

Εξεταστική επιτροπή

Αποστολόπουλος Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων

Ροντογιάννη-Τσιαμπάου Θεοδώρα, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Καλλιώρας Ανδρέας, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία περατώθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών μου και κατά τη φοίτησή μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η διαδικασία της συγγραφής του έργου αυτού, για το οποίο δηλώνω πολύ υπερήφανος, αποτέλεσε μία πολύτιμη εμπειρία, τα ευεργετήματα της οποίας θα είναι ισόβιοι σύμμαχοί μου στην προσπάθεια που καταβάλλω για να γίνω πρωτίστως ένας καλύτερος άνθρωπος και μετέπειτα ένας σωστός εργαζόμενος, ανεξαρτήτου κλάδου, με ορθό και μηχανικό τρόπο σκέψης. Δεδομένου όμως ότι, δεν υπάρχει παρθενόγνεση και τα πάντα στο σύμπαν υπακούνε στο αξίωμα αίτιο-αιτιατό, η προσπάθεια αυτή δεν θα είχε στεφθεί με επιτυχία αν δεν ερχόμουν σε επαφή, τόσο στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας όσο και έξω από αυτά, με μερικούς Ανθρώπους των οποίων η συμπεριφορά, η εμπειρία και οι γνώσεις, αποτέλεσαν τον καλύτερο οδηγό για αυτό το ταξίδι.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, λοιπόν, τους κάτωθι :

Τον κ. Γιώργο Αποστολόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών και Επιβλέποντα της Διπλωματικής μου Εργασίας, πρωτίστως για τα μαθήματα ζωής που παραδίδει, για το χαρακτήρα του και για το οικογενειακό κλίμα που δημιουργεί ανάμεσα σε όλους τους φοιτητές του. Η συνεχής παρουσία και προθυμία του να με βοηθήσει και να απαντήσει σε όλες τις απορίες μου, είναι απλώς απόρροια των παραπάνω χαρακτηριστικών.

Τη Ντέπυ Μινοπούλου, γεωλόγο και Υποψήφια Διδάκτορα του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου Αθηνών, η οποία ανιδιοτελώς με βοήθησε στη συγγραφή και μου παρείχε κάθε πληροφορία που χρειαζόμουν για τη συγκεκριμένη εργασία. Ντέπυ, σε ευχαριστώ πραγματικά και εύχομαι να μη στερέψει ποτέ το πάθος σου για τη δουλειά σου και τη ζωή.

Τον κ. Γιώργο Αμμολοχίτη, γεωφυσικό και μέλος Ε.ΔΙ.Π του Τομέα Μεταλλευτικής, για την καθοριστική συμμετοχή του στη διεξαγωγή και εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων στην περιοχή του Λεχαίου Κορινθίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε.

Την Μυρτώ Παπαδοπούλου, απόφοιτη της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών και φίλη, για τη βοήθεια της στην ερμηνεία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας και στην αναζήτηση χαμένων αντικειμένων.

Τον Αντρέα Στυλιανού, συμφοιτητή και partner in crime, για τη συμμετοχή και τη βοήθεια του στη διεξαγωγή των γεωφυσικών μετρήσεων στην ύπαιθρο και την κατανάλωση εκλεκτών εδεσμάτων.

Τον κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Λέκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, για το ενδιαφέρον που επέδειξε κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας και την πίστη του στο πρόσωπο μου.

Την κ. Ροντογιάννη-Τσιαμπάου Θεοδώρα, Καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, για τις εύστοχες παρατηρήσεις της και τη βοήθειά της στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου.

Τους γονείς μου, για τα πάντα και γιατί με μάθανε να πολεμάω πριν ακόμα γεννηθώ.

Την αδερφή μου, όντας το αλατοπίπερο της ζωής μου.

Τους φίλους μου (you know who you are), για τη στήριξή τους και όλες τις ωραίες στιγμές που περάσαμε, αλλά και θα έρθουν.

Την κυρία Βασιλική Στελάκη και τον κύριο Γιώργο Στελάκη, γιατί με έκαναν ζάμπλουτο δίνοντάς μου και μια δεύτερη, εξίσου υπέροχη, οικογένεια.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενο τον εντοπισμό υπεδαφικών ρευστοποιήσεων στον αρχαιολογικό χώρο της Βασιλικής του Λεχαίου, με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων και την αναζήτηση της αιτίας πρόκλησής των. Το Λέχαιο, ήταν ένα τεχνητό λιμάνι της Αρχαίας Κορίνθου το οποίο αποτέλεσε για τουλάχιστον μία χιλιετία το σημαντικότερο λιμάνι της Δυτικής Ελλάδας, αλλά και το μεγαλύτερο και παλαιότερο, πιθανώς, τεχνητό λιμάνι του αρχαίου κόσμου. Στο χώρο αυτόν, κτίστηκε κατά τα τέλη του 5^{ου} με αρχές του 6^{ου} αιώνα μ.Χ. μία παλαιοχριστιανική Βασιλική Εκκλησία, η οποία ήταν αφιερωμένη στον Μάρτυρα Λεωνίδα και τις Επτά Παρθέnes και στον ευρύτερο χώρο της οποίας διεξήχθησαν οι μετρήσεις της συγκεκριμένης έρευνας. Η εκκλησία αυτή καταστράφηκε τον 6^ο αιώνα μ.Χ., πιθανόν λόγω του μεγάλου σεισμού του 551 μ.Χ. που έπληξε την Αρχαία Κόρινθο. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την μελέτη περιελάμβαναν κατά σειρά αυτήν του γεωραντάρ, την ηλεκτρομαγνητική και την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Τα αποτελέσματα της έρευνας κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά, με την ηλεκτρική τομογραφία και την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο να έχουν δώσει τις ποιοτικότερες ερμηνείες, καθώς αποτυπώθηκαν ξεκάθαρα οι ρευστοποιήσεις στο υπέδαφος της Βασιλικής και εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για τη σύνδεση αυτών, με τη στρωματογραφία και τις υπεδαφικές δομές της περιοχής. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου των ρευστοποιήσεων, αλλά και των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, στα δύο πρώτα κεφάλαια της διπλωματικής αναλύονται αντίστοιχα η θεωρία και ο τρόπος λειτουργίας αυτών των μεθόδων, καθώς και η φύση και οι αιτίες πρόκλησης του φαινομένου. Συμπληρωματικά, στα κεφάλαια αυτά παρουσιάζονται κάποια επιλεγμένα case studies από τη διεθνή βιβλιογραφία, για να κατανοηθεί καλύτερα ο τρόπος εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων, αλλά και η επιτυχημένη εφαρμογή τους σε περιπτώσεις ανίχνευσης ρευστοποιήσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Λεχαίου, καθώς και τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου, ενώ στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα από την παρούσα έρευνα καθώς και κάποια γενικά σχόλια.

Abstract

The purpose of the present thesis is the detection of underground liquefaction features in the archaeological site of a Christian Basilica, in Lechaion, via the implementation of geophysical methods, as well as to unveil the cause of this very phenomenon. Lechaion, the artificial harbor of ancient Corinth, was the most important port of western Greece for at least one millennium and probably the largest and oldest construction of this type in Antiquity. A palaiochristian Basilica church was built on this site, between the end of the 5th and the beginning of the 6th century A.D. The church was dedicated to Saint Leonidas and the Seven Maidens, while the survey measurements were conducted on its premises. The Basilica was ruined during the 6th century A.D., probably as a result of the massive magnitude earthquake that shook ancient Corinth in 551 A.D. The survey was conducted by implementing three geophysical methods, which in the order of application were ground penetrating radar (GPR), electromagnetic (EM) and electrical resistivity (ERT) method as well. The results, as well as the survey as a whole, are considered quite successful. The electromagnetic and the electrical resistivity method have provided the best results accompanied with the most appropriate underground depiction. In fact, all present liquefaction features have been clearly recorded on and below Basilica floor and numerous critical conclusions have been drawn, in relation to the connection of these features with the stratigraphy and underground structures of the whole area. To understand the phenomenon of liquefaction, as well as the geophysical methods applied in this survey, in a better way, the theory and the way of implementation of these methods are scrutinized in the first chapter of this thesis, while the second one elaborates on the nature and causing factors of the phenomenon called liquefactions. In addition, a number of case studies selected from the international bibliography, are presented along the first two chapters, in order for the reader to achieve a better understanding of the way geophysical surveys should be carried out and their successful and to-the-point application in terms of detecting liquefaction features. In the third chapter, there is a thorough presentation of both the geophysical survey conducted in Lechaion and the results obtained from each geophysical method, while, the overall results and conclusions of this study, accompanied with some general comments, are presented in the fourth and final chapter.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Θεωρητικό μέρος	8
1.1. Εισαγωγή	8
1.1.1. Γενικά για τη Γεωφυσική	8
1.1.2. Εφαρμογή της γεωφυσικής έρευνας στην Αρχαιολογία	8
1.2. Γεωφυσικές μέθοδοι	12
1.2.1. Ηλεκτρικές γεωφυσικές μέθοδοι	14
1.2.2. Ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων και των ορυκτών	15
1.2.3. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης	21
1.3. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	42
1.3.1. Γενικά	42
1.3.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	44
1.3.3. Μαγνητική Επιδεκτικότητα	51
1.3.4. Περιορισμοί της Ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου	55
1.4. Η Μέθοδος του Γεωραντάρ	57
1.4.1. Εισαγωγή	57
1.4.2. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ	60
1.4.3. Διαδικασία μετρήσεων	60
1.4.4. Διατάξεις	62
1.4.5. Βάθος και Ανάλυση	64
1.4.6. Πλεονεκτήματα Γεωραντάρ	66
1.4.7. Μειονεκτήματα γεωραντάρ	67
1.5. Εφαρμογές της Γεωφυσικής	68
1.5.1. Machu Picchu, Περού	68
2. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης	80
2.1. Ρευστοποίηση – Ορισμός	80
2.2. Μηχανισμός πρόκλησης ρευστοποίησης	80
2.3. Διαδικασία ρευστοποίησης	81
2.4. Προϋποθέσεις πρόκλησης ρευστοποίησης	84
2.4.1. Γεωλογική ηλικία εδαφικών σχηματισμών	84
2.4.2. Γεωμορφολογικά κριτήρια	85
2.4.3. Υδροφόρος ορίζοντας	86
2.4.4. Σχετική πυκνότητα	86
2.4.5. Κοκκομετρική σύσταση και φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών	88
2.4.6. Ιστορικά περιστατικά ρευστοποιήσεων	92
2.5. Διεθνείς περιπτώσεις ρευστοποιήσεων μεγάλης κλίμακας	94
2.5.1. Niigata, Japan, 1964	94
2.5.2. Anchorage, Alaska, USA, 1964	100
2.6. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στον εντοπισμό ρευστοποιήσεων	105
2.6.1. Γεωφυσικές διασκοπήσεις σε σχηματισμούς που υπέστησαν ρευστοποίηση λόγω σεισμικής δράσης στην περιοχή New Madrid, Η.Π.Α	105
2.6.2. Συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μελέτες στην περιοχή New Madrid	120
2.6.3. Γεωφυσικές διασκοπήσεις στην περιοχή New Madrid με τη μέθοδο του γεωραντάρ (GPR) και της ειδικής αντίστασης	123
3. Γεωφυσική Έρευνα στη Βασιλική του Λεχάιου, Αρχαία Κόρινθος	132

3.1. Πρόλογος	132
3.2. Γενικά στοιχεία για το Λέχαιο	133
3.3. Ιστορικά και αρχαιολογικά δεδομένα.....	134
3.4. Ανύψωση της ακτής στην περιοχή της Κορίνθου.....	137
3.5. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Λεχαίου	138
3.6. Γεωφυσική έρευνα.....	140
3.6.1. Περιοχή έρευνας και στρωματογραφία	140
3.6.2. Το πρόβλημα	141
3.6.3. Επιλογή γεωφυσικών μεθόδων και σχεδιασμός έρευνας.....	142
3.6.4. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	143
3.6.5. Μετρήσεις Γεωραντάρ.....	159
3.6.6. Μετρήσεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	163
4. Συμπεράσματα και σχόλια.....	176
4.1. Συμπεράσματα	176
4.2. Σχόλια.....	181
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	183

1. Θεωρητικό μέρος

1.1. Εισαγωγή

1.1.1. Γενικά για τη Γεωφυσική

Η επιστήμη της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής αναλύει και χρησιμοποιεί φυσικά φαινόμενα που υφίστανται ή δημιουργούνται στη Γη, κάνει μετρήσεις χαρακτηριστικών μεγεθών αυτών στην επιφάνεια, στον αέρα ή μέσα στη Γη, με σκοπό την αποτύπωση της μορφής του υπεδάφους που χαρακτηρίζεται κάθε φορά από συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες. Τέτοια φυσικά φαινόμενα είναι ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, η βαρύτητα, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η διάδοση σεισμικών κυμάτων κλπ., ενώ χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες είναι αντίστοιχα η πυκνότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η διηλεκτρική σταθερά, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η αγωγιμότητα και το αντίστροφο της η ειδική αντίσταση κλπ.

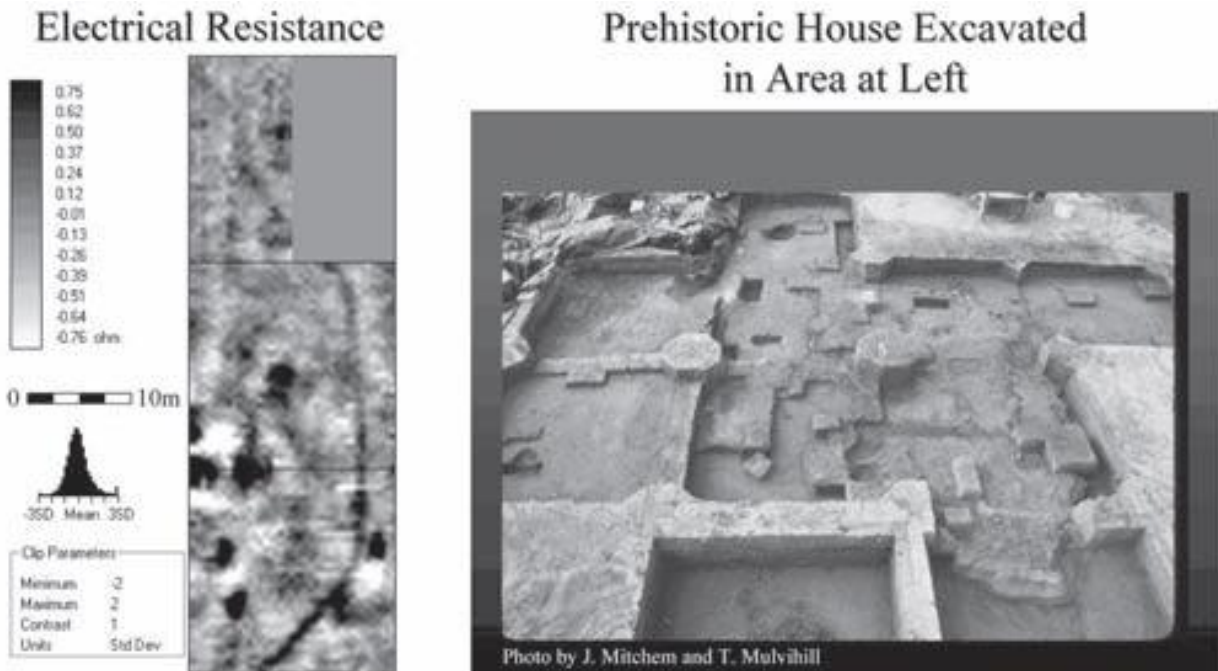
Με λίγα λόγια, σκοπός της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής είναι ο εντοπισμός και η απεικόνιση δομών στο στερεό φλοιό της γης, τόσο επιφανειακών (σε βάθος μερικών μέτρων) όσο και βαθύτερων (σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι και μερικές χιλιάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως στην περίπτωση ερευνών για υδρογονάνθρακες). Χαρακτηριστικά, οι δομές αυτές μπορεί να είναι σύγκλινα, αντίκλινα, γεωλογικά ρήγματα, δομές άλατος, κοιτάσματα, αποθέσεις αργίλου κλπ. Επί του πρακταίου, η σημασία της απεικόνισης όλων αυτών των δομών με τη χρήση των γεωφυσικών μεθόδων είναι μεγάλη καθώς βοηθάει στον εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου, υδροφόρων σχηματισμών, αρχαιοτήτων, κοιτασμάτων μεταλλεύματος, ενώ παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την ασφαλή κατασκευή δομικών έργων και λοιπών κατασκευών. Πολλές φορές μάλιστα, η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων σε συνδυασμό με τη γεωλογική γνώση συνιστά το μοναδικό τρόπο εύρεσης λύσης στα παραπάνω προβλήματα.

1.1.2. Εφαρμογή της Γεωφυσικής Έρευνας στην Αρχαιολογία

Η σημασία και η εφαρμογή της γεωφυσικής έρευνας στον τομέα της Αρχαιολογίας αυξάνει με εκθετικούς ρυθμούς, καθώς με την πάροδο του χρόνου οι αρχαιολόγοι συνειδητοποιούν όλο και περισσότερο τη σπουδαιότητα του συγκεκριμένου εργαλείου στη δουλειά τους. Γενικά, οι αρχαιολογικές τοποθεσίες είναι το προϊόν μακρόχρονων πολιτισμικών και φυσικών διαδικασιών

(Schiffer 1987), καθώς επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες και από τη φυσική συσσώρευση ιζημάτων. Τα εδάφη κατά το πέρασμα του χρόνου υφίστανται φυσικές και χημικές μεταβολές, ενώ τα αρχαιολογικά δεδομένα αλλοιώνονται τόσο χωρικά όσο και ποσοτικά. Εν τέλει, όλες αυτές οι διαδικασίες και οι μεταβολές των τοποθεσιών δημιουργούν μία τρισδιάστατη αρχαιολογική μήτρα (matrix), το οποίο αποτελείται από χαρακτηριστικές τοπογραφικές και φυσικές ιδιότητες όπως είναι η υφή του εδάφους, η στρωματογραφία, διάφορα βιογενή και βιοχημικά χαρακτηριστικά, διαφορεικά ποσοστά κατακράτησης υγρασίας, θερμικές μετατροπές και παρουσία θαμμένων στο έδαφος χειροτεχνημάτων. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της συνεργασίας της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και της Αρχαιολογίας παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης των δυναμικών και των τοποθεσιών των διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων που συνιστούν τον εκάστοτε αρχαιολογικό γρίφο.

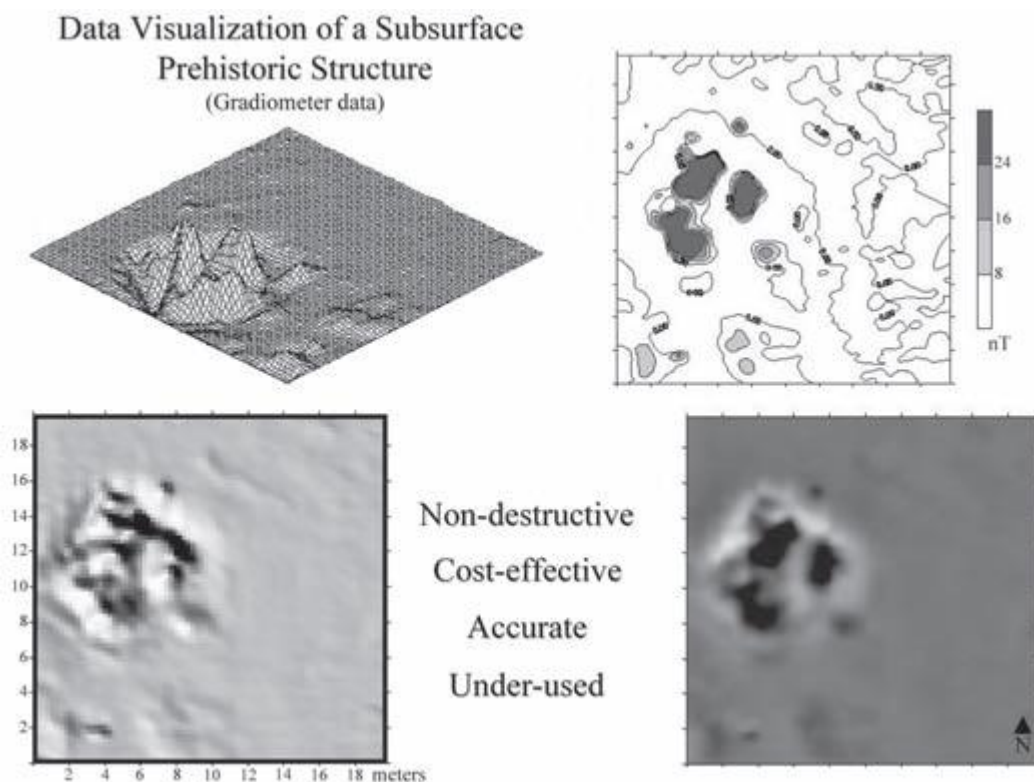
Η χρήση των γεωφυσικών μεθόδων παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης και ανάλυσης υπεδαφικών αρχαιολογικών δομών ενδιαφέροντος (Εικόνα 1.1). Οι αρχαιολογικές-γεωφυσικές έρευνες είναι εξ ορισμού μη καταστροφικές. Σε κάθε μέθοδο που χρησιμοποιείται, οι αντίστοιχες συσκευές συλλέγουν δεδομένα από την επιφάνεια του εδάφους ή πολύ κοντά σε αυτήν μετρώντας τις φυσικές ιδιότητες των υπεδαφικών σχηματισμών. Σε πολλές περιπτώσεις, η εφαρμογή των μεθόδων αυτών στον εντοπισμό αρχαιολογικών δομών είναι αρκετά πιο συμφέρουσα, από οικονομικής και χρονικής άποψης, από τις συμβατικές αρχαιολογικές μεθόδους. Όσον αφορά τον εντοπισμό των δομών αυτών, η συμβατική μέθοδος ανίχνευσης με εκσκαπτικά εργαλεία (πχ. φτυάρι) ανά σταθερά διαστήματα (πχ. 30 m) και σε μικρά σχετικά βάθη, αποτυγχάνει κάποιες φορές να εντοπίσει ακόμα και σχετικά μεγάλους σχηματισμούς ενδιαφέροντος, ενώ μπορεί να αποδειχτεί και ιδιαίτερα χρονοβόρα. Αντίθετα η διαδικασία εντοπισμού δομών μέσω της Γεωφυσικής γίνεται πάντα πάνω σε έναν προσχεδιασμένο κάναβο, στον οποίο η λήψη των μετρήσεων γίνεται σε οριζόντιες και κάθετες τομές και ανά διαστήματα που ποικίλουν ανάλογα με το αντικείμενο έρευνας (συγκεκριμένα για τον τομέα της Αρχαιολογίας, το διάστημα αυτό κυμαίνεται από 1 μέτρο μέχρι κάποια μέτρα). Αποτέλεσμα αυτού είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στον εντοπισμό αρχαιοτήτων και κάποιες φορές μάλιστα ακόμα και η ταυτοποίηση αυτών, γεγονός που βοηθάει σημαντικά την μετέπειτα διαδικασία της εκσκαφής. Το γεγονός αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι η χρησιμοποίηση της γεωφυσικής είναι πανάκεια και αλάνθαστη. Τα δεδομένα που λαμβάνονται με τις εκάστοτε γεωφυσικές μεθόδους χαρακτηρίζονται πάντα από την ύπαρξη κάποιας ποσότητας "θορύβου".



Εικόνα 1.1. Εκσκαφή σε προϊστορική τοποθεσία στην πόλη Arkansas, Η.Π.Α. (δεξιά). Απεικόνιση των υπεδαφικών αρχαιολογικών δομών ενδιαφέροντος με τη γεωφυσική μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης (αριστερά)

Ο "θόρυβος" αυτός προκύπτει καθώς, στη σύνθεση των δεδομένων δεν συμμετέχουν μόνο οι σχηματισμοί που ενδιαφέρουν τους ερευνητές, αλλά οποιαδήποτε υπεδαφική δομή μπορεί να ανιχνευτεί από τα όργανα.

Παρά όμως τη διαρκώς αυξανόμενη φήμη των γεωφυσικών μεθόδων στον τομέα της αρχαιολογικής έρευνας, η εκ των ων ουκ άνευ εφαρμογή τους δεν έχει καθιερωθεί ακόμα. Αιτία, είναι το γεγονός ότι υπάρχουν λίγοι ειδικοί στον τομέα της Αρχαιογεωφυσικής, ενώ πολλοί αρχαιολόγοι δεν είναι ενήμεροι για τη χρησιμότητα του συγκεκριμένου εργαλείου στη δουλειά τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σχετικά περιορισμένη χρήση (διαρκώς αυξανόμενη όμως) της Γεωφυσικής στο συγκεκριμένο κλάδο (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.2. Η χρήση της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στην Αρχαιολογία. Μη καταστροφική, οικονομικά συμφέρουσα και αξιόπιστη μέθοδος, με σχετικά περιορισμένη (διαρκώς αυξανόμενη όμως) εφαρμογή

Εν τέλει, η χρησιμότητα των γεωφυσικών μεθόδων στον κλάδο της Αρχαιολογίας είναι μεγάλη. Αντίστοιχα όμως, σημαντικές είναι και οι ήδη καθιερωμένες αρχαιολογικές πρακτικές. Καμία μέθοδος από μόνη της δεν δίνει το πολυπόθητο βέλτιστο αποτέλεσμα από άποψη χρόνου, ακρίβειας και δαπανών. Αντίθετα, όπως συμβαίνει σε όλες τις επιστήμες, η συνεργασία των δύο αυτών επιστημών δύναται να μεγιστοποιήσει το επιθυμητό αποτέλεσμα, να ελατώσει το σφάλμα και να ανοίξει νέους ορίζοντες στον υπεδαφικό εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος. Είναι μέγιστης σημασίας οι αρχαιολόγοι να υιοθετήσουν τις τεχνικές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στη δουλειά τους, αλλά και οι γεωφυσικοί με τη σειρά τους να εντρυφήσουν στη βέλτιστη εφαρμογή των μεθόδων τους στην Αρχαιολογία και πως αυτό θα επιτευχθεί.

1.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Σε αυτές που χρησιμοποιούν τα ήδη υπάρχοντα φυσικά πεδία της γης και σε αυτές που απαιτείται η διοχέτευση στο έδαφος τεχνητά παραγόμενης ενέργειας. Οι γεωφυσικές μέθοδοι φυσικού πεδίου αξιοποιούν τα βαρυτικά, μαγνητικά, ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία της γης, ερευνώντας για τοπικές αλλοιώσεις στα φυσικώς σχηματιζόμενα αυτά πεδία, οι οποίες προκαλούνται από τους υποκείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η δεύτερη κατηγορία μεθόδων περιλαμβάνει τη δημιουργία τοπικών τεχνητών ηλεκτρικών ή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με τα φυσικά πεδία, αλλά και την ιδιαίτερα σημαντική σεισμική γεωφυσική μέθοδο, όπου μετράται η ταχύτητα διάδοσης των τεχνητώς δημιουργούμενων σεισμικών κυμάτων.

Πίνακας 1.1. Γεωφυσικές μέθοδοι

<i>Μέθοδος</i>	<i>Μετρούμενο μέγεθος</i>	<i>Φυσική ιδιότητα</i>
Σεισμική	Χρόνος διάδοσης των ανακλούμενων/διαθλόμενων κυμάτων	Πυκνότητα και ελαστικότητα, οι οποίες καθορίζουν την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων
Βαρυτική	Χωρικές μεταβολές της έντασης του βαρυτικού πεδίου της Γης	Πυκνότητα
Μαγνητική	Χωρικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου	Μαγνητική επιδεκτικότητα και παραμένων μαγνητισμός
Ηλεκτρική <ul style="list-style-type: none"> • Ειδική αντίσταση • Επαγόμενη πολικότητα • Φυσικό δυναμικό • Ηλεκτρομαγνητική • Γεωραντάρ 	<p>Ηλεκτρική αντίσταση της γης</p> <p>Ένταση πολικότητας/συχνοτικά εξαρτώμενη αντίσταση του εδάφους</p> <p>Ηλεκτρικά δυναμικά</p> <p>Απόκριση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία</p> <p>Χρόνος διάδοσης των ανακλώμενων παλμών του ραντάρ</p>	<p>Ηλεκτρική αγωγιμότητα</p> <p>Ηλεκτρική χωρητικότητα</p> <p>Ηλεκτρική αγωγιμότητα</p> <p>Ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή</p> <p>Διηλεκτρική σταθερά</p>

Όπως αναφέρθηκε, υπάρχει μία πληθώρα γεωφυσικών μεθόδων, κάθε μία από τις οποίες χρησιμοποιεί και αξιοποιεί κάποια συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα (Πίνακας 1.1). Ανάλογα με τη φυσική ιδιότητα, καθορίζεται και το εύρος των εφαρμογών της συγκεκριμένης μεθόδου (Πίνακας 1.2). Για παράδειγμα, η μαγνητική μέθοδος είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό υπεδιαφικών κοιτασμάτων μαγνητίτη, λόγω της υψηλής μαγνητικής τους επιδεκτικότητας. Αντίστοιχα, οι σεισμικές και οι ηλεκτρικές γεωφυσικές μέθοδοι είναι κατάλληλες για τον εντοπισμό υπόγειων στρωμάτων νερού, καθώς οι κορεσμένοι σχηματισμοί διακρίνονται από τους μη κορεσμένους από τις μεγαλύτερες ταχύτητες σεισμικών κυμάτων και από τις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Πίνακας 1.2. Εφαρμογές των γεωφυσικών μεθόδων

<i>Εφαρμογή</i>	<i>Κατάλληλη γεωφυσική μέθοδος</i>
Έρευνα για ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας)	Σ, Β, Μ, (ΗΜ)
Έρευνα για μεταλλοφόρα κοιτάσματα	Μ, ΗΜ, Η, ΦΔ, ΕΠ
Έρευνα για ογκώδη ορυκτά αποθέματα (άμμος και χαλίκια)	Σ, (Η), (Β)
Έρευνα για υπόγεια νερά	Η, Σ, (Β), (Γ)
Αναγνωριστική έρευνα πεδίου για κατασκευές και εφαρμογές μηχανικών	Η, Σ, Γ, (Β), (Μ)
Αρχαιολογική έρευνα	Γ, Η, ΗΜ, Μ, (Σ)

Σημ. Β: Βαρυτική, Μ: Μαγνητική, Σ: Σεισμική, Η: Ηλεκτρική αντίσταση, ΦΔ: Φυσικό Δυναμικό, ΕΠ: Επαγώμενη Πολικότητα, ΗΜ: Ηλεκτρομαγνητική, Γ: Γεωραντάρ. Δευτερεύουσες μέθοδοι σε παρενθέσεις.

Διάφορες γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εναέρια ή θαλάσσια έρευνα, ενώ το υψηλό κόστος διεξαγωγής τους αντισταθμίζεται από τον εξαιρετικά μειωμένο χρόνο περάτωσής τους αλλά και από το γεγονός ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε περιοχές όπου η από εδάφους πρόσβαση είναι δύσκολη ή και αδύνατη. Για παράδειγμα, σε αναγνωριστικές έρευνες πεδίου χρησιμοποιούνται συχνά γεωφυσικές έρευνες δια αέρος λόγω του μικρού χρόνου εκτέλεσης των μετρήσεων. Παρόλα αυτά συγκεκριμένες μέθοδοι δεν μπορούν να εκτελεστούν δια αέρος όπως οι ηλεκτρικές και οι σεισμικές, καθώς οι μέθοδοι αυτές απαιτούν φυσική επαφή με το έδαφος για τη διοχέτευση σε αυτό της εκάστοτε ενέργειας.

1.2.1. Ηλεκτρικές Γεωφυσικές Μέθοδοι

1.2.1.1. Εισαγωγή

Η κατηγορία αυτή των γεωφυσικών μεθόδων αποτελεί ένα από τα παλαιότερα μέσα εξερεύνησης του εσωτερικού της Γης. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού χρονολογείται πίσω στο 1830 όταν και χρησιμοποιήθηκε στην πόλη Cornwall της Αγγλίας από τον Robert Fox για τον εντοπισμό πλευρικών προεκτάσεων ενός ήδη γνωστού κοιτάσματος χαλκού. Πρώτος ο Peter Barlow, ανακάλυψε την παρουσία ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, τα οποία αναφέρονται ως τελλουρικά ρεύματα, το 1847. Αντίστοιχα, η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος αναπτύχθηκε τη δεκαετία 1920-1930 για τον εντοπισμό μεταλλοφόρων κοιτασμάτων.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους μετρώνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στη γη.

Χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα ή εναλλασσόμενο χαμηλής συχνότητας, προκειμένου να ανιχνευθούν οριζόντιες και κατακόρυφες διαφοροποιήσεις των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Στις ηλεκτρικές μεθόδους οι ιδιότητες των ορυκτών και των πετρωμάτων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (ή το αντίστροφο της, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση), το φυσικό ηλεκτρικό δυναμικό, η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική επιδεκτικότητα (σαν έμμεσος παράγοντας).

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε παθητικές και ενεργητικές, ανάλογα με τη χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων.

Παθητικές μέθοδοι:

- *Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self potential method)*

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης. Εφαρμόζεται σε υδρογεωλογικές ή γεωθερμικές έρευνες.

- *Μαγνητοτελλουρική μέθοδος (Magnetotelluric Method)*

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη (φτάνουν μέχρι και τον μανδύα) μέσα στη γη.

Ενεργητικές μέθοδοι:

- *Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (Electromagnetic method)*

Στη μέθοδο αυτή, ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται στην επιφάνεια της γης, το οποίο με τη σειρά του παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στη γη μέσω επαγωγής. Ένας δέκτης, συγκρίνει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή ρεύματος μέσα στη γη, με αυτό που δημιουργείται στην πηγή. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό αγώγιμων μεταλλοφόρων κοιτασμάτων, θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, πυρομαχικών και στρατιωτικού εξοπλισμού που δεν έχουν ενεργοποιηθεί, καθώς και για γεωφυσική χαρτογράφηση μικρού βάθους.

- *Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method)*

Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, με μέσα βάθη διασκόπησης.

- *Μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας (Induced Polarization Method)*

Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

1.2.2. Ηλεκτρικές Ιδιότητες των Πετρωμάτων και των Ορυκτών

1.2.2.1. Ηλεκτρικά Δυναμικά

Τα φυσικά δυναμικά του υπεδάφους οφείλονται σε ηλεκτροχημική ή μηχανική δραστηριότητα. Ο βασικός παράγοντας σε όλες τις περιπτώσεις είναι τα υπόγεια νερά.

Τα φυσικά δυναμικά σχετίζονται με την εξαλλοίωση των σουλφιδικών ορυκτών, με την αλλαγή των γεωλογικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, με την βιοηλεκτρική δραστηριότητα των

οργανικών υλικών, με την διάβρωση, με τις διαφορές θερμότητας και πίεσης στα υπόγεια ρευστά κλπ.

Υπάρχουν 5 τύποι φυσικών δυναμικών. Ο πρώτος τύπος είναι μηχανικής προέλευσης και οι υπόλοιποι χημικής προέλευσης.

- Ηλεκτροκινητικό δυναμικό

Όταν διάλυμα συγκεκριμένης ειδικής αντίστασης ρ και ιξώδους η , αναγκάζεται να περάσει δια μέσου εγκοίλων ή πόρων, παρατηρείται στα άκρα τους διαφορά δυναμικού.

- Δυναμικό διάχυσης (liquid-junction potential)

Το δυναμικό αυτό οφείλεται στη διαφορά ευκινήσις των διαφόρων ιόντων σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων.

- Δυναμικό Nerst

Όταν δύο όμοια μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθίζονται σε διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων προκύπτει διαφορά δυναμικού μεταξύ τους.

- Δυναμικό ορυκτογένεσης

Όταν δύο διαφορετικά μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθίζονται σε ομογενές διάλυμα, τότε δημιουργείται μεταξύ τους διαφορά δυναμικού. Το δυναμικό αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε ζώνες που έχουν σουλφίδια των μετάλλων, γραφίτη και μερικές φορές οξειδία των μετάλλων όπως μαγνητίτη. Οι πιο κοινές ανωμαλίες δυναμικών ορυκτογένεσης συμβαίνουν πάνω από πυρίτη, χαλκοπυρίτη, πυροτίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη και γραφίτη. Τα πλάτη κυμαίνονται από μερικά mV έως 1 Volt. Τα δυναμικά είναι συνήθως αρνητικά στην περιοχή πάνω από το ορυκτό σώμα.

- Φυσικό Δυναμικό σχετιζόμενο με παρουσία γεωθερμικών πεδίων

Η αύξηση της θερμοκρασίας και η κυκλοφορία των υπογείων ρευστών που είναι χαρακτηριστικά γεωθερμικών συστημάτων, είναι ικανά να δημιουργήσουν επιφανειακά δυναμικά.

Αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας σε ένα δείγμα πετρώματος, τότε παρουσιάζεται διαφορά δυναμικού. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού δια της διαφοράς θερμοκρασίας ($\Delta V/\Delta T$) λέγεται σταθερά θερμοηλεκτρικής σύζευξης. Τα θερμοηλεκτρικά δυναμικά μπορούν να είναι θετικά ή αρνητικά.

1.2.2.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα και Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσα στα πετρώματα και ορυκτά με τρεις τρόπους: ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ρεύματος στα υλικά περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (μέταλλα). Στον ηλεκτρολύτη το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό ρυθμό. Η διηλεκτρική αγωγιμότητα λαμβάνει χώρα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές όπου τα ατομικά ηλεκτρόνια κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.

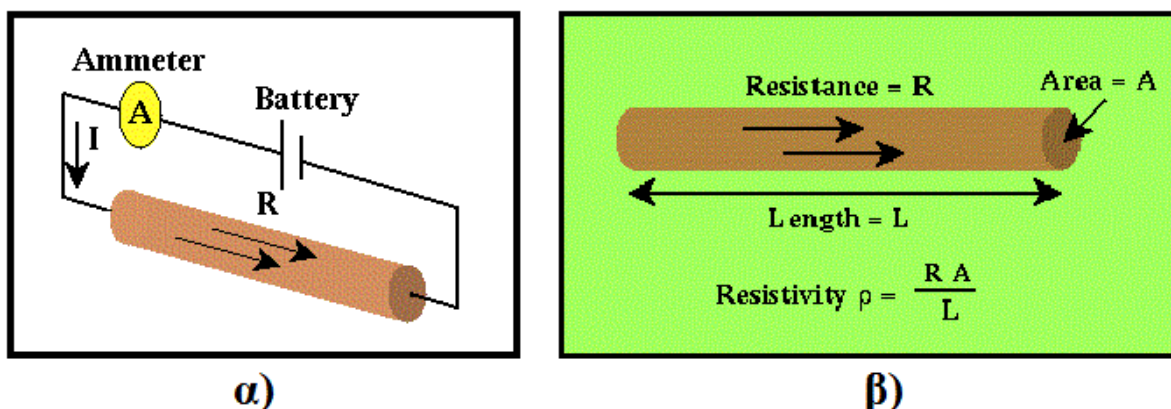
Σύμφωνα με τον Georg Ohm, σε έναν κυλινδρικό αγωγό (Εικόνα 1.3) μήκους L και διατομής A που διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του μετράται διαφορά δυναμικού ΔV , η ηλεκτρική αντίσταση R , με βάση τον αντίστοιχο νόμο, δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1.1)$$

Η ηλεκτρική ωμική αντίσταση R εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.2)$$

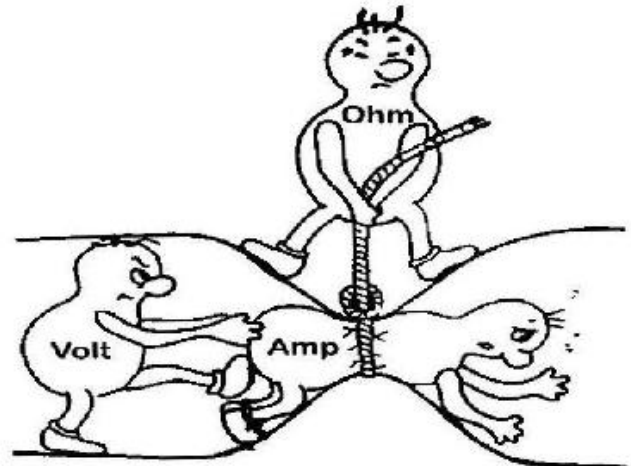
Όπου, ρ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού (Εικόνα 1.3 (β)), ανεξάρτητη των διαστάσεων του, που θεωρείται χαρακτηριστική θεμελιώδης παράμετρος του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί ο αγωγός να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 1.3. Γραφική απεικόνιση του νόμου του Ohm (α, β)

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πετρώματα

είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί και η αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτική παρά ωμική. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω ιόντων (μορίων με περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων). Η ειδική αντίσταση διαφέρει με την ευκινησία, τη συγκέντρωση και το βαθμό διαχωρισμού των ιόντων (εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά του διαλύτη).



Εικόνα 1.4. Georg Ohm (αριστερά) και εικαστική απεικόνιση της εμπειρικής σχέσης του Ohm μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό, της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του και της αντίστασης του (δεξιά).

Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων, αλλά πολύ περισσότερο με την αγωγιμότητα και το ποσό του περιεχομένου νερού.

Η ειδική αντίσταση ενός μέσου με βάση τον εμπειρικό τύπο του Archie (1942) είναι:

$$\rho_e = \alpha \phi^{-m} s^{-n} \rho_w \quad (1.3)$$

όπου, ϕ το ποσοστό όγκου των πόρων (πορώδες), s το ποσοστό των πόρων που περιέχουν νερό, ρ_w η ειδική αντίσταση του νερού, $n \approx 2$, α και m σταθερές ($0.5 \leq \alpha \leq 2.5$, $1.3 \leq m \leq 2.5$).

Οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων και ορυκτών είναι :

- Είδος πετρώματος

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 1.3, κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες, λόγω του συνήθως υψηλού περιεχομένου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες όμως τάσεις αλληλεπικάλυψης.

Πίνακας 1.3. Τιμές ηλεκτρικής αντίστασης σε πετρώματα και ρευστά

<i>Υλικό</i>	<i>Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm·m)</i>
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Συμπαγής Γρανίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 - 300
Θαλασσινό Νερό	0,2

- Δομή και πορώδες

Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση. Επιπροσθέτως, η απόθεση ορυκτών σε οποιοδήποτε πέτρωμα μειώνει το πορώδες του, αυξάνοντας την ειδική του αντίσταση.

- Περιεκτικότητα σε άλατα

Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.

- Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών

Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζονται οι επιδράσεις των διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά υπάρχουν και εξαιρέσεις.

Πίνακας 1.4. Επίδραση των γεωλογικών διεργασιών στην ειδική αντίσταση

<i>Γεωλογική Διεργασία</i>	<i>Επίδραση στην Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση</i>
Αργιλική εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγμάτωση	Ελάττωση
Εισροή θαλασσινού νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Αύξηση ή ελάττωση

- Ηλικία πετρώματος

Τα παλαιότερα πετρώματα έχουν την τάση να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

- Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών

Λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών, η ύπαρξή τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης.

- Βαθμός κορεσμού

Όσο αυξάνει ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος, τόσο μειώνεται η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση.

- Θερμοκρασία

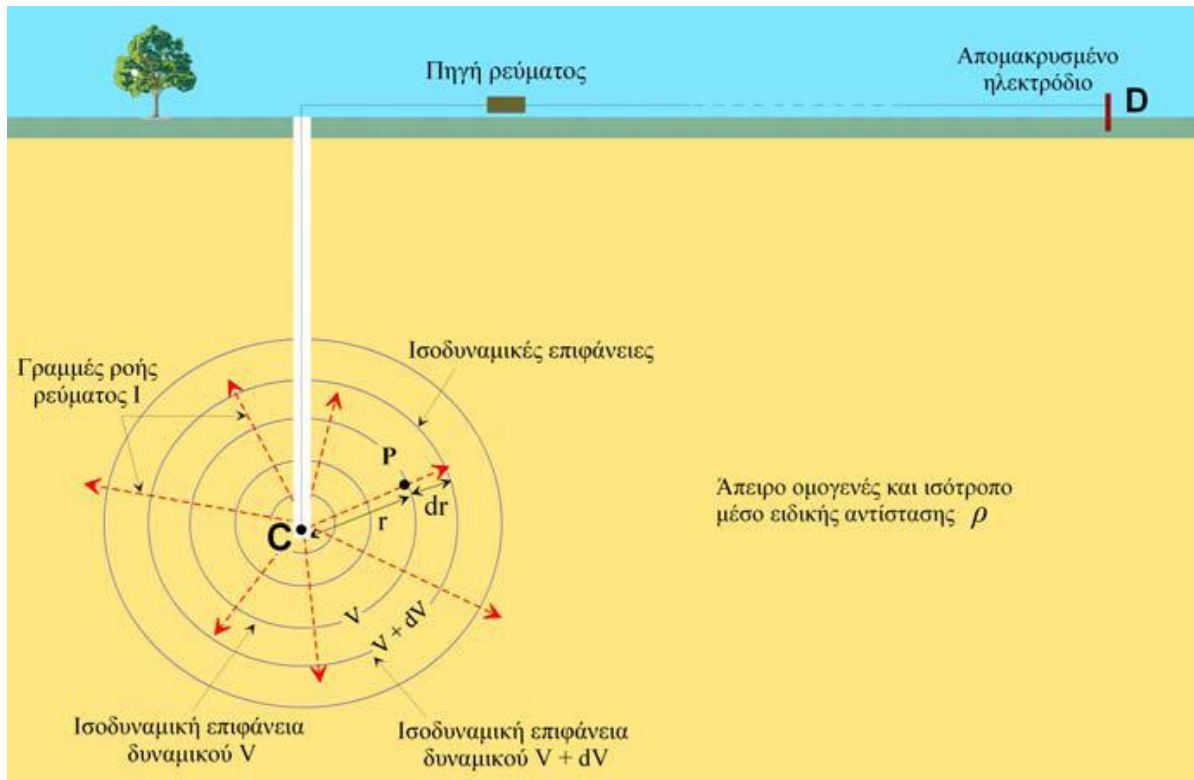
Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Ωστόσο, αυτός ο παράγοντας, έχει πολύ μικρή επίδραση, με αποτέλεσμα να διαδραματίζει αξιοσημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

1.2.3. Η Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

1.2.3.1. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο

Για την περιγραφή της φύσης του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα μέσο που καταλαμβάνει κάποιο όγκο, είναι αναγκαία η διεύρυνση των εννοιών της διαφοράς δυναμικού και του ρεύματος, που σχετίζονται με καλώδια, αντιστάσεις και μπαταρίες. Μέσα στη Γη, ή σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο σώμα, το ηλεκτρικό ρεύμα δεν περιορίζεται σε μια ροή κατά μήκος μιας μοναδικής διαδρομής, όπως συμβαίνει με το καλώδιο. Για την κατανόηση της ροής του ρεύματος στη Γη, θεωρούμε ότι η ειδική αντίσταση της Γης είναι ενιαία σε όλη τη μάζα της (ομογενής ηλεκτρικά Γη) και εξετάζουμε πως συμπεριφέρεται μία σημειακή πηγή ρεύματος μέσα σε ένα ομογενή χώρο απείρων διαστάσεων.

Στην πράξη, συνθήκες άπειρου ομογενούς χώρου δημιουργούνται όταν ένα ηλεκτρόδιο μικρών διαστάσεων, C (σημειακή πηγή ρεύματος), τοποθετείται βαθιά σε ομογενές και ισότροπο μέσο και συνδέεται με πηγή ρεύματος (Εικόνα 1.5). Το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, D, το οποίο τοποθετείται στην επιφάνεια της γης και σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα.



Εικόνα 1.5. Σχηματική απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο

Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι γραμμές ροής του ρεύματος, I , ξεκινούν από τη σημειακή πηγή και κατευθύνονται ακτινικά προς τα έξω. Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, σε διάφορες αποστάσεις από το ηλεκτρόδιο ρεύματος, παραμένει σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές και στις τρεις διαστάσεις σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο.

Το δυναμικό, V , που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος, δίνεται από τη σχέση:

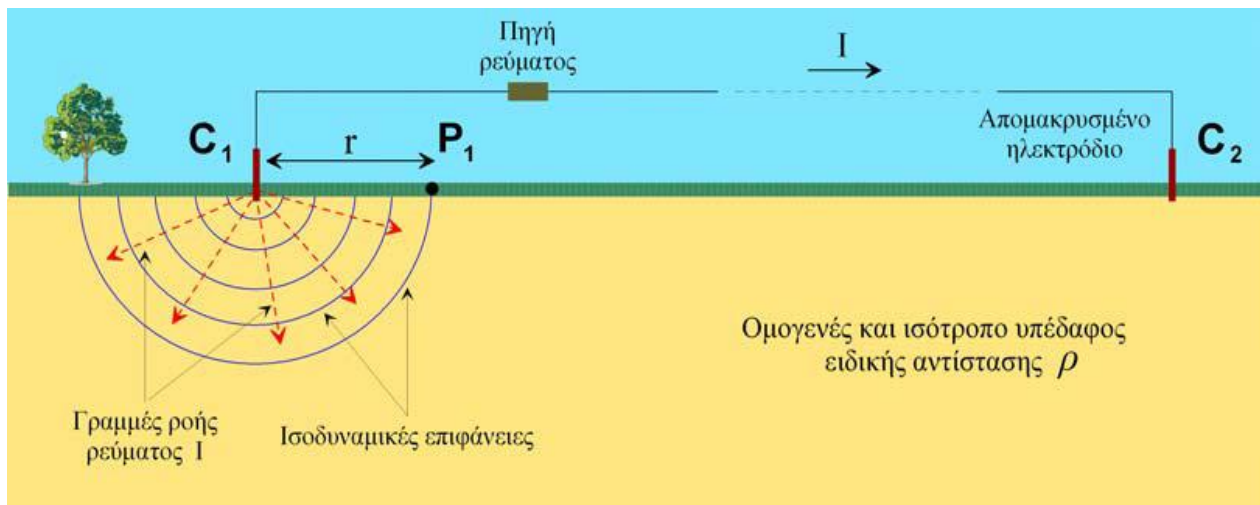
$$V = \rho \frac{I}{4\pi r} \quad (1.4)$$

Όπου, r η απόσταση του σημείου από τη σημειακή πηγή.

Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων του μέσου μπορούν να υπολογιστούν, αφαιρώντας τα δυναμικά των δύο ισοδυναμικών γραμμών, οι οποίες διέρχονται από τα σημεία αυτά.

1.2.3.2. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Για τη δημιουργία συνθηκών ομογενούς ημιχώρου, ένα ηλεκτρόδιο μικρών διαστάσεων, C_1 , (σημειακή πηγή ρεύματος), τοποθετείται στην επιφάνεια ομογενούς γης (Εικόνα 1.6). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C_2 , το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι ακτινικές, όπως στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου, που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο, ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ομόκεντρα ημισφαίρια.



Εικόνα 1.6. Σχηματική απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

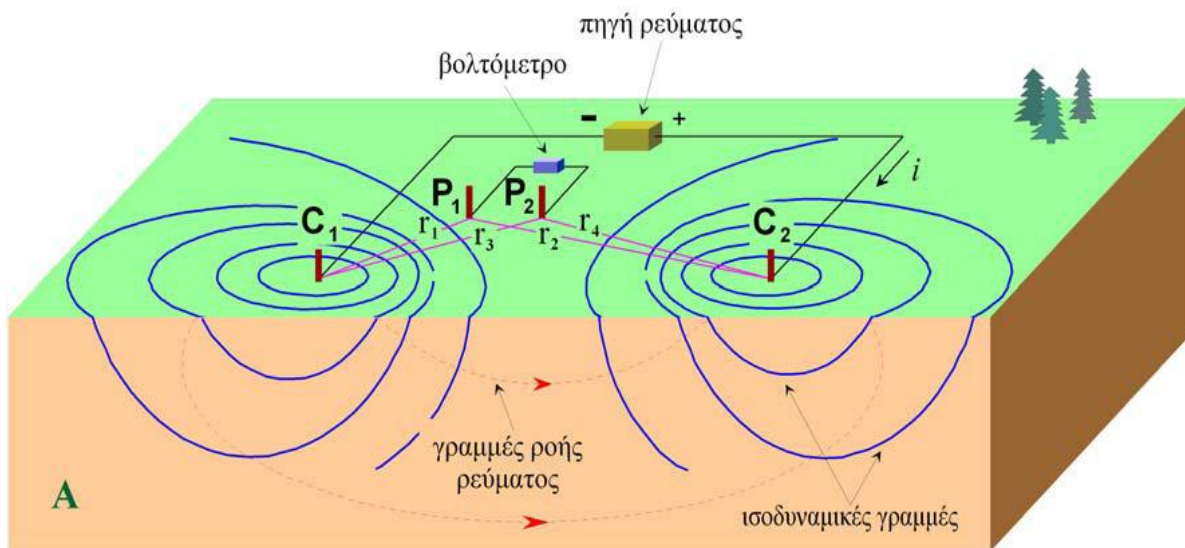
Το δυναμικό, V , που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος, δίνεται από τη σχέση:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (1.5)$$

Ουσιαστικά, η διαφορά στις δύο σχέσεις (1.4) και (1.5) (για τον άπειρο και ημιάπειρο ομογενή χώρο αντιστοίχως) έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση του ημιάπειρου ομογενούς χώρου, η επιφάνεια που συμβάλλει στον τύπο είναι επιφάνεια ημισφαιρίου, ενώ στον άπειρο ομογενές είναι επιφάνεια σφαίρας.

1.2.3.3. Ηλεκτρόδια Ρεύματος και Δυναμικού στην Επιφάνεια Ημιάπειρου Ομογενούς Χώρου

Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος είναι πεπερασμένη, η κατανομή του ρεύματος και οι ισοδυναμικές γραμμές που παράγονται μέσα στην ομογενή γη γίνονται πιο πολύπλοκες από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αντί το ρεύμα να ρέει ακτινικά από τα δύο ηλεκτρόδια (C_1, C_2), ρέει κατά μήκος καμπύλων διαδρομών που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, με αποτέλεσμα το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας να επηρεάζεται και από το C_1 και από το C_2 (Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7. Σχηματική απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο, στην περίπτωση που τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε πεπερασμένη απόσταση μεταξύ τους.

Το δυναμικό στο σημείο P_1 λόγω των C_1 και C_2 είναι:

$$V_{P_1} = V_1 + V_2 = \frac{\rho(+I)}{2\pi r_1} + \frac{\rho(-I)}{2\pi r_2} \quad (1.6)$$

Ομοίως, το δυναμικό στο σημείο P_2 λόγω των C_1 και C_2 είναι:

$$V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (1.7)$$

Έτσι, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων P_1 και P_2 θα είναι:

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (1.8)$$

Οι σημειακές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 υλοποιούνται στην πράξη με την τοποθέτηση δύο μεταλλικών πασάλων (ηλεκτροδίων) στο έδαφος και τη σύνδεση τους μέσω καλωδίων με μία ηλεκτρική πηγή, πχ ένα συσσωρευτή (Εικόνα 1.7). Τα σημεία P_1 , P_2 μέτρησης της διαφοράς δυναμικού ΔV υλοποιούνται με την τοποθέτηση δύο άλλων μεταλλικών ηλεκτροδίων στο έδαφος και τη σύνδεσή τους με ένα βολτόμετρο.

1.2.3.4. Η φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η ειδική αντίσταση, που υπολογίζεται με τη σχέση (1.8) (λύνοντας ως προς ρ), θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

Όταν όμως το μέσο είναι ανομοιογενές, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση με τη σχέση (1.8) ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται *φαινόμενη ειδική αντίσταση*. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράται μέσω της σχέσης (1.9):

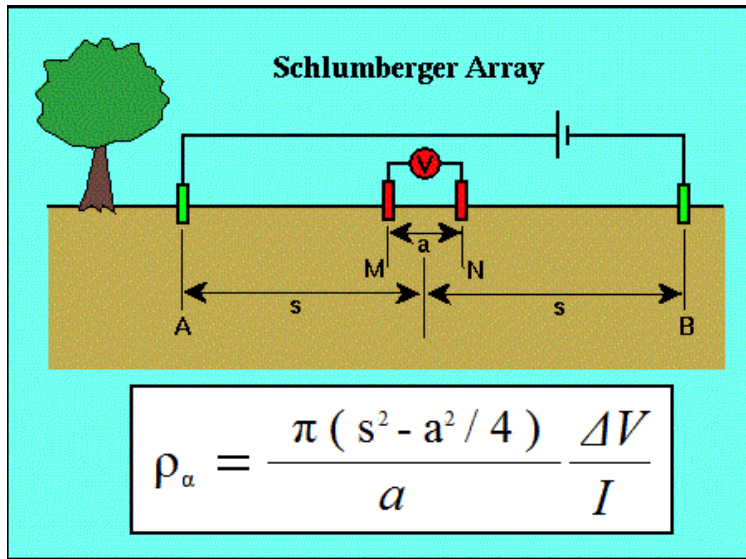
$$\rho_{\alpha} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.9)$$

για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης μέρους του υπεδάφους, ούτε μίας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται, όμως, συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγωγίμων ή μη ανομοιογενειών.

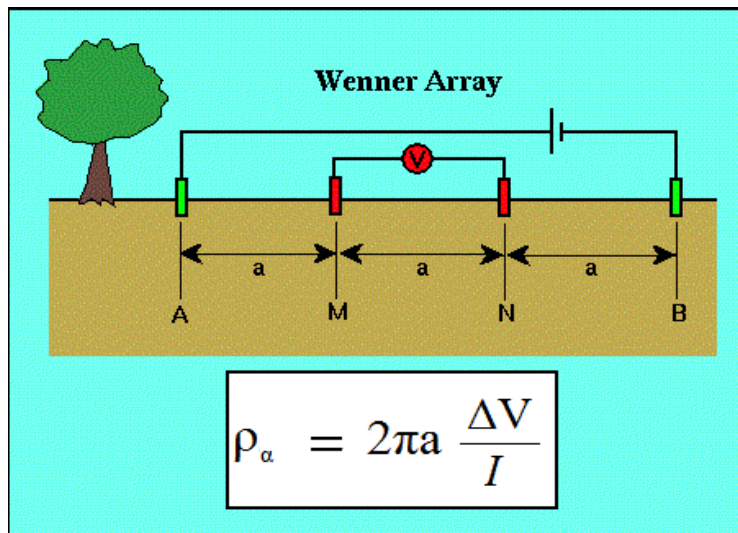
1.2.3.5. Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και τις μεταξύ τους αποστάσεις, υπάρχουν οι ακόλουθες διατάξεις ηλεκτροδίων και οι αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις, οι οποίες απεικονίζονται συνοπτικά στην Εικόνα 1.8.

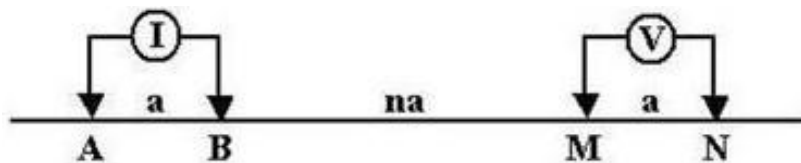
- **Διάταξη Schlumberger**: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού είναι τοποθετημένα συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης, απέχοντας αποστάσεις s και a αντίστοιχα.



- **Διάταξη Wenner**: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a .

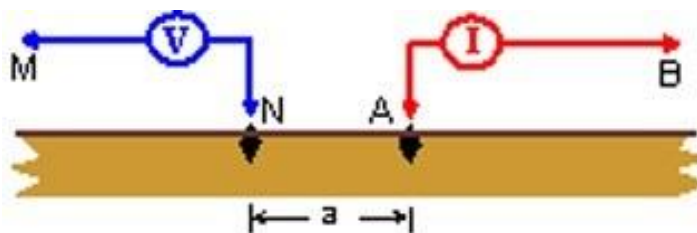


- **Διάταξη Dipole – Dipole**: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση a , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης a (na).



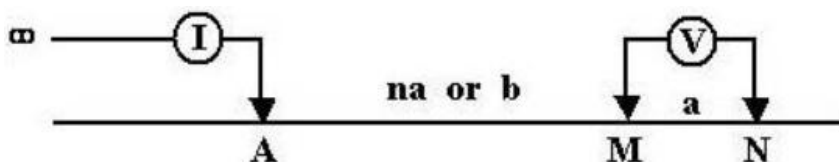
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \pi a n(n+1)(n+2).$$

- **Διάταξη Pole – Pole:** Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια.

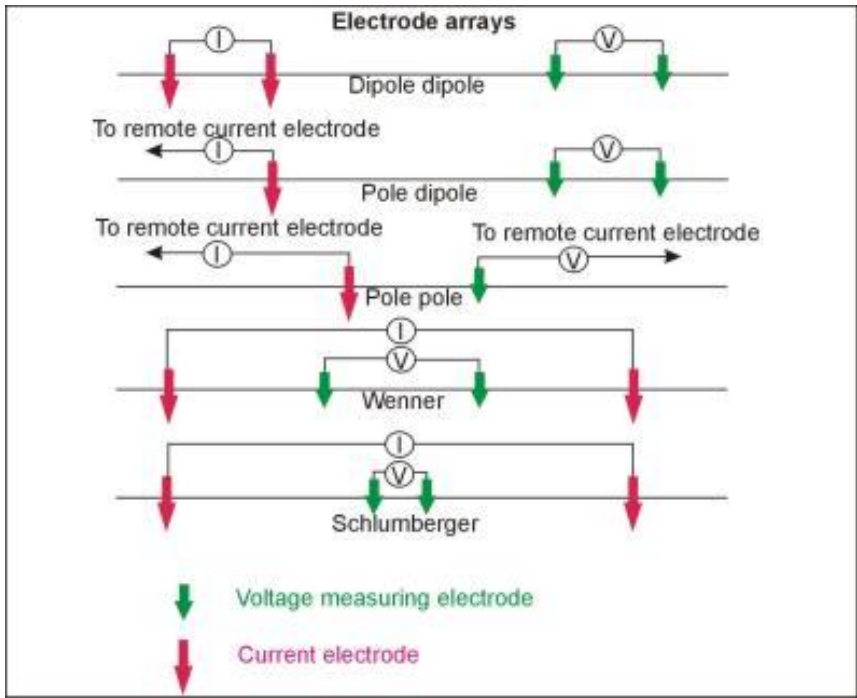


$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a$$

- **Διάταξη Pole – Dipole:** Το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος τοποθετείται πολύ μακριά από το άλλο ηλεκτρόδιο ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Η απόσταση μεταξύ του κοντινού ηλεκτροδίου ρεύματος και του παρακείμενου ηλεκτροδίου δυναμικού είναι na .



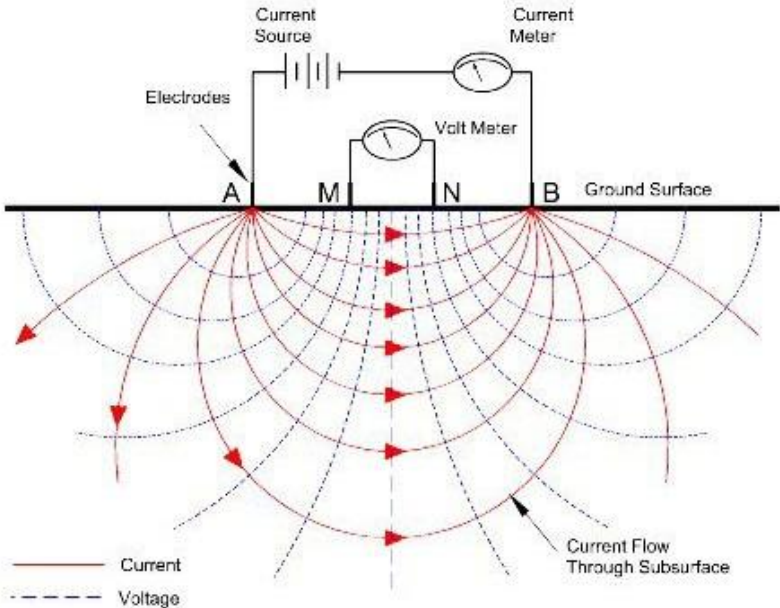
$$\rho_{\alpha} = 2\pi \frac{b(a+b)}{a} \frac{\Delta V}{I}$$



Εικόνα 1.8. Συνοπτική απεικόνιση του συνόλου των διατάξεων για τη μέτρηση της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης

1.2.3.6. Κατανομή Ρεύματος και Δυναμικού Εντός Ομογενούς Υπεδάφους

Η κατανομή των ρευματικών και δυναμικών γραμμών για δύο ηλεκτρόδια ρεύματος στην επιφάνεια ομογενούς υπεδάφους φαίνεται στην Εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9. Κατανομή των ρευματικών και δυναμικών γραμμών για δύο ηλεκτρόδια ρεύματος στην επιφάνεια ομογενούς υπεδάφους (πηγή <http://en.openet.org/>)

1.2.3.7. Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να προσδιοριστεί η φαινόμενη ειδική αντίσταση, ρ_a , μέσω της σχέσης (1.9), πρέπει να καταγραφούν το ΔV και I . Για το σκοπό αυτό απαιτούνται τα παρακάτω όργανα:

1. Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο
2. Βολτόμετρο

Τα δύο αυτά όργανα βρίσκονται, συνήθως, ενσωματωμένα σε ένα όργανο μέτρησης (Εικόνα 1.10)



Εικόνα 1.10. Όργανο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης (πηγή www.geomatrix.co.uk)

3. Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης

Σκοπός του οργάνου αυτού είναι να ρυθμίζει κάθε φορά τη χρησιμοποιούμενη διάταξη, πχ Schlumberger, Dipole – Dipole κτλ

4. Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού

Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης, παρεμβάλλεται ένας ακόμη διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.

5. Καλώδια σε καρούλια (Εικόνα 1.11)

6. Ηλεκτρόδια (Εικόνα 1.11)



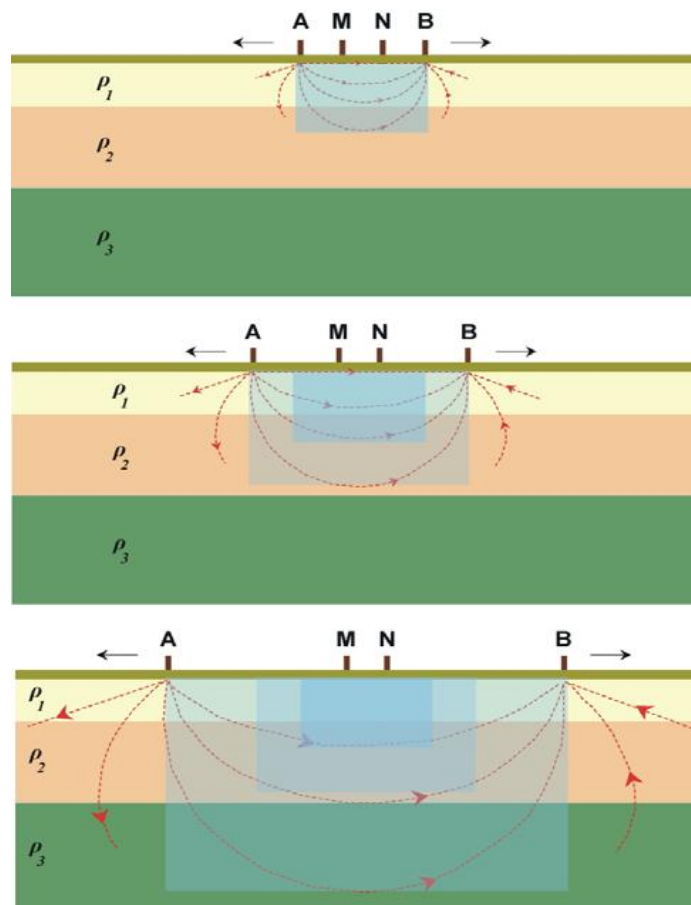
Εικόνα 1.11. Εξοπλισμός υπαίθρου για τον προσδιορισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, ρ_w , που περιλαμβάνει το όργανο μέτρησης, τα καρούλια με τα καλώδια και τα ηλεκτρόδια. (πηγή <http://uavsurvey.ca/Ohmega.htm>)

1.2.3.8. Μετρήσεις και Τεχνικές Υπαίθρου

Το βάθος ανίχνευσης, εξαρτάται κυρίως από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος A και B (Εικόνα 1.9). Όσο αυξάνει η απόσταση AB, τόσο βαθύτεροι σχηματισμοί διαρρέονται από ρεύμα (Εικόνα 1.12), ενώ η διαφορά δυναμικού στα MN αφορά βαθύτερες ισοδυναμικές επιφάνειες. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, επηρεάζεται δηλαδή και από τα δύο αυτά στοιχεία.

Υπάρχουν δύο τεχνικές με τις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, ανάλογα με το σκοπό της έρευνας :

- Οι **ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (Vertical Electrical Soundings ή VES)**, όπου είναι δυνατόν να ανιχνευτεί η εναλλαγή των στρωμάτων με το βάθος, κάτω από ένα σημείο που είναι το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Αυτό γίνεται, μετακινώντας τα ηλεκτρόδια ρεύματος συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης, σε μεγαλύτερες διαδοχικά αποστάσεις (Εικόνα 1.12).
- Οι **οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις (Resistivity Profiling)**, όπου είναι δυνατόν να σαρωθεί πλευρικά μία ζώνη συγκεκριμένου πάχους και να μελετηθεί η πλευρική διαφοροποίηση του υλικού της ζώνης, από τη μελέτη της οριζόντιας (πλευρικής) μεταβολής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στην περίπτωση αυτή, τα ηλεκτρόδια της διάταξης παραμένουν σταθερά και μετακινείται όλη η διάταξη.



Εικόνα 1.12. Γραφική αναπαράσταση της διασκόπησης σε βάθος, μετακινώντας συμμετρικά τα ηλεκτρόδια ρεύματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις

Για τη διασκόπηση σε βάθος με την τεχνική της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης, χρησιμοποιείται, συνήθως, η διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος, μετακινούνται συμμετρικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ κρατούνται σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού έως ότου οι τιμές διαφοράς δυναμικού γίνουν πολύ μικρές. Τότε, μεταφέρονται και τα ηλεκτρόδια δυναμικού σε μεγαλύτερη απόσταση, συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης και συνεχίζουν να αυξάνονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Για οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις, χρησιμοποιείται, συνήθως, η διάταξη Wenner. Για την εφαρμογή της, μετακινείται ολόκληρη η διάταξη με σταθερές τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, κρατώντας έτσι το βάθος διασκόπησης σταθερό και διασκοπώντας παράπλευρα.

1.2.3.9. Επιλογή της Κατάλληλης Διάταξης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης, κάθε φορά, διάταξης ηλεκτροδίων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5.

Πίνακας 1.5. Επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων με βάση διαφορετικούς παράγοντες.

◆◆◆◆ = η πλέον κατάλληλη, ◆◆◆ = κατάλληλη, ◆◆ = μετρίως κατάλληλη, ◆ = ακατάλληλη

	<i>Wenner</i>	<i>Schlumberger</i>	<i>Pole - Dipole</i>	<i>Dipole - Dipole</i>
<i>Λόγος σήματος προς θόρυβο</i>	◆◆◆◆	◆◆◆	◆◆	◆
<i>Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες</i>	◆	◆◆	◆◆◆	◆◆◆◆
<i>Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση</i>	◆◆◆	◆◆◆◆	◆	◆◆
<i>Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων</i>	◆◆◆◆	◆◆◆◆	◆◆	◆◆
<i>Ευαισθησία στη μορφολογία του υποβάθρου</i>	◆	◆	◆◆◆	◆◆◆◆
<i>Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος</i>	◆◆◆◆	◆◆◆◆	◆	◆◆
<i>Ευαισθησία στην κλίση</i>	◆◆◆◆	◆◆◆◆	◆	◆◆
<i>Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων</i>	◆	◆	◆◆◆◆	◆◆◆

Άλλοι παράγοντες, οι οποίοι συμβάλλουν στην επιλογή της κατάλληλης διάταξης είναι:

- Το βάθος διασκόπησης
- Η ευαισθησία σε πλευρικά φαινόμενα
- Η ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων
- Δεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος

- Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας

Γενικά, τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση, έχει η διάταξη Schlumberger. Οι αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς, με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει μόνο όταν το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε να μην είναι δυνατό να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια. Αντίθετα, η διάταξη Dipole - Dipole, παρά το μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης, λόγω της μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού υφίσταται το θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες, κάτι το οποίο όμως την καθιστά ιδανική για την ανίχνευση αυτών των ανομοιογενειών. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου βάθους ανίχνευσης, η διάταξη Dipole - Dipole είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό του αναγλύφου των ασυνεχειών μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων.

1.2.3.10. Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης (Resistivity Profiling)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν τρόπο διασκόπησης ειδικής αντίστασης, που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της οριζόντιας ή πλευρικής μεταβολής αυτής, μέσα σε υπεδαφική ζώνη σταθερού περίπου πάχους. Για την εφαρμογή της, όπως αναφέρθηκε, διατηρούνται σταθερές οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού μεταξύ τους και μετακινείται όλη η διάταξη κατά μήκος μίας γραμμής ή χωρικά σε μία ευρύτερη περιοχή. Με τον τρόπο αυτόν, διασκοπείται παράπλευρα ο χώρος σε ένα περίπου σταθερό μέσο βάθος, μέσω της κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που μετράται. Η κατανομή αυτή δίνει ποιοτικά την χωρική κατανομή στο συγκεκριμένο βάθος γεωηλεκτρικών σχηματισμών.

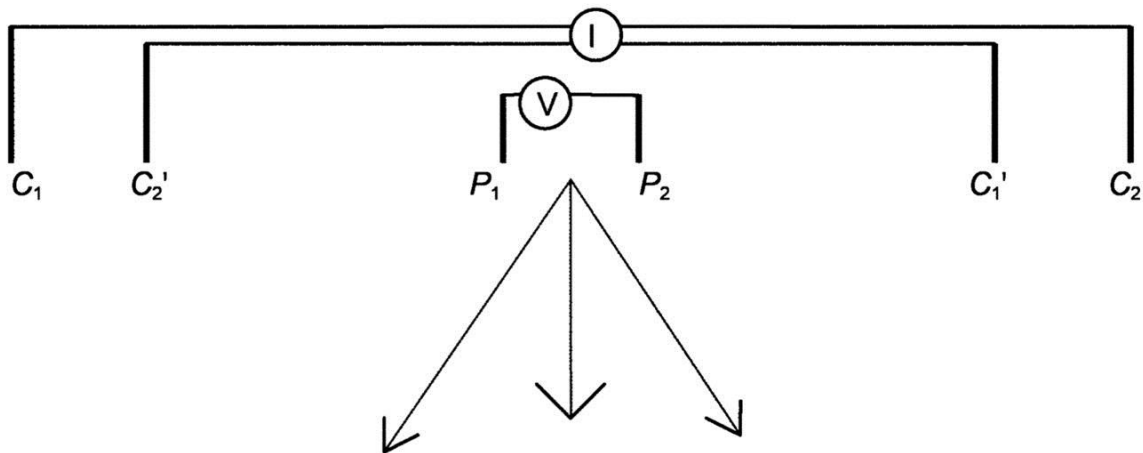
Ειδικότερα, με τη μέθοδο αυτή, αναζητούνται δομές με πεπερασμένες πλευρικές διαστάσεις, μέσα σε υπεδαφικές ζώνες σταθερού πάχους. Τέτοιες δομές μπορεί να είναι τα φυσικά ή τεχνητά έγκοιλα (σπήλαια, υπόγεια τούνελ ή γαλαρίες ορυχείων) στην τεχνική γεωλογία, υδροφόροι ή μη σχηματισμοί άμμων και χαλίκων (φακοί) στην υδρογεωλογία, υπεδαφικά υπολείμματα οικισμών ή ταφικών μνημείων στην αρχαιολογική έρευνα, οι ρηγματογόνες ζώνες, οι φλέβες μεταλλοφορίας κλπ.

1.2.3.11. Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις (Resistivity Soundings)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται περισσότερο από όλες, όταν πρέπει να προσδιοριστούν οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Όπως αναφέρθηκε, αν κρατηθεί το κέντρο της διάταξης ηλεκτροδίων σταθερό και αυξηθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, τότε διενεργείται ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή διασκοπείται το υπέδαφος εις βάθος κάτω από το κέντρο της διάταξης. Η μεταβολή των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, δίνει μία πρώτη εικόνα των μεταβολών των ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων στρωμάτων εις βάθος. Σκοπός, δηλαδή, της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης, είναι η δημιουργία του γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους (υπολογισμός πάχους και ειδικής αντίστασης του κάθε στρώματος) από τις μετρούμενες τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης στις διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου της βυθοσκόπησης ειδικής αντίστασης, είναι ο προσδιορισμός του υδροφόρου ορίζοντα.

1.2.3.11.1. Η Διδιάστατη Βυθοσκόπηση CSDD

Οι Morris et al. (1993) εισήγαγαν μια διάταξη ηλεκτροδίων, συνδυάζοντας τις διατάξεις Schlumberger και Dipole-Dipole. Η διάταξη αυτή ηλεκτροδίων καλείται "Combined Schlumberger and Dipole-Dipole" (CSDD – Apostolopoulos 2003) και διερευνά το υπέδαφος τόσο κατακόρυφα, με τη διάταξη Schlumberger, όσο και κατά μήκος δύο διαγώνιων διευθύνσεων με τη διάταξη Dipole-Dipole (Εικόνα 1.13).



Εικόνα 1.13. Απεικόνιση της διδιάστατης βυθοσκόπησης CSDD

Σκοπός της μεθόδου αυτής, είναι η εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων και των δύο διατάξεων. Χαρακτηριστικά, η διάταξη Schlumberger παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία στο βάθος, καλή διείσδυση δια μέσου ενός επιφανειακού αγωγίμου στρώματος και ικανοποιητικό διαχωρισμό οριζόντιων στρωμάτων, ενώ η διάταξη Dipole-Dipole είναι περισσότερο ευαίσθητη στην μορφολογία του βραχώδους υποβάθρου και την πλευρική ύπαρξη υπεδαφικών δομών (Ward 1990).

Τόσο στις μετρήσεις Schlumberger, όσο και στις μετρήσεις Dipole-Dipole, οι οποίες γίνονται με τη διάταξη CSDD, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά σε συγκεκριμένες θέσεις, ελαχιστοποιώντας έτσι το πέρασμα από επιφανειακές ανομοιογένειες και τις συνεπαγόμενες απότομες αλλαγές της ειδικής αντίστασης (Van Zijl 1985).

Η λήψη δεδομένων με τη διάταξη CSDD είναι εύκολη, γρήγορη και φθηνή. Επιπροσθέτως, είναι πολύ χρήσιμη, γιατί στις περιπτώσεις εκείνες όπου δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση πολλών βυθοσκοπήσεων σε μία περιοχή, η εκμετάλλευση όλων των τιμών CSDD (Schlumberger

και Dipole-Dipole) μπορεί να δώσει μία διδιάστατη τομή φαινόμενης ειδικής αντίστασης, η ερμηνεία της οποίας θα οδηγήσει σε μια διδιάστατη εικόνα της υπεδάφικης στρωμάτωσης.

1.2.3.12. Η Μέθοδος της Διδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

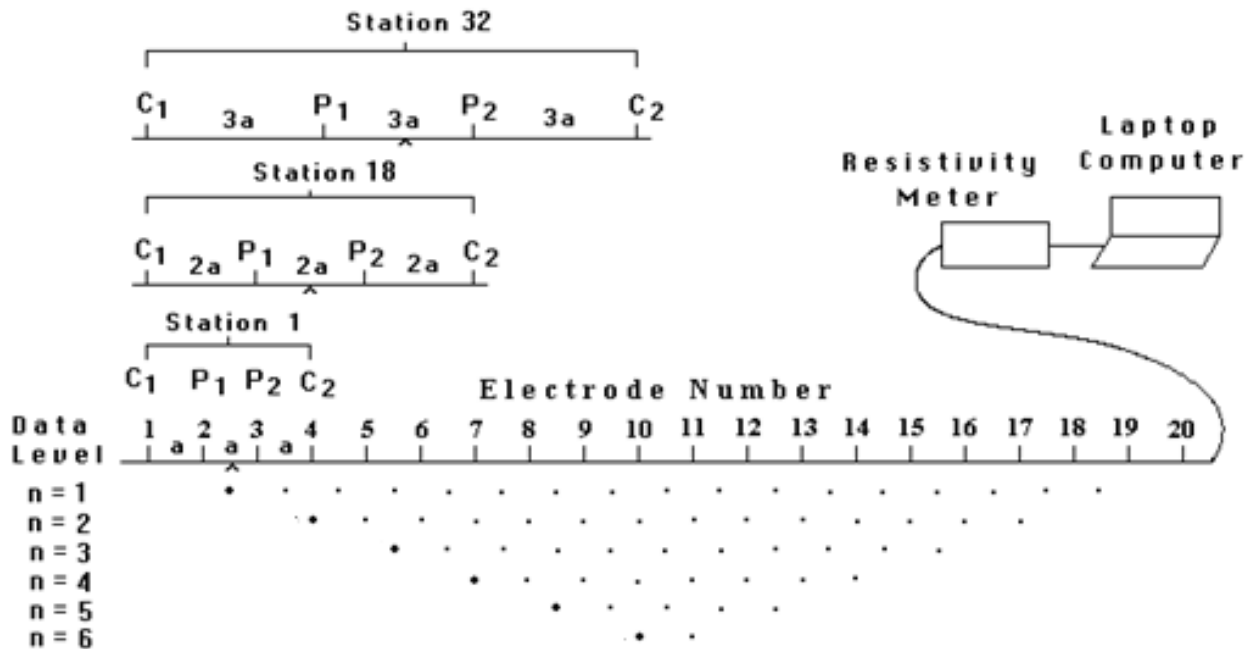
1.2.3.12.1. Ηλεκτρική Τομογραφία στην Ξηρά

Όταν υπάρχει ανάγκη βαθιάς διασκόπησης του υπεδάφους και κάλυψης μεγάλων σε έκταση περιοχών, προτιμάται πλέον, η λήψη μετρήσεων με τη μέθοδο των διδιάστατων βυθοσκοπήσεων CSDD. Παρόλα αυτά, όταν απαιτούνται μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις, τόσο παράπλευρα όσο και σε βάθος, τότε προτιμάται η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η ηλεκτρική τομογραφία, συνίσταται ουσιαστικά σε πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται από την επιλογή των διατάξεων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν (Schlumberger, Wenner, κλπ.). Εν τέλει, όλες οι τιμές που λαμβάνονται από τις εκάστοτε μετρήσεις, χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, η οποία τελικά δίνει μία διδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, τη γεωηλεκτρική τομογραφία.

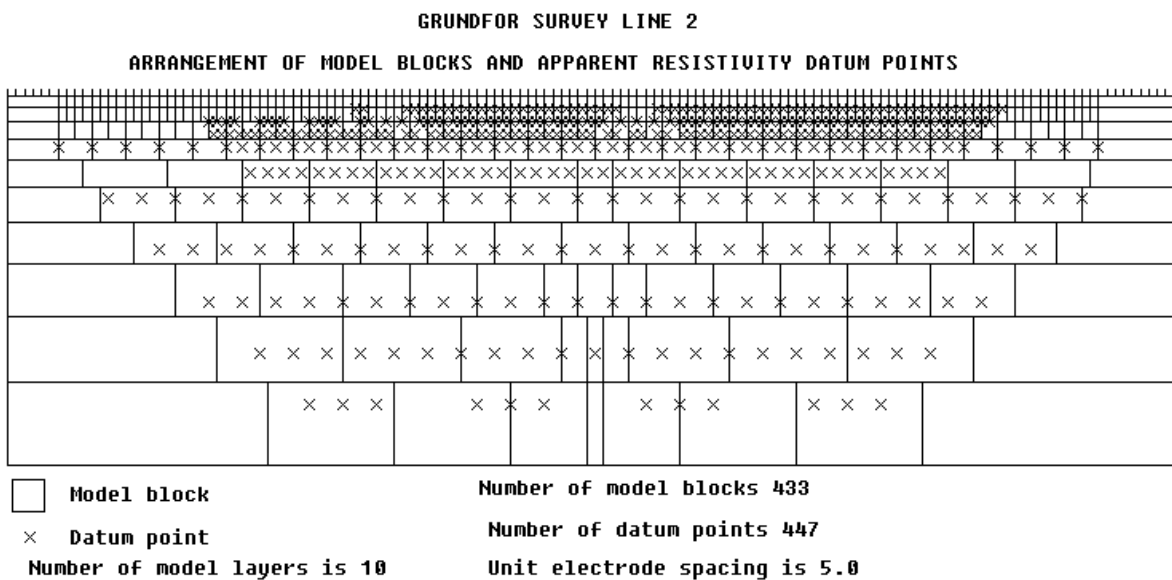
Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε πληθώρα εφαρμογών, όπως αρχαιολογικές μελέτες, γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές κλπ. Για την εκτέλεση της διδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας απαιτείται η καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μίας γραμμής (Εικόνα 1.14). Είναι σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, ώστε να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, γεγονός το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση αυτοματοποιημένων πολυ-ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν με τη σειρά τους αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστροφης δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτήν την ανάγκη. Με τις τεχνικές αυτές, το υπεδάφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων αυξάνει συνήθως με το βάθος (Εικόνα 1.15). Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία μεταξύ των δεδομένων εισόδου και

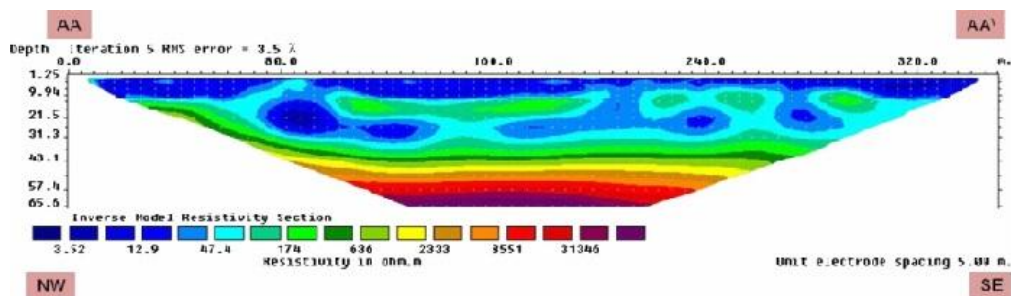
την απόκριση του μοντέλου (Εικόνα 1.16). Όσον αφορά την τοπογραφία, αυτή αντιμετωπίζεται είτε με διορθώσεις, δηλαδή μετατροπή των δεδομένων πριν και μετά την αντιστροφή, είτε με απευθείας εισαγωγή της στο πλέγμα.



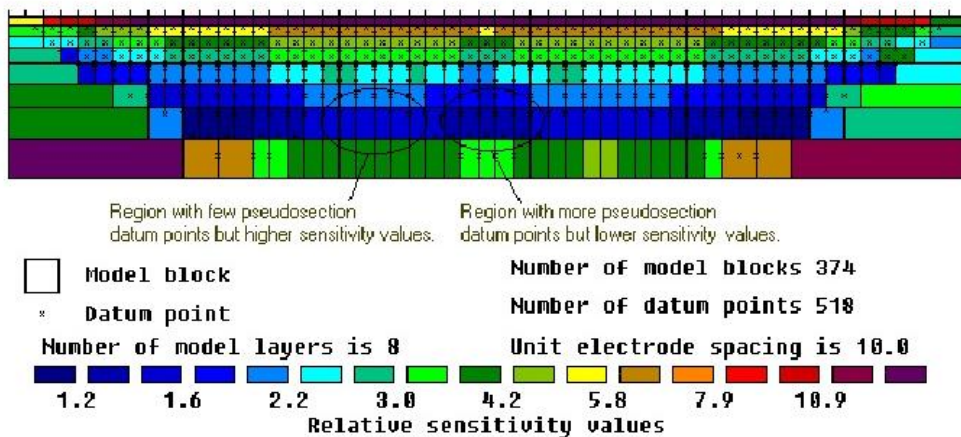
Εικόνα 1.14. Διάταξη ηλεκτρικής τομογραφίας



Εικόνα 1.15. Διαίρεση του υπεδάφους σε κελιά, αυξανόμενου με το βάθος μεγέθους, για την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων



ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



Εικόνα 1.16. Προσαρμογή δεδομένων που ελήφθησαν με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας

1.2.3.12.2. Ηλεκτρική Τομογραφία στη Θάλασσα

Αποτελεί ουσιαστικά μία πρωτοπόρο μέθοδο εφαρμογής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στη θάλασσα (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ).

Κατάλληλα κατασκευασμένο καλώδιο – αντοχή σε αλμυρό νερό, κατάλληλες μονώσεις, αντοχή στην έλξη από την επιφάνεια με κατάλληλη ενίσχυση και δέσιμο, κατάλληλα βύσματα ώστε να διενεργούνται πολλαπλές μετρήσεις αναγκαίες για την ηλεκτρική τομογραφία – βυθίζεται στη θάλασσα και έρχεται σε επαφή με το βυθό, ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις όπως και στην ξηρά, με τα κατάλληλα πρωτόκολλα. Αποτέλεσμα της εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι η αποτύπωση κάτω από το βυθό και για αρκετά μέτρα, της στρωματογραφίας, κάτι πολύ χρήσιμο σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες.

1.2.3.13. Πηγές Θορύβου και Περιορισμοί της Ειδικής Αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπως και όλες οι γεωφυσικές μέθοδοι, χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος πηγών θορύβου, οι οποίες επηρεάζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό τις μετρήσεις. Στη συγκεκριμένη ηλεκτρική μέθοδο, οι πηγές αυτές επηρεάζουν τις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος, από τις οποίες θα υπολογισθεί η φαινόμενη ειδική αντίσταση.

Ο θόρυβος που προκύπτει στις μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης προέρχεται από :

- Πόλωση των ηλεκτροδίων: Ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο, όπως μία χάλκινη ή ατσάλινη ράβδος, όταν έρχεται σε επαφή με κάποιον ηλεκτρολύτη (εκτός από διάλυμα κορεσμένο με τα δικά της άλατα) όπως το εδαφικό νερό, θα δημιουργήσει ένα μετρήσιμο δυναμικό επαφής, το οποίο μπορεί να αποτελεί σημαντικό κλάσμα του δυναμικού που θα μετρηθεί.
- Τελλουρικά ρεύματα: Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μέσα στη γη ρέουν φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία ονομάζονται τελλουρικά ρεύματα. Η παρουσία αυτών των ρευμάτων μπορεί να παράγει μια μετρήσιμη τάση στα ηλεκτρόδια δυναμικού, ακόμα και όταν αυτά δε διαρρέονται από ρεύμα.
- Παρουσία γειτονικών αγωγών: Οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν κοντά σε αγωγούς που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, όπως θαμμένους σωλήνες και φράχτες, καθώς αυτοί λειτουργούν σαν απορροφητές ρεύματος (καταβόθρες). Λόγω της μικρής ειδικής τους αντίστασης, το ρεύμα θα ρεύσει κατά προτίμηση κατά μήκος αυτών των δομών, παρά μέσα στη γη.
- Χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια: Όπως οι γειτονικοί αγωγοί λειτουργούν ως καταβόθρες που βραχυκυκλώνουν το πείραμα της ειδικής αντίστασης, έτσι και η επιφανειακή ειδική αντίσταση αν είναι χαμηλή, δυσκολεύει το ρεύμα να κινηθεί προς τα βαθύτερα στρώματα της γης. Για παράδειγμα, ένα στρώμα υψηλής αγωγιμότητας κοντά στην επιφάνεια, όπως ένα στρώμα νερού, τείνει να εμποδίσει το ρεύμα να διεισδύσει βαθύτερα μέσα στη γη.

- Γεωλογία και τοπογραφία κοντά στα ηλεκτρόδια: Κάθε διαφοροποίηση στη γεωλογία ή στο περιεχόμενο νερό, γύρω από ένα ηλεκτρόδιο, προκαλεί μεταβολές στην επιφανειακή ειδική αντίσταση και επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις. Επιπλέον, η ανώμαλη τοπογραφία ωθεί το ρεύμα να συγκεντρώνεται στις κοιλάδες και να διασκορπίζεται στους λόφους, επηρεάζοντας και αυτή με τη σειρά της την έρευνα.
- Επαγόμενο ρεύμα: Τα καλώδια που συνδέουν την πηγή του ρεύματος με τα ηλεκτρόδια ρεύματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διαρρέονται από ρεύμα, το οποίο μπορεί να παράγει ένα επαγόμενο ρεύμα στα καλώδια που συνδέουν το βολτόμετρο με τα ηλεκτρόδια τάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καταγραφή ψευδής τάσης.

Η ύπαρξη των παραπάνω πηγών θορύβου σε συνδυασμό με τη φύση της μεθόδου, παρέχουν κάποιους περιορισμούς στην εφαρμογή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Οι περιορισμοί αυτοί είναι :

1. Η αμφίσημη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη και αναγκαία η παράλληλη και ανεξάρτητη εκτέλεση γεωφυσικών και γεωλογικών ερευνών, με σκοπό τη διαλογή έγκυρων ερμηνειών των τιμών της ειδικής αντίστασης.
2. Η ερμηνεία περιορίζεται σε απλές δομικές διατάξεις. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτήν την κατάσταση δύναται να μην μπορεί να ερμηνευθεί.
3. Η τοπογραφία και οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια, μπορούν να ελαττώσουν, έως και να εκμηδενίσουν, την επίδραση των βαθύτερων σχηματισμών στην παροχή δεδομένων κατά τη λήψη των μετρήσεων.
4. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης περιορίζεται από τη μέγιστη ποσότητα ρεύματος που μπορεί να διοχετευθεί στο έδαφος, αλλά και από την πρακτική δυσκολία ανάπτυξης και διάταξης καλωδίων μεγάλου μήκους. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης για τις περισσότερες έρευνες κυμαίνεται περίπου στο ένα χιλιόμετρο.

1.2.3.14. Εφαρμογές της Ειδικής Αντίστασης

Η Ειδική Αντίσταση, είναι γενικά μία μέθοδος ιδιαίτερα αποτελεσματική στο να σκιαγραφεί στρωματικές αλληλουχίες σε μικρό βάθος, αλλά και κάθετες ασυνέχειες, με γνώμονα την μεταβολή των τιμών της ειδικής αντίστασης. Οι έρευνες με την μέθοδο αυτή, συνήθως δεν περιλαμβάνουν μετρήσεις μεγάλης κλίμακας λόγω της σωματικής κόπωσης και της χρονικής έκτασης που απαιτείται για την συναρμολόγηση και την αποσυναρμολόγηση της διάταξης των ηλεκτροδίων και των καλωδίων. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος αυτή σπάνια χρησιμοποιείται για αναγνωριστικές έρευνες.

Ειδικά, η ειδική αντίσταση βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε αναγνωριστικές γεωλογικές έρευνες πεδίου, οι οποίες προηγούνται χρονικά των εφαρμογών των μηχανικών, όπως είναι η δημιουργία πάσης φύσεως κατασκευών (Barker 1997). Οι αρχαιολογικές έρευνες, αποτελούν επίσης, έναν άλλον κλάδο όπου η μέθοδος αυτή βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή, με σκοπό τον εντοπισμό χειροτεχνημάτων, οικημάτων και λοιπών αρχαιολογικών δομών.

Η πιο διαδεδομένη ίσως χρήση της ειδικής αντίστασης είναι σε υδρογεωλογικές μελέτες, καθώς παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη γεωλογική δομή, τη λιθολογία και τους υπεδαφικούς υδατικούς πόρους, κάτι το οποίο είναι μεγάλης σημασίας καθώς περιορίζει σημαντικά τον αριθμό των πολυδάπανων αναγνωριστικών γεωτρήσεων, σε συγκεκριμένες πλέον θέσεις..

Ενδεικτικά, κάποιες άλλες εφαρμογές της μεθόδου έγκεινται στον εντοπισμό και την παρακολούθηση του βαθμού ρύπανσης των υπόγειων υδάτων (Merkel 1972), καθώς και την μελέτη της όξινης απορροής των μεταλλείων (Ebraheem et al. 1990).

1.3. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

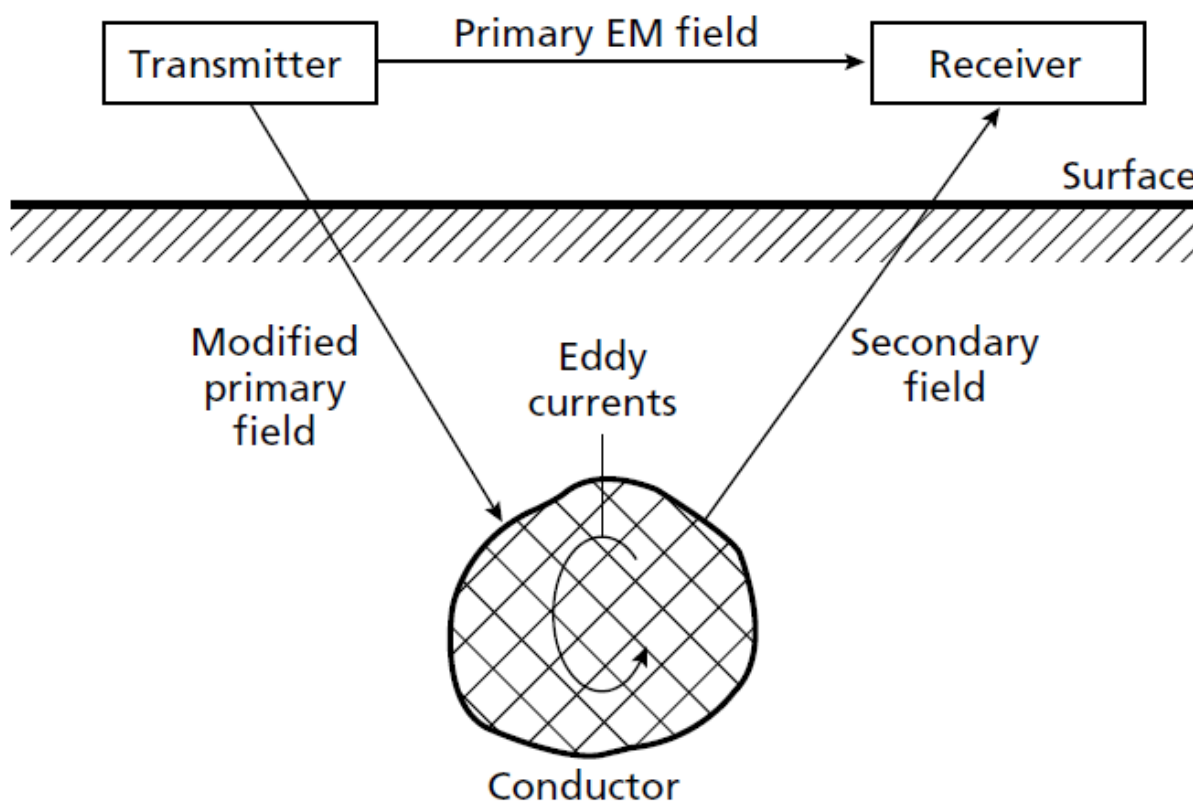
1.3.1. Γενικά

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1920 στη Σκανδιναβία, τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και τον Καναδά, περιοχές όπου ο εντοπισμός αγώγιμων μεταλλικών κοιτασμάτων διευκολυνόταν από την μεγάλη αντίθεση μεταξύ της αγωγιμότητας αυτών και της υψηλής αντίστασης του μητρικού πετρώματος, καθώς και από το μικρό πάχος υπερκειμένων. Η από αέρος εφαρμογή της μεθόδου αυτής αναπτύχθηκε, περίπου, 30 χρόνια αργότερα.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης του υπεδάφους, βασίζεται στην απόκριση αυτού στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ένταση και μαγνητική δύναμη. Αρχικά, εισάγεται στο έδαφος ένα κύριο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται όταν εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει ένα μικρό πηνίο ή ένα μεγάλο ηλεκτρικό κύκλωμα. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την απόκριση του εδάφους και τη δημιουργία ενός δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το οποίο με τη σειρά του ωθεί το εναλλασσόμενο ρεύμα να διαδοθεί προς το πηνίο-δέκτη. Μέσω αυτής της διαδικασίας, της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, είναι δυνατός ο εντοπισμός των παραγόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Το κύριο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ταξιδεύει από το πηνίο-πομπό προς το πηνίο-δέκτη, ακολουθώντας διαδρομές τόσο πάνω όσο και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 1.17). Στα σημεία όπου το υπέδαφος είναι ομογενές, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του πεδίου που διαδίδεται πάνω από την επιφάνεια και μέσα σε αυτό, παρά μόνο μία μικρή μείωση στο πλάτος του δεύτερου σε σχέση με το πρώτο. Ωστόσο, υπό την παρουσία ενός αγώγιμου σώματος, το μαγνητικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που διαδίδεται μέσα στη γη παράγει δινορεύματα (eddy current), το οποίο ρέει μέσα στο σώμα αυτό (Εικόνα 1.17). Τα εναλλασσόμενα ρεύματα δημιουργούν το δικό τους δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο ταξιδεύει προς τον δέκτη. Ο δέκτης, διεγείρεται έτσι από τη σύνθεση του αφιχθέντος κύριου και δευτερογενούς πεδίου και η διέγερση αυτή διαφέρει τόσο σε φάση όσο και σε πλάτος, από αυτή που θα υπήρχε αν στον δέκτη έφτανε μόνο το κύριο πεδίο. Εν τέλει, οι διαφορές αυτές μεταξύ των εκπεμπόμενων και λαμβανομένων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, φανερώνουν την παρουσία του αγώγιμου σώματος και παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη γεωμετρία και τις ηλεκτρικές του ιδιότητες.

Η μαγνητική επαγωγή προέρχεται, όπως αναφέρθηκε, από το μαγνητικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Έτσι, δεν είναι απαραίτητη η φυσική επαφή ούτε του πομπού, ούτε του δέκτη με το έδαφος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι ηλεκτρομαγνητικές έρευνες διασκόπησης των επιφανειακών σχηματισμών να εκτελούνται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με τις ηλεκτρικές έρευνες στις οποίες, όπως έχει αναφερθεί, η επαφή με το έδαφος είναι απαραίτητη. Επιπλέον, εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο πομπός και ο δέκτης μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα αεροσκάφος, ή να ρυμουλκούνται από αυτό, για την εκτέλεση εναέριων μετρήσεων, όπως στην περίπτωση έρευνας για αγωγίμα μεταλλευτικά κοιτάσματα όπου βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή.



Εικόνα 1.17. Βασική αρχή της ηλεκτρομαγνητικής έρευνας

Όλοι οι υπεδafικοί σχηματισμοί που χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ενώ ακόμα και κάποια κοιτάσματα μεταλλευμάτων τα οποία περιέχουν ορυκτά που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν τα πεδία αυτά αν υπάρχει επαρκής ποσότητα από ένα παρελκόμενο ορυκτό στη μάζα τους το οποίο να έχει υψηλή αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, οι ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται

σε συγκεκριμένα κοιτάσματα σουλφιδίων, είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης του αγώγιμου ορυκτού πυροτίτης στη μάζα του κοιτάσματος.

Ένα σημαντικό πρόβλημα κατά την εφαρμογή πολλών ηλεκτρομαγνητικών τεχνικών συνίσταται στην μέτρηση ενός μικρού σε ένταση δευτερογενούς πεδίου, όταν την ίδια στιγμή υπάρχει ένα μεγάλο κύριο πεδίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ακρίβειας στις μετρήσεις. Το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με μία ηλεκτρομαγνητική μέθοδο έρευνας η οποία ονομάζεται time-domain electromagnetic surveying (TDEM) και στην οποία χρησιμοποιείται ένα κύριο πεδίο το οποίο δεν είναι συνεχόμενο αλλά αποτελείται από μία ακολουθία παλμών, οι οποίες είναι διακοπτόμενες ενώ αυτό είναι αδρανές. Το δευτερογενές πεδίο δηλαδή, το οποίο παράγεται από το κύριο, μετράται μόνο κατά τα διαστήματα στα οποία το κύριο είναι απόν.

1.3.2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

1.3.2.1 Γενικά

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο σχετικά με το πόσο εύκολα ένα ηλεκτρικό ρεύμα ρέει δια μέσου ενός υλικού (Witten 2006) και η οποία μετράται σε Siemens ή miliSiemens (Ms). Ένα Siemen είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με $1/\text{Ohm}$. Παλαιότερες αναφορές χρησιμοποιούν την ισοδύναμη μονάδα "Mho", η οποία είναι, απλώς, η λέξη Ohm γραμμένη ανάποδα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, παρόλα αυτά τα δεδομένα αγωγιμότητας δεν είναι συνήθως συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα της ειδικής αντίστασης, τα οποία λαμβάνονται με τη μέθοδο των ηλεκτροδίων. Είναι χρήσιμο να σημειωθεί εδώ ότι, όταν οι αρχαιολόγοι αναφέρονται στην ειδική αντίσταση ή αντίσταση, κάνουν λόγο για δεδομένα που λαμβάνονται με τις διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων στο έδαφος, ενώ όταν μιλάμε γενικά για αγωγιμότητα αναφερόμαστε σχεδόν πάντοτε σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (Electromagnetic Induction, EMI) (Εικόνα 1.18.). Οι χάρτες που προκύπτουν από τις μετρήσεις αγωγιμότητας έχουν την τάση να μοιάζουν με τους αντίστοιχους χάρτες της ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές, αν και η ανάλυση των χαρτών αγωγιμότητας είναι συνήθως μικρότερη εξαιτίας της μικρότερης ευαισθησίας της μεθόδου σε σχέση με το βάθος. Παρά το γεγονός ότι ο κλίμακός μετρήσεων στη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι συνήθως πιο πυκνός από ότι στην ηλεκτρική αντίσταση, οι μετρήσεις αγωγιμότητας επηρεάζονται συνήθως από μεγαλύτερο όγκο εδάφους, θολώνοντας δυνητικά τα

όρια των ανωμαλιών. Όπως και στην περίπτωση της ειδικής αντίστασης, η αγωγιμότητα αποτελεί μία εξαιρετική μέθοδο για τον εντοπισμό ανωμαλιών οι οποίες βασίζονται στις αντιθέσεις της υπεδαφικής υγρασίας και του τύπου των υλικών. Τα μικρότερα κοιλώματα δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμα, αλλά μεγαλύτεροι σχηματισμοί κοιλοτήτων, χαντάκια, καθώς και θαμμένα κατάλοιπα χωματουργικών διεργασιών, μπορούν να εντοπιστούν πολύ αποτελεσματικά.

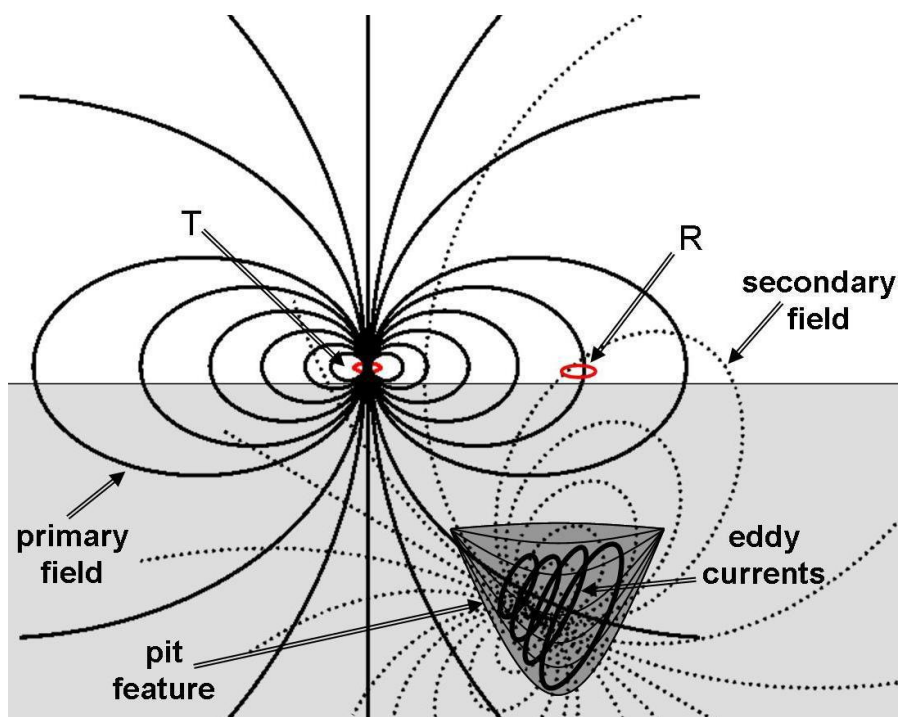


Εικόνα 1.18. Ευρέως χρησιμοποιούμενα όργανα ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. EM-31 (αριστερά) και EM-38 (δεξιά), (πηγή <http://geonicsrental.com/>, <http://www.cflhd.gov>)

1.3.2.2. Μεθοδολογία Μετρήσεων

Η μέθοδος μέτρησης της αγωγιμότητας EMI, είναι αρκετά πιο σύνθετη από την μέθοδο της ειδικής αντίστασης και για το λόγο αυτό θα αναφερθούν μόνο οι θεμελιώδεις αρχές της. Όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ένα πηνίο ή ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, δημιουργείται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (Witten 2006). Αν το ηλεκτρομαγνητικό αυτό πεδίο βρίσκεται αρκετά κοντά σε αντικείμενα που είναι κάπως αγωγίμα, θα προκαλέσει κάποια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος να ρεύσει μέσα σε αυτά. Όπως ακριβώς το ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στο πηνίο συντέλεσε στην δημιουργία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση μέσα στα σώματα θα δημιουργηθούν επίσης ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επαγωγή. Στις αρχαιολογικές έρευνες, τα δεδομένα αγωγιμότητας συλλέγονται συνήθως με τη χρήση δύο πηνίων, ενός πομπού και ενός δέκτη, μέσω μιας διάταξης η οποία χαρακτηρίζεται από πολλά ονόματα όπως Slingram, οριζόντιος βρόχος, κινούμενη συσκευή πομπού-δέκτη,

κινούμενη πηγή διπλού πηνίου και μετρητής εδαφικής αγωγιμότητας (Mussett and Khan 2000, Reynolds 1997). Ο πομπός παράγει, όπως έχει αναφερθεί, το κύριο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο εκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις αλλά, κυρίως, μέσα στο έδαφος. Αν το έδαφος είναι αγώγιμο ή περιέχει υλικά που είναι αγώγιμα, τότε ρεύμα θα ρεύσει μέσα σε αυτό εξαιτίας του κύριου πεδίου. Το ρεύμα αυτό, που ονομάζεται eddy current (επειδή σχηματίζεται όπως οι στρόβιλοι ή δίνες στην κοίτη ενός ποταμού), θα σχηματίσει με τη σειρά του ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (Witten 2006). Το κύριο και το δευτερογενές πεδίο μετρούνται από το πηνίο του δέκτη (Εικόνα 1.19).



Εικόνα 1.19. Μοντέλο Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής. Ο πομπός, T, δημιουργεί ένα κύριο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αναγκάζει ηλεκτρικά ρεύματα (eddy currents) να ρεύσουν μέσα σε αγώγιμα υλικά, όπως στην κοιλότητα της εικόνας και αυτά να δημιουργήσουν ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το κύριο και το δευτερογενές πεδίο μετρούνται από το πηνίο του δέκτη, R.

Η αγωγιμότητα προσεγγίζεται συγκρίνοντας το κύριο με το δευτερογενές πεδίο και μετρώντας τη διαφορά φάσης. Η φάση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις σχετικές χρονικές θέσεις δύο σημάτων. Αν δύο κύματα είναι σε φάση φτάνουν ταυτόχρονα στο δέκτη, ενώ αν δεν είναι σε φάση υπάρχει κάποια καθυστέρηση μεταξύ τους. Υπάρχει ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία του φαινομένου της επαγωγής και εν τέλει της μέτρησης του δευτερογενούς πεδίου από τα όργανα. Όσο μεγαλύτερη

είναι η εδαφική αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η καθυστέρηση του δευτερογενούς πεδίου (Mussett and Khan 2000, Reynolds 1997). Η καθυστέρηση αυτή μετράται αναλύοντας το λαμβανόμενο σήμα σε δύο μέρη: εντός φάσης και εκτός φάσης. Το εντός φάσης μέρος επεξεργάζεται ώστε να είναι σε φάση με τον πομπό (κύριο πεδίο), ενώ το δεύτερο ρυθμίζεται ώστε να έχει διαφορά φάσης 90° .

1.3.2.3. Διατάξεις

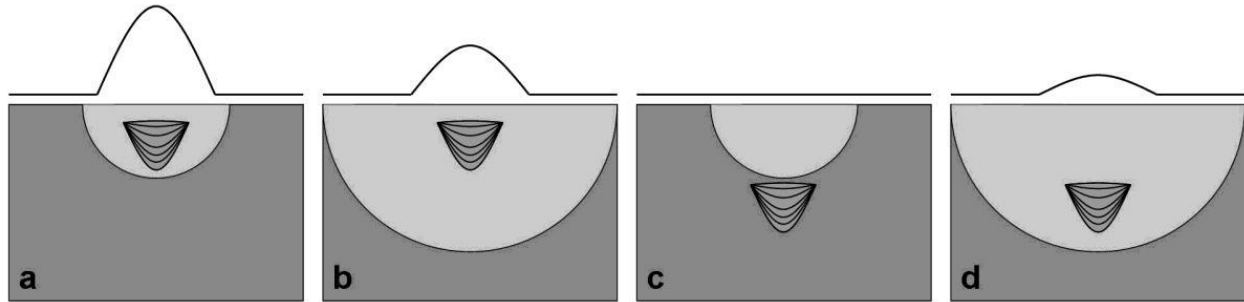
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των οργάνων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, ανάλογα με τις παραλλαγές των συχνοτήτων που χρησιμοποιούν, τον αριθμό των πηνίων και την απόσταση μεταξύ αυτών, καθώς και τον προσανατολισμό τους. Ανάλογα με το είδος των μετρήσεων για το οποίο προορίζονται χρησιμοποιούνται και οι ανάλογες διατάξεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα αναφερθούν οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται ευρέως στην αρχαιολογική έρευνα. Η πιο διαδεδομένη και πρακτική διάταξη είναι αυτή κατά την οποία το πηνίο του πομπού και το πηνίο του δέκτη τοποθετούνται στα αντίθετα άκρα ενός βραχίονα (Εικόνα 1.18). Επειδή ο πομπός και ο δέκτης πρέπει να βρίσκονται σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους για κάθε μέτρηση (McNeill 1996), η χρησιμοποίηση του βραχίονα διευκολύνει και επιταχύνει τη συλλογή δεδομένων κατά μήκος ενός προφίλ. Σύμφωνα με τον McNeill (1996), για κάθε δεδομένη απόσταση μεταξύ των πηνίων, αντιστοιχεί μία βέλτιστη συχνότητα. Συχνότητες μεγαλύτερες ή μικρότερες από τη βέλτιστη, παράγουν δευτερογενή πεδία, αν όμως η απόσταση μεταξύ των πηνίων είναι αρκετά μεγάλη ή μικρή, ο πομπός δεν θα μπορέσει να καταγράψει επαρκώς τα πεδία αυτά. Αντιθέτως, οι Won et al. (1996), υποστηρίζουν ότι η απόσταση των πηνίων και η συχνότητα μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα. Τα όργανα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου έχουν σχεδιαστεί με βάση αυτήν την αρχή και έχουν σταθερές αποστάσεις μεταξύ των πηνίων, χρησιμοποιώντας όμως μεταβλητές τιμές συχνοτήτων οι οποίες καθορίζονται κάθε φορά από το χρήστη. Η βασική ιδέα πίσω από αυτό είναι ότι, κάθε συχνότητα διεισδύει στο έδαφος σε διαφορετικό βάθος, άρα πολλές συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα για την ταυτόχρονη καταγραφή δεδομένων από διαφορετικά βάθη. Δεν είναι ξεκάθαρο ακόμη αν η διάταξη πολυσυχνοτικών οργάνων με σταθερές αποστάσεις πηνίων είναι επαρκής για την αρχαιολογική έρευνα. Δοκιμές πεδίου που διεξήχθησαν, ωστόσο, από τον Ernenwein (2002, 2006, 2008) έδειξαν ότι όταν η συχνότητα και η απόσταση των πηνίων βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία, όπως πρότεινε ο McNeill (1996), τότε τα

αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα, απ' ό,τι αν χρησιμοποιούνταν πολυσυχνοτικές διατάξεις, από άποψη θορύβου και ανάλυσης.

Μια άλλη διάταξη που χρησιμοποιείται συχνά στην αρχαιολογία, κάνει χρήση ενός πομπού διπόλου και ενός δεύτερου δέκτη διπόλου που συνδέονται μέσω ενός καλωδίου και μετακινούνται κατά μήκος του εδάφους. Η διάταξη αυτή είναι η βάση του OhmMapper, το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρεία Geometrics Inc. (CA). Αν και εμφανισιακά διαφέρει από τα περισσότερα όργανα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, το OhmMapper λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, με τη διαφορά ότι αφού μετρήσει την αγωγιμότητα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, την μετατρέπει σε ειδική αντίσταση και για το λόγο αυτόν διατίθεται σαν όργανο μέτρησης της αντίστασης.

1.3.2.4. Βάθος και Ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετρούνται με τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI), εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων όπως τη συχνότητα, το ύψος του αισθητήρα πάνω από το έδαφος και τον προσανατολισμό των πηνίων. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλότερης συχνότητας έχουν μεγαλύτερα μήκη κύματος και για αυτόν το λόγο μπορούν να διεισδύσουν βαθύτερα μέσα στο έδαφος (Witten 2006). Γενικώς, η εδαφική ευαισθησία είναι μεγαλύτερη για χαμηλότερες συχνότητες. Το μειονέκτημα ωστόσο, των χαμηλών συχνοτήτων είναι ότι λόγω του μεγάλου βάθους διείσδυσης, μεγαλύτερος όγκος εδάφους επηρεάζει τις μετρήσεις, με αποτέλεσμα να υπάρχει περίπτωση να μην ανιχνευτούν μικρά αντικείμενα, όπως κάποια αρχαιολογικά κομμάτια. Για αυτό, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μία υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα διεισδύσει σε μικρότερο βάθος, ώστε οι αρχαιολογικοί σχηματισμοί να αποτελέσουν το μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου του εδάφους που συμβάλλει στις μετρήσεις. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν καλύτερη χωρική ανάλυση και επιτρέπουν τον εντοπισμό μικρότερων στόχων, ενώ αντίθετα, οι χαμηλότερες συχνότητες είναι πιο αποτελεσματικές στον εντοπισμό μεγάλων ή μεγάλης αντίθεσης στόχων, οι οποίοι λόγω του μεγάλου βάθους είναι δύσκολο να ανιχνευτούν αλλιώς (Witten 2006) (Εικόνα 1.20). Αν και αντικείμενα σε μικρό βάθος είναι δυνατόν να εντοπιστούν επαρκώς από σχετικά χαμηλές συχνότητες (Εικόνα 1.20 b), οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες για την ανίχνευση τυπικών αρχαιολογικών δομών.



Εικόνα 1.20. Επίδραση της συχνότητας της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI) και του βάθους του στόχου. Οι γραμμικές απεικονίσεις αναπαριστούν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα γραφήματα από κάτω αντιπροσωπεύουν τις διατομές ενός αντικειμένου που είναι θαμμένο σε διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια δείχνουν τα όρια της διείσδυσης σε βάθος, ανάλογα με την εκάστοτε συχνότητα. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι η παρουσία του στόχου σε μικρό βάθος και η μέτρηση του με σχετικά υψηλή συχνότητα (a). Αν ο ίδιος στόχος μετρηθεί με χαμηλότερη συχνότητα, τότε, μεγαλύτερο κομμάτι του εδάφους επηρεάζει τις μετρήσεις και η ανωμαλία που καταγράφεται είναι μικρότερου μεγέθους (b). Όταν όμως ο στόχος είναι βαθύτεροι σχηματισμοί, μία υψηλότερη συχνότητα μπορεί να μην διεισδύσει αρκετά βαθιά στο έδαφος και να μην εντοπιστεί αυτός (c). Η καλύτερη προσέγγιση όταν είναι γνωστό το σχετικά μεγάλο βάθος του στόχου, είναι η εξαρχής χρησιμοποίηση χαμηλότερων συχνοτήτων (d).

Το ύψος στο οποίο βρίσκεται το όργανο μέτρησης πάνω από το έδαφος, είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ευαισθησία του βάθους. Όσο η απόσταση μεταξύ του πηνίου του δέκτη και των αντικειμένων αυξάνει, η απόκριση του αντικειμένου μικραίνει. Πέρα από τη μέγιστη διείσδυση σε βάθος, το σήμα που επιστρέφει από ένα αντικείμενο είναι πολύ μικρό για να ανιχνευθεί (McNeil 1986). Η ευαισθησία σχετικά με το βάθος μπορεί, επομένως, να μεγαλώσει, μεταφέροντας το όργανο όσο πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται (Εικόνα 1.18, δεξιά). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται όργανα υψηλής συχνότητας, όπως το EM-38, λόγω της περιορισμένης διείσδυσης σε βάθος.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διείσδυση σε βάθος, είναι ο προσανατολισμός των πηνίων. Οι δύο πιο διαδεδομένοι προσανατολισμοί είναι, τα πηνία να βρίσκονται είτε οριζόντια είτε κάθετα σχετικά με την επιφάνεια του εδάφους (Reynolds 1997). Αν τα δύο πηνία είναι τοποθετημένα οριζόντια ως προς την επιφάνεια του εδάφους (φανταστείτε δύο κουλούρια Θεσσαλονίκης πάνω στο έδαφος), ο προσανατολισμός τους ονομάζεται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτήν τη θέση, το οριζόντιο πηνίο του πομπού παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, οι γραμμές ροής του οποίου εκπέμπονται κάθετα και για αυτόν το λόγο ονομάζεται και κάθετο μαγνητικό δίπολο. Στη θέση αυτή, η ενέργεια που διεισδύει στο έδαφος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της (Witten 2006) (Εικόνα 1.19). Αυτός είναι και ο πιο διαδεδομένος προσανατολισμός για

τις περισσότερες αρχαιολογικές έρευνες. Από την άλλη, όταν τα πηνία είναι τοποθετημένα κάθετα ως προς την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός ονομάζεται κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προκύπτει από τον πομπό είναι οριζόντια και καλείται οριζόντιος μαγνητικός προσανατολισμός διπόλου. Στη θέση αυτή, ένα πολύ μικρότερο μέρος του επαγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος με αποτέλεσμα, η διείσδυση σε βάθος να ελλοτώνεται (Witten 2006).

1.3.2.5. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η έρευνα αγωγιμότητας χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα. Στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, συγκριτικά με την ηλεκτρική αντίσταση, η συλλογή δεδομένων μπορεί να γίνει πιο γρήγορα επειδή δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή ηλεκτροδίων στο έδαφος ή η επανατοποθέτησή τους σε άλλα σημεία. Επίσης, τα δεδομένα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου μπορούν να συλλεχθούν και σε περιοχές με πολύ ξηρό ή σκληρό έδαφος, σε περιοχές δηλαδή όπου είτε δεν είναι δυνατή η εισαγωγή των ηλεκτροδίων στο έδαφος, είτε το ρεύμα δεν μπορεί να διαρρεύσει λόγω των πολύ χαμηλών τιμών υπεδαφικής υγρασίας. Οι πολύ ξηρές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητα ένδειξη αντίστοιχων ξηρών υπεδαφικών συνθηκών. Συχνά, επαρκείς τιμές εδαφικής υγρασίας για τις μετρήσεις, βρίσκονται λίγα εκατοστά μόνο μακριά από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μπορούν επίσης να μεταφερθούν πιο εύκολα λόγω του μικρότερου μεγέθους τους.

Ένα μειονέκτημα των ερευνών αγωγιμότητας είναι η ευαισθησία του οργάνου EM-38 σε ηλεκτρικές παρεμβολές (φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια κτλ.) και μεταλλικά θραύσματα (Bevan 1998, Clark 1996, Clay 2006). Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ωστόσο, η ευαισθησία αυτή του EM-38 σε μεταλλικά στοιχεία είναι το ζητούμενο, όπως σε πεδία μάχης ή άλλες περιοχές όπου οι στόχοι που αναζητούνται είναι μεταλλικής προέλευσης (Bevan 1998, Heckman 2005). Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζουν τα όργανα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι το φαινόμενο των θερμικών μεταβολών (thermal drift), το οποίο κάνει πιο χρονοβόρα την επεξεργασία των δεδομένων σε σχέση με την ειδική αντίσταση ή την μαγνητική μέθοδο (Clay 2006).

1.3.3. Μαγνητική Επιδεκτικότητα

1.3.3.1. Γενικά

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (Magnetic Susceptibility, MS) είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να μαγνητιστεί υπό την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου (Clark 1996, Dalan 2006). Μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά ανά μονάδα όγκου (κ), ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ) (Dalan 2006), όταν όμως μετράται με το EM-38 ή παρόμοια όργανα, οι μετρήσεις δίνονται σαν αναλογία του κύριου προς το δευτερογενές πεδίο σε μέρη ανά χιλιάδα (ppt). Όλα τα άτομα έχουν τα δικά τους μαγνητικά πεδία, λόγω των ηλεκτρονίων της εξωτερικής τους στιβάδας, έτσι όλες οι ουσίες αντιδρούν (παρουσιάζουν ευαισθησία) σε κάποιο βαθμό, όταν βρεθούν κοντά σε μαγνητικά πεδία (Clark 1996). Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει την μετατροπή αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και υδροξειδίων σε πιο ισχυρές μαγνητικές μορφές, με αποτέλεσμα το επιφανειακό χώμα να είναι πολύ περισσότερο μαγνητικό από τα υπεδαφικά στρώματα. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα και για αυτό τα επιφανειακά στρώματα σε αρχαιολογικές τοποθεσίες είναι συνήθως περισσότερο μαγνητικά από αυτά σε περιβάλλουσες μη-πολιτιστικές περιοχές. Οι άνθρωποι ενισχύουν τη διαδικασία της χωματοποίησης, επομένως και τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, αυξάνοντας την οργανική ύλη, μεταβάλλοντας το πορώδες των εδαφών και ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του εδάφους μέσω θέρμανσης (πχ πυρκαγιές). Επίσης, μπορεί να ενσωματώνουν στο έδαφος υλικά υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας ή υλικά που είναι αποτέλεσμα καύσης. Η διαδικασία της θέρμανσης των εδαφών, είτε είναι φυσική είτε ανθρωπογενής, ενισχύει την μαγνητική επιδεκτικότητα (Dalan 2006). Οι κύριοι τύποι δομών που μπορούν να εντοπιστούν, επομένως, με μία έρευνα μαγνητικής επιδεκτικότητας, είναι αυτές που είναι προϊόν καύσης και αυτές που είναι αποτέλεσμα της διατάραξης του εδάφους. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση των εδαφών, αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας σε αρχαιολογικές τοποθεσίες, αυξάνοντας έτσι και την ικανότητα εντοπισμού ανθρωπογενών δομών (Clark 1996, Dalan 2006).

1.3.3.2. Μεθοδολογία Μετρήσεων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας, όλοι όμως στηρίζονται στη θεμελιώδη αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να προκληθεί στο έδαφος,

δημιουργώντας ένα κύριο πεδίο σε κοντινή απόσταση. Το δευτερογενές πεδίο, όχι μόνο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά ανταποκρίνεται και στις μαγνητικές ιδιότητες. Υπενθυμίζεται επίσης ότι, όταν το δευτερογενές πεδίο αναλύεται σε εντός φάσης (in-phase) και εκτός φάσης (out-of-phase), το μέγεθος του εκτός φάσης συστατικού είναι ανάλογο με την αγωγιμότητα του εδάφους. Εφόσον δεν υπάρχουν εξαιρετικά αγωγιμοί στόχοι στο έδαφος (όπως μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα), το εντός φάσης συστατικό θεωρείται μέτρο της μαγνητικής επιδεκτικότητας (McNeill 1986). Μερικά όργανα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI), μπορούν να λάβουν ταυτόχρονα μετρήσεις πραγματικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας, ενώ άλλα είναι σχεδιασμένα να μετράνε μόνο μαγνητική επιδεκτικότητα, εξακολουθώντας όμως να κάνουν χρήση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

1.3.3.3. Διατάξεις

Τα δεδομένα της μαγνητικής επιδεκτικότητας συλλέγονται με ποικίλους τρόπους όπως, σχετικά υψηλή πυκνότητα δεδομένων οριζόντιας κάλυψης δυνητικά μεγάλων επιφανειακών περιοχών, ανάλυση δειγμάτων εδάφους που λαμβάνονται ανά ποικίλα διαστήματα και σημεία της επιφάνειας ή κάτω από ένα προφίλ εκσκαφής, καθώς και μετρήσεις που λαμβάνονται μέσα από μία γεώτρηση. Όσον αφορά τις επιφανειακές έρευνες, υπάρχουν δύο κοινές διατάξεις αισθητήρων: μονού και διπλού πηνίου. Τα όργανα μονού πηνίου (καλούνται επίσης και μονού ή συμπίπτοντα βρόχου), προκαλούν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο έδαφος και μετράνε τη συχνότητα του δευτερογενούς πεδίου. Η αλλαγή συχνότητας είναι ανάλογη προς την μέση τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους κοντά στο πηνίο (Clark 1996). Απαραίτητη προϋπόθεση της μεθόδου αυτής είναι ο αισθητήρας να βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Όταν χρησιμοποιούνται δύο πηνία (διάταξη Slingram, ένας πομπός και ένας δέκτης, Εικόνα 1.18), οι μετρήσεις γίνονται μέσω της απόκρισης in-phase, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Τόσο οι μονού, όσο και οι διπλού πηνίου διατάξεις, χρησιμοποιούνται επίσης σε αισθητήρες που σχεδιάζονται για εργαστηριακά πειράματα. Τέλος, μία άλλη διάταξη η οποία λαμβάνει διαρκώς αυξανόμενη αναγνωρισιμότητα στις εφαρμογές της Αρχαιολογίας είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα γεωτρήσεων (down-hole MS) (Dalan 2001, 2006)). Όργανα μονού ή διπλού πηνίου εισάγονται στη στήλη γεώτρησης και μετράνε τη μαγνητική επιδεκτικότητα σε αυξανόμενα βάθη. Η μέθοδος αυτή αναμένεται να αποκτήσει περεταίρω αναγνωρισιμότητα στο μέλλον, καθώς έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό θαμμένων εδαφικών

οριζόντων, καθώς και στρωμάτων πολιτισμικού ενδιαφέροντος και παρόμοιων χαρακτηριστικών. Είναι άξιο αναφοράς το γεγονός ότι, η μέθοδος της επιφανειακής μαγνητικής επιδεκτικότητας έχει μικρό βάθος διασκόπησης, ενώ με την αντίστοιχη μέθοδο των γεωτρήσεων το βάθος αυτό αυξάνει σημαντικά.

1.3.3.4. Βάθος και Ανάλυση

Από τις γεωφυσικές μεθόδους που περιγράφονται εδώ, η μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους, είναι αυτή που έχει και τους περισσότερους περιορισμούς ως προς την ευαισθησία σε βάθος, εξαιτίας της αδυναμίας των μαγνητικών πεδίων που μετρώνται. Η απώλεια αυτή αυξάνει εκθετικά καθώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εισάγεται στο έδαφος, αλλά και καθώς ταξιδεύει από το έδαφος στον αισθητήρα μέτρησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι, η εκθετική αυτή μείωση του σήματος είναι της τάξης του 10^6 , με αποτέλεσμα την πολύ μικρή διείσδυση σε βάθος (Clark 1996).

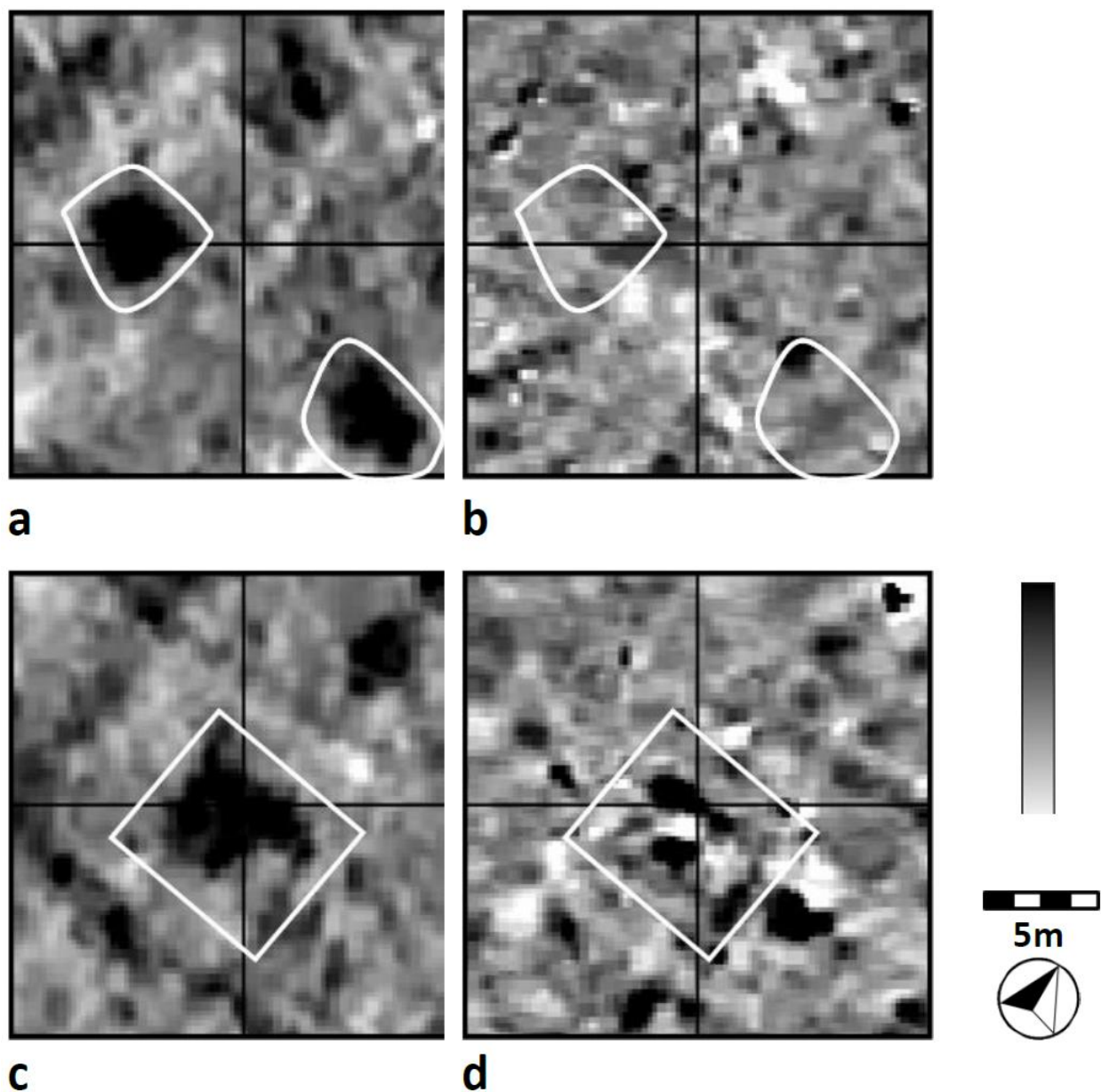
Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ευαισθησία διασκόπησης σε βάθος μεταξύ των οργάνων μονού και διπλού πηνίου. Τα όργανα μονού πηνίου πρέπει να είναι σε άμεση επαφή με το έδαφος και το βάθος διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του δημιουργούμενου βρόχου (Dalan 2006). Πολλά από τα όργανα αυτά δεν ξεπερνάνε το βάθος των 10 m από την επιφάνεια. Οι αισθητήρες διπλού πηνίου, όπως τα όργανα Geonics EM-38, διεισδύουν σε βάθος ενός μέτρου ή περισσότερο (ωστόσο, η ευαισθησία σε βάθος για την αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη με τον αισθητήρα αυτόν). Για στόχους σε βάθος μεγαλύτερο των 70 m, η μόνη επιλογή είναι η εγκατάσταση αισθητήρα μέσα σε μία γεώτρηση, ή η λήψη δειγμάτων εδάφους για εργαστηριακή ανάλυση.

Η πυκνότητα του κανάβου μετρήσεων για τη λήψη δεδομένων μαγνητικής επιδεκτικότητας εξαρτάται από το εκάστοτε όργανο. Οι αισθητήρες διπλού πηνίου χαρακτηρίζονται από υψηλή ταχύτητα μετρήσεων και η πυκνότητα αυτών είναι περίπου ίδια με αυτή των μετρήσεων αγωγιμότητας, όπως για παράδειγμα 0,25 m x 0,5 m (4 μετρήσεις ανά μέτρο και 0,5 m απόσταση μεταξύ των περάλληλων προφίλ). Αντίθετα, οι αισθητήρες μονού πηνίου απαιτούν σημαντικά περισσότερο χρόνο, επειδή για κάθε μέτρηση είναι απαραίτητη η άμεση επαφή με το έδαφος και γιατί οι αισθητήρες αυτοί πρέπει συνήθως να μηδενίζονται πριν από κάθε μέτρηση. Η πυκνότητα, δηλαδή, των μετρήσεων είναι της τάξης της μίας μέτρησης ανά τετραγωνικό μέτρο ή και λιγότερο.

Το γεγονός αυτό θέτει έναν εμφανή περιορισμό στην χωρική ανάλυση. Με τα όργανα διπλού πηνίου η χωρική ανάλυση είναι παρόμοια με την αγωγιμότητα

1.3.3.5. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες, όσο και στην Ευρώπη, οι έρευνες μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στον τομέα της αρχαιολογίας. Ένας πιθανός λόγος μπορεί να είναι τόσο η πολυπλοκότητα των οργάνων της μεθόδου και η έλλειψη βελτιστοποιημένων μορφών αυτών, όσο και το μικρό βάθος διασκόπησης. Το όργανο EM-38 είναι ευρέως διαδεδομένο και διαθέσιμο, αλλά είναι επίσης και επιρρεπές στις ταλαντεύσεις, ενώ η επεξεργασία των δεδομένων είναι συχνά δύσκολη και χρονοβόρα. Ωστόσο, υπάρχουν και πολλά πλεονεκτήματα στην μέθοδο αυτή, τα οποία σιγά σιγά γνωστοποιούνται. Το γεγονός ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα, που μετράται με την μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, είναι μία ενεργή μέθοδος, σημαίνει ότι δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση και την ένταση του μαγνητικού πεδίου της γης (αντίθετα με την μαγνητομετρία) και για αυτό μπορεί να ανιχνεύσει χαρακτηριστικά ανεξάρτητα από τη γεωμετρία. Κάποιες έρευνες έχουν δείξει ότι η μέθοδος της μαγνητικής επιδεκτικότητας μπορεί να εντοπίσει υπεδαφικά χαρακτηριστικά πολιτιστικού ενδιαφέροντος, τα οποία δεν μπορούν να εντοπιστούν με την μαγνητομετρία (Kvamme et al 2006) (Εικόνα 1.21). Το Geonics EM-38 είναι πιθανώς το καλύτερο όργανο για ταχεία κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και ικανοποιητική διασκόπηση σε βάθος, όσον αφορά τυπικές αρχαιολογικές εφαρμογές.



Εικόνα 1.21. Σύγκριση δεδομένων μαγνητικής επιδεκτικότητας και μαγνητομετρίας σε περιοχή της νοτιοδυτικής Αμερικής όπου ζούσαν παλαιότερα ινδιάνοι. a) τα δεδομένα της μαγνητικής επιδεκτικότητας απεικονίζουν ξεκάθαρα δύο εδαφικούς σχηματισμούς, b) είναι χαρακτηριστική η απουσία απεικόνισης των ίδιων σχηματισμών στην ίδια περιοχή, με τα δεδομένα της μαγνητομετρίας, c) τα δεδομένα της μαγνητικής επιδεκτικότητας απεικονίζουν μία υπεδαφική δομή, d) τα δεδομένα της μαγνητομετρίας στην ίδια περιοχή, παρουσιάζουν ανωμαλίες οι οποίες αναπαριστούν πιθανώς τις άκρες της δομής αυτής και ίσως κάποιον κεντρικό σχηματισμό.

1.3.4. Περιορισμοί της Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος είναι μία ευέλικτη και αποτελεσματική τεχνική υπεδαφικών μετρήσεων, η οποία όμως υποφέρει από ορισμένα μειονεκτήματα. Επιφανειακά στρώματα του

εδάφους με υψηλές τιμές αγωγιμότητας, όπως άργιλοι με κάποια περιεκτικότητα σε νερό ή πετρώματα που φέρουν γραφίτη, καθώς και υπεδαφικά νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε άλας, εμποδίζουν την επίδραση βαθύτερων αγώγιμων σχηματισμών. Η διείσδυση σε βάθος υστερεί σε σχέση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους και περιορίζεται από το συχνοτικό εύρος που παράγεται και εντοπίζεται. Χαρακτηριστικά, αν δεν χρησιμοποιούνται φυσικά πεδία, τότε η μέγιστη διείσδυση σε εδαφικές έρευνες φτάνει τα 500 m, ενώ στην από αέρος εφαρμογή της μεθόδου μόλις τα 50 m. Επιπροσθέτως, η ποσοτική ερμηνεία των ηλεκτρομαγνητικών ανωμαλιών είναι πολύπλοκη και αυξάνει εκθετικά όσο μεγαλώνει το βάθος διασκόπησης.

1.4. Η Μέθοδος του Γεωραντάρ

1.4.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι μία σχετικά νέα τεχνική η οποία αναπτύχθηκε εμπορικά τη δεκαετία του 1970. Ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους και βασίζεται στη διάδοση και ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 8MHz έως 4GHz σε ασυνέχειες μέσων, όπου μεταβάλλονται η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα. Για το λόγο αυτόν, η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με σχηματισμούς υψηλών σχετικά ειδικών αντιστάσεων.

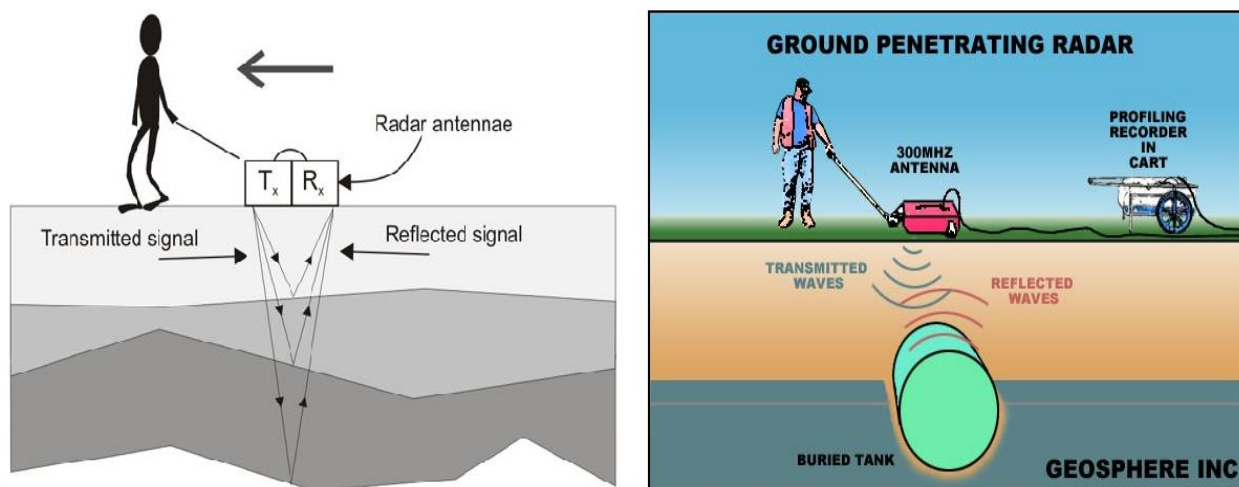
Η διηλεκτρική σταθερά είναι η δυνατότητα ενός υλικού να αποθηκεύει φορτία όταν εφαρμόζεται σε αυτό ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στον Πίνακα 1.6 παρατίθενται οι ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, v , καθώς και οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς, K , και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σ , για διάφορους τύπους υλικών.

Πίνακας 1.6. Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, v , τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς, K , και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σ , για διάφορους τύπους υλικών

Υλικό	K	σ (mS/m)	v (m/ns)
Αέρας	1	0	0.30
Απεσταγμένο νερό	80	0.01	0.033
Γλυκό νερό	80	0.5	0.033
Θαλασσινό νερό	80	3×10^3	0.01
Ξηρά άμμος	3-5	0.01	0.15
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0.1-1.0	0.06
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5-2	0.12
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0.09
Ιλύς	5-30	1-100	0.07
Άργιλος	5-40	2-1000	0.06
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13
Ξηρό άλας	5-6	0.01-1	0.13
Πάγος	3-4	0.01	0.16

Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι μία μη καταστρεπτική τεχνική και μπορεί επομένως να εφαρμοστεί σε αστικά και λοιπά ευαίσθητα περιβάλλοντα. Έχει πολλές γεωλογικές εφαρμογές, όπως απεικόνιση σε υψηλή ανάλυση ρηχών εδαφικών δομών και πετρωμάτων, αποτύπωση στρωματογραφίας, εντοπισμό θαμμένων καναλιών και χαρτογράφηση ταμιευτήρων νερού, καθώς και εκτίμηση του βάθους των υδροφόρων οριζόντων. Εκτός όμως από τις γεωλογικές εφαρμογές βρίσκει χρήση και σε άλλους τομείς, όπως στον τομέα της Αρχαιολογίας, όπου χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θαμμένης τοιχοποιίας ή λοιπών κοιλοτήτων, καθώς και για εγκληματολογικές έρευνες σε περιπτώσεις αναζήτησης σημείων ταφής μέσω της ανίχνευσης πρόσφατα διαταραγμένου εδάφους.

Όσον αφορά τη βασική αρχή της μεθόδου, ένας πομπός εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσα στο έδαφος. Όταν το κύμα αυτό συναντήσει μία μεταβολή στις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του εδάφους, είτε λόγω κάποιου βυθισμένου αντικειμένου είτε λόγω εναλλαγής δύο μέσων με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, μέρος αυτού ανακλάται πίσω προς το δέκτη, όπου καταγράφεται το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου και ο χρόνος άφιξης (Εικόνα 1.22).



Εικόνα 1.22. Βασική αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ. Ανάκλαση του σήματος λόγω α) εναλλαγής στρωμάτων (αριστερά), β) θαμμένου αντικειμένου (δεξιά)

Καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν μέσα στο έδαφος, το πλάτος τους μειώνεται λόγω ποικίλων αιτιών, όπως του φαινομένου της σφαιρικής εκτροπής, όπου η ενέργεια διαδίδεται ακτινικά μέσω μίας συνεχώς αυξανόμενης υποθετικής σφαίρας. Η πιο χαρακτηριστική αιτία που συμβαίνουν οι ανακλάσεις είναι οι μεταβολές στην ποσότητα του

νερού. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ιζηματογένεση, η λιθολογία, το μέγεθος των κόκκων, η πυκνότητα και κατ'έκταση το πορώδες, καθώς και ο κορεσμός. Οι αντιθέσεις στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως στην περίπτωση του αργίλου ή των μεταλλικών αντικειμένων, προκαλούν επίσης ανακλάσεις.

Εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται, η μέθοδος του γεωραντάρ παρέχει εξαιρετική ανάλυση των υπεδαφικών χαρακτηριστικών. Ωστόσο, το βάθος έρευνας σε ιζήματα μπορεί να είναι αρκετά περιορισμένο, με μέγιστο βάθος τα 15-20 m σε περίπτωση υλικών πολύ χαμηλής αγωγιμότητας και όχι παγωμένων, ενώ σε περίπτωση αγωγίμων υλικών δεν ξεπερνάει το ένα μέτρο.

Ακολουθώντας διάφορες παραμέτρους διαδικασίας μέτρησης και επεξεργασίας εξασφαλίζεται η δυνατότητα να εμφανιστεί ανακλώμενο σήμα επιστροφής λόγω της παρουσίας κάποιου αντικειμένου. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά αυτού του σήματος εξαρτώνται από τη γεωμετρία και την αντίθεση στις ιδιότητες του αντικειμένου με τον περιβάλλοντα χώρο.

1.4.2. Τα Βασικά Στοιχεία ενός Συστήματος Γεωραντάρ

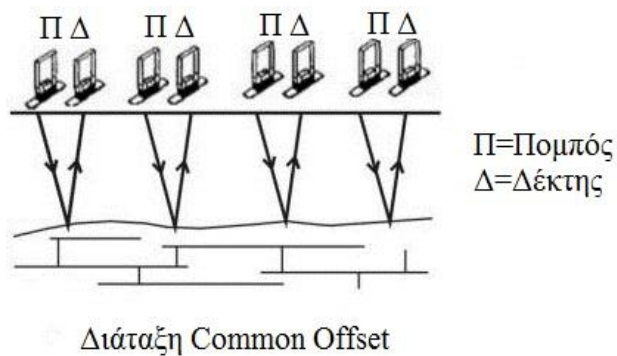
Τα μέρη και οι λειτουργίες που περιλαμβάνονται σε μια διαδικασία μέτρησης με γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα:

- Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (πηγή) που μπορεί να παράγει χρονικά κυμαινόμενες τάσεις (εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο) στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων με ελεγχόμενο και καταγράψιμο τρόπο.
- Μία κεραία-πομπός που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ραδιοκύμα), το οποίο μπορεί να διεισδύσει μέσω του υπεδάφους στο στόχο. Η κεραία-πομπός, μετασχηματίζει τα σήματα ηλεκτρικής τάσης σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Ένα σύστημα ανίχνευσης (δέκτης), που αποτελείται συνήθως από μια κεραία και ηλεκτρονικά στοιχεία κυκλώματος, που μπορούν να ανιχνεύσουν τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να τα μετασχηματίσουν σε μια ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί.

1.4.3. Διαδικασία Μετρήσεων

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις:

- **Η διάταξη common-offset.** Είναι η τυπική διάταξη λειτουργίας ενός συστήματος γεωραντάρ, όπου ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους και μετακινούνται κατά μήκος μιας γραμμής διασκόπησης, συλλέγοντας δεδομένα συνεχώς (Εικόνα 1.23 α). Συνήθως, ο πομπός και ο δέκτης είναι τοποθετημένοι μέσα σε θωρακισμένο κουτί για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω και αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων (Εικόνα 1.23 β).



α



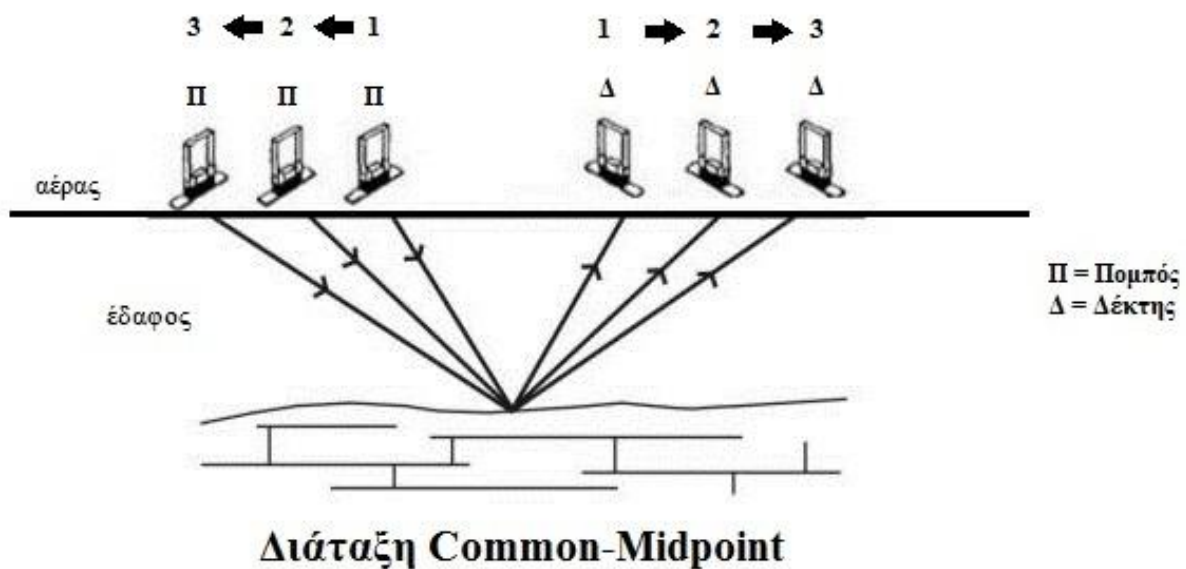
β

Εικόνα 1.23. Διάταξη Common-offset (α), Θωρακισμένο κουτί που περικλείει την κεραία εκπομπής σήματος (β)

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν σε μία common-offset διάταξη είναι :

- **Η συχνότητα λειτουργίας.** Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας των κεραιών του συστήματος γεωραντάρ που χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση σε βάθος με σαφή όμως μείωση στην ανάλυση που επιτυγχάνεται, δηλαδή στη διακριτική ικανότητα ανίχνευσης μεταξύ δύο σημείων του υπεδάφους.
- **Το χρονικό παράθυρο (time-window, TW).** Τα χρονικά όρια καταγραφής ενός σήματος ορίζουν το χρονικό παράθυρο (TW) που εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης και την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης.
- **Η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων.** Σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist, η χρονική διαφορά Δt μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval) δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της περιόδου που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη συχνότητα του μετρούμενου σήματος.

- **Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων.** Η επιλογή του διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (station spacing), συνδέεται κυρίως με την κεντρική συχνότητα των κεραιών.
- **Η θέση των γραμμών διασκόπησης και η πυκνότητά τους.** Οι γραμμές διασκόπησης καθορίζονται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατόν κάθετα στην μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται, ώστε να αυξηθούν οι πιθανότητες εντοπισμού τους και να ελαχιστοποιηθεί ο απαιτούμενος αριθμός των γραμμών που εκτελούνται οι μετρήσεις.
- **Η μέθοδος του κοινού μεσαίου σημείου (Common-Midpoint, CMP).** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος, μεταβάλλοντας την απόσταση των κεραιών κατά μία καθορισμένη απόσταση κάθε φορά, κρατώντας το κέντρο της διάταξης σταθερό και μετρώντας τις αντίστοιχες μεταβολές του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης (Εικόνα 1.24).



Εικόνα 1.24. Διάταξη κοινού μεσαίου σημείου (Common-Midpoint)

1.4.4. Διατάξεις

Τα όργανα της μεθόδου του γεωραντάρ μπορούν να διαμορφωθούν με ποικίλους τρόπους (Εικόνα 1.25). Η διαμόρφωση αυτή εξαρτάται από τον τύπο και τη συχνότητα της κεραιάς που χρησιμοποιείται, το μέγεθος και το βάρος του οργάνου και εάν αυτό είναι τροχοφόρο ή όχι. Σε

παλαιότερες διατάξεις της μεθόδου, ο κεντρικός υπολογιστής και η πηγή ισχύος (συνήθως μπαταρία 12 V) βρίσκονταν τοποθετημένα σχεδόν πάντα στο ίδιο σημείο. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, όλο και περισσότερα συστήματα κατασκευάζονται έτσι ώστε να μπορούν να μετακινηθούν μαζί με την κεραία. Μερικά από τα νεότερα αυτά συστήματα, είναι αρκετά μικρά ώστε να μεταφέρονται από το ίδιο άτομο που μετακινεί και την κεραία. Αντίστοιχα, οι κεραίες μπορούν να απαντηθούν και αυτές σε πληθώρα διατάξεων. Η εκάστοτε κεραία ενός επίγειου ραντάρ συνίσταται ουσιαστικά από δύο κεραίες, μία κεραία-πομπό και μία κεραία-δέκτη. Μερικές φορές, οι δύο αυτές κεραίες είναι τοποθετημένες πολύ κοντά μεταξύ τους μέσα σε ένα κουτί και δεν μπορεί κάποιος να τις δει ή να τις διακρίνει. Αντίθετα, άλλες κεραίες είναι φτιαγμένες έτσι ώστε ο πομπός και ο δέκτης να είναι χωριστά, σε περιπτώσεις όπου ο διαχωρισμός αυτός είναι επιθυμητός λόγω της ανεξάρτητης κίνησής τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κατασκευή που εσωκλείει τις κεραίες περιλαμβάνει και έναν τροχό ή τροχούς, ο οποίος καταγράφει την απόσταση που διανύθηκε και ελέγχει το ποσοστό καταγραφής. Γενικά, προτιμάται η παρουσία τροχών, ειδικά και σε περιπτώσεις όπου η συνεχόμενη μετακίνηση της κεραίας δυσχεραίνεται λόγω εμποδίων στην επιφάνεια του εδάφους. Επιπροσθέτως, ο τροχός βοηθάει την κεραία να μετακινείται με σταθερό σχετικά ρυθμό και να διευκολύνει την αποτελεσματικότερη λήψη δεδομένων.



Εικόνα 1.25. Διάφορες διατάξεις της μεθόδου του γεωραντάρ

1.4.5. Βάθος και Ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση του γεωραντάρ εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Η ταχύτητα και η πυκνότητα δειγματοληψίας εξαρτώνται από τις ρυθμίσεις του οργάνου και την μέθοδο έρευνας, ενώ τόσο η ευαισθησία σε βάθος όσο και η χωρική ανάλυση εξαρτώνται από τις συνθήκες του εδάφους (υγρασία, τύπος ιζημάτων) και τη συχνότητα της κεραίας.

Η ευαισθησία σε βάθος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αγωγιμότητα του εδάφους. Το μεγαλύτερο ποσοστό του εδάφους είναι έστω και λίγο αγωγίμο και έτσι μέρος της ενέργειας που διοχετεύεται μετριάζεται ή μετατρέπεται σε ηλεκτρικά ρεύματα και διασκορπίζεται πριν φθάσει στο δέκτη (Conyers 2004). Καθώς τα ραδιοκύματα κινούνται βαθύτερα μέσα στο έδαφος, όλο και λιγότερη ενέργεια μπορεί να υποστεί ανάκλαση με αποτέλεσμα να υπάρχει μία απώλεια σήματος αναλογικά με το βάθος. Για να αντιμετωπιστεί η απώλεια αυτή, το σήμα που

λαμβάνεται, ενισχύεται και πολλαπλασιάζεται έτσι ώστε να είναι δυνατή η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Conyers 2004).

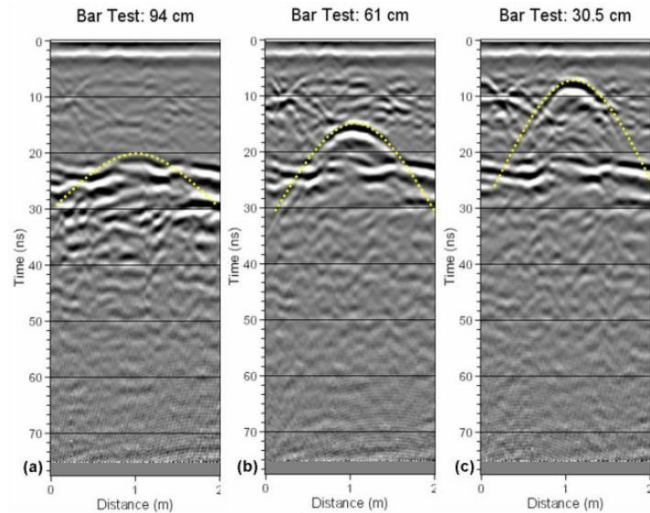
Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απώλειας είναι η υγρασία. Η διάδοση του σήματος επιδεινώνεται από την παρουσία ηλεκτρολυτών και αργλικών ορυκτών, τα οποία συχνά κατακρατούν υγρασία ακόμα και σε πολύ ξηρά περιβάλλοντα. Επιπλέον, η θεώρηση ότι η διεξαγωγή μετρήσεων σε ξηρά περιβάλλοντα με τη μέθοδο του γεωραντάρ θα είναι ιδανική, δεν είναι πάντα σωστή καθώς η παρουσία άλατος σε συνδυασμό με μικρή μόνο περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να δημιουργήσει υψηλή αγωγιμότητα και επομένως σημαντική απώλεια σήματος.

Ο άλλος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το βάθος και, δυστυχώς, και τη χωρική ανάλυση είναι η συχνότητα. Μία κεραία πολύ χαμηλής συχνότητας, όπως των 50 MHz, μπορεί να στείλει το σήμα μέχρι και 50 m, ή και περισσότερο, μέσα στο έδαφος, αυτό όμως θα είχε σαν αποτέλεσμα μία πολύ φτωχή χωρική ανάλυση (Conyers 2004). Αντίθετα, μία υψηλή συχνότητα όπως τα 900 MHz, μπορεί να διεισδύσει μόνο μέχρι ένα μέτρο, ή και λιγότερο, αλλά είναι ικανή να αναλύσει πολύ μικρούς σχηματισμούς της τάξης των μερικών εκατοστών. Υπάρχει δηλαδή μία αντίστροφη αναλογία μεταξύ βάθους και ανάλυσης.

Το βάθος διείσδυσης είναι δυνατό να υπολογιστεί με μία πληθώρα μεθόδων (Εικόνα 1.26) Γενικά, αν μπορεί να μετρηθεί το πραγματικό βάθος του στόχου μέσα στο έδαφος και να καθοριστεί και ο χρόνος ανάκλασης, τότε μπορεί να καθοριστεί η μέση ταχύτητα διάδοσης του ραδιοκύματος μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του στόχου χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$v = \frac{S}{T} \quad (1.10)$$

Όπου, v η ταχύτητα του σήματος, S το βάθος του στόχου και T ο χρόνος διάδοσης του σήματος.



Εικόνα 1.26. Ενδεικτικό τεστ μέτρησης της ταχύτητας στο γεωραντάρ. Μία μεταλλική ράβδος εισάγεται στο έδαφος σε τρία διαφορετικά βάθη 1, 2, 3 (αριστερά) και η ανάκλαση του σήματος πάνω στη ράβδο σε κάθε βάθος δίνει τις αντίστοιχες ανωμαλίες (δεξιά).

1.4.6. Πλεονεκτήματα του Γεωραντάρ

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου του επίγειου ραντάρ είναι η ταχύτητα διεξαγωγής των μετρήσεων και η υψηλή ανάλυση των αποτελεσμάτων σε μικρά βάθη. Όταν τα προφίλ των μετρήσεων βρίσκονται κοντά σε γεωτρήσεις ή άλλες πηγές που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη στρωματογραφία, τα πρωτογενή δεδομένα μπορούν, αν αναλυθούν σε σωστή κλίμακα, να ερμηνευθούν επί τόπου και να παρέχουν αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο παράλληλα με τις μετρήσεις.

Σε εδάφη που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές αγωγιμότητας, η διασκόπηση μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 15-20 m σε βάθος με τη χρησιμοποίηση κεραιών χαμηλής συχνότητας. Ωστόσο, το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η διασκόπηση σε μικρά βάθη, μέχρι τα 5-6 m, όπου μπορεί να παρέχει ανάλυση και απεικόνιση των υπεδαφικών σχηματισμών της τάξης των μερικών εκατοστών, χρησιμοποιώντας κεραίες με συχνότητες των 500 MHz ή υψηλότερες. Όταν η συχνότητα της κεραίας μειώνεται στα 100 MHz, η ανάλυση είναι της τάξης του μέτρου.

Υπό ευνοϊκές συνθήκες και παράλληλα με την ύπαρξη γεωλογικών δεδομένων, το γεωραντάρ μπορεί να εντοπίσει αποτελεσματικά ανακλάσεις από το βραχώδες υπόβαθρο και την επιφάνεια υδροφόρων οριζόντων. Επίσης δύναται να εντοπίσει την επιφάνεια αργιλικών στρωμάτων, κενούς χώρους αλλά και ρήγματα.

1.4.7. Μειονεκτήματα του Γεωραντάρ

Η επιτυχία στην εφαρμογή του επίγειου ραντάρ εξαρτάται από την εκάστοτε τοποθεσία. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας ως προς το βάθος έρευνας. Χαρακτηριστικά, το βάθος αυτό μπορεί να είναι εξαιρετικά περιορισμένο (πολύ μικρότερο από ένα μέτρο) αν η αγωγιμότητα του εδάφους είναι υψηλή (μεγαλύτερη των 30 mS/m). Μάλιστα, αν η περιοχή έρευνας καλύπτεται από ένα αργιλικό στρώμα, αυτό πρέπει να αφαιρεθεί προκειμένου να μπορεί η μέθοδος να εφαρμοστεί αποτελεσματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί η ικανότητα διασκόπησης του γεωραντάρ κάτω από τα αγωγήματα αυτά στρώματα είναι εξαιρετικά μικρή ή ακόμα και μηδενική.

Ένας άλλος παράγοντας που δρα περιοριστικά ως προς το βάθος έρευνας είναι ο διασκορπισμός των ραδιοκυμάτων εξαιτίας μεγάλων χάλικων και τεμαχών πετρώματος. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρησιμοποίηση χαμηλότερης συχνότητας κεραίας.

Η αδυναμία εφαρμογής του γεωραντάρ σε ανώμαλα εδάφη αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου. Για να υπάρχει κατευθυντικότητα των κυμάτων προς το εσωτερικό του εδάφους, πρέπει η κεραία να βρίσκεται σε στενή επαφή με την επιφάνεια του και γιαυτό, το έδαφος πάνω στο οποίο θα διεξαχθούν οι μετρήσεις δεν πρέπει να είναι πολύ τραχύ ή να περιλαμβάνει αντικείμενα όπως δέντρα, φράκτες και όγκους πετρωμάτων.

1.5. Εφαρμογές της Γεωφυσικής

1.5.1. Machu Picchu, Περού

Το Machu Picchu (Εικόνα 1.27) αποτελεί μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς της UNESCO, χρονολογείται από τον 15^ο αιώνα μ.Χ και ήταν η βασιλική πολιτεία του ηγεμόνα των Ίνκας Pachacuti. Εξαιτίας της κατοχής του Περού από τους Ισπανούς κατακτητές, το Machu Picchu εγκαταλείφθηκε, καλύφθηκε από πυκνή βλάστηση και παρέμεινε σε αυτήν την κατάσταση για εκατοντάδες χρόνια (Wright and Zegarra 2000). Ανακαλύφθηκε ξανά μόλις τον περασμένο αιώνα και σήμερα έχει φτάσει στο σημείο να δέχεται ένα εκατομμύριο επισκέπτες το χρόνο. Πρόσφατες κατολισθήσεις, πτώσεις βράχων και υλικών, έχουν δημιουργήσει παγκόσμιο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα για το φαινόμενο αυτό, στην ευρύτερη περιοχή του μνημείου, αλλά και του παρακείμενου χωριού Aguas Calientes (Klimes et al. 2007). Οι επιπτώσεις των πρόσφατων αυτών φαινομένων κυμαίνονται από πολύ σοβαρές, καθώς στα αντίστοιχα γεγονότα του 2004 χάθηκαν 11 ζωές, έως σημαντικής οικονομικής φύσης, καθώς το 1996 αδρανοποιήθηκε ο μοναδικός δρόμος που συνδέει την τοποθεσία με τον έξω κόσμο.

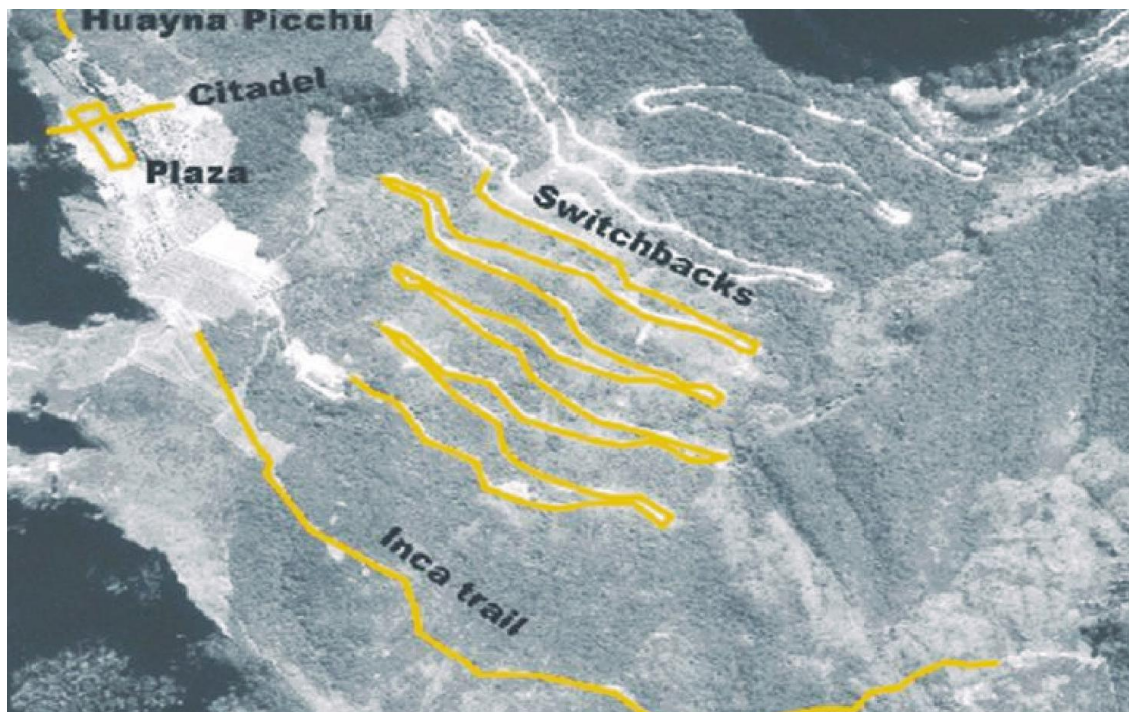


Εικόνα 1.27. Η ακριβής τοποθεσία του Machu Picchu στον ευρύτερο χάρτη του Περού και της Αμερικανικής ηπείρου.

Η πιθανή απειλή για εκδήλωση φαινομένων κατολίσθησης μεγάλης κλίμακας τα οποία θα μπορούσαν να πλήξουν σημαντικά τον αρχαιολογικό χώρο, ώθησε το Ινστιτούτο Γεωλογίας, Μεταλλευτικής και Μεταλλουργίας του Περού (INGEMMET) να ξεκινήσει μία σειρά πολυεθνικών και πολυεπιστημονικών ερευνών, για να αξιολογήσει τις συνθήκες που σχετίζονται με την αστάθεια των πρανών στην περιοχή. Οι γεωφυσικές έρευνες, οι οποίες από τη φύση τους είναι μη καταστρεπτικές, αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι αυτών των ερευνών, καθώς οι συνηθισμένες πρακτικές διάνοιξης τάφρων και διάτρησης του εδάφους (γεωτρήσεις) δεν επιτρέπονται προφανώς στην τοποθεσία.

Σκοπός των ερευνών αυτών, και επομένως και των γεωφυσικών μελετών που έγιναν στην περιοχή, είναι ο καθορισμός γεωλογικών παραμέτρων, όπως ρήγματα, ρωγμές σε πετρώματα, υπερκείμενη λιθολογία και πάχος αυτής κλπ., οι οποίες θα βοηθήσουν στην κατανόηση του δυναμικού κινδύνου κατολισθήσεων στην περιοχή.

Οι γεωφυσικές έρευνες που διεξήχθησαν περιελάμβαναν την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης και τη μέθοδο του γεωραντάρ και πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιοχές του ευρύτερου αρχαιολογικού περιβάλλοντος, χωρίς όμως να έχουν εφαρμοσθεί και οι τρεις μέθοδοι σε κάθε περιοχή (Εικόνα 1.28).



Εικόνα 1.28. Αεροφωτογραφία που απεικονίζει (με κίτρινο χρώμα) τις τρεις τοποθεσίες που διεξήχθησαν οι γεωφυσικές μελέτες

Το χωριό Aguas Calientes χτισμένο στους πρόποδες του βουνού 500 m κάτω από το Machu Picchu, δέχεται συχνά μαζί με την ευρύτερη περιοχή την επίδραση των κατολισθήσεων (Εικόνα 1.29). Η πρόσβαση στο Machu Picchu από το χωριό αυτό, γίνεται από έναν απόκρημνο δρόμο γεμάτο με στροφές, ο οποίος αποτέλεσε και την βασική τοποθεσία των γεωφυσικών μετρήσεων (Εικόνα 1.30). Οι πλαγιές του βουνού καλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα υπερκειμένων (πάχους 1-2 m), το οποίο αποτελείται κυρίως από διαταραγμένα πετρώματα.

Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από φτωχώς ανεπτυγμένα εδάφη, τροπικές συνθήκες υγρασίας και μεγάλο όγκο ετήσιων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Τα γρανιτικά πετρώματα κυριαρχούν στην περιοχή, υποφέρουν όμως από μεγάλα ρήγματα και εκτεταμένα δίκτυα ασυνεχειών.



Εικόνα 1.29. Το χωριό Aguas Calientes (δεξιά) που βρίσκεται 500 m κάτω από το Machu Picchu υποφέρει συχνά από κατολισθήσεις και πτώσεις βράχων. Μία τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στα αριστερά, όπου το 2004 πραγματοποιήθηκε κατολίσθηση εξαιτίας των πολλών βροχοπτώσεων και τα αποτελέσματα της εναποτέθηκαν παρακείμενα του χωριού.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.28, οι τρεις περιοχές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές μετρήσεις είναι, ο ελικοειδής ανηφορικός δρόμος (Switchbacks), το μονοπάτι που οδηγεί στον αρχαιολογικό χώρο (Inca trail) και ο ίδιος ο αρχαιολογικός χώρος (Main Plaza-Citadel). Τα αποτελέσματα των ερευνών στην κάθε περιοχή παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- **Ελικοειδής ανηφορικός δρόμος (Switchbacks)**

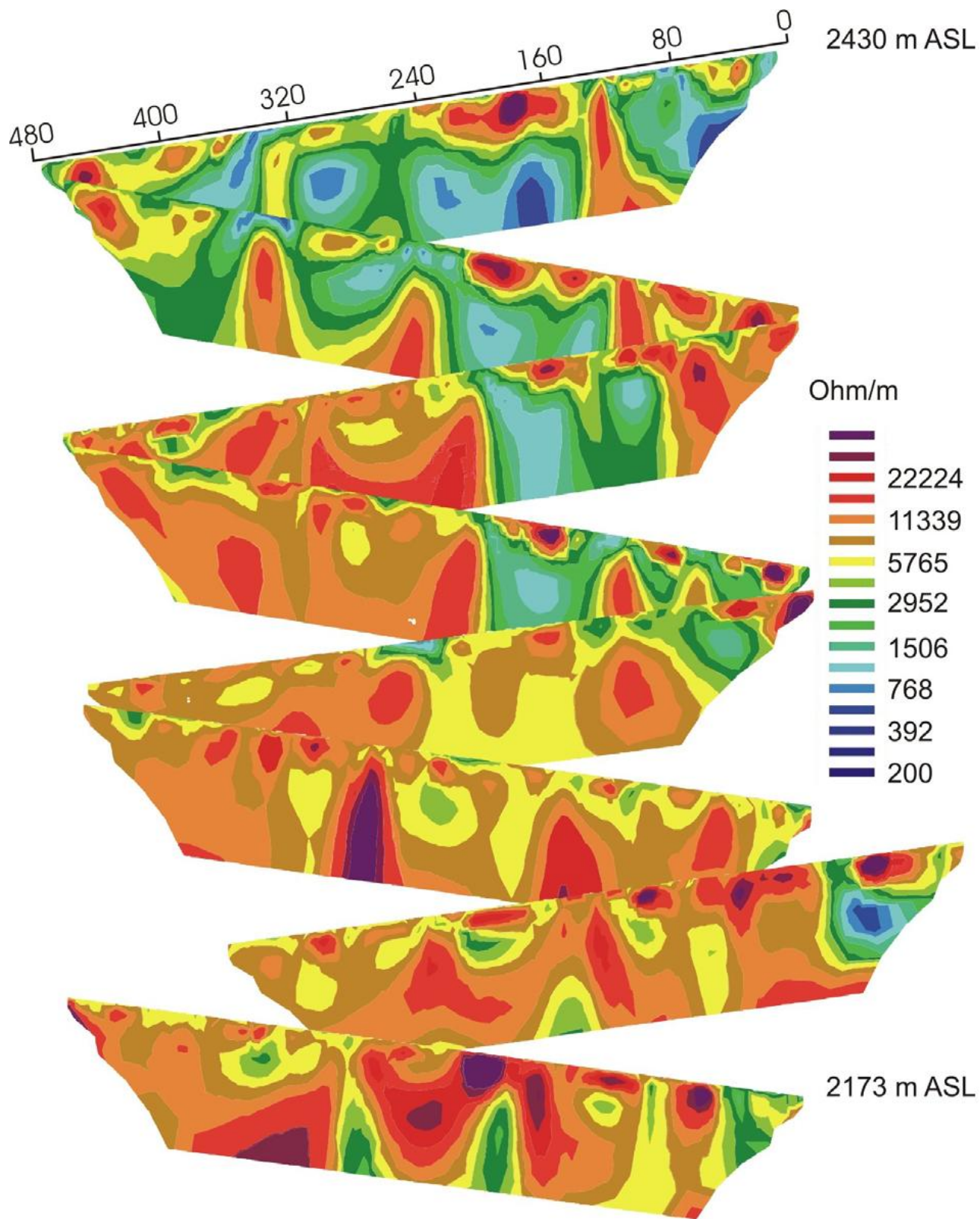
Τα δεδομένα που ελήφθησαν στο δρόμο αυτό αποτελούνταν από 8 γραμμές μετρήσεων ειδικής αντίστασης (γραμμές 0 έως 7) και 3 γραμμές ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, με το όργανο EM-34, κατά μήκος των γραμμών 0, 1 και 2 (Εικόνα 1.30).



Εικόνα 1.30. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι γραμμές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι έρευνες. Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης (γραμμές 0 έως 7) και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (γραμμές 0, 1, 2).

Αποτελέσματα ειδικής αντίστασης

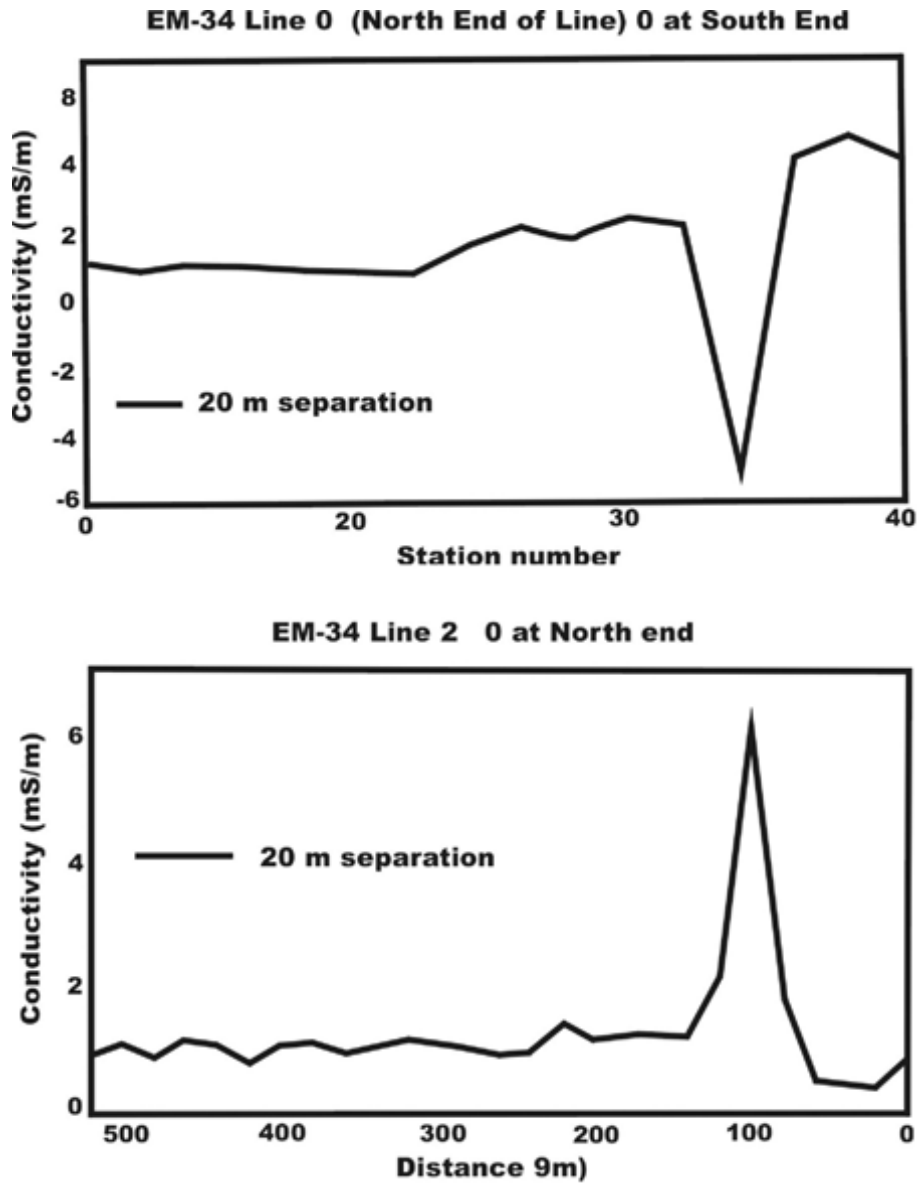
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης (Εικόνα 1.31), επιβεβαιώνεται η παρουσία γρανιτικών πετρωμάτων και παρατηρείται η ύπαρξη ζωνών χαμηλής αντίστασης στις γραμμές 0-3 και μία ζώνη επίσης χαμηλής αντίστασης στην ανατολική πλευρά όλων των υπόλοιπων προφίλ. Οι ζώνες αυτές συνδέονται, πιθανώς, με την παρουσία νερού σε ρωγμές και ασυνέχειες στην μάζα των γρανιτών. Το νερό το οποίο διεισδύει στις ασυνέχειες αυτές σε μεγαλύτερα υψόμετρα, δεν μπορεί προφανώς να μεταναστεύσει μέχρι τη βάση του βουνού και γι' αυτό, ενδεχομένως, οι ζώνες χαμηλής αντίστασης εντοπίζονται κυρίως στα υψηλότερα, από άποψη υψομέτρου, προφίλ. Η τάση στην ανατολική πλευρά μπορεί να οφείλεται σε κάποιο μεγαλύτερο ρήγμα ή ασυνέχεια που επιτρέπει στο νερό να μεταναστεύσει προς τα κάτω.



Εικόνα 1.31. Τοπογραφικά αποτελέσματα διορθωμένων μετρήσεων ειδικής αντίστασης στα 8 προφίλ (Switchbacks)

Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων - EM-34

Αν και υπάρχουν μικρές διαφορές στην αγωγιμότητα κατά μήκος αυτών των προφίλ (Εικόνα 1.32), είναι δύσκολο αυτές να συσχετιστούν με την γεωλογία. Η επιτυχία των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων στην απεικόνιση ζωνών θραύσης ή ρωγμάτωσης στα προφίλ αυτά ήταν περιορισμένη, εξαιτίας της υψηλής ειδικής αντίστασης του γρανίτη και των σχετικά υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης που συνδέονται με τις ασυνέχειες αυτές.



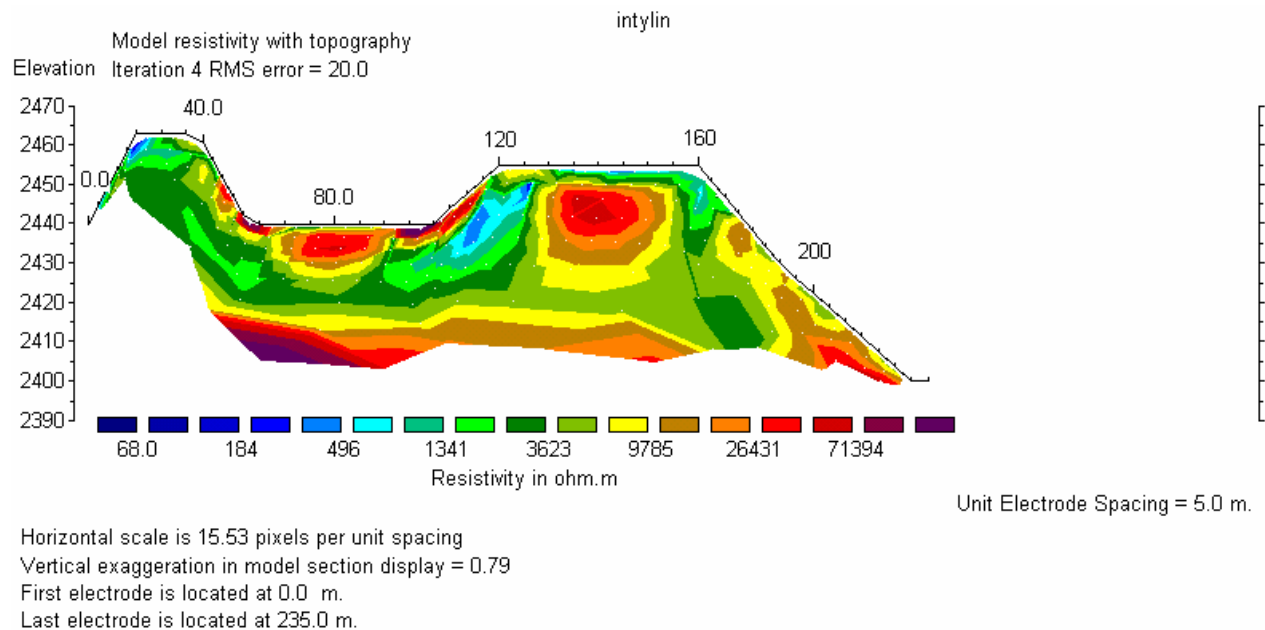
Εικόνα 1.32. Αποτελέσματα μετρήσεων αγωγιμότητας με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο EM-34, στις γραμμές προφίλ 0 και 2.

- **Sanctuary line (Inca trail)**

Κατά μήκος του δρόμου που οδηγεί στον αρχαιολογικό χώρο, συλλέχθηκαν δεδομένα αγωγιμότητας και in-phase με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών EM-31, δεδομένα αγωγιμότητας με χρήση των ηλεκτρομαγνητικών EM-34 και δεδομένα ειδικής αντίστασης.

Αποτελέσματα ειδικής αντίστασης

Η τοπογραφία κατά μήκος αυτής της γραμμής είναι πιο απότομη και τραχιά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (Switchbacks), με αποτέλεσμα το σφάλμα των δεδομένων να είναι μεγαλύτερο. Παρατηρούνται ζώνες χαμηλής ειδικής αντίστασης στα ανώτερα τμήματα των ανατολικών και δυτικών αγροτικών βαθμίδων (Εικόνα 1.33), οι οποίες οφείλονται κατά πάσα πιθανότητα στο μεγαλύτερο πάχος των εδαφικών στρωμάτων στα σημεία αυτά. Οι τιμές αντίστασης πάνω από τον κύριο χώρο είναι υψηλές, το οποίο είναι λογικό λόγω των βραχωδών πετρωμάτων που βρέθηκαν να καλύπτουν τη ζώνη πάνω από το υπόστρωμα. Υπάρχει ένα λεπτό εδαφικό στρώμα πάνω από τη ζώνη αυτή, το οποίο όμως δεν επιδρά σημαντικά στις μετρήσεις γιατί η διάταξη ειδικής αντίστασης που χρησιμοποιήθηκε (5 m απόσταση μεταξύ των διπόλων) υπολογίζει τη μέση τιμή από το στρώμα αυτό και το κατώτερο βραχώδες υπόβραθρο. Παρατηρείται επίσης μία ζώνη χαμηλής αντίστασης που εκτείνεται παράλληλα με την ανατολική πλευρά του κυρίου χώρου. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε μία ζώνη ρηγμάτωσης, όπως αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη τοποθεσία μετρήσεων (Switchbacks), ή σε διαφορετικό τύπο υλικού κάτω από το δάπεδο σε αυτό το σημείο του χώρου.



Εικόνα 1.33. Τοπογραφικά αποτελέσματα διορθωμένων μετρήσεων ειδικής αντίστασης (Sanctuary line)

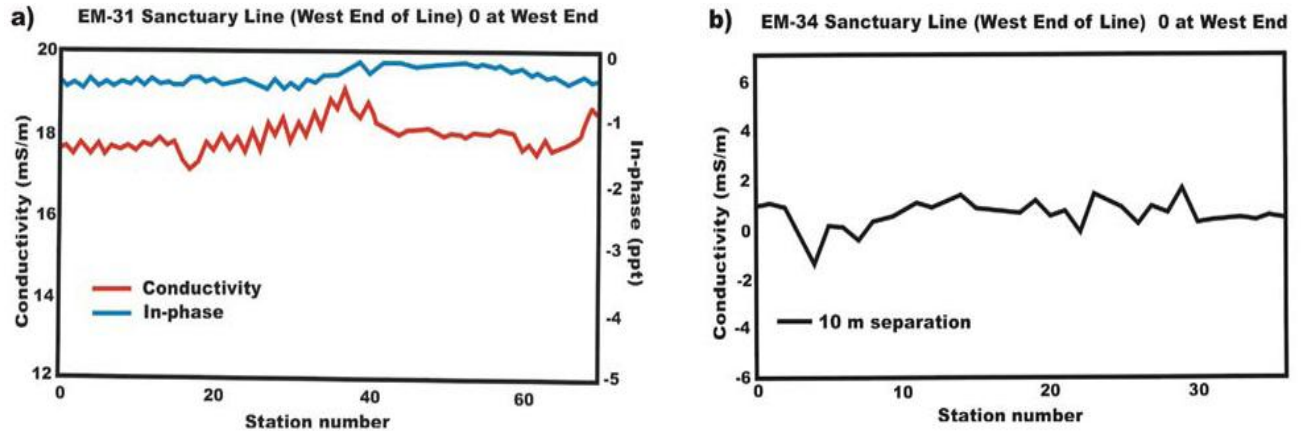
Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων EM-31

Τα in-phase δεδομένα των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται συνήθως για τον εντοπισμό μεταλλικών στόχων, με αποτέλεσμα να μην έχουν μεγάλη επιτυχία στη γεωλογική χαρτογράφηση στο συγκεκριμένο προφίλ (Εικόνα 1.34 α). Όσον αφορά τα δεδομένα αγωγιμότητας, υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση σε αυτά κατά μήκος της συγκεκριμένης γραμμής μετρήσεων, η οποία οφείλεται στη θέση του συστήματος των μετρήσεων αναφορικά με τις εξωτερικές και εσωτερικές αιχμές κάθε βαθμίδα. Εν τέλει, με τη μέθοδο EM-31 δεν ήταν δυνατή η απεικόνιση μεταβολών στις γεωλογικές συνθήκες, καθώς αυτή διασκοπεύει μόνο τα ανώτερα στρώματα του εδάφους σε βάθος μερικών μόνο μέτρων.

Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων EM-34

Το σύστημα μετρήσεων EM-34 μπορεί να διασκοπεύει τουλάχιστον σε διπλάσιο βάθος σε σχέση με το σύστημα EM-31. Για αυτόν το λόγο, η μέση αγωγιμότητα στην περίπτωση αυτή είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με το EM-31, καθώς αναλύει μεγαλύτερο μέρος του υπεδάφους (Εικόνα 1.34 β). Οι διάφορες μεταβολές στην αγωγιμότητα μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές στο πάχος των υπερκειμένων και στη λιθολογία αλλά όμως είναι δύσκολο να συσχετιστούν. Η

αρνητική τιμή που παρατηρείται κοντά στο σταθμό 4 αντιστοιχεί στην κορυφή των δυτικών βαθμίδων και κατά πάσα πιθανότητα είναι μεταλλικής προέλευσης, σχετιζόμενη μάλλον με τον μεγάλο αριθμό τουριστών που κατακλύουν το χώρο.



Εικόνα 1.34. α) Αποτελέσματα μετρήσεων αγωγιμότητας και in-phase με EM-31, β) Αποτελέσματα μετρήσεων αγωγιμότητας με EM-34 (Sanctuary line)

- **Κύριος αρχαιολογικός χώρος (Main Plaza)**

Στο κομμάτι αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν μόνο με την μέθοδο του γεωραντάρ (GPR). Πραγματοποιήθηκαν επίσης ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με την μέθοδο EM-31, οι οποίες όμως δεν παρείχαν σημαντικές πληροφορίες ως προς την υπεδιαφική δομή για τους λόγους που αναφέρθηκαν και πιο πάνω. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος 6 προφίλ στον κύριο αρχαιολογικό χώρο και 3 προφίλ σε χαμηλότερο σημείο του αρχαιολογικού χώρου (Εικόνα 1.35). Οι τελευταίες μετρήσεις των 3 προφίλ συνδέονται και με αντίστοιχες αρχαιολογικές μελέτες στο σημείο και δεν θα παρουσιαστούν εδώ.

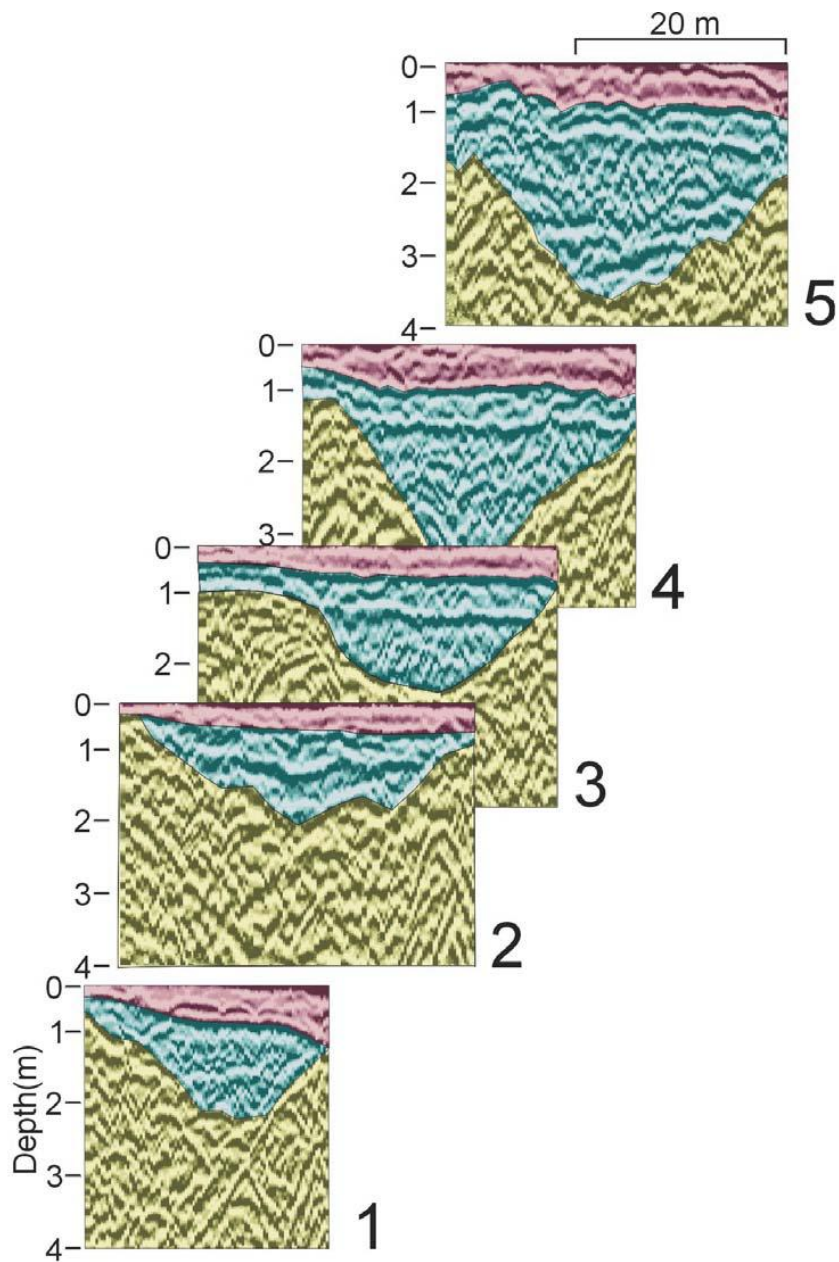
Αποτελέσματα μετρήσεων γεωραντάρ

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.36, τα αποτελέσματα κάθε προφίλ αποτελούνται από τρία διακριτά στρώματα. Το πρώτο στρώμα (κόκκινο χρώμα) αντιστοιχεί στα επιφανειακά εδάφη και έχει πάχος μεταξύ 0,5-1 m. Διακρίνονται μικρής έντασης ανακλάσεις παράλληλα προς την επιφάνεια του εδάφους. Το δεύτερο στρώμα βρίσκεται κάτω από τη χωμάτινη επιφάνεια και εκτείνεται μέχρι το βραχώδες υπόστρωμα. Σε αυτό, απαντώνται κυρίως παραμορφωμένες και



Εικόνα 1.35. Ακριβής θέση των προφίλ μετρήσεων του γεωραντάρ στον αρχαιολογικό χώρο (Main Plaza). Στην εργασία αυτήν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα προφίλ 1-5.

διακοπτόμενες γραμμές ανάκλασης, αν και υπάρχουν και μερικές συνεχόμενες. Η ανοργάνωτη φύση του στρώματος αυτού, οφείλεται στα θεμέλια πετρωμάτων, τις προσχώσεις και τις ανθρώπινες αποθέσεις κατά την κατασκευή του χώρου. Η παρουσία των θεμελίων αυτών επιβεβαιώθηκε και από ερευνητικό όρυγμα στο σημείο αυτό. Οι μη διακοπτόμενες γραμμές ανάκλασης εικάζεται ότι απεικονίζουν υπεδαφικές τοποθεσίες στις οποίες οι εργάτες απόθεσαν άργιλο και λοιπά χωμάτινα εδάφη, για να ομαλοποιήσουν το χώρο γύρω και πάνω από τα βραχώδη αυτά θεμέλια. Το τρίτο στρώμα αντιπροσωπεύει το βραχώδες υπόστρωμα και παρατηρείται σημαντική εκτόνωση στην οροφή του. Το εσωτερικό του χαρακτηρίζεται από πολλές ανομοιογένειες, καθώς υπάρχουν πολλές διακοπτόμενες γραμμές ανάκλασης, ενώ φαίνεται και πληθώρα γραμμών με απότομη κλίση. Τα απότομα αυτά φαινόμενα, συνδέονται πιθανώς με ανακλάσεις στα κατώτερα τοιχώματα των βαθμίδων αφού συναντώνται στα άκρα των προφίλ.



Εικόνα 1.36. Αποτελέσματα μετρήσεων γεωραντάρ στα 5 προφίλ του αρχαιολογικού χώρου (Main Plaza).

Συμπεράσματα

Το γρανιτικό υπόστρωμα κάτω από τον αρχαιολογικό χώρο του Machu Picchu χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Το πάχος των υπερκειμένων, όπου αυτά υπάρχουν, είναι γενικά μικρό, ενώ οι κύριοι χώροι έχουν πληρωθεί με βραχώδη θεμέλια και έχουν καλυφθεί με ένα χωμάτινο στρώμα. Οι γεωργικής φύσεως βαθμίδες και στα ανατολικά αλλά και στα δυτικά του ιερού παρουσιάζουν, κατά πάσα πιθανότητα, παρόμοια συμπεριφορά.

Δυναμικό Κατολίσθησης

Τα γεωφυσικά δεδομένα που συλλέχθηκαν στην τοποθεσία Machu Picchu παρέχουν μία καλή ένδειξη για τη φύση των υπεδαφικών υλικών, τόσο των υπερκειμένων όσο και του υποστρώματος. Αν και παρατηρήθηκαν μεμονωμένα περιστατικά κάθετων ρωγματώσεων στο υπόστρωμα, δεν υπάρχει κάποια ένδειξη βαθιάς ασυνέχειας ή ρηγμάτωσης που να διασχίζει την ευρύτερη μάζα του γρανίτη. Παρομοίως, αν και η τοποθεσία έχει υποστεί ρηχές και επιφανειακές κυρίως αστοχίες τα τελευταία αρκετά χρόνια, δεν υπάρχει κάποια ένδειξη στα υπερκείμενα στρώματα που να υποδεικνύει ότι ο χώρος δύναται να υποστεί στο μέλλον εκτεταμένες επιφανειακές αστοχίες. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκαν δομές παράλληλες ή υποπαράλληλες προς τις πλαγιές του χώρου.

Αν και η περιοχή υπόκειται συχνά σε πτώσεις βράχων και ολισθήσεις υλικών, κατάλληλα αποστραγγιστικά συστήματα και σωστή διαχείριση της τοποθεσίας θα μπορούσαν να μετριάσουν τις επιπτώσεις των φαινομένων αυτών και να μειώσουν την αστάθεια των πρανών και των βαθμίδων. Δεν υπάρχει ένδειξη εκτεταμένου καταστροφικού συμβάντος στο παρελθόν και η πιθανότητα για κάποια καταστροφική αστοχία μεγάλης κλίμακας στο εγγύς και στο απώτερο μέλλον θεωρείται εξαιρετικά μικρή.

Στην παρούσα φάση, δεν υπάρχει κάποια πληροφορία σχετικά με το αν κάποια από τις ρωγματώσεις που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης έχει ενεργοποιηθεί στο πρόσφατο παρελθόν. Μελλοντικές έρευνες στο χώρο του ιερού θα πρέπει να βασιστούν σε μακροχρόνιες καταγραφές και παρατηρήσεις άλλων ερευνών αυτών αλλά και άλλων ήδη γνωστών ρωγματώσεων, ρηγμάτων και ασυνεχειών, καθώς η διάνοιξη ορυγμάτων και γεωτρήσεων απαγορεύεται.

2. Το Φαινόμενο της Ρευστοποίησης

2.1. Ρευστοποίηση - Ορισμός

Η ρευστοποίηση ή ρευστοποίηση εδάφους, είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει όταν χάνεται η τριβή μεταξύ των κόκκων του εδάφους, συνήθως λόγω της αυξημένης πίεσης του νερού μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, μη συνεκτικοί κορεσμένοι εδαφικοί σχηματισμοί έχουν την τάση όταν υπόκεινται σε άμεση φόρτιση κάτω από αστράγγιστες συνθήκες να τείνουν προς συμπίκνωση, όμως λόγω της αδυναμίας μεταβολής του όγκου τους παρουσιάζεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων με ταυτόχρονη μείωση ή και μηδενισμό της διατμητικής τους αντοχής. Με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται η κατάσταση των εδαφικών στρωμάτων από στερεά σε ρευστή. Σημαντικό ρόλο για την εκδήλωση του φαινομένου της ρευστοποίησης διαδραματίζουν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες συναντώνται στη φύση οι εκάστοτε εδαφικοί σχηματισμοί. Χαρακτηριστικά, οι λεπτόκοκκοι μη συνεκτικοί κορεσμένοι εδαφικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν μεγάλες πιθανότητες ρευστοποίησης.

2.2. Μηχανισμός Πρόκλησης Ρευστοποίησης

Η αύξηση της πίεσης των πόρων μη συνεκτικών κορεσμένων εδαφικών σχηματισμών η οποία προκαλείται από δυναμικού τύπου δονήσεις (π.χ. σεισμικές ταλαντώσεις) υπό αστράγγιστες συνθήκες, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση ή ακόμα και την απώλεια της διατμητικής αντοχής του υλικού δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Η διαδικασία αυτή παρατηρείται κυρίως σε ομοιόμορφα χαλαρά, λεπτά έως μεσοκοκκώδη ιζήματα. Ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή αυτής της κατάστασης είναι *ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών*.

Τα φαινόμενα ρευστοποίησης διακρίνονται με βάση το μηχανισμό γένεσης σε δύο γενικές κατηγορίες, την εδαφική ροή (flow failure) και την ανακυκλική κινητικότητα (cyclic mobility). Η εδαφική ροή παρόλο που παρουσιάζει μικρότερες πιθανότητες εμφάνισης από την ανακυκλική κινητικότητα, οι επιπτώσεις της είναι αρκετά πιο σοβαρές. Η εδαφική ροή συναντάται συνήθως σε χαλαρά μη συνεκτικά ιζήματα τα οποία είναι τοποθετημένα σε πρηνή με σημαντική κλίση και στα οποία η διατμητική τάση η οποία απαιτείται για τη στατική ισορροπία της εδαφικής μάζας είναι μεγαλύτερη από την υπολειπόμενη διατμητική αντοχή του εδάφους (Kramer 1996). Οι εφαρμοσμένες ανακυκλιζόμενες τάσεις οδηγούν τον εδαφικό σχηματισμό σε

αστάθεια καθώς η αντοχή του μειώνεται με αποτέλεσμα οι υπάρχουσες στατικές φορτίσεις να προκαλέσουν στη συνέχεια τη δημιουργία εδαφικής ροής. Ένα τέτοιο μηχανισμό μονοτονικής φόρτισης αποτελεί η διάβρωση του πόδα ενός πρανούς ή αντίστοιχα η φόρτιση της κεφαλής του. Το συγκεκριμένο φαινόμενο χαρακτηρίζεται από την απότομη εμφάνιση, την ταχύτατη κίνηση και την μεγάλη σε κλίμακα απόσταση στην οποία μπορούν να κινηθούν τα υλικά του ρευστοποιημένου εδάφους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εμφάνισης εδαφικής ροής αποτελούν οι αστοχίες των φραγμάτων Sheffield και Lower San Fernando (Olson 2001).

Η ανακυκλική κινητικότητα η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, μπορεί να προκληθεί σε περιοχές με μικρή κλίση (έως 30°) ή χωρίς κλίση, ενώ οι επιπτώσεις αυτής χαρακτηρίζονται ελαφριές έως πολύ σοβαρές. Σε αντίθεση με την εδαφική ροή, φαινόμενα ρευστοποίησης λόγω ανακυκλικής κινητικότητας προκαλούνται όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρότερη της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού.

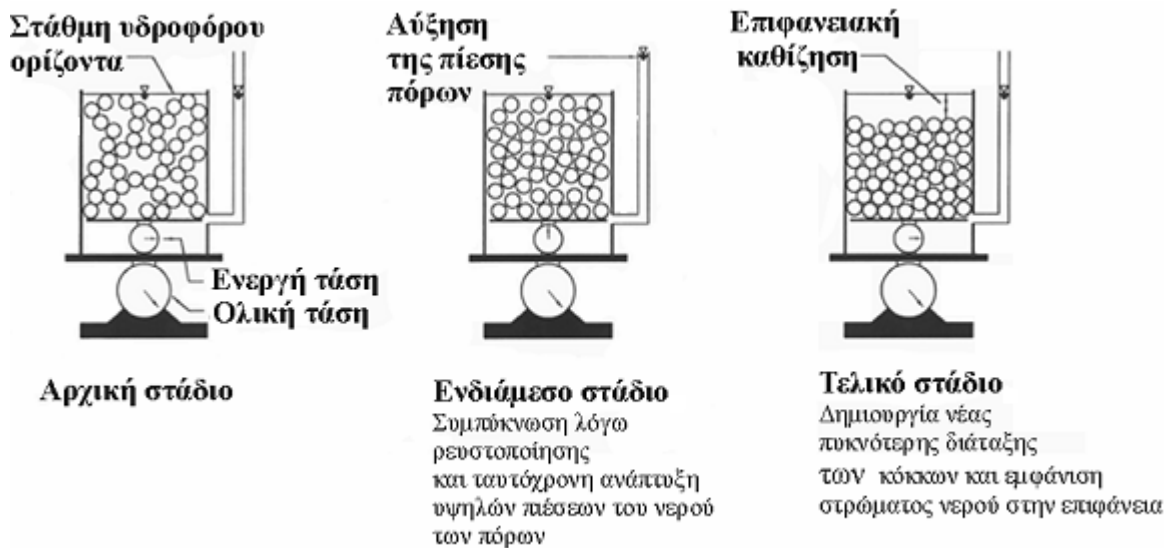
2.3. Διαδικασία Ρευστοποίησης

Όταν ένας χαλαρός κοκκώδης εδαφικός σχηματισμός υπόκειται σε ανακυκλική δόνηση, όπως στην περίπτωση ενός σεισμού, τότε επιδεικνύει τάση συμύκνωσης δηλαδή μεταβολής του όγκου. Συγκεκριμένα, οι κόκκοι από τους οποίους αποτελείται το εδαφικό υλικό μετακινούνται έχοντας ως στόχο την μείωση των μεταξύ τους κενών. Όμως, η παρουσία νερού σε αυτά τα κενά, στην περίπτωση κορεσμένων χαλαρών εδαφών σε αστράγγιστες συνθήκες, εμποδίζει αυτήν την μετατόπιση. Αυτή η πίεση που μεταφέρεται στο νερό των πόρων, λόγω των αστράγγιστων συνθηκών δεν μπορεί να εκτονωθεί με συνέπεια την απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων u . Η συνεχιζόμενη αύξηση της πίεσης των πόρων u , έχει ως συνέπεια την μείωση της διατμητικής αντοχής τ_u του εδάφους μέχρι την πλήρη απώλεια αυτής, σύμφωνα με το νόμο αστοχίας (νόμος του Coulomb):

$$\tau_u = \sigma' \nu \tan \phi' \quad (2.1)$$

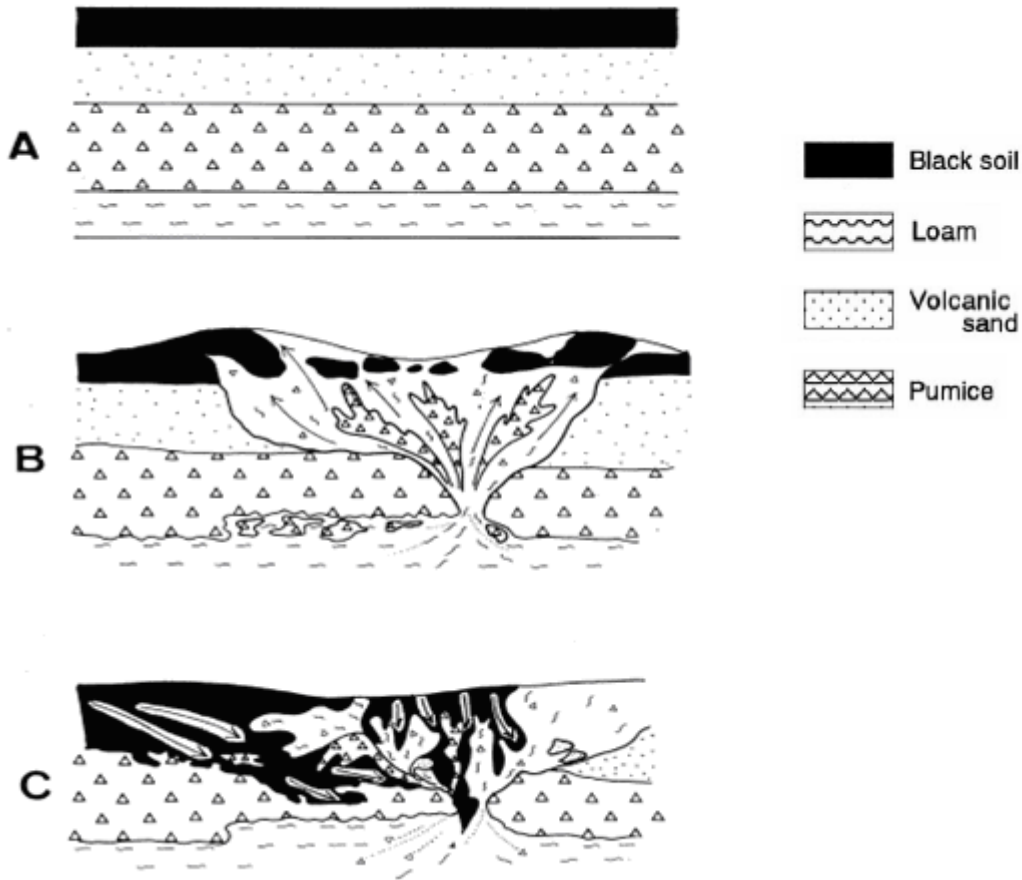
Όπου, $\sigma' \nu$ είναι η ενεργή τάση και ϕ' η ενεργός (δρώσα) γωνία τριβής του εδαφικού υλικού. Η ενεργή τάση $\sigma' \nu$ δίνεται από τον τύπο $\sigma' \nu = \sigma - u$, όπου σ είναι η τάση και u η πίεση των πόρων. Ο όρος της συνοχής c δεν υπάρχει γιατί πρόκειται για μη συνεκτικά εδάφη.

Στο στάδιο αυτό το οποίο ονομάζεται ολική ρευστοποίηση, η πίεση του νερού των πόρων, το οποίο δεν έχει απεγκλωβιστεί από το εδαφικό στρώμα, ανταποκρίνεται στην πίεση που ασκούνται τα υπερκείμενα στρώματα διατηρώντας τον όγκο του σχηματισμού. Παράλληλα οι δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ των κόκκων του εδάφους έχουν καταρρεύσει με αποτέλεσμα αυτό να συμπεριφέρεται πλέον ως ρευστό (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1. Σχηματική απεικόνιση των σταδίων ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών

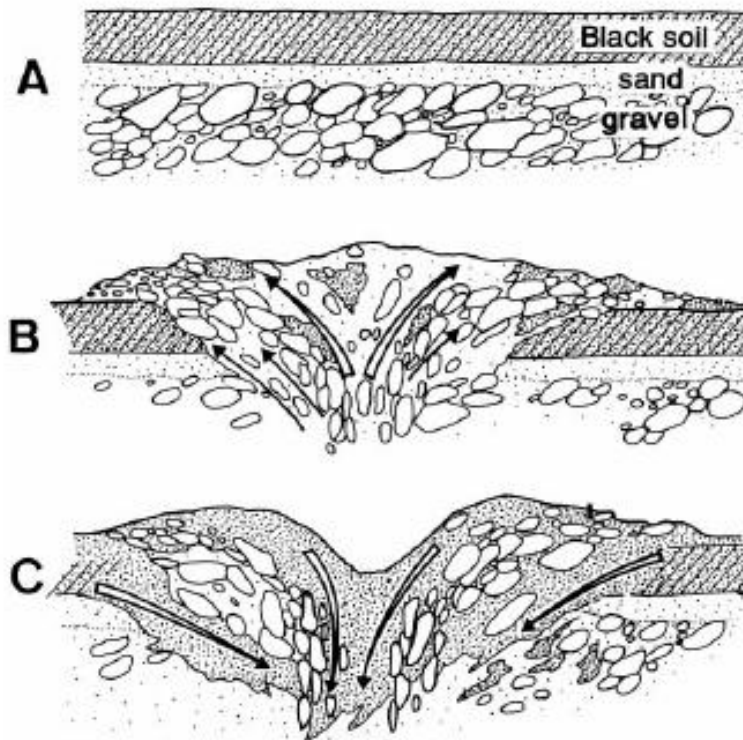
Η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων στη συνέχεια θα προκαλέσει την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και την ταυτόχρονη μείωση του όγκου του. Η ποσότητα του νερού που παρέμεινε εγκλωβισμένη στο ίζημα θα διοχετευτεί προς την επιφάνεια λόγω της μεγάλης υδραυλικής κλίσης παρασέρνοντας εδαφικό υλικό. Η διάρκεια αυτής της ροής προς την επιφάνεια εξαρτάται από το χρόνο που χρειάζεται για να αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία στην εδαφική στήλη. Είναι, επομένως, σύνηθες φαινόμενο η συνέχιση αυτής της ροής και μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης.



Εικόνα 2.2. Σχηματικό διάγραμμα στο οποίο φαίνονται τα στάδια της ρευστοποίησης του εδάφους: α) πριν το σεισμό, β) κατά τη διάρκεια του σεισμού, γ) αμέσως μετά το σεισμό

Σύμφωνα με το σχηματικό διάγραμμα της Εικόνας 2.2 διακρίνονται τρία στάδια ρευστοποίησης. Πρώτον, στρώματα εδάφους κορεσμένα σε νερό, υπόκεινται σε δονήσεις και αναταράξεις κατά τη διάρκεια του σεισμού. Δεύτερον, τα ιζήματα χαλαρώνουν, συμπιέζονται και προκαλείται κατάρρευση του εδαφικού σκελετού. Τρίτον, οι κόκκοι του εδάφους χαλαρώνουν μεταξύ τους λόγω των αναταράξεων και η απότομη άνοδος του νερού σε συνδυασμό με την κίνηση του εδάφους έχουν σαν αποτέλεσμα την άνοδο και την ανάβλυσή του στην επιφάνεια και την εμφάνιση, συνήθως, μικρών λόφων ή οπών σε αυτήν.

Στο σχηματικό διάγραμμα της Εικόνας 2.3 δείχνονται τα στάδια της ρευστοποίησης σε διαφορετικό τύπο εδάφους σε σχέση με αυτό της Εικόνας 2.2.



Εικόνα 2.3. Σχηματικό διάγραμμα όπου φαίνονται τα στάδια της ρευστοποίησης σε διαφορετικό τύπο εδάφους σε σχέση με αυτό της Εικόνας 2.2: α) πριν το σεισμό, β) κατά τη διάρκεια του σεισμού, γ) αμέσως μετά το σεισμό

2.4. Προϋποθέσεις Πρόκλησης Ρευστοποίησης

Προκειμένου να θεωρηθεί ένα έδαφος εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο θα πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις και να έχει την ικανότητα να ρευστοποιηθεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Οι απαραίτητες συνθήκες και προϋποθέσεις ρευστοποίησης αναλύονται στη συνέχεια.

2.4.1. Γεωλογική Ηλικία Εδαφικών Σχηματισμών

Όσο παλαιότερες είναι οι αποθέσεις τόσο μικρότερη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση παρουσιάζουν, λόγω του ότι η πυκνότητα και ο βαθμός συγκόλλησης των εδαφών αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Η αύξηση δηλαδή της αντοχής των σχηματισμών έναντι της ρευστοποίησης είναι ανάλογη της ηλικίας τους. Εδαφικοί σχηματισμοί ηλικίας Άνω Ολοκαίνου είναι περισσότερο επιδεκτικοί προς ρευστοποίηση από σχηματισμούς του Ολοκαίνου, ενώ ρευστοποίηση εδαφών Πλειστοκαινικής ηλικίας έχει προκληθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Δεν έχουν παρατηρηθεί σύγχρονα φαινόμενα ρευστοποίησης σε ιζήματα προ-Πλειστοκαίνου (Obermeier 1996).

2.4.2. Γεωμορφολογικά Κριτήρια

Το περιβάλλον απόθεσης των εδαφικών σχηματισμών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο ως προς την εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης. Κορεσμένες, χαλαρές και ψαθυρές αποθέσεις παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο βαθμό επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση (Youd 1998). Όταν οι συνθήκες επιτρέπουν την απόθεση ενός ομοιόμορφου ταξινομημένου σχηματισμού σε χαλαρή κατάσταση, το αποτέλεσμα είναι η υψηλή επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση. Έτσι λοιπόν, ποτάμιες, κολλούβιες και αιολικές αποθέσεις είναι επιδεκτικές προς ρευστοποίηση όταν βρίσκονται σε κορεσμένο στάδιο (Kramer 1996). Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί σε σχηματισμούς αλλουβιακών ριπιδίων, σε αλλοβιακές πεδιάδες και σε δελταϊκές αποθέσεις με μικρότερη όμως συχνότητα. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στις ανθρωπογενείς αποθέσεις, όπως επιχώσεις και φίλτρα φραγμάτων, στις οποίες δεν έχει πραγματοποιηθεί συμπύκνωση μετά την τοποθέτησή τους και οι οποίες σε περίπτωση κορεσμού συγκαταλέγονται στα εδάφη με μεγάλη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 2.1, ο οποίος είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας από τον Iwasaki (1986) μεγάλου αριθμού δεδομένων ρευστοποίησης από σεισμούς στην Ιαπωνία και δείχνει το δυναμικό ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών ανάλογα με το γεωμορφολογικό τους περιβάλλον.

Πίνακας 2.1. Ταξινόμηση εδαφών με βάση γεωμορφολογικά κριτήρια (Iwasaki 1986)

<i>Κατηγορία</i>	<i>Γεωμορφολογικές ενότητες</i>	<i>Δυναμικό ρευστοποίησης</i>
A	Πρόσφατος ποτάμιος βυθός, παλιός ποτάμιος βυθός, βάλτος	Υψηλή πιθανότητα ρευστοποίησης
B	Ριπίδια, ποτάμιες προσχώσεις, πλημμυρικές πεδιάδες	Πιθανότητα ρευστοποίησης
Γ	Λόφοι, βουνά	Μη ρευστοποιήσιμα

2.4.3. Υδροφόρος Ορίζοντας

Απαραίτητη και αναγκαία προϋπόθεση για τη ρευστοποίηση ενός εδάφους είναι το έδαφος αυτό να βρίσκεται σε κορεσμένη κατάσταση, δηλαδή να βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Έτσι, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα επηρεάζει την επιδεκτικότητα των σχηματισμών προς ρευστοποίηση. Όπως η αντοχή ενός στρώματος στη στρωματογραφική στήλη έναντι ρευστοποίησης αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης των υπερκειμένων (γεωστατική τάση) και την ηλικία του, έτσι αυξάνεται και με την αύξηση του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα. Συνεπώς, όσο πιο χαμηλή είναι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση θα προβάλλει το συγκεκριμένο εδαφικό στρώμα σε ενδεχόμενη πιθανότητα ρευστοποίησης (Youd 1998). Αποτελέσματα γεωτεχνικών ερευνών σε θέσεις εμφάνισης ρευστοποίησης έδειξαν ότι τα περισσότερα περιστατικά παρουσιάστηκαν σε περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα δεν ξεπερνούσε τα 3 μέτρα σε βάθος από την επιφάνεια, ενώ μερικά συνδέονται και με βάθος στάθμης έως και 10 μέτρα. Ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις ρευστοποίησης σε θέσεις όπου η υδροστατική στάθμη βρισκόταν σε βάθη μεγαλύτερα των 15 m (Youd 1998). Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η σχέση της επιδεκτικότητας εδαφών προς ρευστοποίηση με το βάθος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Πίνακας 2.2. Επιδεκτικότητα ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών ανάλογα με το βάθος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (Youd 1998)

<i>Βάθος στάθμης υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια</i>	<i>Επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση</i>
< 3 m	Πολύ υψηλή
3 έως 6 m	Υψηλή
6 έως 10 m	Μέτρια
10 έως 15 m	Χαμηλή
> 15 m	Πολύ χαμηλή

2.4.4. Σχετική Πυκνότητα

Εδαφικοί σχηματισμοί παρόμοιας κοκκομετρικής σύστασης είναι δυνατό να επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς τη δυνατότητα ρευστοποίησής τους ανάλογα με την τιμή της

σχετικής τους πυκνότητας. Όσο πιο χαλαρή είναι η διάταξη των κόκκων ενός εδάφους τόσο η τιμή του δείκτη πόρων είναι μεγαλύτερη και αντίστοιχα η τιμή της σχετικής πυκνότητας του D_r (%) είναι μικρότερη. Η τιμή της D_r υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.2)$$

Όπου, e είναι ο πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου, e_{\max} είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα (π.χ. με απλή απόθεση υλικού) και e_{\min} είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στη μέγιστη συμβατική πυκνότητα (π.χ. μετά από συμπίκνωση) (Κούκης και Σαμπατακάκης 2002).

Σύμφωνα με τους Terzaghi και Pech (1967), στα αμμώδη εδάφη η σχετική πυκνότητα συνδέεται με τον αριθμό κρούσεων N_{SPT} της επί τόπου δοκιμής πρότυπης διείδυσης (Standard Penetration Test, SPT), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3. Άμμοι που ταξινομούνται από χαλαρές έως πολύ χαλαρές είναι εν δυνάμει ρευστοποιήσιμες. Αντιθέτως, για να δημιουργηθούν ικανές συνθήκες πρόκλησης ρευστοποίησης σε μερικώς πυκνά αμμώδη στρώματα απαιτούνται πολύ δυνατές φορτίσεις.

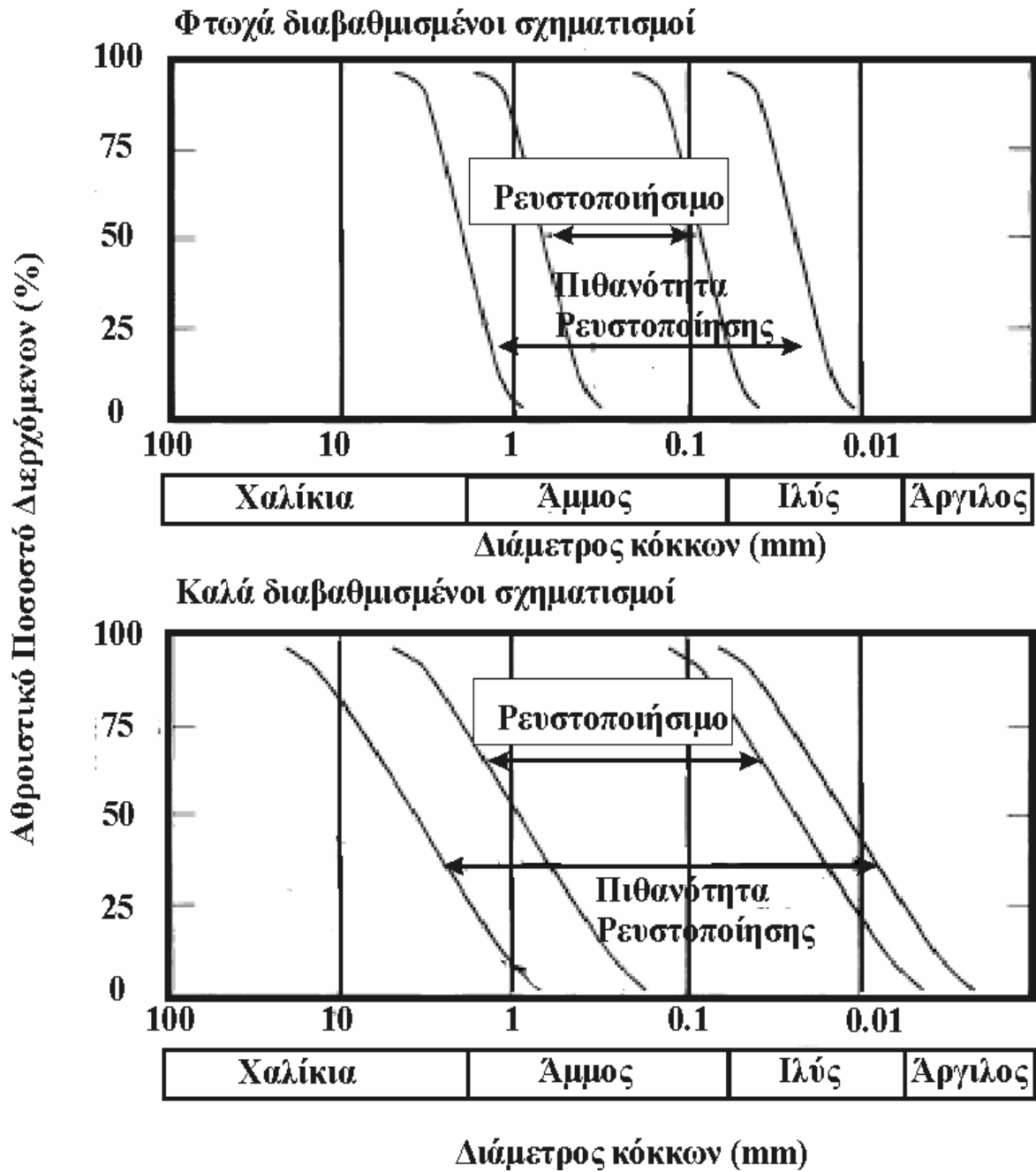
Πίνακας 2.3. Σχετική πυκνότητα άμμων ανάλογα με τον αριθμό κρούσεων N_{SPT} της δοκιμής πρότυπης διείδυσης (SPT) (Obermeier et al. 2005)

<i>Αριθμός κρούσεων N</i>	<i>Χαρακτηρισμός</i>	<i>Σχετική πυκνότητα D_r (%)</i>
0-4	Πολύ χαλαρό	0-15
4-10	Χαλαρό	15-35
10-30	Ενδιάμεσο	35-65
30-50	Πυκνό	65-85
>50	Πολύ πυκνό	85-100

2.4.5. Κοκκομετρική Σύσταση και Φυσικά Χαρακτηριστικά των Εδαφών

Η κοκκομετρική σύσταση και τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών θεωρούνται τα πιο σημαντικά κριτήρια για το χαρακτηρισμό ενός εδάφους ως ρευστοποιήσιμο. Τα πρώτα συμπεράσματα τα οποία είχαν προκύψει από τις αρχικές μελέτες του φαινομένου της ρευστοποίησης, χαρακτήριζαν ως επιδεκτικούς προς ρευστοποίηση εκείνους τους εδαφικούς σχηματισμούς οι οποίοι αποτελούνταν μόνο από καθαρή άμμο. Τα λεπτόκοκκα εδάφη θεωρούνταν μη ικανά να αναπτύξουν τις απαιτούμενες για τη δημιουργία του φαινομένου, υψηλές πιέσεις πόρων, ενώ η παρουσία αργιλικού κλάσματος σε αυτά συντελούσε στην ανάπτυξη συνοχής c . Τα χονδρόκοκκα εδάφη είναι πολύ διαπερατά ώστε να διατηρήσουν την απαιτούμενη υπερπίεση του νερού των πόρων μέχρι να προκληθεί ρευστοποίηση.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους επηρεάζει επίσης το βαθμό επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση. Καλά διαβαθμισμένα εδάφη είναι λιγότερο πιθανό να ρευστοποιηθούν σε σχέση με εδάφη ομοιόμορφης διαβάθμισης, καθώς, η πλήρωση των κενών μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων από μικρότερους κάτω από συνθήκες πλήρους αποστράγγισης, έχει ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση σε μικρότερο, όμως, ποσοστό και κατά συνέπεια μικρότερη τιμή υπερπίεσης πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες (Kramer 1996). Το παραπάνω συμπέρασμα έχει επιβεβαιωθεί και από ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης, όπου ανομοιόμορφα διαβαθμισμένοι εδαφικοί σχηματισμοί προκάλεσαν αστοχίες λόγω ρευστοποίησης. Όσον αφορά το σχήμα των κόκκων, είναι φανερό ότι εδάφη αποτελούμενα από στρογγυλοποιημένους κόκκους αυξάνουν την πυκνότητά τους σε μεγαλύτερο βαθμό από εδάφη με γωνιώδεις κόκκους, επομένως, τα εδάφη αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση (Kramer 1996). Μια πρώτη προσέγγιση της πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών ανάλογα με την κοκκομετρική τους σύσταση, τόσο για υλικά με ανομοιόμορφη όσο και με ομοιόμορφη κατάταξη, δημοσιεύθηκε από τον Tsuchida (1971) και παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν (Εικόνα 2.4). Οι καμπύλες ορίζουν περιοχές πολύ μεγάλης ή μεγάλης, αντίστοιχα, πιθανότητας ρευστοποίησης.



Εικόνα 2.4. Διάγραμμα πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφών ανάλογα με την κοκκομετρική τους καμπύλη (τροποποιημένο από τον Tsuchida, 1971)

Όσον αφορά τα αδρόκοκκα εδάφη, η δυνατότητα άμεσης αποστράγγισής τους τεκμηριώνει απόλυτα την ταξινόμησή τους ως μη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση, παρόλο που η συμπεριφορά τους σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση δε διέφερε σε μεγάλο βαθμό από αυτήν των άμμων, καθώς χονδρόκοκκα έως χαλικώδη εδάφη είναι, εν δυνάμει ικανά να αναπτύξουν υψηλές πιέσεις πόρων και κατά συνέπεια ρευστοποίηση. Ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών όμως, οδήγησαν στην αναθεώρηση των παραπάνω συμπερασμάτων. Σύμφωνα με τους Seed et al (2003) λοιπόν, το πλεονέκτημα της άμεσης αποστράγγισης των αδρόκοκκων έως χαλικωδών εδαφών εξουδετερώνεται όταν ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις: i) περιστοιχίζονται από λεπτόκοκκα εδάφη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται αστράγγιστες συνθήκες, ii) υπάρχει παρουσία λεπτόκοκκων τα οποία καταλαμβάνουν τα διάκενα ανάμεσα στα αδρόκοκκα στοιχεία του σχηματισμού με αποτέλεσμα την μείωση της διαπερατότητας του, iii) όταν το στρώμα του αδρόκοκκου σχηματισμού έχει μεγάλες διαστάσεις και κατά συνέπεια η απόσταση στην οποία θα πρέπει να γίνει άμεση αποστράγγιση κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης είναι μεγάλη. Όταν ικανοποιούνται, επομένως, αυτές οι προϋποθέσεις τα εδάφη θεωρούνται επιδεκτικά προς ρευστοποίηση.

Η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων και των αμμωδών εδαφών με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων, αποτελούσε πάντα αντικείμενο επιστημονικών μελετών και μάλιστα δυναμικό, καθώς, τα δεδομένα τα οποία υπάρχουν από επί τόπου δοκιμές σε περιοχές εμφάνισης ρευστοποίησης εμπλουτίζονται συνεχώς με νέα στοιχεία προερχόμενα από νεώτερους σεισμούς, Kocaelli, Turkey και Chi-Chi, Taiwan το 1999 (Bray et al. 2001, Sancio et al. 2002 και Sancio et al. 2003).

Αναπτύχθηκαν πολλές θεωρίες και αναθεωρήθηκαν πολλά συμπεράσματα σχετικά με τη συσχέτιση των φυσικών χαρακτηριστικών αργίλων και ιλύων, όπως είναι το ποσοστό λεπτόκοκκων και οι τιμές ορίων Atterberg, με την επιδεκτικότητα ρευστοποίησης, μέχρι την επικράτηση, έως και σήμερα, των αποτελεσμάτων των ερευνών των Seed et al. (2003). Βασικό μειονέκτημα των προηγούμενων κριτηρίων ήταν ότι εδάφη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση ταξινομούσαν ως μη ρευστοποιήσιμα με αποτέλεσμα τη λανθασμένη εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης.

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι Seed et al. (2003) διακρίνουν τρεις κατηγορίες επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών (Εικόνα 2.4). Στην πρώτη κατηγορία ταξινομούνται εδάφη με δείκτη πλαστικότητας (Plasticity Index, PI) μικρότερο του

12 και όριο υδαρότητας (Liquid Limit, LL) μικρότερο του 37 ενώ η περιεχόμενη υγρασία τους θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 80 % του LL. Τα εδάφη ονομάζονται εν δυνάμει ρευστοποιήσιμα και τοποθετούνται στη ζώνη A του διαγράμματος πλαστικότητας. Η δεύτερη κατηγορία (ζώνη B), περιλαμβάνει εδάφη των οποίων ο δείκτης πλαστικότητας δεν υπερβαίνει την τιμή 20 και το όριο υδαρότητας είναι μικρότερο του 37. Τα εδάφη αυτά θεωρούνται επιδεκτικά προς ρευστοποίηση όταν η περιεχόμενη υγρασία τους είναι μεγαλύτερη από το 85 % της τιμής του LL, αν και σύμφωνα με τους Seed et al. (2003), παρουσιάζουν πιο όλκιμη συμπεριφορά και ίσως δεν εμφανίσουν τόσο μεγάλες διαφορές στην τιμή της αντοχής και της δυσστησίας τους. Τέλος, τα εδάφη που ταξινομούνται στη ζώνη C του διαγράμματος πλαστικότητας θεωρούνται ως μη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση και, κατά συνέπεια, δε συντρέχουν λόγοι περαιτέρω διερεύνησης του δυναμικού ρευστοποίησης αυτών.

Στην περιοχή της ζώνης B ταξινομείται και μια ειδική κατηγορία αργιλικών εδαφών, η παρουσία των οποίων σε μια περιοχή επιβάλλει τη διενέργεια περαιτέρω έρευνας. Αυτά τα εδάφη, τα οποία ονομάζονται "ευαίσθητα", είναι στη πλειοψηφία τους άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας CL (Clay of low plasticity, CL) με μερικές εξαιρέσεις ιλύων χαμηλής πλαστικότητας ML (Silt of low plasticity, ML) (Εικόνα 2.5) και μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές λόγω μείωσης της αντοχής τους κατά τη διάρκεια σεισμικών ανακυκλιζόμενων διατμητικών φορτίσεων. Τα κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για την αναγνώριση τέτοιων εδαφών, σύμφωνα με τον Youd (1998) είναι τα παρακάτω :

- Τιμή ευαισθησίας μεγαλύτερη του 4
- Όριο υδαρότητας μικρότερο του 40
- Περιεχόμενη υγρασία μεγαλύτερη του 90 % του LL και
- Διορθωμένος αριθμός κρούσεων δοκιμής SPT $(N_1)_{60}$ μικρότερος του 5

παραπάνω συνθήκη ισχύει όμως, μόνο σε περιπτώσεις κατά τις οποίες στην ρευστοποιημένη κατά το παρελθόν περιοχή, οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη στιγμή της ιστορικής εμφάνισης παραμένουν ως είχαν (Youd 1984). Επίσης, σύμφωνα με τον Obermeier (1996), ερευνητικές εργασίες παλαιορευστοποίησης έδειξαν ότι το ίδιο στρώμα έχει επανειλημμένως ρευστοποιηθεί στο παρελθόν και μάλιστα ότι η εκτόνωση της υπερπίεσης των πόρων, μέσω της ροής προς την επιφάνεια μίγματος άμμου και νερού, πραγματοποιήθηκε μέσω προϋπαρχουσών οδών διαφυγής.

Το παραπάνω συμπέρασμα έρχεται, όμως, σε αντίθεση με τη διαδικασία ρευστοποίησης, όπως αυτή περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου, σύμφωνα με την οποία ένας εδαφικός σχηματισμός λόγω της αναδιάταξης των κόκκων και τη διαφυγή μέρους του νερού, το οποίο καταλαμβάνει το χώρο στα διάκενα, μετά την εμφάνιση του φαινομένου παρουσιάζει πιο πυκνή διάταξη. Ένα ήδη ρευστοποιημένο έδαφος θα έπρεπε να παρουσιάζει, δηλαδή, μεγαλύτερη αντίσταση στη ρευστοποίηση.

Την εξήγηση σε αυτήν την αντίφαση δίνει ο Obermeier (1996), με τη βοήθεια δεδομένων από θέσεις στην περιοχή New Madrid του 1811-1822. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, όταν ένα στρώμα χαλαρού σχηματισμού υπόκειται ενός αδιαπέρατου και ρευστοποιείται, τότε πράγματι το μεγαλύτερο τμήμα του συμπυκνώνεται μετά το συμβάν. Στην κορυφή όμως του συγκεκριμένου στρώματος, δηλαδή κοντά στην επαφή με το αδιαπέρατο, ένα τμήμα του παραμένει σε χαλαρή κατάσταση το οποίο συνεχίζει να παρουσιάζει μεγάλη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση ακόμα και μετά την εκτόνωση του φαινομένου. Αυτό συμβαίνει διότι στην περιοχή αυτή συγκεντρώνονται ποσότητες νερού, οι οποίες στη συνέχεια χαλαρώνουν τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων (Obermeier 1996). Το φαινόμενο αυτό επαληθεύτηκε με εργαστηριακές δοκιμές με τις οποίες μελετήθηκε η συμπεριφορά αμμωδών σχηματισμών ανάμεσα σε αργιλικά λεπτά στρώματα, στις οποίες παρατηρήθηκε κατά μήκος της βάσης των αργίλων η δημιουργία ενός νέου χαλαρού στρώματος άμμου (Elgamal et al. 1989).

Ο συνδυασμός ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης με το βαθμό επιδεκτικότητας των περιοχών, με βάση τα γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω, παρέχει τη δυνατότητα οριοθέτησης περιοχών επιδεκτικών προς ρευστοποίηση και τη σύνταξη αντίστοιχων προκαταρκτικών χαρτών.

Τέλος, όσον αφορά τα ιστορικά κριτήρια, θα πρέπει να τονιστεί ότι η ύπαρξη ιστορικών περιγραφών συντελεί στην αξιολόγηση της περιοχής ως θέση όπου στο μέλλον υπάρχει

πιθανότητα εμφάνισης ρευστοποίησης, ενώ η έλλειψη παρόμοιων αναφορών δε θα πρέπει να αποκλείει την πιθανότητα πρόκλησης ρευστοποίησης όταν τα υπόλοιπα δεδομένα οδηγούν σε αυτό το συμπέρασμα.

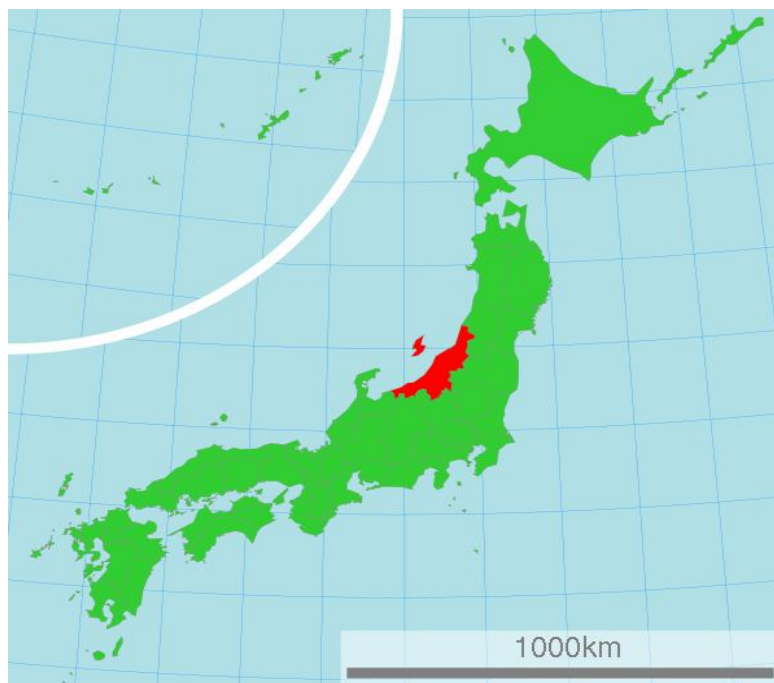
2.5. Διεθνείς Περιπτώσεις Ρευστοποιήσεων Μεγάλης Κλίμακας

Η ρευστοποίηση ενός υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού είναι πιθανό να προκαλέσει την εκδήλωση χαρακτηριστικών φαινομένων στην επιφάνεια του εδάφους όπως κώνοι άμμου ή αλλιώς "ηφαίστεια άμμου", καθώς επίσης, και την ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού από εδαφικές διαρρήξεις. Επιπλέον, είναι πιθανή η πρόκληση εδαφικών καθιζήσεων, ενώ υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας κατασκευών οι οποίες εδράζονται στο ρευστοποιημένο σχηματισμό.

Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ($M > 6.5$). Ορόσημο για τη συστηματική μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης, αποτέλεσαν ουσιαστικά οι δύο σεισμικές δονήσεις στην Niigata (Ιαπωνία) και στην Αλάσκα (Η.Π.Α.) το 1964. Στις δύο αυτές περιπτώσεις, η ρευστοποίηση των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών προκάλεσε μεγάλης κλίμακας αστοχίες σε κατασκευές τόσο στην πόλη της Niigata όσο και στην πόλη Anchorage στην Αλάσκα.

2.5.1. Niigata (Japan), 1964

Τα αποτελέσματα του φαινομένου της ρευστοποίησης απεικονίστηκαν με τον πιο δραματικό τρόπο στον σεισμό που έπληξε την πόλη Niigata της Ιαπωνίας (Εικόνα 2.5) στις 16 Ιουνίου του 1964 (Εικόνες 2.6 και 2.7). Το επίκεντρο του σεισμού μεγέθους 7,3 της κλίμακας Ρίχτερ ήταν 55 Km μακριά από την Niigata, μια πόλη 300.000 κατοίκων στη δυτική πλευρά της Ιαπωνίας, όπου ο ποταμός Shinano εισχωρεί στη θάλασσα. Η όχθη του ποταμού καλύπτεται από στρώματα άμμου πάχους 100 m πάνω στα οποία κτίστηκε η πόλη. Τα παλαιότερα τμήματα της πόλης ανεγερθήκαν πάνω σε υψηλούς αμμόλοφους. Τα νεώτερα τμήματα της πόλης κτίστηκαν πάνω σε νεώτερης ηλικίας ιζήματα και σε ανακτειθήσα γη κοντά στον ποταμό (ο αγγλικός όρος αναφέρεται ως reclaimed land και αποτυπώνει την προσπάθεια του ανθρώπου να επεκτείνει την έκταση της γης απομονώνοντας ουσιαστικά ένα παράκτιο κομμάτι της θάλασσας).



Εικόνα 2.6. Με κόκκινο απεικονίζεται η περιοχή της Niigata, στον ευρύτερο χάρτη της Ιαπωνίας

Εκτεταμένες περιοχές από ιζήματα που βρισκόντουσαν στο επίπεδο της θάλασσας ρευστοποιήθηκαν. Το έδαφος παρουσίασε εκτεταμένες ρωγματώσεις και το νερό που βρισκόταν κάτω από την επιφάνεια του ανήλθε σε αυτή, ενώ δημιουργήθηκαν παράλληλα τεράστιοι κρατήρες από άμμο που θα μπορούσαν να παρομοιαστούν με μεγάλες τρύπες κατασκευασμένες από τυφλοπόντικες. Κάποιες από αυτές περιβαλλόντουσαν από δαχτυλίδια άμμου τα οποία ήρθαν στην επιφάνεια από το ανοδικό νερό του υπεδάφους.



Εικόνα 2.7. Ανατροπή πολυκατοικιών στην πόλη Niigata της Ιαπωνίας λόγω σεισμικής δόνησης μεγέθους Ms 7.5 που προκάλεσε το φαινόμενο της ρευστοποίησης

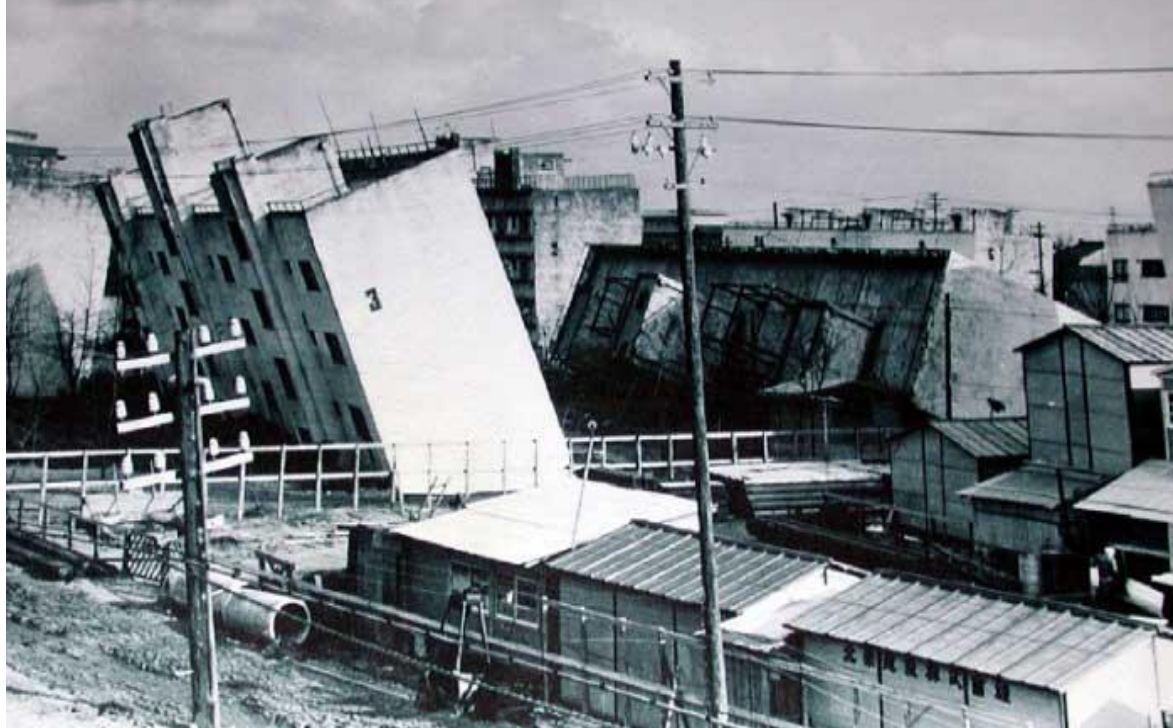


Εικόνα 2.8. Ανατροπή πολυκατοικιών λόγω ρευστοποίησης των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών (Σεισμική δόνηση μεγέθους Ms 7.5 στη Niigata, Ιαπωνία, το 1964)

Καθώς η ρευστοποίηση επεκτεινόταν σε όλο και μεγαλύτερες περιοχές, τα κτίρια άρχιζαν να καθιζάνουν, κάποια εκ των οποίων μέχρι και ένα μέτρο σε βάθος, ενώ αυτοκίνητα και φορτηγά βυθίστηκαν ολόκληρα μέσα στην κινούμενη άμμο. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι μία μεγάλη ορθογώνια δεξαμενή επεξεργασίας αστικών λυμμάτων, η κορυφή της οποίας βρισκόταν αρχικά στο επίπεδο του εδάφους, έγειρε και ανυψώθηκε δύο με τρία μέτρα.

Ένα κτίριο από ένα συγκρότημα διαμερισμάτων στο Kawagishi-cho αναποδογύρισε, "ξαπλώνοντας" ουσιαστικά στο έδαφος, παραμένοντας εντελώς ανέπαφο, ενώ οι ένοικοι βγήκαν από το κτίριο περπατώντας πάνω στην πλαϊνή πλευρά του (Εικόνες 2.8, 2.9, 2.10). Πολλά από τα εν λόγω κτίρια στη συνέχεια ανυψώθηκαν πίσω στην αρχική τους θέση, προστέθηκαν επιπλέον μέτρα στήριξης και επαναλειτούργησαν. Οι ρευστοποιήσεις προκάλεσαν, επίσης, σοβαρές ζημιές σε γέφυρες, αυτοκινητόδρομους, εγκαταστάσεις παροχής υπηρεσιών, προκυμαίες και λοιπές λιμενικές εγκαταστάσεις, μονάδες επεξεργασίας πετρελαίου και σιδηροδρόμους.

Kawagishi-Cho, Niigata City, Japan 1964: M7.5 Niigata Earthquake



Εικόνα 2.9. Φωτογραφία που θα μπορούσε να αναπαριστά πίνακα του Νταλί. Τα καταστροφικά αποτελέσματα της ρευστοποίησης είναι κάτι παραπάνω από εμφανή.

Η Niigata αποτελεί την χαρακτηριστική περίπτωση απώλειας φέρουσας ικανότητας που προκαλείται από ρευστοποίηση μετά από έναν σεισμό. Στο εργαστήριο του στο Berkeley, ο Seed χρησιμοποίησε δείγμα άμμου αναπαριστώντας τις συνθήκες που επικρατούσαν στη Niigata κατά τη διάρκεια του σεισμού για να δείξει τον πιθανό χρονισμό και την αλληλουχία των γεγονότων της ρευστοποίησης στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η αναπαράσταση των συνθηκών κατέδειξε με δραματικό τρόπο την σημασία και την σημαντικότητα της δευτερογενούς ρευστοποίησης, η οποία προκαλείται από την ανοδική ροή του νερού από τις αρχικά ρευστοποιημένες υποκείμενες ζώνες άμμου.



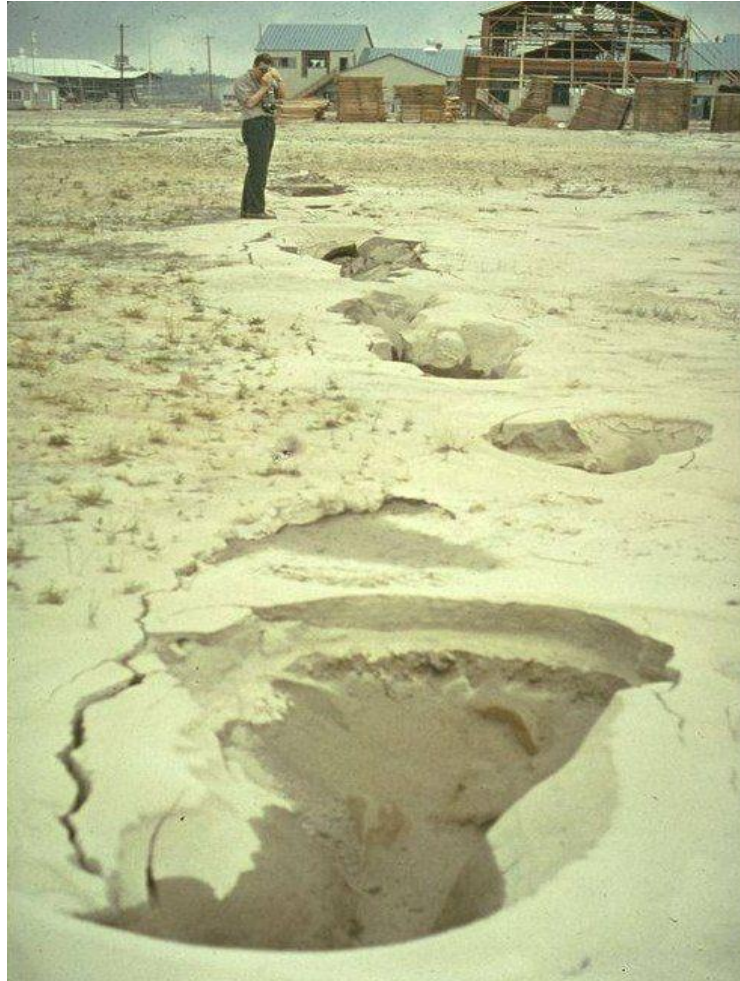
Εικόνα 2.10. Ένοικοι βρίσκουν οδό διαφυγής από τα κεκλιμένα – σχεδόν οριζοντιοποιημένα – κτίρια από την πρόσοψη αυτών. Πολλά από τα κτίρια στη συνέχεια επαναανυψώθηκαν και επαναλειτούργησαν

Τα πειράματα που διεξήγαγε ο Seed δείχνουν ότι η ρευστοποίηση, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η πίεση του νερού των πόρων εξισώνεται με την πίεση που εσωκλείεται στο υπερκείμενο έδαφος, εκδηλώθηκε κατά πάσα πιθανότητα σε βάθη που κυμαίνονταν από 4.5 μέχρι και 12 m κατά το σεισμό συνολικής διάρκειας πενήντα δευτερολέπτων. Τρία λεπτά μετά το πέρας της σεισμικής ταλάντωσης, το έδαφος είχε ρευστοποιηθεί σε βάθος τριών μέτρων από την επιφάνεια. Ένα λεπτό αργότερα η ρευστοποίηση είχε φτάσει στο ένα μέτρο από το έδαφος και δεκατρία λεπτά αργότερα στα τριάντα εκατοστά. Μέχρι εκείνη τη στιγμή οι δομές είχαν αρχίσει, ήδη, να καθιζάνουν και το κρίσιμο στρώμα της απώλειας της αντοχής – το οποίο δεν βρίσκεται στην επιφάνεια αλλά ακριβώς κάτω από τα θεμέλια των κτιρίων – είχε προσεγγιστεί.

Αμμόλακκοι (sand boils)

Οι αμμόλακκοι (sand boils) είναι ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να συνδέεται με το φαινόμενο της ρευστοποίησης (Εικόνα 2.11). Προκαλείται από τη διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές ενός αμμόλοφου, προκαλώντας εσωτερική διάβρωση ενώ παράλληλα η μετατόπιση κόκκων εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σωλήνα μέσα στο ανάχωμα. Οι αμμόλακκοι είναι ένα φαινόμενο το οποίο δύσκολα μπορεί να αντιμετωπιστεί. Ο πιο

αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισής του είναι η δημιουργία σώματος νερού πάνω από τον βραστήρα, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ικανή ποσότητα πίεσης για να σταματήσει τη ροή του νερού. Με την επίτευξη μίας χαμηλότερης ροής δυσχεραίνεται πολύ η μετακίνηση των κόκκων του εδάφους. Το σώμα νερού δημιουργείται συνήθως από σακιά γεμισμένα με άμμο τα οποία τοποθετημένα δημιουργούν ένα δαχτυλίδι γύρω από το ανάχωμα.

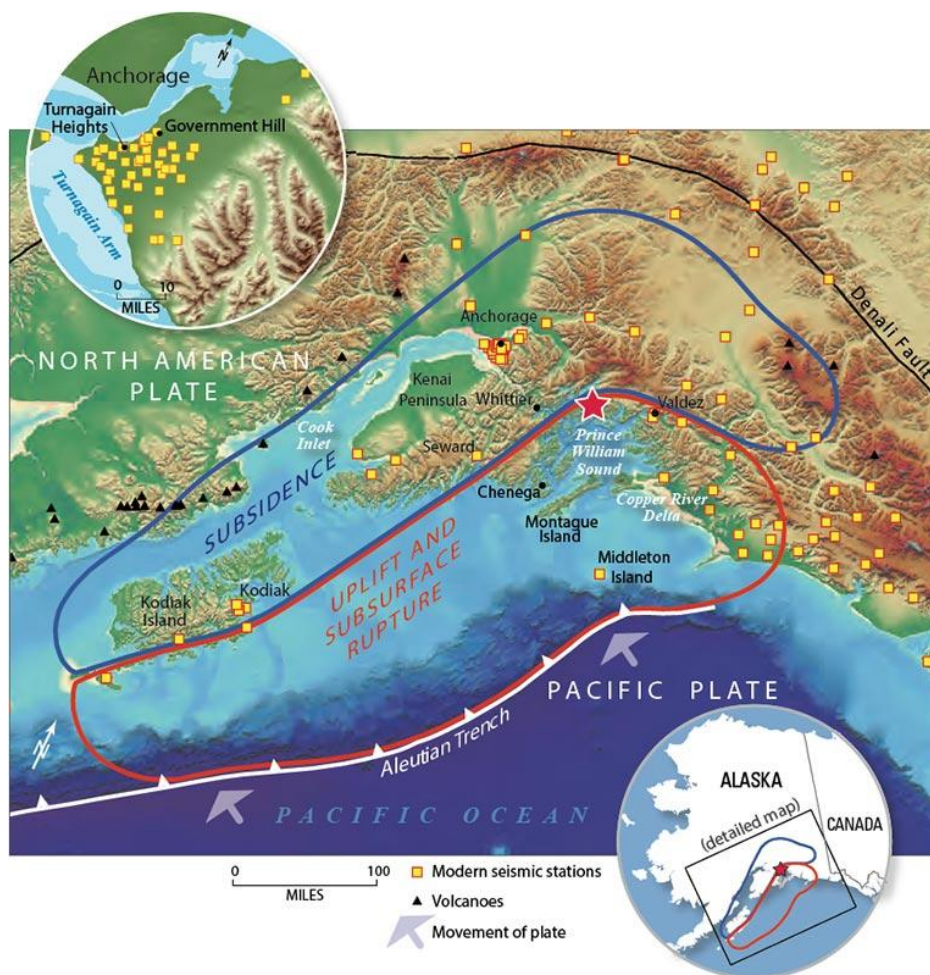


Εικόνα 2.11. Αμμόλακκοι (sand boils) και ρωγμές στο έδαφος (ground fissures) είχαν παρατηρηθεί σε πολλές τοποθεσίες στην πόλη Niigata μετά το σεισμό του 1964.

2.5.2. Anchorage, Alaska (USA), 1964

Ο σεισμός που έπληξε την Αλάσκα στις 27 Μαρτίου του 1964, μεγέθους 9,2 της κλίμακας Ρίχτερ, ήταν και είναι ο μεγαλύτερος καταγεγραμμένος σεισμός της Βορείου Αμερικής - και αυτός που μελετήθηκε περισσότερο από οποιονδήποτε άλλον στην ιστορία της χώρας - και ο δεύτερος μεγαλύτερος που έχει καταγραφεί ποτέ μετά τον σεισμό του 1960 στη Χιλή μεγέθους

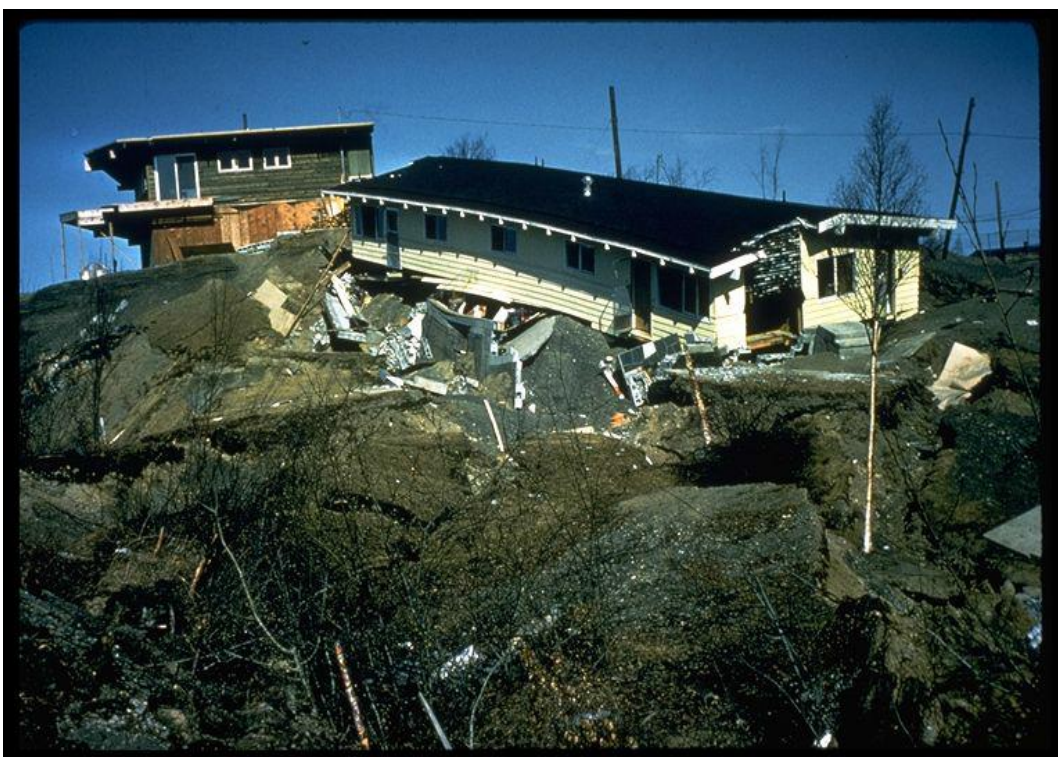
9,5 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ. Η σεισμική διάρρηξη ξεκίνησε περίπου σε 25 Km βάθος από την επιφάνεια, με το επίκεντρο της να βρίσκεται 10 Km ανατολικά του College Fiord, 90 Km δυτικά της πόλης Valdez και 120 Km ανατολικά της πόλης Anchorage (Εικόνα 2.12). Είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτεταμένων δραματικών φαινομένων εδαφικής κατάρρευσης, πολλά από τα οποία ήταν αποτέλεσμα ρευστοποίησης.



Εικόνα 2.12. Ο χάρτης δείχνει το επίκεντρο του σεισμού (κόκκινο αστεράκι) που έπληξε την Αλάσκα το 1964. Ο σεισμός προκλήθηκε όταν η πλάκα του Ειρηνικού κινήθηκε βόρεια, κάτω από την Βόρεια Αμερικάνικη πλάκα

Στην παράκτια πόλη Valdez, κτισμένη στο δέλτα ενός ποταμού σε έδαφος αποτελούμενο από λάσπη, λεπτή άμμο και χαλίκια, μία βίαιη και ξαφνική γεωλίσθηση μετέφερε στο λιμάνι 75 εκατομμύρια κυβικά μέτρα χώματος και εδάφους μετατοπίζοντας την ακτογραμμή 150 m προς την ενδοχώρα. Οι λιμενικές εγκαταστάσεις και οι εγκαταστάσεις πλησίον της ακτής καταστράφηκαν ολοσχερώς. Σε κάποια τμήματα της περιοχής, έδαφος βάθους μέχρι και 60

μέτρα ολίσθησε εκατοντάδες μέτρα μέσα στον κόλπο. Ο Seed αναφέρει ότι η ολίσθηση ήταν αποτέλεσμα της ρευστοποίησης των ιζημάτων, πάνω στα οποία είχαν κατασκευαστεί οι εγκαταστάσεις (Εικόνα 2.13). (Η κοινότητα ξανακτίστηκε από την αρχή, αυτήν τη φορά όμως σε καινούρια τοποθεσία περισσότερο από 6 Km μακριά προς τα βορειοδυτικά, σε πιο στερεό έδαφος. Ο νοτιότερος τερματικός σταθμός του πετρελαιαγωγού της Αλάσκας βρίσκεται στην καινούρια αυτήν τοποθεσία). Παρόμοιες ολισθήσεις στη λίμνη Kenai και στην πόλη Seward, όπου διαδοχικές λωρίδες γης εξαφανιζόντουσαν ολισθαίνοντας μέσα στον κόλπο καθόλη τη διάρκεια του σεισμού – διήρκεσε συνολικά σχεδόν 4 min – επέφεραν, επίσης, δραματικές αλλαγές στη διαμόρφωση του τοπίου.



Εικόνα 2.13. Αστοχία κατασκευής λόγω εδαφικής ροής στο Anchorage (Σεισμική δόνηση μεγέθους Mw 9.2 στην Αλάσκα, Η.Π.Α. το 1964)

Σύμφωνα με τον Seed, τα καταστροφικά φαινόμενα που συνέβησαν στη λίμνη Kenai και στις πόλεις Valdez και Seward είναι αποτέλεσμα πλευρικών ρευστοποιήσεων και ρευστοποιήσεων στρωμάτων άμμου που βρισκόντουσαν κάτω από ένα σταθερό κατά τα άλλα έδαφος .

Σύμφωνα με τον T. Leslie Youd, ειδικό του U.S.G.S. (United States Geological Survey) στις ρευστοποιήσεις, οι πλευρικές διαρρήξεις είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εδαφικής αστοχίας που προκαλείται από ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Οι αστοχίες αυτές

αναπτύσσονται σε πρανή με μηδαμινή ή με πολύ μικρή κλίση. Σε αντίθεση με τις ολισθήσεις, οι οποίες είναι καταστροφικές και μπορούν να μετακινήσουν μεγάλες ποσότητες εδάφους σε μεγάλες αποστάσεις σε αρκετά μεγάλες ταχύτητες, οι πλευρικές εδαφικές διαρρήξεις αποτελούνται από λιγότερο βίαιες διαρρήξεις λίγων μέτρων έως μερικών δεκάδων μέτρων.

Οι πλευρικές εξαπλώσεις-διαρρήξεις (Εικόνα 2.14), αποτέλεσμα ρευστοποίησης, διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην πιο διάσημη καταστροφή που έπληξε τη Βόρεια Αμερική, το σεισμό του San Francisco – και την εμφάνιση εστιών φωτιάς σε όλη την πόλη – το 1906. Σύμφωνα με τον Youd, οι αστοχίες που υπέστησαν όλοι οι μεγάλοι αγωγοί πετρελαίου σημειώθηκαν σε περιοχές όπου εμφανίστηκαν πλευρικές εξαπλώσεις- διαρρήξεις.



Εικόνα 2.14. Ο αυτοκινητόδρομος Seward που συνδέει την πόλη Anchorage με τη χερσόνησο Kenai στα νοτιοδυτικά, υπέστη δραματικές παραμορφώσεις εξαιτίας του σεισμού του 1964.

Στο σεισμό του 1964 στην Αλάσκα, 266 γέφυρες υπέστησαν ζημιές σε τέτοιο βαθμό που ήταν αναγκαστική η πλήρης επισκευή ή ακόμα και η αντικατάστασή τους. Σύμφωνα με τον Youd, όλες σχεδόν οι αστοχίες προκλήθηκαν λόγω της συμπίεσης των εδαφικών σχηματισμών εξαιτίας των πλευρικών εξαπλώσεων-διαρρήξεων των ρευστοποιημένων αποθέσεων στα κανάλια του ποταμού. Τα καταστρώματα των γεφυρών έγειραν και πολλά από αυτά μετατοπίστηκαν ακόμα και κάτω από τα αντερείσματα (Εικόνες 2.15 και 2.16).



Εικόνα 2.15. Αλάσκα 1964, Αστοχία γέφυρας που προκλήθηκε από τη ρευστοποίηση των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών, αποτελούμενων ως επί τω πλείστον από ποτάμιες αποθέσεις, εξαιτίας του σεισμού

Συνολικά οι πλευρικές εξαπλώσεις προκάλεσαν ζημιές αξίας 60.000.000 δολλαρίων, από τη συνολικά υπολογιζόμενη ζημιά των 300.000.000 δολαρίων που προκλήθηκε από το σεισμό του 1964. Οι εδαφικές αστοχίες προκάλεσαν περίπου το 60 % της συνολικής ζημιάς, η οποία προκλήθηκε κυρίως από ρευστοποίηση κορεσμένων άμμων και από εξασθένηση των ευαίσθητων αργιλικών εδαφών. (Εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.16. Παραμόρφωση των γραμμών του σιδηροδρομικού δικτύου και του δρόμου στην περιοχή Portage κατά το σεισμό του 1964. Το περιβάλλον έδαφος έχει βυθιστεί εξαιτίας της επέλασης του νερού, όπως φαίνεται στα αριστερά της εικόνας.

2.6. Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων στον Εντοπισμό Ρευστοποιήσεων

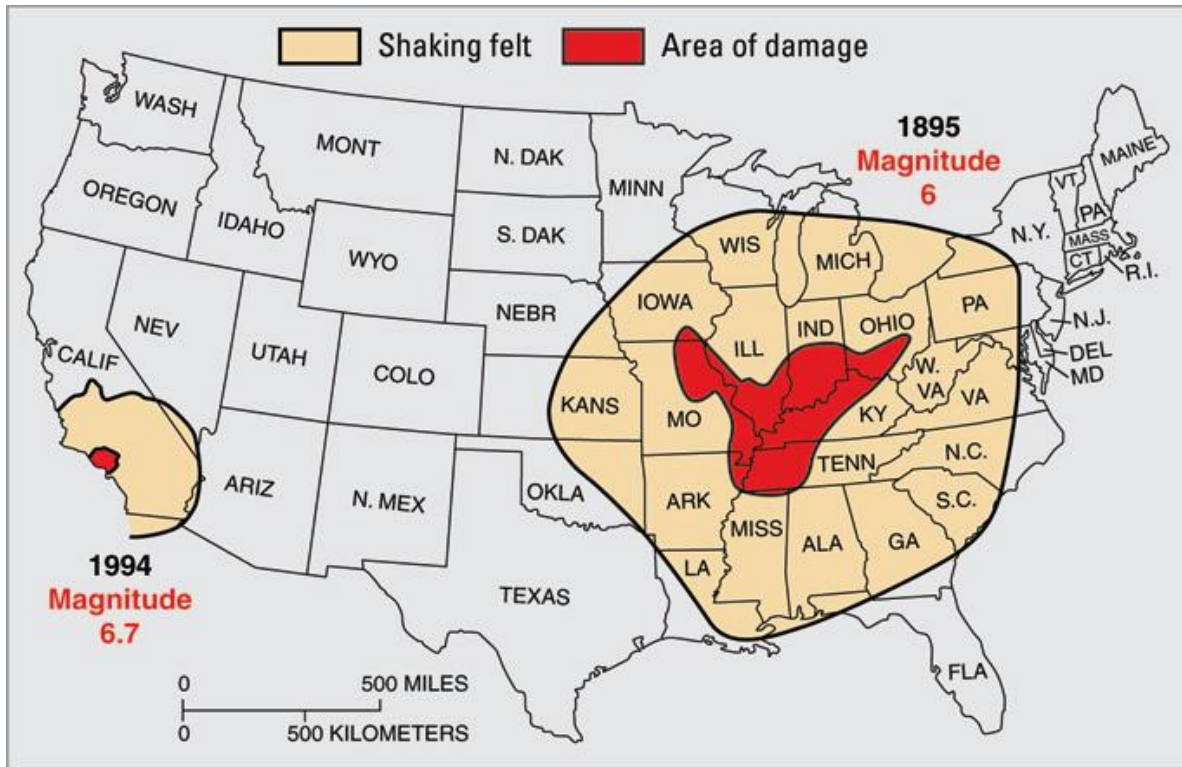
2.6.1. Γεωφυσικές Διασκοπήσεις σε Ρευστοποιημένους Σχηματισμούς λόγω Σεισμικής Δράσης στην Περιοχή New Madrid, Η.Π.Α

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και των περιορισμών που παρουσιάζει η εφαρμογή ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών γεωφυσικών μεθόδων στην απεικόνιση θαμμένων στο έδαφος ρευστοποιημένων σχηματισμών, η

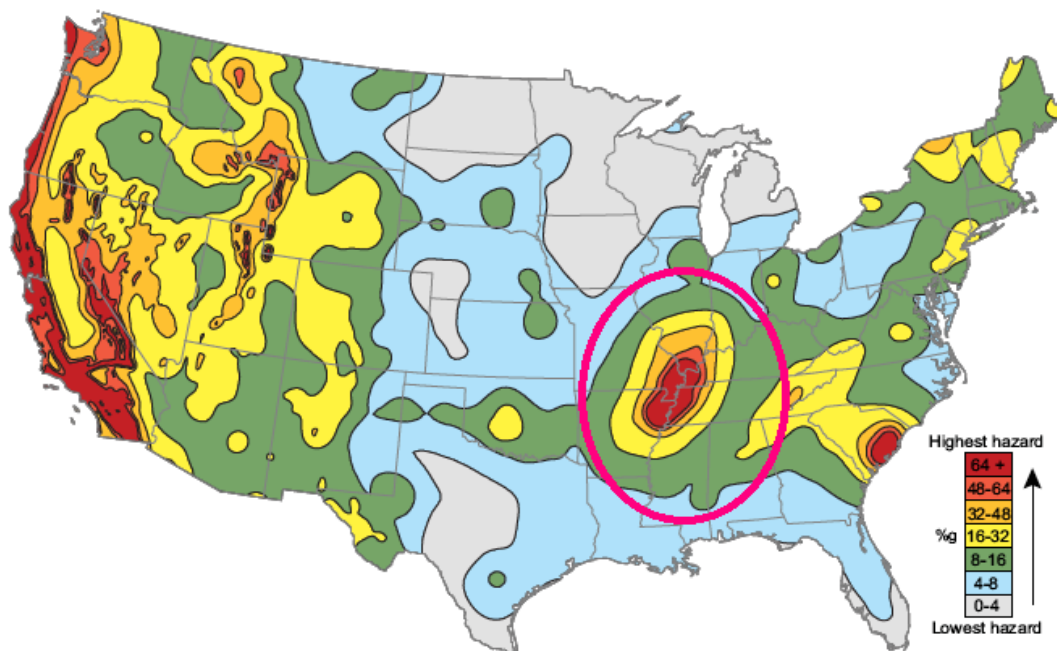
ρευστοποίηση των οποίων ήταν αποτέλεσμα έντονης σεισμικής δραστηριότητας. Οι γεωφυσικές έρευνες που διεξήχθησαν στην περιοχή New Madrid, στις κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, σε τοποθεσίες όπου υπάρχει αυξημένη παρουσία ρευστοποιήσεων, έδειξαν ότι αυτές οι τεχνικές απεικόνισης του υπεδάφους μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο στον κλάδο της παλαιοσεισμολογίας. Οι παλαιοσεισμολογικές έρευνες που σχετίζονται με την ανίχνευση των χαρακτηριστικών των ρευστοποιήσεων παρέχουν ένα από τα ελάχιστα μέσα για την εκτίμηση των διαστημάτων επανάληψης μεγάλων σεισμών στην περιοχή New Madrid, μια περιοχή με πληθώρα αποδείξεων για την ύπαρξη σεισμικών φαινομένων αλλά ταυτόχρονα με πολύ μικρή καταγραφή αρχείου με τη βοήθεια επιστημονικών οργάνων. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες μελέτες ήταν υπέργειες με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της διατάραξης του εδάφους. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς οι έρευνες διεξήχθησαν σε κρατικά προστατευμένες αρχαιολογικές τοποθεσίες. Έρευνες σαν αυτές που θα αναλυθούν παρακάτω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών των ρευστοποιήσεων στο υπέδαφος και για τη δημιουργία ερευνητικών τάφρων στις σωστές θέσεις και με το βέλτιστο προσανατολισμό με σκοπό εκτεταμένες γεωλογικές μελέτες.

Το δυναμικό της περιοχής New Madrid, στις κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, ως προς την πιθανότητα εμφάνισης σεισμών έγινε γνωστό το διάστημα 1811-1812 μετά από τους μεγάλους σεισμούς που έπληξαν την περιοχή αλλά και την ιδιαίτερα εκτεταμένη περίοδο των μετασεισμών. Η κίνηση του εδάφους, η οποία προκλήθηκε από σεισμούς οι οποίοι δημιουργήθηκαν στο εσωτερικό των τεκτονικών πλακών, έγινε αισθητή στη Νέα Υόρκη ακόμα και σε τμήματα του Καναδά (Street and Nuttli 1984) (Εικόνα 2.17) και προκάλεσε εκτεταμένες εδαφικές ρευστοποιήσεις κατά μήκος της κοιλάδας του Μισσισσιππή. Αν και οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος σεισμοί αυτής της περιόδου ήταν της τάξης του 7,4–8,1, στη σημερινή εποχή η περιοχή χαρακτηρίζεται από μικρού έως μεσαίου μεγέθους σεισμική δραστηριότητα (Atkinson and Hanks 1995, Johnston 1996, Hough et al. 2000). Οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί τις τελευταίες δεκαετίες συγκλίνουν στο ότι γεγονότα σαν αυτά που συνέβησαν στην περιοχή New Madrid, έχουν τη δυνατότητα να επαναλαμβάνονται συχνά (Johnston and Nava 1985), παρουσιάζοντας μάλιστα μέσο εκτιμώμενο διάστημα επανάληψης περί τα 500 χρόνια (Tuttle et al. 2002).

Οι τοποθεσίες ρευστοποιήσεων που κρίνονται κατάλληλες για παλαιοσεισμολογική έρευνα επιλέγονται μετά από εξονυχιστική εξέταση εναέριων φωτογραφιών της επιλεγμένης περιοχής και μέσω έρευνας πεδίου (Εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.17. Χάρτης των Η.Π.Α, όπου με κόκκινο χρώμα (κεντροανατολικές Η.Π.Α, περιοχή New Madrid) απεικονίζεται το επίκεντρο του σεισμού του 1895 (παρόμοιος με αυτόν του 1811-1812) και οι περιοχές που υπέστησαν σοβαρές ζημιές από αυτόν, ενώ με μπεζ χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές στις οποίες ο σεισμός έγινε αισθητός.



Εικόνα 2.18. Χάρτης των Η.Π.Α που παρουσιάζει το δυναμικό κάθε περιοχής ως προς την εμφάνιση σεισμικής δραστηριότητας. Εσωτερικά του ροζ κύκλου επισημαίνεται η περιοχή New Madrid, η οποία παρουσιάζει το υψηλότερο δυναμικό μαζί με την δυτική ακτή των Η.Π.Α.

2.6.1.1. Γεωφυσικές Διασκοπήσεις σε Τοποθεσίες με Πολιτισμικό (Αρχαιολογικό) Ενδιαφέρον, κυρίως με τη Μέθοδο της Ηλεκτρικής Αντίστασης

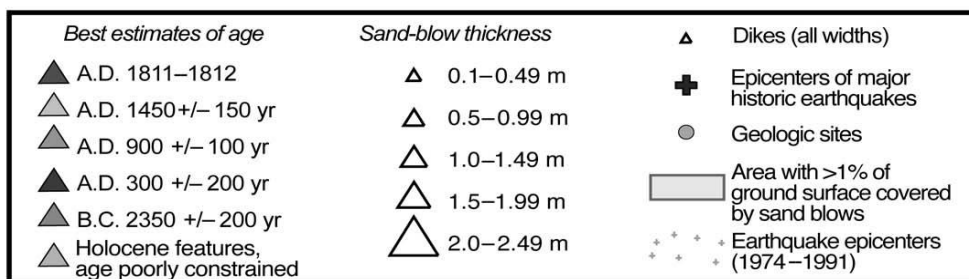
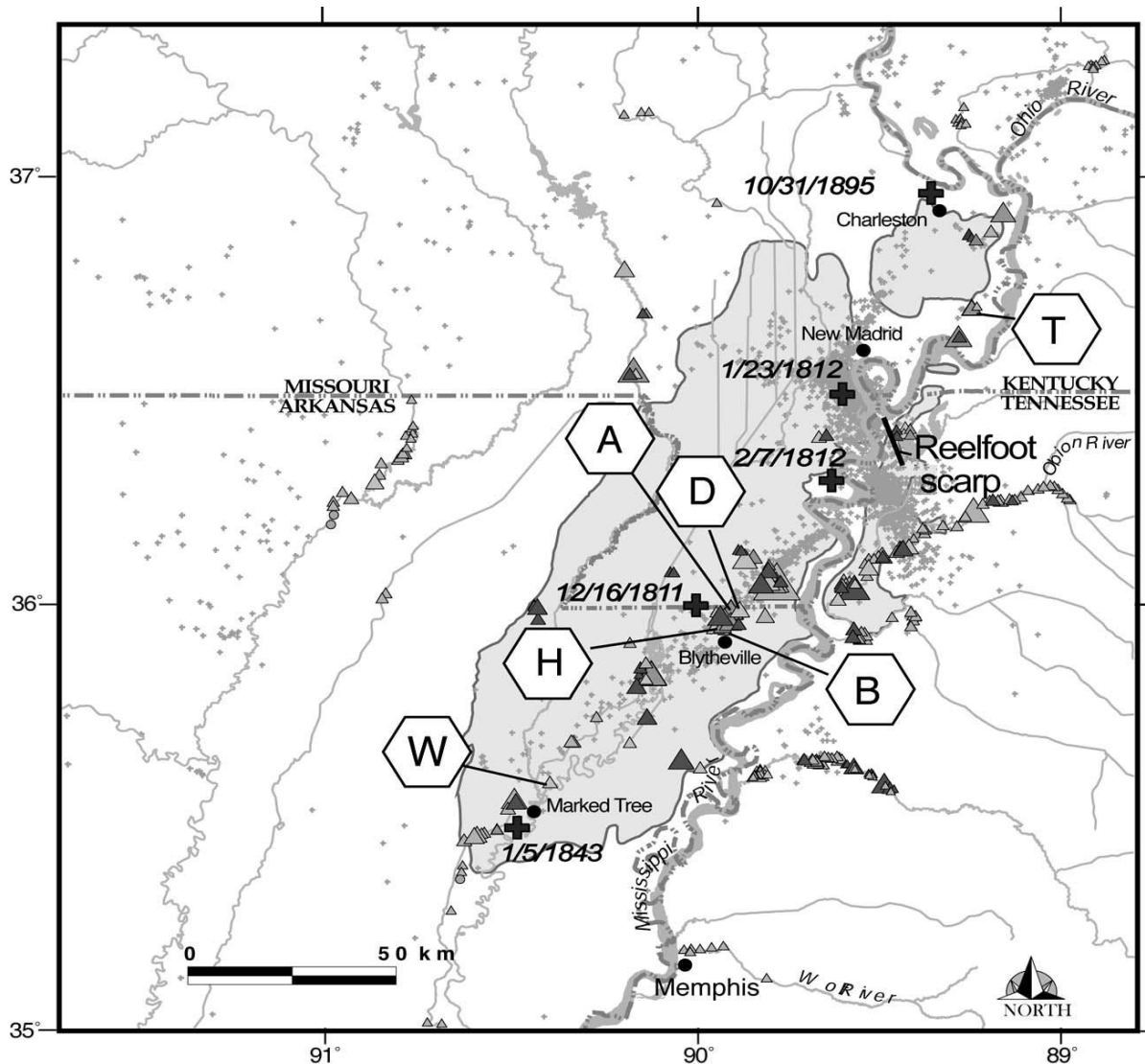
Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις χρησιμοποιούνται σε μελέτες παλαιορυστοποίησης σε αρχαιολογικές τοποθεσίες με σκοπό τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών των ρυστοποιήσεων, όπως σχηματισμοί όπου η άμμος έχει ανέλθει στην επιφάνεια και χαντάκια άμμου, καθώς και διάφορα ανθρωπογενούς προέλευσης πολιτιστικά απομεινάρια θαμμένα στο έδαφος. Μπορούν επιπροσθέτως να βοηθήσουν στον καθορισμό του βαθμού στον οποίο έχουν αναπτυχθεί τα χαρακτηριστικά της ρυστοποίησης και της κατάλληλης θέσης για πραγματοποίηση ανασκαφών και εκσκαφών. Με τη χρήση τους μεγιστοποιείται και βελτιστοποιείται η απόληψη πληροφοριών σχετικά με τους υπεδάφικούς σχηματισμούς, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται η διατάραξη του εδάφους. Αν και κάποια χαρακτηριστικά των ρυστοποιήσεων, κυρίως τα νεώτερα σε ηλικία, είναι άμεσα ορατά στην επιφάνεια του εδάφους, τα παλαιότερα είναι θαμμένα κάτω από νεώτερα ιζήματα και σχηματισμούς και για αυτόν το λόγο η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη.

Σε τοποθεσίες ρυστοποιήσεων έχει εφαρμοστεί μια πληθώρα γεωφυσικών μεθόδων απεικόνισης του υπεδάφους με κυμαινόμενους βαθμούς επιτυχίας (Collier 1998, Wolf et al 1998,

Tuttle et al 1999, Barnes 2000, Liu and Li 2001, Browning 2003, Al-Shukri et al. 2005). Καταλυτικό ρόλο για την απεικόνιση του υπεδάφους με τη χρήση των ηλεκτρικών μεθόδων παίζει η διαφορά στις φυσικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα ιζήματα που συνιστούν τον κύριο όγκο του ρευστοποιημένου εδάφους και αυτά των αρχικών περιβαλλόντων σχηματισμών. Στην πλειοψηφία τους οι ρευστοποιημένοι σχηματισμοί αποτελούνται από μεσαίου μεγέθους κόκκους άμμου με λίγα μόνο κλάσματα λεπτόκοκκων. Σε αντίθεση, οι αρχικές περιβάλλουσες ποτάμιες αποθέσεις είναι ένας συνδυασμός αργίλου, λάσπης και αμμώδους λάσπης. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πορωδών ιζημάτων σχετίζεται με το βαθμό κορεσμού τους και την περιεκτικότητά τους σε άργιλο. Η ηλεκτρική αντίσταση των αμμωδών ρευστοποιημένων σχηματισμών μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτήν των γειτονικών λεπτόκοκκων αρχικών ιζημάτων. Στην περίπτωση, μάλιστα, που οι αρχικοί σχηματισμοί είναι και αυτοί πλούσιοι σε αργίλους ή οργανική ύλη, η αντίθεση αυτή γίνεται ακόμα πιο έντονη.

Στις περισσότερες έρευνες που διεξήχθησαν στην περιοχή New Madrid (Εικόνα 2.19) χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός γεωφυσικών μεθόδων, κυρίως ηλεκτρικής αντίστασης, εδαφικής αγωγιμότητας και μαγνητικών. Η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιείται με δύο διατάξεις, τη διάταξη Wenner και τη διάταξη διπόλου-διπόλου με τα ηλεκτρόδια να απέχουν μεταξύ τους όχι περισσότερο από 5 m. Οι μέθοδοι αυτές είναι κατάλληλες για τον εντοπισμό πλευρικών διαφοροποιήσεων στους σχηματισμούς στα ανώτερα στρώματα του εδάφους. Αντίθετα, η μέθοδος των ηλεκτρομαγνητικών διεξάγεται κυρίως για αναγνωριστικούς σκοπούς. Αν και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρούς χρόνους επιτόπιας ανάκτησης δεδομένων, κάποιες φορές η ανάλυση των απεικονίσεων δεν είναι τόσο ικανοποιητική.

Η μαγνητική γεωφυσική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στις τοποθεσίες των ρευστοποιήσεων για τον εντοπισμό εδαφικών οριζόντων εκμεταλλευόμενων από τον ιθαγενή αμερικάνικο πληθυσμό και πολιτισμικών τους χαρακτηριστικών όπως αποθηκευτικά πηγάδια και υπόγεια τοιχώματα. Κεραμικά και άλλα ψημένα πήλινα χειροτεχνήματα των πληθυσμών αυτών, θαμμένα στο έδαφος, μπορεί να παρουσιάζουν υψηλές ποσότητες παραμένουστος μαγνητισμού.



Εικόνα 2.19. Χάρτης της περιοχής New Madrid όπου απεικονίζονται οι περιοχές έρευνας καθώς και οι εκτιμώμενες ηλικίες και τα μεγέθη των χαρακτηριστικών των ρευστοποιήσεων (Tuttle et al. 2002). Οι περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν οι μελέτες περιλαμβάνουν τις Archway (A), Bugg (B), Dillahunt (D), Haynes (H), Towosahgy (T) και Walker (W). Η περιοχή των επιφανειακών σχηματισμών όπου η άμμος ανήλθε στην επιφάνεια είναι από τον Saucier (1977) και Obermeier (1989).

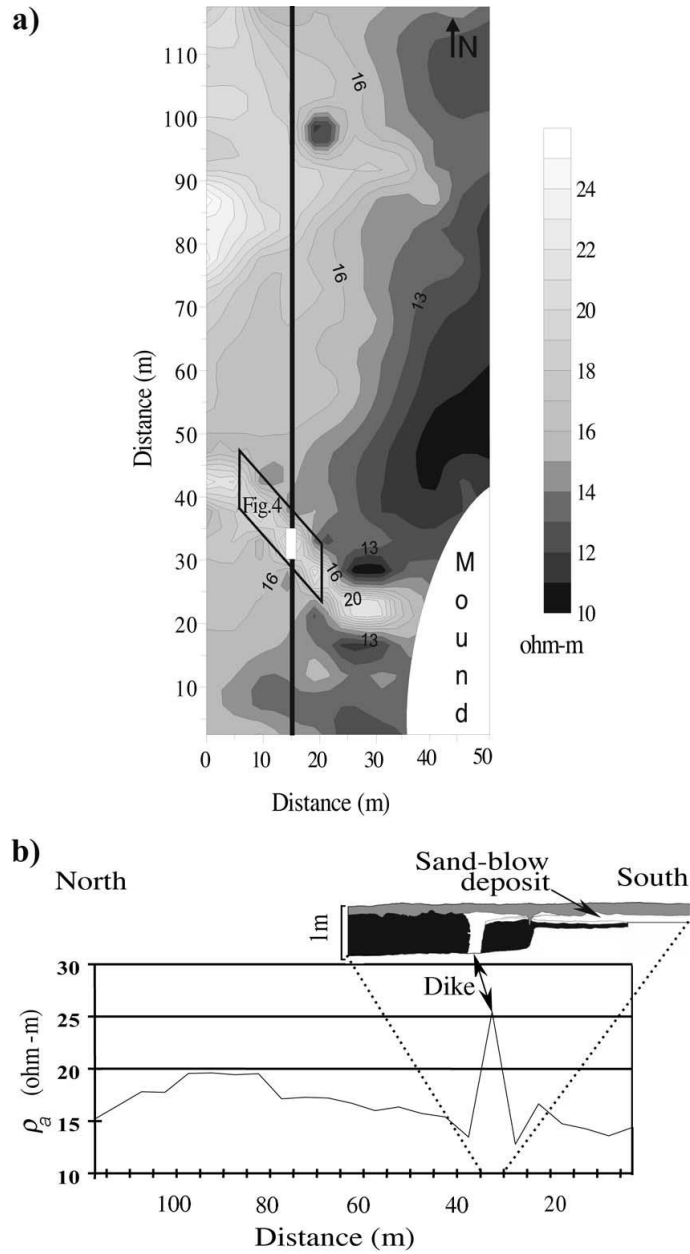
Τα χαρακτηριστικά αυτά μαζί με τα διάφορα θαμμένα αντικείμενα μπορούν να αποτελέσουν έναν πολύ καλό τρόπο εκτίμησης της ηλικίας των ρευστοποιήσεων καθώς η χρονολόγησή τους περιορίζει σημαντικά το εύρος της. Η ικανότητα υπεδαφικής απεικόνισης με τη χρήση της μαγνητικής μεθόδου εξαρτάται άμεσα από την διαφορά στις ιδιότητες μεταξύ των χαρακτηριστικών των οριζόντων-αντικειμένων και των γειτονικών σχηματισμών αλλά και από τη σχέση μεταξύ του μεγέθους των αντικειμένων-χαρακτηριστικών και της απόστασης μεταξύ των μετρήσεων. Επειδή το μέγεθος των ανθρωπογενών αυτών γνωρισμάτων και το βάθος στο οποίο βρίσκονται συνήθως δεν ξεπερνάει το ένα μέτρο, η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων κυμαίνεται από 0.5–1.5 m. Επίσης, σε σημεία του υπεδάφους όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση αργιλικών ή οργανικής ύλης, παρατηρούνται πολύπλοκες μαγνητικές ανωμαλίες, η ερμηνεία των οποίων είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Σε αντίθεση, ορίζοντες οι οποίοι διακόπτονται από χαρακτηριστικά ρευστοποιήσεων και υπεδαφικές ρωγμές, δημιουργούν υψηλές μαγνητικές τιμές οι οποίες αναγνωρίζονται εύκολα.

2.6.1.2. Γεωφυσικές Έρευνες στην Τοποθεσία Walker

Η τοποθεσία Walker (Εικόνα 2.19, θέση W) επιλέχθηκε για τις γεωφυσικές έρευνες λόγω της αφθονίας χειροτεχνημάτων που βρέθηκαν σε αποσαθρωμένους ρευστοποιημένους σχηματισμούς πλησίον ενός μεγάλου καλοδιατηρημένου τύμβου του ιθαγενούς πληθυσμού (χρονολόγηση πολιτισμικής περιόδου περί τα 800-1673 μ.Χ.). Οι πιθανοί ρευστοποιημένοι επιφανειακοί σχηματισμοί επιλέχθηκαν αρχικά μέσω εξέτασης εναέριων φωτογραφιών και επιβεβαιώθηκε η παρουσία τους με την εκσκαφή δοκιμαστικών ορυγμάτων. Για την επιλογή των βέλτιστων θέσεων για εκσκαφή και τη διενέργεια παλαιοσεισμολογικών και γεωλογικών ερευνών εκτελέστηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις ειδικής αντίστασης, αγωγιμότητας και μαγνητικών (Εικόνες 2.20 έως 2.22).

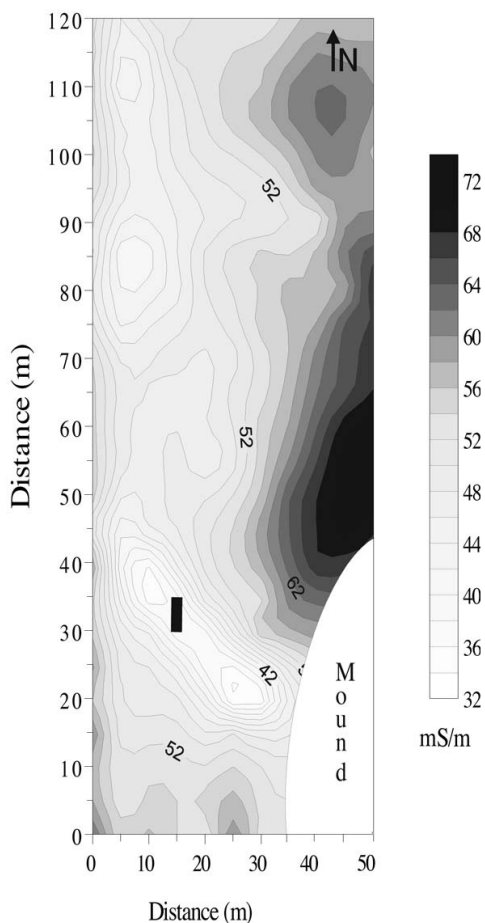
Στα αποτελέσματα-δεδομένα της ειδικής αντίστασης αλλά και της αγωγιμότητας εμφανίζεται μία ανωμαλία που έχει διεύθυνση προς τα βόρειο-δυτικά και εκτιμάται ότι πρόκειται για έναν ρευστοποιημένο υπεδαφικό σχηματισμό ή μία ρωγμή πλάτους 5-7 m και μήκους πάνω από 35 m (Εικόνα 2.20 και 2.21). Αντίστοιχα, μία εκτεταμένη κυκλική ανωμαλία στο βορειοδυτικό κομμάτι της περιοχής έρευνας διαγράφει μία ρευστοποιημένη περιοχή έκτασης μεγαλύτερης από 1400 m². Η διαφορά στην ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των λεπτόκοκκων ιθαγενών

ιζημάτων και των αντίστοιχων αμμωδών ρευστοποιημένων είναι μικρή (συνήθως μικρότερη από 10 ohm/m), στα σημεία όμως όπου η επαφή των αρχικών ιζημάτων με τις τάφρους που έχουν σχηματιστεί λόγω ρευστοποίησης είναι σχεδόν κατακόρυφη, παρατηρείται απότομη μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών (Εικόνα 2.20a). Στην Εικόνα 2.20a στα βόρειο-δυτικά του χάρτη της ειδικής αντίστασης, τα σημεία στα οποία η απόσταση μεταξύ των καμπυλών μικραίνει υποδηλώνουν περιοχές στις οποίες το πάχος των ρευστοποιημένων σχηματισμών αυξάνει. Στα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν εκσκαφές παρατηρήθηκαν χαντάκια τα οποία αποτέλεσαν το αρχικό στρώμα από το οποίο μετανάστευσε η άμμος και ανήλθε στην επιφάνεια λόγω ρευστοποίησης. Οι οπές οι οποίες δημιουργήθηκαν κατά την άνοδο της άμμου δεν διακρίνονται ξεκάθαρα στο χάρτη των αγωγιμοτήτων (Εικόνα 2.21).

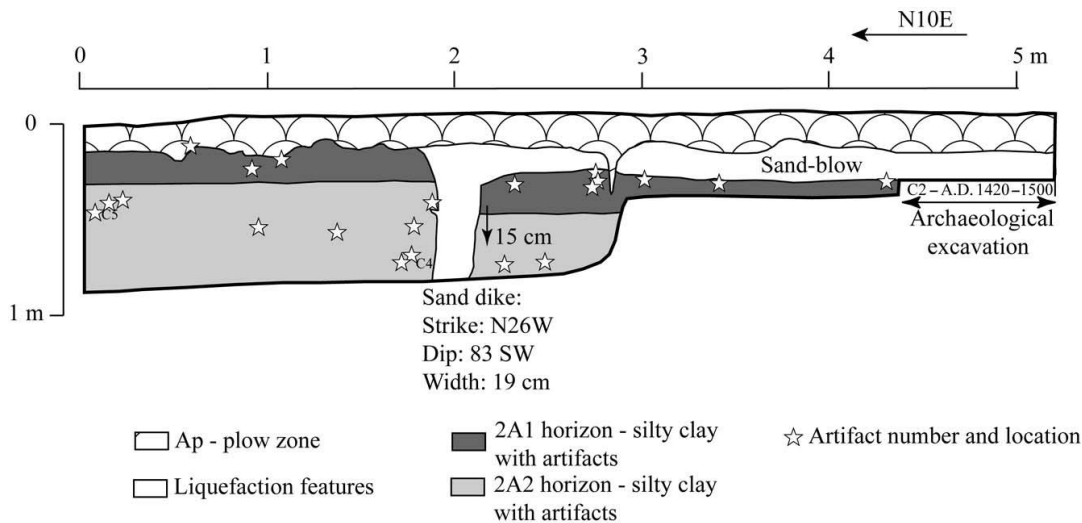


Εικόνα 2.20. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας στην περιοχή Walker (δίπλα σε τύμβο των ιθαγενών-mound) εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης (διάταξη Wenner, με 5 m απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων). (a) Οι ρευστοποιημένοι σχηματισμοί με βορειοδυτική διεύθυνση και το χαντάκι απεικονίζονται με σχετικά υψηλές τιμές στο νοτιότερο κομμάτι της περιοχής έρευνας. Οι πυκνές καμπύλες στο χάρτη υποδεικνύουν περιοχές με πιθανή παρουσία σπών, λόγω της αύξησης του πάχους των ρευστοποιημένων σχηματισμών. Η μαύρη γραμμή δείχνει το προφίλ και την τομή που απεικονίζεται στο (b). Το μικρό άσπρο ορθογώνιο αναπαριστά τη θέση της τάφρου από αυτήν που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.20. (b) Προφίλ της ειδικής αντίστασης με μία πιο απλοποιημένη εκδοχή της τάφρου από αυτήν που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.20.

Στη βορειοδυτική περιοχή ρευστοποιήσεων στο χάρτη, δημιουργήθηκε μία εκσκαφή με βάση την επιφανειακή διασπορά των χειροτεχνημάτων που βρέθηκαν και των αποτελεσμάτων της ηλεκτρικής έρευνας. Τα δεδομένα των μαγνητικών μετρήσεων από την περιοχή υποδεικνύουν παρουσία αρκετών πιθανών εδαφών σε κοντινή απόσταση τα οποία βρισκόντουσαν κάτω από την κτήση των ιθαγενών (Εικόνα 2.21). Όπως αποκαλύφθηκε με την εκσκαφή, ο ρευστοποιημένος ορίζοντας έχει μήκος 5 m και πάχος 35 cm (Εικόνα 2.22). Στη βάση του ρευστοποιημένου σχηματισμού βρίσκεται ένα αμμώδες χαντάκι το οποίο έχει άνοιγμα 19 cm και κόβει έναν λεπτόκοκκο ορίζοντα ο οποίος περιελάμβανε πήλινα χειροτεχνήματα, ίχνη από κάρβουνο και κόκκαλα από ελάφια. Τα χειροτεχνήματα που βρέθηκαν θαμμένα στο έδαφος εξαιτίας της ρευστοποίησης αποτελούν χαρακτηριστικό δείγμα της ύστερης πολιτισμικής περιόδου του Μισσισιπιπύ και υποδεικνύουν ότι τα χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης σχηματίστηκαν πιθανόν μετά το 1400 μ.Χ. Με βάση αυτά τα δεδομένα, εκτιμάται ότι το φαινόμενο της ρευστοποίησης εκδηλώθηκε περί τον 15^ο αιώνα μ.Χ., πιθανότατα κατά τη διάρκεια των σεισμών που έπληξαν την περιοχή New Madrid (Barnes 2000, Tuttle et al. 2000).



Εικόνα 2.21. Τα αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών ερευνών που απεικονίζουν την κατανομή της αγωγιμότητας του εδάφους στην περιοχή Walker (απόσταση μεταξύ των μετρήσεων 5 μέτρα). Αν και οι ρευστοποιημένοι σχηματισμοί με βορειοδυτικό προσανατολισμό είναι ευδιάκριτοι, οι θέσεις των οπών και των τάφρων είναι λιγότερο εμφανής σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ειδικής αντίστασης. Το μαύρο ορθογώνιο απεικονίζει τη θέση της τάφρου.



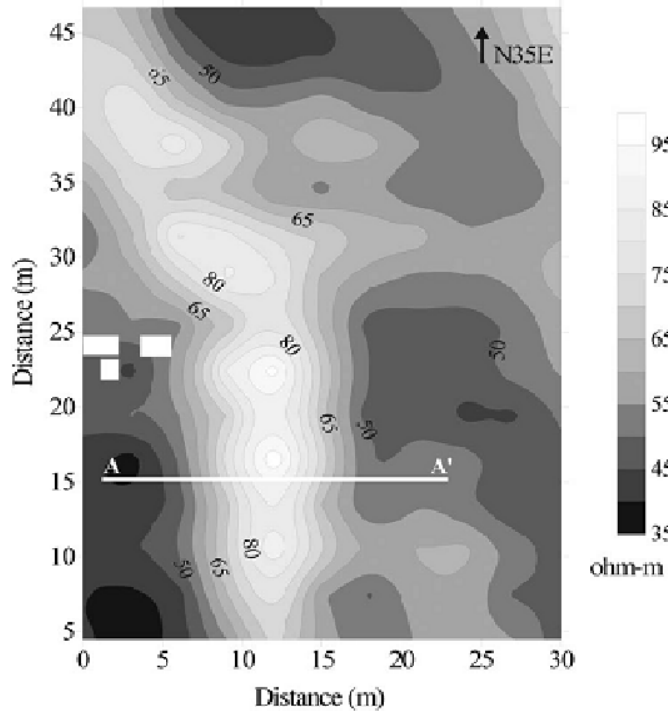
Εικόνα 2.22. Γραφική αναπαράσταση της τάφρου στην τοποθεσία Walker. Το χαντάκι που απεικονίζεται αποτελείται από λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη άμμο, εκτείνεται προς τα βορειοδυτικά και διακόπτει αργιολασπώδεις οριζόντες οι οποίοι περιέχουν θραύσματα από πήλινα αγγεία, ξυλοκάρβουνο και κόκκαλα ελαφιών. Χειροτεχνήματα που βρέθηκαν σε οριζόντα ο οποίος θάφτηκε εξαιτίας της ρευστοποίησης, υποδεικνύουν ότι τα χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της μέσης ή ύστερης πολιτισμικής περιόδου του Μισσισιπιπή, 1000-1673 μ.Χ.

2.6.1.3. Γεωφυσικές Έρευνες στην Τοποθεσία Towosahgy

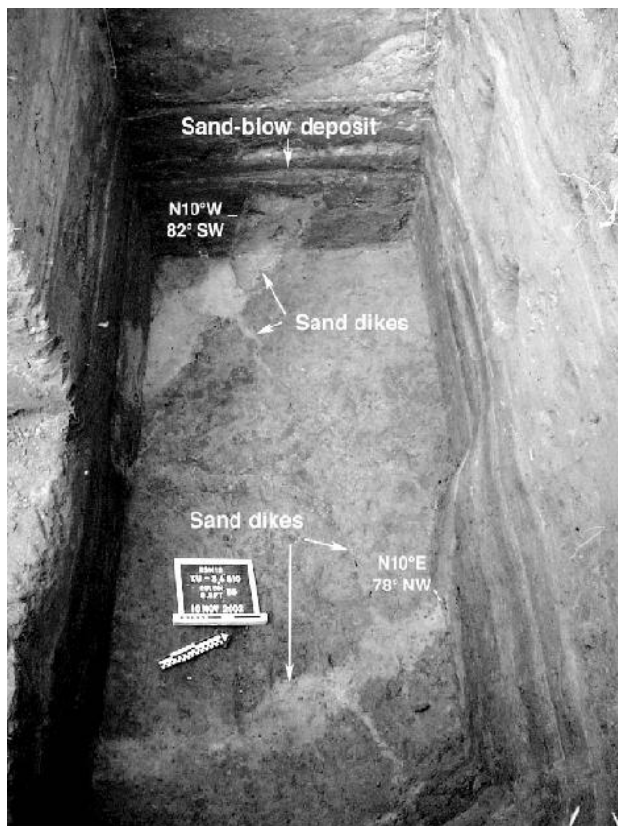
Η τοποθεσία Towosahgy (Εικόνα 2.19, θέση T) αποτελεί αρχαιολογικό χώρο των ιθαγενών ινδιάνων και προστατεύεται από το Τμήμα Διαφύλαξης Φυσικών Πόρων της Πολιτείας του Μιζούρι. Σε προηγούμενη αρχαιολογική έρευνα στην περιοχή, είχαν παρατηρηθεί 2 σημεία ρευστοποιημένων σχηματισμών κατά τη διάρκεια εκσκαφής (Price et al. 1990, Saucier 1991). Στη συγκεκριμένη έρευνα διεξήχθησαν ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις στο σημείο της προηγούμενης εκσκαφής. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας ήταν ο καθορισμός του βαθμού της ρευστοποίησης των σχηματισμών μέσα στην εκσκαφή αλλά και η πιθανή παρουσία περαιτέρω θαμμένων παρακείμενων ρευστοποιημένων σχηματισμών. Σε αντίθεση με άλλες τοποθεσίες ερευνών, δεν υπήρχαν ενδείξεις ρευστοποιήσεων στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης, για τα οποία χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner με απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τα 3 m, παρουσιάζουν μία μεγάλη ανωμαλία με διεύθυνση Βορράς-Νότος (Εικόνα 2.23). Τα δεδομένα αυτά συνάδουν με τις συντεταγμένες (B10°Α και B10°Δ) των χαρακτηριστικών των ρευστοποιήσεων που παρατηρήθηκαν στην εκσκαφή σε βάθος 1.5-2 m (Εικόνα 2.24). Το πιο παχύ τμήμα του

ρευστοποιημένου σχηματισμού φαίνεται να εντοπίζεται περίπου 5 m νοτιοανατολικά της εκσκαφής και πιθανώς επικαλύπτει το αρχικό στρώμα από το οποίο προήλθε η κύρια μάζα του. Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από ευρήματα στην εκσκαφή που υποδεικνύουν ότι ο ρευστοποιημένος σχηματισμός αυξάνει σε πάχος προς τα νοτιοανατολικά. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης, εκτιμάται ότι ο ρευστοποιημένος ορίζοντας έχει 5 m πλάτος και 15 m μήκος.



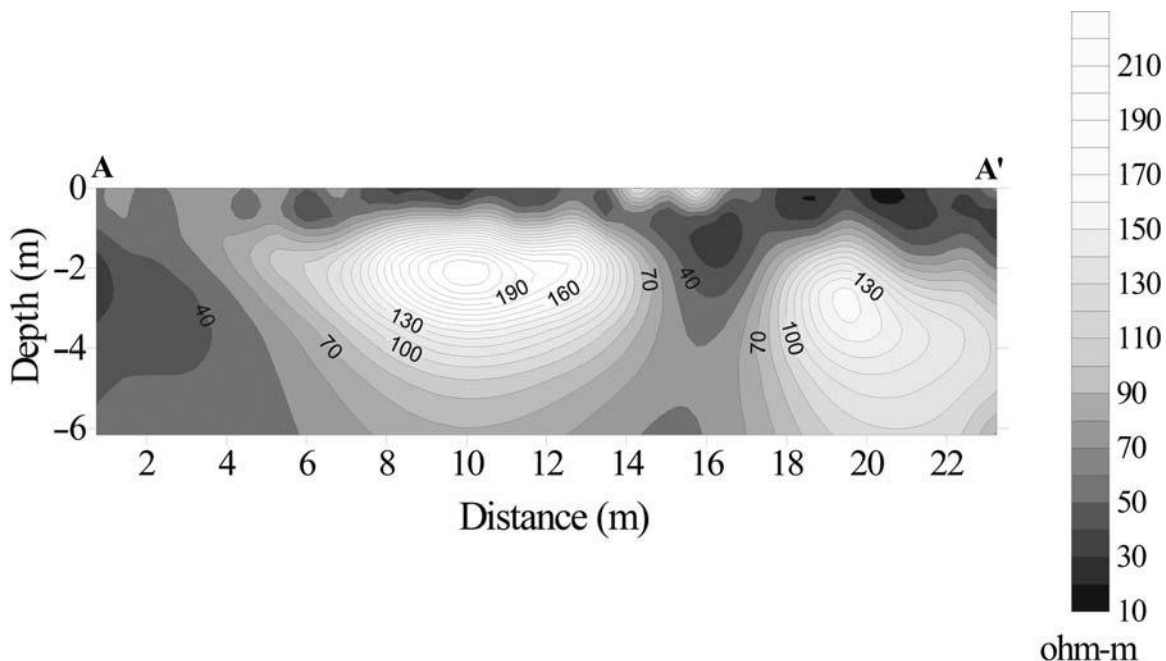
Εικόνα 2.23. Αποτελέσματα έρευνας ειδικής αντίστασης στην τοποθεσία Towosahgy (διάταξη Wenner, απόσταση ηλεκτροδίων 3 μέτρα). Η σχεδόν γραμμική απεικόνιση των υψηλών τιμών της ειδικής αντίστασης (άσπρη περιοχή) αντιστοιχεί στο βορειοδυτικό όριο του ρευστοποιημένου σχηματισμού, ο οποίος παρατηρήθηκε κατά την εκσκαφή και τις διάφορες μετρήσεις (λευκά ορθογώνια). Η λευκή γραμμή απεικονίζει την τοποθεσία στην οποία εφαρμόστηκε η διάταξη διπόλου-διπόλου.



Εικόνα 2.24. Φωτογραφία της εκσκαφής στην τοποθεσία Towosahgy.

Απεικονίζεται η γενικότερη τάση των χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης καθώς και η βορειοδυτική διεύθυνση ανάπτυξης της. Οι ρευστοποιημένοι σχηματισμοί βρίσκονται παρακείμενα ενός λόφου πάνω στον οποίο ήταν κτισμένος ένας μεγάλος ναός των ιθαγενών ινδιάνων, ενώ τα αντικείμενα που βρέθηκαν στην περιοχή βοήθησαν στην χρονολόγηση του συμβάντος της ρευστοποίησης.

Μετά τη διάταξη Wenner εκτελέστηκε η διάταξη διπόλου-διπόλου, με απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στο 1.5 m και σχεδόν κάθετη στο ρευστοποιημένο σχηματισμό ώστε να δημιουργηθεί μία εγκάρσια τομή (Εικόνα 2.25). Όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση στην απεικόνιση των πιο επιφανειακών σχηματισμών και για αυτόν το λόγο η διάταξη διπόλου-διπόλου δίνει πιο σαφή αποτελέσματα από την διάταξη Wenner στη συγκεκριμένη περίπτωση. Μάλιστα, τα αποτελέσματα της διάταξης διπόλου-διπόλου υποδεικνύουν την πιθανή παρουσία ενός δεύτερου ρευστοποιημένου οριζοντα ανατολικά του πρώτου, λόγω της ύπαρξης περιοχής στο χάρτη που χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης και η οποία βρίσκεται κάτω από ένα στρώμα με χαμηλότερες τιμές, πιθανώς, ποτάμιων αποθέσεων.



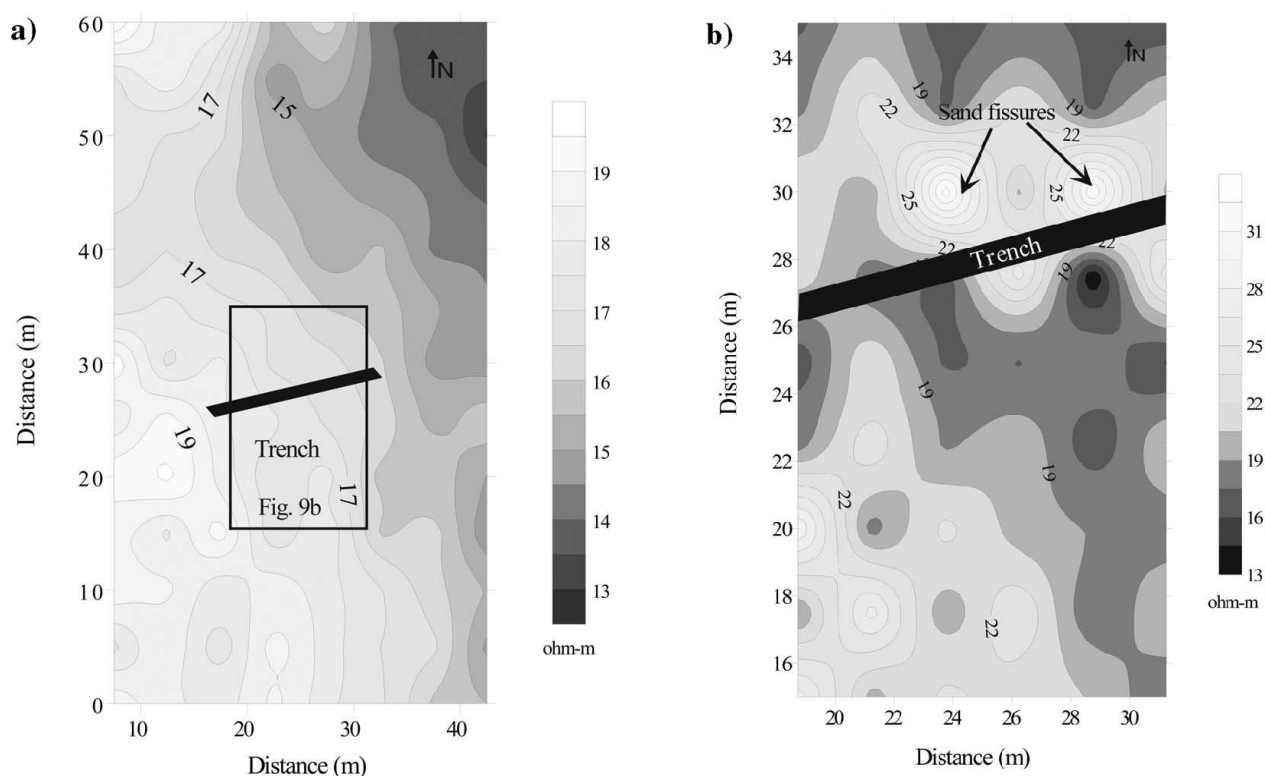
Εικόνα 2.25. Αποτελέσματα έρευνας ειδικής αντίστασης στην τοποθεσία Towosahgy (Εικόνα 2.19, θέση T) (διάταξη διπόλου-διπόλου, απόσταση ηλεκτροδίων 1.25 m). Η αριστερή πλευρά του προφίλ ξεκινάει στην ανατολική πλευρά του λόφου των ιθαγενών (Εικόνα 2.19, θέση A). Στο κέντρο του προφίλ απεικονίζονται πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, οι οποίες ταυτίζονται με την αύξηση του πάχους του ρευστοποιημένου σχηματισμού προς τα νοτιοανατολικά, όπως αυτός απεικονίζεται και στην εκσκαφή της Εικόνας 2.23. Οι χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης στην επιφάνεια, πιθανώς, υποδηλώνουν την παρουσία λεπτόκοκκων σχηματισμών (πχ. ποτάμιων αποθέσεων) οι οποίοι μπορούν να προσφέρουν τις κατάλληλες περιοριστικές συνθήκες για ανάπτυξη υπερπίεσης στην υποκείμενη κορεσμένη άμμο. Στα ανατολικά του μοντέλου παρατηρείται μία μικρότερη ανωμαλία η οποία είναι πιθανό να αντιπροσωπεύει έναν άλλο ρευστοποιημένο ορίζοντα, κάτι το οποίο όμως δεν έχει επιβεβαιωθεί.

2.6.1.4. Γεωφυσικές Έρευνες στην Τοποθεσία Dillahunty

Στην περιοχή Dillahunty (Εικόνα 2.19, θέση D) διεξήχθησαν γεωφυσικές έρευνες ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και αγωγιμότητας του εδάφους σε ένα δίκτυο συνολικής έκτασης 3000 m², με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στα 5 m. Σκοπός των ερευνών ήταν η αναγνώριση και η απεικόνιση χαρακτηριστικών των ρευστοποιήσεων, τα οποία δεν μπορούσαν να γίνουν αντιληπτά επιφανειακά. Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών ερευνών δείχνουν ένα εκτεταμένο μοτίβο με διεύθυνση Βορράς-Νότος, το οποίο ερμηνεύεται περισσότερο σαν απεικόνιση ποτάμιων αποθέσεων παρά χαρακτηριστικών ρευστοποιήσεων (Εικόνα 2.26a).

Στη συνέχεια, επαναλήφθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αυτήν τη φορά όμως με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να βρίσκεται στα 2.5 m, το οποίο είχε σαν αποτέλεσμα πιο ευκρινή αποτύπωση των υπεδαφικών σχηματισμών λόγω της υψηλότερης

ανάλυσης (Εικόνα 2.26b). Τα αποτελέσματα της έρευνας απεικονίζουν τουλάχιστον δύο ρευστοποιημένους σχηματισμούς με βορειοδυτική διεύθυνση, καθώς και ορίζοντες από τους οποίους προήλθε το ρευστοποιημένο υλικό. Το βάθος στο οποίο εντοπίστηκε η ρευστοποίηση είναι λιγότερο από ένα μέτρο και το μέγιστο πάχος του ρευστοποιημένου ορίζοντα ανέρχεται στα 50 cm. Μία πιθανή εξήγηση για την αποτυχία των πρώτων ερευνών είναι η μεγάλη απόσταση των μετρήσεων σε σχέση με το αρκετά μικρότερο μέγεθος των χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων ρευστοποιήσεων και το βάθος στο οποίο βρίσκονταν, καθώς και η μικρή διαφορά στο μέγεθος των κόκκων των ρευστοποιημένων σχηματισμών σε σχέση με τους αρχικούς ορίζοντες.



Εικόνα 2.26. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, χρησιμοποιώντας τη διάταξη Wenner στην περιοχή Dillahunty (Εικόνα 2.19, θέση D). Παρατηρώντας τις δύο εικόνες φαίνεται ξεκάθαρα πόσο μεγάλη σημασία έχει η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων στην απεικόνιση των ρευστοποιημένων σχηματισμών. Στην εικόνα (a) στην οποία η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 5 m είναι αδύνατο να παρατηρηθούν τα χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης (sand fissures), τα οποία διακρίνονται με ευκρίνεια στην εικόνα (b) στην οποία η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 2.5 m.

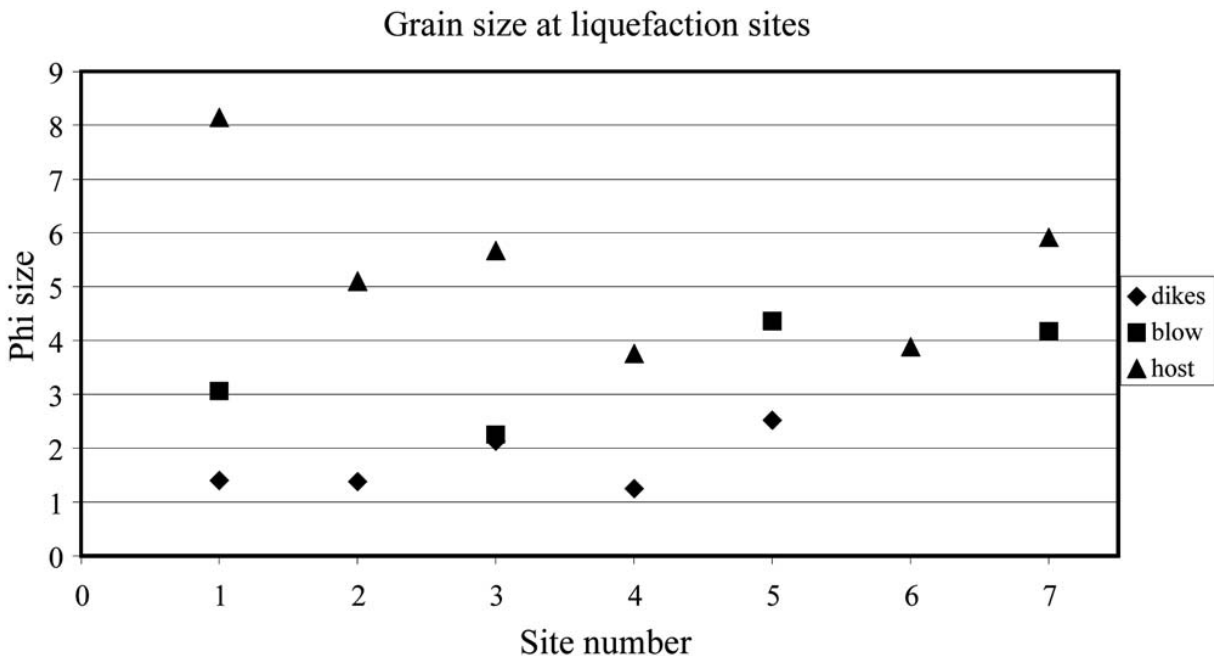
2.6.2. Συμπεράσματα που Προέκυψαν από τις Μελέτες στην Περιοχή New Madrid

Οι γεωφυσικές έρευνες που διεξήχθησαν στην περιοχή New Madrid δείχνουν ότι η επιτυχία των ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων είναι συνάρτηση: 1) της διαφοράς του μεγέθους των κόκκων μεταξύ των ρευστοποιημένων σχηματισμών και των αρχικών σχηματισμών, 2) της περιεχόμενης υγρασίας και αργίλου των ιζημάτων, 3) του βάθους, του μεγέθους και του προσανατολισμού των ρευστοποιημένων σχηματισμών και 4) της απόστασης μεταξύ των σημείων λήψης μετρήσεων.

2.6.2.1. Επίδραση του Μεγέθους των Κόκκων και της Περιεχόμενης Υγρασίας στην Απεικόνιση των Χαρακτηριστικών της Ρευστοποίησης με τη Χρήση Ηλεκτρικών Μεθόδων

Για να διαπιστωθεί η επίδραση του μεγέθους των κόκκων, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε δείγματα που ελήφθησαν από τους ρευστοποιημένους σχηματισμούς και από τους αρχικούς εδαφικούς ορίζοντες (Εικόνα 2.27). Στην μη κορεσμένη ζώνη, χονδρόκοκκα υλικά όπως χονδρόκοκκη άμμος, έχουν σαν αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης από τα λεπτόκοκκα ιζήματα όπως άργιλος και λάπη. Τα χονδρόκοκκα ιζήματα με λίγα λεπτόκοκκα στη μάζα τους, όπως συμβαίνει στους περισσότερους ρευστοποιημένους σχηματισμούς, έχουν αυξημένη διαπερατότητα και για αυτό το λόγο το νερό στραγγίζεται πιο εύκολα σε σχέση με ιζήματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά, όπως άργιλος. Τα επιφανειακά ιζήματα είναι συνήθως λεπτόκοκκες ποτάμιες αποθέσεις με υψηλό δυναμικό συγκράτησης της υγρασίας στη μάζα τους. Οι ορίζοντες ιθαγενούς κτήσης χαρακτηρίζονται από τη συχνή παρουσία οργανικής ύλης, η οποία βοηθάει στην αύξηση του δυναμικού συγκράτησης της υγρασίας και το οποίο έχει σαν συνέπεια υψηλότερες τιμές εδαφικής αγωγιμότητας σε σχέση με τους ρευστοποιημένους σχηματισμούς. Στις περισσότερες τοποθεσίες, οι ρευστοποιημένοι σχηματισμοί αποτελούνται από λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη άμμο (<3 Phi) και έχουν την τάση να είναι πιο χονδρόκοκοι κοντά στη σχισμή του σχηματισμού και πιο λεπτόκοκοι στα όρια τους. Οι ρευστοποιήσεις που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια παλαιότερων σεισμών και παρουσίασαν επιφανειακές εκδηλώσεις, είναι πιο πιθανό να παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση λεπτόκοκκων υλικών από αυτές που δημιουργήθηκαν πιο πρόσφατα (Tuttle et al.

2000). Με μία εξαίρεση, οι αρχικοί σχηματισμοί είναι αρκετά πιο λεπτόκοκκοι από τους αντίστοιχους ρευστοποιημένους).



Εικόνα 2.27. Κοκκομετρική ανάλυση δειγμάτων ιζημάτων από τις τοποθεσίες έρευνας στην περιοχή New Madrid. Μέγεθος $\Phi = -\log_2$ (μέγεθος κόκκου σε mm). Οι τοποθεσίες είναι 1=Walker δυτικά, 2= Walker νότια, 5= Archway T2, 6= Archway T1, 7= Dillahunty (Εικόνα 2.19).

Στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και σε άλλες έρευνες, η επιτυχημένη απεικόνιση των χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μεγάλη αντίθεση των μεγεθών των κόκκων μεταξύ των αρχικών και των ρευστοποιημένων σχηματισμών. Για παράδειγμα, στην τοποθεσία Walker (Εικόνα 2.19, θέση W) όπου η αντίθεση του μεγέθους των κόκκων μεταξύ αρχικών και ρευστοποιημένων οριζόντων είναι μεγάλη (τοποθεσία 1 στην Εικόνα 2.27), τα χαρακτηριστικά της ρευστοποίησης είναι πιο ευδιάκριτα και αναγνωρίσιμα. Αντίθετα, σε περιοχές όπου η αντίθεση αυτή είναι μικρή, όπως στην τοποθεσία Dillahunty (Εικόνα 2.19, θέση D), τα χαρακτηριστικά αυτά είναι λιγότερο φανερά και αναγνωρίσιμα (τοποθεσία 7 στην Εικόνα 2.27).

2.6.2.2. Επίδραση του Μεγέθους, του Βάθους και του Προσανατολισμού των Χαρακτηριστικών της Ρευστοποίησης στην Έρευνα

Το μέγεθος, το βάθος και ο προσανατολισμός των χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης, σε συνδυασμό με την επιλεγμένη απόσταση μεταξύ των μετρήσεων, επηρεάζουν την ικανότητα εντοπισμού αυτών των χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους. Αν και η διαφορά στις φυσικές ιδιότητες μεταξύ των αρχικών και των ρευστοποιημένων οριζόντων είναι κάποιες φορές μικρή, υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, οι οποίες προκαλούνται από απότομες, σχεδόν κάθετες διεπαφές μεταξύ των αρχικών και των ρευστοποιημένων ιζημάτων, βελτιώνουν την αναγνώριση των επιθυμητών χαρακτηριστικών. Σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος των χαρακτηριστικών είναι μικρό συγκριτικά με την απόσταση μεταξύ των μετρήσεων ή βρίσκονται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια (< 2 m βάθος), η απεικόνιση βελτιώνεται μειώνοντας την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στις διατάξεις ειδικής αντίστασης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, συνιστάται η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι σχεδόν δύο φορές το βάθος του ζητούμενου χαρακτηριστικού. Με επαρκή αντίθεση ειδικής αντίστασης μεταξύ των ρευστοποιημένων και αρχικών ιζημάτων, τα ρευστοποιημένα χαντάκια από άμμο (Εικόνα 2.26) εντοπίζονται πιο αποτελεσματικά αν η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων δεν είναι μεγαλύτερη από τρεις φορές το φάρδος τους. Όσο αυξάνει το βάθος στο οποίο συναντώνται οι ρευστοποιημένοι σχηματισμοί, τόσο μειώνεται η ανάλυση της απεικόνισής τους, με αποτέλεσμα σε μερικές περιπτώσεις να μην είναι δυνατή ακόμα και η διάκριση μεταξύ διαφορετικών χαρακτηριστικών.

2.6.2.3. Σύγκριση της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης με Άλλες Ηλεκτρομαγνητικές Μεθόδους για τον Εντοπισμό Χαρακτηριστικών Ρευστοποίησης

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του γεωραντάρ και άλλων ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων, είναι η ευκολία και η ταχύτητα εκτέλεσής τους. Ωστόσο, στις συγκεκριμένες τοποθεσίες στην περιοχή New Madrid, οι οποίες χαρακτηρίζονται από λεπτόκοκκες ποτάμιες αποθέσεις και μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης, η εφαρμογή της μεθόδου του γεωραντάρ δεν αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για τον εντοπισμό θαμμένων σχηματισμών, παρόλο που μπορεί να δώσει και ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνιστάται, η χρήση του γεωραντάρ να συνοδεύεται από την εφαρμογή και άλλων μεθόδων. Άλλα ηλεκτρομαγνητικά όργανα με σταθερές αποστάσεις μεταξύ των εκπεμπόντων και λαμβανόντων πηγών (π.χ. EM-31) προσφέρουν περιορισμένη ευελιξία ως

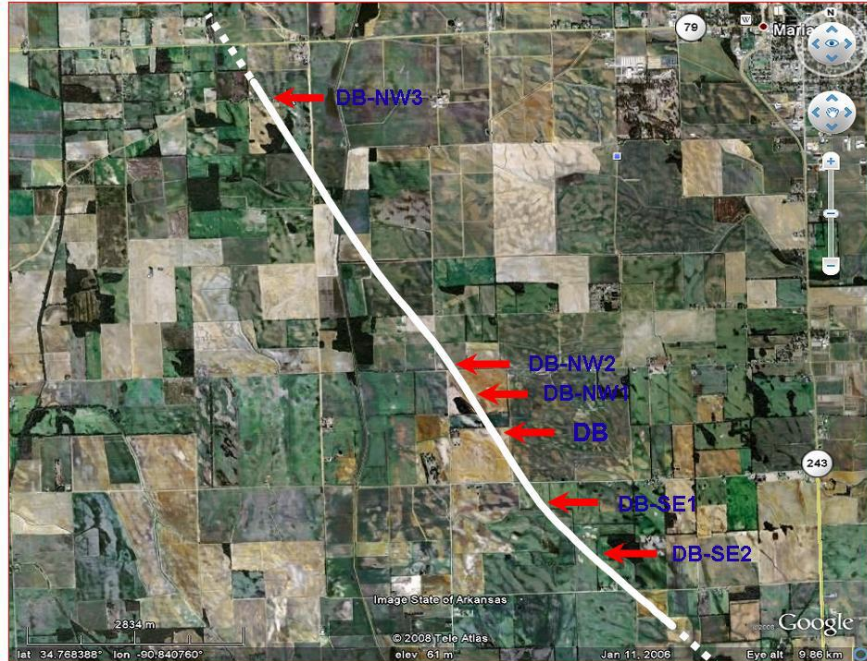
προς το βάθος διείσδυσης, αλλά προσφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν τα χαρακτηριστικά προς εξέταση είναι μεγάλα σε μέγεθος (αρκετά μέτρα), ενώ είναι χρήσιμα για τον καθορισμό της ευρύτερης τάσης των ποτάμιων αποθέσεων.

2.6.3. Γεωφυσικές Διασκοπήσεις στην Περιοχή New Madrid με τη Μέθοδο του Γεωραντάρ (GPR) και της Ειδικής Αντίστασης

Στην περιοχή New Madrid διεξήχθησαν γεωφυσικές διασκοπήσεις με τη μέθοδο του γεωραντάρ και της ειδικής αντίστασης, με σκοπό να αποτυπώσουν την μορφολογία των ρευστοποιημένων σχηματισμών και να βοηθήσουν στην ερμηνεία της προέλευσης αυτών, η δημιουργία των οποίων ήταν συνέπεια της δράσης σεισμών μεγάλης έντασης. Για το σκοπό αυτό διεξήχθησαν γεωφυσικές έρευνες σε έξι επιλεγμένες τοποθεσίες της ευρύτερης περιοχής.

Σε κάθε περιοχή σχεδιάστηκαν προφίλ, το μήκος των οποίων κυμαινόταν από μερικά μέτρα έως αρκετές εκατοντάδες μέτρα, κατά μήκος των οποίων πραγματοποιήθηκε η λήψη των δεδομένων με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Σε ορισμένα από τα προφίλ διεξήχθησαν και μετρήσεις με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης.

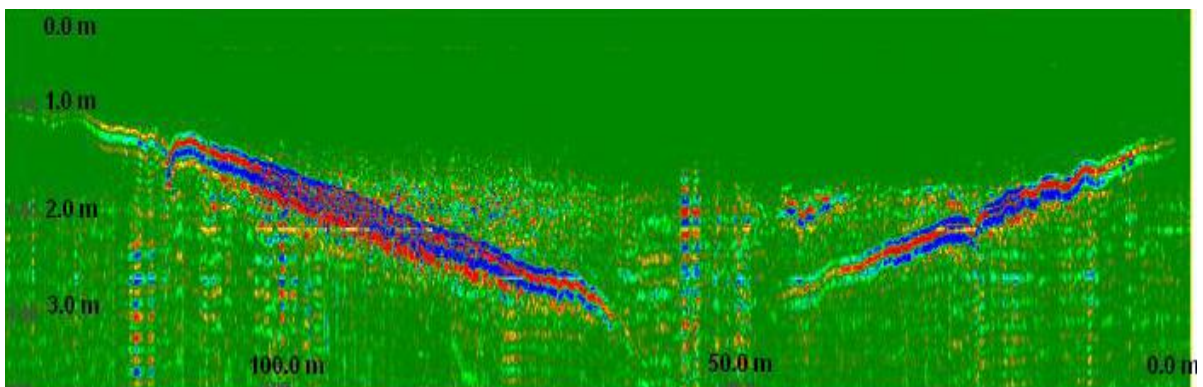
Οι τοποθεσίες που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων δεν ήταν τυχαίες, αλλά η επιλογή τους έγινε με σκοπό να εξεταστεί η υπόθεση, σύμφωνα με την οποία τα εδαφικά χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενες μελέτες διαγράφονται από ενδείξεις ρευστοποιήσεων και ότι η εμφάνιση αυτών συνδέεται άμεσα και ελέγχεται από το ρήγμα της περιοχής (Εικόνα 2.28).



Εικόνα 2.28. Δορυφορική απεικόνιση της ευρύτερης περιοχής New Madrid των μετρήσεων, Marianna, Arkansas. Με κόκκινα βέλη απεικονίζονται οι έξι περιοχές στις οποίες διεξήχθησαν η μέθοδος του γεωραντάρ και της ειδικής αντίστασης, ενώ με την άσπρη γραμμή αναπαριστάται η πιθανή παρουσία του ρήγματος.

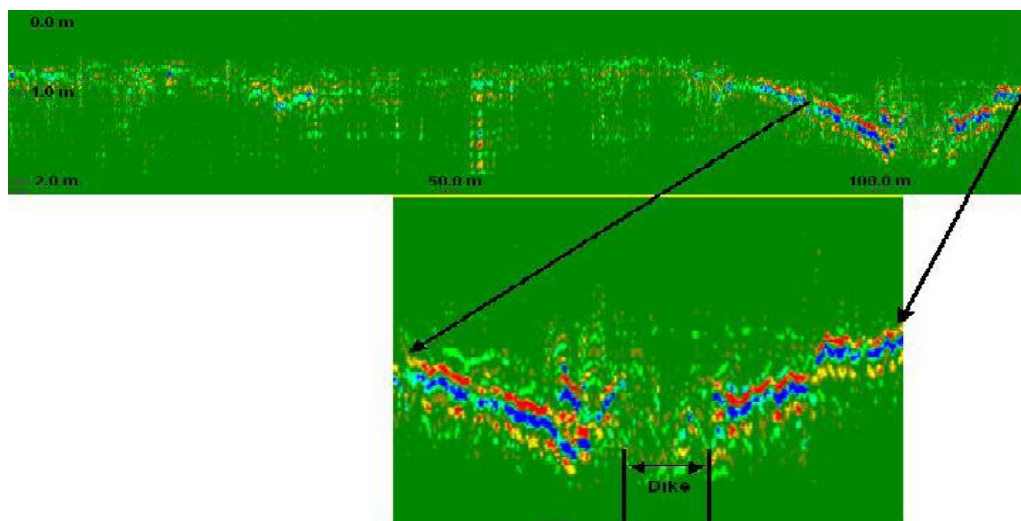
2.6.3.1. Αποτελέσματα της Εφαρμογής της Μεθόδου του Γεωραντάρ και της Ειδικής Αντίστασης στις Επιλεγμένες Τοποθεσίες, στην Περιοχή New Madrid

2.6.3.1.1. Περιοχή Daytona Beach (Εικόνα 2.28, θέση DB)



Εικόνα 2.29. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ. Παρατηρείται γεωφυσική ανωμαλία (απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο) η οποία ξεκινάει περίπου στα 5 m από τα ανατολικά (στα 0 μέτρα από τα ανατολικά εντοπίζεται η αρχή του προφίλ μετρήσεων) και σε βάθος 1,2 m από την επιφάνεια και βυθίζεται προς τα δυτικά μέχρι το βάθος των 2,8 m όπου και εξαφανίζεται σε απόσταση 40 m από τα ανατολικά. Η ανωμαλία επανεμφανίζεται στο ίδιο βάθος σε απόσταση 60 m από τα ανατολικά και ανεβαίνει μέχρι το βάθος του 1 m στο τέρμα του προφίλ των μετρήσεων.

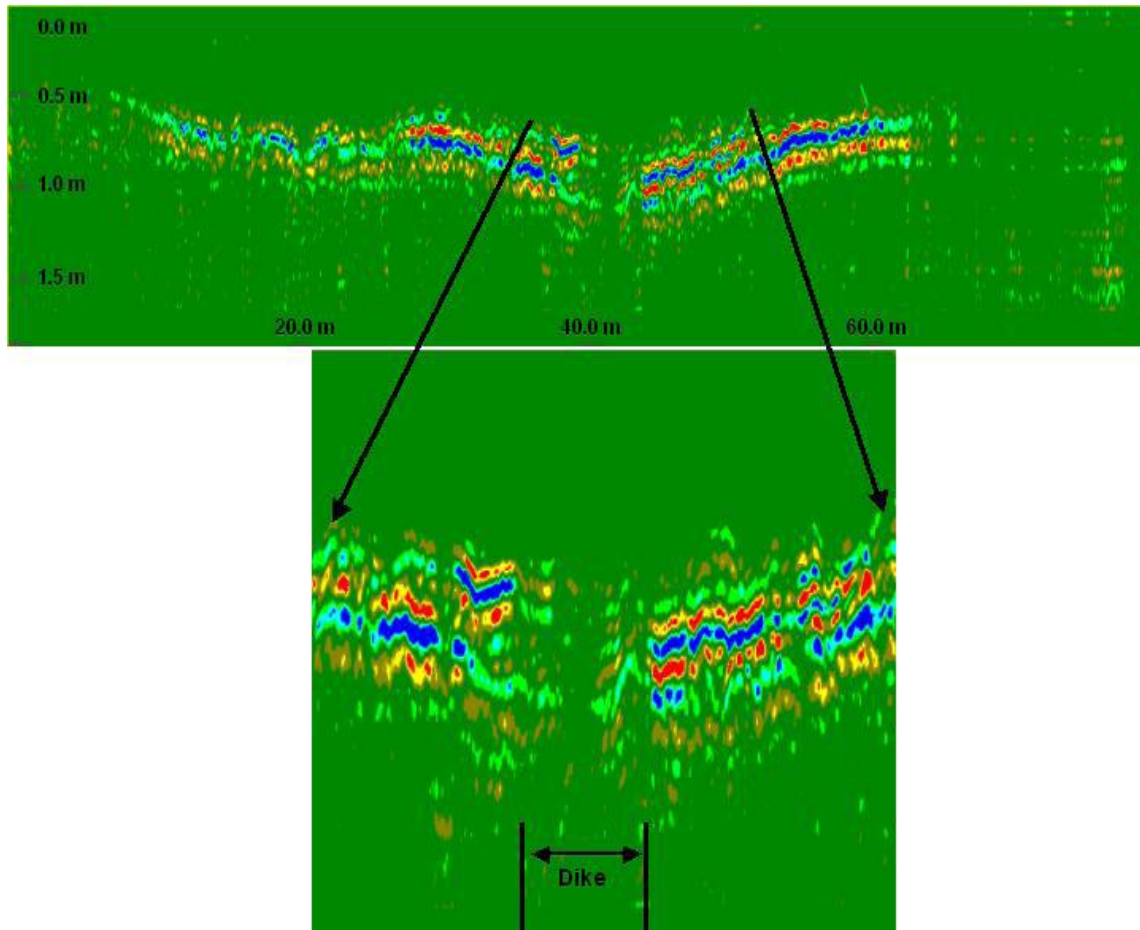
2.6.3.1.2. Περιοχή Daytona Beach NW1 (Εικόνα 2.28, θέση DB-NW1)



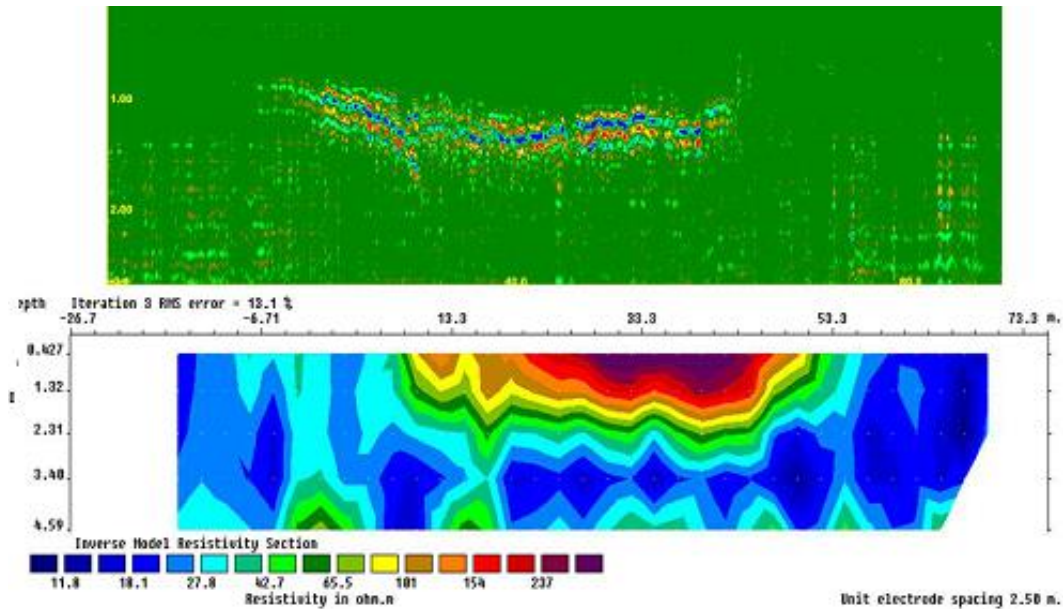
Εικόνα 2.30. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ. Η πάνω εικόνα απεικονίζει τις ληφθείσες μετρήσεις κατά μήκος ενός προφίλ μετρήσεων. Η κάτω εικόνα αποτελεί μεγέθυνση του τμήματος της πάνω εικόνας το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανωμαλία. Η ανωμαλία αυτή (απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο χρώμα) αναπαριστά την επαφή μεταξύ του ρευστοποιημένου εδάφους και του αρχικού εδάφους).

2.6.3.1.3. Περιοχή Daytona Beach NW2 (Εικόνα 2.28, θέση DB-NW2)

Κατά μήκος των προφίλ που δημιουργήθηκαν στην τοποθεσία, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο με τη μέθοδο του γεωραντάρ (Εικόνα 2.30), όσο και με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης (Εικόνα 2.31).

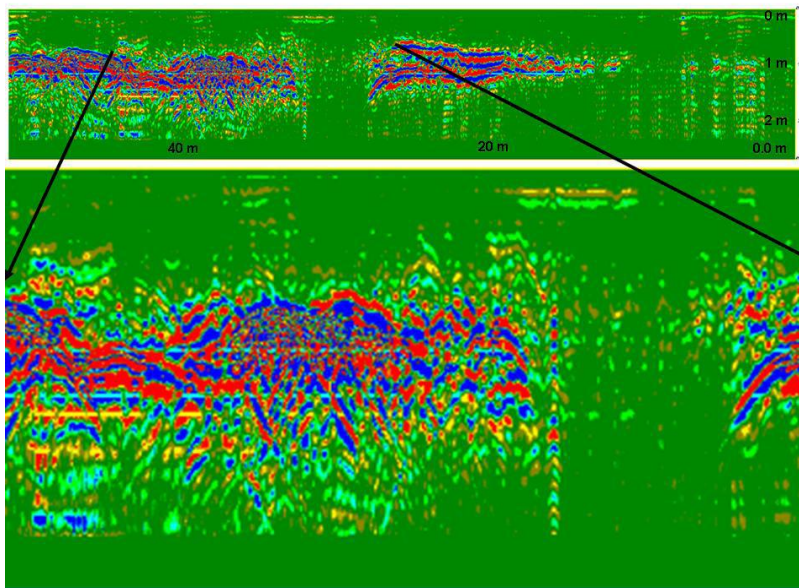


Εικόνα 2.31. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ. Η πάνω εικόνα απεικονίζει τις ληφθείσες μετρήσεις κατά μήκος ενός προφίλ μετρήσεων. Η κάτω εικόνα αποτελεί μεγέθυνση του τμήματος της πάνω εικόνας το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανωμαλία και στο οποίο φαίνεται ξεκάθαρα η απουσία υλικού λόγω της ρευστοποίησης. Η ανωμαλία αυτή (απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο χρώμα) αναπαριστά την επαφή μεταξύ του ρευστοποιημένου εδάφους και του αρχικού εδάφους). Παρατηρείται μείωση της έντασης της ανωμαλίας στα ανατολικά και στα δυτικά του προφίλ, η οποία είναι αποτέλεσμα της μείωσης του πάχους του στρώματος της άμμου και του εξαιρετικά αυξημένου βαθμού κορεσμού, τα οποία προκάλεσαν σημαντική εξασθένηση του σήματος.



Εικόνα 2.32. Η πάνω εικόνα αντιστοιχεί στα δεδομένα των μετρήσεων που ελήφθησαν με τη μέθοδο του γεωραντάρ, ενώ η κάτω εικόνα αναπαριστά τα αποτελέσματα της μεθόδου της ειδικής αντίστασης. Είναι εμφανής η συσχέτιση μεταξύ των υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης (κόκκινο χρώμα) και της ανωμαλίας που εμφανίζεται στο πάνελ του γεωραντάρ.

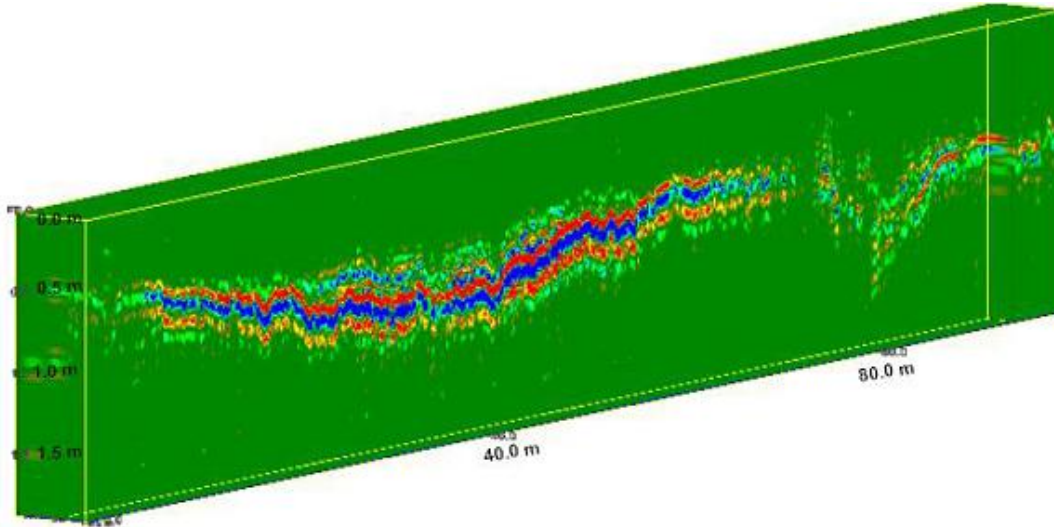
2.6.3.1.4. Περιοχή Daytona Beach NW3 (Εικόνα 2.28, θέση DB-NW3)



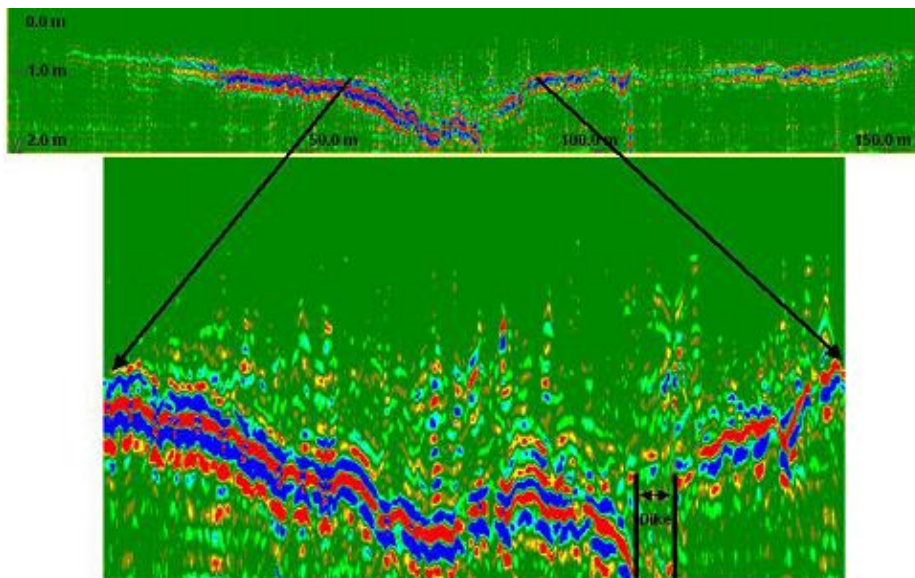
Εικόνα 2.33. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ. Η πάνω εικόνα απεικονίζει τις ληφθείσες μετρήσεις κατά μήκος ενός προφίλ μετρήσεων. Η κάτω εικόνα αποτελεί μεγέθυνση του τμήματος της πάνω εικόνας το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανωμαλία και στο οποίο φαίνεται ξεκάθαρα η απουσία υλικού λόγω της ρευστοποίησης.

2.6.3.1.5. Περιοχή Daytona Beach SE1 (Εικόνα 2.28, θέση DB- SE1)

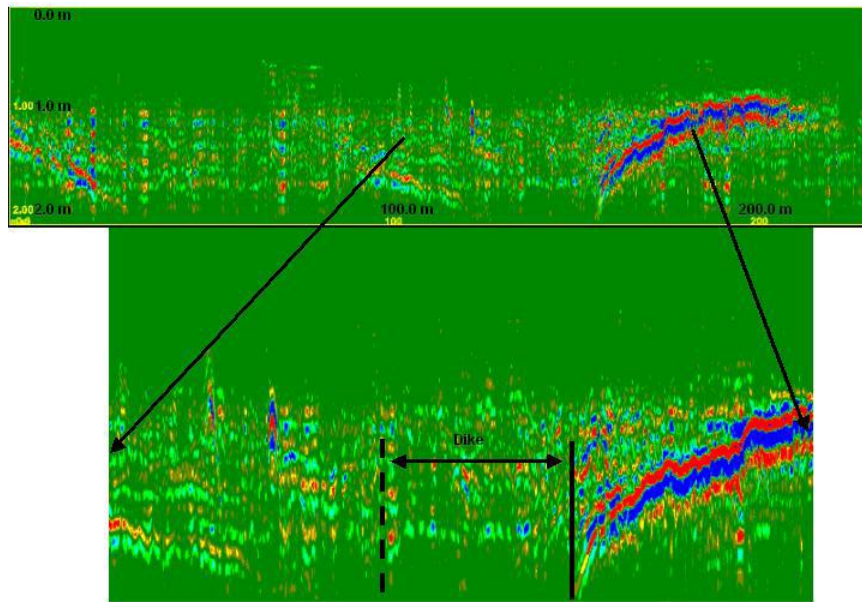
Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη τοποθεσία περιελάμβαναν τόσο μετρήσεις κατά μήκος δύο ανεξάρτητων προφίλ, όσο και μετρήσεις κατά μήκος έξι παράλληλων προφίλ για την τρισδιάστατη απεικόνιση των υπεδιαφικών ανωμαλιών.



Εικόνα 2.34. Τρισδιάστατη απεικόνιση αποτελεσμάτων της μεθόδου του γεωραντάρ. Η ανωμαλία απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο χρώμα και αναπαριστά την επαφή μεταξύ του ρευστοποιημένου εδάφους και του αρχικού εδάφους.



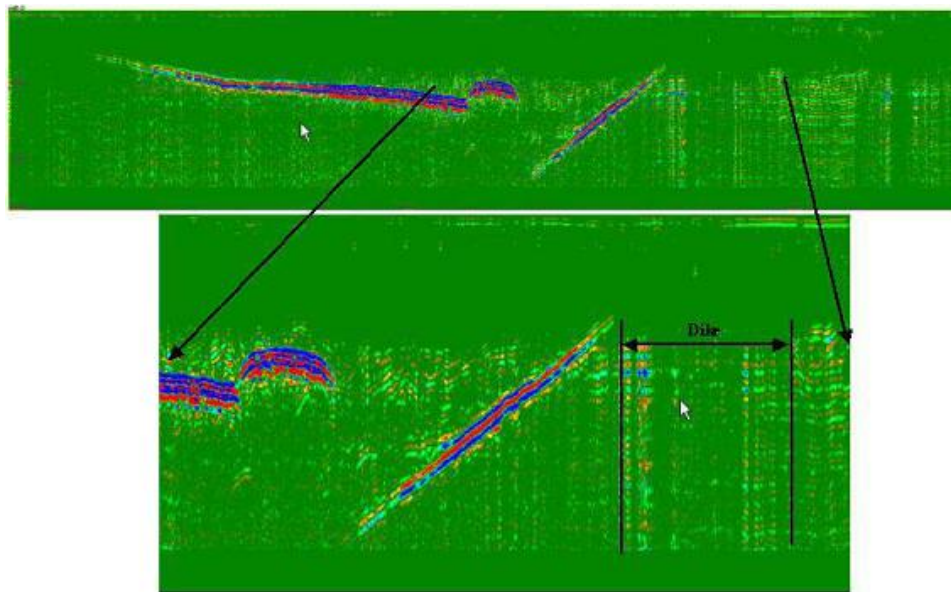
Εικόνα 2.35. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ κατά μήκος του πρώτου προφίλ. Η πάνω εικόνα απεικονίζει τις ληφθείσες μετρήσεις κατά μήκος του προφίλ μετρήσεων. Η κάτω εικόνα αποτελεί μεγέθυνση του τμήματος της πάνω εικόνας το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανωμαλία και στο οποίο φαίνεται ξεκάθαρα η απουσία υλικού λόγω της ρευστοποίησης. Η ανωμαλία απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο χρώμα και αναπαριστά την επαφή μεταξύ του ρευστοποιημένου εδάφους και του αρχικού εδάφους.



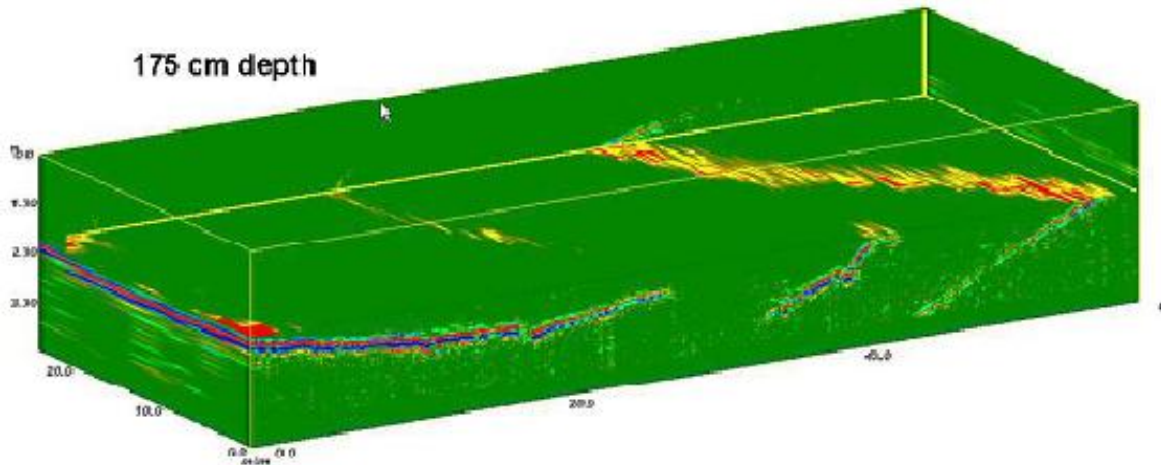
Εικόνα 2.36. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ κατά μήκος του δεύτερου προφίλ. Η ερμηνεία είναι παρόμοια με αυτή των προηγούμενων εικόνων.

2.3.6.1.6. Περιοχή Daytona Beach SE2 (Εικόνα 2.28, θέση DB- SE2)

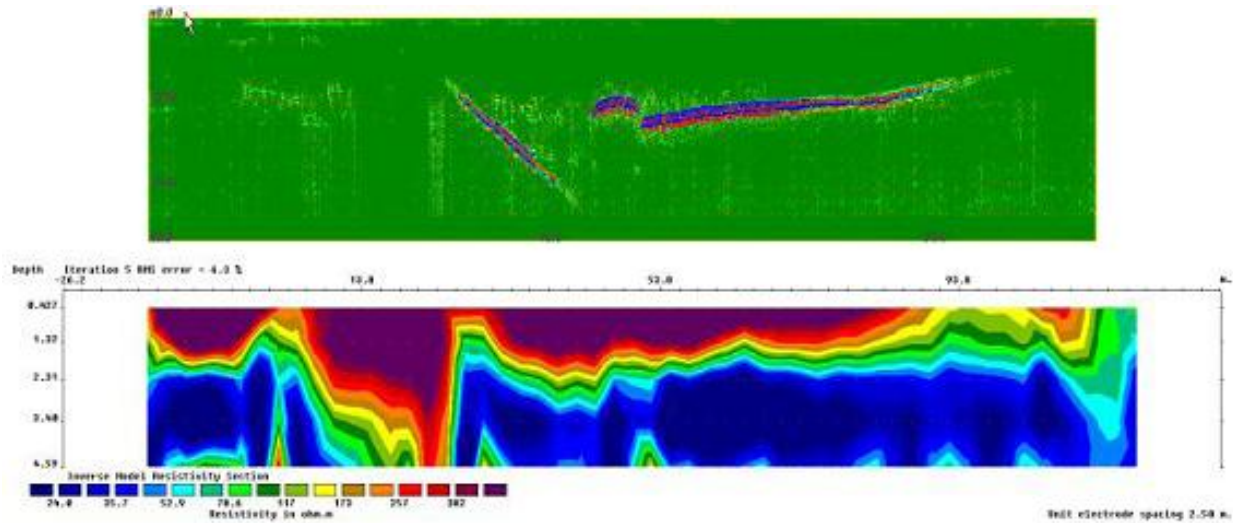
Στην περιοχή Daytona Beach SE2 διεξήχθησαν μετρήσεις με τη μέθοδο του γεωραντάρ κατά μήκος πολλαπλών προφίλ και ειδικής αντίστασης κατά μήκος ενός ανεξάρτητου προφίλ.



Εικόνα 2.37. Αποτελέσματα της μεθόδου του γεωραντάρ. Με μπλε και κόκκινο χρώμα αναπαριστάται η επαφή μεταξύ του ρευστοποιημένου και του αρχικού εδάφους. Η ασυνέχεια των στρωμάτων αποδίδεται σε καθιζήσεις και δημιουργία τάφρων. Στην μεγενθυμένη κάτω εικόνα φαίνεται η παρουσία μεγάλης τάφρου στα ανατολικά.



Εικόνα 2.38. Τρισδιάστατη απεικόνιση αποτελεσμάτων της μεθόδου του γεωραντάρ. Η ανωμαλία απεικονίζεται με μπλε και κόκκινο χρώμα και αναπαριστά την επαφή μεταξύ του ρευστοποιημένου εδάφους και του αρχικού εδάφους.



Εικόνα 2.39. Η πάνω εικόνα αντιστοιχεί στα δεδομένα των μετρήσεων που ελήφθησαν με τη μέθοδο του γεωραντάρ, ενώ η κάτω εικόνα αναπαριστά τα αποτελέσματα της μεθόδου της ειδικής αντίστασης. Είναι εμφανής η συσχέτιση μεταξύ των υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης (κόκκινο χρώμα) και της ανωμαλίας που εμφανίζεται στο πάνελ του γεωραντάρ, καθώς και η απεικόνιση της θέσης της τάφρου.

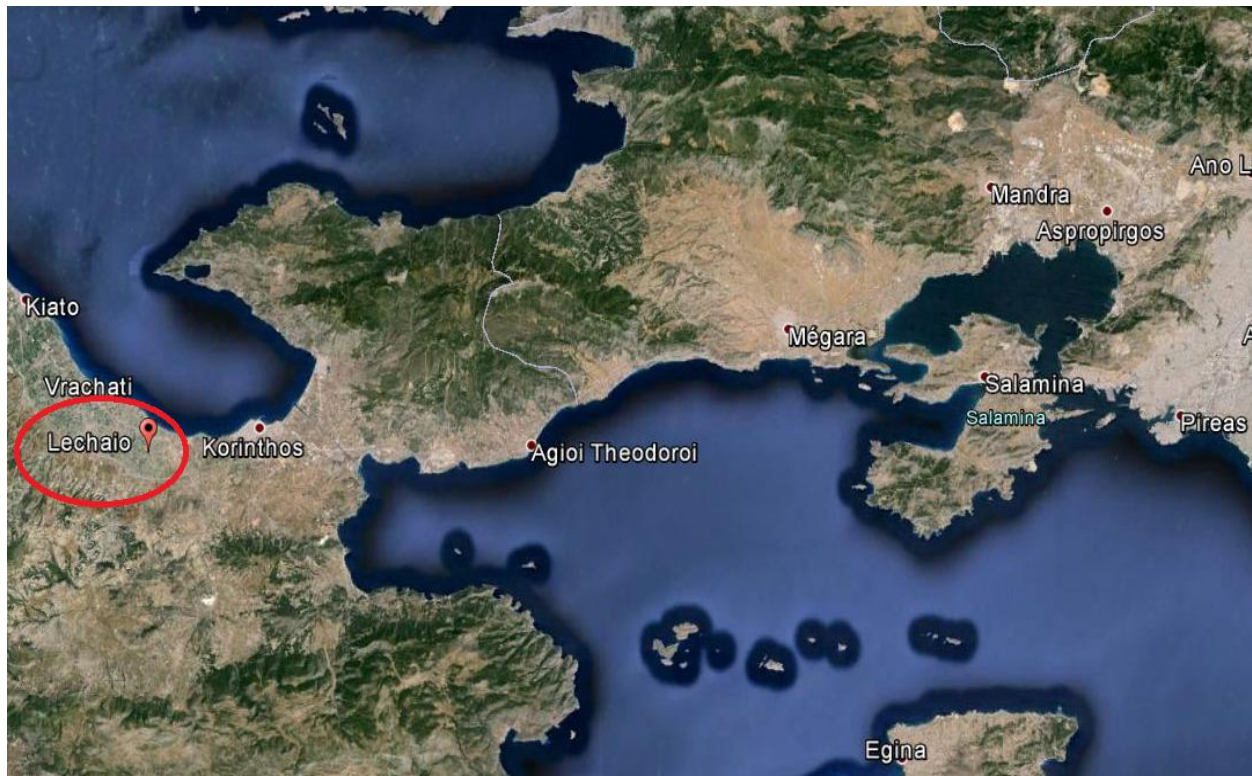
Τα δεδομένα των μετρήσεων με τη μέθοδο του γεωραντάρ που ελήφθησαν στις έξι τοποθεσίες μαρτυρούν ισχυρή διατάραξη του εδάφους κατά μήκος της ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης (Εικόνα 2.28) κατά το παρελθόν. Η διατάραξη αυτή περιλαμβάνει ρευστοποιήσεις οι οποίες προκλήθηκαν από σεισμούς, υποχώρηση του εδάφους, ρευστοποιημένους σχηματισμούς κωνικής μορφής και παρουσία άμμου στην επιφάνεια του εδάφους λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης και της δημιουργίας οδών διαφυγής της. Το πάχος των σωλήνων αυτών από τους οποίους η άμμος και το νερό ανερχόντουσαν στην επιφάνεια κυμαίνεται από 1-4 m. Οι

ρευστοποιημένοι σχηματισμοί καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις οι οποίες εκτείνονται από 100x150 m μέχρι 200x600 m και ξεπερνούν τα 3 m σε πάχος. Αυτό υποδεικνύει ότι μεγάλες ποσότητες άμμου ανήλθαν στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών δονήσεων. Με περαιτέρω μελέτες ίσως καταστεί δυνατή η σύνδεση του μεγέθους των ρευστοποιημένων σχηματισμών με την ένταση του σεισμού που τους δημιούργησε.

3. Γεωφυσική Έρευνα στη Βασιλική του Λεχαίου (Αρχαία Κόρινθος)

3.1. Πρόλογος

Σκοπός της γεωφυσικής αυτής έρευνας, ήταν ο εντοπισμός φαινομένων εδαφικής ρευστοποίησης και η εξέταση της αιτίας πρόκλησής των, σε παλαιοχριστιανική Βασιλική εκκλησία στην αρχαιολογική τοποθεσία του αρχαίου λιμανιού του Λεχαίου, στη νοτιοανατολική ακτή του κορινθιακού κόλπου (Εικόνα 3.1). Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν περιελάμβαναν την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, την μέθοδο του γεωραντάρ και την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων οδήγησαν στην αναγνώριση της στρωματογραφίας της περιοχής και στον εντοπισμό χονδρόκοκκων υλικών που σχηματίζουν ζώνες υψηλής αντίστασης, τα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί πιθανώς στα αρχαία χρόνια για γεωτεχνικές πρακτικές και τα οποία θα μπορούσαν να συνδέονται με τις εκδηλώσεις των χαρακτηριστικών του φαινομένου της ρευστοποίησης. Οι τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας εντόπισαν επιτυχώς τις ζώνες ρευστοποίησης, υποδεικνύοντας παράλληλα ότι η μέθοδος αυτή



Εικόνα 3.1. Η παράκτια τοποθεσία του Λεχαίου (κόκκινος κύκλος) παρακείμενα της Κορίνθου. Πηγή : *Google Earth.*

μπορεί να καταστεί ένα χρήσιμο εργαλείο για παρόμοιες εφαρμογές. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και η μέθοδος του γεωραντάρ προσέθεσαν επίσης σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές στην ιζηματογένεση.



Εικόνα 3.2. Εικόνα της Βασιλικής από δορυφόρο σε διαδοχική μεγέθυνση (b, c, d). Η ακριβής τοποθεσία της περιοχής έρευνας στον ευρύτερο χάρτη της Ελλάδας (a).

3.2. Γενικά Στοιχεία για το Λέχαιο

Το Λέχαιο, το δυτικό λιμάνι της Αρχαίας Κορίνθου, ήταν ένα τεχνητό λιμάνι το οποίο κατασκευάστηκε και θεμελιώθηκε σε βαλτώδη περιοχή και η σύνδεσή του με την ανοιχτή θάλασσα γινόταν δια μέσου ενός καναλιού με ενισχυμένη προστατευτική τοιχοποιία. Ήταν, πιθανώς, το σημαντικότερο λιμάνι τέτοιου τύπου στην αρχαιότητα και ένα από τα πιο σημαντικά λιμάνια στην Ελλάδα, για περισσότερο από μία χιλιετία. Παρόλα αυτά, η χρονολογία

κατασκευής του παραμένει ασαφής μέχρι και σήμερα, με επικρατέστερη ημερομηνία αρχικής κατασκευής να θεωρείται το 600 π.Χ. και ενδεχόμενες ημερομηνίες ανακατασκευής το 44 π.Χ. και 350 μ.Χ. Γεωμορφολογικές και βιολογικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, σε συνδυασμό με χρονολόγηση με ραδιοάνθρακα εκτεθειμένων κοχυλιών θαλάσσιας προέλευσης που βρέθηκαν στους τοίχους του καναλιού που οδηγεί στην εσωτερική λεκάνη του λιμανιού, υποδεικνύουν ότι το κανάλι αυτό είχε ελεύθερη πρόσβαση στη θάλασσα πριν ακόμα συμβεί μία, σεισμικής προέλευσης, ανύψωση του εδάφους, η οποία πιθανώς έλαβε χώρα κάπου μεταξύ του 5^{ου} και του 3^{ου} αιώνα π.Χ.. Τα δεδομένα αυτά μαρτυρούν ότι η κατασκευή του λιμανιού ξεκίνησε το 600 π.Χ., την περίοδο δηλαδή της κορινθιακής επέκτασης προς το Ιόνιο και τη νότια Ιταλία.

Κατά τα τέλη του 5^{ου} με αρχές του 6^{ου} αιώνα μ.Χ., χτίστηκε στο δυτικό τμήμα του λιμανιού, μεταξύ του δυτικού εσώτερου λιμανιού και της ακτογραμμής, μια παλαιοχριστιανική Βασιλική Εκκλησία, η οποία ήταν αφιερωμένη στον Μάρτυρα Λεωνίδα και τις επτά Παρθένες (Pallas 1965). Αρχαιολογικές έρευνες μαρτυρούν ότι η Βασιλική καταστράφηκε τον 6^ο αιώνα (Pallas 1965, Rothaus 1995), το οποίο φέρεται να είναι αποτέλεσμα του μεγάλου σεισμού του 551 μ.Χ. που έπληξε την παράκτια ζώνη της Αρχαίας Κορίνθου και προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές (Pallas 1965).

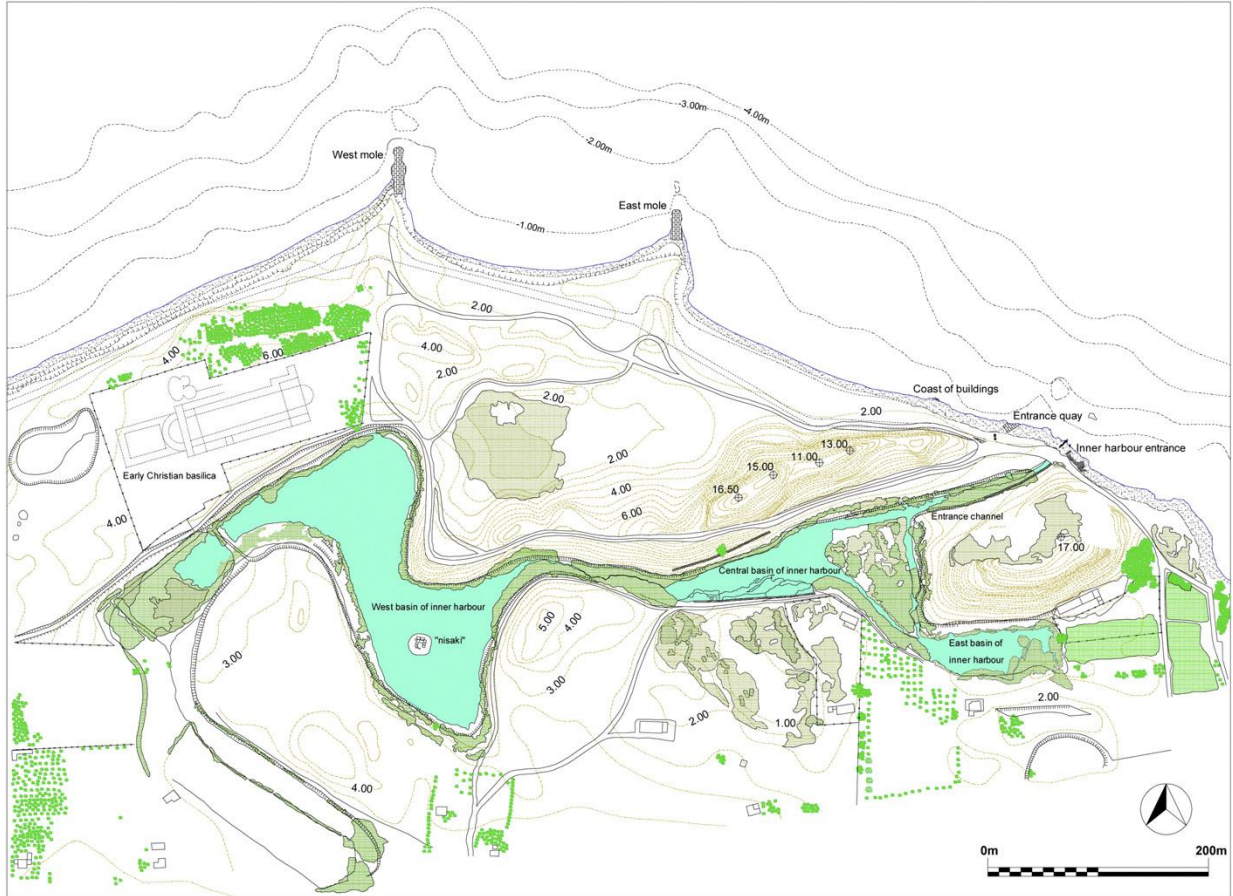
Η αρχαιότερη αναφορά της τοποθεσίας αυτής χρονολογείται στα τέλη του 6^{ου} ή στις αρχές του 5^{ου} αιώνα π.Χ. και σχετίζεται με έναν μύθο του Σιμωνίδα (545 π.Χ.). Η περιοχή αναφέρεται επίσης, σε πολλές πολεμικές περιγραφές μεταξύ του 392 και 217 π.Χ. από τον Ξενοφώντα, τον Διόδωρο Σικελιώτη, τον Πολύβιο και άλλους αρχαίους της εποχής.

3.3. Ιστορικά και Αρχαιολογικά Δεδομένα

Ευρήματα στην περιοχή του σημερινού Λεχαιού, παραλιακό προάστιο της σύγχρονης πόλης της Κορίνθου, έχουν ταυτοποιηθεί ως κομμάτια του Λεχαιού, του δυτικού λιμανιού της Αρχαίας Κορίνθου, μίας πόλης η οποία άνθισε και γνώρισε μεγάλη ακμή στους Αρχαϊκούς (700-600 π.Χ.) και Ρωμαϊκούς (44 π.Χ.-400 μ.Χ.) χρόνους. Αρχαιολογικά και ιστορικά δεδομένα μαρτυρούν ότι το Λέχαιο χρησιμοποιούνταν σαν λιμάνι τουλάχιστον μεταξύ του 500 π.Χ. και του 400 μ.Χ. και ήταν πιθανώς το σημαντικότερο λιμάνι της δυτικής Ελλάδας, για τουλάχιστον μία χιλιετία.

Η περιοχή σήμερα χαρακτηρίζεται από λοφίσκους και αναχώματα που αποτελούνται από άμμο και βότσαλα και τα οποία δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής της εσωτερικής λεκάνης του λιμανιού, χωρίς όμως να είναι γνωστή η ακριβής ημερομηνία που συνέβη αυτό στην αρχαιότητα. Τα αναχώματα αυτά επιβίωσαν επίσης της απομάκρυνσης υλικού, η οποία σχετίζεται με την κατασκευή σιδηροδρομικών γραμμών κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα (Georgiadis 1907). Η δραστηριότητα αυτή, πιθανώς, δεν αποτελεί μεμονωμένη διεργασία αλλά μία συνεχή διαδικασία εκσκαφής του βυθού και του δαπέδου, η οποία θα ήταν απαραίτητη για να διατηρηθεί λειτουργικό το λιμάνι.

Οι εναπομείνουσες εγκαταστάσεις του λιμανιού που είναι ορατές σήμερα, περιλαμβάνουν δύο μόλους, οι οποίοι πιθανώς σχημάτιζαν ένα εξωτερικό λιμάνι, ένα κανάλι με πέτρινη επένδυση που συνέδεε την ακτή με το εσωτερικό λιμάνι, καθώς και τα θεμέλια μιας ορθογώνιας κατασκευής (μνημείο) στην μέση της εσωτερικής λεκάνης (Georgiadis 1907, Shaw 1969). Γύρω από το λιμάνι έχουν εντοπιστεί χαλάσματα ενός νεκροταφείου που χρονολογείται από τον 6^ο μέχρι τον 4^ο αιώνα π.Χ., ποικίλα ερείπια από ρωμαϊκά κτίρια, καθώς και τα ερείπια ενός μνημειώδους συγκροτήματος παλαιοχριστιανικής Βασιλικής Εκκλησίας του 5^{ου} αιώνα μ.Χ., στο χώρο του οποίου πραγματοποιήθηκαν και οι παρούσες γεωφυσικές μελέτες (πρόκειται για την μεγαλύτερη Βασιλική της περιόδου που ανακαλύφθηκε ποτέ στην Μεσόγειο) (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3. Απεικόνιση του λιμανιού του Λεχαιού (Georgiadis 1907).

Παρόλα αυτά, εξαιτίας των λιγοστών ιστορικών και αρχαιολογικών δεδομένων, η παλαιοτοπογραφία και η ιστορία της περιοχής παραμένουν σε σημαντικό βαθμό άγνωστες. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ακριβής χρονολογία κατασκευής του λιμανιού παραμένει άγνωστη και αποτελεί θέμα αντιπαράθεσης μεταξύ των ερευνητών. Οι πιο πιθανές ημερομηνίες περιλαμβάνουν :

- Την περίοδο ευημερίας και εξάπλωσης της Κορίνθου στα δυτικά, προς το Ιόνιο και τη νότια Ιταλία, ειδικά γύρω στο 600 π.Χ.
- Τα χρόνια αμέσως μετά την επανίδρυση της Κορίνθου από τους Ρωμαίους, το 44 π.Χ.
- Την περίοδο γύρω στο 350 μ.Χ, όπου έχουν επιβεβαιωθεί επιγραφικά μεγάλες εργασίες στο λιμάνι (Parachatzis 1974, Sakellariou and Faraklas 1971, Wiseman 1978, Salmon 1984, Rothaus 1995).

Μερικά σημαντικά δημόσια κτίσματα και οχυρωματικά έργα, κατασκευάστηκαν επίσης από τους Κορινθίους το δεύτερο μισό του 5^{ου} αιώνα π.Χ. (E. Gebhard, pers. comm. 1995).

Στο λιμάνι του Λεχαίου, παρά τη σημαντικότητά του ως ιστορική τοποθεσία και ως το μεγαλύτερο και παλαιότερο, πιθανώς, τεχνητό λιμάνι του αρχαίου κόσμου, δεν έχουν πραγματοποιηθεί ποτέ εργασίες ανασκαφής. Για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να δωθούν αρχαιολογικές απαντήσεις ως προς την τοπογραφία και την ιστορία. Παρόλα αυτά, η συσχέτιση των επιφανειακών αρχαιολογικών ευρημάτων με τις γεωμορφολογικές μεταβολές που έχει υποστεί η περιοχή της Κορίνθου τα τελευταία εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, αποτελεί έναν εναλλακτικό και απλό τρόπο εύρεσης των συγκεκριμένων απαντήσεων. Οι μεταβολές αυτές συνεχίζουν ακόμα και στις τελευταίες δεκαετίες, όπως αποκαλύπτουν οι γεωδαιτικές μετρήσεις (Mariolakos and Stiros 1987, Stiros 1988a, 1988b).

3.4. Ανύψωση της Ακτής στην Περιοχή της Κορίνθου

Η βόρεια ακτή της Πελοποννήσου έχει από καιρό αναγνωριστεί ως μία περιοχή που υφίσταται ανύψωση και μάλιστα συγκαταλέγεται ανάμεσα στις περιοχές με τα μεγαλύτερα ποσοστά παγκοσμίως. Εξαιτίας του εντυπωσιακού αυτού βαθμού ανύψωσης (ο οποίος έκανε γνωστή την περιοχή και προσέλκυσε το ενδιαφέρον γεωεπιστημόνων από όλον τον κόσμο), η παραλιακή τοπογραφία της βόρειας Πελοποννήσου χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό θαλάσσιων βαθμίδων (Keraudren and Sorel 1987). Μάλιστα, τόσο η σύγχρονη όσο και η αρχαία πόλη της Κορίνθου έχουν κτιστεί πάνω σε δύο από αυτές τις βαθμίδες. Γεωμορφολογικά, βιολογικά και αρχαιολογικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι οι ακτές γύρω από την Κόρινθο συνέχισαν να υφίστανται ανύψωση τα τελευταία μερικές χιλιάδες χρόνια. Τα δεδομένα αυτά, έγκεινται σε :

- Ανυψωμένα έγκοιλα που σχετίζονται με απολιθώματα στις ακτές, στην περιοχή Περαχώρα Κορινθίας (Pirazzoli et al 1994, Stiros et al. in press).
- Εκτεθειμένα παραλιακά πετρώματα τα οποία κείτονται πάνω σε αρχαίες κατασκευές στη δυτική έξοδο της διώρυγας της Κορίνθου (Mariolakos and Stiros 1987).
- Εκτεθειμένα θαλάσσια στρώματα στην περιοχή της Κορίνθου που περιέχουν ψήγματα αγγειοπλαστικής τέχνης, αδιευκρίνιστης χρονολογίας (von Freyberg 1973).
- Ανυψωμένα ευρήματα του αρχαίου λιμανιού και της θαλάσσιας πανίδας στο λιμάνι της αρχαίας πόλης της Αιγείρας (Papageorgiou et al. 1993).

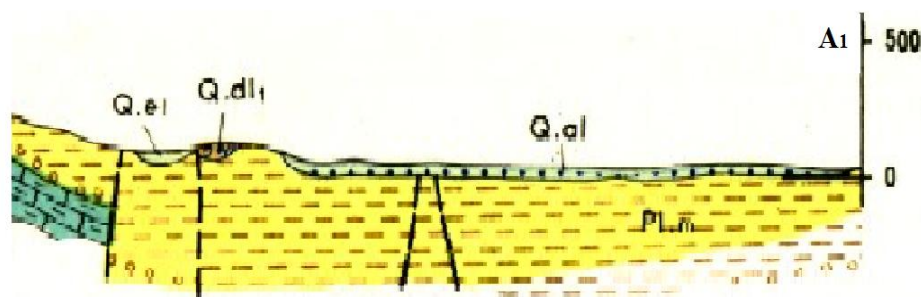
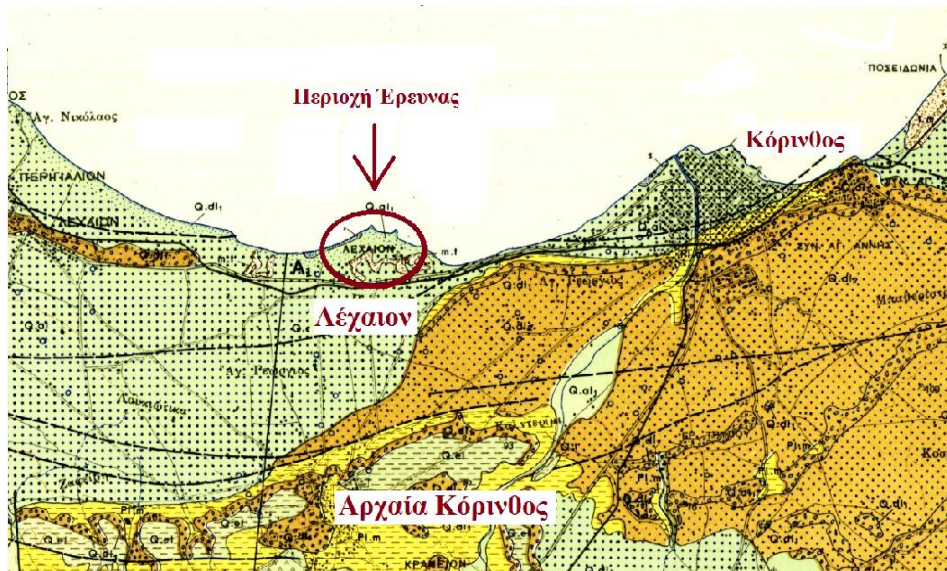
Τα σημάδια μιας πρόσφατης πτώσης της στάθμης της θάλασσας είναι παρόντα ακόμα και στο Λέχαιο. Ο Higgins (1965), παρατήρησε στην είσοδο του λιμανιού έγκοιλα που σχετίζονταν με την παρουσία μαλάκιων, καθώς και θαλάσσια ιζήματα που σχηματίστηκαν στον πυθμένα της

εσωτερικής λεκάνης του λιμανιού, τα οποία σήμερα βρίσκονται εκτεθειμένα σε ύψος μεγαλύτερο από ένα μέτρο πάνω από την τωρινή στάθμη της θάλασσας. Γενικά, η πρωτοποριακή έρευνα του Higgins (1965) υποδεικνύει ότι η περιοχή του Λεχαίου έχει υποστεί σημαντικές περιβαλλοντικές μεταβολές, όπως ανύψωση μεγαλύτερη του ενός μέτρου και πιθανώς ταλαντώσεις της σχετικής στάθμης της θάλασσας.

3.5. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Λεχαίου

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 3.4, η γεωλογία της περιοχής του Λεχαίου και της Αρχαίας Κορίνθου παρουσιάζει μια σχετική απλότητα, καθώς οι σχηματισμοί που συναντώνται είναι κυρίως ελουβιακοί, σύγχρονες προσχώσεις, μάργες, θαλάσσιες και παράκτιες αποθέσεις, ερυθρά άμμος και τεχνητά μεταφερθέντα υλικά κατά τη διάνοιξη της διώρυγας της Κορίνθου.

Η περιοχή στην οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις και η οποία αποτελεί κομμάτι του Λεχαίου, χαρακτηρίζεται ως επί το πλείστον από σύγχρονες προσχώσεις, όπως υλικά από αποσάθρωση γειτονικών πετρωμάτων και ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, αλλά και υλικά τα οποία μεταφέρθηκαν στον συγκεκριμένο χώρο κατά τη διάνοιξη της διώρυγας της Κορίνθου.



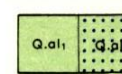
Εικόνα 3.4. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Λεχαιού (πάνω αριστερά) και γεωλογική τομή στην περιοχή της Ακροκορίνθου (κάτω αριστερά).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

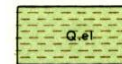
ΟΛΟΚΑΙΝΟΝ



Τεχνητός μεταφερθέντα υλικά κατά τη διάνοιξη της Διώρυγας της Κορίνθου

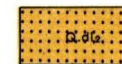


Σύγχρονες προσχώσεις . Q.al: υλικά από αποσάθρωση γειτονικών πετρωμάτων, Q.bl: αποθέσεις εντός ποταμών και χειμάρρων

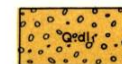


Ελουβιακοί κυρίως σχηματισμοί

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟΝ

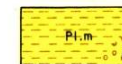


Ερυθρά αργιλομιγής άμμος



Θαλάσσιες και παράκτιες αποθέσεις : κροκαλοπαγή, μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, άμμοι κλπ.

ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟΝ



Μάργες

3.6. Γεωφυσική Έρευνα

3.6.1. Περιοχή Έρευνας και Στρωματογραφία



Εικόνα 3.5. Πανοραμική άποψη του χώρου της Βασιλικής, όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις. Πηγή: *Google Earth*.

Η ανώτερη στρωματογραφία της Βασιλικής θα μπορούσε να θεωρηθεί τεχνητής προέλευσης (Εικόνα 3.5). Αποτελείται κυρίως από άμμο και χαλίκια, με περιστασιακές παρεμβολές από άργιλο, λίθινα και κεραμικά κλάσματα (Pallas 1965). Η στρωματογραφία αυτή, εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 1,5 μέτρο κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής. Η τεχνητή φύση της ανώτερης στρωματογραφίας, εκτείνεται πιθανώς σε βάθος μέχρι και 3 m, όπως υποδεικνύεται και από την παρουσία στρώματος ογκολίθων σε βάθος τριών μέτρων, στη νοτιοδυτική πλευρά της βασιλικής (Pallas 1965).

3.6.2. Το Πρόβλημα

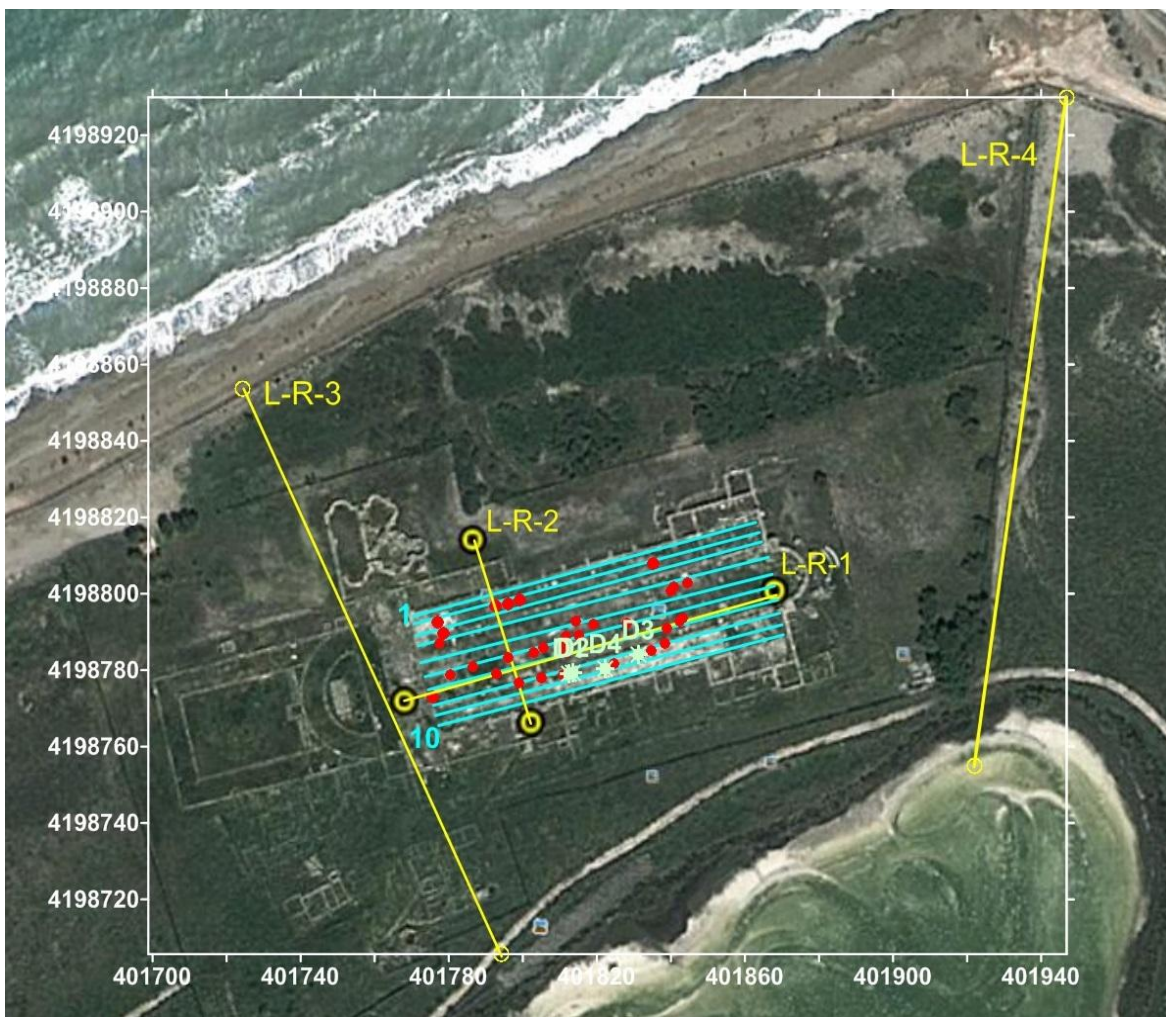
Το διακοσμημένο δάπεδο της βασιλικής χαρακτηρίζεται από πολυάριθμα βυθίσματα και δομές που έχουν υποστεί διαφορετική καθίζηση, κυκλικής και γραμμικής γεωμετρίας, και οι οποίες αποτελούν ένδειξη των διαδικασιών παραμόρφωσης του εδάφους (Εικόνα 3.6). Οι δομές, όπως αποτυπώθηκαν στη νότια στοά του ιερού, έχουν ποικίλες διαστάσεις και γενική κατευθυντικότητα Ανατολή-Δύση, με τις κυκλικές αστοχίες να κυμαίνονται από 0.45x0.33 m και 0.12 m σε βάθος, μέχρι 1.8x1.33 m και 0.4 m σε βάθος. Αντίστοιχα, το βάθος των γραμμικών αστοχιών κυμαίνεται από 0.05 μέχρι 0.12 m. Στον κεντρικό διάδρομο, η κατανομή τους δεν ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη τάση πέρα από την παρουσία συστάδας παραμορφώσεων στο κεντρικό τμήμα και κοντά στο όριο με το νότιο διάδρομο. Οι επιφανειακές αυτές δομές υποδεικνύουν ότι η εδαφική ρευστοποίηση είναι αποτέλεσμα σεισμικής δραστηριότητας.



Εικόνα 3.6. Εκδηλώσεις του φαινομένου της ρευστοποίησης στο δάπεδο της Βασιλικής, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Παρατηρούνται κυκλικές (b και c) και γραμμικές (d) αστοχίες.

3.6.3. Επιλογή Γεωφυσικών Μεθόδων και Σχεδιασμός Έρευνας

Τα επιφανειακά στρώματα (χαλαρά ιζήματα) στην υπό μελέτη περιοχή, η οποία βρίσκεται παρακείμενα της θάλασσας, μας ώθησαν να χρησιμοποιήσουμε γεωφυσικές μεθόδους οι οποίες επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων όπως, το μέγεθος των κόκκων, η διαπερατότητα, η παρείσφρυση θαλασσινού νερού και ο βαθμός συμπίεσης των σχηματισμών. Οι ηλεκτρομαγνητικές (μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής αγωγιμότητας (EM) και γεωραντάρ (GPR)) και ηλεκτρικές (ERT) μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν τέτοια χαρακτηριστικά και να προβάλλουν γνωρίσματα του φαινομένου της ρευστοποίησης.



Εικόνα 3.7. Η περιοχή έρευνας και η διάταξη των προφίλ των μετρήσεων. Με τις γαλάζιες γραμμές απεικονίζονται τα προφίλ του γεωραντάρ (GPR) και των ηλεκτρομαγνητικών (EM) μετρήσεων, ενώ με τις κίτρινες αυτά της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT). Με τις κόκκινες κουκίδες απεικονίζεται η επιφανειακή θέση των σημείων του ρευστοποιημένου εδάφους, όπου αυτή καταγράφηκε.

Καθώς επρόκειτο για αναγνωριστική έρευνα πεδίου, σχεδιάστηκαν δέκα προφίλ μη καταστρεπτικών ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων (EM) και μετρήσεων γεωραντάρ (GPR) (Εικόνα 3.7). Οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις εκτελέστηκαν με το όργανο μέτρησης αγωγιμότητας GF "CMD2" (αντίστοιχο με το Geonics EM-31) και δύο διαμορφώσεις, μία "χαμηλή" για 1,5 m συνολικό βάθος εντοπισμού και μία "ψηλή" για 3 m συνολικό βάθος, ενώ οι μετρήσεις γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα MALA, με θωρακισμένη κεραία 250 MHz. Η τοποθέτηση των προφίλ των μετρήσεων έγινε με τη χρήση διάταξης διαφορικού GPS (παγκόσμιο σύστημα στιγματοθέτησης) με το όργανο LEICA GPS1200. Επιπροσθέτως, σχεδιάστηκαν δύο κάθετα προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT), χρησιμοποιώντας τις διατάξεις ηλεκτροδίων Pole – Dipole και Schlumberger, με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά των μετρήσεων του γεωραντάρ. Για την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης και των γεωφυσικών δεδομένων, σημειώθηκε η ακριβής τοποθεσία κάποιων από τα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν στο δάπεδο της βασιλικής με το διαφορικό GPS (Εικόνα 3.7).

3.6.4. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

3.6.4.1. Σχεδιασμός Ηλεκτρομαγνητικών Μετρήσεων

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7, οι μετρήσεις της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου πραγματοποιήθηκαν σε δέκα παράλληλα προφίλ (γαλάζιες γραμμές) με διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ, τα οποία σχεδιάστηκαν και κάλυψαν το σύνολο σχεδόν του δαπέδου της Βασιλικής. Η κάθετη απόσταση μεταξύ των προφίλ δεν είναι σταθερή, λόγω της μορφολογίας και των φυσικών εμποδίων του δαπέδου και παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις. Το μήκος του εκάστοτε προφίλ ανέρχεται στα 100 m και η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με βήμα προχώρησης 1 m, ενώ το συνολικό πλάτος του κανάβου είναι περί τα 30 m.

3.6.4.2. Εξοπλισμός Υπαίθρου και Επεξεργασία Μετρήσεων

Για τις μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments "CMD2", με απόσταση πηνίων 3 m (αντίστοιχο του Geonics EM-31) και με δύο διαμορφώσεις, μία "χαμηλή" ("low") για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m και μία "υψηλή" ("high") για συνολικό βάθος εντοπισμού 3 m. Επιπλέον, το όργανο αυτό έχει τη

δυνατότητα να παρέχει και τα στοιχεία των γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης, όντας κατάλληλα συνδεδεμένο με ειδικό όργανο GPS.

Αρχικά, οι μετρήσεις διεξήχθησαν στα δέκα προφίλ επιλέγοντας τη ρύθμιση "high", δηλαδή με συνολικό βάθος διασκόπησης τρία μέτρα, ενώ στη συνέχεια επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις, αυτή τη φορά με τη ρύθμιση "low", για μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια στους πολύ επιφανειακούς σχηματισμούς (μέχρι 1,5 μέτρο).

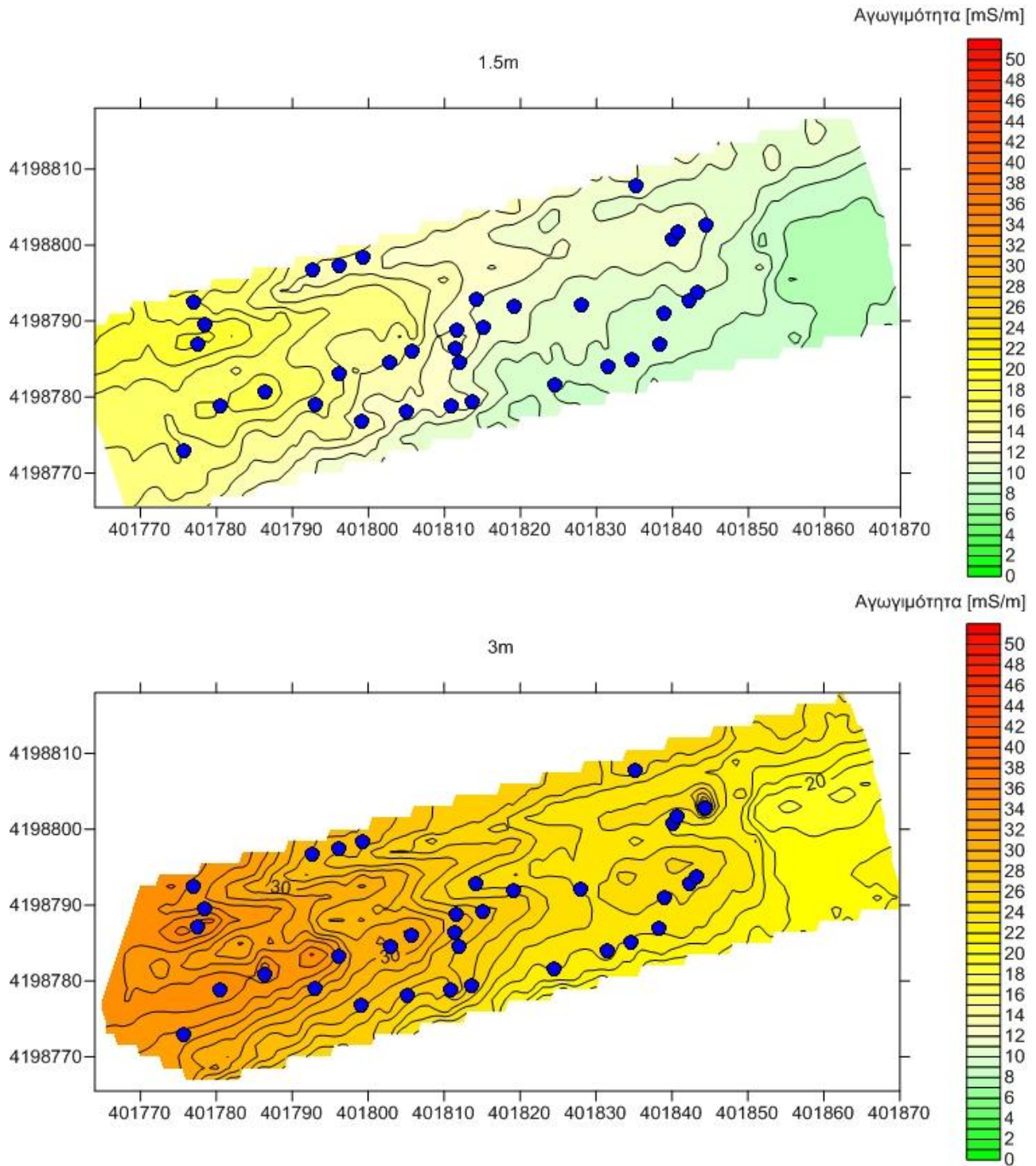
Τελικώς, τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις μετρήσεις επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer της Goldensoftware και δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχοι χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για τα δύο βάθη διασκόπησης, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.8. Διαδικασία λήψης των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων στο δάπεδο της Βασιλικής με το όργανο GF CMD-2.

3.6.4.3. Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες

Χάρτες Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας



Εικόνα 3.9. Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βάθος 1.5 m (πάνω) και 3 m (κάτω). Με μπλε κουκίδες απεικονίζονται οι θέσεις των καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

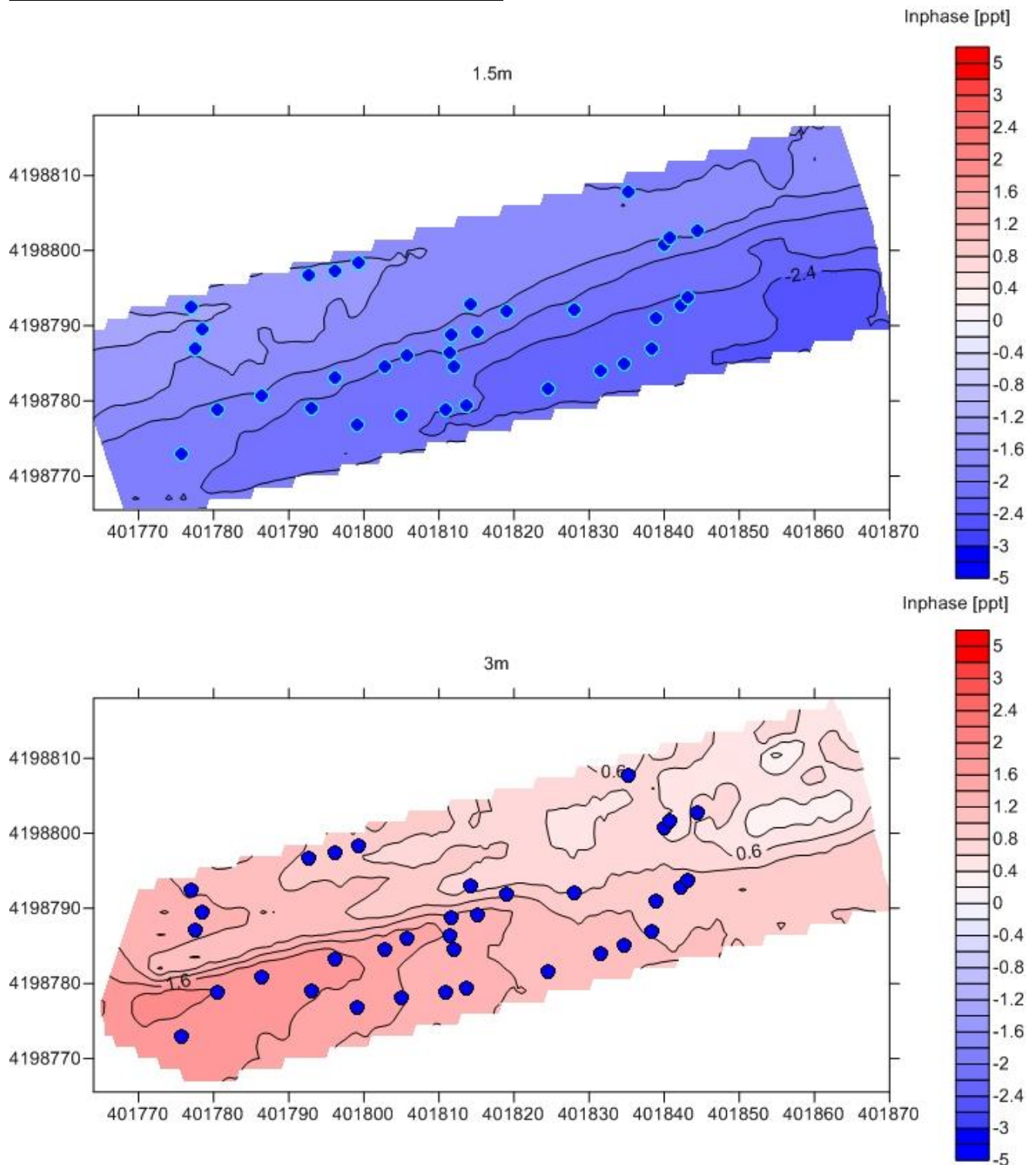
Μελετώντας την Εικόνα 3.9 και συγκρίνοντας τους χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα δύο βάθη (1.5 m και 3 m) εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι και στους δύο χάρτες, το δυτικό τμήμα παρουσιάζεται πιο αγώγιμο (υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας) σε σχέση με το ανατολικό (χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας). Αυτό πιθανώς υποδεικνύει διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος κάτω από το χώρο της Βασιλικής, η οποία ελαττώνεται όσο προχωράμε προς τα ανατολικά, όπως φαίνεται και από τη σταδιακή και ομαλή μείωση της αγωγιμότητας. Υποδεικνύει, επίσης, κατά πάσα πιθανότητα και μεγαλύτερη διαπερατότητα των σχηματισμών και παρουσία περισσότερο λεπτόκοκκου υλικού.
- Επειδή η κλίμακα των δύο χαρτών είναι η ίδια, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι στον χάρτη του 1.5 m οι τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι χαμηλότερες σε σχέση με τον χάρτη των 3 m, όπου οι τιμές αγωγιμότητας είναι υψηλότερες. Όσο κατευθυνόμαστε δηλαδή βαθύτερα στο έδαφος σε σχέση με την επιφάνεια του δαπέδου της Βασιλικής, τόσο μεγαλώνει η αγωγιμότητα των σχηματισμών. Αυτό είναι πιθανόν να οφείλεται στη δράση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης και παράλληλα να υποδεικνύει την ύπαρξη περατών (αδρομερών) αποθέσεων, συχνά ανθρωπογενούς προέλευσης.
- Παρατηρείται και στους δύο χάρτες η ύπαρξη μίας τοπικής, μάλλον συνεκτικής, μη αγώγιμης δομής στο νοτιοανατολικότερο τμήμα, η οποία παρουσιάζει σταθερές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η δομή αυτή εντοπίζεται και στον χάρτη του 1.5 m αλλά και των 3 m, το οποίο σημαίνει ότι η δομή αυτή, ανθρωπογενούς μάλλον προέλευσης λόγω του συνεχούς χαρακτήρα της, βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια και όχι σε βάθος μεγαλύτερο του 1.5 m. Παρόμοιες μικρότερες δομές εντοπίζονται και σε άλλα σημεία του χάρτη, όπως η ελλειψοειδής δομή που βρίσκεται ακριβώς αριστερά της προαναφερθείσας δομής και η οποία εντοπίζεται μόνο στον χάρτη των 3 m.
- Στο χάρτη των 3 m παρατηρούνται δύο μακρόστενες, παράλληλες ζώνες σαν "γλώσσες" από το δυτικό μέχρι το κεντρικό περίπου τμήμα του χάρτη, όπου οι τιμές αγωγιμότητας φαίνονται να επεκτείνονται και να εισχωρούν στις επόμενες, με διεύθυνση ΝΔ/ΒΑ, οι οποίες μπορεί να υποδεικνύουν την ύπαρξη τοιχοποιίας ή πλακόστρωτων κατασκευών

κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής. Στον χάρτη του 1.5 m διακρίνεται, εμφανώς λιγότερο, η βόρεια μόνο ζώνη.

- Στο χάρτη των 3 m φαίνεται ότι οι θέσεις των ρευστοποιήσεων (μπλε κουκίδες) στο αριστερό μισό του χάρτη, βρίσκονται ως επί το πλείστον κατά μήκος των δύο ζωνών που παρατηρήθηκαν προηγουμένως και μαζί με τη νότια σειρά των μπλε κουκίδων φαίνεται ότι παρουσιάζουν μια γραμμική τάση, όπως αν ακολουθούσαν για παράδειγμα μία υπεδαφική τοιχοποιία. Αντίθετα, οι ρευστοποιήσεις στο χάρτη του 1.5 m, δε φαίνεται να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη κατανομή.
- Η πλειοψηφία των ρευστοποιήσεων και στους δύο χάρτες φαίνεται να απαντάται σε περιοχές με υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας.

Χάρτες Μαγνητικής Επιδεκτικότητας (Inphase)



Εικόνα 3.10. Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας (Inphase) σε βάθος 1.5 m (πάνω) και 3 m (κάτω). Με μπλε κουκίδες απεικονίζονται οι θέσεις των καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

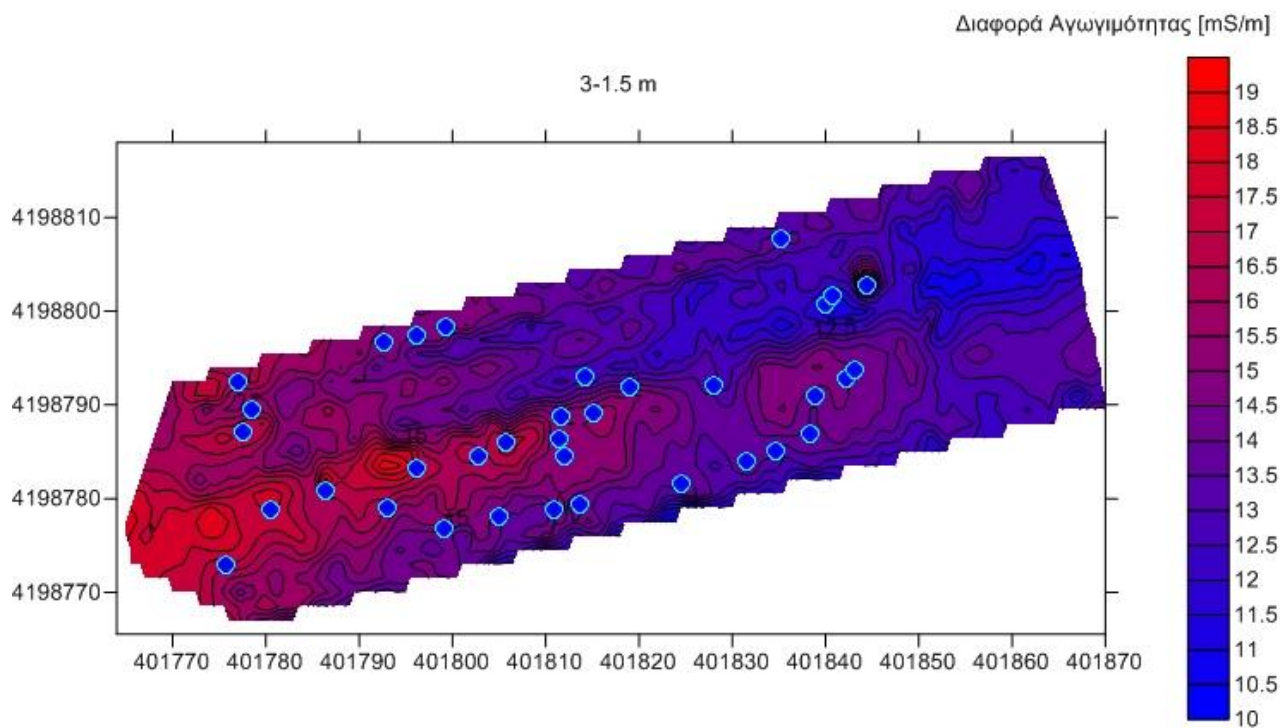
Μελετώντας την Εικόνα 3.10 και συγκρίνοντας τους χάρτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας στα δύο βάθη (1.5 m και 3 m) εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι στο χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m, το βόρειο μισό τμήμα παρουσιάζει υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας και παραπλήσιες σε αυτές των περιβαλλόντων σχηματισμών, ενώ όσο μεταφερόμαστε προς το νότιο μισό του χάρτη φαίνεται μία σταδιακή μείωση της μαγνητικής επιδεκτικότητας, όπως συμβαίνει περίπου και με τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στον αντίστοιχο χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m.
- Χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα τιμών παρατηρείται εύκολα ότι οι πιο επιφανειακοί σχηματισμοί, που απεικονίζονται από τον χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m, χαρακτηρίζονται από μικρότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας σε σχέση με αυτούς που τους περιβάλλουν (τιμές μικρότερες του μηδενός), ενώ οι βαθύτεροι σχηματισμοί όπως φαίνεται και στον χάρτη των 3 m έχουν μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας σε σχέση με το περιβάλλον τους (τιμές μεγαλύτερες του μηδενός).
- Στο χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m παρατηρείται στην κάτω δεξιά γωνία μία δομή με σταθερή τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας και η οποία αντιστοιχεί με τις δομές που παρατηρούνται στο ίδιο σημείο στους δύο ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες πιο πάνω. Η δομή αυτή, δε φαίνεται στο χάρτη των 3 m.
- Στο χάρτη των 3 m παρατηρείται στο αριστερό μισό και μέσο, μία σχετικά ευθεία ομάδα παράλληλων γραμμών, κατά μήκος της οποίας φαίνεται να συγκεντρώνονται πολλές καμπύλες διαφόρων τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας, αλλά και ρευστοποιήσεις. Το μοντέλο αυτό θα μπορούσε να αναπαριστά για παράδειγμα μία τοιχοποιία ή ένα τεχνητό διάδρομο, λόγω και της σχετικά απότομης μετάβασης των τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας από την πάνω πλευρά της ευθείας στην κάτω. Οι απότομες αυτές μεταβάσεις είναι συνήθως προϊόν ανθρωπογενούς δραστηριότητας, καθώς στη φύση η μετάβαση των μαγνητικών τιμών, αλλά και αυτών της αγωγιμότητας, από τον ένα σχηματισμό στον άλλον είναι πιο ομαλή.
- Παρατηρείται ότι και στους δύο χάρτες, η πλειοψηφία των ρευστοποιήσεων εντοπίζεται στο νότιο μισό τους, όπου στο 1.5 m οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι χαμηλότερες ενώ στα 3 m υψηλότερες.

- Τελικώς, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τους χάρτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας, είναι πιο ασαφή και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας σε σχέση με αυτά των χαρτών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Χάρτης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας 3 m-1.5 m

Μία τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί για την καλύτερη ανάδειξη υπεδαφικών δομών, είναι η αφαίρεση χαρτών με τιμές φυσικών φαινομένων ίδιου είδους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Surfer, αφαιρείται ο χάρτης των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνολικού βάθους 1.5 m από τον αντίστοιχο χάρτη των 3 m (Εικόνα 3.11). Με αυτόν τον τρόπο, ουσιαστικά εντείνεται η επίδραση συγκεκριμένων υπεδαφικών δομών, ενώ παράλληλα μειώνεται η επίδραση του υπεδαφικού περιβάλλοντός των. Δημιουργείται έτσι, ένας χάρτης όπου διακρίνονται πιο καθαρά και με μεγαλύτερη σαφήνεια οι μεταβολές της αγωγιμότητας και οι δομές που διαφέρουν από τους περιβάλλοντες σχηματισμούς . Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν πρόκειται για αφαίρεση βαθών, δηλαδή δεν απεικονίζονται τιμές που βρίσκονται μόνο μεταξύ 1.5 m και 3 m, αλλά για απόρριψη μεσαίων τιμών και απεικόνιση των ακραίων τιμών. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω μόνο για τους χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθώς οι αντίστοιχοι χάρτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν παρείχαν σαφή αποτελέσματα.



Εικόνα 3.11. Χάρτης κατανομής της διαφοράς ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ο οποίος προέκυψε από την αφαίρεση του χάρτη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνολικού βάθους διασκόπησης 1.5 m από τον αντίστοιχο χάρτη των 3 m. Με μπλε κουκίδες απεικονίζονται οι θέσεις των καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

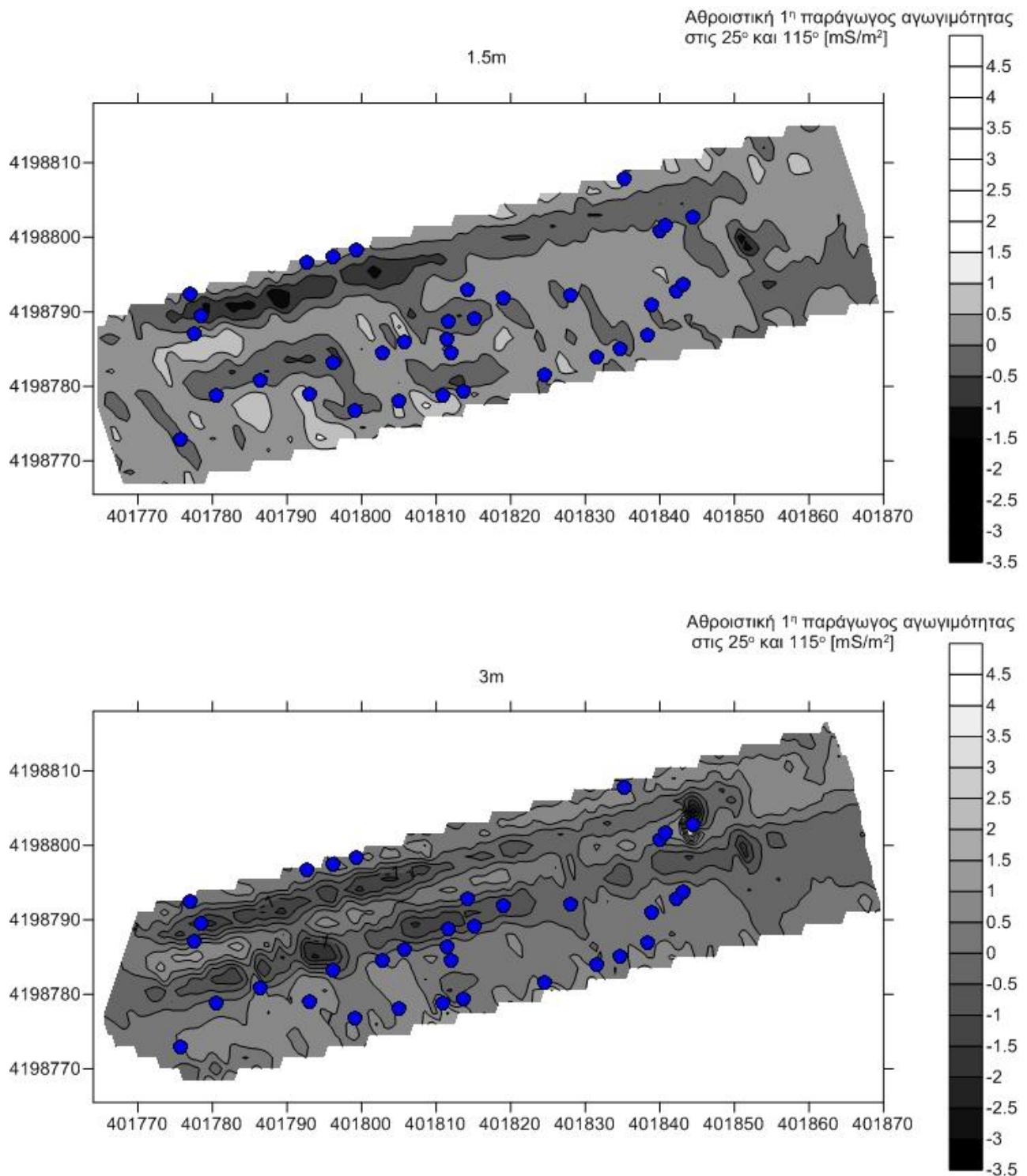
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Μελετώντας την Εικόνα 3.11, όπου φαίνεται ο χάρτης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 3 m-1.5 m, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Παρατηρείται μία σχετικά σταδιακή μετάβαση από υψηλότερες σε χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, από τα δυτικά προς τα ανατολικά του χάρτη, όπως συμβαίνει αντίστοιχα και στους χάρτες της αγωγιμότητας και για τα δύο βάθη (Εικόνα 3.9).
- Ο χάρτης αυτός παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες και σε σημεία ταυτίζεται με τον χάρτη της αγωγιμότητας για συνολικό βάθος 3 m (Εικόνα 3.9). Στα νοτιοανατολικά και των δύο χαρτών παρατηρούνται οι ίδιες δομές, όπως και στα βορειοανατολικά, ενώ στο αριστερό μισό του παρόντος χάρτη παρατηρούνται οι δομές - "γλώσσες", όπως και στον χάρτη της αγωγιμότητας για συνολικό βάθος 3 m. Η συνεπής αυτή εμφάνιση των ανωμαλιών στις συγκεκριμένες θέσεις στους διαφορετικούς χάρτες, συνεπάγεται και την σχεδόν σίγουρη ύπαρξη και ανίχνευση δομών στο υπέδαφος.

- Στον παρόντα χάρτη, οι τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας ακολουθούν πιο συγκεκριμένη τάση και διαγράφουν καλύτερα ορισμένες περιοχές σε σχέση με τους απλούς χάρτες της αγωγιμότητας. Διακρίνεται για παράδειγμα στο αριστερό μισό του χάρτη η κόκκινη ζώνη που αντιστοιχεί στη νότια ‘‘γλώσσα’’ του χάρτη των 3 m, ενώ στο δεξιό μισό διακρίνεται μία μπλε ζώνη χαμηλότερων τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- Οι σχετικά ευθείες αυτές ζώνες θα μπορούσαν να αναπαριστούν τοιχία (δηλαδή δομές ανθρωπογενούς προέλευσης), όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, λόγω της μορφολογίας τους αλλά και λόγω της απότομης μετάβασης των τιμών αγωγιμότητας μεταξύ των ευθειών αυτών και των γύρω περιοχών.
- Η μεσαία νοητή ευθεία γραμμή των ρευστοποιήσεων (μπλε κουκίδες) βρίσκεται πάνω στην κόκκινη ‘‘γλώσσα’’, δηλαδή εκεί που παρατηρούνται υψηλές τιμές διαφοράς αγωγιμότητας, ενώ η θέση των υπόλοιπων ρευστοποιήσεων φαίνεται να σχετίζεται με χαμηλότερες, κυρίως, τιμές διαφοράς αγωγιμότητας. Γενικά, στις πολύ χαμηλές τιμές διαφοράς αγωγιμότητας δεν παρατηρούνται σχεδόν καθόλου ρευστοποιήσεις.
- Είναι φανερό ότι, η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης τεχνικής έδωσε μία ακόμα πιο σαφή εικόνα σχετικά με το τι συμβαίνει στο υπέδαφος, κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής.

Χάρτες Αθροιστικής 1ης Παραγωγού Διευθύνσεων Κατανομής Αγωγιμότητας



Εικόνα 3.12. Χάρτες αθροιστικής 1^{ης} παραγωγού των τιμών της φαινόμενης αγωγιμότητας στις διευθύνσεις 25° και 115° και για βάθος 1.5 m (πάνω) και 3 m (κάτω). Με μπλε κουκίδες απεικονίζονται οι θέσεις των καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

Για τη βέλτιστη αποτύπωση δεδομένων και εξαγωγή συμπερασμάτων, υποβάλλονται οι αρχικοί χάρτες των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε περαιτέρω επεξεργασία μέσω του προγράμματος Surfer. Συγκεκριμένα, επιλέχτηκε να εφαρμοστεί φίλτρο πρώτης παραγώγου, δεδομένου ότι με αυτόν τον τρόπο σκιαγραφείται η κλίση των υπεδιαφικών σχηματισμών και φαίνονται δομές όπως τοιχία, με διευθύνσεις 25° και 115° για τους χάρτες στα δύο βάθη. Αφού δηλαδή φτιάχτηκαν οι αρχικοί χάρτες αγωγιμότητας (Εικόνα 3.9), στη συνέχεια εφαρμόστηκε το φίλτρο πρώτης παραγώγου για κάθε χάρτη και για δύο διευθύνσεις σε κάθε χάρτη (25° και 115°). Στη συνέχεια, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας στο πρόγραμμα, αθροίστηκαν οι δύο χάρτες $1^{ης}$ παραγώγου για κάθε βάθος και προέκυψαν οι δύο χάρτες που φαίνονται παραπάνω (Εικόνα 3.12). Η διαδικασία αυτή δεν παρουσιάζεται και για τους χάρτες μαγνητικής επιδεκτικότητας καθώς δεν υπήρξαν σαφή αποτελέσματα.

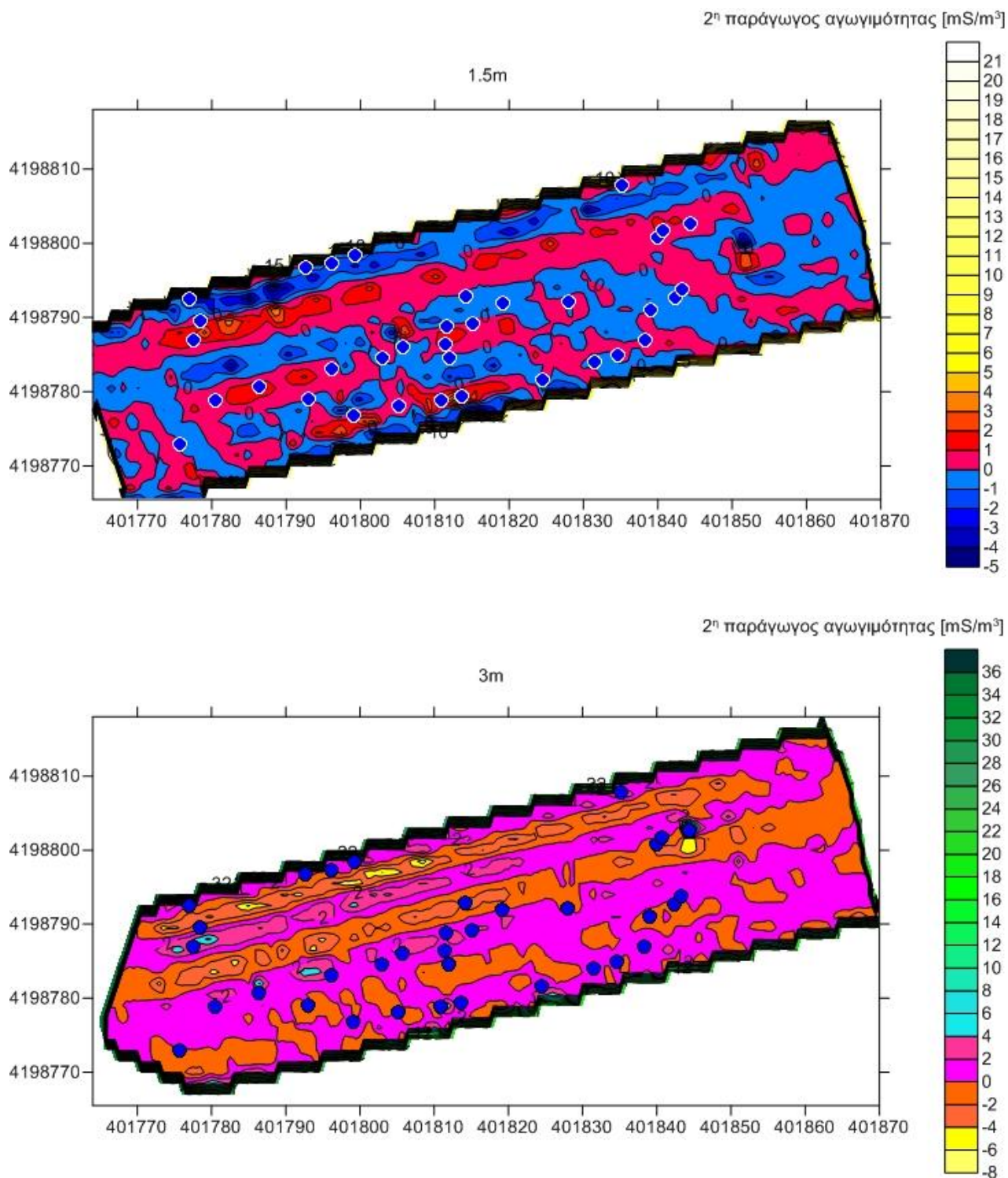
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Μελετώντας την Εικόνα 3.12 και συγκρίνοντας τους χάρτες αγωγιμότητας των αθροιστικών πρώτων παραγώγων στα δύο βάθη (1.5 m και 3 m), μπορούν να εξαχθούν τα εξής:

- Είναι εύκολα αντιληπτό ότι αυτός ο τρόπος επεξεργασίας δίνει τα πιο σαφή και ξεκάθαρα αποτελέσματα, σε σχέση με αυτούς που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα. Πλέον, δε φαίνονται ασαφείς ή γενικές μεταβολές των τιμών της αγωγιμότητας, οι οποίες εκφράζονται από τις ανάλογες καμπύλες, αλλά συγκεκριμένες δομές με καθορισμένα άκρα και όρια.
- Στο χάρτη των 3 m παρατηρούνται ξεκάθαρα δύο ευθείες και παράλληλες δομές στο πάνω μισό του χάρτη, οι οποίες ξεκινούν από το δυτικό άκρο και σταματούν λίγο πριν το ανατολικό. Η πάνω ευθεία δομή παρατηρείται και στο χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m, το οποίο πλέον σημαίνει ότι σε βάθος μέχρι 1.5 m υπάρχει αυτή η δομή, η οποία μάλλον οφείλεται σε κάποιο πλακόστρωτο κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής.
- Η κάτω ευθεία δομή που παρατηρείται στο χάρτη των 3 m, εμφανίζεται διακεκομμένη σε αυτόν του 1.5 m, και μάλιστα να αναπτύσσεται μέχρι το μέσο μόνο του χάρτη. Μάλιστα, στο 1.5 m η δομή αυτή φαίνεται ότι σχηματίζει ένα "γάμμα", το οποίο είναι πιθανόν να αντιστοιχεί σε ένα άλλο πλακόστρωτο, ίσως μέχρι βάθους 1.5 m, όπου λόγω της αλλαγής διεύθυνσης θα μπορούσε να οδηγήσει για παράδειγμα σε κάποιο άλλο δωμάτιο του χώρου της Βασιλικής.

- Σχετικά με τους σχηματισμούς οι οποίοι διακρίνονται σε μικρό βάθος αλλά δε διακρίνονται τόσο καλά σε μεγαλύτερο, δεν υπάρχει μεγάλη βεβαιότητα για το βάθος ύπαρξής τους, καθώς στις διασκοπήσεις μεγαλύτερου βάθους τα αποτελέσματα επηρεάζονται από πολύ μεγαλύτερο όγκο σχηματισμών και δεδομένων. Αντίθετα, αν ένας σχηματισμός μπορεί να παρατηρηθεί σε μεγαλύτερο βάθος αλλά όχι σε μικρότερο, τότε μπορεί να ειπωθεί με μεγαλύτερη ασφάλεια ότι ο σχηματισμός αυτός βρίσκεται βαθύτερα από το μικρότερο βάθος διασκόπησης.
- Στο νοτιοανατολικό άκρο και των δύο χαρτών εμφανίζεται για άλλη μία φορά η δομή η οποία εμφανίζεται σε όλους τους παραπάνω χάρτες, εκτός ίσως μόνο από το χάρτη inphase των 3 m. Μπορεί δηλαδή πλέον να ειπωθεί με αρκετή βεβαιότητα, ότι σε αυτό το σημείο υπάρχει μία δομή συνεκτική, ορθογώνιου ίσως σχήματος, με σταθερές τιμές αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας.
- Η σημαντικότερη παρατήρηση που μπορεί να γίνει, έχει σχέση με το γεγονός ότι η πλειοψηφία των ρευστοποιήσεων (μπλε κουκίδες) συναντάται στα άκρα των δομών που αναλύθηκαν, ίσως πλακόστρωτων, ενώ, δε συναντώνται σχεδόν καθόλου στο εσωτερικό αυτών. Η θέση των ρευστοποιήσεων δηλαδή, συμπίπτει με υψηλότερες τιμές αθροιστικής 1^{ns} παραγώγου αγωγιμότητας (άκρα των δομών), ενώ στο εσωτερικό των δομών όπου συναντώνται χαμηλότερες τιμές δεν παρατηρούνται σχεδόν καθόλου ρευστοποιήσεις. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπου η θέση των ρευστοποιήσεων δεν ακολουθεί αυτόν τον κανόνα, οι οποίες όμως είναι μάλλον ελάχιστες συγκριτικά με την γενική τάση, η οποία είναι η εμφάνισή τους στα άκρα των δομών. Τέτοια περίπτωση είναι η νότια νοητή ευθεία των ρευστοποιήσεων, όπου θα μπορούσε να εξακριβωθεί αν συμβαίνει το ίδιο με επέκταση της έρευνας προς τα νότια σε περαιτέρω προφίλ.
- Παρατηρούνται κάποιες μεμονωμένες δομές, όπως οι μαύρες περιοχές στο χάρτη βάθους 1.5 m.
- Οι παρατηρήσεις αυτές θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικό σύμμαχο στην προσπάθεια αναζήτησης των αιτιών που προκάλεσαν τις ρευστοποιήσεις στο συγκεκριμένο χώρο.

Χάρτες 2ης Παραγώγου Κατανομής Αγωγιμότητας



Εικόνα 3.13. Χάρτες 2ης παραγώγου των τιμών της φαινόμενης αγωγιμότητας για βάθος 1.5 m (πάνω) και 3 m (κάτω). Με μπλε κουκίδες απεικονίζονται οι θέσεις των καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

Για την περαιτέρω ποιοτικότερη αποτύπωση των δεδομένων και εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, υποβλήθηκαν, τελικώς, οι αρχικοί χάρτες των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε άλλη μία επεξεργασία μέσω του προγράμματος Surfer και συγκεκριμένα εφαρμόστηκε φίλτρο δευτέρας παραγώγου, επιλέγοντας τάξη Laplacian 4. Έτσι, ενισχύθηκε ακόμα περισσότερο η επίδραση των επιφανειακών σχηματισμών, όπως τα άκρα των δομών, ενώ μειώθηκε και άλλο η επίδραση των περιβαλλόντων σχηματισμών. Με τη διαδικασία αυτή, μπόρεσε να αποτυπωθεί ακόμα πιο ξεκάθαρα το υπέδαφος της Βασιλικής, το οποίο θα βοηθήσει στην προσπάθεια να αποκαλυφθούν τα αίτια των ρευστοποιήσεων στο συγκεκριμένο χώρο.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Μελετώντας την Εικόνα 3.13 και συγκρίνοντας τους χάρτες των τιμών της δευτέρας παραγώγου για τα δύο βάθη (1.5 m και 3 m), εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι υπάρχουν κάποιες ομοιότητες και ακολουθείται η ίδια γενική τάση μεταξύ των χαρτών για τα αντίστοιχα βάθη (1.5 m και 3 m) της αθροιστικής πρώτης παραγώγου και της δευτέρας παραγώγου, η οποία είναι η εμφάνιση της πλειονότητας των ρευστοποιήσεων στα άκρα των δομών.
- Ουσιαστικά διακρίνονται και στους δύο χάρτες δύο διακριτές περιοχές τιμών. Οι περιοχές χαμηλότερων τιμών (μπλε αποχρώσεις στο χάρτη του 1.5 m και πορτοκαλί αποχρώσεις στο χάρτη των 3 m) και οι περιοχές υψηλότερων τιμών (κόκκινες αποχρώσεις για 1.5 m βάθος και ροζ αποχρώσεις για 3 m βάθος).
- Στο χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m διακρίνεται στο βόρειο κομμάτι η ευθεία δομή με χαμηλές τιμές δευτέρας παραγώγου αγωγιμότητας (μπλε γραμμή) όπως και στον αντίστοιχο χάρτη της αθροιστικής πρώτης παραγώγου. Η ταύτιση της συγκεκριμένης δομής στους δύο χάρτες προκαλεί υποψίες για την ύπαρξη της. Αντίθετα, η δομή που παρουσιάζεται ως "γάμμα" στο χάρτη πρώτης παραγώγου για 1.5 m, δεν απαντάται στον παρόντα χάρτη, το οποίο μας κάνει να αμφισβητούμε τελικά την ύπαρξη κάποιας συγκεκριμένης δομής, όπως πλακόστρωτου διαδρόμου, και να θεωρήσουμε ότι ίσως πρόκειται για συσσώρευση μπαζών.
- Αντίστοιχα, παρατηρούνται ομοιότητες και στους δύο χάρτες των 3 m (1^{ης} και 2^{ης} παραγώγου) με κυριότερη την αποτύπωση δύο ευθύγραμμων παράλληλων δομών στο πάνω μισό του χάρτη. Στον παρών χάρτη οι δύο αυτές δομές είναι πιο λεπτές σε πάχος.

- Στο χάρτη συνολικού βάθους 1.5 m, η πλειοψηφία των ρευστοποιήσεων φαίνεται ότι βρίσκεται σε περιοχές υψηλότερων τιμών (κόκκινες αποχρώσεις) ακριβώς όπως και στο χάρτη της 1^{ης} παραγωγού, με κάποιες εξαιρέσεις να είναι παρούσες.
- Η προηγούμενη διαπίστωση λαμβάνει χώρα σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό στο χάρτη των 3 m, όπου η ολότητα σχεδόν των ρευστοποιήσεων βρίσκεται σε περιοχές υψηλότερων τιμών (ροζ αποχρώσεις).
- Παρατηρούνται μεμονωμένες δομές, όπως οι κίτρινες περιοχές στο χάρτη των 3 m και οι πορτοκαλί σε αυτόν του 1.5 m.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Συνολικά για την Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδο

Αξιολογώντας τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, συνολικά, από την μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών χαρτών, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

- ✓ Κοινό τόπο σε όλους τους χάρτες αποτελεί το γεγονός ότι οι ρευστοποιήσεις εντοπίζονται ως επί το πλείστον σε περιοχές υψηλότερων τιμών αγωγιμότητας σε σχέση με τις περιβάλλουσες τιμές.
- ✓ Ειδικά στους χάρτες των παραγωγών για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, διακρίνονται ξεκάθαρα δύο παράλληλες ευθύγραμμες δομές στο πάνω μισό τους, οι οποίες εμφανίζονται με την μορφή "γλωσσών" στον αντίστοιχο χάρτη αγωγιμότητας 3m. Στους χάρτες των παραγωγών για βάθος 1.5 m διακρίνεται ξεκάθαρα η βόρεια ευθεία δομή και τμήματα μόνο της νότιας.
- ✓ Η απότομη μεταβολή των τιμών αγωγιμότητας μεταξύ των παράλληλων αυτών δομών και των περιβαλλόντων σχηματισμών, καθώς και το όχι τόσο φυσικό, ευθύγραμμο και μακρόστενο σχήμα τους, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται μάλλον για προϊόντα ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως πχ. πλακόστρωτοι διάδρομοι.
- ✓ Οι ρευστοποιήσεις εντοπίζονται συνήθως, όπως φαίνεται και από τους χάρτες των παραγωγών, στα άκρα των δομών (πιθανώς πλακόστρωτα με χαμηλότερες τιμές αγωγιμότητας λόγω συνεκτικότητας) και όχι στο εσωτερικό τους.
- ✓ Στους περισσότερους χάρτες παρατηρείται μία συνεκτική δομή με σταθερές τιμές αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας στο νοτιοανατολικό άκρο τους, η οποία ίσως να πρόκειται για κάποια κατασκευή.

3.6.5. Μετρήσεις Γεωραντάρ

3.6.5.1. Σχεδιασμός Μετρήσεων Γεωραντάρ

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7, οι μετρήσεις της μεθόδου του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκαν στον ίδιο κανάβο που πραγματοποιήθηκαν και οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις. Ο κανάβος, όπως αναφέρθηκε, αποτελείται από δέκα παράλληλα προφίλ (γαλάζιες γραμμές) με διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ, τα οποία κάλυψαν το σύνολο σχεδόν του δαπέδου της Βασιλικής. Η κάθετη απόσταση μεταξύ των προφίλ δεν είναι σταθερή λόγω της μορφολογίας και των φυσικών εμποδίων του δαπέδου, καθώς και της τεχνικής φύσης της ίδιας της μεθόδου (κύλιση του οργάνου με τροχό) και παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις. Το μήκος του εκάστοτε προφίλ ανέρχεται στα 100 m περίπου και η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με βήμα προχώρησης ένα μέτρο, ενώ το συνολικό πλάτος του κανάβου είναι περί τα 30 m.

3.6.5.2. Εξοπλισμός Υπαίθρου και Επεξεργασία Μετρήσεων

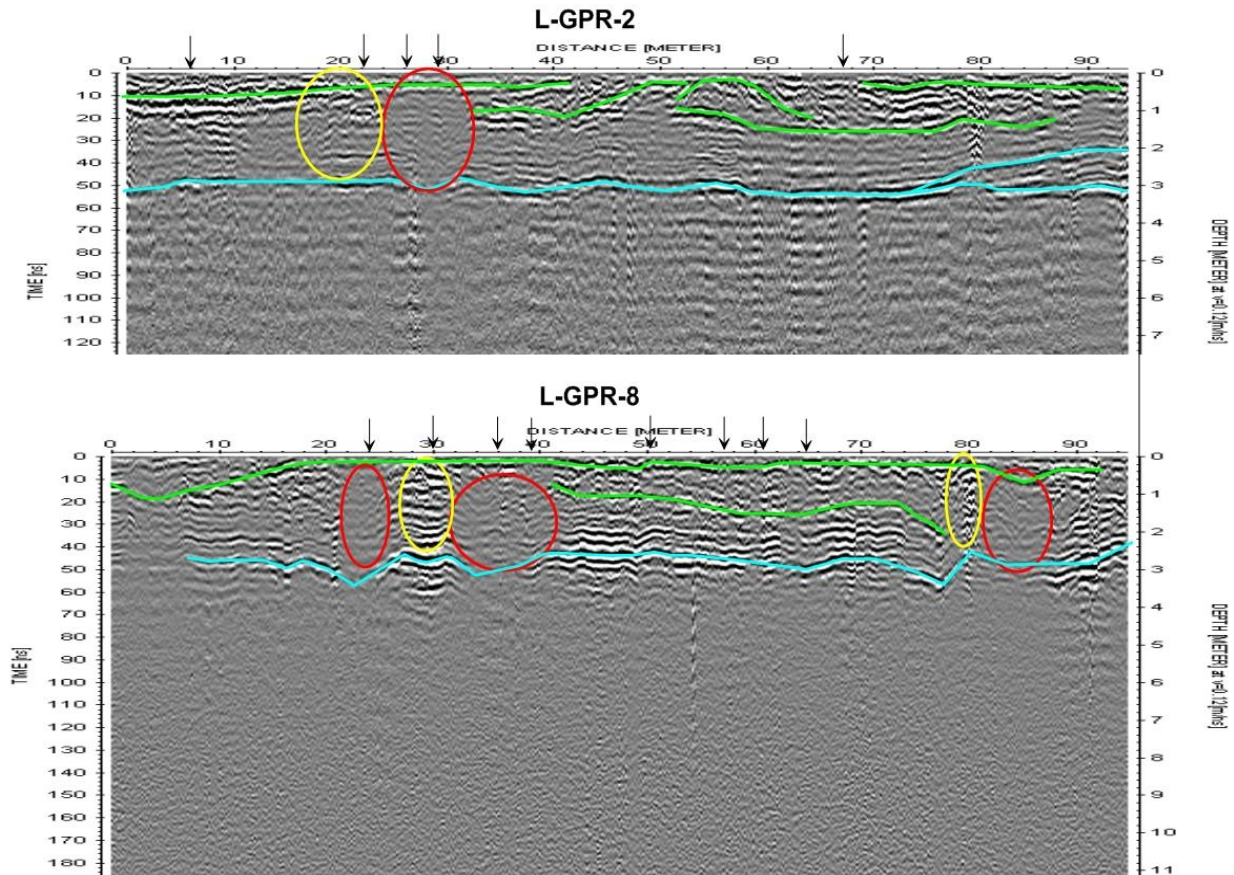
Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το επιστημονικό όργανο της MALA Geoscience με θωρακισμένη κεραία συχνότητας 250 MHz, η οποία λειτούργησε ταυτόχρονα και ως πηγή αλλά και ως δέκτης. Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου, το οποίο προκύπτει και από τη φύση της κατασκευής των οργάνων, είναι η ταχεία περάτωση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων, ειδικά σε σχέση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους, όπως πχ. η ηλεκτρική τομογραφία.

Τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις μετρήσεις, αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν μέσω του προγράμματος REFLEXW της Sandmeier Scientific Software και στη συνέχεια, τα μοντέλα που προέκυψαν υπέστησαν τελική επεξεργασία μέσω του προγράμματος Surfer της Goldensoftware για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και λοιπών δομών.



Εικόνα 3.14. Διάταξη GPR της MALA Geoscience με θωρακισμένη κεραία 250 MHz. **Πηγή:** <http://www.archeores.com>.

3.6.5.3. Τομές Γεωραντάρ

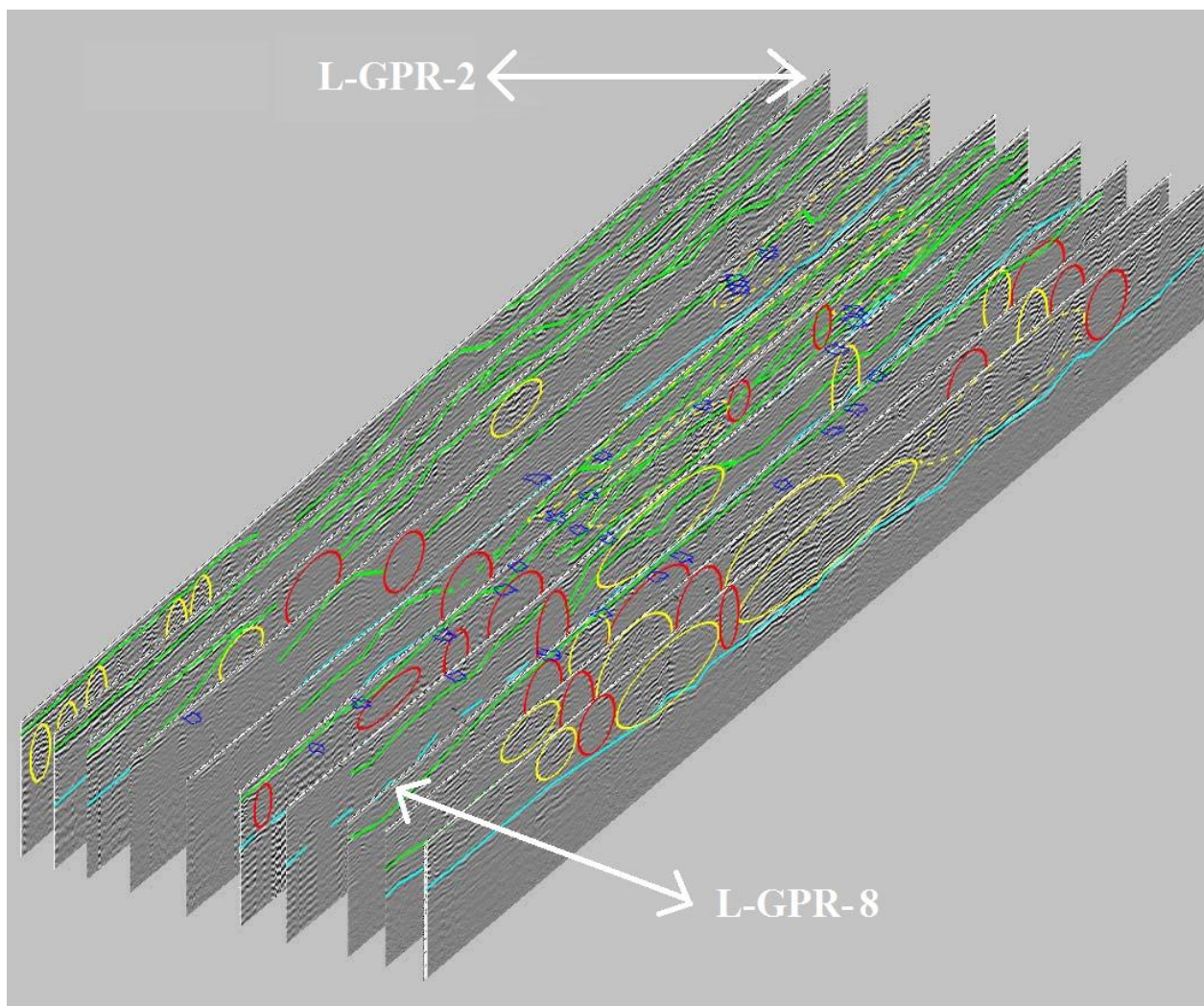


Εικόνα 3.15. Διδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της 2ης και της 8ης τομής των μετρήσεων του γεωραντάρ, ξεκινώντας από Βορρά (Εικόνα 3.16). Οι γαλάζιες γραμμές απεικονίζουν την κύρια στρωματογραφία σε βάθος περίπου 3 m, ενώ οι πράσινες πιο επιφανειακή στρωματογραφία μεταξύ αδρομερών σχηματισμών. Οι κίτρινοι κύκλοι σκιαγραφούν ανακλάσεις που σχετίζονται με συσσώρευση αδρομερών υλικών, ενώ αντίθετα οι κόκκινοι κύκλοι μαρτυρούν περιοχές λεπτόκοκκων σχηματισμών, λόγω της φανεράς απουσίας ανακλάσεων. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν θέσεις καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

Οι δύο τομές που παρουσιάζονται παραπάνω δεν επιλέχθηκαν τυχαία, αλλά λόγω της παρουσίας πλήθους ρευστοποιήσεων σε αυτές. Στην Εικόνα 3.16, όπου παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση όλων των τομών, οι ρευστοποιήσεις απουσιάζουν από τη δεύτερη τομή καθώς καταγράφηκαν μετά τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου.

Η μέθοδος του γεωραντάρ δεν αποφέρει καλά αποτελέσματα σε πολύ αγώγιμα εδάφη, καθώς το σήμα απορροφάται από τους σχηματισμούς και δε συμβαίνουν ανακλάσεις, όπως φαίνεται για παράδειγμα στους κόκκινους κύκλους. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου στο χώρο της Βασιλικής υπήρξε λίγο επίφοβη, δεδομένου των υψηλών τιμών

αγωγιμότητας από την πολύ κοντινή παρουσία της θάλασσας. Παρ'όλα αυτά, η επεξεργασία των μετρήσεων έδωσε σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.16. Τρισδιάστατη απεικόνιση των δέκα τομών γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν στο δάπεδο της Βασιλικής. Οι μπλε κύκλοι υποδεικνύουν τις θέσεις των καταγεγραμμένων επιφανειακών ρευστοποιήσεων.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Μελετώντας τις δύο παραπάνω εικόνες των τομών του γεωραντάρ (Εικόνα 3.15 και 3.16), εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι και στις δύο τομές (Εικόνα 3.15) εμφανίζεται στο ίδιο περίπου βάθος των 3 m μία μεγάλη σταθερή ανωμαλία, η οποία χωρίζει χώρους διαφορετικής σύστασης και η οποία σημειώνεται με γαλάζιο χρώμα, απεικονίζοντας την κύρια στρωματογραφία του υπεδάφους. Παρατηρείται επίσης ότι, κάτω από αυτήν τη γαλάζια γραμμή οι

ανακλάσεις λιγοστεύουν σημαντικά και ειδικά στην περίπτωση της 8^{ης} τομής σχεδόν εκλείπουν, το οποίο προκαλεί υποψίες ότι η γραμμή αυτή μπορεί να αντιστοιχεί στο επίπεδο του θαλασσινού νερού.

- Στα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους παρατηρούνται επίσης εκτεταμένες ανωμαλίες που σημειώνονται με πράσινες γραμμές, οι οποίες όμως δεν είναι συνεχείς αλλά διακόπτονται. Οι ορίζοντες αυτοί, πιθανώς διαχωρίζουν σχηματισμούς που αποτελούνται από ποικίλα αδρομερή υλικά και ταυτίζονται με τις λιγότερο αγωγίμες ζώνες, όπως αυτές παρουσιάζονται στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες.
- Εντοπίζονται περιοχές όπου παρατηρούνται εκτεταμένες ανακλάσεις και οι οποίες κυκλώνονται με κίτρινο χρώμα. Οι περιοχές αυτές αποτελούνται κατά πάσα πιθανότητα από μη αγωγίμα υλικά, τα οποία δεν αφήνουν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διεισδύσει και με αυτόν τον τρόπο προκαλούνται οι ανακλάσεις. Οι δομές αυτές θα μπορούσαν να είναι ανθρωπογενούς προέλευσης, όπως για παράδειγμα τοιχία ή κάποιο πλακόστρωτο.
- Από την άλλη, εντοπίζονται περιοχές όπου παρατηρούνται ελάχιστες ή καθόλου ανακλάσεις και κυκλώνονται με κόκκινο χρώμα. Οι περιοχές αυτές αποτελούνται από αγωγίμα και λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία αφήνουν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από το γεωραντάρ να διεισδύσει, με αποτέλεσμα να μην προκαλούνται ανακλάσεις.
- Παρατηρείται σε ορισμένα σημεία της Εικόνας 3.15, ότι οι κόκκινοι κύκλοι ταυτίζονται ακριβώς με τη θέση των ρευστοποιήσεων (βελάκια) και μάλιστα υπάρχει μία περιοχή σε κάθε τομή όπου ο κόκκινος κύκλος φιλοξενεί δύο ρευστοποιήσεις (κόκκινος κύκλος στην 2^η τομή και μεσαίος κόκκινος κύκλος στην 8^η). Η παρατήρηση αυτή φαντάζει πολύ λογική δεδομένου του μηχανισμού της ρευστοποίησης, σύμφωνα με τον οποίο δημιουργείται ένας πίδακας άμμου προς την επιφάνεια, ο οποίος στη συνέχεια υποχωρεί έχοντας δημιουργήσει μία λεπτόκοκκη και αγωγίμη περιοχή.
- Υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις, καθώς παρατηρούνται ρευστοποιήσεις πάνω από μεμονωμένες περιοχές με αδρομερή και μη αγωγίμα υλικά (κίτρινοι κύκλοι), αλλά και σε περιοχές με μεγάλο πλάτος εμφάνισης στις οποίες παρατηρούνται εκτεταμένες ανακλάσεις (η περιοχή στην 8^η τομή όπου παρατηρούνται τέσσερις ρευστοποιήσεις).
- Μελετώντας την Εικόνα 3.16 και την τρισδιάστατη απεικόνιση των δέκα τομών, παρατηρείται ότι οι λεπτόκοκκοι σχηματισμοί οι οποίοι περιγράφονται από τους

κόκκινους κύκλους, παρουσιάζουν μία γραμμικότητα και μία συνέχεια με διεύθυνση Βορράς-Νότος, η οποία ταυτίζεται με τη δομή που παρατηρείται στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες (ειδικά σε αυτών του 1.5 m της 1^{ης} και 2^{ης} παραγωγού) και η οποία μοιάζει με "γάμμα".

- Λόγω της ύπαρξης στο υπέδαφος ανθρωπογενών αποθέσεων (καθώς πρόκειται για τεχνητή κατασκευή) που έχει σαν αποτέλεσμα τη σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, αλλά και της παρακείμενης παρουσίας της θάλασσας με συνέπεια την αύξηση της αγωγιμότητας, η επεξεργασία των μετρήσεων ήταν δυσχερής και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενώ παρείχαν αξιόλογες παρατηρήσεις, δεν ήταν τόσο σαφή όσο αυτά της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.

3.6.6. Μετρήσεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας

3.6.6.1. Σχεδιασμός μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7, οι μετρήσεις της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις τομές. Οι τομές L-R-1 και L-R-2, με διευθύνσεις ΔΝΔ-ΑΒΑ και ΒΒΔ-ΝΝΑ ανιστοίχως, παρουσιάζονται κάθετες μεταξύ τους, διασχίζοντας το δάπεδο της Βασιλικής (Εικόνες 3.7 και 3.17). Το μήκος της τομής L-R-1 ανέρχεται στα 105 m περίπου, με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι στο 1,5 m, ενώ το μήκος της τομής L-R-2 ανέρχεται στα 50 m περίπου, με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να βρίσκεται στο 0,5 m. Από την άλλη, οι τομές L-R-3 και L-R-4, με διευθύνσεις ΒΒΔ-ΝΝΑ και ΒΒΑ-ΝΝΔ ανιστοίχως, δεν τέμνουν το δάπεδο της Βασιλικής, αλλά ούτε τέμνονται με άλλες τομές. Το μήκος της τομής L-R-3 ανέρχεται στα 160 m και αυτό της L-R-4 στα 170 m, με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι και στις δύο τομές στα 2,5 m.



Εικόνα 3.17. Οι τομές L-R-2 (αριστερά) και L-R-4 (δεξιά) κατά το στάδιο συναρμολόγησής τους.

3.6.6.2. Εξοπλισμός Υπαίθρου, Διαδικασία και Επεξεργασία Μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας και τη λήψη των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL Pro της IRIS Instruments, ενώ η καταγραφή των γεωγραφικών συντεταγμένων και του απολύτου υψομέτρου της θέσης κάθε ηλεκτροδίου έγινε με κατάλληλο όργανο GPS.

Επειδή οι στόχοι που ψάχνουμε (ρευστοποιήσεις) είναι αρκετά επιφανειακοί, αλλά εξαρτώνται και από τη στρωματογραφία, οι τομογραφίες πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τη διάταξη Pole-Dipole, καθώς η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευαισθησία σε επιφανειακές ανομοιογένειες και μπορεί να αποκαλύψει τυχόν δομές και την έκτασή τους, τόσο σε βάθος όσο και παράπλευρα (Πίνακας 1.5).



Εικόνα 3.18. Το όργανο μέτρησης των τιμών ειδικής αντίστασης, SYSCAL Pro. Πηγή: <http://www.gubkin.ru/>

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων στην ύπαιθρο, ακολούθησε η ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων. Η ερμηνεία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος RES2DINV (Loke and Barker, 1996), το οποίο δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας. Οι επιλογές που έγιναν στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

1. Μέσω της ρύθμισης “Model refinement”, επιλέχθηκε το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην ύπαιθρο για τις τέσσερις τομές. Με τον τρόπο αυτόν, το πρόγραμμα δημιουργεί περισσότερες μετρήσεις από αυτές που ελήφθησαν πραγματικά, με αποτέλεσμα την αποτύπωση του υπεδάφους με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Σύμφωνα με τις οδηγίες του ίδιου του προγράμματος, αν υπάρχουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές των αντιστάσεων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (όπως και υπάρχουν στην συγκεκριμένη περίπτωση), προτείνεται η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου με περισσότερα και μικρότερα κελιά (Εικόνα 1.15). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για διατάξεις όπως η Pole-Dipole και η Dipole-Dipole, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες σε αποκλίσεις που εντοπίζονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Γενικώς, η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου όπου το εύρος των κελιών είναι το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων δίνει τα **βέλτιστα** αποτελέσματα.

2. Μέσω της ρύθμισης "Select robust inversion" επιλέχθηκαν και οι τρεις δυνατές διαδικασίες ερμηνείας, δηλαδή Standard-Standard (SS), Robust-Standard (RS), Robust-Robust (RR), καθώς, επίσης, και η ερμηνεία Robust Robust Horizontal (RRH) με κατάλληλη ρύθμιση. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, η μέθοδος που έδωσε τα περισσότερα ικανοποιητικά αποτελέσματα ήταν η Robust-Robust συνεπικουρούμενη από την ρύθμιση Horizontal. Με τη χρήση της παραμέτρου Robust-Robust, καταρθώθηκε να αφαιρεθεί σε σημαντικό βαθμό ο "θόρυβος" των μετρήσεων και να ληφθεί ερμηνεία αυτών, όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται, δίνοντας έμφαση σε απότομες μεταβολές ορίων και τιμών της ειδικής αντίστασης. Δεδομένου ότι οι επιφανειακές δομές, ανθρωπογενούς και μη προέλευσης, παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια και κατ'επέκταση απότομες μεταβολές στις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, με την επιλογή Robust Robust επιτεύχθει η καλύτερη δυνατή ερμηνεία. Προσθέτοντας και την επιλογή Horizontal στη Robust-Robust, καταρθώθηκε να ερμηνευθεί ικανοποιητικά και η στρωματογραφία, εκτός από τις επιφανειακές δομές.

3.6.6.3. Τομές Ηλεκτρικής Τομογραφίας

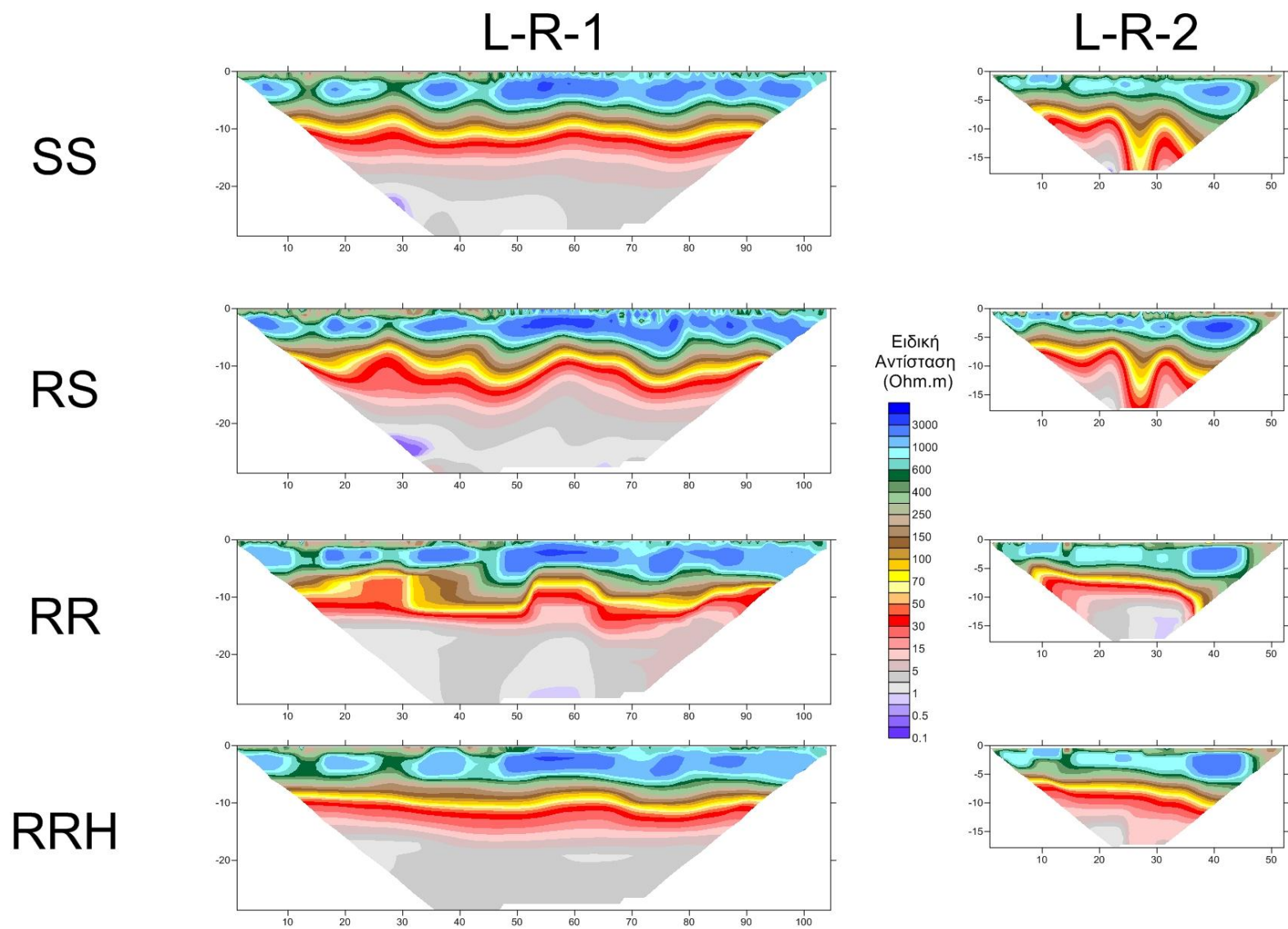
Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για όλες τις διαθέσιμες επιλογές αναστροφής που εφαρμόστηκαν (SS, RS, RR, RRH) και για τις τέσσερις γεωηλεκτρικές τομές που πραγματοποιήθηκαν (L-R-1, L-R-2, L-R-3, L-R-4) και θα επιλεγεί η αναστροφή που περιγράφει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το υπεδafικό μοντέλο, ώστε να προχωρήσει η περαιτέρω ανάλυσή του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δύο ζεύγη, ανάλογα με τη σχέση τους στο χώρο. Οι κάθετες τομές L-R-1 και L-R-2 παρουσιάζονται μαζί στην Εικόνα 3.19, καθώς τέμνουν και οι δύο το δάπεδο της Βασιλικής και ο σχεδιασμός τους είχε ως στόχο τον εντοπισμό και την αποτύπωση επιφανειακών δομών, οι οποίες θα βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις θέσεις και τα αίτια πρόκλησης των ρευστοποιήσεων. Οι τομές L-R-3 και L-R-4 από την άλλη, παρουσιάζονται μαζί στην Εικόνα 3.20, καθώς δεν τέμνουν το δάπεδο της Βασιλικής και ο σχεδιασμός τους πραγματοποιήθηκε με σκοπό την αποτύπωση της στρωματογραφίας και όχι συγκεκριμένων τοπικών δομών, εξ ου και το μεγαλύτερο μήκος τους.

Παρατηρώντας στην Εικόνα 3.19 και τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους ερμηνείας της τομής L-R-1, συμπεραίνεται ότι αυτή περιγράφεται καλύτερα από την επιλογή Robust-Robust-

Horizontal (RRH). Στην επιλογή RS, τα αποτελέσματα των επιφανειακών δομών παρουσιάζονται ομαλοποιημένα, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό δεδομένου ότι οι στόχοι είναι ρευστοποιήσεις όπου αναμένονται απότομες μεταβολές των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης. Επίσης, οι κατώτεροι ορίζοντες που αποτυπώνουν τη στρωματογραφία, παρουσιάζονται αρκετά παραμορφωμένοι, έχοντας επηρεαστεί από τις επιφανειακές μετρήσεις, και δεν ανταποκρίνονται τόσο στην πραγματικότητα. Αντίστοιχα, η ερμηνεία RR ενώ παρουσιάζει ικανοποιητικά τις απότομες μεταβολές της αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα, υστερεί πολύ στην αποτύπωση της στρωματογραφίας και των κατώτερων στρωμάτων, καθώς αυτά παρουσιάζονται εντελώς παραμορφωμένα, έχοντας επηρεαστεί από τα ανώτερα στρώματα. Η ερμηνεία SS παρουσιάζει με τον πλέον ικανοποιητικό τρόπο τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα, υστερεί όμως λίγο στην αποτύπωση της στρωματογραφίας η οποία φαίνεται να επηρεάζεται από τις ανώτερες δομές. Τέλος, η επιλογή RRH αποτυπώνει με σχεδόν ρεαλιστικό τρόπο τη στρωματογραφία και αρκετά ικανοποιητικά τα επιφανειακά στρώματα, με μικρότερη όμως λεπτομέρεια σε σχέση με την SS.

Είναι λοιπόν σαφές, ότι για την επιλογή της πλέον κατάλληλης ερμηνείας των γεωηλεκτρικών τομών πρέπει να γίνουν ορισμένοι συμβιβασμοί και να επιλεγθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Η επιλογή δηλαδή της RRH ως της πλέον κατάλληλης ερμηνείας για την τομή L-R-1, δεν εξασφαλίζει την καλύτερη επιφανειακή αποτύπωση, δεδομένου ότι αυτή παρέχεται από την SS, εξασφαλίζει όμως το βέλτιστο συνδυασμό ικανοποιητικής αποτύπωσης των επιφανειακών δομών και απότομων μεταβολών των αντιστάσεων τους και της στρωματογραφίας. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο σκέψης, επιλέχθηκε αντίστοιχα η ερμηνεία RRH και για την τομή L-R-2.

Παρομοίως, παρατηρώντας στην Εικόνα 3.20 και τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους ερμηνείας των τομών L-R-3 και L-R-4, συμπεραίνεται ότι αυτές περιγράφονται καλύτερα από την επιλογή Robust-Robust-Horizontal (RRH). Στην προσπάθεια επιλογής, η επικέντρωση γίνεται κυρίως στη στρωματογραφία των τομών και όχι τόσο στους επιφανειακούς σχηματισμούς, λόγω της κλίμακας των τομών που είναι απόρροια του μεγάλου μήκους των.

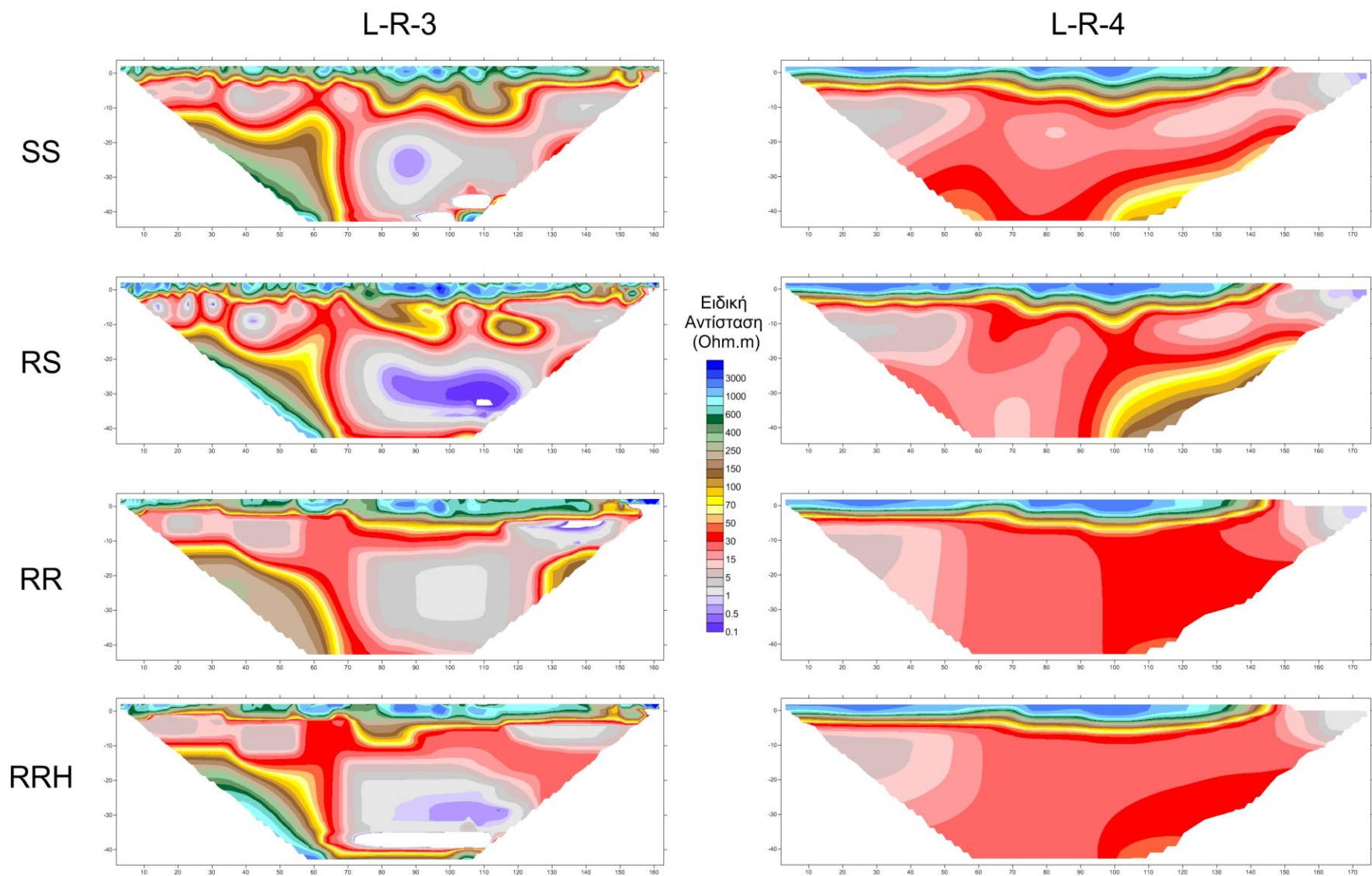


Εικόνα 3.19. Διδιάστατη απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών L-R-1 και L-R-2. Από πάνω προς τα κάτω παρουσιάζονται οι τομές με αναστροφή Standard-Standard (SS), Robust-Standard (RS), Robust-Robust (RR) και Robust-Robust-Horizontal (RRH) αντιστοίχως.

Έτσι λοιπόν, όσον αφορά την τομή L-R-3, παρατηρείται ότι η επιλογή SS εμφανίζει έναν μεμονωμένο και εντελώς αγωγίμο στόχο (μωβ χρώμα), ενώ η επιλογή RS εμφανίζει στα βορειοδυτικά της τομής κάποιες αγωγίμες, επίσης μεμονωμένες δομές, οι οποίες κατά πάσα πιθανότητα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Οι επιλογές RR και RRH φαίνεται να απεικονίζουν το υπεδάφος με πιο ρεαλιστικό τρόπο και μάλιστα η δεύτερη να το κάνει και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κόκκινη, σχετικά αγωγίμη ζώνη, που εμφανίζεται στα ανατολικά της RRH και απουσιάζει από την RR. Αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς η επιλογή ερμηνείας RRH έχει σα στόχο την καλύτερη αποτύπωση της στρωματογραφίας σε σχέση με την απλή εφαρμογή της ερμηνείας RR.

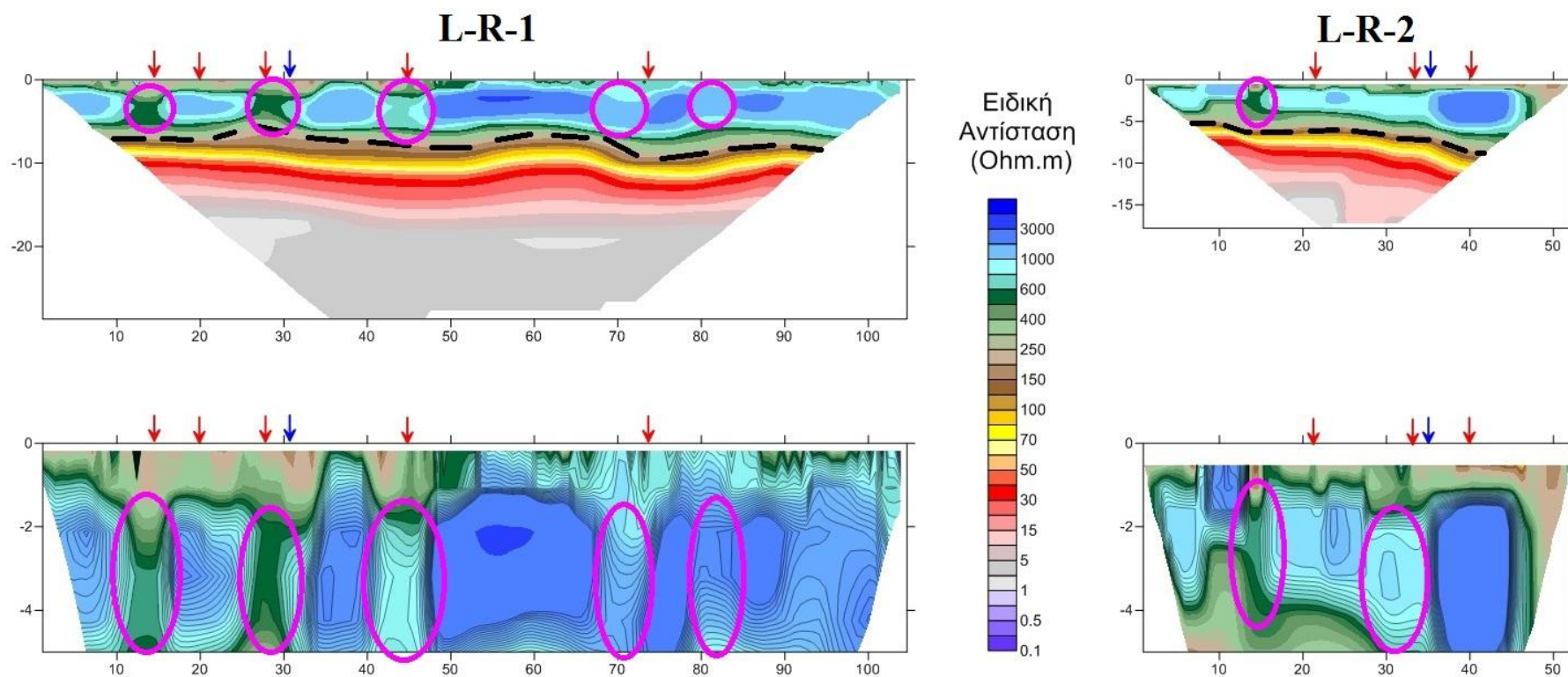
Από την άλλη, στην τομή L-R-4 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο τμήμα του υπεδάφους αποτελείται από σχετικά αγωγίμους σχηματισμούς, οι οποίοι απεικονίζονται με αποχρώσεις του κόκκινου και στην περίπτωση αυτή είναι μαργαϊκής προέλευσης. Από τις τέσσερις ερμηνείες, αυτή που παρουσιάζει τις λιγότερες ανωμαλίες και παραμορφώσεις και κατά πάσα πιθανότητα ανταποκρίνεται ορθότερα στο πραγματικό μοντέλο του υπεδάφους, είναι για άλλη μια φορά η RRH.

Στη συνέχεια, αφού επιλέχθηκε η καλύτερη, σύμφωνα με τη γνώμη μας, ερμηνεία για κάθε μία από τις τέσσερις τομές, θα αναλυθούν τα μοντέλα αυτά και θα εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα.



Εικόνα 3.20. Διδιάστατη απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών L-R-3 και L-R-4. Από πάνω προς τα κάτω παρουσιάζονται οι τομές με αναστροφή Standard-Standard (SS), Robust-Standard (RS), Robust-Robust (RR) και Robust-Robust-Horizontal (RRH) αντιστοίχως.

Γεωηλεκτρικές τομές L-R-1 και L-R-2, ερμηνεία Robust-Robust-Horizontal (RRH)



Εικόνα 3.21. Διδιάστατη απεικόνιση των τομών L-R-1 και L-R-2 με ερμηνεία Robust-Robust-Horizontal (πάνω) και μεγέθυνση του επιφανειακού στρώματος των τομών (κάτω). Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η κύρια στρωματογραφία, με μωβ κύκλους οι θέσεις των ρευστοποιήσεων στο υπέδαφος και με βέλη οι θέσεις της επιφανειακής εμφάνισης αυτών.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

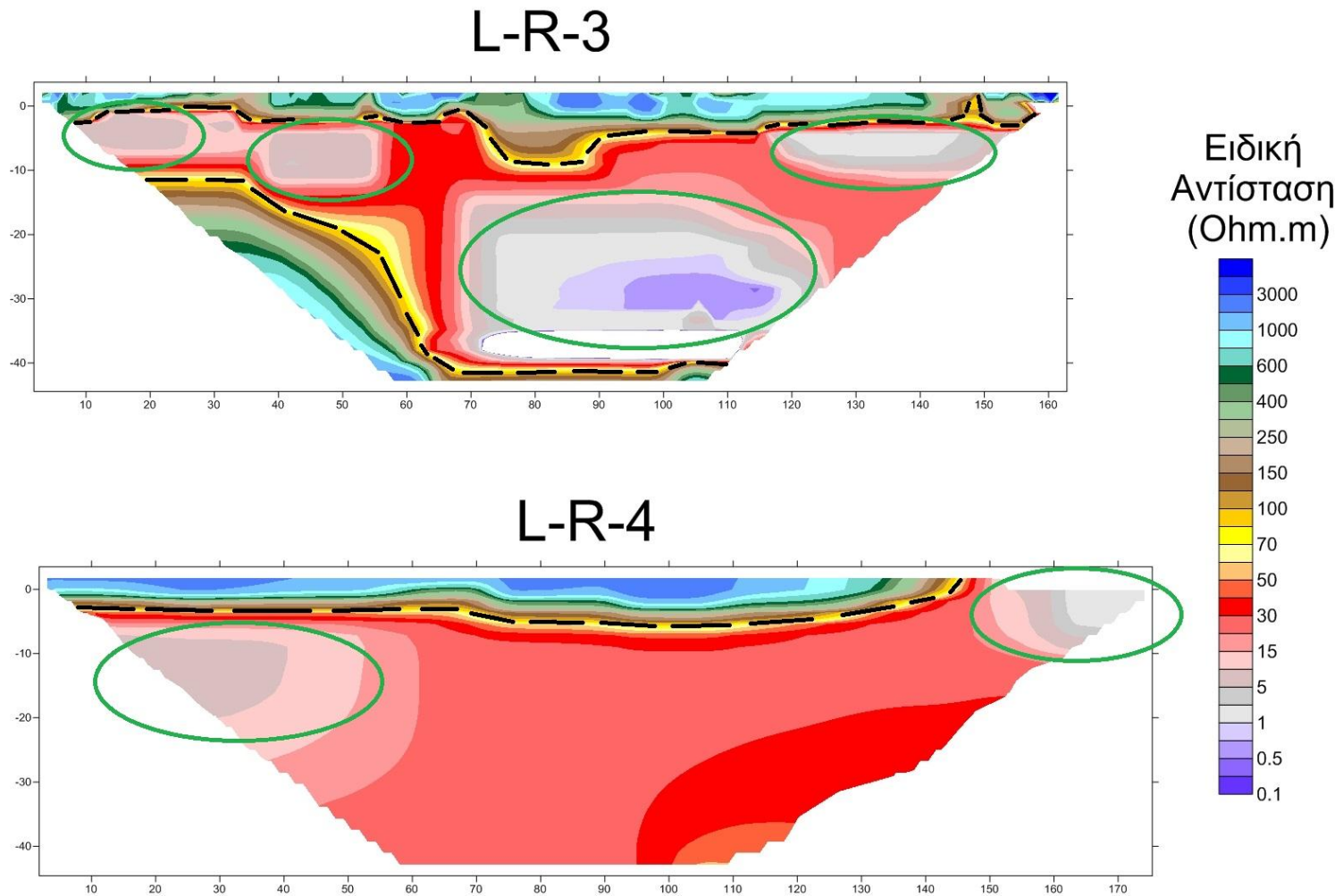
Μελετώντας στην Εικόνα 3.21 και τις δύο τομές, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι όσο κατευθυνόμαστε από την επιφάνεια του εδάφους προς μεγαλύτερα βάθη, οι τιμές της ειδικής αντίστασης μικραίνουν, αυξάνουν δηλαδή αντίστοιχα αυτές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αυτό είναι απολύτως λογικό, λόγω της παρακείμενης παρουσίας της θάλασσας (Εικόνα 3.7) και κατά συνέπεια του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης στα κατώτερα στρώματα του υπεδάφους, κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής.
- Το επιφανειακό στρώμα του υπεδάφους, που βρίσκεται πάνω από την μαύρη διακεκομμένη γραμμή, παρατηρείται ότι αποτελείται από δομές με πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (αποχρώσεις του μπλε και του πράσινου). Πρόκειται, δηλαδή, για συνεκτικές δομές και στην συγκεκριμένη περίπτωση ανθρωπογενούς προέλευσης, όπως μπάζα, καθώς βρισκόμαστε στο χώρο ακριβώς κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής.
- Με μωβ χρώμα κυκλώνονται οι περιοχές όπου αποτυπώνεται ξεκάθαρα το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Παρατηρείται ότι στις περιοχές αυτές, συμβαίνει απότομη μεταβολή των τιμών της ειδικής αντίστασης και μάλιστα οι περιοχές αυτές εμφανίζουν υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας, σε σχέση με τις περιοχές εκατέρωθεν αυτών, ακριβώς δηλαδή όπως ορίζεται θεωρητικά και από την ερμηνεία του ίδιου του φαινομένου των ρευστοποιήσεων. Ειδικά, στα δυτικά της πάνω τομής της L-R-1 και στους δύο πρώτους κύκλους, καθώς και στην πάνω τομή της L-R-2, είναι εντυπωσιακό το πόσο ικανοποιητικά περιγράφεται το φαινόμενο αυτό.
- Οι κάτω τομές, οι οποίες ουσιαστικά είναι μεγέθυνση του επιφανειακού στρώματος των πάνω τομών (των συνεκτικών δηλαδή δομών), δημιουργήθηκαν για να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, οι περιοχές και ο μηχανισμός της ρευστοποίησης. Για παράδειγμα, οι ρευστοποιήσεις που σημειώνονται με τους τρεις κύκλους, στο κέντρο και τα ανατολικά της κάτω τομής της L-R-1 και αυτές της αντίστοιχης τομής της L-R-2, περιγράφονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και πιο ξεκάθαρα σε σχέση με τις πάνω τομές. Είναι χαρακτηριστικό, ότι στην μεγενθυμένη τομή L-R-2, ο δεξιά κύκλος απεικονίζει με ξεκάθαρο τρόπο υπεδαφική ρευστοποίηση, η οποία όμως δε φαίνεται στην πάνω τομή.
- Με τα βέλη σημειώνονται οι επιφανειακές θέσεις των ρευστοποιήσεων, οι οποίες καταγράφηκαν με GPS. Είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι στην τομή L-R-1, σχεδόν όλα

τα βέλη βρίσκονται ακριβώς πάνω από τους μωβ κύκλους ή στα όρια τους. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το δεύτερο βέλος από τα δυτικά. Αντίθετα, στην τομή L-R-2, το σφάλμα ταύτισης των κύκλων με τα βέλη είναι μεγαλύτερο.

- Στην περίπτωση του πρώτου κύκλου από τα ανατολικά για την τομή L-R-1 και του κύκλου στα δυτικά για την L-R-2, παρατηρείται ότι υπάρχει υπεδαφική εμφάνιση ρευστοποίησης, η οποία όμως δε συνοδεύεται από αντίστοιχο βέλος στην επιφάνεια. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ενδεχόμενη κάλυψη ή αποκατάσταση του δαπέδου, στα συγκεκριμένα σημεία στην επιφάνεια.
- Στα ανατολικά της τομής L-R-2 παρατηρείται ξεκάθαρα μία πολύ πυκνή και συνεκτική δομή, με πολύ υψηλές και σταθερές τιμές ειδικής αντίστασης. Η δομή αυτή θα μπορούσε να σχετίζεται με αρχαία κατασκευαστικά έργα του εσωτερικού αρχαίου λιμανιού.
- Τέλος, παρατηρείται μία κλίση της στρωματογραφίας στα ανατολικά της τομής L-R-2, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη της λιμνούλας (Εικόνα 3.7, κάτω δεξιά).

Γεωηλεκτρικές τομές L-R-3 και L-R-4, ερμηνεία Robust-Robust-Horizontal (RRH)



Εικόνα 3.22. Διδιάστατη απεικόνιση των τομών L-R-3 και L-R-4 με ερμηνεία Robust-Robust-Horizontal. Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η κύρια στρωματογραφία, ενώ εσωτερικά των πράσινων κύκλων καταγράφονται περιοχές με πολύ υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μελετώντας στην Εικόνα 3.22 και τις δύο τομές L-R-3 και L-R-4, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι το επιφανειακό στρώμα και των δύο τομών, αποτελείται από δομές με υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων (αποχρώσεις του μπλε και του πράσινου). Πρόκειται δηλαδή για συνεκτικές δομές, πιθανώς ανθρωπογενούς προέλευσης, καθώς βρισκόμαστε παρακείμενα του χώρου της Βασιλικής.
- Στην τομή L-R-3 παρατηρείται ότι η κύρια στρωματογραφία (διακεκομμένη γραμμή) διακόπτεται και εμφανίζεται πάλι σε μεγαλύτερο βάθος, καθώς παρεμβάλλεται ένα στρώμα από πολύ αγωγίμες περιοχές (πράσινοι κύκλοι) και σχετικά αγωγίμες περιοχές (αποχρώσεις του κόκκινου). Οι περιοχές που σημειώνονται με πράσινους κύκλους στα δυτικά της τομής υποδηλώνουν διείσδυση του θαλασσινού νερού, ενώ οι δύο κύκλοι στο κέντρο και στα ανατολικά της τομής υποδηλώνουν μάλλον διείσδυση του νερού της λιμνούλας (Εικόνα 3.7).
- Αντιστοίχως, στην τομή L-R-4 ο πράσινος κύκλος στα δυτικά της τομής υποδεικνύει θαλάσσια διείσδυση, ενώ η περιοχή που σημειώνεται στα ανατολικά της τομής εμφανίζεται υπεραγωγίμη και σε μικρότερο απόλυτο υψόμετρο, λόγω της παρακείμενης παρουσίας της λίμνης και του άλατος, αλλά και της τοποθέτησης των τελευταίων ηλεκτροδίων της τομής στην επιφάνεια της αποξηραμένης, λόγω θερινής εποχής, λίμνης.
- Στην τομή L-R-4, με αποχρώσεις του κόκκινου απεικονίζεται σχεδόν αδιατάρακτο το μαργαϊκό υπόστρωμα (Εικόνα 3.4), ενώ αντίθετα στην τομή L-R-3 το υπόστρωμα αυτό έχει επηρεαστεί ξεκάθαρα από τη διείσδυση νερού σε αυτό.
- Ο σκοπός της δημιουργίας των τομών L-R-3 και L-R-4 ήταν η αποτύπωση της στρωματογραφίας, εξ ου και το μεγαλύτερο συνολικό βάθος διασκόπησης. Για το λόγο αυτόν και εξαιτίας της φύσης της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, δεν υπάρχει τόσο λεπτομερής απεικόνιση του επιφανειακού στρώματος, όπως συμβαίνει στις τομές L-R-1 και L-R-2, ενώ δε φαίνεται να υπάρχει ξεκάθαρα κάποιο περιστατικό ρευστοποίησης.

4. Συμπεράσματα και Σχόλια

4.1. Συμπεράσματα

Έχοντας διεξάγει και τις τρεις γεωφυσικές μεθόδους έρευνας στον ευρύτερο χώρο της Βασιλικής στην περιοχή του Λεχαίου (Αρχαία Κόρινθος) και παρατηρώντας εν τέλει τα αποτελέσματα όλων, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω γενικά και καταληκτικά συμπεράσματα:

- ✓ Η συνδυαστική δράση της θαλάσσιας διείδυσης και της σεισμικής δραστηριότητας, φέρεται να είναι η κύρια αιτία πρόκλησης των ρευστοποιήσεων στον ευρύτερο χώρο της Βασιλικής, στην περιοχή του Λεχαίου.
- ✓ Η μέθοδος που παρουσίασε την μεγαλύτερη επιτυχία στην αποτύπωση του υπεδάφους και της συσχέτισης των ρευστοποιήσεων με τις τοπικές δομές, είναι χωρίς αμφιβολία αυτή της ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην μέθοδο αυτή, διακρίνονται ξεκάθαρα οι θέσεις και ο μηχανισμός των ρευστοποιήσεων, ενώ και η συσχέτισή τους με τις περιβάλλουσες τοπικές δομές είναι σχετικά εύκολη υπόθεση. Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι και η ξεκάθαρη και ευδιάκριτη αποτύπωση της στρωματογραφίας, κάτω από τα εκάστοτε προφίλ του κανάβου των μετρήσεων.
- ✓ Πολύ σημαντική υπήρξε επίσης, η επιλογή εφαρμογής της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. Όσο περισσότερο προχωρούσε η διαδικασία επεξεργασίας των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων και δημιουργίας των χαρτών, τόσο πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα ελαμβάνοντο. Συγκεκριμένα, οι αρχικοί χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για τα δύο βάθη (1.5 m και 3 m), δεν απεικονίζουν μεν ξεκάθαρα αποτελέσματα, αλλά όμως παρουσιάζουν μία συγκεκριμένη τάση, η οποία είναι μείωση των τιμών καθώς κινούμαστε από δυσμάς προς ανατολάς. Η δημιουργία του χάρτη της αφαίρεσης των δύο βαθών (3-1.5 m) στη συνέχεια, παρουσιάζει μία πολύ πιο βελτιωμένη και ξεκάθαρη απεικόνιση της κατανομής των τιμών αγωγιμότητας του υπεδάφους, ενώ τέλος οι χάρτες της 1^{ης} και 2^{ης} παραγωγού, οι οποίοι αξιοποιούν την κλίση και τις απότομες μεταβολές των τιμών αγωγιμότητας των υπεδαφικών δομών αντίστοιχα, απεικονίζουν το υπέδαφος με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο.
- ✓ Η μέθοδος του γεωραντάρ αποτύπωσε ικανοποιητικά ορισμένες θέσεις ρευστοποιήσεων και μία γενική μορφή της στρωματογραφίας, γενικότερα όμως δεν απέδωσε το ίδιο

αποτελεσματικά όπως οι άλλες δύο γεωφυσικές μέθοδοι. Παρ'όλα αυτά, η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό συμπληρωματικό όπλο στη γεωφυσική φαρέτρα για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων, όσον αφορά αρχαιολογικές έρευνες και έρευνες επιφανειακής στρωματογραφίας, όπως και συνέβη στην παρούσα έρευνα.

- ✓ Παρατηρώντας τους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες και συγκεκριμένα αυτούς των παραγώγων, φαίνεται ότι η πλειονότητα των ρευστοποιήσεων αναπτύσσεται σε γραμμική διάταξη και εντοπίζεται στα άκρα και τα όρια των δομών, οι οποίες πιθανώς αντιστοιχούν σε υπεδαφικούς πλακόστρωτους διαδρόμους ή τοιχία. Από την άλλη, στους αρχικούς χάρτες αγωγιμότητας και στο χάρτη αφαίρεσης των βαθών (3-1.5 μέτρα), φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ρευστοποιήσεων εντοπίζεται σε περιοχές με υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας.
- ✓ Στις τομές L-R-1 και L-R-2 της ηλεκτρικής τομογραφίας, απεικονίζεται με ξεκάθαρο τρόπο το φαινόμενο και ο μηχανισμός των ρευστοποιήσεων, με τις μεγεθυμένες τομές να βοηθούν πολύ σε αυτό. Παρατηρείται ότι οι ρευστοποιήσεις λαμβάνουν χώρα στο επιφανειακό στρώμα και διακόπτουν τη συνοχή των συνεκτικών δομών υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης, κατά πάσα πιθανότητα ανθρωπογενούς προέλευσης. Σε πολλά σημεία, η θέση των υπεδαφικών ρευστοποιήσεων (μωβ κύκλοι) ταυτίζεται με την επιφανειακή εμφάνιση αυτών (βέλη), σε άλλα όμως παρατηρείται μία ασυνέπεια μεταξύ των θέσεων των δύο.
- ✓ Αντίθετα, οι τομές L-R-3 και L-R-4, λόγω της φύσης τους παρουσιάζουν μικρότερη λεπτομέρεια στα επιφανειακά στρώματα, καθώς ο σκοπός δημιουργίας τους ήταν η αποτύπωση της στρωματογραφίας και για το λόγο αυτόν δε φαίνεται ξεκάθαρα κάποιο συμβάν ρευστοποίησης. Επιπροσθέτως, στις γραμμές που σχεδιάστηκαν οι δύο αυτές τομές, δεν υπάρχει επιφανειακή εμφάνιση των χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης.
- ✓ Στις τομές του γεωραντάρ, οι ρευστοποιήσεις απεικονίζονται με κόκκινους κύκλους, όπου λόγω του μηχανισμού του φαινομένου, το δάπεδο στο σημείο αυτό είναι αγωγίμο, με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται ανακλάσεις. Παρατηρούνται όμως και μερικές περιπτώσεις όπου, η επιφανειακή εμφάνιση ρευστοποιήσεων αντιστοιχεί σε υπεδαφική, μη αγωγήμη, περιοχή με πληθώρα ανακλάσεων (κίτρινοι κύκλοι).
- ✓ Σε όλες τις τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας, φαίνεται ξεκάθαρα το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης και της διείσδυσης του θαλασσινού νερού της λίμνης, το οποίο απεικονίζεται με πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης ή αντίστοιχα, πολύ υψηλές τιμές

ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ενώ παρατηρείται και στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες και συγκεκριμένα στους απλούς χάρτες αγωγιμότητας και στο χάρτη αφαίρεσης των βαθών (3-1.5 μέτρα). Παρατηρείται, τέλος, ξεκάθαρα και στις τομές του γεωραντάρ και συγκεκριμένα κάτω από την κύρια στρωματογραφία (γαλάζια γραμμή), όπου λόγω των πολύ υψηλών τιμών αγωγιμότητας το ηλεκτρομαγνητικό σήμα που στέλνει το όργανο απορροφάται και δε δημιουργούνται ανακλάσεις.

- ✓ Σε όλους τους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες, παρατηρείται στη νοτιοανατολική γωνία μία συνεκτική δομή με σταθερές τιμές αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας. Η δομή αυτή, είναι πιθανώς ανθρωπογενούς προέλευσης και πρόκειται, μάλλον, για κάποια κατασκευή που σχετιζόταν με τη λειτουργία του αρχαίου λιμανιού και όχι με αυτή της Βασιλικής. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι η δομή αυτή εντοπίζεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1.5m, ενώ παράλληλα σύμφωνα με μελέτες, το βάθος θεμελίωσης της Βασιλικής εντοπίζεται στα 1.5-1.7m.
- ✓ Στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες και ιδιαίτερα σε αυτούς των παραγώγων, εμφανίζονται ξεκάθαρα δύο ευθύγραμμες και παράλληλες δομές στο βόρειο κομμάτι, οι οποίες με απόλυτη σχεδόν βεβαιότητα είναι ανθρωπογενούς προέλευσης και πρόκειται, μάλλον, για πλακόστρωτα ή τοιχία, τα οποία έβρισκαν κάποια χρησιμότητα στη λειτουργία του αρχαίου λιμανιού, για το λόγο που αναφέρθηκε και αμέσως προηγούμενα.
- ✓ Στις τομές του γεωραντάρ, οι εκτεταμένες ανακλάσεις πάνω από τη στρωματογραφία (γαλάζια γραμμή) υποδεικνύουν πιθανώς ανθρωπογενείς δομές, όπως πλακόστρωτα και τοιχία, ενώ η ίδια παρατήρηση μπορεί να γίνει και για το επιφανειακό στρώμα των τομών της ηλεκτρικής τομογραφίας, όπου επικρατούν συνεκτικοί σχηματισμοί με πολύ υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων.
- ✓ Ο σχεδιασμός του κανάβου των μετρήσεων στις περιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και του γεωραντάρ, έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να καλυφθεί το σύνολο του δαπέδου της Βασιλικής και να αναλυθεί υπεδαφικά το σύνολο των ρευστοποιήσεων που εμφανίζεται σε αυτό. Η τομή L-R-1 της ηλεκτρικής τομογραφίας σχεδιάστηκε στην ευθεία όπου παρατηρείται μία γραμμική ομάδα πολλών ρευστοποιήσεων, αλλά και τα όρια της νότιας ευθύγραμμης δομής, όπως αυτή απεικονίζεται στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες των παραγώγων. Αντίστοιχα, η τομή L-R-2 σχεδιάστηκε στην ευθεία όπου, στον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη της 1^{ης} παραγώγου για συνολικό βάθος 1.5 m, παρατηρείται η δομή

που προσομοιώνεται με γάμμα. Οι κάθετες αυτές τομές δηλαδή, τοποθετήθηκαν με τέτοιον τρόπο ώστε να μπορεί να γίνει συσχέτιση μεταξύ της επιφανειακής εμφάνισης των χαρακτηριστικών της ρευστοποίησης και της υπεδαφικής, αλλά και να μελετηθούν οι ζώνες που εντοπίστηκαν με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και αυτή του γεωραντάρ. Τέλος, οι τομές L-R-3 και L-R-4 σχεδιάστηκαν εκατέρωθεν του δαπέδου της Βασιλικής και κάθετα σχεδόν στη νοητή ευθεία θάλασσας-λίμνης, ώστε να αποτυπωθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η στρωματογραφία παρακείμενα των ρευστοποιήσεων και η επίδραση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στο χώρο κάτω από το δάπεδο της Βασιλικής.

- ✓ Φαίνεται λοιπόν από τα παραπάνω, η ανάγκη συσχέτισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων. Τα αποτελέσματα δηλαδή των ηλεκτρομαγνητικών χαρτών, βοήθησαν ουσιαστικά στο σωστό σχεδιασμό και τοποθέτηση των τομών της ηλεκτρικής τομογραφίας.
- ✓ Οι χάρτες της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και οι τομές του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας, βρίσκονται σε σημαντική συμφωνία μεταξύ τους και επιπλέον η κάθε μέθοδος προσθέτει το δικό της λιθαράκι εκεί που οι άλλες μέθοδοι δεν μπορούν, συμβάλλοντας έτσι όλες μαζί στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων στην παρούσα έρευνα. Έτσι, κάποιες από τις ρευστοποιήσεις που εντοπίζονται στα άκρα των δομών στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες υπό την μορφή κάτοψης, αναλύονται στις τομές γεωραντάρ και ηλεκτρικής τομογραφίας και σε κατακόρυφη διάσταση, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται τελικά σε σημεία μία τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους, ως αποτέλεσμα της συνεργασίας και των τριών γεωφυσικών μεθόδων. Επίσης, η στρωματογραφία και η διείσδυση του θαλασσινού νερού αποτυπώνεται με παρόμοιο τρόπο στις τομές του γεωραντάρ και στις L-R-1 και L-R-2 της τομογραφίας.
- ✓ Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό ότι, για τη σωστή διεξαγωγή μίας γεωφυσικής έρευνας απαιτείται η εφαρμογή τουλάχιστον δύο ή και τριών γεωφυσικών μεθόδων, ώστε να αντισταθμίζει η μία τα μειονεκτήματα της άλλης, αλλά και να αξιοποιούνται τα δυνατά στοιχεία της κάθε μίας. Επιπλέον, η αποτύπωση δομών και τάσεων σε παραπάνω από μία μεθόδους, αυξάνει τις πιθανότητες ανίχνευσης δομής στο υπέδαφος και μειώνει αντίστοιχα την πιθανότητα σφάλματος στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- ✓ Μετά την ολοκλήρωση της παρούσης γεωφυσικής έρευνας, έγινε για άλλη μία φορά αντιληπτό ότι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και αυτές της ηλεκτρικής τομογραφίας και του

γεωραντάρ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά και να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε περιπτώσεις αρχαιολογικής έρευνας. Το καινούριο όμως στοιχείο που αποκάλυψε η συγκεκριμένη έρευνα, έγκειται στο ότι το φαινόμενο των εδαφικών ρευστοποιήσεων μπορεί να ανιχνευθεί επιτυχώς από την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας ακόμα και όταν δεν υπάρχει επιφανειακή εμφάνιση αυτού, με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και την μέθοδο του γεωραντάρ να αποτελούν σημαντικά υποστηρικτικά εργαλεία, μέσω της μελέτης των πλευρικών και κατακόρυφων μεταβολών στη στρωματογραφία. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντικό όπλο σε μελλοντικές γεωτεχνικές και λοιπής φύσεως μελέτες.

4.2. Σχόλια

Μελετώντας τα διάφορα case studies που παρατέθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και τη γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Λέχαιο (Αρχαία Κόρινθος), μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω σχόλια, όσον αφορά στο πεδίο εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων:

- Παρατηρείται ότι η Γεωφυσική μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό όπλο στην προσπάθεια εντοπισμού ρευστοποιήσεων, όπως παρουσιάζεται στο 3^ο κεφάλαιο της Διπλωματικής αυτής, όπου αναλύεται η καθόλα επιτυχημένη ανίχνευση αυτών στην περιοχή της Βασιλικής του Λεχαίου, αλλά και στο case study του 2^{ου} κεφαλαίου το οποίο λαμβάνει χώρα στην περιοχή New Madrid στις Η.Π.Α.
- Ειδικά, η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης σε συνδυασμό με τη συνεπικουρική δράση της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και αυτής του γεωραντάρ, μπορεί να παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ανίχνευση υπεδαφικών ρευστοποιήσεων, όπως αποτυπώνεται και στη γεωφυσική έρευνα του Λεχαίου.
- Παράλληλα, επαληθεύεται για άλλη μία φορά πόσο σημαντικό εργαλείο μπορεί να καταστεί η γεωφυσική στην ανίχνευση αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών δομών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα από την παρούσα έρευνα, αποτελεί ο εντοπισμός των δύο παράλληλων και ευθύγραμμων δομών που διακρίνονται ξεκάθαρα στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες των παραγώγων.
- Λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα της Γεωφυσικής επιστήμης στον εντοπισμό ρευστοποιήσεων και αποτύπωσης πάσης φύσεως υπεδαφικών δομών και στρωματογραφίας γενικότερα, μπορεί με ασφάλεια να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν και θα έπρεπε ανεξαιρέτως, να αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι στις γεωτεχνικές μελέτες που προηγούνται της κατασκευής πάσης φύσεως έργων, όπου η άμεση προτεραιότητα είναι η ευστάθεια του εδάφους και η στατικότητα των κατασκευών. Η σημερινή πρακτική της μεμονωμένης, συνήθως, εκτέλεσης ερευνητικών γεωτρήσεων, δίνει μεν την πραγματική εικόνα της κατάστασης του υπεδάφους, αλλά αναφέρεται συνήθως μόνο σε τοπικές δομές, σε αντίθεση με τη γεωφυσική όπου αποτυπώνει το σύνολο του υπεδάφους που διερευνάται. Ο συνδυασμός λοιπόν των δύο αυτών μεθόδων, ει δυνατόν, είναι απαραίτητος για την καλύτερη δυνατή ερμηνεία της κατάστασης του εδάφους, πριν τη δημιουργία κάποιας κατασκευής.

- Χαρακτηριστικό παράδειγμα της γεωτεχνικής και γεωστατικής έκφανσης της Γεωφυσικής αποτελεί το case study στο Machu Piccu, όπου ερευνάται η ευστάθεια των πρανών και οι υπεδαφικοί σχηματισμοί, για ενδεχόμενα μελλοντικά φαινόμενα κατολισθήσεων.
- Το Λέχαιο είναι μία περιοχή με εξαιρετικό ιστορικό, πολιτισμικό και υδρογεωλογικό ενδιαφέρον και η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει χώρο για μελλοντικές έρευνες αντίστοιχου αντικειμένου, όπως θα μπορούσε να είναι πχ. η ανίχνευση του αρχαίου λιμανιού στη λίμνη δίπλα στη Βασιλική, η μελέτη του φαινομένου της ανύψωσης της ακτής, του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης κλπ.

Εν κατακλείδι, όσον αφορά τις ρευστοποιήσεις, πρέπει να αναφερθεί ότι είναι ένα φαινόμενο το οποίο χρήζει ιδιαίτερης και ακόμα μεγαλύτερης προσοχής στο μέλλον, καθώς λόγω της φύσης του μπορεί να εμφανιστεί σχεδόν σε οποιοδήποτε έδαφος και να δημιουργήσει τεράστια προβλήματα στις κατασκευές, ακόμα και στην ασφάλεια των πολιτών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Allred, B.J., Ehsani, M.R., Daniels, J.J., 2008, General Considerations for Geophysical Methods Applied to Agriculture, in *Handbook of Agricultural Geophysics*, edited by Barry J. Allred, Jeffery J. Daniels, M. Reza Ehsani, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, pp. 3-14.

Al-Shukri, H.J., Mahdi, H.H., Tuttle, M., 2006, Three-dimensional Imaging of Earthquake Induced Liquefaction Features with Ground Penetrating Radar Near Marianna, Arkansas, *Seismological Research Letters*, 77, pp. 505-513.

Al-Shukri, H.J., Mahdi, H.H., Al Kadi, O., Tuttle, M., Spatial and Temporal Characteristic of Paleoseismic Features in the Southern Terminus of the New Madrid Seismic Zone in Eastern Arkansas, *Final Technical Report*, External Grant Ward Number 07HQGR0069, pp. 1-24, <http://earthquake.usgs.gov/research/external/reports/07HQGR0069.pdf>.

Al-Shukri, H.J., Lemmer, R.E., Mahdi, H. H., and Connelly, J. B., 2005, Spatial and Temporal Characteristics of Paleoseismic Features in the Southern Terminus of the New Madrid Seismic Zone, *Seismological Research Letters*, 76, pp. 502–511.

Apostolopoulos, G., Minos-Minopoulos, D., Amolochitis, G., Pavlopoulos, K., Papadopoulos, A., 2013, Geophysical Investigation for the Detection of Liquefaction Phenomena in an Archaeological Site, Lechaion, Greece, *Proceedings, Near Surface Geoscience 2013 – 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* Bochum, Germany, 9-11 September.

Archie, G.E., 1942, The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics, *Trans. Am. Inst. Mining Met. Eng.*, 146, pp. 54–62.

Atkinson, G.M., Hanks, T.C., 1995, A high-frequency Magnitude Scale, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 825–833.

Barker, R.D., 1997, Electrical Imaging and its Application in Engineering Investigations, in *Modern Geophysics in Engineering Geology*, edited by McCann, D.M., Eddleston, M., Fenning, P.J. and Reeves, G.M., Geological Society Engineering Geology Spec. Publication, 12, pp.37-43.

Barnes, A.A., 2000, An Interdisciplinary Study of Earthquake-induced Liquefaction Features in the New Madrid Seismic Zone: Central United States, *M.S. Thesis*, Auburn University.

Best, M., Bobrowsky, P., Douma, M., Carlotto, V., Pari, W., 2009, Geophysical Surveys at Machu Picchu, Peru: Results For Landslide Hazard Investigations, in *Landslides – Disaster Risk Reduction*, edited by Kyoji Sassa, Paolo Canuti, pp 265-273.

Bevan, B. W., 1998, Geophysical Exploration for Archaeology: An Introduction to Geophysical Exploration, *Midwest Archaeological Center, Special Report No. 1*, U.S. Department of the Interior, National Park Service, Midwest Archaeological Center, Lincoln, Nebraska.

Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, H.T., Onalp, A., Seed, R.B., Stewart, J.P., Youd, T.L., Baturay, M.L., Cetin, K.O., Christensen, C., Karadayilar, T., Emrem, C., 2001, Ground Failure in Adapazari, Turkey, *Proceedings of Earthquake Geot. Eng. Sat. Conf of the XVth Int Conf on Soil Mechanics & Geot Eng*, Istanbul, Turkey, August 24-25.

Browning, S.E., 2003, Paleoseismic Studies in the New Madrid Seismic Zone, Central United States, *M.S. Thesis*, Auburn University.

Clark, A., 1996, Seeing Beneath the Soil, *Prospection Methods in Archaeology*, Routledge, London.

Clay, R. B., 2006, Conductivity Survey: a Survival Manual, in *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*, edited by J. K. Johnson, University of Alabama Press, Tuscaloosa.

Collier, J.W., 1998, Geophysical Investigations of Liquefaction Features in the New Madrid seismic zone: Northeastern Arkansas and southeastern Missouri, *M.S. Thesis*, Auburn University.

Conyers, L.B., 2004, Ground-penetrating Radar for Archaeology, AltaMira Press, Walnut Creek, California.

Dalan, R. A., 2006, Magnetic Susceptibility, in *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*, edited by J. K. Johnson, pp. 161-203. University of Alabama Press, Tuscaloosa.

Dalan, R. A., 2001, A Magnetic Susceptibility Logger for Archaeological Application, *Geoarchaeology*, 16, pp. 263-273.

Ebraheem, A.M., Hamburger, M.W., Bayless, E.R. and Krothe, N.C., 1990, A Study of Acid Mine Drainage Using Earth Resistivity Measurements, *Groundwater*, 28, pp. 361-368.

Elgamal, A.-W.M., Dobry, R. Adalier, K., 1989, Study of effect of Clay Layers on Liquefaction of Sand Using Small-scale Models, in *Proceedings from the Second US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines*, edited by State University of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research, *Technical Report NCEER-89-0032*, pp. 233-245.

Ernenwein, E.G., Hargrave, M.L., 2009, Archaeological Geophysics for DoD Field Use: a Guide for New and Novice Users, *Project 200611: Streamlined Archaeo-geophysical Data Processing and Integration for DoD Field Use*.

Ernenwein, E. G., 2002, Establishing a Method for Locating Buried Oxbow Lake Deposits Using Electrical Conductivity, Sacramento Valley, California, *Unpublished Master's Thesis*, University of Denver.

Ernenwein, E. G., 2006, Imaging in the Ground-penetrating Radar Near-field Zone: A Case Study from New Mexico, USA, *Archaeological Prospection* 13, pp. 154-156.

Ernenwein, E. G., 2008, A Geophysical View of Pueblo Escondido: Implications for the Pithouse to Pueblo Transition in the Jornada Mogollon, *Bulletin of the Texas Archeological Society*, 79, pp., 125-145.

Georgiades, A.S., 1907, Les Ports de la Grèce dans l' Antiquité qui Subsistent Encore Aujourd'hui, Athènes.

Hadler, H., Vött, A., Koster, B., Mathes-Schmidt, M., Mattern, T., Ntageretzis, K., Reicherter, K., Sakellariou, D., Willershäuser, T., 2011, Lechaion, the Ancient Harbour of Corinth (Peloponnese, Greece) Destroyed By Tsunamigenic Impact, *2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*, Corinth, Greece, pp. 70-73.

Heckman, E. 2005, Geophysical Methodologies and Test Site for Battlefield Archaeology, *Unpublished Master's Thesis*, University of Arkansas.

Higgins, C. ,1965, Beachrock in Greece, *Unpublished Report*, Davis: University of California.

Hough, S.E., Armbruster, J.G., Seeber, L., Hough, J. F., 2000, On the Modified Mercalli Intensities and Magnitudes of the 1811–1812 New Madrid, *Journal of Geophysical Research*, 105, pp. 839-864.

Iwasaki, T., 1986, Soil Liquefaction Studies in Japan: State-of-the-Art, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 5, pp. 1-71.

Johnson, J.K., 2006, Remote Sensing in Archaeology, An Explicitly North American Perspective, *The University of Alabama Press*, 322 pages.

Johnston, A.C., 1996, Seismic Moment Assessment of Stable Continental Earthquakes, Part III: 1811–1812 New Madrid, 1886 Charleston and 1755 Lisbon, *Geophysical Journal International*, 126, pp. 314–344.

Johnston, A.C., Nava, S.J., 1985, Recurrence Rates and Probability Estimates for the New Madrid Seismic Zone, *Journal of Geophysical Research*, 90, pp. 6737–6753.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002: An Introduction to Geophysical Exploration, *Third Edition*, Blackwell Science Ltd, 262 pages.

Keraudren, B., Sorel, D., 1987, The terraces of Corinth (Greece): A Detailed Record of Eustatic Sea-Level Variations During the Last 500,000 Years, *Marine Geology*, 77, pp. 99-107.

Klimes, J., Vilimek, V. and Vlcko, J., 2007, Debris Flows in the Vicinity of the Machu Picchu Village, Peru, in *Progress in Landslide Science*, edited by K. Sassa K., H. Rukuoka, F. Wang and G. Wang, *Springer Verlag*, pp. 313-318.

Kramer, S.V., 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, *Practice Hall*, New Jersey, 653 pages.

Kvamme, K. L., Ernenwein, E. G., Hargrave, M. L., Sever, T., Harmon, D., Limp, F., Howell, B., Koons, M. Tullis J., 2006, New Approaches to the Use and Integration of Multi-Sensor Remote Sensing for Historic Resource Identification and Evaluation, *Report submitted to Strategic Environmental Resource Development Program (SERDP)*, Washington, D.C., <http://www.serdp.org/Research/upload/SI-1263-FR.pdf>.

Lekkas, E., Lozios, S., Skourtsos, E., Kranis, H., 1996, Liquefaction, Ground Fissures and Coastline Change During the Egio Earthquake (15 June 1995; Central-Western Greece), *Terra Nova*, 8, 648-654.

Liu, L., and Y. Li, 2001, Identification of Liquefaction and Deformation Features Using Ground Penetrating Radar in the New Madrid Seismic Zone, USA, *Journal of Applied Geophysics*, 47, pp. 199–215.

Loke, M.H., 2004, Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, Copyright (1996-2004) M.H.Loke.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996, Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method, *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 131-152.

Lucius, J.E., Langer, W.H., Ellefsen, K.J., 2006, An Introduction to Using Surface Geophysics to Characterize Sand and Gravel Deposits, *U.S. Geological Survey*, Open-File Report 2006-1257, 51 p. [available online at <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1257/>].

Mariolakos, I., Stiros, S.C., 1987. Quaternary Deformation of the Isthmus and Gulf of Corinthos (Greece). *Geology*, 15, pp. 225-228.

Marjoribanks, R., 2010, Geological Methods in Mineral Exploration and Mining, *Second Edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: DOI 10.1007/978-3-540-74375-0.

McNeill, J. D., 1986, Geonics EM-38 Ground Conductivity Meter: Operating Instructions and Survey Interpretation Techniques, *Technical Note TN-21*, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario.

McNeill, J. D., 1996, Why doesn't Geonics Limited Build a Multi-Frequency EM-31 or EM-38?, *Technical Note TN-30*, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario.

Merkel, R.H., 1972, The use of resistivity techniques to delineate acid mine drainage in groundwater, *Groundwater*, 10, pp.38–42.

Morhange, C., Pirazzoli, P. A., Evelpidou, N., Marriner, N., 2012, Late Holocene Tectonic Uplift and the Silting Up of Lechaion, the Western Harbor of Ancient Corinth, Greece, *Geoarchaeology: An International Journal*, 27, pp. 278–283.

Mourtzas, N.D., Kissas, C., Kolaiti, E., 2014, Archaeological and Geomorphological Indicators of the Historical Sea Level Changes and the Related Palaeogeographical Reconstruction of the Ancient Foreharbour of Lechaion, East Corinth Gulf (Greece), *Quaternary International*, 332, pp. 151-171.

Mussett, A., E. and M. A. Khan, 2000, Looking Into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics, *Cambridge University Press*, Cambridge.

Obermeier, S.F., Pond, E.C., 1999, Issues in Using Liquefaction Features for Paleoseismic Analysis, *Seismological Research Letters*, 70, pp. 34-58.

Obermeier, S.F., 1996, Use of Liquefaction-Induced Features for Paleoseismic Analysis- An Overview of How Seismic Liquefaction Features Can be Distinguished from other Features and How their Regional Distribution and Properties of Source Sediment Can be Used to Infer the Location and Strength of Holocene Paleo-Earthquakes, *Engineering Geology*, 44, pp 1-76.

Obermeier, S.F., Olson, M.S., Green, A.R., 2005, Field Occurrences of Liquefaction Induced Features: A Primer for Engineering Geology Analysis of Paleoseismic Shaking, *Engineering Geology*, 76, pp. 209-234.

Obermeier, S.F., 1989, The New Madrid Earthquakes: An Engineering-Geologic Interpretation of Relict Liquefaction Features, *U. S. Geological Survey*.

Olson, S.M., 2001, Liquefaction Analysis of Level and Sloping Ground Using Field Case Histories and Penetration Resistance, *Dissertation thesis*, Univ. of Illinois, pp. 547.

Owen, G., Moretti M., 2011, Identifying Triggers for Liquefaction-Induced Soft-Sediment Deformation in Sands, *Sedimentary Geology*, 235, pp. 141–147.

Pallas, D., 1965, Excavation of the Early Christian Basilica of Lechaion, *Praktika* 1958 (PAE 1958), pp. 119-134.

Papageorgiou, S., Arnold, M., Laborel, J., Stiros, S.C., 1993, Seismic Uplift of the Harbour of Ancient Aigeira, Central Greece, *International Journal of Nautical Archaeology*, 22, pp. 275-281.

Papathanassiou, G., Valkaniotis S., Chaztipetros Al., Pavlides S., 2010, Liquefaction Susceptibility Map of Greece, *Bulletin of the Geological Society of Greece, 2010 Proceedings of the 12th International Congress*, Patras, May, pp. 1-9.

Parasnis, D.S., 1986, *Principles of Applied Geophysics*, Fourth edition, Chapman And Hall, London New York, 402 pages.

Pirazzoli, P.A., Stiros, S.C., Arnold, M., Laborel, J., Laborel-Deguen, F., Papageorgiou, S., 1994, Episodic Uplift Deduced from Holocene Shorelines in the Perachora Peninsula, Corinth Area, Greece. *Tectonophysics*, 229, pp. 201-209.

Price, J.E., G. Fox, and R. Saucier, 1990, Archeological Investigations in Three Areas of the Towosahgy State Historic Site: 23MI2, Mississippi County, Missouri, *Missouri Department of Natural Resources*.

Reynolds, J. M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, *John Wiley & Sons*, Chichester.

Rothaus, R., 1995, Lechaion, Western Port of Corinth: A Preliminary Archaeology and History, *Oxford Journal of Archaeology*, 14, pp., 293-306.

Sakellariou, Faraklas, 1971. Ancient Greek Cities No 3: Corinthia e Cleonaea (in Greek). *Athens Technological Organization, Center of Ecistics*, Athens.

Salmon, 1984. Wealthy Corinth: a History of the City to 338 BC, *Clarendon Press*, Oxford, 464 pp.

Sancio, R.B., Bray, J.D., Stewart, J.P., Youd, T.L., Durgunoglu, H.T., Onalp, A., Seed, R.B., Christensen, C., Baturay, M.L., Karadayilar, T., 2002, Correlation Between Ground Failure and soil condition in Adapazari, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, pp. 1093-1102.

Sancio, R.B., Bray, J.D., Riemer, M.F., Durgunoglu, H.T., 2003, An Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Adapazari Silt, Paper 172, *Pacific Conf on Earthquake Engineering, Proceedings*, New Zealand.

Saucier, R.T., 1977, Effects of the New Madrid Earthquake Series in the Mississippi Alluvial Valley, *U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper S-77-5*.

Saucier, R.T., 1991, Geoarchaeological Evidence of Strong Prehistoric Earthquakes in the New Madrid, Missouri Seismic Zone, *Geology*, 19, pp. 296–298.

Seed, H.B., Lee, K. L., Idriss I. M., Makdisi, F.I., 1979, When Soils Start to Flow, *U.S. Geological Survey, MOSAIC*, July-August, pp.26-34.

Seed, R.B., Cetin, O.K., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., Faris, A., 2003, Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework, *26th annual ASCE L.A. Geot. Spring Sem.*, Long Beach, California, April 30, 71 pages.

Shaw, J.W., 1969. A Foundation in the Inner Harbor at Lechaem. *American Journal of Archaeology*, 73, pp. 370-372.

Stiros, S., Pirazzoli, P., Rothaus, R., Papageorgiou, S., Laborel, J., Arnold, M., 1996, On the Date of Construction of Lechaion, Western Harbor of Ancient Corinth, Greece, *Geoarchaeology: An International Journal*, 11, pp. 251-263.

Stiros, S. (in press), Palaeogeographic Reconstruction of the Heraion-Vouliagmeni Lake Coast Since the Early Helladic Times, *The Annual of the British School at Athens*.

Stiros, S., 1988a, Model for the North Peloponnesian (Central Greece) Uplift, *Journal of Geodynamics*, 9, pp. 199-214.

Stiros, S., 1988b, Archaeology, a Tool in the Study of Active Tectonics-the Aegean as a Case

Street, R., Nuttli, O.W., 1984, The Central Mississippi Valley Earthquakes of 1811–1812: *Proceedings of the Symposium on the New Madrid Seismic Zone*, 33–63.

Study Eos, *Transactions of the American Geophysical Union*, 13, pages 1636, 1639.

Takahama, N., Otsuka, T., Brahmantyo, B., 2000, A New Phenomenon in Ancient Liquefaction-the Draw-In Process, its Final Stage, *Sedimentary Geology*, 135 pp. 157–165.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 2004, *Applied Geophysics, Second Edition*, Cambridge University Press, New York, Melbourne, Sydney, Port Chester, 744 pages.

Terzaghi, K., Pech, R., 1967, *Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edition, John Wiley and sons*, New York, 729 pages.

Tsuchida, H., 1971, Estimation of liquefaction potential of sandy soils, In: *Proc. 3rd Joint Meeting, US-Japan, UNJR*.

Tuttle, M.P., Lafferty III, R.H., Cande, R.F., Sierzchula, M.C., 2011, Impact of Earthquake-Induced Liquefaction and Related Ground Failure on a Mississippian Archeological Site in the New Madrid Seismic Zone, Central USA, *Quaternary International*, 242, pp. 126-137.

Tuttle, M.P., Schweig, E.S., Sims, J.D., Lafferty, R.H., Wolf, L.W., Haynes, M. L., 2002, The Earthquake Potential of the New Madrid Seismic Zone, *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, pp. 2080–2089.

Tuttle, M.P., J. Collier, L.W. Wolf, and R.H. Lafferty, 1999, New Evidence for a Large Earthquake in the New Madrid Seismic Zone Between A. D. 1400 and 1670, *Geology*, 27, pp. 7771–7774.

Tuttle, M.P., Sims, J.D., Dyer-Williams, K., Lafferty, R.H., and Schweig, E.S., 2000, Dating Liquefaction Features in the New Madrid Seismic Zone and Implications for Seismic Hazard, *Nuclear Regulatory Commission, NUREG/GR-0018*.

Von Freyberg, B. ,1973, *Geologie des Isthmus von Korinth*. Erlanger Geologische Abhandlung
Ward. S., 1990, *Geotechnical and Environmental Geophysics, SEG*.

Weymouth, John W., 1986, Geophysical Methods of Archaeological Site Surveying, pp. 311-396 in: *Advances in Archaeological Method and Theory*, edited by Michael B. Schiffer, *Academic Press*, New York.

Wiseman, J., 197, *The Land of the Ancient Corinthians, Studies in Mediterranean Archaeology*, 50, 150 pages.

Witten, A. J., 2006, *Handbook of Geophysics and Archaeology, Equinox Publishing*, London.

Wolf, L.W., Collier, J., Tuttle, M., Bodin, P., 1998, Geophysical Reconnaissance of Earthquake-Induced Liquefaction Features in the New Madrid Seismic Zone, *Journal of Applied Geophysics*, 39, pp. 121–129.

Wolf, L.W., Tuttle, M.P., Browning, S., Park, S., 2006, Geophysical Surveys of Earthquake-Induced Liquefaction Deposits in the New Madrid Seismic Zone, *Geophysics*, 71, pp.B.223–B230.

Wolf, L.W., 2006, Geophysical Investigations of Earthquake-Induced Liquefaction at Cultural Sites in The New Madrid Seismic Zone, *Final Report USGS External Project No. 1434-01HQGR0003* in collaboration with Tuttle M.P., Towards a Paleoearthquake Chronology for the New Madrid Seismic Zone, *USGS External Project No. 1434-01HQGR0164*.

Wolf, L.W., Collier, J., Tuttle, M., and Bodin, P., 1998, Geophysical Reconnaissance of Earthquake-Induced Liquefaction Features in the New Madrid Seismic Zone, *Journal of Applied Geophysics*, 39, pp. 121–129.

Won, J. J., Keiswetter, D.A., Fields, G.R.A, Sutton, L.C., 1996, Gem-2: A New Multi-Frequency Electromagnetic Sensor, *Journal of Environmental Geophysics*, 1, pp.129-137.

Wright KR, and Valencia Zegarra, A., 2000, *Machu Picchu: A Civil Engineering Marvel: ASCE Press*.

Youd, T.L., 1998, Screening Guide for Rapid Assessment of Liquefaction Hazard at Highway Bridge Site, *Technical report MCEER-98-0005*, 58 pages.

Youd, T.L., 1984 α , Recurrence of Liquefaction at the Same Site, *Proc 8th World Conf on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp. 231-238.

Youd, T.L., 1984 β , Geological Effects – Liquefaction And Associated Ground Failures, *Proc. Geologic and Hydrologic Hazards Training Program, Open File report 84-760, USGS, Menlo Park, California*, pp. 210-232.

Αποστολόπουλος, Γ., 2008, *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008*.

Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., 2002, *Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 515 σελίδες*.

Λούης, Ι.Φ., 2004, *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική, Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, Σύγχρονες Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Γεωφυσικής, Αθήνα, 2004*.

Παπαθανασίου, Γ., 2006, *Φαινόμενα Ρευστοποίησης Εδαφών στον Ελληνικό Χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας*.