



**ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ
ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗ
ΠΡΟΪΣΤΟΡΙΚΗ ΘΕΣΗ ΜΑΓΟΥΛΑ ΖΕΡΕΛΙΑ ΤΟΥ
ΔΗΜΟΥ ΑΛΜΥΡΟΥ (2010)**



Dr. Απόστολος Σαρρής & Dr. Νίκος Παπαδόπουλος

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ - ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ
&
ΑΡΧΑΙΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΡΕΥΝΑΣ**

**Ρέθυμνο
10 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2010**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

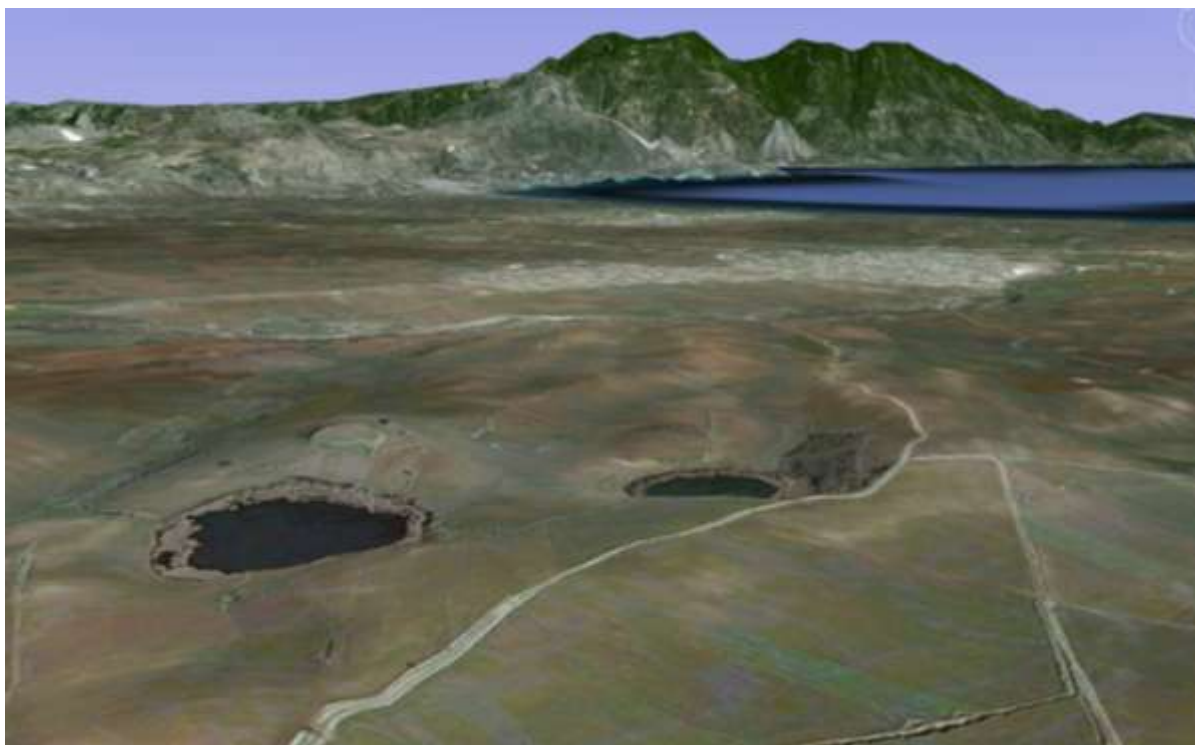
Η γεωφυσική έρευνα και χαρτογράφηση του αρχαιολογικού χώρου στην Μαγούλα Ζερέλια του Δήμου Αλμυρού (Εικόνα 1.1.) πραγματοποιήθηκε μέσω προγραμματικής σύμβασης μεταξύ του Δήμου Αλμυρού και του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (Ι.Τ.Ε.). Οι έρευνες χρηματοδοτήθηκαν από τον Δήμο Αλμυρού και πραγματοποιήθηκαν με την υποστήριξη του Τμήματος Ιστορίας, Αρχαιολογίας και Κοινωνικής Ανθρωπολογίας (Ι.Α.Κ.Α.) του Πανεπιστημίου Βόλου (καθ. Αντίκλεια Μουνδρέα-Αγραφιώτη) και του Υπουργείου Πολιτισμού - ΙΓ' ΕΠΚΑ Βόλου (Δρ. Βάσω Ροντήρη και Δρ. Κώστα Βουζαξάκη). Στόχος των ερευνών ήταν η διερεύνηση του υπεδάφους στην περιοχή που βρίσκεται πάνω στην μαγούλα και του χώρου που εκτείνεται κυρίως νότια και δυτικά αυτής για τον εντοπισμό αρχιτεκτονικών λειψάνων και την καθοδήγηση μελλοντικών ανασκαφών που στοχεύουν στην ανάδειξη της περιοχής.



Εικόνα 1.1. Η ευρύτερη περιοχή του Νομού Μαγνησίας στην οποία διακρίνεται ο Αλμυρός και η θέση της μαγούλας Ζερέλια (από δορυφορικές εικόνες του Google Earth).

1.1 Τοπογραφία και Γεωλογία της περιοχής της Μαγούλας Ζερέλια

Η μαγούλα Ζερέλια αποτελεί μία σημαντική προϊστορική θέση του Κρόκιου πεδίου που βρίσκεται στην περιοχή του Αλμυρού (περίπου 3-4Km νότιο-δυτικά της Ευξεινούπολης και του Αλμυρού) (Εικόνες 1.2., 1.3., 1.4) μία περιοχή που δεν έχει διερευνηθεί συστηματικά σε σχέση με τις περιοχές της Λάρισας, Βόλου και Καρδίτσας.



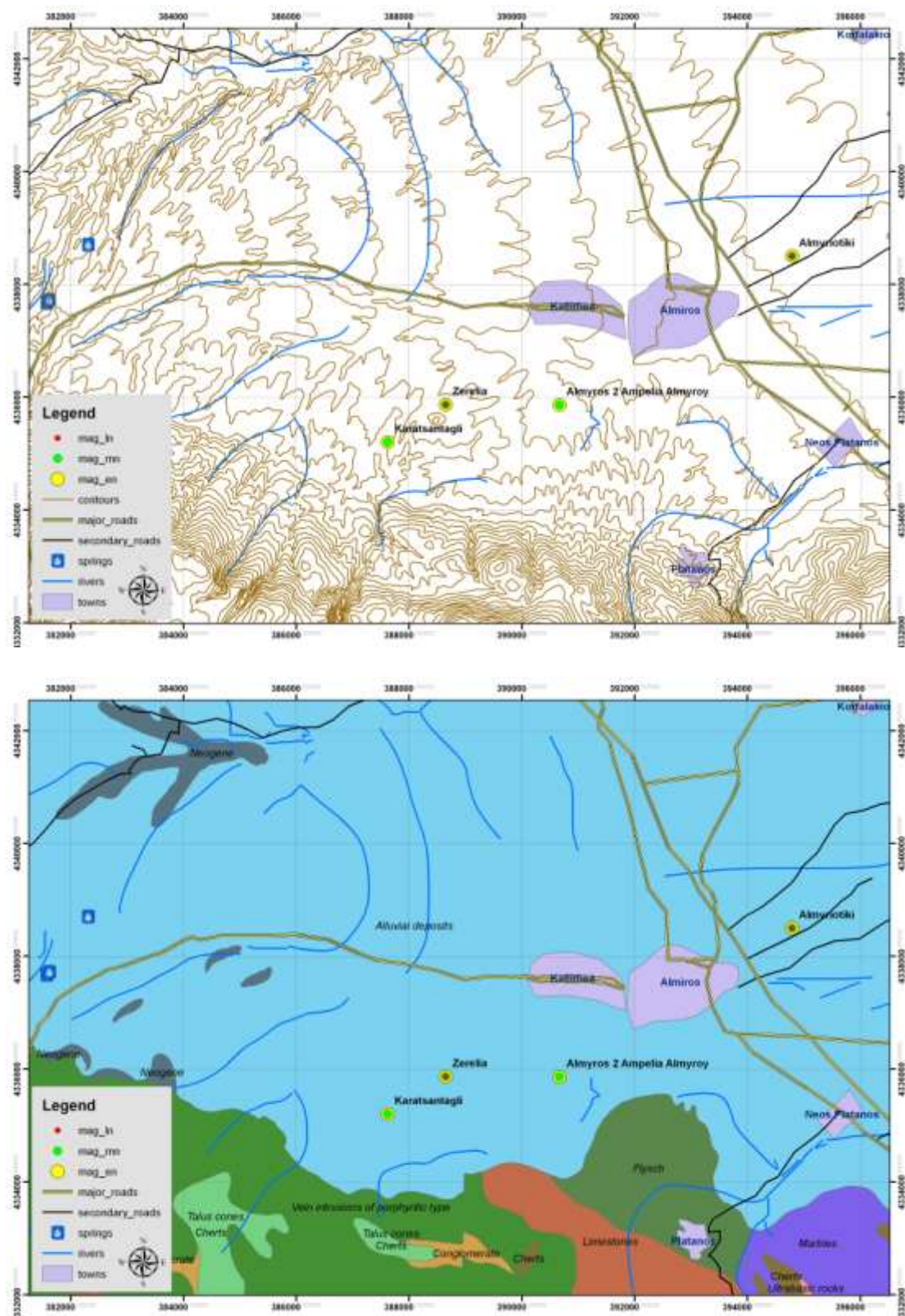
Εικόνα 1.2. Τρισδιάστατη απεικόνιση της ευρύτερης περιοχής της μαγούλας Ζερέλια με υπέρθεση δορυφορικής εικόνας από το Google Earth. Διακρίνεται ο γήλοφος και οι δύο λίμνες.

Στην περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εντοπίζονται Τεταρτογενείς αλλούβιες και διλούβιες αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται από διάφορες προσχώσεις και κορήματα ορέων, αργίλους, άμμους, λατύπες και κροκάλες ενώ προς τα νότια εμφανίζεται ο Άνω Κρητιδικός ασβεστόλιθος. Στην εικόνα 1.5. φαίνεται μία συνοπτική γεωλογική τομή των σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος με διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ.

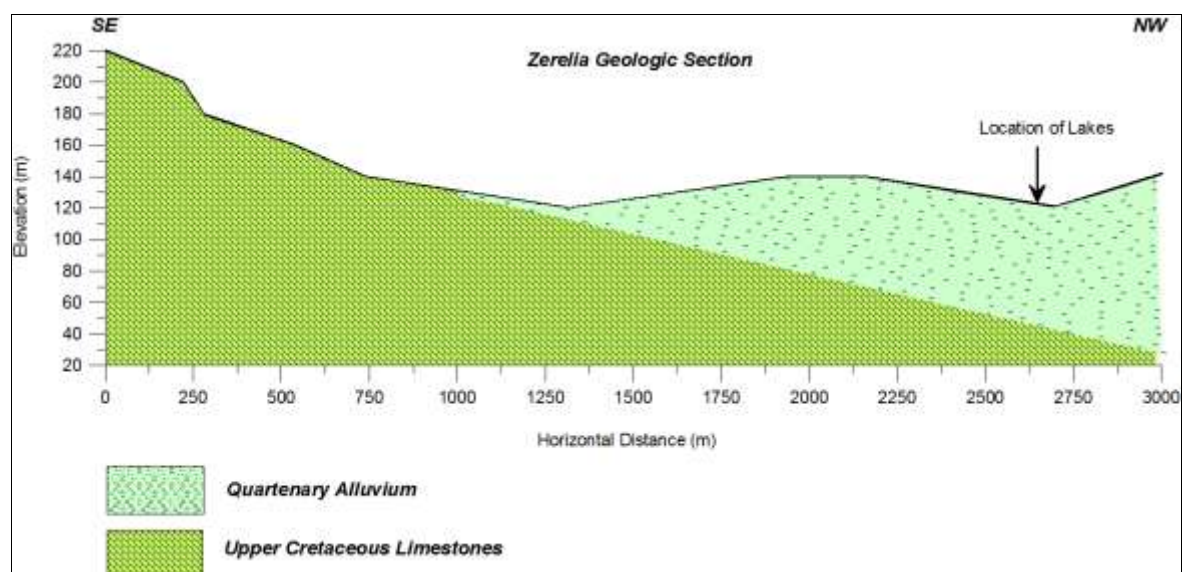
Η μαγούλα βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή υδροβιότοπου που αποτελείται από δύο σχεδόν κυκλικές λίμνες (ακτίνας 150m και 125m αντιστοίχως για την μεγαλύτερη και την μικρότερη) βάθους περίπου 10m. Οι λίμνες απέχουν μεταξύ τους γύρω στα 300m ενώ η δημιουργία τους αποτελεί πεδίο έρευνας. Μέχρι σήμερα εικάζεται ότι είναι ηφαιστειακής προέλευσης, δηλαδή ότι τα κοιλάματα αυτών δημιουργήθηκαν από εκρήξεις αερίων και πληρώθηκαν από νερό (λίμνη τύπου Mare). Δεν θα πρέπει όμως να αποκλειστεί και η περίπτωση καθίζησης του ασβεστολιθικού υποβάθρου. Γύρω από τις λίμνες υπάρχει πλούσια υδρόβια βλάστηση που εκτείνεται ορισμένα μέτρα περιμετρικά των λιμνών και μέσα σε αυτές ζουν ψάρια (http://www.almiros.gov.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=173&Itemid=228). Οι λίμνες αποτελούν ζώνη προστασίας από το πρόγραμμα NATURA2000.



Εικόνα 1.3. Λεπτομέρειες της περιοχής στην οποία βρίσκεται η μαγούλα Ζερέλια και οι δύο λίμνες (από δορυφορικές εικόνες του Google Earth).



Εικόνα 1.4. Τοπογραφικός (πάνω) και γεωλογικός (κάτω) χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Αλμυρού.



Εικόνα 1.5: Συνοπτική γεωλογική τομή της περιοχής.

1.2 Ο Αρχαιολογικός Χώρος της Μαγούλας Ζερέλια

Ο προϊστορικός οικισμός που βρίσκεται στην μαγούλα Ζερέλια έχει δείγματα κατοίκησης από τη Μέση Νεολιθική Εποχή (MNE, ~5800 π.Χ.) που συνεχίστηκε μέχρι και την Ύστερη Εποχή του Χαλκού (YEX). Στα επιφανειακά στρώματα υπάρχουν ενδείξεις αρχιτεκτονικών δομών των ιστορικών έως και νεώτερων χρόνων, ενώ τα περισσότερα ευρήματα της Νεολιθικής εποχής προέρχονται από πρόσφατη ανασκαφική τομή της ΙΓ' ΕΠΚΑ στο ΝΑ άκρο της μαγούλας, το οποίο έχει σχετικά απογυμνωθεί από τα ανώτερα στρώματα (όπως και άλλα σημεία περιμετρικά της μαγούλας) λόγω των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την καλλιέργεια των γύρω ιδιοκτησιών. Οι μέχρι τώρα ανασκαφές έχουν καταλήξει ότι οι μεγαλύτερες στρωματογραφικές αποθέσεις της μαγούλας δημιουργήθηκαν κατά την εποχή του Χαλκού (Μαλακασιώτη et al 2008, http://almyrosinfo.gr/data_info.php?prod_id=194&timicat1=95920&timicat2=354&timicat3=0&timicat4=0&timicat5=0&timicat6=0&timicat7=0).

Αρχικά, η μαγούλα Ζερέλια ανασκάφηκε αρχικά από τους Wace και Thompson (Wace & Thompson 1912). Επιφανειακές αρχαιολογικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν το 1992 από την Ολλανδική Αρχαιολογική Σχολή σε συνεργασία με την ΙΓ' ΕΠΚΑ στην ευρύτερη περιοχή (Reinders 2004). Το 2005 το Τμήμα ΙΑΚΑ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας πραγματοποίησε μία συστηματική επιφανειακή αρχαιολογική έρευνα στον χώρο γύρω από την μαγούλα Ζερέλια. Η πρόσφατη αρχαιολογική ανασκαφή στην μαγούλα Ζερέλια διενεργείται από το Τμήμα Προϊστορικής Αρχαιολογίας του ΙΑΚΑ (υπεύθυνη. αρχαιολόγος καθ. Αντίκλεια Μουνδρέα Αγραφιώτη) σε συνεργασία με τη ΙΓ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων. Στόχος των ανασκαφικών εργασιών είναι η μελέτη της διαχρονικής κατοίκησης της μαγούλας μέσα από την καταγραφή της στρωματογραφίας και την μελέτη των αντίστοιχων ευρημάτων σε κάθε φάση κατοίκησης (Μουνδρέα-Αγραφιώτη 2008).

Νοτιότερα της μαγούλας Ζερέλια βρίσκεται η μαγούλα Καρατζάνταγλι η οποία είχε κατοικηθεί πρωϊμότερα από την Αρχαιότερη και Μέση Νεολιθική περίοδο. Ενδεχομένως, οι δύο αυτές μαγούλες να αποτελούσαν τμήμα μιας εξελικτικής αλυσίδας της κατοίκησης της περιοχής.

Στην ευρύτερη περιοχή βρίσκονται επίσης ο προϊστορικός οικισμός κόμβου Μικροθηβών (τελική Νεολιθική προς την Πρώιμη εποχή του Χαλκού), ο λόφος της Φυλάκης, ο οικισμός της Βουκοκαλύβας, η Πλατανιώτικη Μαγούλα, η Ελληνιστική πόλη της Άλου και τα φρούρια Αγίου Νικολάου Αλίας (Μπακλαλί) και Βρύναινας, ενώ προς την ακτή εκτείνεται ο Μεσαιωνικός Αλμυρός (http://www.almiros.gov.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=160&Itemid=200).

Λεπτομέρειες από τον ευρύτερο χώρο της Μαγούλας Ζερέλια παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.6.



Εικόνα 1.6. Λεπτομέρειες του ευρύτερου χώρου στον οποίο βρίσκεται η μαγούλα Ζερέλια.

1.3 Οι Γεωφυσικές Έρευνες στην Μαγούλα Ζερέλια

Οι γεωφυσικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν με τις μεθόδους του γεωραντάρ, μαγνητικών μετρήσεων, μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους και της Ηλεκτρικής Τομογραφίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι τεχνικές έδωσαν έμφαση στην λεπτομερή χαρτογράφηση του χώρου (δειγματοληψία 50cm για τις μαγνητικές διασκοπήσεις, 1m για τις διασκοπήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης και 5cm κατά μήκος των οδεύσεων του γεωραντάρ που απείχαν 50cm μεταξύ τους).

Η γεωφυσική χαρτογράφηση της περιοχής πραγματοποιήθηκε την περίοδο 19-23 Ιουλίου 2010 από το Εργαστήριο Γεωφυσικής – Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών (Ιδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας) υπό την καθοδήγηση του Dr. A. Σαρρή και Dr. N. Παπαδόπουλου στον χώρο που υπέδειξε η καθ. Αντίκλεια Μουνδρέα-Αγραφιώτη. Οι γεωφυσικοί κάρναβοι επεκτάθηκαν και πέρα από την αρχική οριοθέτησή τους και καλύφθηκε μία μεγαλύτερη περιοχή.

Στις γεωφυσικές έρευνες συμμετείχαν οι παρακάτω ερευνητές:

Δρ. Απόστολος Σαρρής	Διευθυντής Ερευνών, Επ. Υπ. Εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών – ΙΜΣ/ΙΤΕ.
Δρ. Νίκος Παπαδόπουλος	Δόκιμος Ερευνητής Εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών – ΙΜΣ/ΙΤΕ.
Maria Cristina Salvi	Υποψήφια διδάκτωρ του πανεπιστημίου Ferrara της Ιταλίας

Στις γεωφυσικές έρευνες συνεισέφεραν επίσης και φοιτητές του Πανεπιστημίου του Βόλου που συμμετείχαν στις ανασκαφές της μαγούλας Ζερέλια.

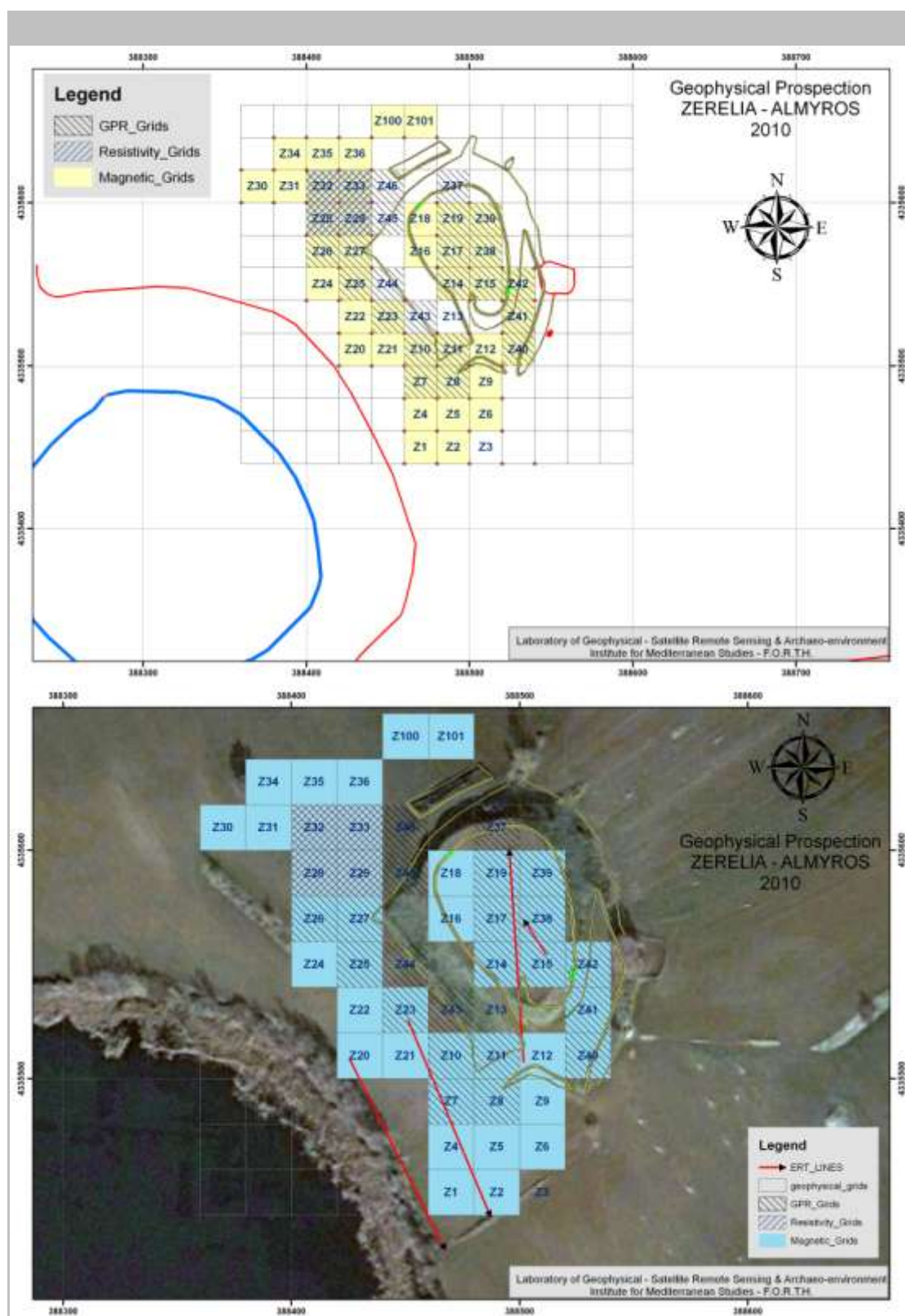
Στις γεωφυσικές έρευνες διερευνήθηκε συνολική έκταση πάνω των 15.000 τετραγωνικών μέτρων. Οι μαγνητικές διασκοπήσεις κάλυψαν 41 καννάβους διαστάσεων 20x20m με πραγματική κάλυψη (λόγω εμποδίων, λιθοσωρών, κ.α.) πάνω από 14.000 τετραγωνικά μέτρα και το γεωραντάρ μία έκταση 8.500 τετραγωνικών μέτρων έχοντας μεγάλη επικάλυψη με τις αντίστοιχες μαγνητικές μετρήσεις. Επίσης επικάλυψη είχαν οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης που περιορίστηκαν σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος (4 κάρναβοι – 1.600 τετρ. μ.). Επίσης, έγιναν 4 τομές ηλεκτρικής τομογραφίας πλησίον της μεγάλης λίμνης, καθώς και κατά μήκος της μαγούλας φθάνοντας σε ένα μέγιστο βάθος 20m με στόχο να μελετηθεί η γεωλογία της περιοχής ενδιαφέροντος. Τέλος, έγιναν μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας σε δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν από παλαιότερη ανασκαφική τομή στο νότιο-ανατολικό τμήμα της μαγούλας, για να γίνει μία στρωματογραφική συσχέτιση με την μαγνητική επιδεκτικότητα.

Στην Εικόνα 1.7. παρουσιάζονται λεπτομέρειες από την περιοχή που καλύφθηκε κατά την διεξαγωγή των γεωφυσικών μετρήσεων στην Μαγούλα Ζερέλια.

Στην Εικόνα 1.8. παρουσιάζεται η γεωφυσική κάλυψη της περιοχής από τις διαφορετικές τεχνικές.



Εικόνα 1.7. Λεπτομέρειες από την διεξαγωγή των γεωφυσικών μετρήσεων με τις μαγνητικές τεχνικές και το γεωραντάρ στην περιοχή της Μαγούλας Ζερέλια.



Εικόνα 1.8. Γεωφυσική κάλυψη της περιοχής από τις διαφορετικές τεχνικές.

2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

Τα παρακάτω όργανα και μεθοδολογίες εφαρμόστηκαν για την γεωφυσική διασκόπηση της συγκεκριμένης περιοχής:

	Μέθοδος	Όργανο	Βάθος Διασκόπησης	
1.	Μαγνητικές μετρήσεις	Bartington Fluxgate Gradiometer G601	2m	 
2.	Μέθοδος Γεωραντάρ	Noggin Plus-Smart Cart με τις κεραίες συχνότητας των 250 MHz	2m	

3.	Ηλεκτρικές Διασκοπήσεις /Ηλεκτρική τομογραφία	Syscal Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 της εταιρείας IRIS Instruments.	20m	 
4.	Ηλεκτρικές Διασκοπήσεις	Geoscan Research RM15/PA5 Twin Probe array	1-2m	

5.	Μαγνητική Επιδεκτικότητα	Bartington MS2B		
----	-----------------------------	--------------------	--	--



3. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κατά τη διάρκεια των γεωφυσικών ερευνών εφαρμόστηκαν μαγνητικές μέθοδοι, τεχνικές ηλεκτρικής τομογραφίας και ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ. Οι παραπάνω γεωφυσικές τεχνικές επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες για την επίτευξη των στόχων της έρευνας και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Ο συνδυασμός των 4 τεχνικών (καθώς επίσης και της μαγνητικής επιδεκτικότητας) βελτιστοποίησε τα αποτελέσματα της έρευνας.

Μία σύντομη ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων της κάθε τεχνικής δίνεται στις επόμενες παραγράφους.

3.1. Γενικά στοιχεία για την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης / Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί μία από τις γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην διασκόπηση και στον εντοπισμό “ρηχών δομών”. Η μέθοδος αυτή είναι επίσης γνωστή και ως “μέθοδος συνεχούς ρεύματος”. Σκοπός της μεθόδου αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής αυτού, πραγματοποιώντας μετρήσεις είτε στην επιφάνεια της Γης είτε μέσα σε αυτή, σε γεωτρήσεις.

Βασίζεται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια ή σε γεωτρήσεις και χρησιμοποιούνται με σκοπό το διαχωρισμό στόχων με διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση (Nishimura 2001: 544). Στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, οι «ανωμαλίες» ορίζονται ως οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου ή της πυκνότητας του ρεύματος, οι οποίες οφείλονται σε διαταραχές εξ’ αιτίας στόχων με διαφορετική αντίσταση (ή αγωγιμότητα) από το περιβάλλον έδαφος (Σαρρής 2008, Sarris 1992: 17). Συνεπώς, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι για τις γεωηλεκτρικές αρχαιολογικές διασκοπήσεις πιθανοί στόχοι αποτελούν τόσο οι αρχιτεκτονικές δομές (π.χ. τοίχοι, τάφοι πληρωμένοι με αέρα, θεμέλια οικιών, κ.α.), όσο και τάφοι πληρωμένοι με εδαφικό υλικό, τα οποία παρουσιάζουν ισχυρό σήμα και εγγράφονται ως ισχυρές αντιστάσεις. Τάφοι, επίσης με συσσωρεύσεις οργανικού υλικού και αγωγίμα εδάφη, παρουσιάζουν συχνά ασθενές σήμα και εγγράφονται ως ασθενείς αντιστάσεις (Clark 1990: 37). Επιπλέον, δάπεδα οικιών ή άλλες συμπίεσμένες δομές είναι ανιχνεύσιμες εξ αιτίας είτε του μειωμένου πορώδους είτε της υγρασίας, που έχει συσσωρευτεί στην επιφάνειά τους.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ , ενός κυλινδρικού σχήματος που έχει μήκος L , αντίσταση R και εμβαδόν διατομής S δίνεται από την σχέση:

$$\rho = R \frac{S}{L}. \quad (1)$$

Όπου R είναι σε Ohms, L σε μέτρα και S σε τετραγωνικά μέτρα. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το Ohm-m. Μία άλλη φυσική ποσότητα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υπεδάφους κατά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η αγωγιμότητα, η οποία ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($\sigma = 1/\rho$). Η αγωγιμότητα δείχνει την ευκολία με

την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέεται στο έδαφος και μονάδα μέτρησης αυτής είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων οι οποίοι είναι εύκολα μεταβαλλόμενοι. Εξαρτάται από τις υδρολογικές – υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής, τη χημική σύσταση του νερού, τα ιόντα που είναι διαλυμένα σε αυτό, το πορώδες των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις και διακλάσεις, τη θερμοκρασία και την πίεση, καθώς και από τις τοπογραφικές μεταβολές.

Όπως αναφέρθηκε οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ποικίλουν και μεταβάλλονται εύκολα. Έτσι πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική αντίσταση δεν αποτελεί απόλυτα χαρακτηριστικό γνώρισμα συγκεκριμένων λιθολογικών τύπων, καθώς η διακύμανση αυτής μπορεί να παρουσιάζει μεγάλο εύρος ακόμα και μέσα στον ίδιο λιθολογικό τύπο. Επίσης δύο τελείως διαφορετικοί σχηματισμοί μπορεί να έχουν παρόμοιες ειδικές αντιστάσεις.

Για τους λόγους αυτούς η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή και σε συνδυασμό πάντα με τις υπάρχουσες πληροφορίες της υπό μελέτη περιοχής. Τέτοιες πληροφορίες είναι γεωλογικοί και τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής, αποτελέσματα από γεωτρήσεις ή πιθανές ανασκαφές κ.λ.π. Όλες αυτές οι πληροφορίες θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μαζί με τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα ερμηνείας.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έχει μία αρκετά μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Γεωλογία για γεωλογική χαρτογράφηση, στην Υδρογεωλογία για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων, στην Τεχνική Γεωλογία για την εύρεση του μητρικού πετρώματος και εγκοίλων, στον καθορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους κ.λ.π., για περιβαλλοντικούς σκοπούς στον προσδιορισμό της ζώνης μόλυνσης σε υδροφόρα στρώματα και της εύρεσης περιοχών υπεδάφιας μόλυνσης, στην αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων και μεταλλευμάτων και στην διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων.

Για την μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους εισάγεται μέσα σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων Α και Β. Το Α ηλεκτρόδιο είναι ένας θετικός ηλεκτρικός πόλος ενώ το Β ένας αρνητικός. Λόγω των αντιστάσεων επαφής που παρουσιάζονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και του εδάφους, η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπέδαφος ρεύμα μετριέται σε δύο άλλα ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια δυναμικού Μ, Ν). Έτσι κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής μεθόδου χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1.

Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν με την χρήση των τεσσάρων ηλεκτροδίων που φαίνονται στην εικόνα 3.1, τότε η σχέση που δίνει την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι:

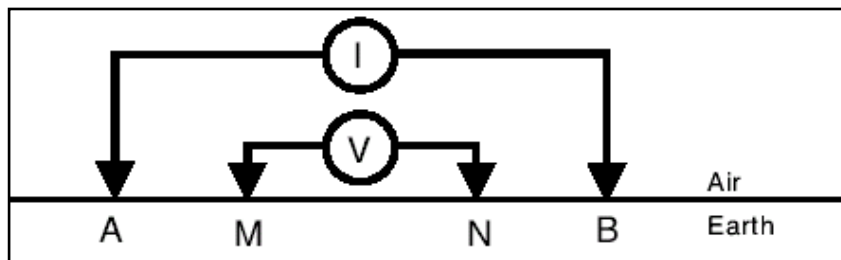
$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{1}{K} = 2\pi R \frac{1}{K} \quad (2)$$

Όπου:

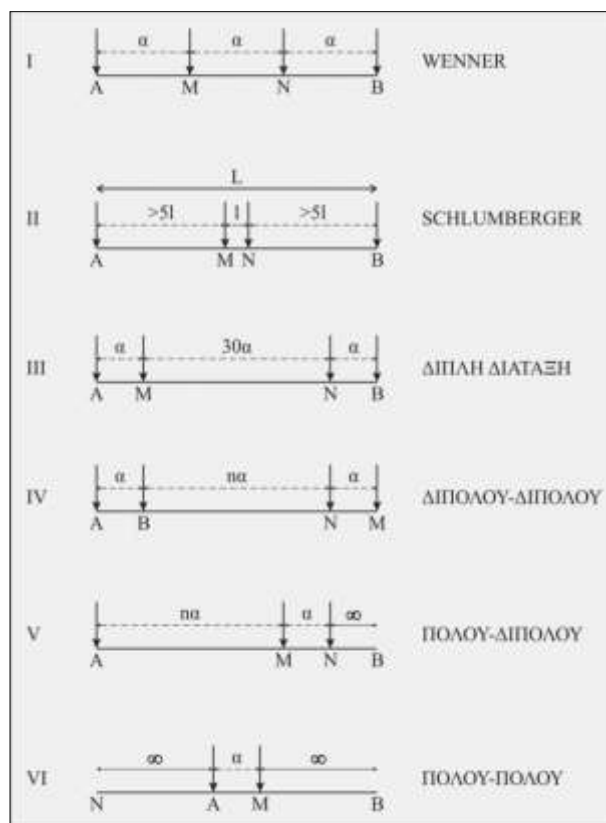
- ρ = η ειδική αντίσταση ομογενούς γης
- I = ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διοχετεύεται στην γη
- ΔV = μετρούμενη διαφορά δυναμικού
- K = γεωμετρικός παράγοντας
- R = μετρούμενη αντίσταση

Ο γεωμετρικός παράγοντας K εξαρτάται αποκλειστικά από την διάταξη των ηλεκτροδίων και τις αποστάσεις μεταξύ τους και ισούται με:

$$K = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (3)$$



Εικόνα 3.1.: Διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων A, B (ηλεκτρόδια ρεύματος) και M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού).



Εικόνα 3.2.: Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων. I) Wenner, II) Schlumberger, III) Διπλή Διάταξη, IV) Διπόλου-Διπόλου, V) Πόλου-Διπόλου, VI) Πόλου-Πόλου.

Στην περίπτωση που η γη είναι ομογενής, τότε για οποιαδήποτε πιθανή διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων η εφαρμογή του γεωμετρικού παράγοντα στην μετρούμενη αντίσταση (R) θα δώσει την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Στην πραγματικότητα όμως η γη είναι ανομοιογενής. Οπότε για να περιγραφεί αυτή η ανομοιογένεια εισάγεται ένας νέος όρος για την περιγραφή της αντίστασης που λέγεται “φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση”. Η φαινόμενη

ειδική ηλεκτρική αντίσταση αντιπροσωπεύει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που θα είχε το υπέδαφος αν ήταν πράγματι ομογενές και γενικά αποτελεί έναν σταθμισμένο μέσο όρο της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους.

Θεωρητικά υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι για να διαταχθούν τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά μόνο λίγες από αυτές τις διατάξεις

χρησιμοποιούνται ευρύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί κάποιες διατάξεις θεωρητικά να υπερτερούν έναντι κάποιων άλλων αλλά δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν πρακτικά. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται ευρύτατα φαίνονται στην Εικόνα 3.2.

Μέθοδοι έρευνας

Βυθοσκοπήσεις: Με την εφαρμογή των βυθοσκοπήσεων γίνεται προσπάθεια να μετρηθεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στο γεγονός ότι το υπέδαφος θεωρείται ότι έχει οριζόντια στρωματογραφία, δηλαδή αποτελείται από διακριτά, οριζόντια, ομογενή και ισότροπα στρώματα. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η μέθοδος Schlumberger αλλά και η μέθοδος Wenner. Κλασσικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων. Κατά την διάρκεια των βυθοσκοπήσεων λαμβάνονται μία σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος (τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά). Με την συνεχή αύξηση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό μετριέται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής αντίστασης σε μία στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης.

Οριζοντιογραφίες (Χαρτογράφηση): Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τις βυθοσκοπήσεις, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και οι μετρήσεις λαμβάνονται μετακινώντας πλευρικά την διάταξη των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα. Με τον τρόπο αυτό χαρτογραφούνται μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος. Κυρίως χρησιμοποιούνται οι διατάξεις Wenner, Διπόλου – Διπόλου και Πόλου – Διπόλου. Οι οριζοντιογραφίες αποτελούν κλασσικές μεθόδους χαρτογράφησης των αρχαιολογικών θέσεων.

Τομογραφίες (Δυσδιάστατη διασκόπηση): Η δυσδιάστατη διάταξη μέτρησης επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τα οποία εμπεριέχουν πληροφορίες τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης. Οι τομογραφίες μπορούν να θεωρηθούν ως την συλλογή μιας σειράς τομών σε μία συγκεκριμένη περιοχή με συνεχώς αυξανόμενη απόσταση ηλεκτροδίων ή μία σειρά διαδοχικών βυθοσκοπήσεων πάνω σε μία γραμμή. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των τομογραφιών αποτελεί ο μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων που συλλέγονται σε σχέση με τις βυθοσκοπήσεις και τις οριζοντιογραφίες. Για να είναι δυνατή η συλλογή τέτοιων δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης τα οποία έχουν πλήρως αυτοματοποιήσει την διαδικασία.

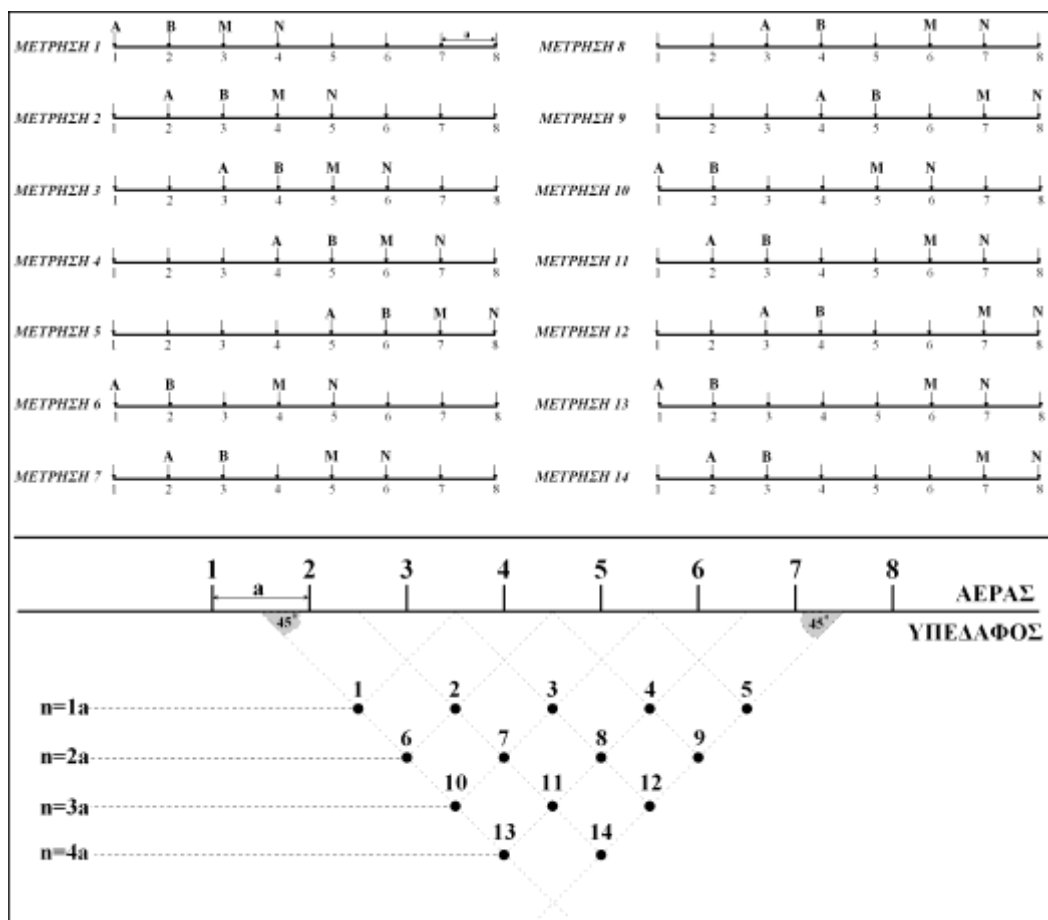
Συλλογή τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες συνήθως πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (25 και πάνω) τα οποία τοποθετούνται πάνω σε μία γραμμή στο έδαφος και συνδέονται με ένα πολύκλωνο καλώδιο το οποίο συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Τα σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης περιέχουν ηλεκτρονικά συστήματα με τα οποία είναι δυνατή η αυτόματη επιλογή των τεσσάρων ηλεκτροδίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση. Αυτό

είναι πάρα πολύ σημαντικό στην γεωηλεκτρική διασκόπηση καθώς μειώνεται αισθητά ο χρόνος συλλογής των δεδομένων.

Για την αποθήκευση των μετρήσεων που θα συλλεχθούν χρησιμοποιείται ένας φορητός υπολογιστής που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Συνήθως, τα όργανα αυτά κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν αυτονομία και μπορούν να αποθηκεύσουν στην μνήμη τους αρκετά δεδομένα παρατήρησης. Αυτό αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αν πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε περιοχές με πολύ απότομο ανάγλυφο, όπου η χρήση φορητού υπολογιστή θα δυσχέραινε την λήψη των μετρήσεων. Εν συνεχεία, μέσω ειδικών καλωδίων τα δεδομένα μεταφέρονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία. Παράλληλα είναι δυνατός ο προγραμματισμός του οργάνου, χρησιμοποιώντας ειδικά αρχεία τα οποία και εισάγονται σε αυτό, έτσι ώστε να διεξαχθεί οποιαδήποτε γνωστή διάταξη ηλεκτροδίων αυτοματοποιημένα.

Στην Εικόνα 3.3. φαίνεται σχηματικά ο τρόπος διεξαγωγής της ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου για μία διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με 4 και πως τα δεδομένα απεικονίζονται σε δύο διαστάσεις, έτσι ώστε να σχηματιστεί η ψευδοτομή της μεταβολής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Κάθε τιμή της αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή το κέντρο των διπόλων AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 3.3: Τρόπος πραγματοποίησης της ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με 4.

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων είναι η εξής: Αρχικά η απόσταση όλων των ηλεκτροδίων είναι ίση με 1a. Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με αριθμό 1, 2, 3, 4 όπου το 1 ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως το ηλεκτρόδιο ρεύματος A, το 2 ως το ηλεκτρόδιο ρεύματος B, το 3 ως το ηλεκτρόδιο δυναμικού M και το 4 ως το ηλεκτρόδιο δυναμικού N. Στην συνέχεια η διάταξη μεταφέρεται κατά απόσταση a προς τα δεξιά και για την δεύτερη μέτρηση της αντίστασης χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με αριθμούς 2, 3, 4, 5 ως A, B, M, N αντίστοιχα. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται έως ότου χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόδια 5, 6, 7, 8 για την τελευταία μέτρηση με απόσταση 1a (μετρήσεις 1-5).

Στην συνέχεια, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων B και M αυξάνεται σε $n=2a$ αλλά η απόσταση μεταξύ των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) παραμένει σταθερή και ίση με 1a. Ο παράγοντας n είναι ο λόγος της απόστασης των ηλεκτροδίων B-M προς την απόσταση των ηλεκτροδίων A-B. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 1, 2, 4, 5 ως A, B, M, N για την πρώτη μέτρηση με $n=2a$. Η διάταξη εν συνεχεία μεταφέρεται κατά 1a προς τα δεξιά μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι μετρήσεις (μετρήσεις 6-9). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για μεγαλύτερα n. Συνήθως στην πράξη ο μέγιστος αριθμός n ο οποίος χρησιμοποιείται είναι 6-8, καθώς για μεγαλύτερα n το σήμα της μεθόδου ασθενεί σημαντικά. Για τον λόγο αυτό αν υπάρχει επιθυμία η διασκόπηση να κυμανθεί σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη, αυτό το οποίο γίνεται είναι να αυξηθεί η απόσταση των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) σε 2a ή/και 3a και να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για διάφορα πάλι n.



Εικόνα 3.4: Φωτογραφία του οργάνου SYSCAL Pro (κάτω τμήμα εικόνας) και του πολυπλέκτη SYSCAL Switch Pro (πάνω τμήμα εικόνας).

Για την συλλογή των γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το δεκακάναλο όργανο SYSCAL Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 της εταιρείας IRIS Instruments. Το όργανο αυτό (Εικόνα 3.4) είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, με αυτονομία και αρκετή εσωτερική μνήμη ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Στο όργανο μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα μέχρι 96 ηλεκτρόδια. Η αυτόματη πραγματοποίηση των μετρήσεων της

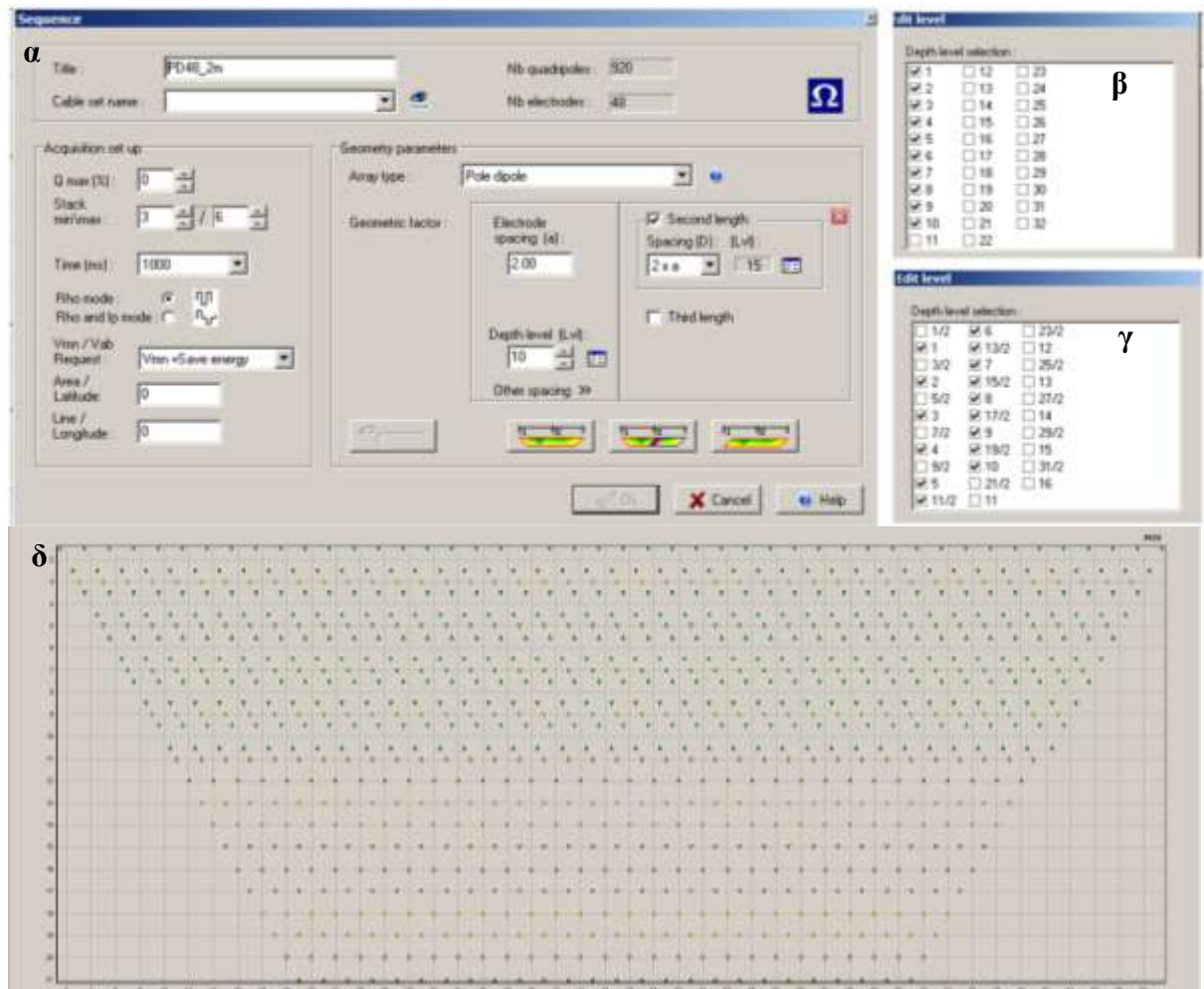
αντίστασης του υπεδάφους ελέγχεται από τον πολυπλέκτη, που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης, μέσω ενός ειδικού αρχείου που εισάγεται στο όργανο και περιλαμβάνει την γεωμετρία της διάταξης που χρησιμοποιείται. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η συλλογή πολλών δεδομένων υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον το όργανο έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει και να αποθηκεύσει ταυτόχρονα μέχρι δέκα μετρήσεις, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο περίπου κατά δέκα φορές τον χρόνο συλλογής των δεδομένων.

Στην περιοχή πραγματοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις δισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες. (ERT1, ERT2, ERT3, ERT4) εφαρμόζοντας την διάταξη Πόλου-Διπόλου. Για την ERT1 χρησιμοποιήθηκε και η διάταξη Wenner-Schlumberger, αλλά εξαιτίας στιγμιαίας δυσλειτουργίας του οργάνου συλλέχθηκε ένα μόνο μέρος αξιόπιστων δεδομένων. Σκοπός της ERT1 ήταν να χαρτογραφηθεί η στρωματογραφική διαδοχή των ιζημάτων της μαγούλας ενώ με την ERT2 έγινε προσπάθεια επιβεβαίωσης και καθορισμού του βάθους ταφής της δομής που εντοπίστηκε με το γεωραντάρ και την μαγνητική χαρτογράφηση σε μία συγκεκριμένη περιοχή πάνω στη μαγούλα (νότια του τοπογραφικού σημείου). Οι τομές ERT3 και ERT4 ήταν σχεδόν παράλληλες, απείχαν μεταξύ τους περίπου 25 μέτρα και πραγματοποιήθηκαν στα ανατολικά της μεγάλης λίμνης. Σκοπός αυτών των τομογραφιών ήταν να χαρτογραφηθεί η στρωματογραφία της περιοχής πλησίον των λιμνών και να εντοπιστεί το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής. Για την επεξεργασία όλων των τομών ελήφθη υπ' όψιν η μεταβολή του τοπογραφικού ανάγλυφου κατά μήκος των γραμμών.

Στον πίνακα 3.1.1 φαίνονται οι τεχνικές λεπτομέρειες των τομογραφιών και στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των γεωηλεκτρικών δεδομένων κατά μήκος όλων των τομογραφιών

	Αριθμός Ηλεκτροδίων	Μήκος Τομής (m)	Απόσταση Ηλεκτροδίων (m)	Μετρήσεις	Διάταξη	Μέγιστο Βάθος Διασκόπησης (m)
ERT1	48	94	2	899 (PD) 411 (WS)	Πόλου- Διπόλου (PD) & Wenner- Schlumberger (WS)	~ 20
ERT3	48	94	2	912	Πόλου- Διπόλου	~ 20
ERT4	48	94	2	927	Πόλου- Διπόλου	~ 20
ERT2	48	18.8	0.4	785	Πόλου- Διπόλου	~ 4

Πίνακας 3.1.1: Τεχνικές προδιαγραφές των γεωηλεκτρικών τομογραφιών.



Εικόνα 3.5: α) Γενικές επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πρωτοκόλλων μέτρησης της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. β) Διαφορετικά επίπεδα βάθους για την περίπτωση που η απόσταση των ηλεκτροδίων ήταν $a=2$ m. γ) β) Διαφορετικά επίπεδα βάθους για την περίπτωση που η απόσταση των ηλεκτροδίων ήταν $a=4$ m. δ) Εποπτική παρουσίαση θέσης των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της ειδικής φαινόμενης αντίστασης.

3.2. Μαγνητικές Διασκοπήσεις

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις αποτελούν μία τεχνική, με την οποία μπορούν να μετρηθούν μικρές μεταβολές στο μέγεθος του γήινου μαγνητικού πεδίου. Για το λόγο αυτό αποβλέπουν στην ανίχνευση της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, η οποία οφείλεται στην παρουσία συγκεκριμένων στόχων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσω της μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου της γης σε μικρή και σταθερή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους μιας αρχαιολογικής θέσης.

Υπεδάφειοι στόχοι με μαγνητικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές του περιβάλλοντος εδάφους αλλάζουν κατά μεγάλο ή μικρό βαθμό το τοπικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η μικρή μεταβολή του μαγνητικού πεδίου μπορεί να ανιχνευθεί με τις μαγνητικές τεχνικές και παρατηρείται σαν μία «ανωμαλία» στις μετρήσεις (Nishimura 2001: 546). Οι μαγνητικές αυτές ανωμαλίες σχετίζονται άμεσα με τη μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους. Περιοχές με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα (σε σύγκριση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους) παρουσιάζονται ως θετικές ανωμαλίες, ενώ περιοχές με μειωμένη μαγνητική επιδεκτικότητα παρουσιάζονται ως αρνητικές ανωμαλίες. Και τα δύο είδη μαγνητικών ανωμαλιών είναι ενδιαφέροντα στη διαδικασία ερμηνείας των μαγνητικών δεδομένων. (Sarris and Jones 2000: 22-3).

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για να αποκαλύψουν αρχαιολογικές κατασκευές που είχαν υποστεί καύση, όπως κεραμικοί κλίβανοι αγγείων (Aitken 1974: 214). Σύντομα όμως η τεχνική αυτή αποδείχτηκε ιδιαίτερα ευαίσθητη στην ανίχνευση και άλλων υπεδάφειων στόχων, όπως αρχιτεκτονικές δομές, τάφροι, λάκκοι απορριμμάτων, ακόμα και οπές στις οποίες στηρίζονταν ξύλινοι πάσσαλοι (Aitken 1974: 189-90, Sarris and Jones 2000: 23). Οι «ανωμαλίες» στις συγκεκριμένες περιπτώσεις προέρχονται από τις μεταβολές της μαγνητικής επιδεκτικότητας των θαμμένων αντικειμένων, οι οποίες προκαλούνται όταν υλικά πλούσια σε σιδηρούχα συστατικά σχηματίζουν πιο ισχυρές σιδηριμαγνητικές δομές, όπως ο μαγνητίτης και ο αιματίτης. Αυτή η μαγνητική ενίσχυση σχετίζεται πρωταρχικά με την όπτηση του υλικού (Σαρρής 1995). Συχνά μεταβολές οφείλονται και στην ύπαρξη βακτηρίων, τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν κάτω από κατάλληλες συνθήκες του εδάφους. Τέτοιες συνθήκες απαντούν στα περισσότερα επιφανειακά εδάφη που περιέχουν αρχαιολογικού ενδιαφέροντος υλικά και προκαλούν σημαντικές μαγνητικές μεταβολές σε σχέση με το τοπικό μαγνητικό πεδίο της περιοχής των μετρήσεων.

Για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται συνήθως μαγνητόμετρα μέτρησης της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου (πρωτονιακά μαγνητόμετρα ή μαγνητόμετρα Καισίου) ή διαφορικά μαγνητόμετρα (όπως μαγνητόμετρα ροής) για τη μέτρηση της κατακόρυφης ή της οριζόντιας βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου (Aitken 1974: 210-13, Αράμπελος 1991: 131-4, Sarris 2008, Sarris and Jones 2000: 24, Nishimura 2001: 546-7). Τα όργανα αυτά έχουν ακρίβεια της τάξεως του 1-0.1 nT. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιούνται με την τοποθέτηση του αισθητήρα σε μία σταθερή απόσταση από την επιφάνεια της γης. Οι μετρήσεις λαμβάνονται σε σταθερά διαστήματα (δηλ. με σταθερό βήμα δειγματοληψίας) σε ορθογώνιους καννάβους, σχετικά μικρών διαστάσεων (π.χ. 10x10m ή 20x20m).

Γενικά, η ύπαρξη αρχαιολογικών ερειπίων στο υπέδαφος, συνοδευμένη συνήθως από μία αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του υπεδάφους στο συγκεκριμένο σημείο, προκαλεί ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλει το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης. Τα πυρηνικά μαγνητόμετρα μετρούν τη συνισταμένη των διανυσμάτων του ασθενούς τοπικού μαγνητικού πεδίου και του πιο ισχυρού γήινου μαγνητικού πεδίου. Τα διαφορικά μαγνητόμετρα (μαγνητόμετρα ροής) μετρούν την κάθετη ή οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Τα δύο αυτά είδη μαγνητομέτρων αποτελούν τα πιο αποτελεσματικά όργανα μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου και των μεταβολών αυτού λόγω της παρουσίας ανθρωπογενών λειψάνων. Η μεταβολή του τοπικού μαγνητικού πεδίου λόγω της ύπαρξης υπεδάφειων αρχαιολογικών υπολειμμάτων είναι σχετικά μικρή, εξ αιτίας της ασθενούς έντασης της παραμένουσας μαγνήτισης. Η μεταβολή αυτή αυξάνεται με την αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των αρχαιολογικών στόχων (φαινόμενα καύσης, πυκνότητα σε σιδηρούχα συστατικά, κ.α.). Τα όργανα, τα οποία απαιτούνται για τον εντοπισμό των αρχαιολογικών ερειπίων χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια, μεγάλη ευαισθησία και αξιοπιστία των μετρήσεων. Τα όργανα αυτά μετρούν το μαγνητικό πεδίο με μία ακρίβεια της τάξεως των 1-0.1 nT. Μεγαλύτερη ακρίβεια, της τάξεως του pT, είναι εφικτή με τη χρήση μαγνητομέτρων Καισίου, αλλά με κίνδυνο να υπάρχουν αυξημένα επίπεδα του εξωτερικού θορύβου.

Είναι γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο της γης μεταβάλλεται με το χρόνο. Από τις χρονικές μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου, η ημερήσια μεταβολή αυτού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι παροδικές αυτές μεταβολές επηρεάζουν τις μαγνητικές μετρήσεις υπαίθρου και δεν είναι προβλέψιμες. Υπό κανονικές συνθήκες, η ένταση του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει διακυμάνσεις της τάξεως των 50-100nT. Μερικές φορές το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζεται πιο ενεργητικό, με χρονικές διακυμάνσεις στην έντασή του της τάξεως των 100-500 nT (περιπτώσεις μαγνητικών καταιγίδων). Η χρήση διαφορικών μαγνητομέτρων, όπως το Geoscan FM256 – Fluxgate Gradiometer και το Bartington Instruments Grad601, έχει το πλεονέκτημα της εξάλειψης των δραστικών χρονικών αλλαγών του μαγνητικού πεδίου, καθώς και της άμβλυνσης των γεωλογικών επιδράσεων (Sarris and Jones 2000: 24).

Στην συγκεκριμένη έρευνα έγινε συστηματική χρήση του διαφορικού μαγνητομέτρου ροής Bartington Instruments Grad601 (Εικόνα 3.6.). Το μαγνητόμετρο αυτό μετράει τη διαφορά της έντασης της κατακόρυφης συνιστώσας του γήινου μαγνητικού πεδίου ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικά επίπεδα (ύψη) από την επιφάνεια του εδάφους. Το όργανο μπορεί να καταγράφει δεδομένα συνεχώς και διευκολύνεται η κάλυψη μεγάλων εκτάσεων εδάφους ημερησίως με πολλές μετρήσεις ανά μονάδα επιφανείας. Επιπλέον, γίνεται εφικτή η εξομάλυνση των γεωλογικών τάσεων, η άμβλυνση εξωτερικών παρεμβολών λόγω εγγύτητας των γεωφυσικών καννάβων σε συρματοπλέγματα και νεότερα κτίσματα και τέλος, η αποφυγή διορθώσεων της ημερήσιας μεταβολής της έντασης του ολικού μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 3.6. Το διαφορικό μαγνητόμετρο ροής Bartington Instruments Grad601.

3.3. Η μέθοδος του Γεωραντάρ

Η λέξη RADAR προέρχεται από τα αρχικά RAdio Detecting And Ranging. Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας. Η μέθοδος του γεω-Radar (**G**round **P**enetrating **R**adar – G.P.R.) παρουσιάζει την ίδια αρχή λειτουργίας με την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Πρόκειται για μία ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική τεχνική που βρίσκει εφαρμογή στην χαρτογράφηση των στρωμάτων σε εδάφη και πετρώματα και στον εντοπισμό υπόγειων δομών, στηριζόμενη στις διαφορές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών. Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκίνησε αρχικά το 1956, αλλά η μεγάλη ώθηση της μεθόδου δόθηκε μετά το 1970 κυρίως λόγω της αλματώδους εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1960.

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία σειρά από εφαρμογές όπως είναι η χαρτογράφηση του βάθους του υποβάθρου, ο καθορισμός του πάχους των στρωμάτων και το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ο εντοπισμός φυσικών και τεχνητών εγκοίλων στο υπέδαφος, η ανίχνευση των αλλαγών της σύστασης των πετρωμάτων, ο εντοπισμός ρωγμών του υποβάθρου. Ιδιαίτερη εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται στην Αρχαιομετρία για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών λειψάνων.

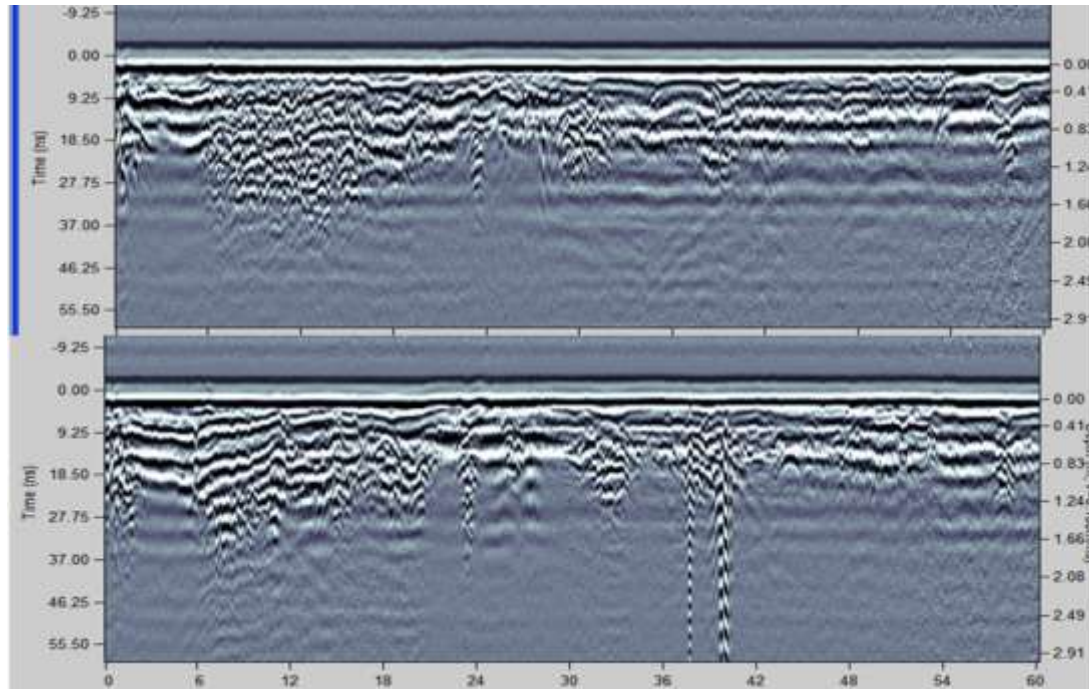
Η βασική αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, υψηλής συχνότητας, στο υπέδαφος και στην καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που διαδίδεται στο υπέδαφος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητές του, δηλαδή την διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα. Βασικά, η μέθοδος στηρίζεται κυρίως στην καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων σε επιφάνειες που παρουσιάζουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες.

Όπως αναφέρθηκε η αρχή λειτουργίας της μεθόδου G.P.R. (γεωραντάρ) παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης. Ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής συχνότητας και μικρής διάρκειας παράγεται και διοχετεύεται στο έδαφος. Ο παλμός (το σήμα) διαδίδεται και διαχέεται στα υλικά που συνιστούν το υπέδαφος και η πορεία του εξαρτάται από τις ιδιότητες των περιβαλλόντων υλικών. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού ανακλάται στην διαχωριστική επιφάνεια υλικών με διαφορετικές ιδιότητες και καταγράφεται σε έναν δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διοχετεύεται σε βαθύτερα επίπεδα.

Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου παλμού εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης 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. Στα περισσότερα γεωλογικά υλικά η αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά (σχετική διαπερατότητα) είναι οι παράμετροι που κυρίως επηρεάζουν τον παλμό. Επιπλέον, η απορρόφηση του σήματος εξαρτάται από την συχνότητα της κεραίας, την αγωγιμότητα και την διηλεκτρική σταθερά. Το μέγιστο βάθος για το οποίο μπορεί να δώσει πληροφορίες η μέθοδος του γεωραντάρ εξαρτάται κυρίως από την απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών (ΗΜ) κυμάτων. Η απορρόφηση αυξάνει με την συχνότητα και κατά συνέπεια όσο χαμηλότερη συχνότητα χρησιμοποιείται

τόσο βαθύτερα “βλέπει” η μέθοδος. Για παράδειγμα συστήματα G.P.R. που λειτουργούν σε εύρος 25-50 MHz μπορεί να διερευνήσουν βάθη που υπερβαίνουν τα 50 μέτρα σε εδάφη με χαμηλή αγωγιμότητα (μικρότερη από 1ns/m) όπως άμμος, χαλίκια. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη ότι η διακριτική ικανότητα μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας.

Οι καταγραφές Radar (ραδιογράμματα) τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη (Εικόνα 3.7) κατ’ αναλογία με τις σεισμικές αναγραφές. Δημιουργείται έτσι μία τομή η οποία προσομοιάζει την αληθινή ηλεκτρική τομή του υπεδάφους, δηλαδή της αποτύπωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του με το βάθος (Σαρρής 2008).



Εικόνα 3.7: Ραδιογράμματα από μετρήσεις του γεωραντάρ στα οποία φαίνεται η παρουσία ανακλαστήρων ανάλογα με τη στρωματογραφία.

Η εφαρμογή τεχνικών όπως αυτή του γεωραντάρ ή των μαγνητικών και ηλεκτρικών διασκοπήσεων προσφέρει πρόσθετες πληροφορίες οι οποίες είναι ουσιαστικής σημασίας κατά την διάρκεια της ερμηνείας των μετρήσεων.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η ερμηνεία των γεωφυσικών ανωμαλιών εξαρτάται από εμπειρικές γνώσεις και θεωρητικές υποθέσεις (μοντέλα). Τα αποτελέσματα της ερμηνείας δεν μπορούν να θεωρηθούν πάντα αδιάψευστα. Οι γεωφυσικές ανωμαλίες μπορούν να σχετίζονται με γεωλογικά ή επιφανειακά φαινόμενα και άλλες εξωγενείς παραμέτρους. Επίσης θα πρέπει να είναι κατανοητός ο περιορισμός των δυνατοτήτων των γεωφυσικών μεθόδων σε σχέση με την διακριτική τους ικανότητα (εντοπισμό και διάκριση αντικειμένων συγκεκριμένων διαστάσεων, συνήθως μικρότερων της δειγματοληψίας των μετρήσεων), το βάθος διασκόπησης (το οποίο έχει μία αντιστρόφως αναλογική σχέση με την χωρική ευκρίνεια των μεθόδων: δηλαδή μείωση της ανάλυσης με αυξανόμενο βάθος έρευνας), τις εδαφικές συνθήκες (ανάγκη καλού διαχωρισμού του αντικειμένου από το περιβάλλον εδαφικό πλαίσιο στο οποίο ανήκει), κ.α.

Μία μεθοδικότερη και αποτελεσματικότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών διασκοπήσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη στενότερη συνεργασία γεωφυσικών και αρχαιολόγων, καθώς επίσης και με τη δειγματοληπτική επιβεβαίωση ή απόρριψη συγκεκριμένων γεωφυσικών ανωμαλιών (Aitken 1974, Sarris and Jones 2000). Για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να υπάρχει συνεχής επικοινωνία μεταξύ της ομάδας των αρχαιολόγων και της αντίστοιχης των γεωφυσικών, έτσι ώστε η εξέταση και ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων να γίνεται διαδραστικά υπό το φως των αρχαιολογικών δεδομένων.

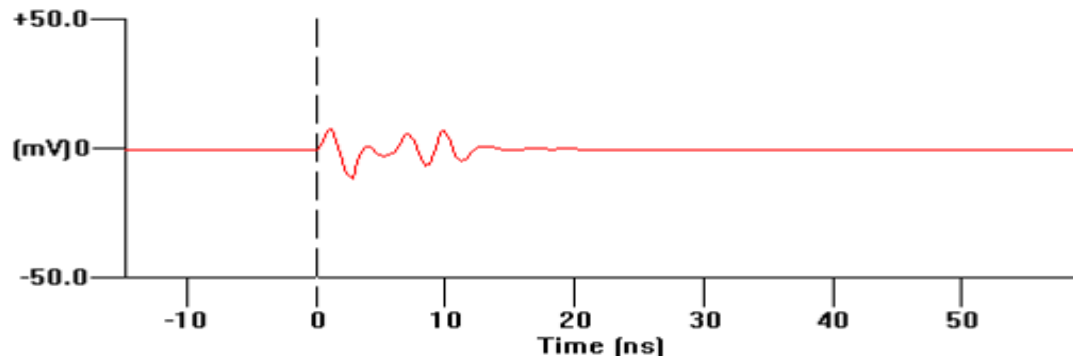
3.4. Επεξεργασία Γεωφυσικών Μετρήσεων

Τα πρωταρχικά δεδομένα καταχωρήθηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ έγινε μία κωδικοποίηση των φακέλων που αντιστοιχούσε στην κωδικοποίηση των γεωφυσικών καννάβων και την περιοχή, όπου λαμβάνονταν οι μετρήσεις.

Κατά το αρχικό στάδιο της επεξεργασίας διάφορα λογισμικά (Geoplot, Surfer) επέτρεψαν τη μετατροπή των πρωταρχικών δεδομένων με τη μορφή συντεταγμένων (x, y, z - .xyz). Η μετατροπή αυτή ήταν αναγκαία για τα επόμενα στάδια της επεξεργασίας. Η αλλαγή των συντεταγμένων ήταν επιβεβλημένη για τη σύνθεση των μεμονωμένων καννάβων σε «μωσαϊκά καννάβων» με συντεταγμένες παρόμοιες με αυτές του τοπογραφικού χάρτη της περιοχής. Η καλύτερη σύνδεση των γεωφυσικών καννάβων επιτεύχθηκε με τη στατιστική ανάλυση των κοινών γραμμών αλληπάλληλων καννάβων ή με τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών των γειτονικών καννάβων. Στη συνέχεια, ένας διορθωτικός συντελεστής εφαρμόστηκε σε όλα τα δεδομένα με σκοπό να ομαλοποιήσει το μέσο όρο των μετρήσεων και να φέρει αυτές σε ένα κοινό επίπεδο αναφοράς, έτσι ώστε να εξαιρεθούν τυχόν ασυνέχειες στις ενώσεις των γεωφυσικών καννάβων (Grid Equalization). Επιπλέον, έγινε αναγωγή όλων των μετρήσεων ανά γραμμή δειγματοληψίας σε ένα κοινό επίπεδο αναφοράς, έτσι ώστε να εξομαλυνθούν περιοχές με έντονες επιφανειακές ανωμαλίες (Line Equalization). Αρκετές φορές ήταν αναγκαία η αναγωγή των μετρήσεων ανά γραμμή δειγματοληψίας και στις δύο κατευθύνσεις (x-axis & y-axis).

Το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας περιελάμβανε τη χαρτογράφηση των δεδομένων, η οποία έγινε με τη χρήση αλγορίθμου παρεμβολής (Kriging), που διαθέτει το λογισμικό πακέτο Surfer, το οποίο χρησιμοποιήθηκε από το πρώτο ήδη στάδιο της επεξεργασίας. Σε συγκεκριμένες μετρήσεις έγινε επιλεκτική αποβολή του θορύβου, ο οποίος οφείλεται στην παρουσία μεταλλικών αντικειμένων (για την περίπτωση των μαγνητικών μετρήσεων), με την αφαίρεση υψηλών και χαμηλών ακραίων τιμών (Selective Despiking). Το ίδιο αποτέλεσμα επιτεύχθηκε και μέσω της συμπίεσης του δυναμικού εύρους τιμών των μετρήσεων (Compression of Dynamic Range).

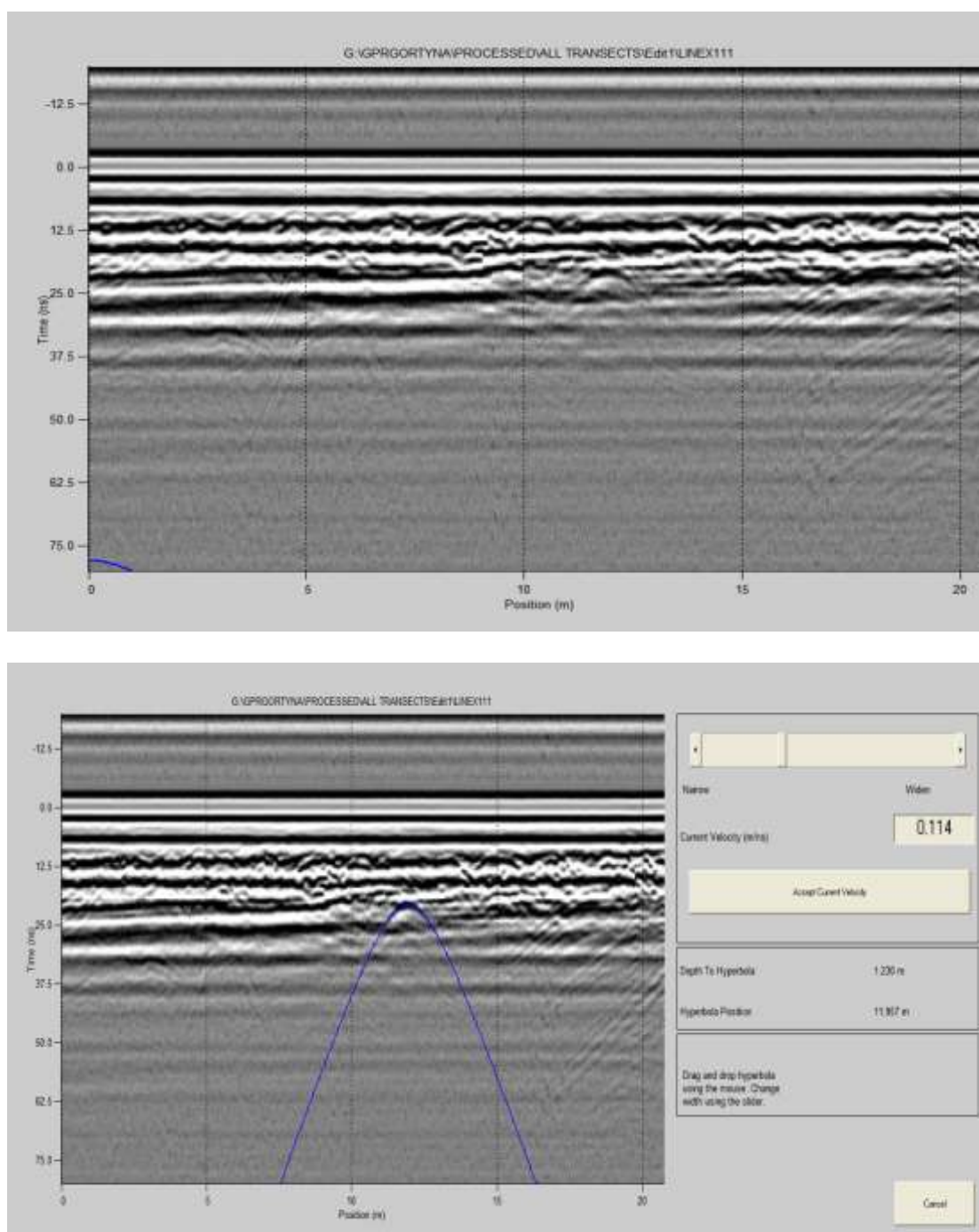
Για τις μετρήσεις του γεωραντάρ έγινε αρχικά καθορισμός του first peak για να προσδιοριστεί το αρχικό ωφέλιμο σήμα από κάθε γραμμή. Ο καθορισμός αυτός έγινε με βάση το ποσοστό της εντάσεως του πρώτου ανακλώμενου κύματος (10%). Ακολούθησε η διαδικασία εξισορρόπησης των γραμμών με βάση του επιλεγμένου first peak (Εικόνα 3.8.). Η διαδικασία αυτή (Datum zero 10-20%) προσπάθησε να φέρει τις πρώτες ανακλάσεις κάθε γραμμής σε ένα κοινό χρόνο άφιξης.



Εικόνα 3.8.: Διαδικασία επιλογής του χρόνου προσέλευσης του πρώτου ανακλώμενου κύματος (first peak).

Ακολούθησε ενίσχυση του ανακλώμενου σήματος με φίλτρα AGC, Dewow & DCshift. Ο υπολογισμός του μέσου όρου του πλάτους του σήματος (average envelope amplitude) έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από την ανόρθωση αυτού (rectification) ή τον υπολογισμό του RMS του πλάτους. Επίσης έγινε αποβολή του θορύβου (background noise) και εξομάλυνση των δεδομένων εφαρμόζοντας ένα Trace-to-trace averaging filter. Άλλες διαδικασίες όπως Horizontal filtering & time-vertical filtering δεν έδωσαν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Εκτός από τα παραπάνω, εφαρμόστηκε το φίλτρο migration για την καλύτερη χωρική οριοθέτηση των ανακλαστήρων.

Η σύνθεση των επεξεργασμένων τομών του ραντάρ έγινε με τα προγράμματα της Sensors&Software (EKKO MAPPER & EKKO 3D). Από τις κατακόρυφες αρχικές τομές δημιουργήθηκαν δυσδιάστατες οριζόντιες τομές σε διαφορετικά βάθη, υπολογίζοντας μία ταχύτητα μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα στην γη ίση με 0.1 m/nsec. Η ταχύτητα μετάδοσης καθορίστηκε μέσω της προσαρμογής των ελλείψεων των ανακλαστήρων από το λογισμικό πρόγραμμα επεξεργασίας (Εικόνα 3.9.). Οι δυσδιάστατες οριζόντιες τομές του γεωραντάρ έγιναν για πάχη 0,1m και 0,2m. Οι οριζόντιες τομές υποβλήθηκαν σε βελτίωση του ιστογράμματος, πύκνωση των μετρήσεων με μεθόδους παρεμβολής και φίλτρα εξομάλυνσης.



Εικόνα 3.9: Προσαρμογή των ελλείψεων των ανακλαστήρων για τον υπολογισμό της ταχύτητας μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος.

Η επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφία έγινε με πιο πολύπλοκες τεχνικές βασιζόμενες στην μέθοδο της αντιστροφής. Η εφαρμογή της θεωρίας της αντιστροφής στην γεωηλεκτρική διασκόπηση προσπαθεί να βρει ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης του οποίου η απόκριση θα είναι παρόμοια ή σχεδόν ίδια με τις μετρούμενες (παρατηρούμενες) τιμές της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Το μοντέλο αυτό είναι ουσιαστικά μία ιδανική μαθηματική αναπαράσταση της γης. Αποτελείται από παραμέτρους, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Η απόκριση του μοντέλου δίνει τις υπολογιζόμενες (συνθετικές) ειδικές φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες υπολογίζονται με βάση πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

Βασικό στοιχείο κάθε μεθόδου αντιστροφής αποτελεί η εύρεση ενός τρόπου υπολογισμού της απόκρισης του γεωηλεκτρικού μοντέλου, δηλαδή των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων που θα προκαλέσει μία γνωστή κατανομή αντιστάσεων του υπεδάφους. Η διαδικασία αυτή είναι και γνωστή ως επίλυση του Ευθέως Προβλήματος. Με άλλα λόγια, το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα περιλαμβάνει την λύση της διαφορικής εξίσωσης που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα ανομοιογενές υπέδαφος, για μία συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων, τέτοιας ώστε να μπορεί να καθοριστεί η κατανομή του δυναμικού. Εφ' όσον το δυναμικό είναι γνωστό τότε με βάση τη σχέση (2) είναι πολύ εύκολο να υπολογιστούν οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να επιλυθεί το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα, οι αναλυτικές και οι αριθμητικές μέθοδοι. Με τις αναλυτικές μεθόδους επιλύονται κατευθείαν οι εξισώσεις - πρόκειται για τις πιο ακριβείς μεθόδους που όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για απλά γεωμετρικά σχήματα όπως για παράδειγμα σφαίρες.

Για να αντιμετωπιστεί η έντονη ανομοιογένεια και ετερογένεια που παρουσιάζει η γη, το πρόβλημα προσεγγίζεται με την χρήση των αριθμητικών μεθόδων. Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι μπορούν να ενσωματώσουν μία οποιαδήποτε τυχαία κατανομή της αντίστασης, δηλαδή μπορούν να προσεγγίσουν περισσότερο τις πραγματικές υπεδάφειες συνθήκες. Οι πιο διαδεδομένες αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του Ευθέως Προβλήματος είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method). Με βάση αυτές τις μεθόδους το υπέδαφος χωρίζεται σε διακεκριμένες και πεπερασμένες περιοχές, που ονομάζονται παράμετροι οι οποίες η κάθε μία μπορεί να έχει διαφορετική τιμή της αντίστασης. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παρασταθεί οποιαδήποτε κατανομή της υπεδάφειας αντίστασης, όσο πολύπλοκη και να είναι.

Ο τελικός σκοπός της γεωηλεκτρικής διασκόπησης είναι να βρεθεί ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης στηριζόμενοι στις πραγματικές μετρήσεις της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας της ανακατασκευής του υπεδάφους, αυτό θεωρείται ότι χωρίζεται σε ανεξάρτητα τμήματα (παράμετροι) τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή της αντίστασής τους ανεξάρτητα το ένα με το άλλο. Ο στόχος είναι να υπολογιστεί μία εκτίμηση της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, για την οποία η διαφορά μεταξύ των πραγματικών (μετρούμενων) δεδομένων της φαινόμενης αντίστασης και των υπολογιζόμενων

(συνθετικών) τιμών της φαινόμενης αντίστασης να είναι ελάχιστη. Τα συνθετικά δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης θα υπολογιστούν μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.

Επειδή όμως το γεωηλεκτρικό πρόβλημα είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα, η παραπάνω διαδικασία πρέπει να είναι επαναληπτική. Δηλαδή η διαδικασία της αντιστροφής ξεκινάει με ένα αρχικό ηλεκτρικό μοντέλο γης (συνήθως ομογενή γη) και σε κάθε επανάληψη βρίσκεται μία διόρθωση του μοντέλου, η οποία διόρθωση προστίθεται στο προηγούμενο μοντέλο. Έτσι λοιπόν στο τέλος κάθε αντιστροφής λαμβάνεται ένα αναβαθμισμένο μοντέλο γης και τελικά η διαδικασία θα σταματήσει όταν θα ανακατασκευαστεί ένα τέτοιο μοντέλο του οποίου η απόκριση, δηλαδή οι υπολογιζόμενες συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις θα διαφέρουν ελάχιστα από τις πραγματικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Θα πρέπει επίσης αν τονιστεί ότι η αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων είναι ένα “νοσηρό” (ill-conditioned) πρόβλημα, δηλαδή μεγάλες αλλαγές στην πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μικρές μεταβολές στα παρατηρούμενα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Έτσι λοιπόν η διαδικασία της αντιστροφής μπορεί να καταστεί εξαιρετικά ασταθής και να δώσει λύσεις που δεν έχουν κανένα φυσικό νόημα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες. Αυτή που ευρύτατα χρησιμοποιείται σήμερα είναι η αντιστροφή με περιορισμούς εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion ή Occam’s inversion). Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι να βρεθεί το πιο απλό και ομαλό ηλεκτρικό μοντέλο γης η απόκριση του οποίου να μπορεί να προσεγγίσει τα δεδομένα. Η αντιστροφή αυτή δεν ψάχνει απαραίτητα να βρει την πιο “καλή” λύση, αλλά επιδιώκεται η παραγωγή ενός απλοποιημένου μοντέλου το οποίο θα αποτελεί λογική αναπαράσταση του υπεδάφους. Δηλαδή η εξομαλυσμένη εξαναγκασμένη αντιστροφή εγγυάται την σταθερότητα της λύσης και επίσης παράγεται ένα μοντέλο τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν επιλεγεί από τον χρήστη (ομαλότητα μοντέλου) και όχι τυχαία.

Για την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε αρχικά το πρόγραμμα RES2DINV, το οποίο μπορεί αυτόματα να καθορίσει ένα δισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο της γης, με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τις υπαίθριες εργασίες και μπορεί να αντιστρέψει ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων. Η γη θεωρείται ότι αποτελείται από ορθογώνια τμήματα (παράμετροι), τα οποία μπορούν να μεταβάλουν την αντίσταση τους ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Η κατανομή και το μέγεθος των τμημάτων αυτών δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό και το βάθος κάθε σειράς αυτών των τμημάτων θεωρείται περίπου ίσο με το “μέσο βάθος διείσδυσης” (Edwards, 1977). Η επεξεργασία κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας ξεχωριστά είχε ως βασικούς σκοπούς να αξιολογηθεί η ποιότητα των δεδομένων αλλά και να ληφθεί μία πρώτη εικόνα για την κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης. Το πρόγραμμα RES2DINV χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση του ευθέως ηλεκτρικού προβλήματος και τον υπολογισμό των τιμών των φαινόμενων αντιστάσεων. Η διαδικασία της αντιστροφής στηρίζεται σε μία επαναληπτική μη-γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων (deGroot-Heldin and Constable, 1990).

Κάθε διαφορετικό αρχείο που αντιπροσώπευε τα δεδομένα κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας διορθώθηκε με βάση το τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

που ορίστηκε για την περιοχή, καθορίζοντας με αυτό τον τρόπο την σχετική του θέση στον χώρο μελέτης (Papadopoulos et al, 2007). Σε κάθε τομή πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες διορθώσεις όσον αφορά το τοπογραφικό ανάγλυφο κατά μήκος κάθε τομής.

Για την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Στο αρχικό στάδιο έγινε ένα φιλτράρισμα των δεδομένων εξαλείφοντας αυτά που παρουσίαζαν μεγάλα σφάλματα. Εν συνεχεία πολύ υψηλές και χαμηλές ακραίες τιμές, που οφείλονται σε εξωγενείς πηγές ή θόρυβο (π.χ. κακή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος), απομακρύνθηκαν από τα δεδομένα. Οι παράμετροι του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ταυτόσημοι για όλες τις τομογραφίες. Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Για την κατασκευή του δικτύου των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν 4 κόμβοι μεταξύ των ηλεκτροδίων, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την ακρίβεια υπολογισμού των φαινόμενων αντιστάσεων.

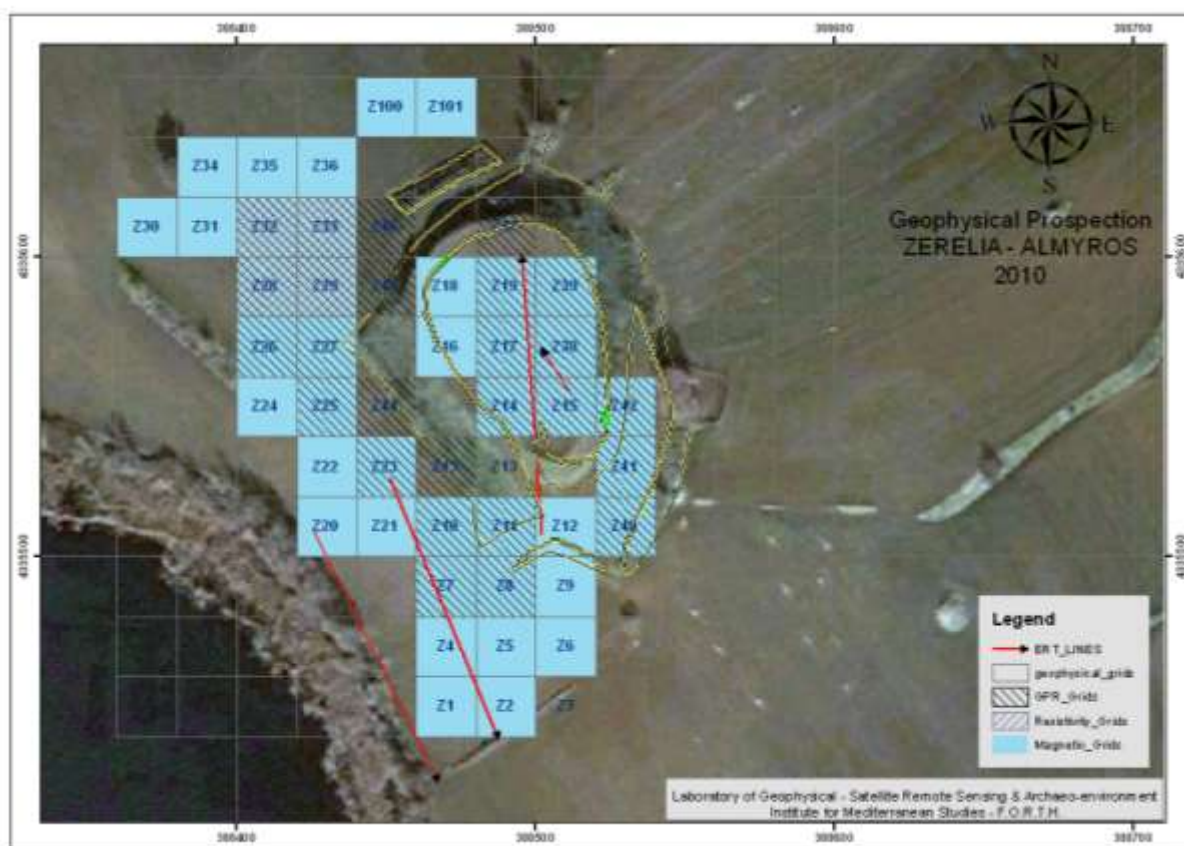
Για την ανακατασκευή της αντίστασης του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εξομαλυσμένης αντιστροφής. Όταν το σχετικό σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων κατά την διάρκεια της αντιστροφής ήταν μικρότερο του 2%, τότε η διαδικασία αυτόματα σταματούσε, το οποίο σήμαινε ότι το ηλεκτρικό μοντέλο δεν επιδεχόταν επιπλέον βελτίωση. Ο μέσος όρος των σφαλμάτων όλων των δισδιάστατων τομογραφιών που επεξεργάστηκαν ήταν χαμηλότερος από 2-2,5%, εκτός από την περίπτωση της τομής ERT1 –PD όπου το σφάλμα του τελικού γεωηλεκτρικού μοντέλου ήταν 5,7%.

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας περιλάμβανε την ανάλυση των γεωφυσικών ανωμαλιών και την δημιουργία διαγραμματικών χαρτών απεικόνισης των σημαντικότερων χαρακτηριστικών αυτών. Το τελικό αυτό στάδιο έγινε σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ArcGIS 9.3.).

Τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των γεωφυσικών διασκοπήσεων παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες της Ενότητας 4.



4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η κάλυψη των γεωφυσικών καννάβων στην περιοχή του γήλοφου Ζερέλια. Η μεγαλύτερη περιοχή καλύφθηκε από τις μαγνητικές μετρήσεις. Οι περισσότεροι από τους μαγνητικούς καννάβους καλύφθηκαν επίσης με το γεωραντάρ ενώ η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει περιοχές όσο το δυνατόν εγγύτερα και περιμετρικά της μαγούλας. Ένα μικρό τμήμα ΒΔ της μαγούλας καλύφθηκε και με ηλεκτρικές διασκοπήσεις υψηλής ανάλυσης (δειγματοληψία 1x0.5m). Δύο σχεδόν παράλληλες οδεύσεις ηλεκτρικής τομογραφίας υλοποιήθηκαν ΒΑ της μεγάλης λίμνης (ανάμεσα στην λίμνη και στην μαγούλα). Μία οδευση υλοποιήθηκε κατά μήκος της μαγούλας με προσανατολισμό σχεδόν Β-Ν. Οι συγκεκριμένες οδεύσεις έφθασαν σε ένα βάθος μέχρι 20m από την επιφάνεια. Μία μικρότερη οδευση μικρής διεύθυνσης πραγματοποιήθηκε επίσης πάνω στην μαγούλα με στόχο να επιβεβαιώσει ορισμένες επιφανειακές ανωμαλίες. Τα αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε μία τεχνική παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες που ακολουθούν.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Συνολική περιοχή επάνω και περιμετρικά της μαγούλας Ζερέλια
Οριζόντιες τομές του υπεδάφους με αυξανόμενο βάθος (ανά 20cm)

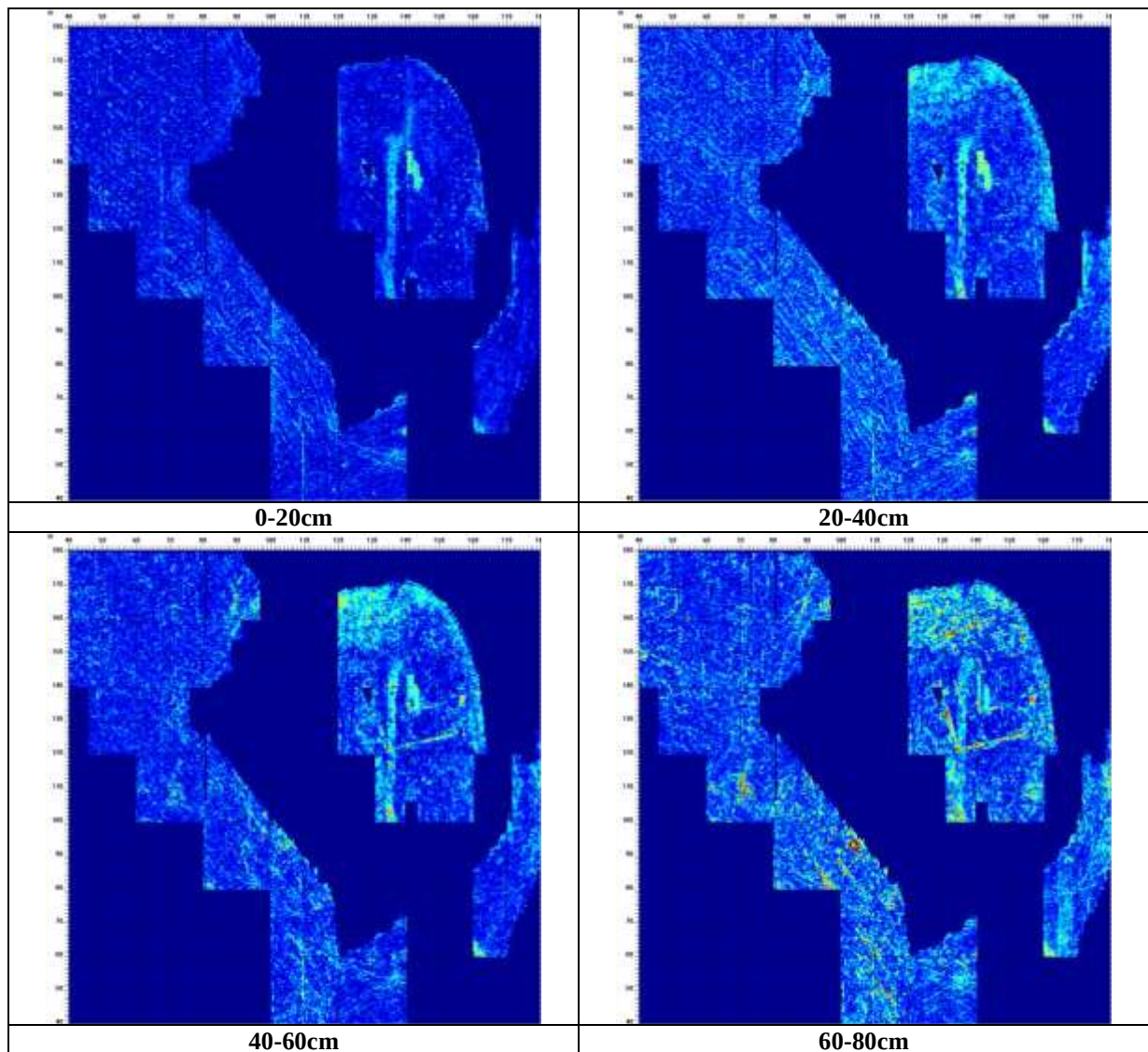
Signal velocity: 0.1m/nsec

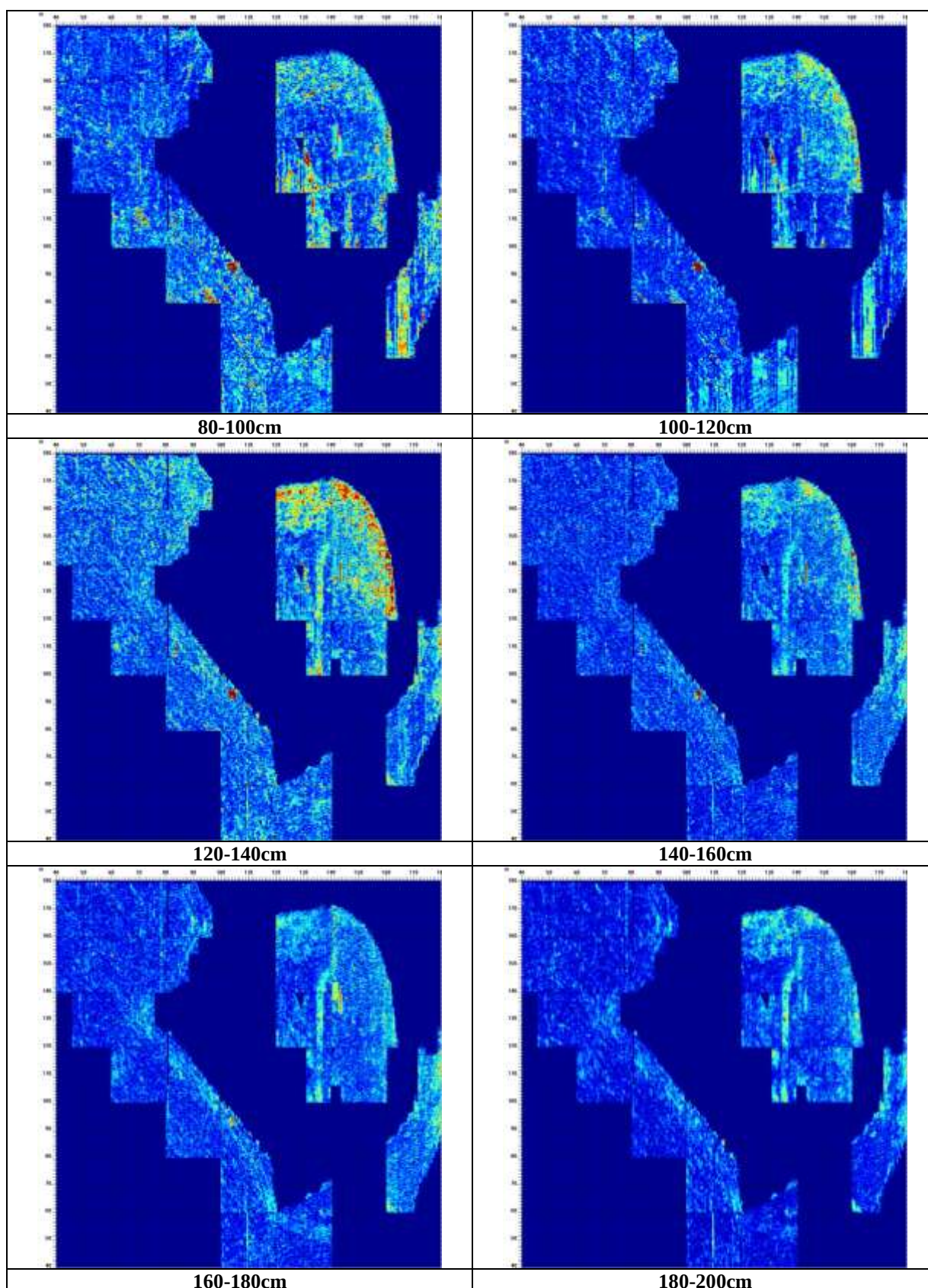
Total Background Subtraction

Processing: Dewow Time filter, Migration, Envelope

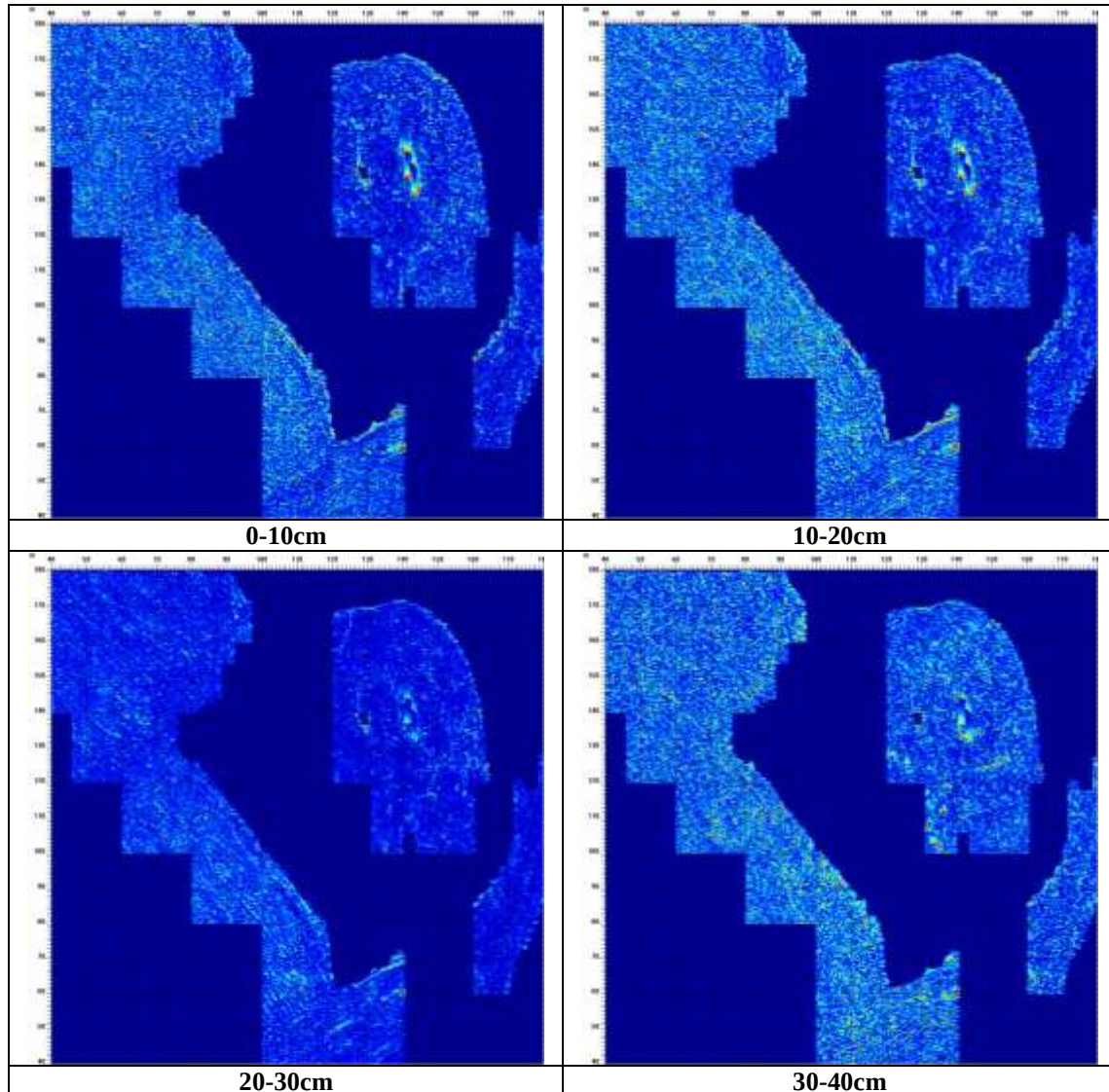
Amplitude Equalization: 3.93m

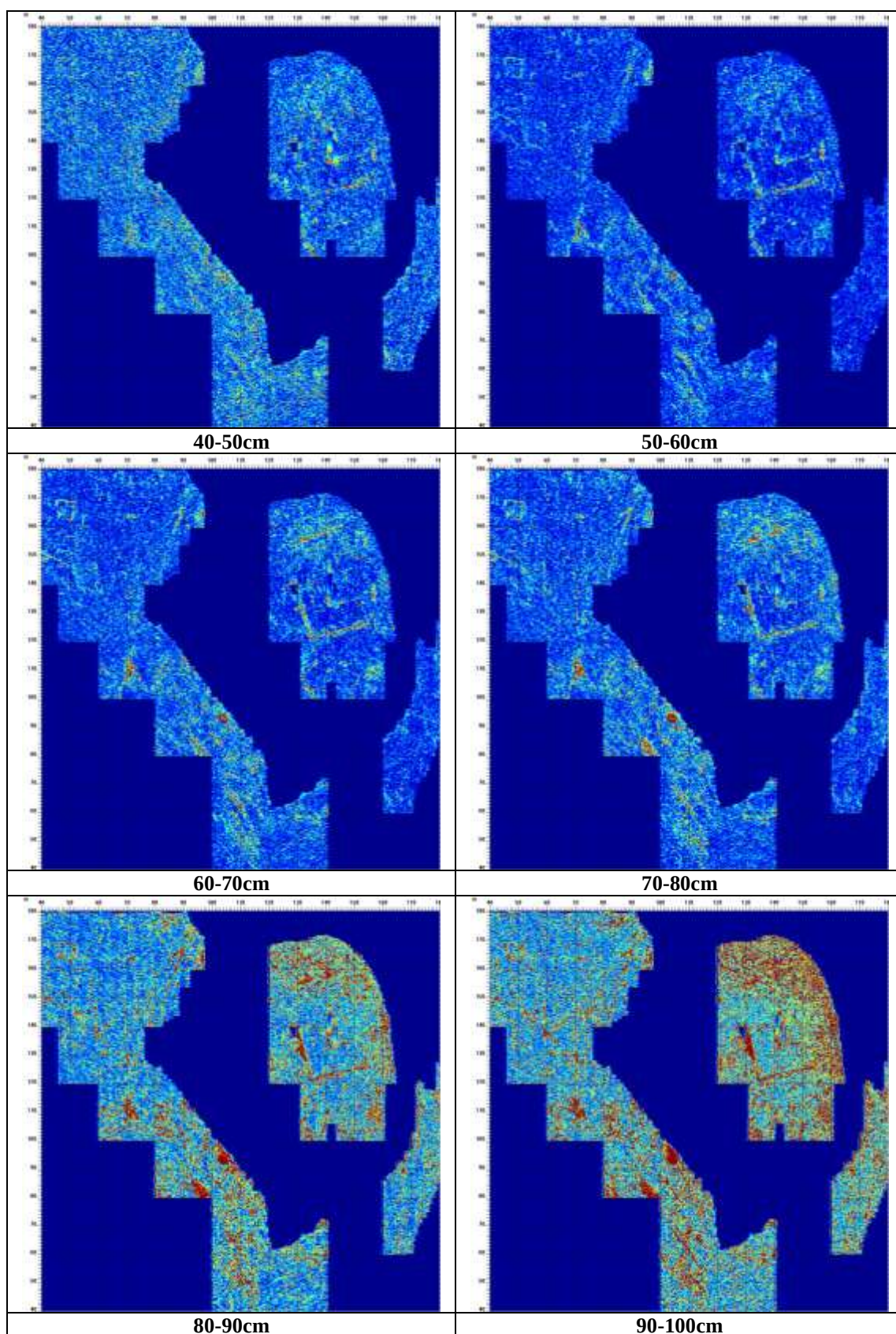
Interpolation limit: 2m

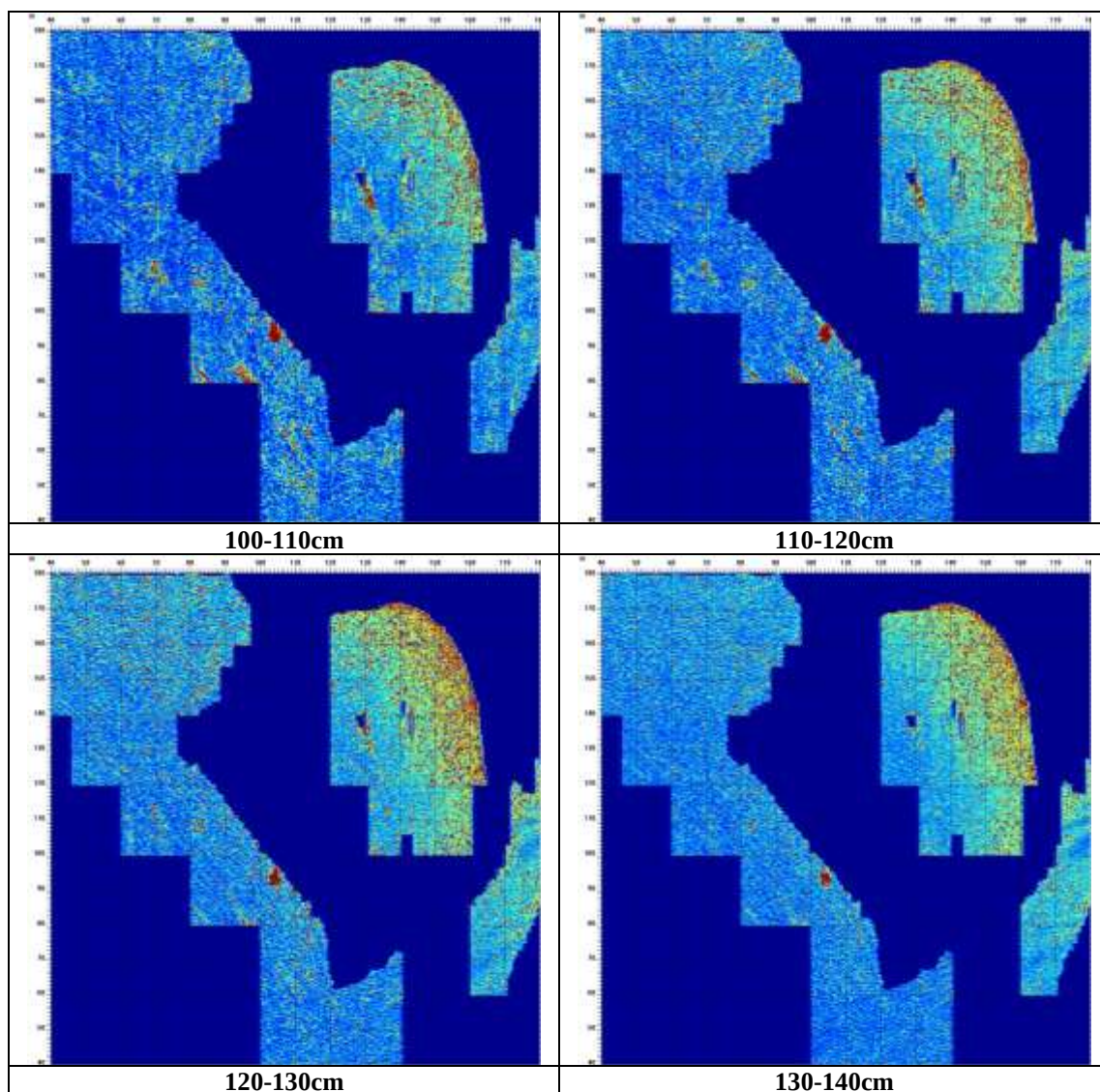




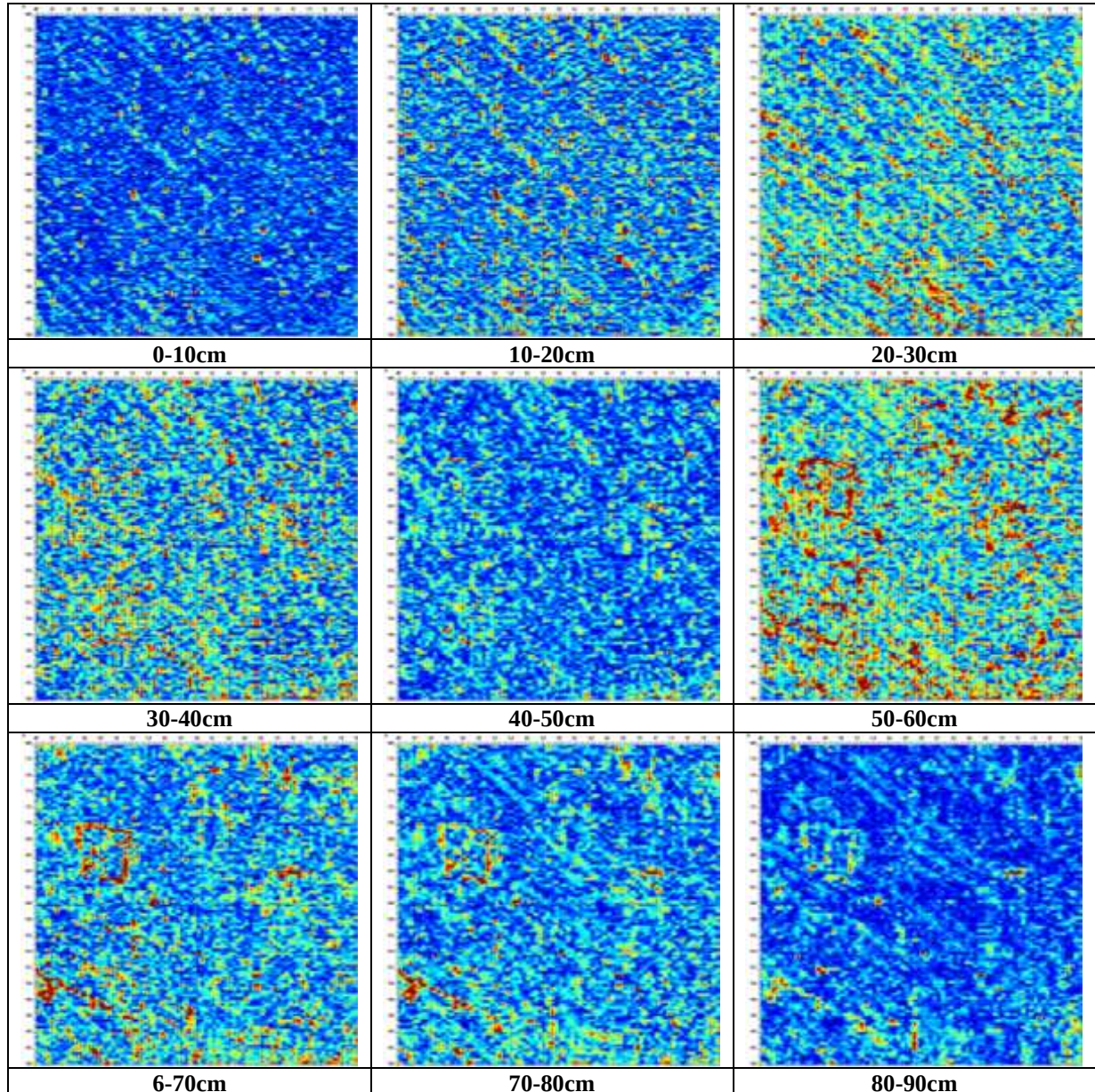
Συνολική περιοχή επάνω και περιμετρικά της μαγούλας Ζερέλια
Οριζόντιες τομές του υπεδάφους με αυξανόμενο βάθος (ανά 10cm)
Signal velocity: 0.1m/nsec
Local Background Subtraction (3m)
Processing: Dewow Time filter, Envelope
Amplitude Equalization: 3.93m
Interpolation limit: 2m

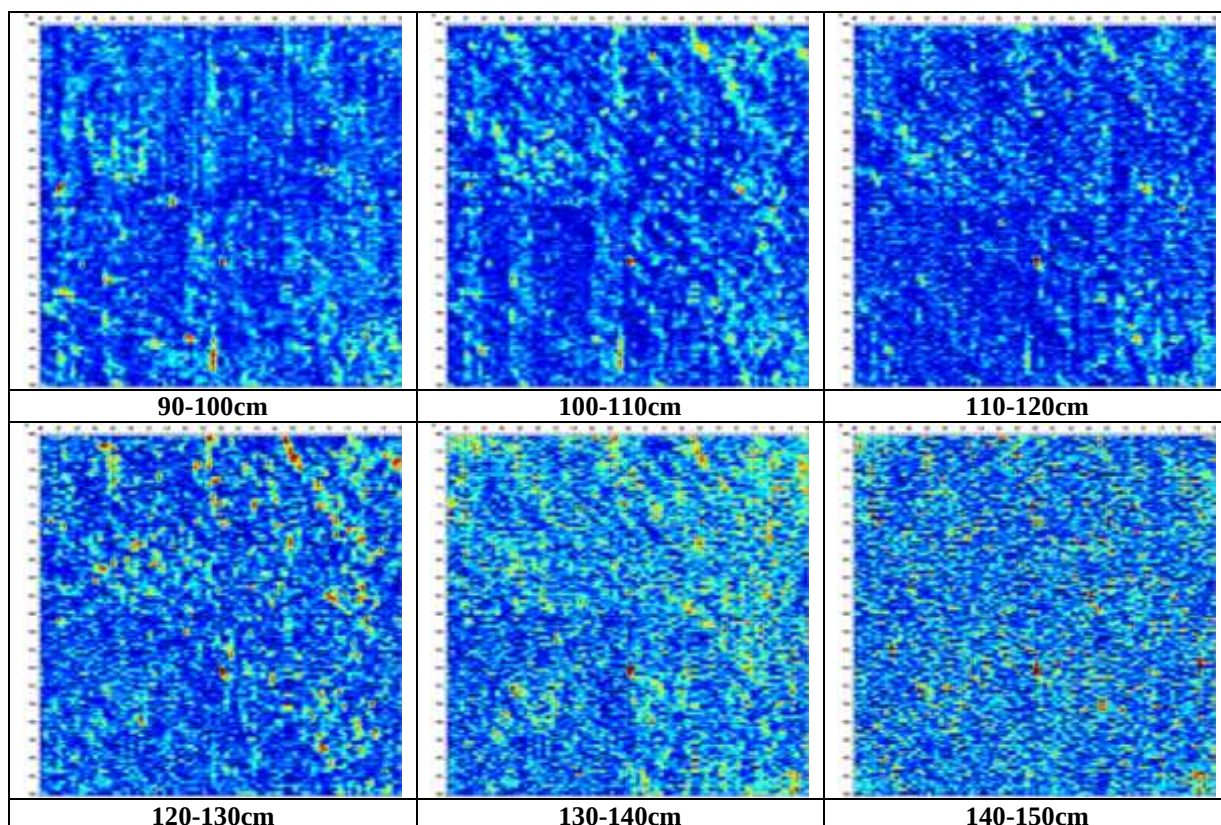


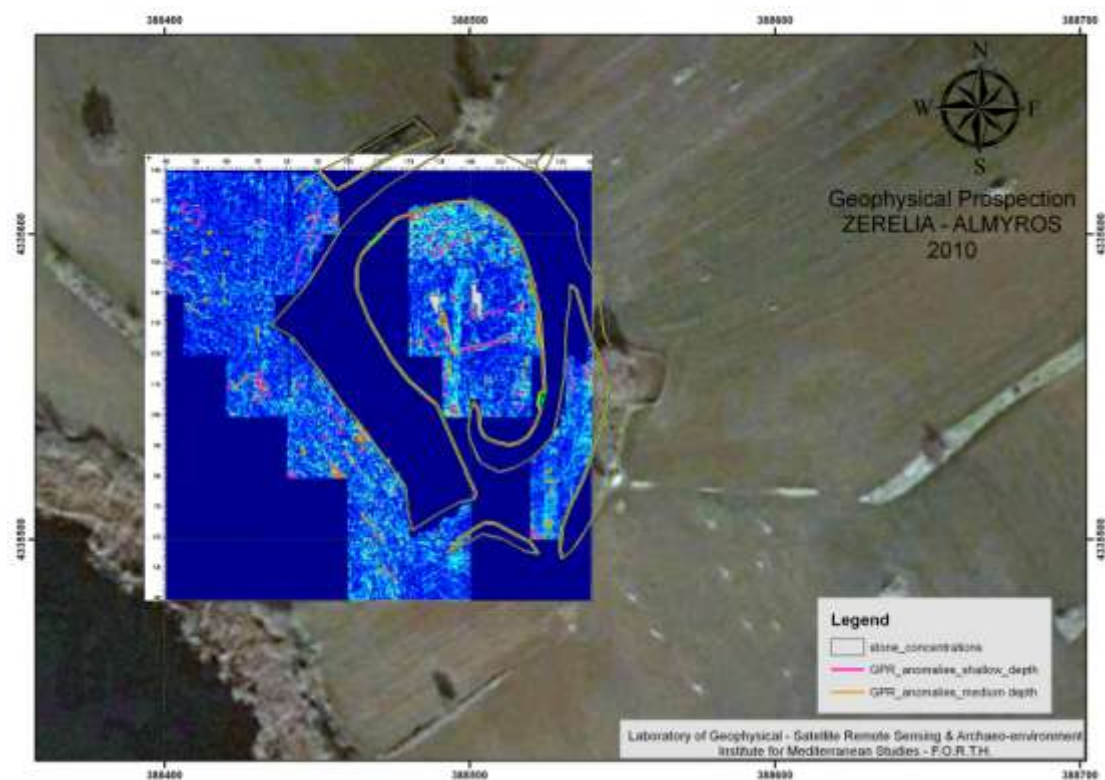




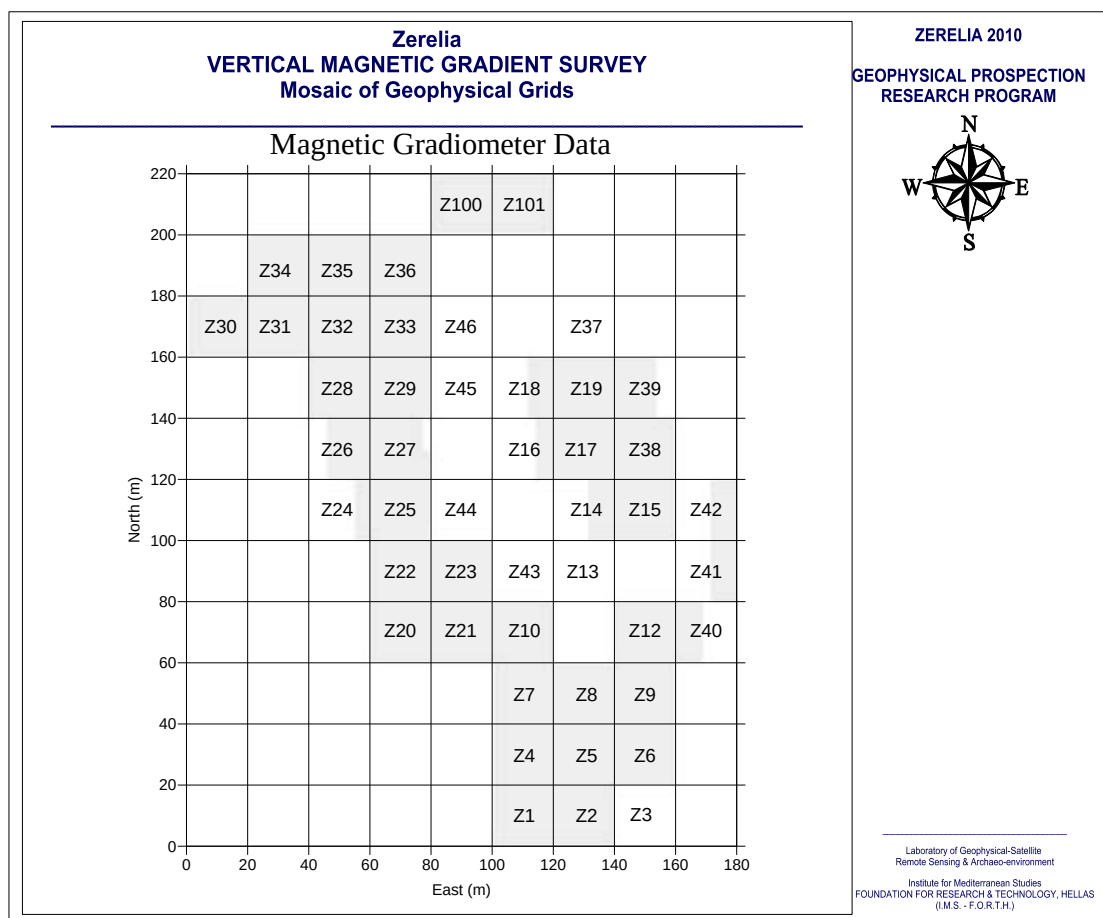
Περιοχή κάβναβων Z28, Z29, Z32, Z33
(EAST: 388400-388440, NORTH: 4335580-4335620m)
Οριζόντιες τομές του υπεδάφους με αυξανόμενο βάθος (ανά 10cm)
Signal velocity: 0.1m/nsec
Local Background Subtraction (3m)
Processing: Dewow Time filter, Migration, Envelope
Amplitude Equalization: 5m
Interpolation limit: 2m

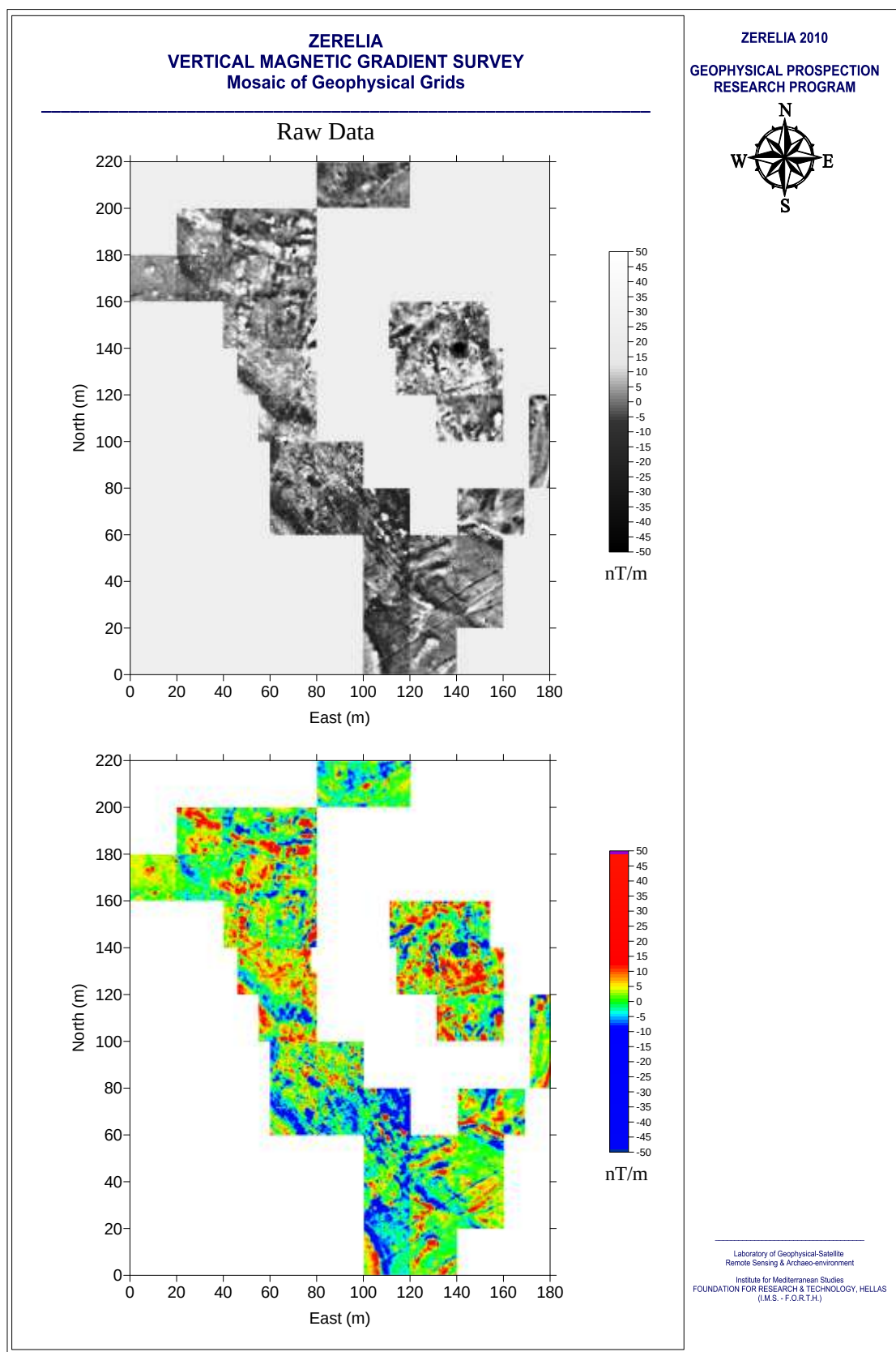


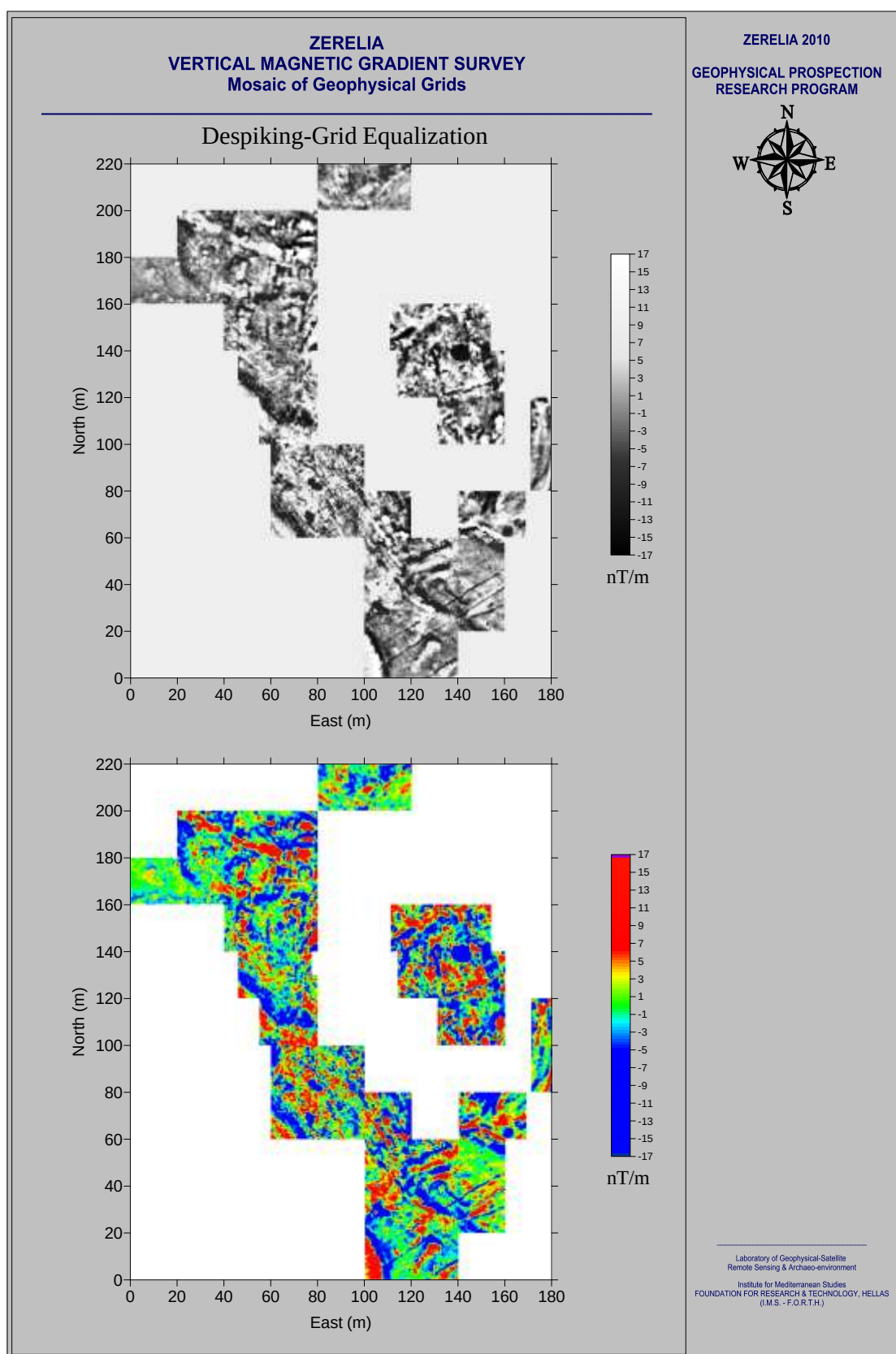


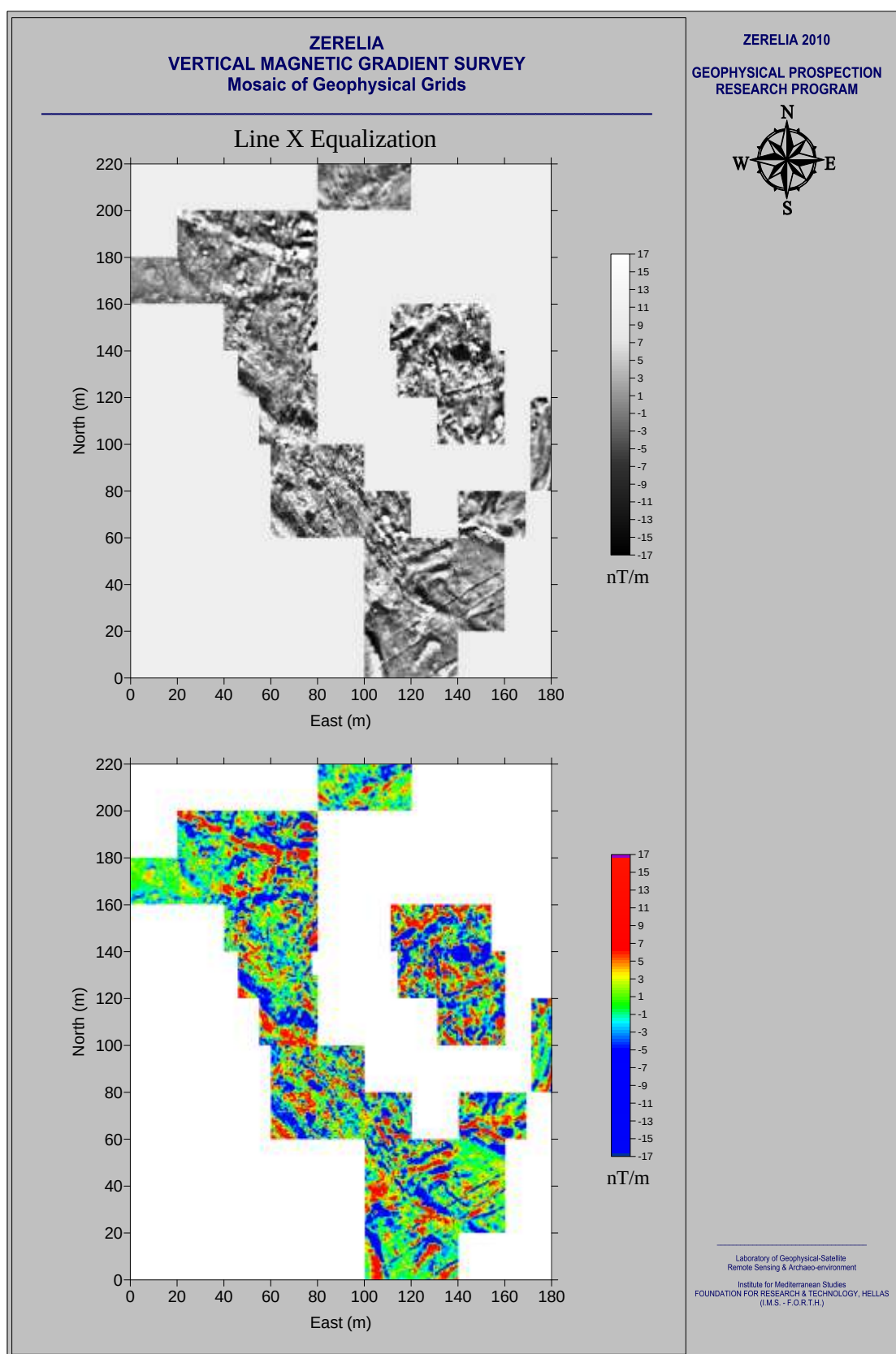


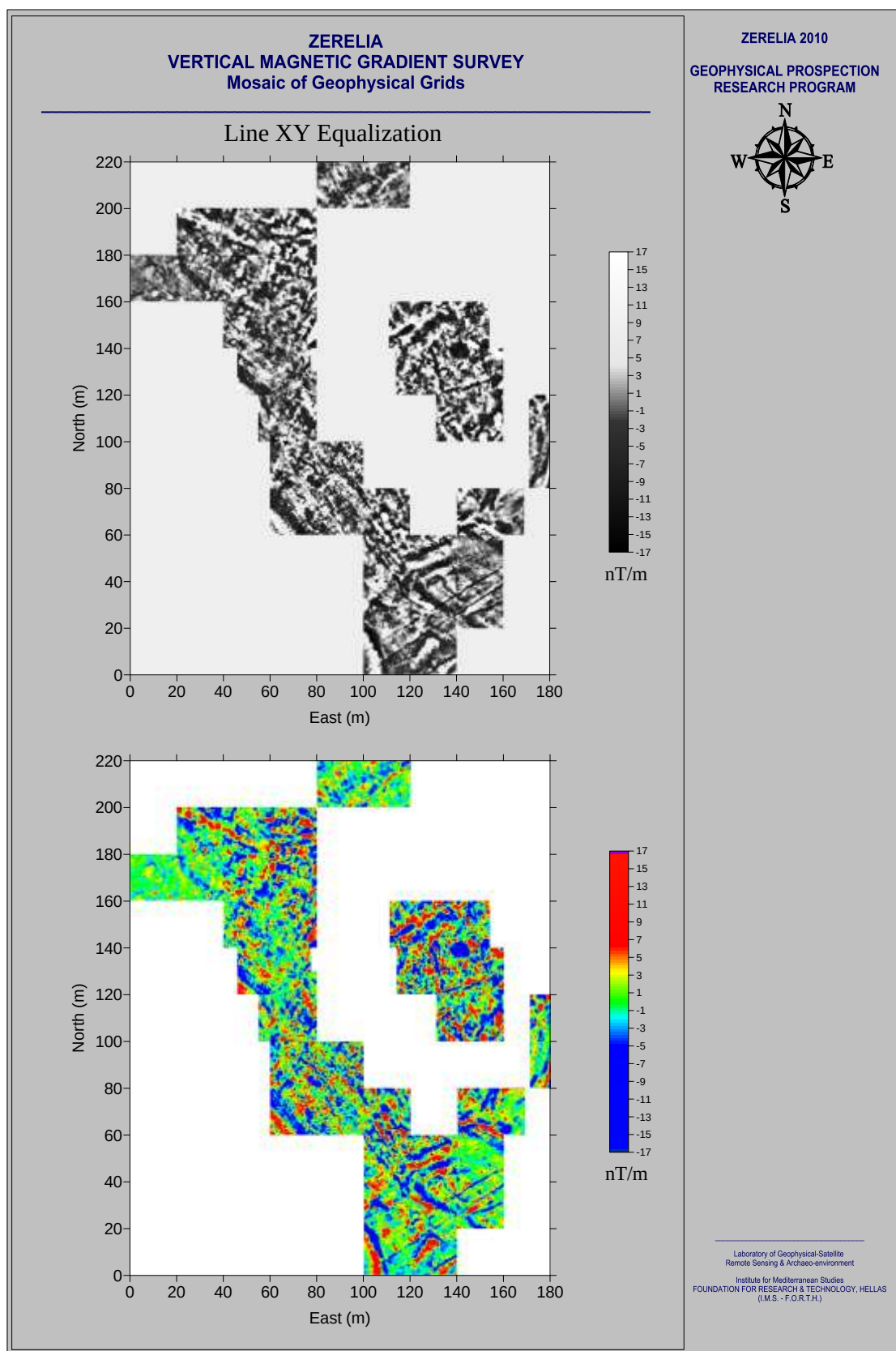
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ







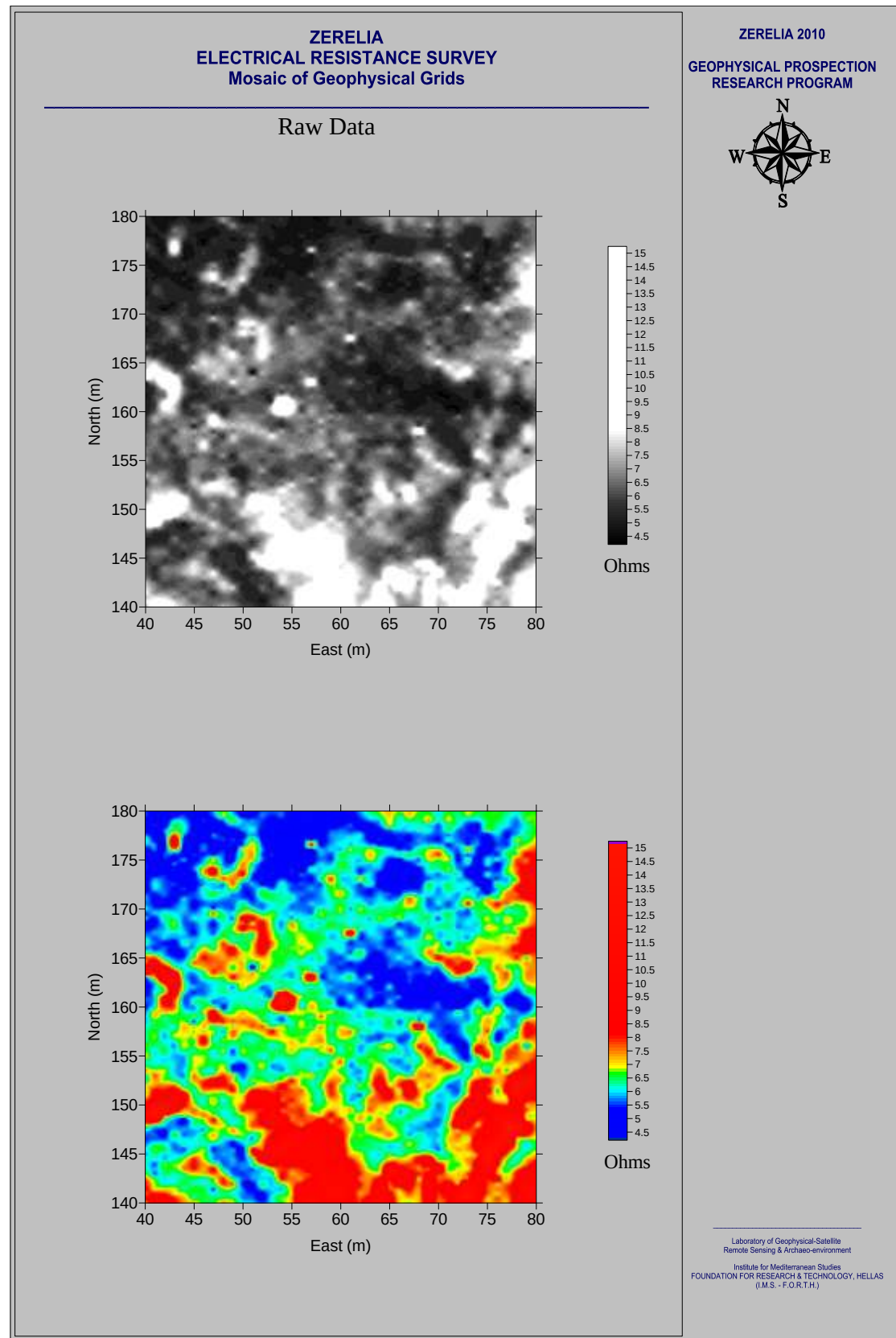


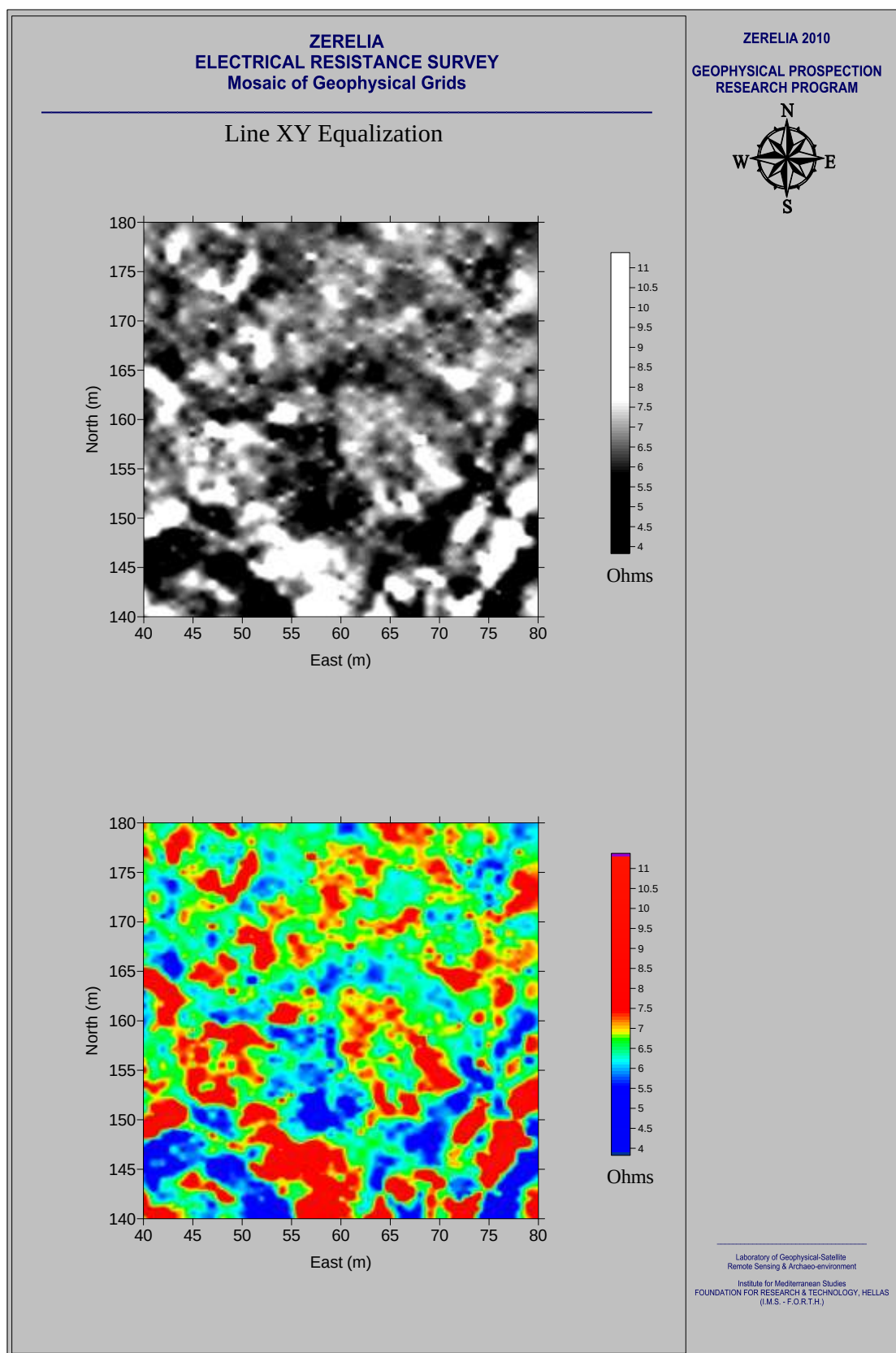




ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ

Περιοχή κάβναβων Z28, Z29, Z32, Z33
(EAST: 388400-388440, NORTH: 4335580-4335620m)

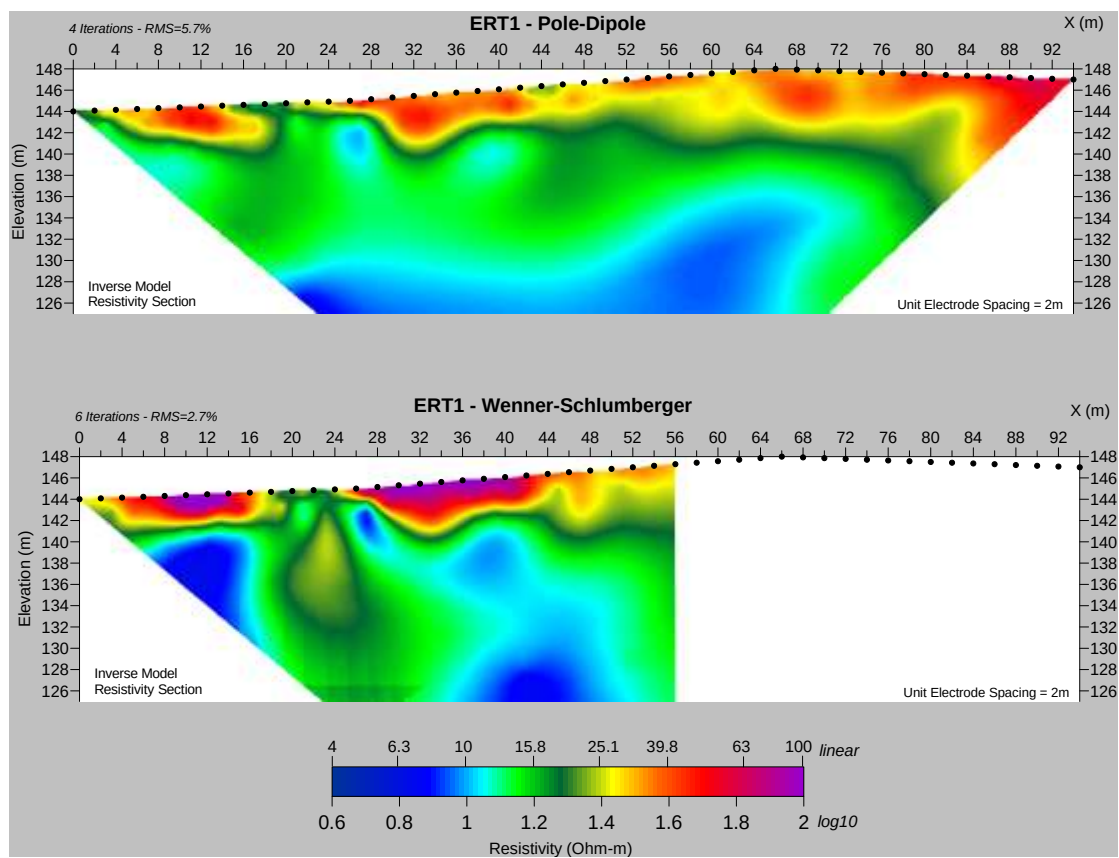


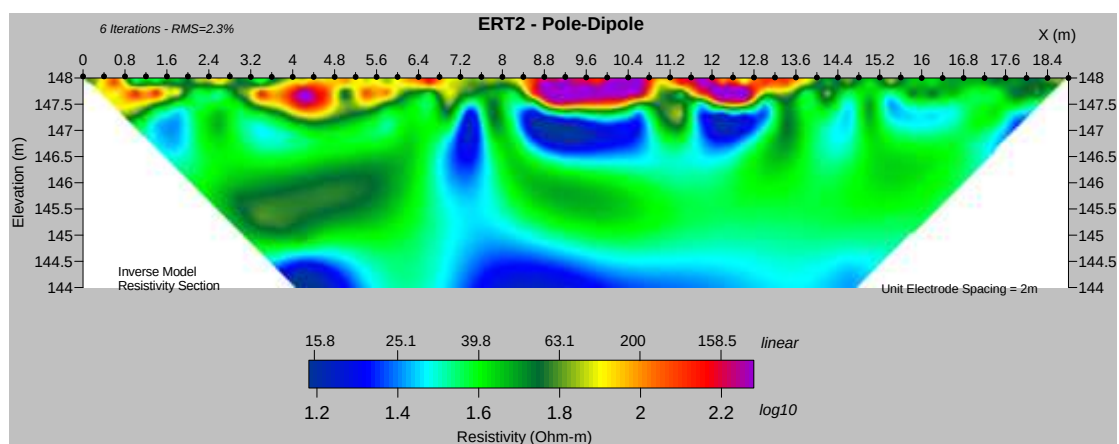


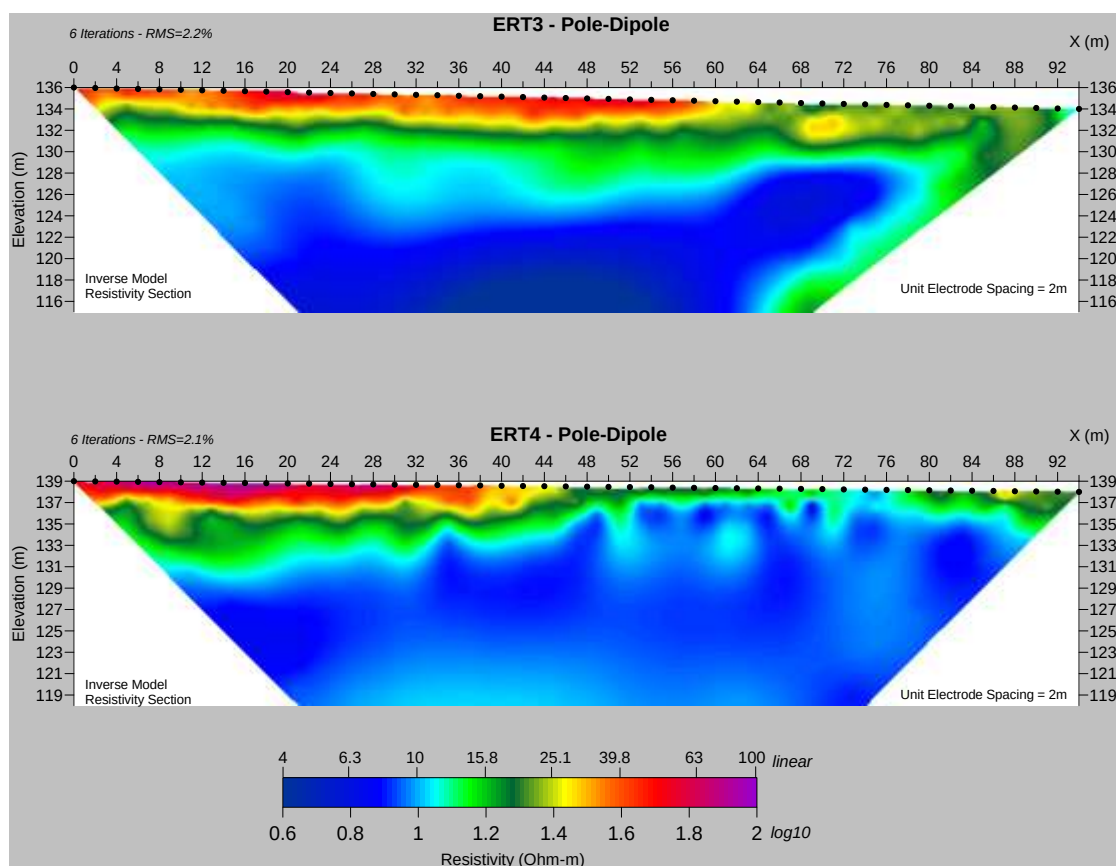


ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ









5. ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γεωφυσική διερεύνηση μαγούλων δεν έχει αποτελέσει συνηθισμένο αντικείμενο ερευνών, αν και παραμένει να είναι η μοναδική μη-καταστρεπτική μέθοδος προσέγγισης για την διερεύνηση του υπεδάφους των συγκεκριμένων μνημείων. Αυτό οφείλεται κυρίως σε μία δυσκολία προσέγγισης ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλαπλά στρώματα και φάσεις κατοίκησης που δημιουργούν κάποιες δυσκολίες όσον αφορά την ανάλυση και διακριτική ικανότητα των γεωφυσικών σημάτων. Από την άλλη πλευρά, σε μεμονωμένες φάσεις κατοίκησης η γεωφυσική έρευνα έχει δώσει αρκετά καλά αποτελέσματα. Το ίδιο ισχύει και στις επίπεδες περιοχές γύρω από τις μαγούλες.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις στην περιοχή της μαγούλας Ζερέλια θα πρέπει να θεωρηθούν ιδιαίτερα επιτυχής αφού είχαν ως αποτέλεσμα την υπόδειξη αρκετών υπεδάφειων χαρακτηριστικών τα οποία είναι πιθανόν να σχετίζονται με αρχιτεκτονικά λείψανα. Τα περισσότερα από τα υπεδάφεια χαρακτηριστικά προέρχονται κυρίως από τις μετρήσεις των μαγνητικών μετρήσεων και του γεωραντάρ τα οποία είχαν την πιο πυκνή δειγματοληψία του χώρου. Και οι δύο τεχνικές έχουν δώσει ένα πλήθος γεωφυσικών ανωμαλιών οι οποίες εκτείνονται μέχρι ένα βάθος περίπου 2m από την σημερινή επιφάνεια του εδάφους. Τμήμα της περιοχής που διερευνήθηκε και με ηλεκτρικές μεθόδους επιβεβαίωσε την ύπαρξη ορισμένων από τους παραπάνω στόχους βελτιώνοντας την ερμηνεία των γεωφυσικών σημάτων. Τα στοιχεία που συλλέχτηκαν στην έκταση που διερευνήθηκε (πλέον των 15.000 τετραγωνικών μέτρων) μπορούν να συμπληρώσουν την εικόνα που υπάρχει από τα λιγοστά ευρήματα από τις μέχρι σήμερα δοκιμαστικές ανασκαφές που έχουν διενεργηθεί στον χώρο της μαγούλας. Για την καλύτερη ερμηνεία των γεωφυσικών ανωμαλιών και την συσχέτιση τους με την γεωμορφολογία της περιοχής, έγινε γεωαναφορά όλων των γεωφυσικών χαρτών στο τοπογραφικό σχέδιο των καννάβων και στην γεωαναφερμένη δορυφορική εικόνα Quickbird (από το Google Earth).

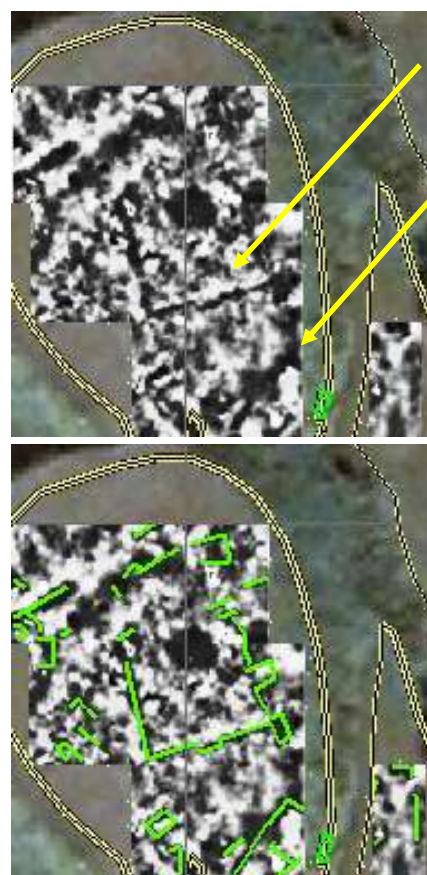
Πιο συγκεκριμένα, οι μαγνητικές μετρήσεις που κάλυψαν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής ενδιαφέροντος έδωσαν πλήθος από ανωμαλίες κυρίως επάνω στο επίπεδο της μαγούλας καθώς και προς τα ΒΔ αυτής (Εικόνα 5.1.).



Εικόνα 5.1. Υπέρθεση της διαγραμματικής ερμηνείας των μαγνητικών ανωμαλιών πάνω στον χάρτη της κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου.

Στον επίπεδο χώρο που βρίσκεται πάνω στην μαγούλα οι μαγνητικές διασκοπήσεις υπέδειξαν την παρουσία αρκετών γραμμικών στοιχείων τα περισσότερα εκ των οποίων έχουν παρόμοια διεύθυνση. Στο κέντρο της μαγούλας κυριαρχεί μία εκτεταμένη ορθογώνια δομή, στην οποία φαίνονται καθαρά η δυτική, νότια και ανατολική τοιχοδομή αυτής, ενώ δεν είναι ξεκάθαρη η βόρεια επέκταση αυτής. Εάν τα βόρεια όρια της αρχιτεκτονικής δομής περνούν λίγο βορειότερα από το τριγωνομετρικό σημείο που υπάρχει στο κέντρο της μαγούλας (και το οποίο έχει επισκιάσει τις μαγνητικές μετρήσεις σε μία απόσταση πάνω από 3m γύρω από αυτό), τότε οι διαστάσεις του κτίσματος είναι περίπου 20x20m. Η γραμμικότητα των τοιχοδομών του κτίσματος διακόπτεται σε διαφορετικά σημεία (π.χ. κέντρο της ανατολικής τοιχοδομής, κέντρο της νότιας τοιχοδομής). Γραμμικά στοιχεία εμφανίζονται και βορειότερα, καθώς επίσης και ανατολικά της ανασκαφικής τομής που διενεργεί το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Μία επίσης ορθογώνια κατασκευή μήκους 16m και πλάτους 6m περίπου φαίνεται επίσης στο νοτιότερο τμήμα του πλατώματος της μαγούλας που διερευνήθηκε



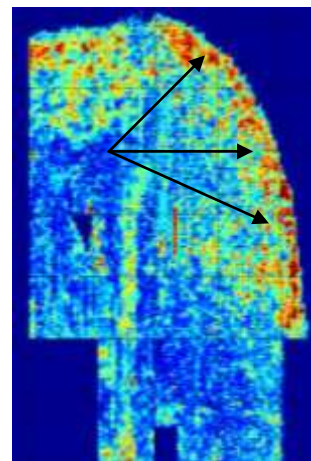
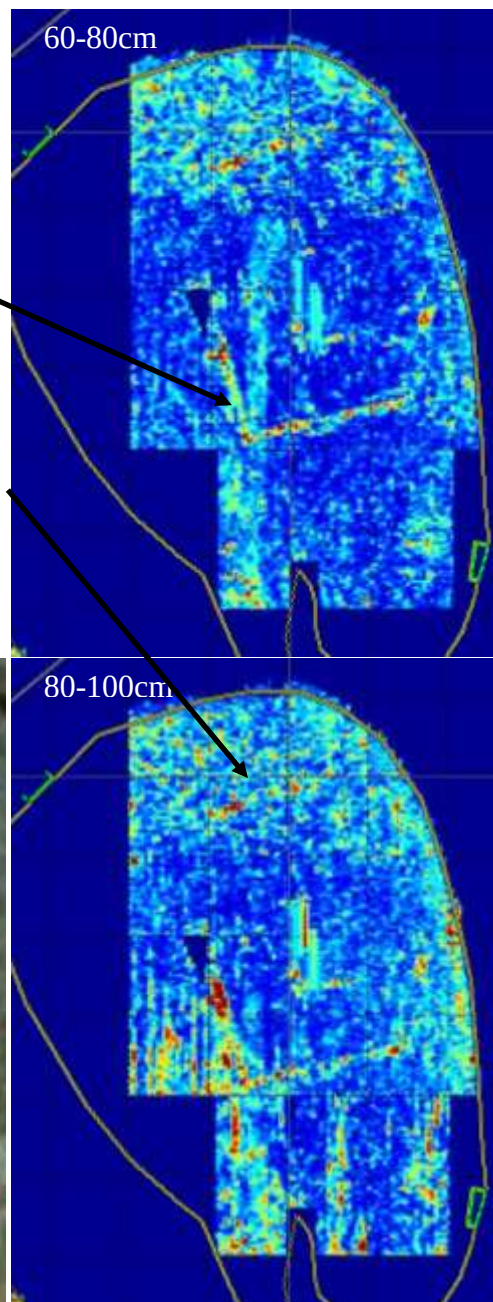
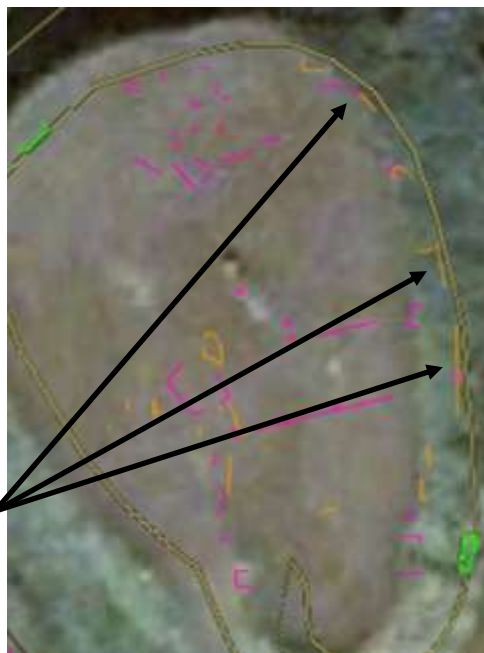
με τις μαγνητικές τεχνικές. Οι συγκεκριμένες ανωμαλίες θα πρέπει να ανήκουν στις πιο πρόσφατες φάσεις κατοίκησης της μαγούλας.

Τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά που υποδεικνύονται από την επεξεργασία και ερμηνεία των μαγνητικών δεδομένων επιβεβαιώθηκαν από τις μετρήσεις του γεωραντάρ. Η δυτική και νότια πλευρά της κεντρικής αρχιτεκτονικής δομής είναι διακριτές.

Μία σχετικά παράλληλη γραμμική ανωμαλία (αποτελούμενη από γραμμικά τμήματα ενδεχομένως λόγω της κακής διατήρησης αυτής) διακρίνεται περίπου 35m βορειότερα από την νότια τοιχοδομή. Οι μετρήσεις του γεωραντάρ δείχνουν επίσης μεγάλη διαταραχή στην περιοχή που εκτείνεται ακόμα βορειότερα μέχρι την άκρη του πλατώματος της μαγούλας. Η συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να σχετίζεται και να οριοθετεί την περιοχή του νεκροταφείου, όπου είχαν γίνει παλαιότερα ανασκαφές και είχε αποκαλυφθεί ένας αριθμός τάφων.

Επίσης, οι μετρήσεις του γεωραντάρ απεκάλυψαν ορισμένους

ακόμα ανακλαστήρες προς την ανατολική περίμετρο του πλατώματος της μαγούλας. Οι συγκεκριμένες ανωμαλίες φαίνεται να εκτείνονται σε βάθος περίπου 1m από την επιφάνεια του εδάφους και θα μπορούσαν να σχετίζονται με λιθοσωρούς, τμήματα των οποίων είναι ορατά και επιφανειακά, οι οποίοι είτε αποτελούν τμήμα της σωζόμενης οχύρωσης του οικισμού είτε προέρχονται από τον καθαρισμό του πλατώματος με στόχο την καλλιέργεια αυτού.

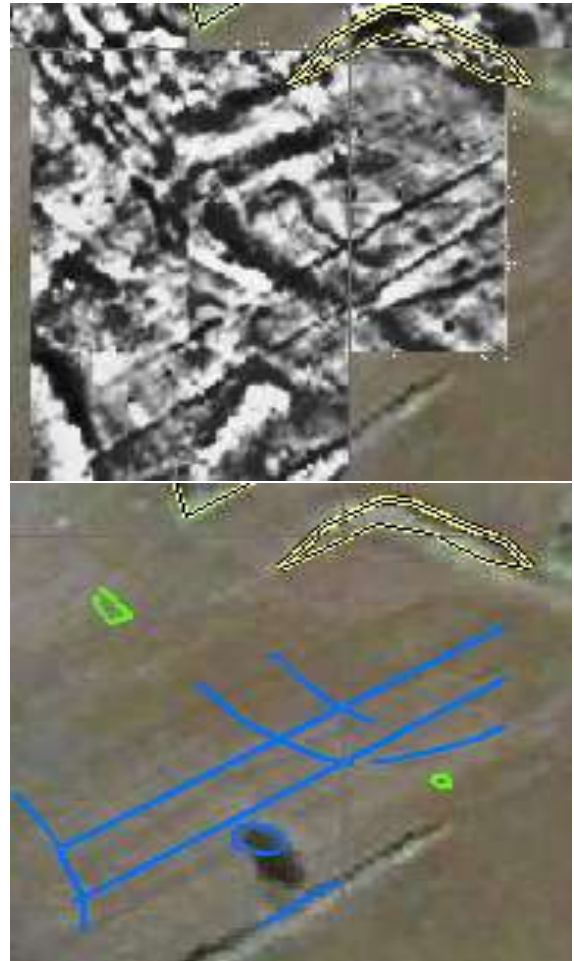


Επίσης, τμήματα γραμμικών χαρακτηριστικών εμφανίζονται και στο ανατολικό πέδιλο της μαγούλας (δυτικά από την στάνη και νότια της ανασκαφής της ΙΓ' ΕΠΚΑ) και ενδεχομένως σχετίζονται με λιθοσωρούς/τοιχία(?) όπως αυτά που έχουν έρθει στο φως από την ανασκαφή της ΙΓ' ΕΠΚΑ.

Ακόμα πιο νότια, ορισμένες καμπυλόγραμμες ανωμαλίες ενδέχεται να σχετίζονται με την διάνοιξη του ανατολικού πλατώματος της μαγούλας.



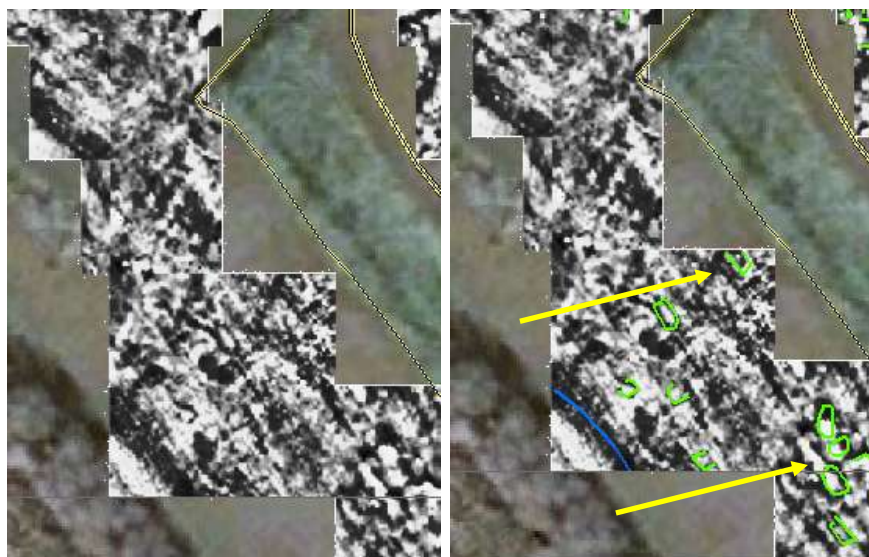
Παρόμοια χαρακτηριστικά που εκτείνονται νότια της μαγούλας φαίνεται να προέρχονται και αυτά από νεώτερες ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Για παράδειγμα οι γραμμικές ανωμαλίες που φαίνονται να εκτείνονται με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ προς την μεγάλη λίμνη Ζερέλια είναι πιθανόν να οφείλονται σε ίχνη/προέκταση παλαιότερου δρόμου, καθώς είναι στην προέκταση του χωματόδρομου που φτάνει στα Ζερέλια από την Ευξεινούπολη (από τα ανατολικά της μαγούλας).



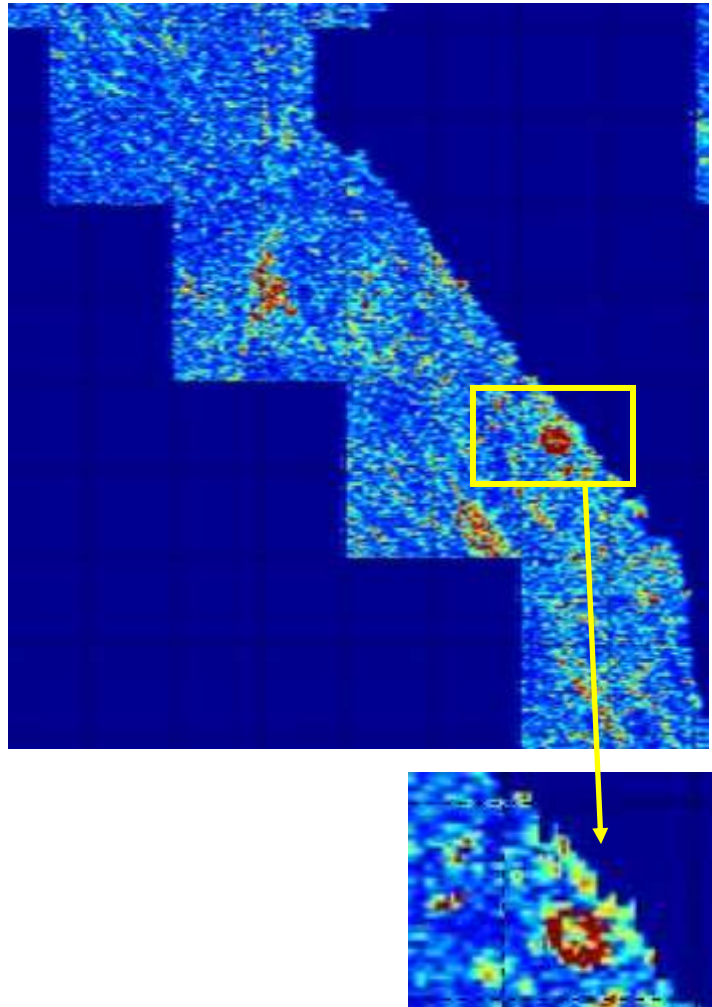
Προς τα δυτικά και σε εγγύτητα με την ακτογραμμή της μεγάλης λίμνης διακρίνονται 2 καμπυλόγραμμες ανωμαλίες που ενδέχεται να σχετίζονται με παλαιότερη ακτογραμμή της λίμνης.



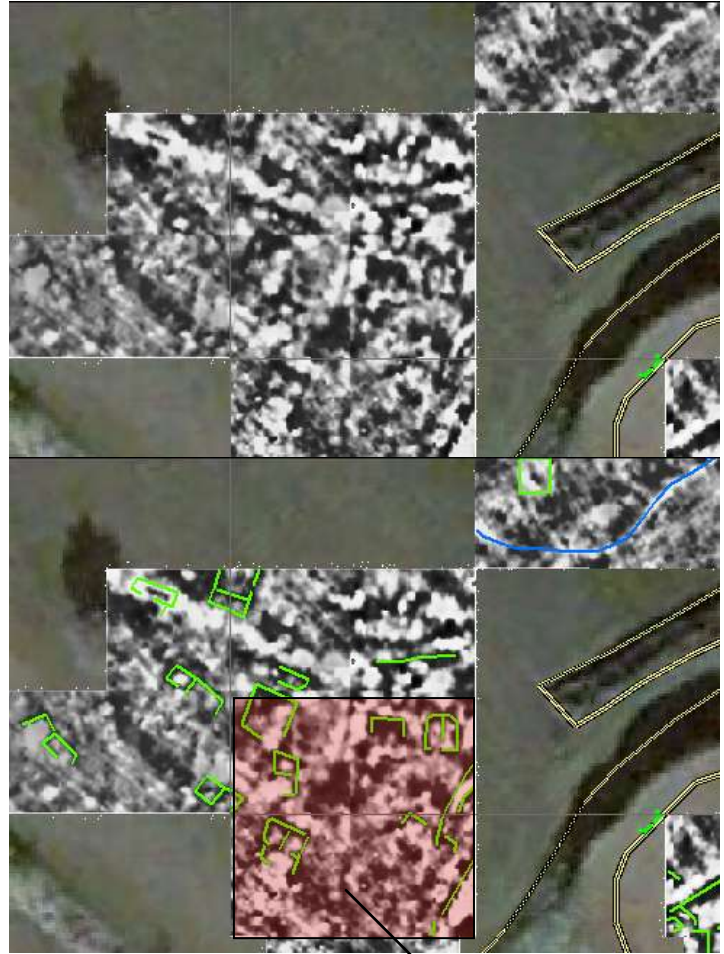
Η κεντρική περιοχή δυτικά της μαγούλας παρουσιάζει αυξημένα επίπεδα θορύβου κυρίως λόγω των αρόσεων. Λίγα μόνο σημεία φαίνεται να διαφοροποιούνται και να εμφανίζουν κάποιο πιθανό ενδιαφέρον κυρίως προς τα ΝΑ της κεντρικής περιοχής.



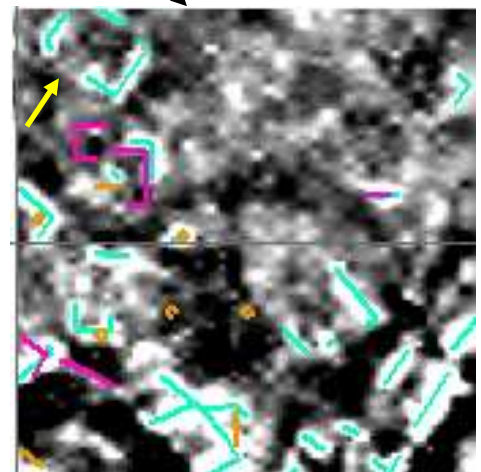
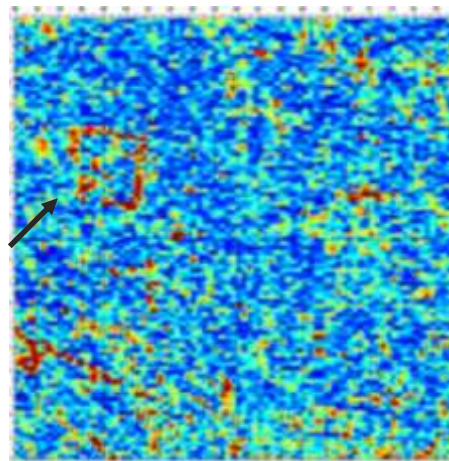
Στην ίδια περιοχή οι μετρήσεις του γεωραντάρ έδωσαν και αυτές μικρό αριθμό ανακλαστήρων. Πιο σημαντικός θεωρείται ο υποψήφιος στόχος που βρίσκεται εγγύτερα προς την μαγούλα και ο οποίος έχει διαστάσεις περίπου 2,5x3m και εκτείνεται σε ένα βάθος μεγαλύτερο των 1,5m



Από την άλλη πλευρά, η σχετικά επίπεδη περιοχή ΒΔ της μαγούλας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι μαγνητικές διασκοπήσεις έδωσαν ένα μεγάλο αριθμό ανωμαλιών που φαίνεται να σχετίζεται με την παρουσία ορθογώνιων αρχιτεκτονικών δομών, οι περισσότερες εκ των οποίων είναι προσανατολισμένες προς την διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Οι διαστάσεις των κτιρίων παρουσιάζουν διακυμάνσεις αλλά οι περισσότερες είναι μικρότερες από 6-7m.

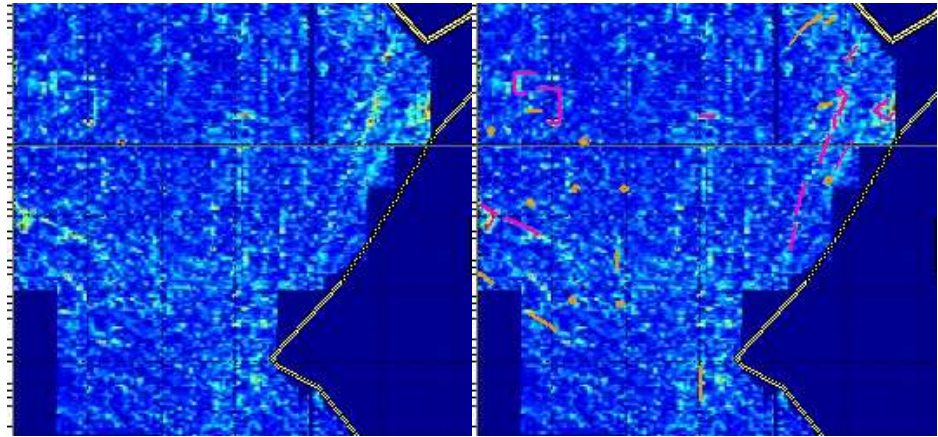


Ορισμένες από τις υποψήφιες μαγνητικές ανωμαλίες επιβεβαιώθηκαν από τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους και του γεωραντάρ, οι οποίες έδωσαν και αυτές με την σειρά τους ορισμένους



ακόμα υποψήφιους στόχους. Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην αρχιτεκτονική δομή που βρίσκεται στο ΒΔ άκρο και εκτείνεται στην περιοχή EAST=388402-388411m / NORTH=4335613-4335621m, έχοντας διαστάσεις 7,5-5,5m. Παρόμοιες διαστάσεις (6,5-5,5m) παρουσιάζει άλλη μία αρχιτεκτονική δομή λίγο νοτιότερα της πρώτης και εκτείνεται στην περιοχή EAST=388405-388411m / NORTH=4335603-4335610m. Από τις οριζοντιογραφικές απεικονίσεις του γεωραντάρ με αυξανόμενο βάθος, η συγκεκριμένη δομή φαίνεται επίσης να επεκτείνεται ανάμεσα στα 50-90cm από την επιφάνεια του εδάφους.

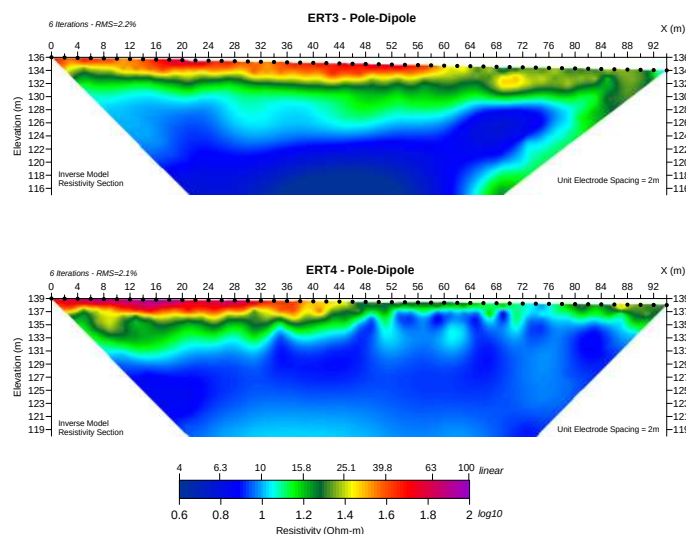
Ανάμεσα στα υπόλοιπα ευρήματα του γεωραντάρ από την συγκεκριμένη περιοχή περιλαμβάνονται κάποια γραμμικά στοιχεία πλησίον της μαγούλας που ενδεχομένως σχετίζονται με την οριοθέτηση (παλιά ίχνη) της μαγούλας, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή έχει και αυτή ισοπεδωθεί από τρακτέρ με σκοπό να γίνει εκμεταλλεύσιμη προς καλλιέργεια.



Εάν και η ευρύτερη περιοχή προς τα βόρεια και ΒΔ της μαγούλας παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά, τότε θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για την παρουσία ενός «επίπεδου» οικισμού ο οποίος σχετίζεται με την μαγούλα και εκτείνεται πέρα από αυτήν ενώ θα πρέπει να προβληματίσει το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος οικισμός βρίσκεται αντίθετα από τις λίμνες και σε μία θέση που έχει εποπτεία των καλλιεργήσιμων βόρειων γαιών και της ακτογραμμής προς τα ανατολικά.

Τέλος, αναφορικά με τα αποτελέσματα των Δισδιάστατων Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών, οι τομογραφίες ERT3 και ERT4 παρουσιάζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα σχετικά με την γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους κατά μήκος των τομών και σε βάθος μέχρι τα 20 περίπου μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Συνοπτικά εντοπίζονται δύο οριζόντια στρώματα, το επιφανειακό που σχετίζεται με σχετικά χαλαρές αποθέσεις

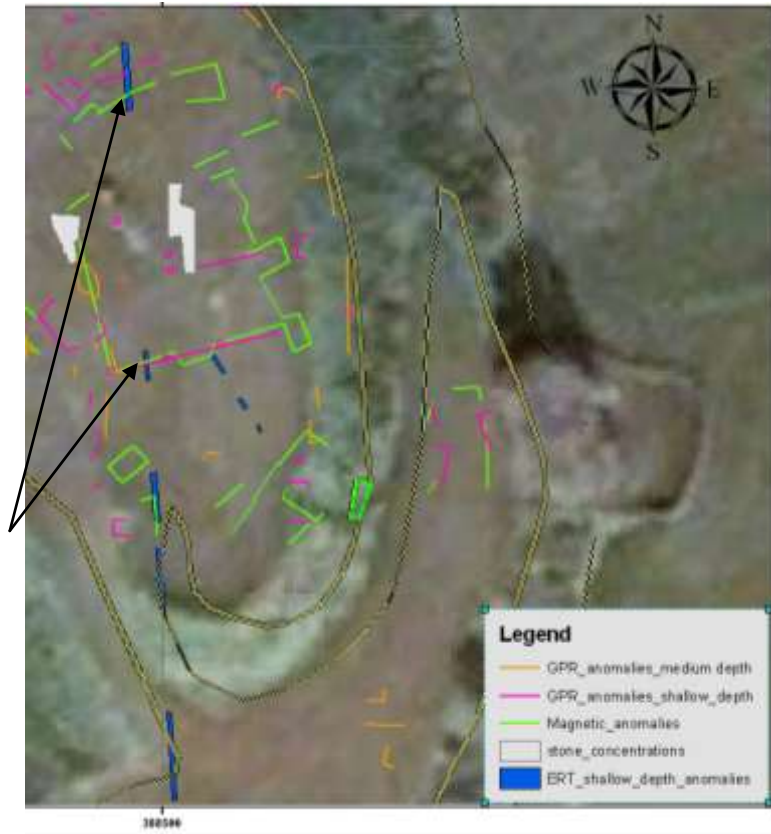
άμμων, χαλικίων και αργίλων το οποίο εμφανίζεται με τιμές ειδικών αντιστάσεων μεγαλύτερων των 15 Ohm-m (>15 Ohm-m), ενώ το υποκείμενο στρώμα έχει χαμηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων (<15 Ohm-m). Στην τομή ERT3 το επιφανειακό στρώμα ξεκινάει από την επιφάνεια του εδάφους και εκτείνεται κατά μήκος όλης της γραμμής έχοντας ένα σχετικά σταθερό πάχος ίσο με 4,5-5 μέτρα. Μία παρόμοια κατάσταση παρατηρείται επίσης στην τομή ERT4, όπου αυτό το επιφανειακό στρώμα έχει επίσης πάχος 4,5-5 μέτρα μέχρι την οριζόντια απόσταση των 40 μέτρων από την αρχή της τομής στα ΝΑ, ενώ στην συνέχεια το στρώμα συνεχίζει ελαφρά λεπτότερο προς τα ΒΔ με ένα πάχος περίπου 2-2,5 μέτρων. Το υποκείμενο στρώμα των χαμηλών



αντιστάσεων, το οποίο εντοπίζεται και στις δύο τομές σε βάθος μεγαλύτερο των 5 μέτρων αντιπροσωπεύει τα ιζήματα της περιοχής που είναι κορεσμένα με νερό.

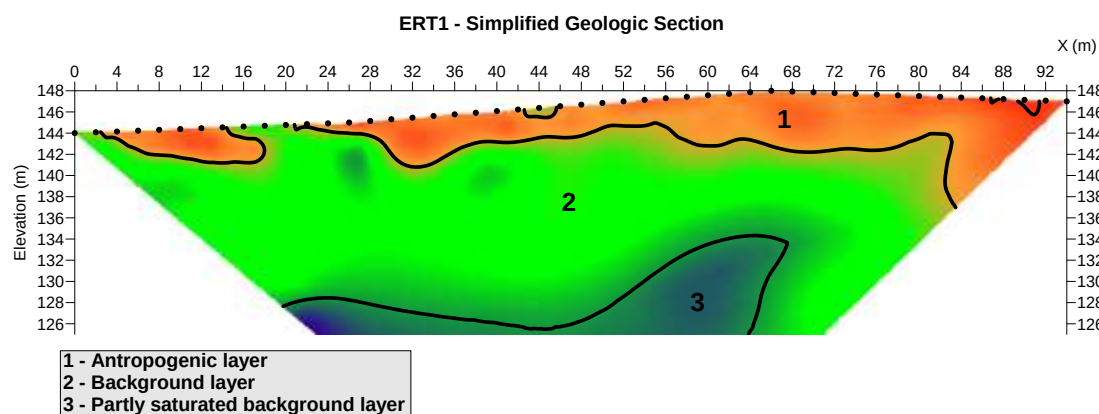
Επίσης το ασβεστολιθικό υπόβαθρο της περιοχής φαίνεται να βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 20 μέτρων, καθώς σε καμία από τις δύο τομογραφίες δεν παρατηρηθήκαν τιμές αντιστάσεων που να δικαιολογούν την ύπαρξη του ασβεστολιθικού σχηματισμού.

Η τομή ERT1 ξεκίνησε από τα νότια και διέσχισε την μαγούλα προς τα βόρεια, περνώντας δυτικά του τοπογραφικού σημείου που βρίσκεται στην κορυφή της μαγούλας. Στα νότια της γραμμής ($X=4\text{m}$) και μέχρι την οριζόντια απόσταση των 12 μέτρων προς τα βόρεια εμφανίζεται μία περιοχή με υψηλές τιμές αντιστάσεων ($>40 \text{ Ohm-m}$) πάχους 1-1,5 μέτρου. Μία παρόμοια ανωμαλία υψηλών αντιστάσεων εμφανίζεται λίγο βορειότερα ($X=28-40$ μέτρα). Οι δύο αυτές ανωμαλίες ενδεχομένως να σχετίζονται από εδαφικές συγκεντρώσεις λόγω της κατασκευής του δρόμου που οδηγεί στην κορυφή της μαγούλας. Από την οριζόντια απόσταση των 40 μέτρων και μέχρι το τέλος της τομής, χαρτογραφείται το ανθρωπογενές στρώμα της μαγούλας το οποίο εμφανίζεται με αυξανόμενο πάχος, από τα 2 μέτρα στα 5-6 μέτρα, από τα νότια προς τα βόρεια. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από το γεγονός της διαμόρφωσης της μαγούλας στα νότια για την κατασκευή του δρόμου που οδηγεί στην κορυφή της με την αφαίρεση του αντίστοιχου εδαφικού υλικού.



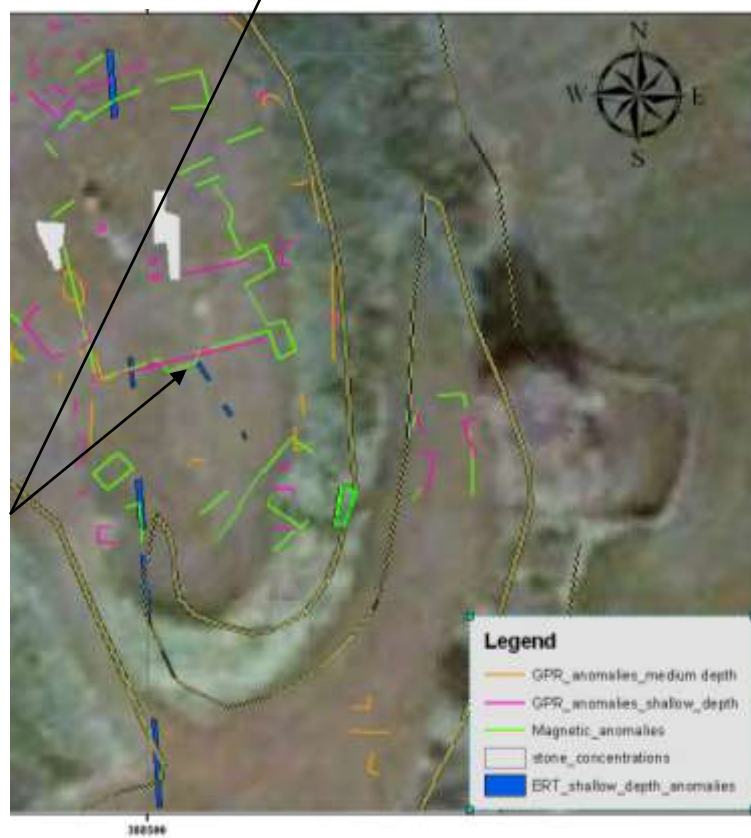
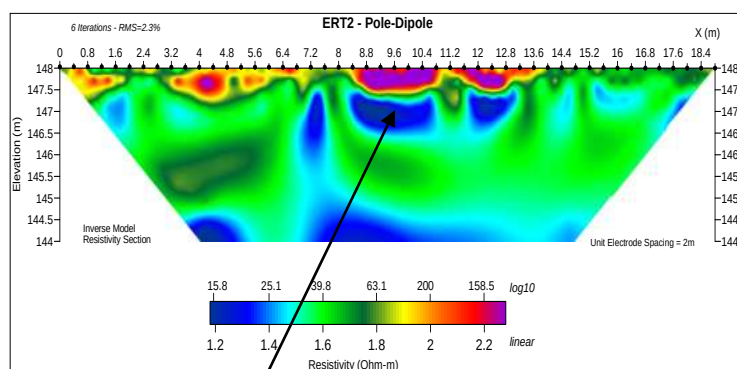
Οι τελευταίες δύο σημαντικές ανωμαλίες της ηλεκτρικής αντίστασης συμπίπτουν με τις πιθανές τοιχοδομές (νότια και βόρεια) της ορθογώνιας αρχιτεκτονικής δομής που βρίσκεται στο κέντρο του πλατώματος της μαγούλας.

Κάτω από το ανθρωπογενές υλικό της μαγούλας χαρτογραφείται το στρώμα των άμμων, χαλίκιων και αργίλων πάνω στο οποίο θεμελιώθηκε η κατασκευή της μαγούλας και στην συνέχεια εντοπίζονται τα μερικώς κορεσμένα σε νερό ιζήματα.

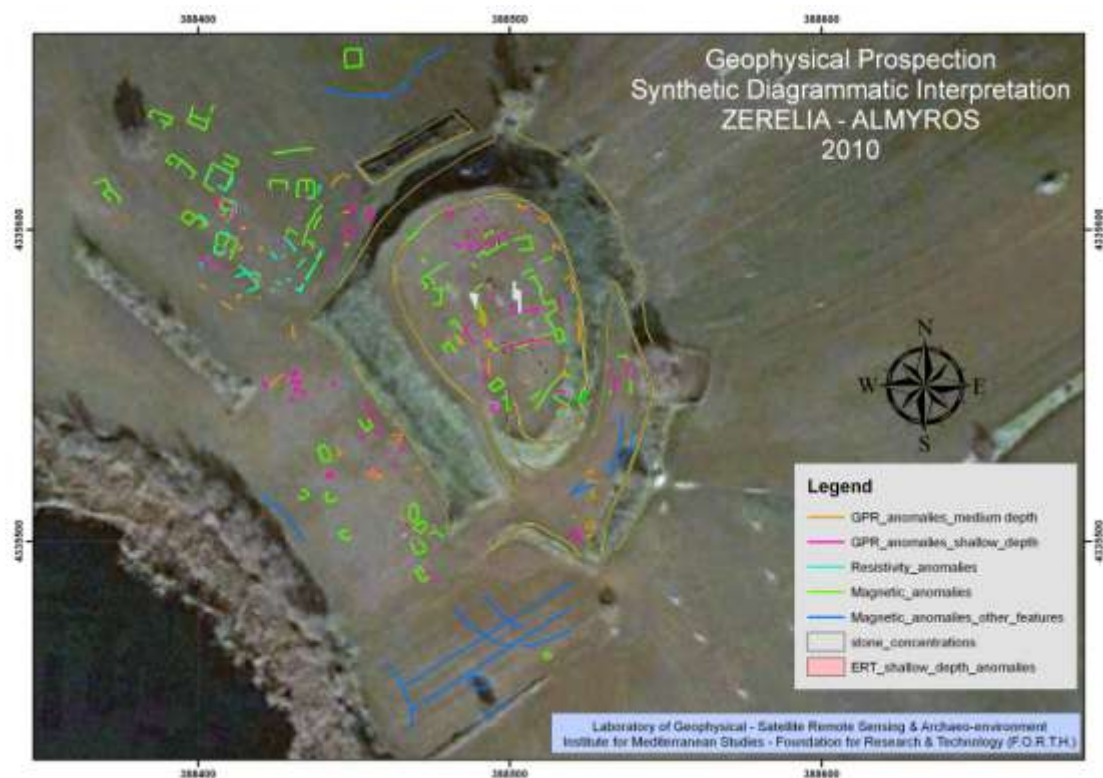


Στην παραπάνω Εικόνα φαίνεται ένα απλοποιημένο γεωλογικό μοντέλο των σχηματισμών που εντοπίζονται κατά μήκος της τομής ERT1 και σε μέγιστο βάθος 20 περίπου μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους.

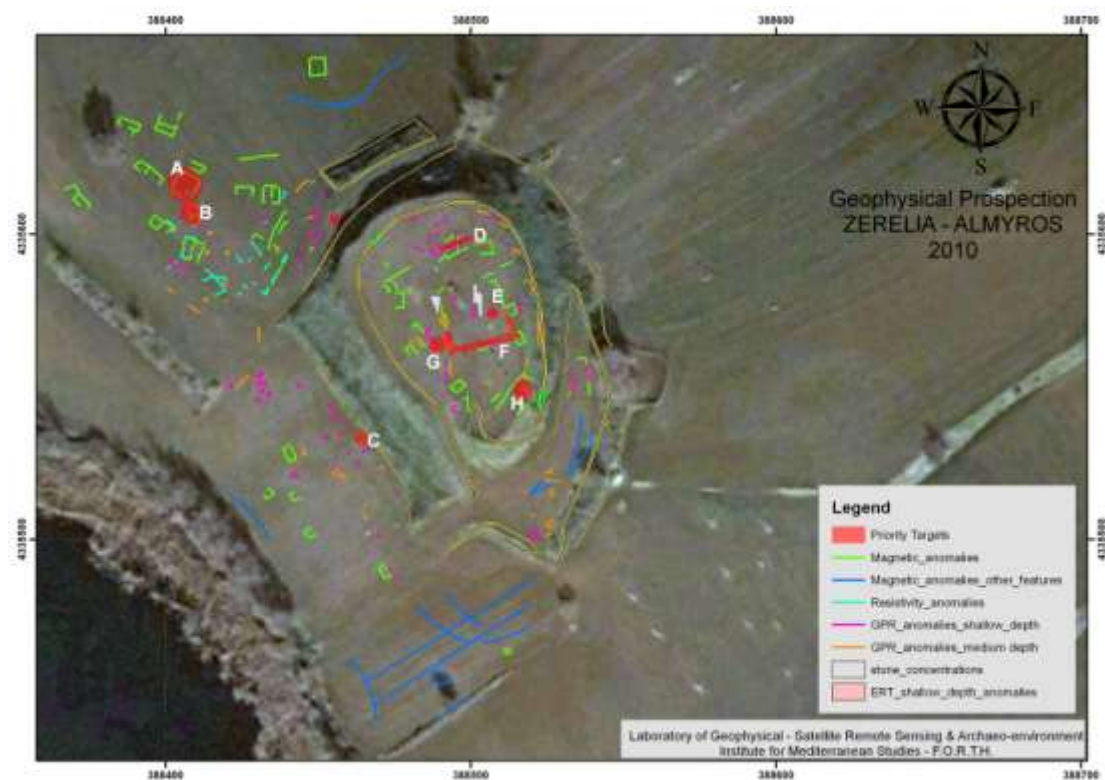
Κατά μήκος της τομής ERT2 εντοπίζονται επιφανειακά και μέχρι το βάθος του ενός μέτρου κάποιες περιοχές με υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων ($X=0.8-1.6$ m, $X=4-5.2$ m, $X=8.8-10.4$ m, $X=12-12.12.8$). Ειδικά η περιοχή προς το τέλος της όδευσης συσχετίζεται με τις γραμμική ανωμαλία που εντοπίστηκε τόσο στις μαγνητικές μετρήσεις όσο και το γεωραντάρ και αφορά την νότια τοιχοδομή της ορθογώνιας αρχιτεκτονικής δομής στο κέντρο του πλατώματος της μαγούλας.



Τα συνολικά αποτελέσματα από την διαγραμματική ερμηνεία όλων των γεωφυσικών διασκοπήσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.2. ενώ οι προτεινόμενοι στόχοι για μελλοντική διερεύνηση (ως στόχοι υψηλής προτεραιότητας) παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.3. και 5.4.



Εικόνα 5.2. Λεπτομέρειες από τα συνθετικά αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην περιοχή της Μαγούλας Ζερέλια. Διαγραμματική ερμηνεία των γεωφυσικών ανωμαλιών.



Εικόνα 5.3. Προτεινόμενες περιοχές για μελλοντική διερεύνηση (στόχοι υψηλής προτεραιότητας)



Εικόνα 5.4. Λεπτομέρειες από τις προτεινόμενες περιοχές για μελλοντική διερεύνηση (στόχοι υψηλής προτεραιότητας)

Τέλος θα πρέπει να γίνει και αναφορά στις μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας από δείγματα εδαφών που λήφθηκαν από την τομή της ΙΓ' ΕΠΚΑ που βρίσκεται ΝΑ της μαγούλας. Δείγματα συλλέχθηκαν ανά 5cm από την επιφάνεια της μαγούλας μέχρι ένα βάθος 2m και μετρήθηκε εργαστηριακά η μαγνητική επιδεκτικότητα σε δύο συχνότητες με το όργανο Bardington MS2B. Οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας για τις δύο συχνότητες καθώς και ο υπολογισμός του frequency dependent susceptibility (FDS%) , LeBorgne Contrast (LBC) & Normalized Le Borgne Contrast (NLBC) παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Οι μετρήσεις έγιναν για να γίνει μία συσχέτιση της μαγνητικής επιδεκτικότητας με τις φάσεις κατοίκησης.

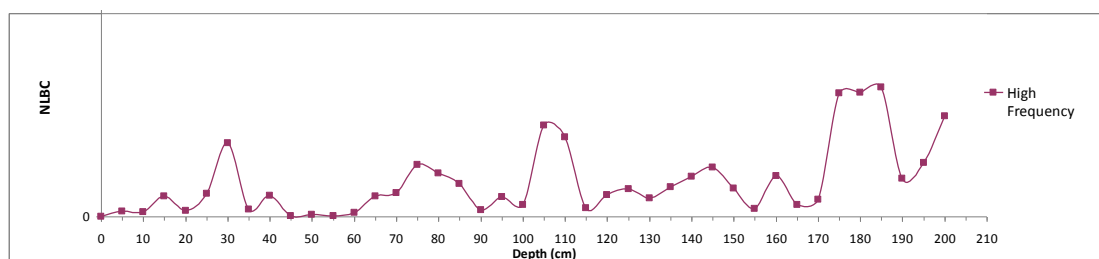
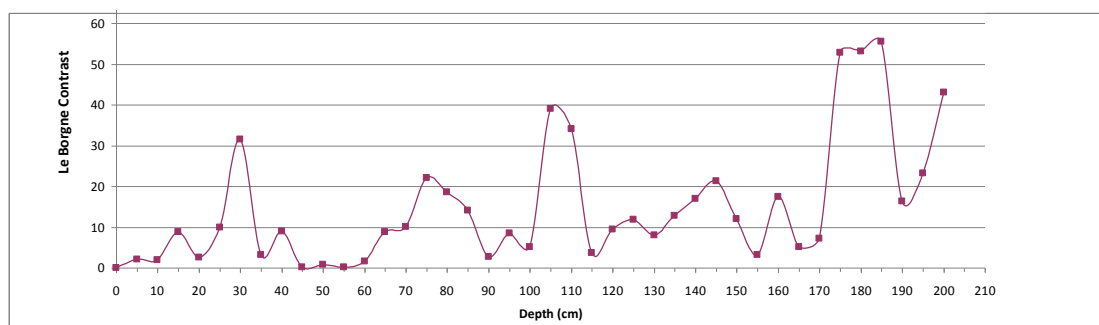
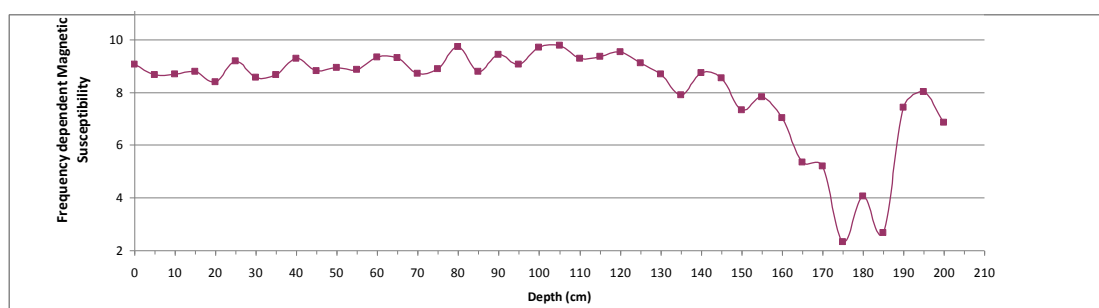
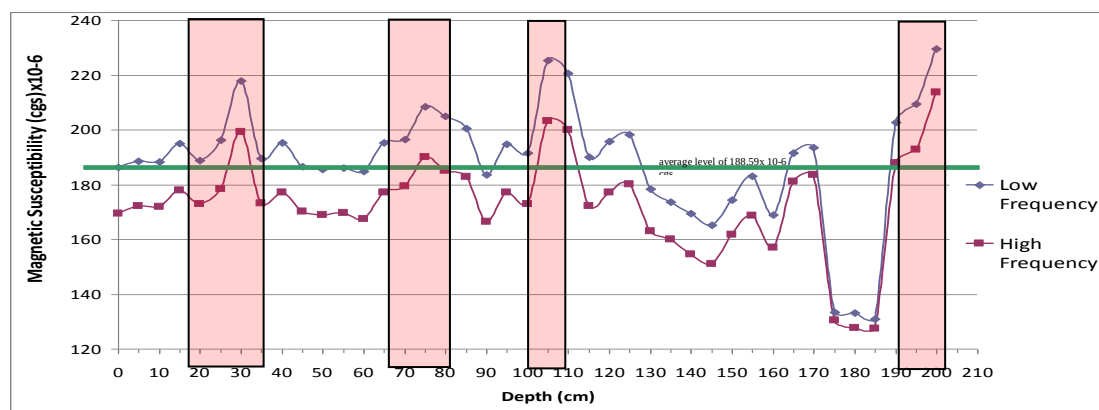
Πίνακας 5.1. Παρουσίαση των μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Depth (cm)	xlow	xhigh	FDS%	Le Borgne Contrast	NLBC
0	186.37275	169.48182	9.06298	0.0005455	2.93E-06
5	188.498	172.15569	8.6697551	2.125804	0.011406
10	188.35941	172.00095	8.6847074	1.987212	0.010663
15	195.12834	177.97276	8.7919463	8.7561394	0.046982
20	188.85935	173.03045	8.381318	2.4871523	0.013345
25	196.27951	178.27331	9.1737546	9.9073135	0.053159
30	217.99629	199.31089	8.5714286	31.624089	0.169682
35	189.52215	173.09607	8.6671044	3.1499503	0.016901
40	195.37658	177.23092	9.2875318	9.0043846	0.048314
45	186.5555	170.1407	8.7988827	0.1832977	0.000984
50	185.56423	169.00081	8.9259797	0.8079662	0.004335
55	186.20502	169.71101	8.8579795	0.1671836	0.000897
60	184.81078	167.57387	9.3267882	1.5614172	0.008378
65	195.21663	177.05985	9.3008339	8.8444291	0.047456
70	196.42857	179.33131	8.7040619	10.056371	0.053958
75	208.54063	190.02211	8.880053	22.16843	0.118947
80	205.03007	185.07381	9.7333333	18.657871	0.100111
85	200.52734	182.90314	8.7889273	14.155138	0.075951
90	183.67095	166.37846	9.4149294	2.7012514	0.014494
95	194.87596	177.25481	9.0422368	8.5037564	0.045628
100	191.51885	172.949	9.6960926	5.146647	0.027615
105	225.39247	203.33915	9.7844113	39.020274	0.209367
110	220.54502	200.10687	9.2671108	34.172817	0.183357
115	189.98373	172.20544	9.3577982	3.6115323	0.019378
120	195.74663	177.10954	9.521028	9.374427	0.050299
125	198.18089	180.11786	9.114415	11.808686	0.063361
130	178.39005	162.89995	8.683274	7.9821543	0.042829
135	173.62169	159.91471	7.8947368	12.750513	0.068414
140	169.33097	154.52931	8.7412587	17.041235	0.091436
145	165.11748	151.0457	8.522283	21.25472	0.114044
150	174.40494	161.6221	7.3294019	11.967263	0.064211
155	183.10312	168.80822	7.8070175	3.269084	0.017541

160	168.84203	156.96118	7.03667	17.530165	0.09406
165	191.46685	181.24118	5.3406998	5.0946547	0.027336
170	193.62951	183.57083	5.1948052	7.2573054	0.03894
175	133.51686	130.41982	2.3195876	52.855338	0.2836
180	133.17599	127.78152	4.0506329	53.196205	0.285429
185	130.82298	127.32919	2.6706231	55.549219	0.298054
190	202.77256	187.73496	7.4159907	16.400356	0.087998
195	209.5387	192.72869	8.0223881	23.166502	0.124302
200	229.52012	213.76636	6.8637804	43.147916	0.231514

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα που παρουσιάζουν τις μαγνητικές ιδιότητες των εδαφών σε σχέση με το βάθος.

Γενικά παρατηρούμε 4 περιοχές με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα (καθώς και αυξημένο συντελεστή LeBorgne Constrast) που πιθανώς σχετίζονται με 4 φάσεις κατοίκησης. Η πρώτη αντιστοιχεί στα επιφανειακά δείγματα και στις πρόσφατες ανθρωπογενείς επεμβάσεις στην μαγούλα (25-40cm από την επιφάνεια της μαγούλας). Οι επόμενες φάσεις κατοίκησης συναντώνται στα 70-85cm και 105-115cm, ενώ η τελευταία φάση απαντάται στα 190-200cm. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι στα πρώτα 2m από την επιφάνεια της μαγούλας έχουμε περίπου 3 φάσεις κατοίκησης. Οι φάσεις αυτές (ιδιαίτερα οι πιο επιφανειακές) είναι που δίνουν τις πιο ισχυρές ανωμαλίες των γεωφυσικών μετρήσεων που διεξήχθησαν πάνω στην μαγούλα. Η τάση της μείωσης της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της εξαρτημένης από την συχνότητα μαγνητική επιδεκτικότητα (FDS%) που παρατηρείται σε βάθος 170-190cm μπορεί να δικαιολογηθεί με μία περίοδο εγκατάλειψης της κατοίκησης.



Γενικά, ο ευρύτερος αρχαιολογικός χώρος της μαγούλας Ζερέλια παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον με πλούσια υπεδάφεια αρχιτεκτονικά λείψανα και προσφέρεται τόσο για την ανάδειξη αυτών όσο και για την μελέτη των οικιστικών τάσεων που διαμόρφωσαν την χρήση του χώρου στο παρελθόν. Από τα μέχρι σήμερα δεδομένα φαίνεται να υπάρχει μεγάλος αριθμός αρχιτεκτονικών υπεδάφειων μνημείων τόσο επάνω στην μαγούλα αλλά και στον χώρο γύρω από αυτή. Η επέκταση των γεωφυσικών ερευνών χαρτογράφησης στην περιοχή που εκτείνεται Β και ΒΔ της μαγούλας θα μπορούσε να δώσει πληροφορίες για την επέκταση του πιθανού επίπεδου οικισμού που σχετίζεται με την μαγούλα. Επίσης ενδιαφέρον θα είχε η χαρτογράφηση του χώρου νότια της μαγούλας προς την μικρή λίμνη. Τα παραπάνω θα μπορούσαν να συνοδευτούν με μία γεωλογική-γεωφυσική χαρτογράφηση των δύο λιμνών με στόχο την μελέτη της δημιουργίας αυτών και την ανάδειξη της περιοχής σε ένα περιβαλλοντικό – πολιτιστικό πάρκο.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aitken, M., 1974. *Physics and Archaeology*, 2nd ed., Oxford: Clarendon Press
- Αράμπελος, Δ., 1991. *Στοιχεία Γεωφυσικών Διασκοπήσεων*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη
- Clark, A. J., 1990. *Seeing Beneath the Soil. Prospecting Methods in Archaeology*, London: B.T. Batsford Ltd.
- deGroot-Hedlin, C., and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55:1613-1624.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Μαλακασιώτη, Ζ., Ροντήρη, Β., Βουζαξάκης, Κ. και Καλογιάννη, Α., 2008. Η αρχαιολογική έρευνα της ΙΓ' ΕΠΚΑ στη Μαγούλα Ζερέλια, Δ' Συνέδριο Αλμυριωτικών Σπουδών, Αλμυρός.
- Μουνδρέα-Αγραφιώτη, Α., 2008. Το ερευνητικό πρόγραμμα στη Μαγούλα Ζερέλια, Αλμυρού, (Μαγνησία), Δ' Συνέδριο Αλμυριωτικών Σπουδών, Αλμυρός.
- Nishimura, Y., 2001. Geophysical prospection in Archaeology in D. R. Brothwell and A. M. Pollard (eds.), *Handbook of Archaeological Sciences*, pp.543-553, New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N. and Sarris, A. 2007. Efficient ERT Measuring and Inversion Strategies for 3-D Imaging of Buried Antiquities. *Near Surface Geophysics*, 5, 6, 349-362.
- Reinders, R. 2004. Prehistoric sites at the Almiros and Sourpi plains (Thessaly, Greece), *Publications of the Netherlands Institute at Athens V*, Assen: Koninklijke Van Gorcum.
- Sarris, A., 1992. Shallow Depth Geophysical Investigation through the Application of Magnetic and Electric Resistance Techniques, An evaluation study of the responses of magnetic and electric resistance techniques to archaeogeophysical prospection surveys in Greece and Cyprus, Ph.D, University of Nebraska, Lincoln
- Sarris, A. and Jones, R. E, 2000. Geophysical and Related Techniques Applied to Archaeological Survey in the Mediterranean: A Review, *Journal of Mediterranean Archaeology (JMA)*, v.13, no.1, pp.3-75.
- Σαρρής, Α., 1995. Μαγνητική Επιδεκτικότητα, Σημειώσεις στο μάθημα: ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΡΙΑ – Μαγνητική Διασκόπηση Εδαφών & Εφαρμογές της Μαγνητικής Επιδεκτικότητας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Σαρρής, Α., 2008. Επίγειες και Δορυφορικές Τεχνικές Τηλεπισκόπησης και Χαρτογράφησης Αρχαιολογικών Θέσεων, Κεφάλαιο 7, Δεύτερη Κατηγορία: Έρευνα για Ανάδειξη Υπαίθριων Αρχαιολογικών Χώρων και Ιστορικών Συνόλων, Νέες Τεχνολογίες στις Αρχαιογνωστικές Επιστήμες, επιμέλεια Ι. Λυριτζής, Πρώτη Έκδοση, Gutenberg, Αθήνα, σελ. 177-212.
- Wace, A. J. B. & Thompson, M..S., 1912. *Prehistoric Thessaly*, 150-166

Dr. A. Σαρρής & Dr. N. Παπαδόπουλος.