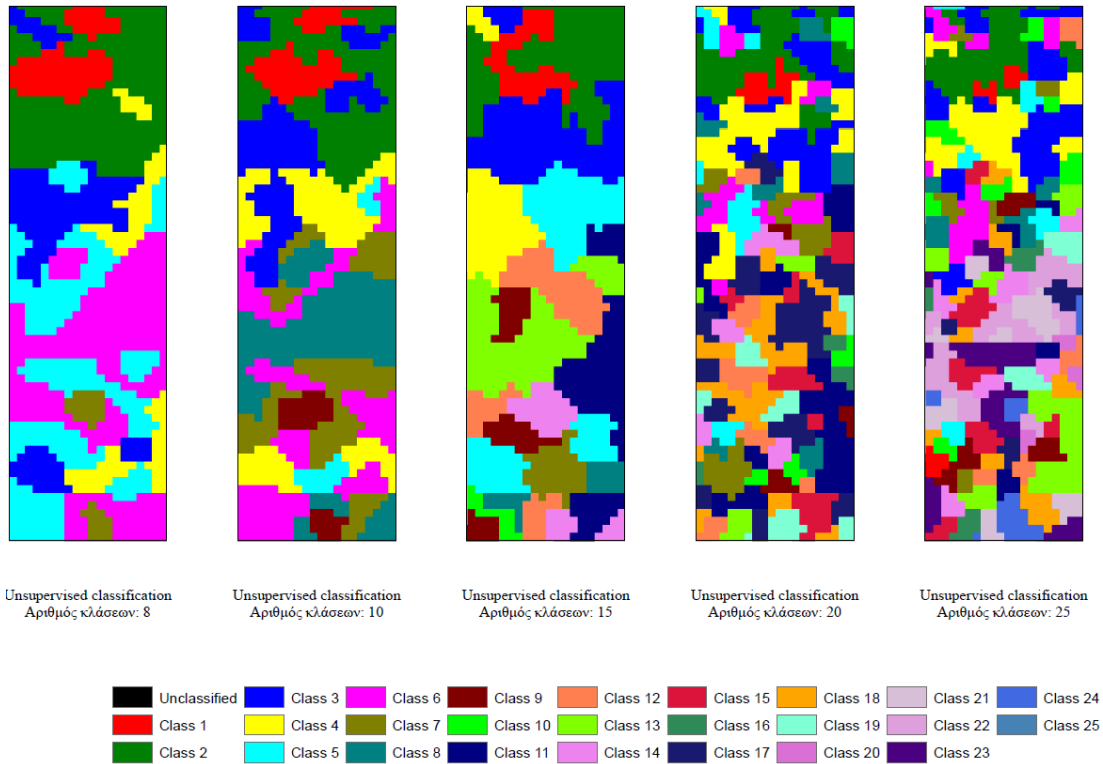
Εικόνα 53: Αποτέλεσμα της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης με 6 κλάσεις στις 18 εικόνες των δεικτών βλάστησης.



Εικόνα 54: Αποτέλεσμα της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης με 10 κλάσεις στις 18 εικόνες των δεικτών βλάστησης.



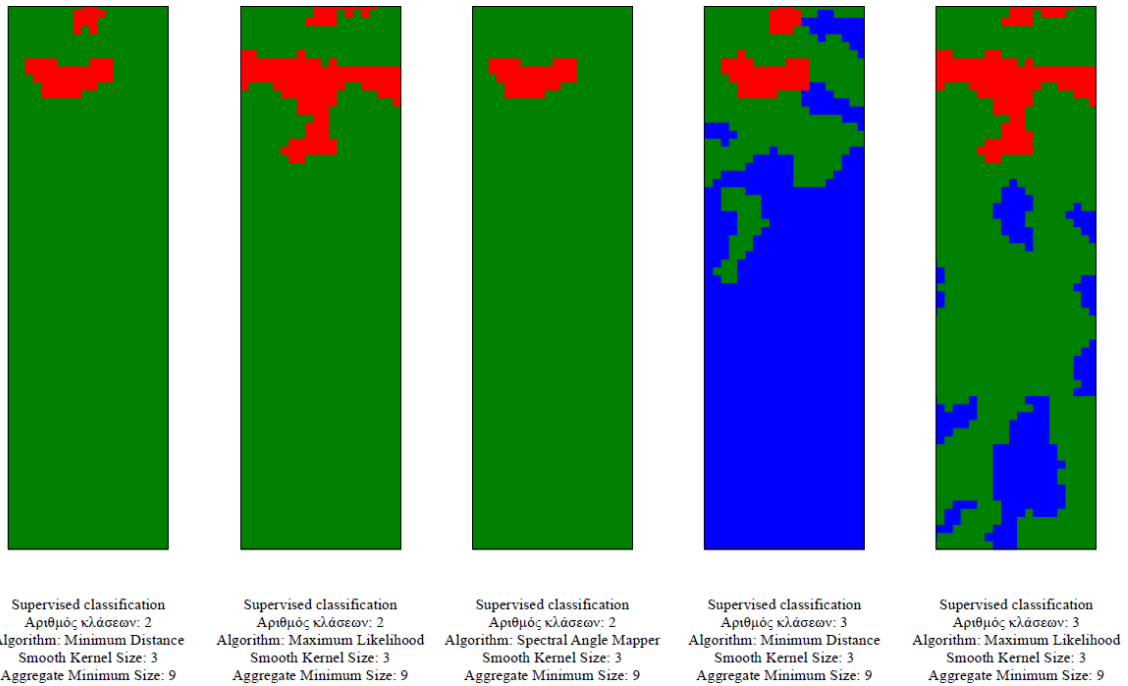
Εικόνα 55: Αποτελέσματα μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (2, 3, 4, 5 και 6 κλάσεις) στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.



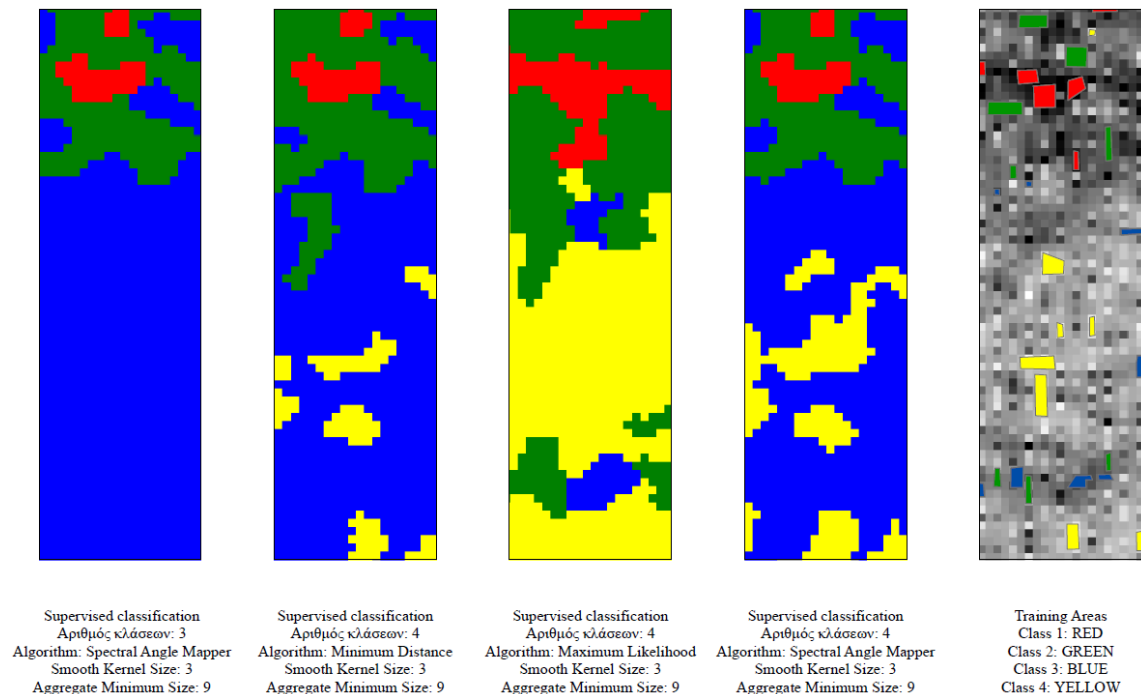
Εικόνα 56: Αποτελέσματα μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (8, 10, 15, 20 και 25 κλάσεις) στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.

4.2.3 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Ακολούθως μετά την εφαρμογή των μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων, στην εικόνα των 18 καναλιών εφαρμόστηκαν επιβλεπόμενες ταξινομήσεις. Με τη βοήθεια πάλι του λογισμικού ENVI εκτελέστηκαν συνολικά εννέα διαφορετικές επιβλεπόμενες ταξινομήσεις με τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αριθμών κλάσεων και τρεις διαφορετικούς αλγόριθμους ταξινόμησης σε κάθε περίπτωση αριθμού κλάσεων. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο Maximum Likelihood, ο Minimum Distance και ο Spectral Angle Mapper. Ο αλγόριθμος Maximum Likelihood υποθέτει ότι τα στατιστικά στοιχεία κάθε κλάσης σε κάθε κανάλι κατανέμονται κανονικά. Υπολογίζει την πιθανότητα κάθε εικονοστοιχείου να ανήκει σε μια συγκεκριμένη κλάση και αντιστοιχεί κάθε εικονοστοιχείο στην κλάση με την υψηλότερη πιθανότητα. Ο δεύτερος αλγόριθμος, ο Minimum Distance, χρησιμοποιεί τα μέσα διανύσματα κάθε κλάσης για να υπολογίσει την Ευκλείδεια απόσταση τους από κάθε εικονοστοιχείο και στην συνέχεια ταξινομεί το κάθε εικονοστοιχείο στην πλησιέστερη του κλάση. Τέλος ο τρίτος αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε, ο Spectral Angle Mapper, υπολογίζει την φασματική ομοιότητα μεταξύ δύο φασμάτων υπολογίζοντας τη μεταξύ τους γωνιά και αντιμετωπίζοντας τα ως διανύσματα μέσα σε ένα χώρο ίσο διαστάσεων με τον αριθμό των καναλιών της εικόνας στην οποία εφαρμόζεται. Στην συνέχεια συγκρίνει τη γωνιά μεταξύ των μέσων διανυσμάτων εκπαίδευσης με τα διανύσματα του κάθε εικονοστοιχείου μέσα στο πολυδιάστατο χώρο και ταξινομεί τα εικονοστοιχεία στην κλάση με την μικρότερη γωνιά. Στις εικόνες 57 και 58 φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της επιβλεπόμενης ταξινόμησης καθώς και οι περιοχές εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κλάση.



Εικόνα 57: Αποτελέσματα επιβλεπόμενων ταξινομήσεων στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 3 διαφορετικούς αλγόριθμους.



Εικόνα 58: Αποτελέσματα επιβλεπόμενων ταξινομήσεων στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 3 διαφορετικούς αλγόριθμους και περιοχές εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κλάση.

4.2.4 Support Vector Machine Classification

Τα τελευταίο είδος ταξινομήσεων που εφαρμόστηκε στην εικόνα των δεικτών βλάστησης ήταν επιβλεπόμενες ταξινομήσεις με τη χρήση των SVMs. Οι συγκεκριμένες ταξινομήσεις έγιναν επίσης με τη βοήθεια του λογισμικού ENVI. Εκτελέστηκαν συνολικά δώδεκα διαφορετικές ταξινομήσεις με τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αριθμών κλάσεων και τέσσερις διαφορετικοί τύποι μαθηματικών μοντέλων Kernel σε κάθε περίπτωση αριθμού κλάσεων. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Linear, το Polynomial, το Radial Basis Function και το Sigmoid. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν διαφορετικοί μαθηματικοί τρόποι παρουσίασης της συνάρτησης Kernel η όποια προσδίδει το βάρος στα κοντινά σημεία δεδομένων κατά την εκτίμηση των κλάσεων. Οι εξισώσεις των τεσσάρων αυτών μαθηματικών μοντέλων είναι οι εξής:

$$\text{Linear:} \quad K(x_i, x_j) = x_i^T x_j \quad (1)$$

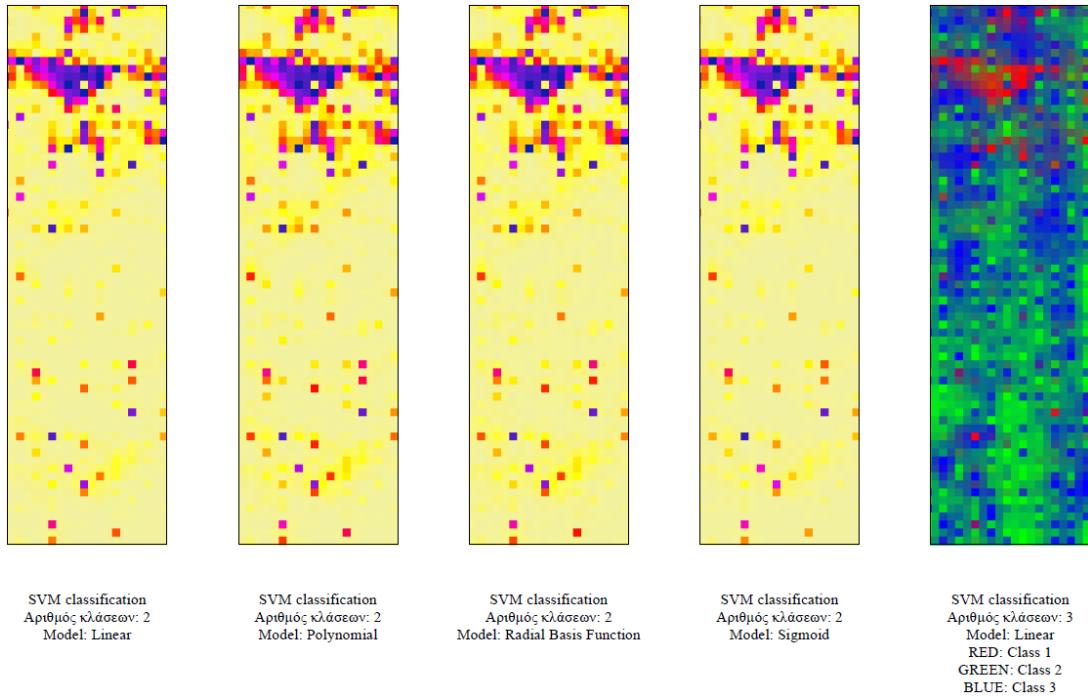
$$\text{Polynomial:} \quad K(x_i, x_j) = (g x_i^T x_j + r)^d, \quad g > 0 \quad (2)$$

$$\text{RBF:} \quad K(x_i, x_j) = \exp(-g \|x_i - x_j\|^2), \quad g > 0 \quad (3)$$

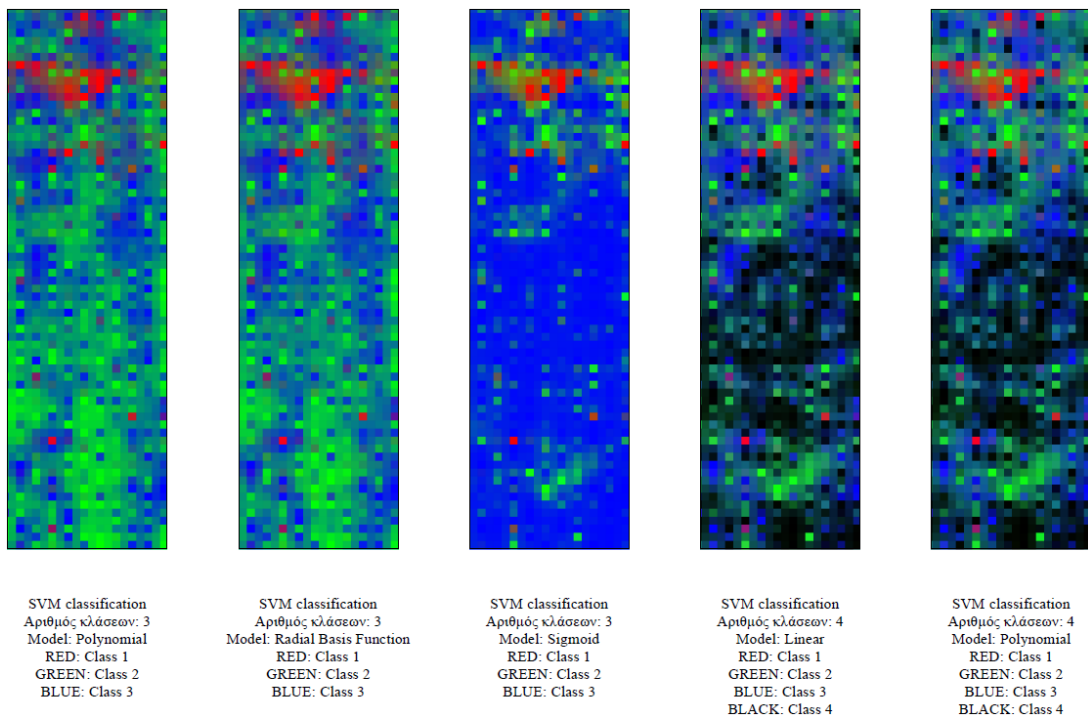
$$\text{Sigmoid:} \quad K(x_i, x_j) = \tanh(g x_i^T x_j + r) \quad (4)$$

Όπου: g είναι ο όρος γάμμα (gamma term) της συνάρτησης Kernel σε όλες τις περιπτώσεις εκτός του Linear, d είναι ο όρος του βαθμού του πολυωνύμου της συνάρτησης Kernel στην περίπτωση του Polynomial Kernel και r είναι η μεροληψία (bias term) της συνάρτησης Kernel στις περιπτώσεις του Polynomial και Sigmoid Kernels.

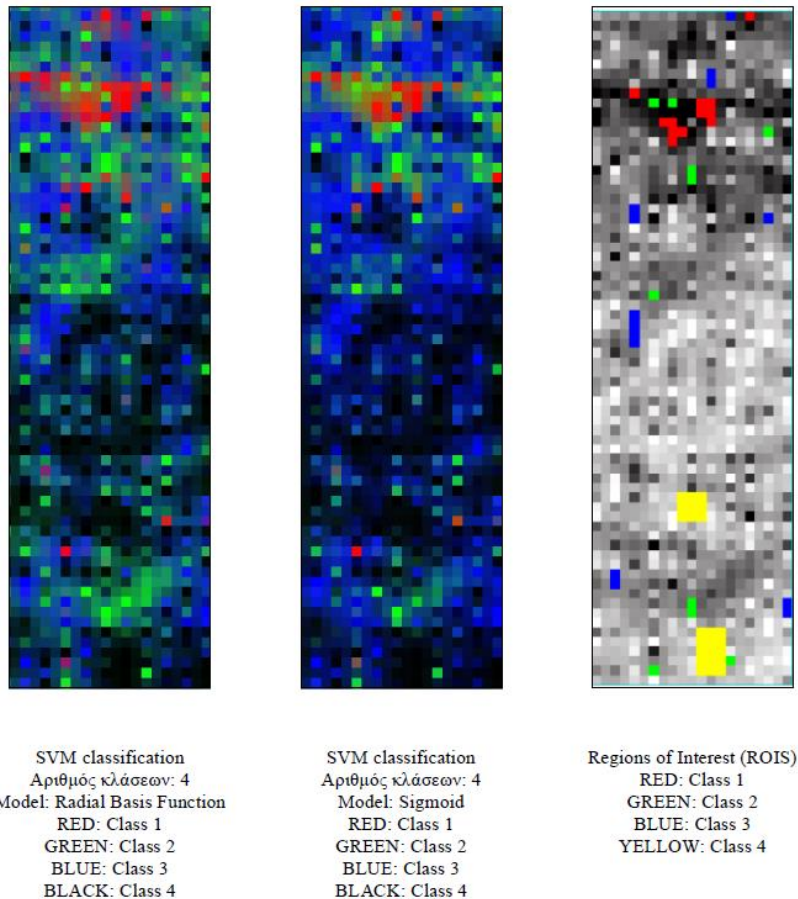
Στις εικόνες 59, 60 και 61 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τη βοήθεια των SVMs καθώς και οι περιοχές εκπαίδευσης (ROIs: regions of interest) που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κλάση.



Εικόνα 59: Αποτελέσματα ταξινόμησης χρησιμοποιώντας SVMs στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 4 διαφορετικούς αλγόριθμους.



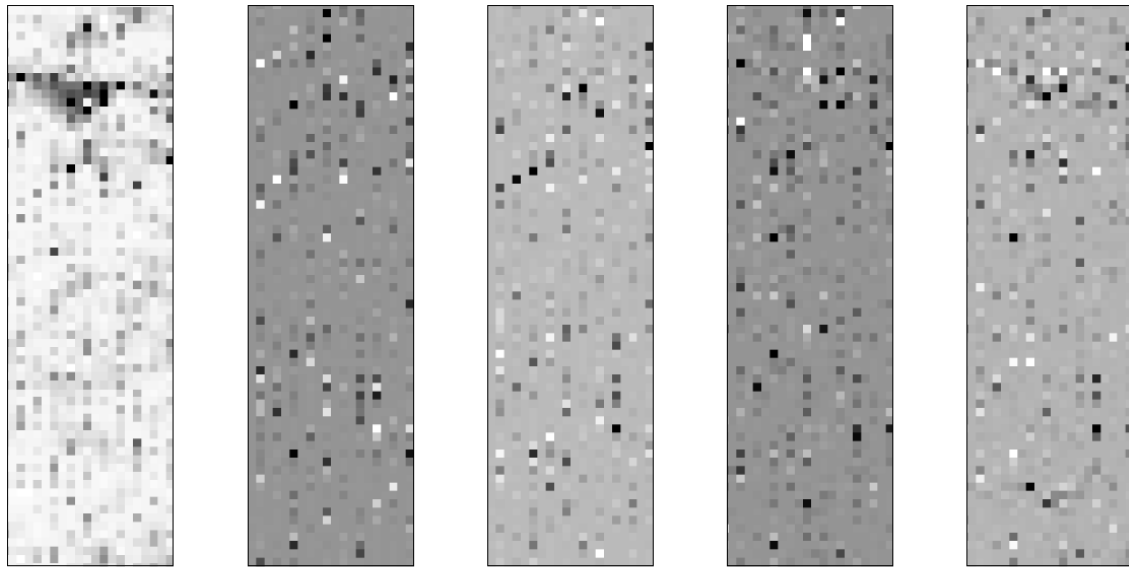
Εικόνα 60: Αποτελέσματα ταξινόμησης χρησιμοποιώντας SVMs στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 4 διαφορετικούς αλγόριθμους.



Εικόνα 61: Αποτελέσματα ταξινόμησης χρησιμοποιώντας SVMs στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης με 4 διαφορετικούς αλγόριθμους και περιοχές εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε κλάση.

4.2.5 RX Anomaly Detection

Στις εικόνες 62, 63 και 64 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγόριθμου RXD και UTD με διάφορους συνδυασμούς πάνω στην εικόνα με τα 18 κανάλια που δημιουργήθηκε με τις εικόνες των δεικτών βλάστησης. Συγκεκριμένα εκτελέστηκαν 15 διαφορετικοί συνδυασμοί εφαρμόζοντας τους τρεις αλγόριθμους RXD, UTD και RXD-UTD σε καθολικό επίπεδο και σε τοπικό επίπεδο με local Kernel size 3, 5, 9 και 25. Ο αλγόριθμος Uniform Target Detector (UTD) δουλεύει παρόμοια με τον αλγόριθμο RXD με τη διαφορά ότι αντί να χρησιμοποιεί ένα δείγμα διάνυσματος από τα δεδομένα χρησιμοποιεί ένα μοναδιαίο διάνυσμα ενώ ο RXD-UTD αποτελεί μια υβριδική μέθοδος από τον συνδυασμό των μεθόδων RXD και UTD.



RX Anomaly Detection
Algorithm: RXD
Mean source: Global

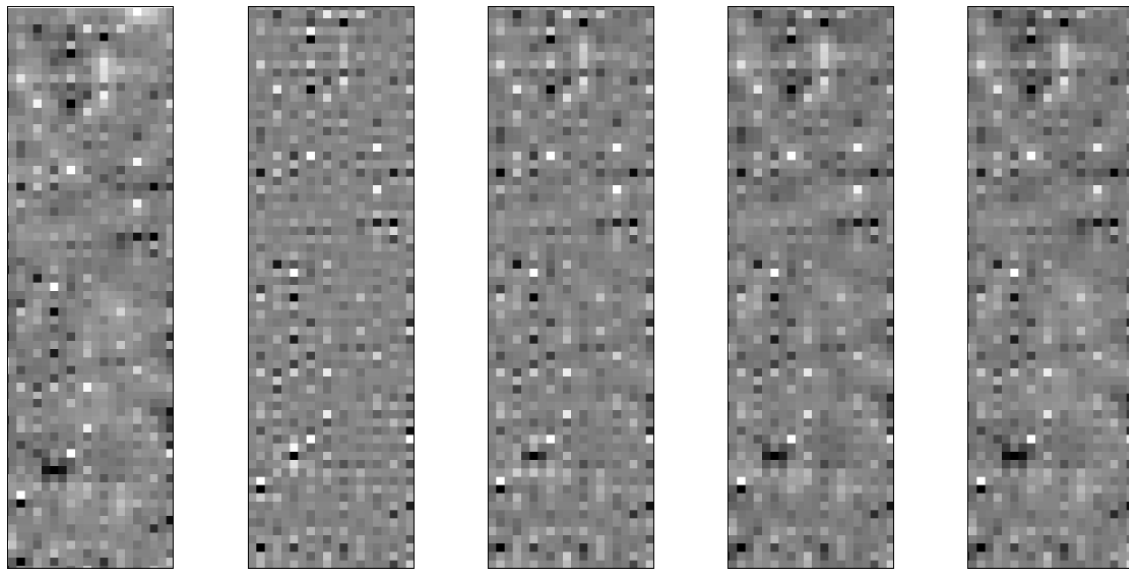
RX Anomaly Detection
Algorithm: RXD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 3

RX Anomaly Detection
Algorithm: RXD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 5

RX Anomaly Detection
Algorithm: RXD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 9

RX Anomaly Detection
Algorithm: RXD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 25

Εικόνα 62: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου RXD στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης



RX Anomaly Detection
Algorithm: UTD
Mean source: Global

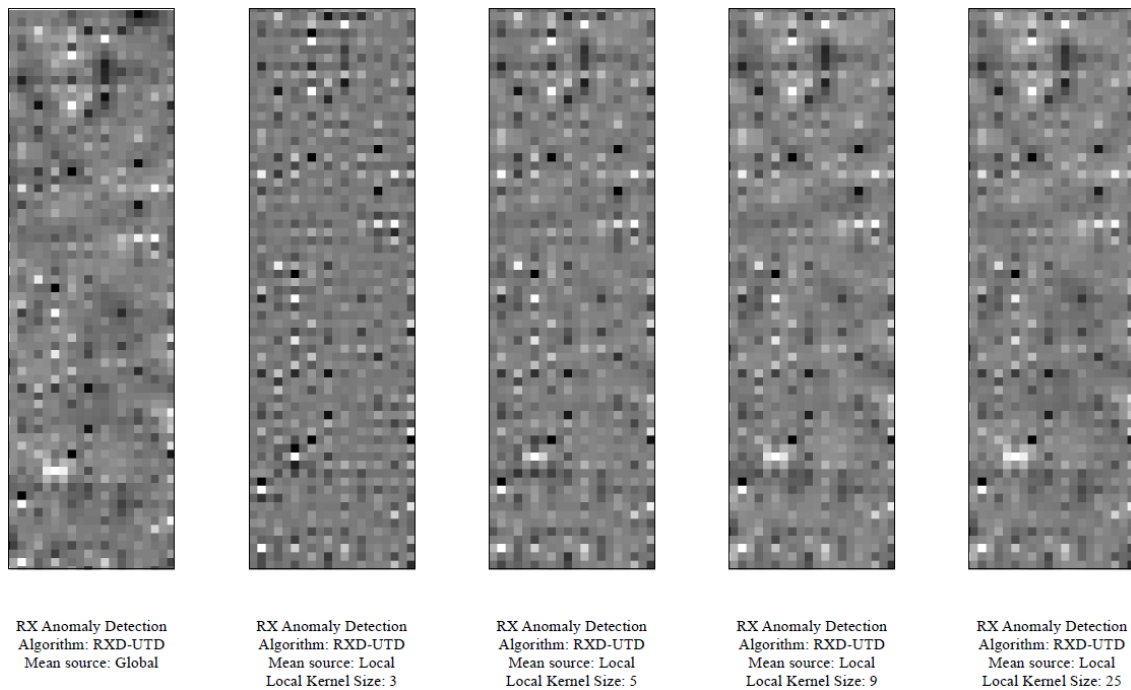
RX Anomaly Detection
Algorithm: UTD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 3

RX Anomaly Detection
Algorithm: UTD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 5

RX Anomaly Detection
Algorithm: UTD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 9

RX Anomaly Detection
Algorithm: UTD
Mean source: Local
Local Kernel Size: 25

Εικόνα 63: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου UTD στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστησης.



Εικόνα 64: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγόριθμου RXD-UTD στην εικόνα με τα 18 κανάλια των δεικτών βλάστης.

4.3 Αποτελέσματα εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων ήταν η απεικόνιση μερικών από τα καλύτερα μοντέλα παλινδρόμησης που παρουσιάστηκαν κατά τη διαδικασία της προσπάθειας συσχέτισης των μετρήσεων του GPR με τις μετρήσεις του φασματοραδιόμετρου, μέσα από διάφορα μαθηματικά μοντέλα, πάνω στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye που καλύπτει την περιοχή μελέτης. Η μελέτη ασχολήθηκε συγκεκριμένα με το δείκτη βλάστησης SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index) ο οποίος σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα παρουσίασε τα μοντέλα με τις υψηλότερες τιμές συντελεστή προσδιορισμού R^2 . Αρχικά απεικονίστηκε ο δείκτης SARVI πάνω στην δορυφορική εικόνα GeoEye εφαρμόζοντας την παρακάτω εξίσωση στις τιμές των εικονοστοιχείων της (Agariou, 2012):

$$\text{SARVI} = (1+0.5) (p\text{NIR} - p\text{rb}) / (p\text{NIR} + p\text{rb} + 0.5) \quad (1)$$

$$p\text{rb} = p\text{red} - \gamma (p\text{blue} - p\text{red}) \quad (2)$$

όπου ο συντελεστής $\gamma = 0.5$

Ακολούθως εντοπίστηκαν τα βέλτιστα μαθηματικά μοντέλα που συνδέουν το δείκτη SARVI με τις μετρήσεις του GPR που αντιστοιχούν σε βάθος από 0-0.60m. Λεπτομερέστερα, για τις μετρήσεις που αντιστοιχούν σε βάθος 0-0.20m το γραμμικό μαθηματικό μοντέλο έδωσε τιμή συντελεστή προσδιορισμού R^2 ίση με 0.353 σε σχέση με 121 μετρήσεις από τις συνολικά 769 που συλλέγηκαν με το GPR. Οι 121 αυτές μετρήσεις αντιστοιχούν σε τιμές -4 έως -1 της δεύτερης κύριας συνιστώσας που προέκυψε από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR στα πρώτα τρία στρώματα του υπεδάφους (βάθος 0-0.60m). Αντίστοιχα για τις ίδιες 121 μετρήσεις, οι τιμές τους οι οποίες αντιστοιχούν στις μετρήσεις του GPR σε βάθος 0.20-0.40m παρουσίασαν με το γραμμικό μαθηματικό μοντέλο ένα συντελεστή προσδιορισμού R^2 ίσο με 0.343 ενώ για τις τιμές που αντιστοιχούν στις μετρήσεις του GPR σε βάθος 0.40-0.60m ίσο με 0.434. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις των τριών αυτών γραμμικών μοντέλων:

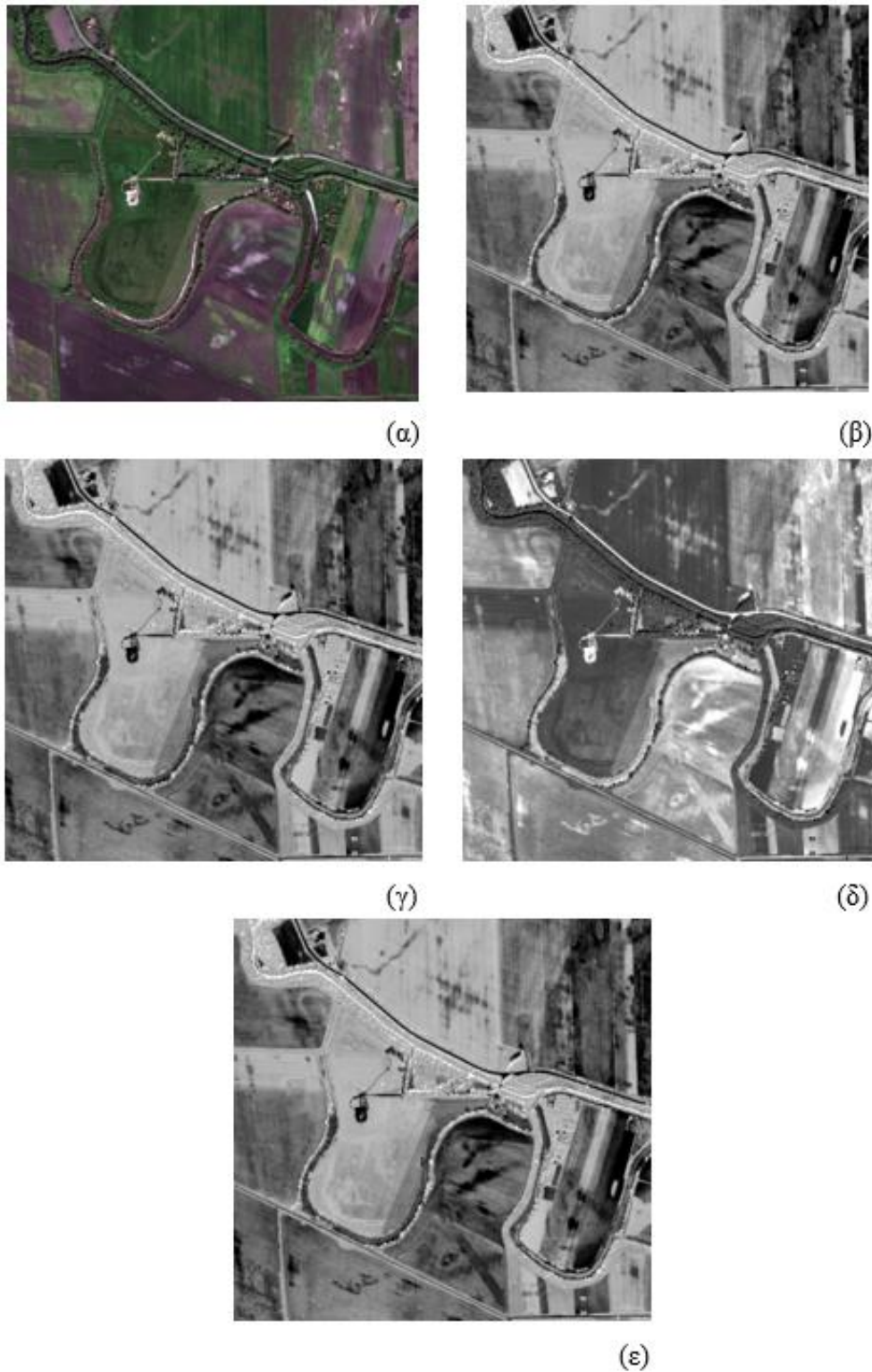
$$\text{Τομή 1 (0-0.20m): } Y = 1.550 + (1.409E-005 * X) \quad (1)$$

$$\text{Τομή 2 (0.20-0.40m): } Y = 1.483 + (-3.351E-005 * X) \quad (2)$$

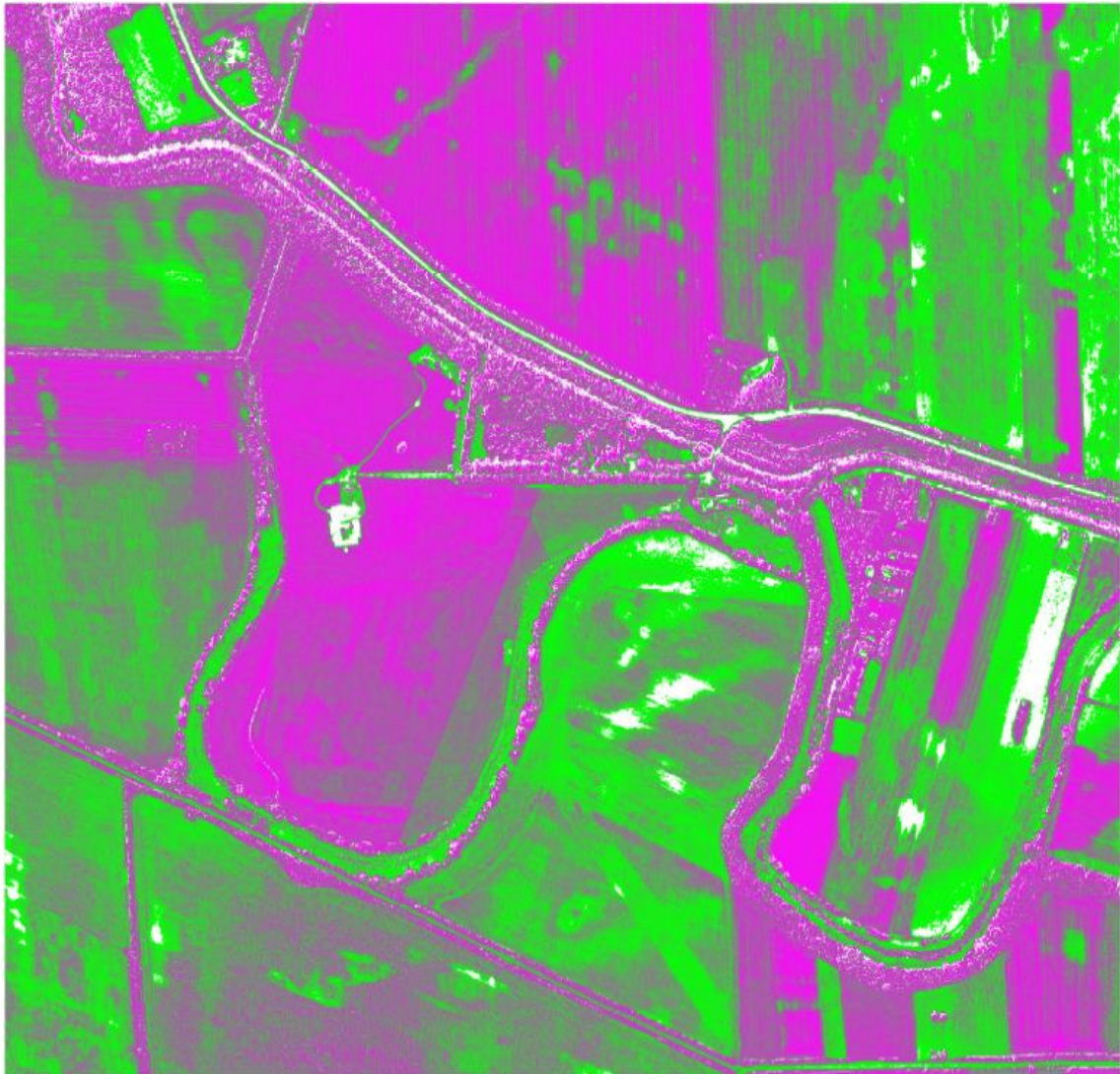
$$\text{Τομή 3 (0.40-0.60m): } Y = 1.510 + (3.858E-005 * X) \quad (3)$$

όπου Y οι τιμές του δείκτη βλάστησης SARVI και X οι τιμές των αντίστοιχων μετρήσεων του GPR στα αντίστοιχα βάθη.

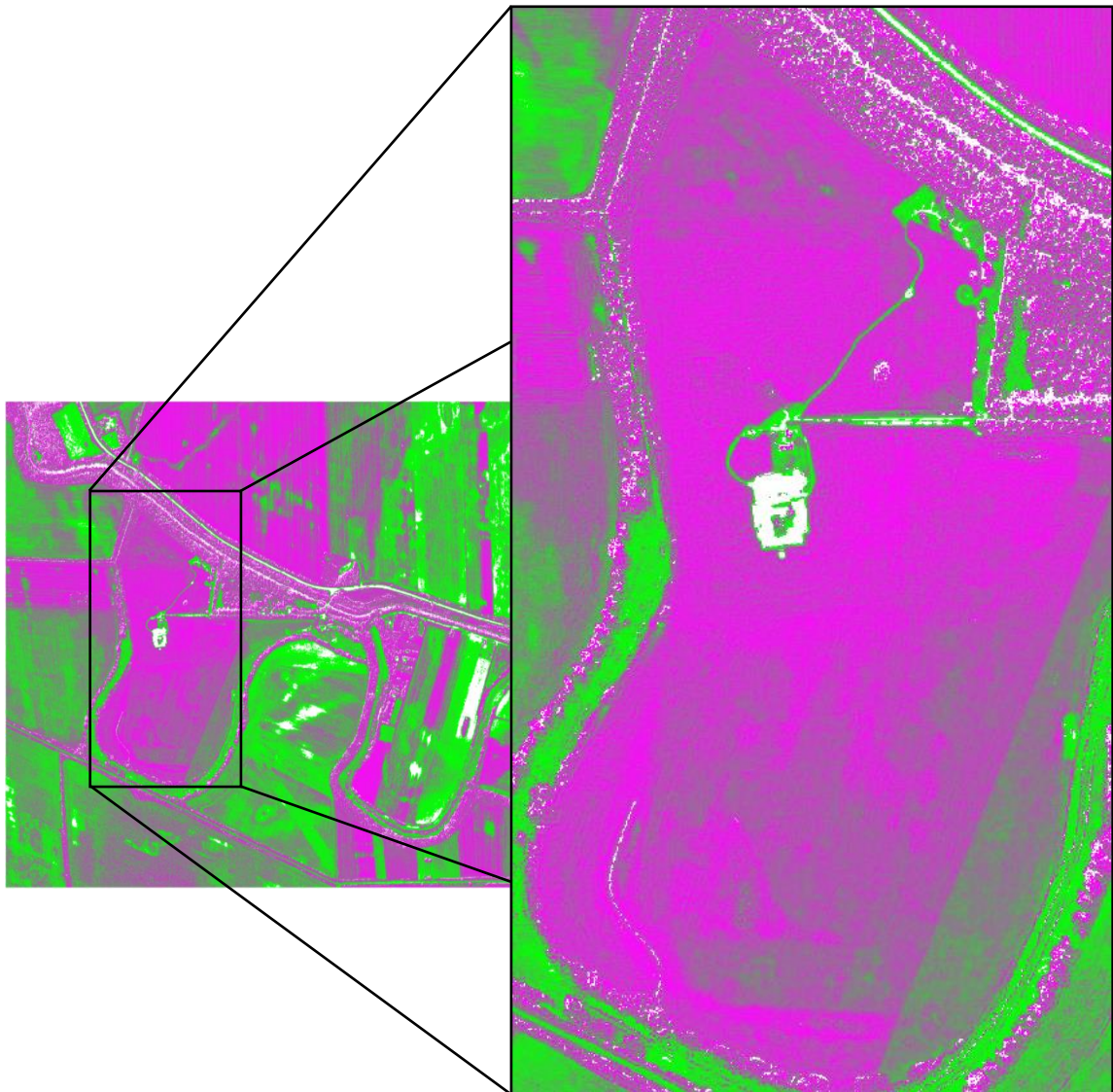
Για την απεικόνιση των τριών αυτών μοντέλων στην εικόνα GeoEye έπρεπε πρώτα οι εξισώσεις να λυθούν ως προς X και ακολούθως να εφαρμοστούν στην εικόνα του δείκτη SARVI θέτοντας ως Y τις τιμές των εικονοστοιχείων της. Παρόλο που υπήρχαν πολύ καλύτερα μοντέλα, λόγω της πολυπλοκότητας των εξισώσεων τους δεν μπόρεσαν να εφαρμοστούν στην εικόνα του SARVI ή έδιναν πολύ αρνητικά αποτελέσματα (μαύρες εικόνες). Για το λόγο αυτό επιλέγηκε ένα απλό μαθηματικό μοντέλο για κάθε περίπτωση όπως το γραμμικό (Linear). Τα μοντέλα εφαρμόστηκαν ξεχωριστά στην εικόνα του SARVI δημιουργώντας έτσι τρεις νέες εικόνες οι οποίες στην συνέχεια ενώθηκαν σε μια νέα εικόνα με τρία διαφορετικά κανάλια. Η επεξεργασία τους έγινε μέσω των λογισμικών ENVI και ArcMap. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγόριθμων που αναφέρθηκαν προηγουμένως στην εικόνα του δείκτη βλάστησης SARVI και το έγχρωμο σύνθετο (RGB) της εικόνας που δημιουργήθηκε από την ένωση των τριών εικόνων που προέκυψαν σε μια νέα εικόνα. (Εικόνες 65, 66 και 67)



Εικόνα 65: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye με ανάλυση 50cm η οποία καλύπτει την περιοχή Vésztó-Mágor Tell. (α) Έγχρωμο σύνθετο RGB, (β) δείκτης SARVI, (γ-ε) αποτελέσματα εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στις τιμές των εικονοστοιχείων της εικόνας του δείκτη SARVI τα οποία τον συσχετίζουν με τις μετρήσεις του GPR σε βάθη 0-20m, 0.20-0.40m και 0.40-0.60m αντίστοιχα.



Εικόνα 66: Έγχρωμο σύνθετο (R (Band 3:Εικόνα 65ε) - G (Band 2:Εικόνα 65δ) - B (Band 1:Εικόνα 65γ)) της εικόνας η οποία δημιουργήθηκε από την ένωση των τριών νέων εικόνων που προέκυψαν από την εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στην εικόνα του δείκτη βλάστησης SARVI.



Εικόνα 67: Εστίαση στην περιοχή ενδιαφέροντος.

5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Λαμβάνοντας υπόψη το σκοπό της μελέτης, την συγχώνευση τηλεπισκοπικών δεδομένων για την ανίχνευση υπεδάφινων αρχαιολογικών καταλοίπων, και τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν, όπως το αν μπορεί να υπάρξει μια θετική συσχέτιση μεταξύ δεδομένων από GPR, φασματοραδιόμετρο και πολυφασματικές εικόνες, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούμε να πούμε ότι έχει γίνει μια μεγάλη προσπάθεια που παρόλες τις αρκετές αποτυχίες της υπήρξαν και κάποια ελάχιστα θετικά αποτελέσματα που υποστηρίζουν θετικά τον συγκεκριμένο σκοπό και ερωτήματα.

Σε μια παρόμοια πρόσφατη μελέτη που έχει γίνει από τους Agariou et al. (2017), έχει εντοπιστεί ότι παρά την απλότητα του, το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης (Linear)

είναι το καταλληλότερο μοντέλο για την συγχώνευση των μετρήσεων του φασματοραδιόμετρου και του GPR που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της δορυφορικής εικόνας GeoEye. Παρουσίασε τα πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα που εντοπίστηκαν, με το Pearson coefficient (R) να φτάνει σχεδόν μέχρι το 50%, παρέχοντας έτσι πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα ειδικά κατά την επεξεργασία των διάφορων υπερφασματικών δεικτών. Η εν λόγω μελέτη συμφωνεί μαζί με τη μελέτη αυτή επαληθεύοντας τα ευρήματα της μέσα από την επεξεργασία των δεδομένων που εκπόνησε και τα αποτελέσματα που παρουσίασε. Σε αντίθεση όμως με αυτή, τα δεδομένα έχουν εξεταστεί με κάποια διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης, χρησιμοποιώντας όμως λιγότερους δείκτες βλάστησης, και με τεχνικές ανάλυσης εικόνων που δεν είχαν εφαρμοστεί ξανά. Επίσης κάποια νέα ευρήματα έχουν εντοπιστεί τα οποία ενθαρρύνουν περαιτέρω την έρευνα για την απάντηση στα συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι σχολιασμοί των αποτελεσμάτων που ακολουθούν υποδεικνύουν τις σημαντικές νέες παρατηρήσεις έχουν προκύψει μέσα από τη διαφορετική προσέγγιση που επέλεξε η υφιστάμενη μελέτη για την επεξεργασία των δύο διαφορετικών αυτών σετ δεδομένων και της δορυφορικής εικόνας GeoEye που καλύπτει την περιοχή μελέτης.

5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης

Όσον αφορά την επεξεργασία που έχει γίνει με τα μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης και τους δείκτες βλάστησης, μελετώντας τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει φαίνεται ότι δεν είναι και τόσο ικανοποιητικά. Παρόλο που έχουν εντοπιστεί κάποιες πολύ πιο μεγάλες συσχετίσεις μεταξύ των δυο διαφορετικών αυτών σετ δεδομένων σε σύγκριση με την παρόμοια μελέτη που έχει γίνει, τα αποτελέσματα εξακολουθούν να μην είναι τα επιθυμητά. Ο λόγος είναι επειδή οι συγκεκριμένες αυτές συσχετίσεις αφορούν ένα μικρό αριθμό του δείγματος των μετρήσεων που έχουν συλλεγεί στην περιοχή μελέτης, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία τους. Υπάρχουν όμως κάποιες παρατηρήσεις που αξίζει να σημειωθούν.

Ξεκινώντας από τα μαθηματικά μοντέλα, το κυβικό μοντέλο (Cubic) φαίνεται να είναι το βέλτιστο για τη δημιουργία μιας ισχυρής συσχέτισης μεταξύ των δύο αυτών σετ δεδομένων. Ξεχώρισε σε όλο το στάδιο της επεξεργασίας δίνοντας τις υψηλότερες

συσχετίσεις σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις που έχουν εξεταστεί. Το μοντέλο Quadratic παρουσίασε επίσης αρκετά καλές συσχετίσεις και σε αρκετές φορές ίδιους συντελεστές προσδιορισμού (R^2) με το μοντέλο Cubic. Παρά την απλότητα του, όπως και στην μελέτη των Agariou et al. (2017), αρκετά καλές συσχετίσεις δημιουργήθηκαν και μέσω του γραμμικού μοντέλου (Linear). Όσο για το μοντέλο Inverse, παρόλο που έχει παρουσιάσει μια από τις ισχυρότερες συσχετίσεις που έχουν προκύψει, και συγκεκριμένα την υψηλότερη συσχέτιση που έχει εντοπιστεί μεταξύ των δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR που αντιστοιχούν σε βάθος από 0-0.20m, στις πλείστες περιπτώσεις έδωσε τις πιο χαμηλές συσχετίσεις από όλα τα μοντέλα.

Συνεχίζοντας με τους δείκτες βλάστησης, ο REP ήταν αυτός που ξεχώρισε περισσότερο από τους υπόλοιπους. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις παρουσίαζε τους πιο υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού (R^2). Ακόμη και στις περιπτώσεις που κάποιοι άλλοι δείκτες βλάστησης υπερτερούσαν τα αποτελέσματα του δεν διέφεραν και πολύ από αυτούς. Μέσα όμως από την διαφορετική προσέγγιση που ακολούθησε η υφιστάμενη μελέτη για την επεξεργασία των μετρήσεων ξεχώρισαν και κάποιοι άλλοι δείκτες βλάστησης. Ο GREEN NDVI παρουσίασε τους πιο υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού R^2 κατά τη διαδικασία του διαχωρισμού των μετρήσεων βάση των τριών κύριων συνιστωσών που προέκυψαν από την εφαρμογή του PCT στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil. Παράλληλα ο SARVI παρουσίασε τους πιο υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού R^2 κατά τη διαδικασία του διαχωρισμού των μετρήσεων βάση των τριών κύριων συνιστωσών που προέκυψαν από την εφαρμογή του PCT στις μετρήσεις του GPR σε βάθος από 0 έως 0.60m. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 έφτασε σχεδόν μέχρι το 50%, για αρκετό ποσοστό των μετρήσεων, παρέχοντας έτσι ακόμη πιο υποσχόμενα αποτελέσματα από πριν ειδικά κατά την επεξεργασία των διάφορων δεικτών βλάστησης.

5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων τεχνικών ανάλυσης εικόνας

Η απεικόνιση των 18 δεικτών βλάστησης και των μετρήσεων του GPR σε βάθος από 0 έως 0.60m σε εικόνες βοήθησε στην έρευνα ευκολύνοντας τον εντοπισμό τυχόν ανωμαλιών που μπορεί να υπάρχουν μέσα στην περιοχή μελέτης. Επίσης οι εικόνες αυτές πρόσφεραν μια καλύτερη μορφή ερμηνείας των μετρήσεων που συλλέχτηκαν. Παρακάτω σχολιάζονται τα αποτελέσματα των τεχνικών ανάλυσης εικόνων που εφαρμόστηκαν στις συνολικά 21 διαφορετικές εικόνες που δημιουργήθηκαν.

5.2.1 Έγχρωμα σύνθετα (RGB composites)

Η πιο απλή τεχνική που εφαρμόστηκε, τα έγχρωμα σύνθετα, παρά την αρκετή προσπάθεια που έγινε με τους διάφορους συνδυασμούς που εξετάστηκαν δεν απέδωσε κάποια ιδιαίτερα αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, εκ πρώτης όψεως τα αποτελέσματα φαίνονται σχεδόν ίδια σε όλες τις περιπτώσεις και παρόμοια με τις αρχικές εικόνες. Επίσης δεν παρουσιάστηκε κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στις εικόνες ούτε εντοπίστηκε κάτι διαφορετικό. Τα έγχρωμα σύνθετα απλά τόνισαν τις ανωμαλίες που ήδη είχαν εντοπιστεί μέσα από τις αρχικές εικόνες. Μερικοί όμως από αυτούς τους συνδυασμούς περισσότερο από τους υπόλοιπους. Οι συνδυασμοί αυτοί περιλαμβάνουν τους δείκτες TSAVI, GREEN_NDVI, RVI, GEMI, NDVI και MSAVI (έγχρωμα σύνθετα 17, 19 και 22). Δεν ξεχώρισε όμως ιδιαίτερα κάποιος από τους δείκτες λόγο του ότι οι εικόνες τους είναι αρκετά παρόμοιες μεταξύ τους.

5.2.2 Επιβλεπόμενη VS μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα της επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι καλύτερα. Στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση ομαδοποιώντας την εικόνα σε πάνω από 10 κλάσεις τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι πολύ αρνητικά καθώς δεν βοηθά καθόλου στο εντοπισμό κάποιας ανωμαλίας. Η εικόνα διαχωρίζεται σε πολύ μικρά κομμάτια που δεν βοηθούν στην κατανόηση και την ερμηνεία της ή σχετικά με το τι υπάρχει στην περιοχή. Στις περιπτώσεις με 5 έως 10 κλάσεις τα αποτελέσματα φαίνονται να είναι λίγο καλύτερα αφού ξεχωρίζουν την ανωμαλία που εντοπίζεται στο πάνω μέρος της περιοχής σε μια ξεχωριστή κλάση. Με την εφαρμογή της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε κάθε εικόνα των δεικτών βλάστησης ξεχωριστά το αποτέλεσμα σε κάθε εικόνα ήταν παρόμοιο με των άλλων. Οι εικόνες είχαν ταξινομηθεί με σχεδόν τις ίδιες περιοχές για κάθε κλάση εκτός από τους IRG, RVI και SARVI. Επίσης διαχωρίζοντας τις σε 6 κλάσεις τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα όσον αφορά την ερμηνεία τους από ότι σε 10 κλάσεις. Οι δυο μέθοδοι ταξινόμησης συγκρίθηκαν μεταξύ τους βάση των αποτελεσμάτων που έδωσαν με το διαχωρισμό της εικόνας των 18 καναλιών σε ίδιο αριθμό κλάσεων (2, 3 και 4 κλάσεις). Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση διαχωρίζει ορθά την περιοχή σε 2, 3 και 4 κλάσεις τοποθετώντας την ανωμαλία στο πάνω μέρος της περιοχής

σε μια ξεχωριστή κλάση. Αντίθετα, η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση δεν διαχώρισε σωστά σε μία διαφορετική κλάση την περιοχή της ανωμαλίας αυτής όπως φαίνεται στις αρχικές εικόνες. Η πρώτη κλάση (κόκκινη περιοχή), στην οποία ανήκει η ανωμαλία που βρίσκεται στο πάνω μέρος της περιοχής, μπορεί να χαρακτηριστεί ως η καταπονημένη βλάστηση ενώ οι υπόλοιπες κλάσεις ως η υγιής βλάστηση. Η περιοχή αυτή της καταπονημένης βλάστησης υποδηλώνει ότι κάτι μπορεί να υπάρχει στο υπέδαφος, πράγμα που υποστηρίζουν και οι μετρήσεις τους GPR. Όπως αναφέρουν οι Gyucha et al. (2012) σε παρόμοια μελέτη που διεξάγει στην ίδια περιοχή μελέτης, η συγκεκριμένη ανωμαλία που εντοπίζεται στις εικόνες των δεικτών βλάστησης και που ξεχωρίζει από τις ταξινομήσεις πιθανόν να είναι μέρος εντός χαντακιού που περιβάλλει την περιοχή του Vészto-Mágor Tell.

5.2.3 Support Vector Machine Classification

Η ταξινόμηση με τη χρήση των SVMs έδωσε σχετικά καλά αποτελέσματα αφού χώρισε τα εικονοστοιχεία της εικόνας στην περιοχή με την καταπονημένη βλάστηση σε μια ξεχωριστή κλάση. Με αριθμό κλάσεων 2 τα αποτελέσματα των 4 διαφορετικών μοντέλων που εφαρμόστηκαν φαίνονται να είναι ακριβώς τα ίδια. Το ίδιο περίπου ισχύει και στις περιπτώσεις όπου επιλέγηκε ο αριθμός των κλάσεων να είναι 3 και 4. Η μόνη διαφορά που παρουσιάζεται είναι στο αποτέλεσμα του μοντέλου Sigmoid, το οποίο φαίνεται να χωρίζει πιο ξεκάθαρα την περιοχή της καταπονημένης βλάστησης από τις υπόλοιπες κλάσεις. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των SMVs με τα αποτελέσματα της επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης δείχνουν να είναι καλύτερα, αφού ταξινομούν τα όρια της περιοχής της καταπονημένης βλάστησης (κλάση 1: κόκκινο χρώμα) ορθότερα, έχοντας βέβαια σαν μέτρο σύγκρισης τις αρχικές εικόνες.

5.2.4 RX Anomaly Detection

Οι εφαρμογή των αλγόριθμων RXD και UTD μέσω του εργαλείου RX Anomaly Detection του λογισμικού ENVI δεν επέφερα κάτι επιθυμητό. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα τους φαίνεται ότι όλα, εκτός ένα από αυτά, είναι πολύ αρνητικά καθώς δεν βελτιώνουν την ερμηνεία της εικόνας των δεικτών βλάστησης αλλά αντίθετα την χειροτερεύουν. Επίσης δεν εντοπίζουν ή τονίζουν κάποια ανωμαλία που υπάρχει στην περιοχή μελέτης. Η χρήση του εργαλείου RX Anomaly Detection αποτέλεσε μια

αποτυχημένη προσπάθεια που επέφερε μόνο ένα θετικό αποτέλεσμα (Εικόνα 62 Algorithm: RXD, Mean source: Global) το οποίο δεν μπορεί να θεωρηθεί και τόσο ικανοποιητικό.

5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye

Παρατηρώντας την εικόνα που δημιουργήθηκε μέσω των μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης δεν φαίνεται να ξεχωρίζει κάτι ιδιαίτερο ή να τονίζονται έντονα κάποιες ανωμαλίες που πιθανόν να υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Η εικόνα δεν αποτελεί ένα θετικό αποτέλεσμα που να βοηθά στον εντοπισμό υπεδάφιαρχαιολογικών καταλοίπων. Αντίθετα είναι ένα πολύ αρνητικό αποτέλεσμα, γεγονός που προφανώς οφείλεται στο ότι τα μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός από το ότι γενικά έχουν μικρό συντελεστή προσδιορισμού R^2 , σχετίζονται με ένα πολύ μικρό αριθμό του συνόλου των μετρήσεων του GPR. Επίσης πρέπει ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι το σύνολο αυτό των μετρήσεων του GPR αποτελεί στην ουσία ένα πολύ μικρό δείγμα μετρήσεων που αφορά μια πολύ μικρή περιοχή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Επιπλέον, το γεγονός ότι αυτές οι μετρήσεις έχουν ληφθεί κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες περιορίζει ακόμη περισσότερο τις πιθανότητες να προκύψει ένα θετικό αποτέλεσμα. Επομένως ήταν κάπως αναμενόμενο ότι το αποτέλεσμα δεν θα ήταν το επιθυμητό. Στην εικόνα του δείκτη SARVI επιλέγηκε να εφαρμοστούν απλά γραμμικά μαθηματικά μοντέλα λόγω του ότι είναι πιο εύκολα στην εφαρμογή τους και επειδή επίσης παρουσίαζαν καλύτερα αποτελέσματα από άλλα μοντέλα σε ό,τι αφορά την ερμηνεία του αποτελέσματος τους. Τα 3 μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολύ παρόμοια μεταξύ τους, πράγμα που φαίνεται και στα αποτελέσματά τους. Παραδείγματος χάρη η εικόνα του πρώτου (Εικόνα 65γ) και του τρίτου (Εικόνα 65ε) μοντέλου οπτικά δεν φαίνεται να έχουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους αλλά ούτε και σε σχέση με την εικόνα του δείκτη SARVI. Τα μαθηματικά μοντέλα παλινδρόμησης δεν απόδωσαν κάτι. Η εφαρμογή τους στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα GeoEye αποτέλεσε ακόμη μια αποτυχημένη προσπάθεια με αρκετά αρνητικά αποτελέσματα.

6 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της μελέτης μπορούν να εξαχθούν κάποια θετικά συμπεράσματα παρόλες τις πολλές αποτυχημένες προσπάθειες που έχουν γίνει. Τα τελικά αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μπορεί να υπάρξει μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του GPR και ορισμένων δεικτών βλάστησης μέσω ενός απλού μαθηματικού μοντέλου παλινδρόμησης όπως το κυβικό (Cubic). Η ισχυρή αυτή συσχέτιση ίσως να μην μπορεί να εντοπιστεί για όλες τις μετρήσεις του GPR που συλλέχτηκαν στην περιοχή μελέτης αλλά σίγουρα για ορισμένες από αυτές. Αρκεί βέβαια να διαχωριστούν σε ομάδες σωστά και να εξεταστούν ξεχωριστά από το σύνολο οι κατάλληλες ομάδες μετρήσεων.

Εφαρμόζοντας τον PCT στις μετρήσεις του GPR ή στους συντελεστές Crop mark, Vegetation και Soil της εικόνας GeoEye οι μετρήσεις του GPR μπόρεσαν να διαχωριστούν σε ομάδες οι οποίες συσχετίζονται αρκετά καλά με ορισμένους δείκτες βλάστησης. Επομένως η περαιτέρω διερεύνηση των μετρήσεων με τη χρήση του PCT ίσως να επιφέρει ακόμη πιο επιθυμητά αποτελέσματα. Ακόμη και αυτά τα αποτελέσματα όμως δυστυχώς δεν ικανοποιούν εντελώς τους στόχους της μελέτης. Παρόλα αυτά, το σύνολο των τελικών αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι η περαιτέρω ενίσχυση της οπτικής τηλεπισκόπησης για τον καλύτερο εντοπισμό αρχαιολογικών καταλοίπων είναι εφικτή.

Η προσέγγιση που επέλεξε να ακολουθήσει η παρούσα μελέτη για την επεξεργασία των δεδομένων οδήγησε σε κάποια αποτελέσματα μέσα από τα οποία δημιουργούνται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πρακτικές εφαρμογές. Αναμένεται στο μέλλον να εξετασθεί η συσχέτιση των μετρήσεων του GPR με περισσότερους από 6 δείκτες βλάστησης όπως έχει γίνει σε αυτή τη μελέτη. Επίσης η χρήση πιο σύνθετων μαθηματικών μοντέλων παλινδρόμησης στα οποία συμμετέχουν περισσότεροι από ένας δείκτες βλάστησης, ή και οι τιμές των καναλιών της δορυφορικής εικόνας, ίσως να καταλήξει στα επιθυμητά αποτελέσματα που αναζητούνται. Τέλος, περαιτέρω πειράματα αναμένονται να διεξαχθούν από τους Agariou et al. (2017) κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και με τη χρήση διαφορετικών σετ δορυφορικών δεδομένων. Αυτό θα επιτρέψει τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας τους να χρησιμοποιηθούν σαν βοηθητικά εργαλεία για τις αρχαιολογικές έρευνες χρησιμοποιώντας επίσης πιο προηγμένα μαθηματικά μοντέλα όπως τα machine learning και τα νευρωνικά δίκτυα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

1. Agapiou, A., Alexakis, D. D., Sarris, A., and Hadjimitsis, D. G. (2013). “Orthogonal equations of multi-spectral satellite imagery for the identification of un-excavated archaeological sites.” *Remote Sensing*, 5(12), 6560–6586.
2. Agapiou, A., Hadjimitsis, D. G., and Alexakis, D. D. (2012). “Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks.” *Remote Sensing*, 4(12), 3892–3919.
3. Agapiou A., Hadjimitsis D., Sarris A., Themistocleous K., and Papadavid G. (2010) “Hyperspectral Ground Truth Data for the Detection of Buried Architectural Remains.” In: Ioannides M., Fellner D., Georgopoulos A., Hadjimitsis D.G. (eds) *Digital Heritage. EuroMed 2010. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6436. Springer, Berlin, Heidelberg
4. Agapiou, A., Lysandrou, V., Sarris, A., Papadopoulos, N., and Hadjimitsis, D. (2017). “Fusion of Satellite Multispectral Images Based on Ground-Penetrating Radar (GPR) Data for the Investigation of Buried Concealed Archaeological Remains.” *Geosciences*, 7(2), 40.
5. Armesto-González, J., Riveiro-Rodríguez, B., González-Aguilera, D., and Rivas-Brea, M. T. (2010). “Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings.” *Journal of Archaeological Science*, Elsevier Ltd, 37(12), 3037–3047.
6. Asăndulesei, A. (2017). “Inside a Cucuteni Settlement: Remote Sensing Techniques for Documenting an Unexplored Eneolithic Site from Northeastern Romania.” *Remote Sensing*, 9, 41.

7. Ball, G. H., and Hall, D. J. (1965). "ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification." Menlo Park, United States: Stanford Research Institute (Office of Naval Research. Information Sciences Branch).
8. Chein-I Chang, and Shao-Shan Chiang. (2002). "Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(6), 1314–1325.
9. Corbeanu, R. M., Soegaard, K., Szerbiak, R. B., and McMechan, G. A. (2002) "Prediction of 3-D fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah." *Geophysics*, 67(5), 1495-1504.
10. Corbeanu, R. M., Soegaard, K., Szerbiak, R. B., Thurmond, J. B., McMechan, G. A., Wang, D., Snelgrove, S. H., Forster, C. B., and Menitove, A. (2001) "Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores and 3- D ground-penetrating radar: Example from the mid-Cretaceous Ferron Sandstone, east-central Utah." *AAPG BULLETIN*, 85(9), 1583– 1608.
11. Daniels, J.J. (2000). "Ground Penetrating Radar Fundamentals." Prepared as an appendix to a Report to the U.S.EPA, Region V, Department of Geological Sciences, The Ohio State University, Columbus
12. Davis, J.C. (2002). "Statistics and Data Analysis in Geology" 3rd Ed. John Wiley, New York Deuel, Leo. 1969. *Flights into Yesterday*. St. Martin's Press, New York.
13. Gaffney, C., Gater, J. and Ovenden, S. (2002). "The use of Geophysical Techniques in Archaeological Evaluations." Institute of Field Archaeologists, University of Reading, 2 Earley Gate, PO Box 239, Reading RG6 6AU, United Kingdom

14. Giardino, J.M. (2011). "A history of NASA remote sensing contributions to archaeology." *J. Archaeol. Sci.*, 38, 2003–2009
15. Gyucha, A., Yerkes, R. W., Parkinson, W. A., Sarris, A., Papadopoulos, N., Du, P. R., and Salisbury, R. B. (2012). "Settlement Nucleation in the Neolithic: A Preliminary Report of the Körös Regional Archaeological Project's Investigations at Szeghalom-Kovácsalom and Vésztő-Mágó." *Neolithic and Copper Age Between the Carpathians and the Aegean Sea: Chronologies and Technologies from the 6th to the 4th Millennium BCE*, (January), 129–142.
16. Khaleghia B., Khamisa A., O. Karraya F., N. Razavib S. (2013). "Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art." *Information Fusion*, 14, 28-44
17. Lasaponara, R., Leucci, G., Masini, N., Persico, R., and Scardozzi, G. (2016). "Towards an operative use of remote sensing for exploring the past using satellite data: The case study of Hierapolis (Turkey)." *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., 174, 148–164.
18. Lasaponara, R. and Masini, N. (2011). "Satellite remote sensing in archaeology: Past, present and future perspectives." *J. Archaeol. Sci.*, 38, 1995–2002
19. Limp, F. et al. (2006). "New Approaches to the Use and Integration of Multi-Sensor Remote Sensing for Historic Resource Identification and Evaluation." University of Arkansas, Center for Advanced Spatial Technologies, Fayetteville, Arkansas
20. MILTON, E. J. (1987) Review Article Principles of field spectroscopy, *International Journal of Remote Sensing*, 8:12, 1807-1827, DOI: 10.1080/01431168708954818

21. Mountrakis, G., Im, J., and Ogole, C. (2011). "Support vector machines in remote sensing: A review." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier B.V., 66(3), 247–259.
22. Myers, A. (2010). "Camp Delta, Google Earth and the ethics of remote sensing in archaeology." *World Archaeology*, 42(3), 455-467, DOI: 10.1080/00438243.2010.498640
23. Neubauer, W. and Eder-Hinterleitner, A. (1997). "Resistivity and magnetics of the Roman town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of Prospection Data." *Archaeological Prospection*, 4, 179-189
24. Parcak, S.H. (2009). "Satellite Remote Sensing for Archaeology." Routledge, Taylor and Francis Group, London, New York
25. Reed, I. S., and Yu, X. (1990). "Adaptive Multiple-Band CFAR Detection of an Optical Pattern with Unknown Spectral Distribution." *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 38(10), 1760–1770.
26. Richards, A. J. (2013). "Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction." Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Example and Some Practical Considerations, 173-176
27. Robinson, D. A. et al. (2008). "Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods." *Hydrol. Process.*, 22, 3604–3635, doi:10.1002/hyp.6963

28. Rowlands, A., and Sarris, A. (2007). "Detection of exposed and subsurface archaeological remains using multi-sensor remote sensing." *Journal of Archaeological Science*, 34(5), 795–803.
29. Schowengerdt, R.A. (1997). "Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing." Academic Press, San Diego
30. Siart, C., Eitel, B., and Panagiotopoulos, D. (2008). "Investigation of past archaeological landscapes using remote sensing and GIS: a multi-method case study from Mount Ida, Crete. *J. Archaeol. Sci.*, 35, 2918–2926.
31. Themistocleous, K., Agapiou, A., Cuca, B., and Hadjimitsis, D. G. (2015). "Unmanned aerial systems and spectroscopy for remote sensing applications in archaeology." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(7W3), 1419–1423.
32. Zhang, J. (2010) "Multi-source remote sensing data fusion: status and trends." *International Journal of Image and Data Fusion*, 1(1), 5-24, DOI: 10.1080/19479830903561035

Ελληνόγλωσση

1. Τζώτσος, Κ. Α. (2014). "Διερεύνηση τεχνικών κατάτμησης εικόνας, υπολογιστικής νοημοσύνης και εμπείρων συστημάτων στην Τηλεπισκόπηση." Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα
2. Λεονταράκης, Κ. (2011). "Γεωφυσικές Διασκοπήσεις εντός γεωτρήσεων και σηράγγων." Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα

3. Μόδης, Κ. και Σταματάκη, Σ. (2015). “Εισαγωγή στη μεταλλευτική έρευνα.” Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, Κεφάλαιο 4 Έμμεσες μέθοδοι αναζήτησης κοιτασμάτων
4. Παρχαρίδης, Ι. (2015). “Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης.” [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3960>
5. Σπανουδάκης, Ν. (2007). “Συμβολή των μεθόδων ταξινόμησης δεδομένων γεωραντάρ στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων.” Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. (2014). “Αμφίπολη: Αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης του λόφου Καστά.” [naftemporiki.gr](http://www.naftemporiki.gr), <<http://www.naftemporiki.gr/story/894881/amfipoli-apotelesmata-tis-geofusikis-diaskopisis-tou-lofou-kasta>> (Νοέμβριος 15, 2017)
7. (2017). “Γεωφυσικές Διασκοπήσεις.” ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ - ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ, <http://ims.forth.gr/index_main.php?c=50&l=g&d=7> (Οκτ. 28, 2017)