



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**“Συμβολή της ηλεκτρικής τομογραφίας στην παρακολούθηση
της υφαλμύρινσης πριν, κατά την διάρκεια και μετά την δοκιμή
άντλησης στον οικισμό Φαράγγι Αποκορώνου”**



ΜΙΧΑΛΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, Καθηγητής (επιβλέπων)
ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής
ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, Αν. Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ i

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ii

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ iii

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Γενικά.....	1
1.2 Η περιοχή έρευνας	2
1.3 Σκοπός της εργασίας.....	6
1.4 Μεθοδολογία.....	6

2. ΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ 7

2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Η γεωλογική δομή της νήσου Κρήτης	7
2.3 Ο γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Μ.Ε. για την περιοχή έρευνας.....	9
2.4 Ο λεπτομερής γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας.....	12

**3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ –
ΕΡΜΗΝΕΙΑ** 15

3.1 Εισαγωγή	15
3.2 Οι μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης στην έρευνα για την ρύπανση του υπεδάφους	16
3.3 Οι μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στον εντοπισμό και χαρτογράφηση των ζωνών μίξης του θαλασσινού με το γλυκό νερόν	17
3.4 Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης	18
3.4.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	18
3.4.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων	19
3.4.3 Φαινόμενη ειδική αντίσταση	22
3.5 Μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή έρευνας	24
3.6 Αποτελέσματα – Ερμηνεία	28
3.6.1 Ηλεκτρική τομογραφία - Γραμμή 1 (μέσα στην πόλη)	28

Περιεχόμενα

3.6.2 Ηλεκτρική τομογραφία-Γραμμή 2 (Νότια της πόλης)	31
3.6.3 Ηλεκτρική τομογραφία-Γραμμή 3 (Πηγή Π3).....	34
3.7 Δοκιμαστική άντληση – Ηλεκτρική τομογραφία	36
3.7.1 Εισαγωγή	36
3.7.2 Δοκιμαστική άντληση.....	37
3.7.2.1 Επεξεργασία αντλητικών δεδομένων.....	39
3.7.2.2 Αποτελέσματα δοκιμαστικής άντλησης	40
3.7.3 Αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας.....	42
3.7.4 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα	46
4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	47
4.1 Εισαγωγή	47
4.2 Γεωλογικά στοιχεία.....	47
4.3 Γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή έρευνας.....	48
4.4 Μετρήσεις σε διαφορετικές περιόδους	50
4.5 Απεικόνιση καρστικής δομής	53
4.6 Γεωφυσική γραμμή μελέτης 5	56
4.7 Η ηλεκτρική βυθοσκόπηση εντοπίζει στρώμα χαμηλής αντίστασης σε απόσταση ~ 2Km από την ακτογραμμή.....	61
4.8 Ενδείξεις για την ζώνη χαμηλής αντίστασης προκύπτουν και από την χαρτογράφηση με την μέθοδο VLF	62
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	66
5.1 Εισαγωγή	66
5.2 Συμπεράσματα	66
5.3 Προτάσεις	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια διερεύνησης του φαινομένου της υφαλμύρινσης σε πόλη για που βρίσκεται Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι στην ευρύτερη περιοχή του Στύλου (επαρχία Αποκορώνου, νομός Χανίων) πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική άντληση σε υδρογεώτρηση της περιοχής. Σε μικρή απόσταση από την θέση της υδρογεώτρησης πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική τομογραφία σε 4 διακριτές χρονικές περιόδους (πριν, κατά την διάρκεια και 2 φορές μετά την δοκιμαστική άντληση). Σκοπός της δοκιμαστικής άντλησης (πέρα από την ποιοτική παρακολούθηση του καρστικού υδροφόρου συστήματος) ήταν η παρακολούθηση - αξιολόγηση της επίδρασής της στην κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας για την χαρτογράφηση - ανίχνευση της υφάλμυρης ζώνης καρστικού συστήματος. Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της γεωφυσικής διασκόπησης που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή και παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την χρήση της εφαρμοσμένης γεωφυσικής στην προσπάθεια χαρτογράφησης της ζώνης – μετώπου υφαλμύρινσης σε παράκτιο καρστικό σύστημα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

- **Βαφείδης Αντώνιος:** Καθηγητής, Διευθυντής του εργαστηρίου εφαρμοσμένης γεωφυσικής του τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π. (Πολυτεχνείο Κρήτης)
- **Καρατζάς Γεώργιος:** Καθηγητής, τμήμα ΜΗ.ΠΕΡ. (Πολυτεχνείο Κρήτης)
- **Μανούτσογλου Εμμανουήλ:** Αν. Καθηγητής, τμήμα ΜΗΧ.Ο.Π. (Πολυτεχνείο Κρήτης)
- **Γκιντόνη Ελένη:** Διπλ. Χημικός Μηχανικός, Τεχνικός υπεύθυνος του εργαστηρίου αναλύσεων νερού, Ι.Γ.Μ.Ε.
- **Γιαννουλόπουλος Παναγιώτης:** Υδρογεωλόγος (M.Sc, P.h.d), Ι.Γ.Μ.Ε.
- **Hamdan Hamdan:** Μηχανικός Ορυκτών Πόρων (M.Sc), Υποψήφιος διδάκτορας του τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π.
- **Βοζινάκης Κώστας:** Γεωλόγος, Υ.Ε.Β. Χανίων
- **Δασύρας, Αιμ.**: Γεωλόγος, Ο.Α.ΔΥ.Κ.
- **Δαμπαθάκης, Στ.:** Γεωλόγος, Ο.Α.ΔΥ.Κ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Σε πόλη που βρίσκεται Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού Στύλος, στο νομό Χανίων χημικές αναλύσεις σε νερό από ερευνητικές γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν την χρονική περίοδο 1981 – 1982, έδειξαν υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων της τάξης των 2500 ppm. Το γεγονός ότι η θέση των γεωτρήσεων βρίσκεται σε μεγάλη σχετικά απόσταση από την ακτογραμμή (Σχήμα 1.2) δημιουργήθηκε προβληματισμός γενικότερης θαλάσσιας υφαλμύρινσης του υπό εκμετάλλευση υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής. Η υφαλμύρινση των υπογείων νερών σε παράκτιες περιοχές είναι ένα πρόβλημα που απασχολεί έντονα καθώς όταν επέλθει είναι πολλή δύσκολη έως αδύνατη η αποκατάσταση. Οι δυσκολίες εντοπίζονται στο να αποτραπεί η εξάπλωση της υφαλμύρινσης, στην αναποτελεσματικότητα των μεθόδων απορρύπανσης και στο υψηλό κόστος της επιχείρησης. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εν μέρει με την σωστή επιλογή της θέσης των υδρογεωτρήσεων και την σωστή διαχείριση των υπόγειων νερών πριν συμβεί η ρύπανσή τους από το θαλασσινό νερό.

Τις περισσότερες φορές η υφαλμύρινση των υπογείων νερών είναι αναπόφευκτη γιατί δεν έχει προηγηθεί πλήρης υδρογεωλογική έρευνα της περιοχής για να εκτιμηθεί η δυνατότητα απόληψης νερού χωρίς να επηρεάζονται οι υπάρχουσες συνθήκες, όσον αφορά το μετωπο γλυκού / θαλασσινού νερού στο υπέδαφος. Το μετωπο αυτό συνήθως διαπιστώνεται από χημικές αναλύσεις δειγμάτων νερού που προέρχονται από γεωτρήσεις. Για την οριοθέτηση με ασφάλεια του μετώπου γλυκού / θαλασσινού νερού απαιτούνται πολλές γεωτρήσεις, μια και η γεώτρηση δίνει σημειακή πληροφορία, γεγονός το οποίο αυξάνει το κόστος σημαντικά. Έτσι η οριοθέτηση του μετώπου γίνεται δύσκολη υπόθεση όταν στηρίζεται μόνο στις γεωτρήσεις.

Η χρήση γεωφυσικών μεθόδων μπορεί να προσφέρει ουσιαστική βοήθεια στον εντοπισμό του μετώπου υφαλμύρινσης. Η γεωφυσική έρευνα στηρίζεται στο γεγονός ότι οι μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων των γεωλογικών

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

σηματισμών λόγω μεταβολών του υδροχημικού χαρακτήρα του νερού το οποίο περιέχουν είναι μετρήσιμες.

Με τις γεωφυσικές μεθόδους πραγματοποιούνται μετρήσεις στην επιφάνεια της γης και καθορίζονται οι φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών στρωμάτων χωρίς να απαιτείται πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων. Έτσι δίνεται η δυνατότητα χαρτογράφησης της οριζόντιας εξάπλωσης του γλυκού και του θαλασσινού νερού στην περιοχή που περικλείεται μεταξύ των γεωτρήσεων αλλά και ο εντοπισμός του μετώπου γλυκού / θαλασσινού νερού.

Η συστηματική γεωφυσική έρευνα συμβάλλει στον εντοπισμό και την περιγραφή της εξάπλωσης της ρύπανσης των υπογείων νερών και αυτό χρησιμοποιείται ως τεχνολογία στις Δυτικές χώρες (Καναδά, ΗΠΑ κλπ) αλλά και σε χώρες της Ανατολής, της Αφρικής και της Ευρώπης από τις αρχές της δεκαετίας του '80 με υψηλή απόδοση.

1.2 Η περιοχή έρευνας

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται Νότια του κόλπου της Σούδας, στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού Στύλος, στην επαρχία Αποκορώνου του νομού Χανίων, όπως αυτή αποτυπώνεται στον ακόλουθο χάρτη (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Η περιοχή έρευνας

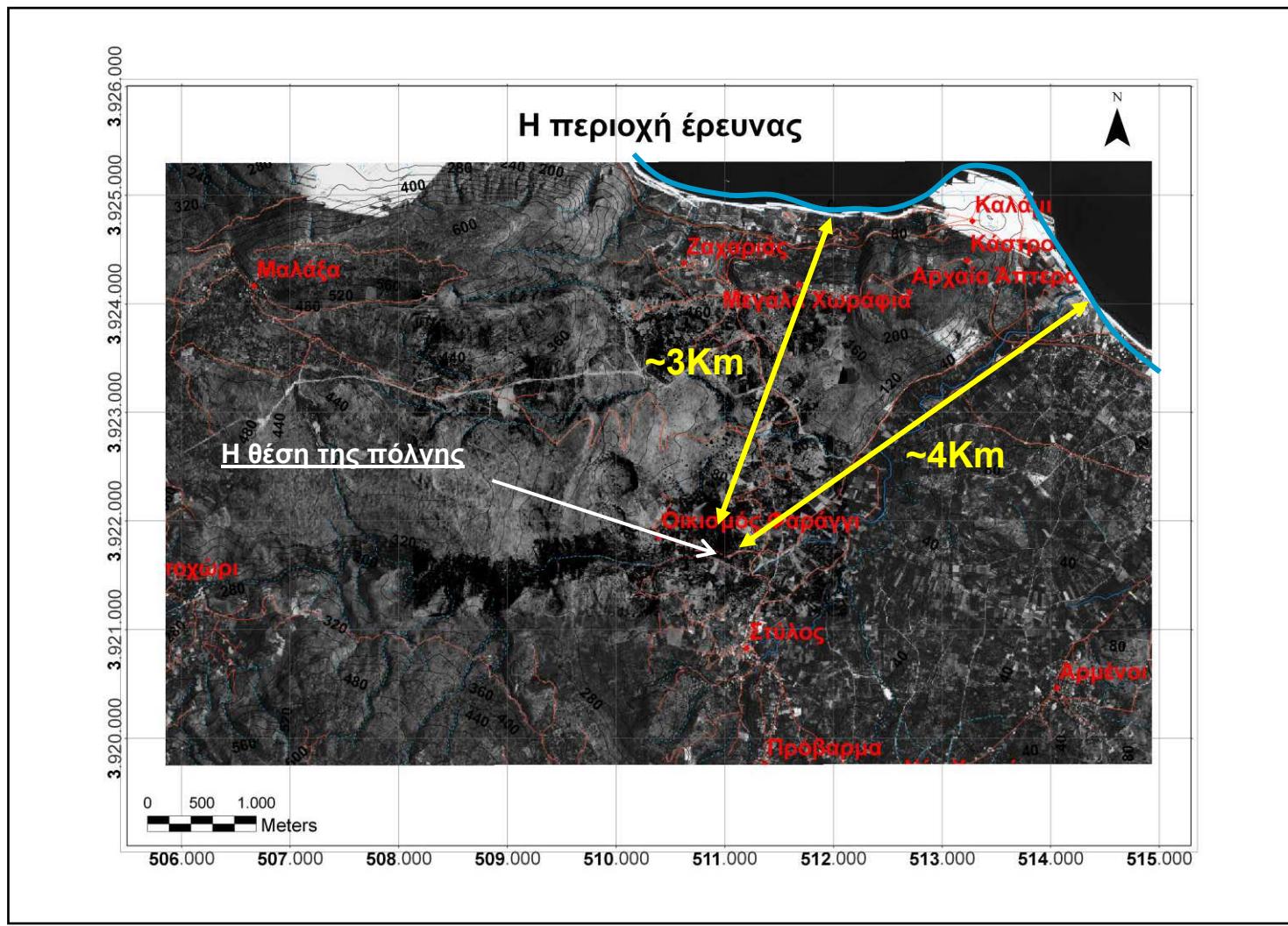
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η περιοχή έρευνας περιλαμβάνει τον ορεινό όγκο της Μαλάξας, το φαράγγι του Κεραμιώτη (ή φαράγγι Δικτάμου όπως έχει μετονομαστεί), την ευρύτερη περιοχή των οικισμών Μεγάλα Χωράφια και Καλάμι, καθώς και ένα μεγάλο μέρος της κοιλάδας του ποταμού Κοιλιάρη. Στο κεντρικό τμήμα του χάρτη βρίσκεται η πόλη (Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι) σε γεωτρήσεις της οποίας διαπιστώθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Η διερεύνηση των αιτιών του φαινομένου αποτέλεσε την αφορμή για την πραγματοποίηση των εργασιών της παρούσας. Νοτιότερα βρίσκονται οι οικισμοί Στύλος και Πρόβαρμα, ενώ στο Νοτιοανατολικό τμήμα του χάρτη περιλαμβάνεται ο οικισμός των Αρμένων καθώς και ένα μέρος του ποταμού Μεσοπόταμου.

Η περιοχή οριοθετείται από τις ακόλουθες συντεταγμένες: 505848m Δυτικά, 514931m Ανατολικά, 3925321m Βόρεια, και 3919753m Νότια (Ε.Γ.Σ.Α. '87), (Σχήμα 1.2).

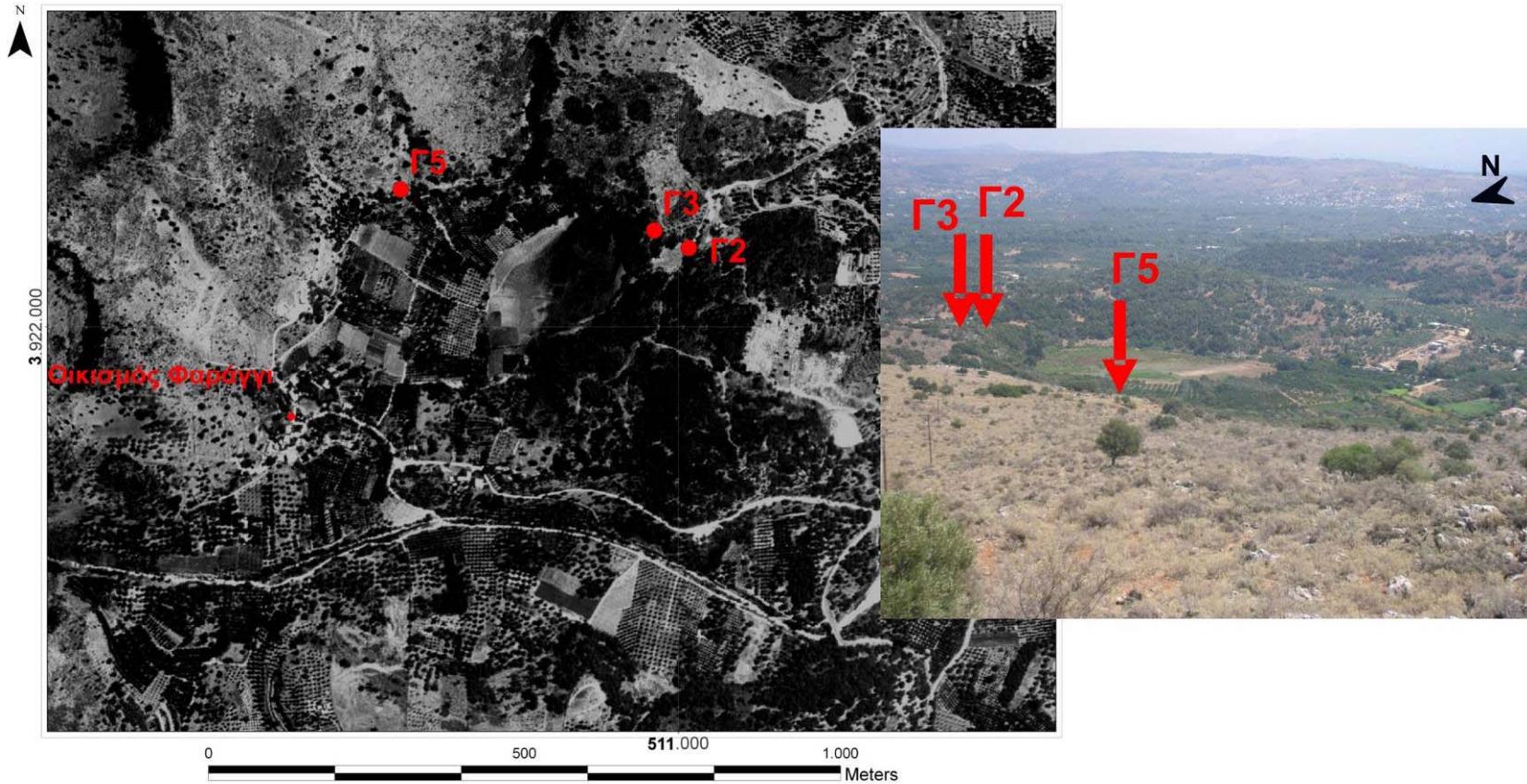
Αφορμή για την πραγματοποίηση της έρευνας στην περιοχή, αποτέλεσε η διαπίστωση έπειτα από την εκτέλεση υδρογεωτρήσεων που είχε πραγματοποιήσει ο Ο.Α.ΔΥ.Κ. (Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης), κατά την χρονική περίοδο 1981-1982, περιφερειακά πόλης, (Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι) του φαινομένου της υφαλμύρινσης στον υδροφόρο της περιοχής στην θέση αυτή (Σχήμα 1.3).

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή



Σχήμα 1.2 Η θέση της πόλυγης και της ακτογραμμής στην περιοχή έρευνας. Με κίτρινα βέλη προβάλλονται ενδεικτικά οι αποστάσεις της πόλυγης από την ακτογραμμή (γαλάζια γραμμή). Το υπόβαθρο του χάρτη έχει προκύψει από την σύνθεση των ορθοφωτοχαρτών της περιοχής έρευνας.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή



Σχήμα 1.3 Η θέση της πόλης και των υδρογεωτρήσεων (Γ_2 , Γ_3 , Γ_5), η εκτέλεση των οποίων ανέδειξε το φαινόμενο της υφαλμύρινσης στην περιοχή. Η φωτογραφία στα δεξιά του σχήματος έχει ληφθεί από Δυτικά και απεικονίζει την πόλη. Τα κόκκινα βέλη στην φωτογραφία δείχνουν την θέση των γεωτρήσεων

1.3 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων της ηλεκτρικής τομογραφίας στην ανίχνευση της υφαλμύρινσης σε καρστικά συστήματα έπειτα και από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης που έχει πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

1.4 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση των δυνατοτήτων της ηλεκτρικής τομογραφίας περιλαμβάνει :

- Την αξιολόγηση ενός μέρους από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης που έχουν πραγματοποιηθεί στην ευρύτερη περιοχή στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Πυθαγόρας II (πίνακας 1.1) από το εργαστήριο εφαρμοσμένης γεωφυσικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης
- Στην περιοχή της πόλης όπου παρατηρείται το φαινόμενο της υφαλμύρινσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας στην ίδια γραμμή (γραμμή 4) σε 4 διακριτές περιόδους για την διερεύνηση των δυνατοτήτων της ηλεκτρικής τομογραφίας στην ανίχνευση της υφαλμύρινσης έπειτα από αντλητική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε σε υδρογεώτρηση (Γ3) στον υφάλμυρο υδροφόρο της περιοχής.

**Γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή έρευνας
(Πυθαγόρας II)**

Μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης	Πλήθος γραμμών μελέτης	Χαρακτηρισμός γραμμών μελέτης
Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση	5	H1, H2, A2, S1, S2
Ηλεκτρική Τομογραφία	4	1, 2*, 3, 5
Σεισμική Τομογραφία	1	STS1-7
Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος V.L.F.	8	001, 003- 009

*Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας 2 έχει πραγματοποιηθεί 2 φορές

Πίνακας 1.1: Γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή έρευνας (Ερευνητικό πρόγραμμα – Πυθαγόρας II)

Κεφάλαιο 2: Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

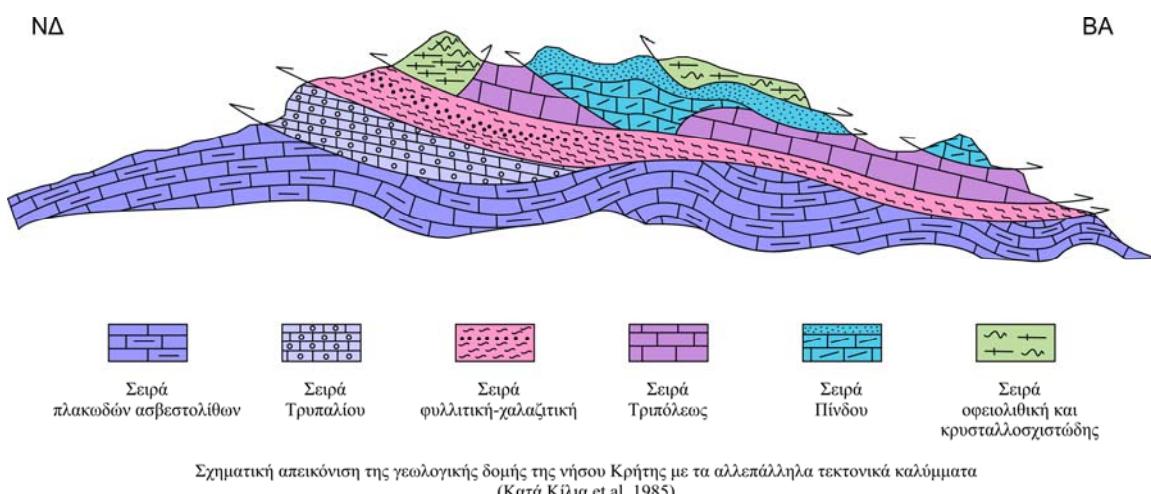
ΟΙ ΓΕΩΔΑΙΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η υφιστάμενη γεωλογική πληροφορία για την περιοχή έρευνας.

2.2 Η γεωλογική δομή της νήσου Κρήτης

Η Γεωλογία της Κρήτης (Μουντράκης, 1985), χαρακτηρίζεται από τα αλλεπάλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνίδων ζωνών τα οποία συνωθούνται στον μικρό σχετικά γεωγραφικό χώρο του νησιού, με γενική κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο. (Σχήμα 2.1. Κατά Κίλια et al., 1985)



Σχήμα 2.1 : Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της νήσου Κρήτης με τα αλλεπάλληλα τεκτονικά καλύμματα (Κατά Κίλια et al., 1985).

Γενικά η Κρήτη συγκροτείται από ένα αυτόχθονο (ή σχετικά αυτόχθονο) σύστημα, που είναι **η ενότητα Ταλέα Όρη των πλακωδών ασβεστολίθων (Plattenkalk)**, πάνω στο οποίο τοποθετούνται με λεπιοειδή τεκτονική διάταξη οι σειρές των πετρωμάτων των άλλων ζωνών και ενοτήτων.

Η ενότητα Ταλέα Όρη-Πλακώδεις ασβεστόλιθοι περιλαμβάνει κυρίως **τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους με πυριτικές ενστρώσεις και κερατολιθικούς κονδύλους, αλλά επίσης και μαζώδεις ασβεστόλιθους, δολομίτες, ασβεστολιθικά**

Κεφάλαιο 2: Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας

κροκαλοπαγή και φυλλιτικές-χαλαζιτικές παρεμβολές. Η σειρά αυτή έχει ηλικία από **Πέρμιο μέχρι Ήώκαινο**, είναι **ημιμεταμορφωμένη** και ανήκει πιθανότατα στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη. Αποτελεί το σχετικά αυτόχθονο υπόβαθρο της Κρήτης και αποκαλύπτεται σε πολλές περιοχές του νησιού υπό μορφή πολλαπλού τεκτονικού παραθύρου κάτω από τα αλλεπάλληλα επωθημένα καλύμματα. Μεγάλες μάζες των ορεινών όγκων των Λευκών Ορέων και της Ιδης δομούνται από την σειρά των πλακωδών ασβεστολίθων.

Πάνω στην σειρά των πλακωδών ασβεστολίθων βρίσκεται μια **σειρά κροκαλοπαγών-λατυποπαγών ασβεστολίθων** που ονομάζεται **σειρά Τρυπαλίου**. Η ηλικία της θεωρήθηκε **Άνω Τριαδική-Κάτω Ιουρασική** αν και δεν αποκλείεται και πολύ νεότερη ηλικία. Από γεωτεκτονική άποψη η σειρά Τρυπαλίου θεωρείται από άλλους μεν ως ο υποκείμενος ορίζοντας της αμέσως ανώτερης φυλλιτικής σειράς, ενώ από άλλους ως επικλυσιγενή σειρά πάνω στους πλακώδεις ασβεστόλιθους και επομένως αποτελεί λιθοφασική πλευρική διαφοροποίηση της ίδιας της ενότητας Ταλέα Όρη-Πλακώδεις ασβεστόλιθοι.

Επωθημένη πάνω στην ενότητα Ταλέα Όρη και στην σειρά Τρυπαλίου βρίσκεται μια **φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά** ηλικίας **Περμίου-Τριαδικού**, που αποτελείται από **φυλλίτες, χαλαζίτες, μετα-κροκαλοπαγή, μετα-ψαμμίτες, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μετα-βασίτες και μετα-ανδεσίτες**. Η μεταμόρφωση της σειράς έγινε σε συνθήκες υψηλής πίεσης (γλαυκοφανιτική). Η γεωτεκτονική θέση της παραμένη άγνωστη. Άλλοι την θεωρούν υπόβαθρο της Γαβρόβου-Τριπόλεως και άλλοι ανεξάρτητη μονάδα προερχόμενη με επώθηση από πιο εσωτερικά.

Πάνω στην φυλλιτική σειρά τοποθετείται η **ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως** με τους γνωστούς **νηριτικούς ασβεστόλιθους** και σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται επωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της **ζώνης Πίνδου**.

Εκτός από τα παραπάνω τεκτονικά καλύμματα των εξωτερικών Ελληνίδων στον χώρο της Κρήτης βρίσκονται σε ακόμη ανώτερη τεκτονική θέση και αλλόχθονα τεκτονικά λέπια των εσωτερικών ζωνών. Τέτοια είναι η **ενότητα Αρβης** με **οφιολιθικά πετρώματα** καθώς και άλλες διάσπαρτες οφιολιθικές εμφανίσεις που θεωρούνται ότι έχουν επωθηθεί από τον χώρο της Υποπελαγονικής, όπως επίσης και **κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα** (γνεύσιοι, σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες της ενότητας Αστερούσια) με προέλευση την Πελαγονική.

Κεφάλαιο 2: Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας

Τέλος, πάνω σε αυτούς τους αλπικούς σχηματισμούς κάθονται σε στρωματογραφική ασυμφωνία **Ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς** (κυρίως κλαστικά θαλάσσια ιζήματα) τα οποία έχουν μεγάλο πάχος και εξάπλωση στις παραλιακές περιοχές της Κρήτης.

2.3 Ο γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Μ.Ε. για την περιοχή έρευνας

Βασική πηγή πληροφόρησης για την γεωλογική δομή της περιοχής, αποτέλεσε ο υφιστάμενος γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο Χανιά, 1971 (Γεωλογική χαρτογράφηση από Ε.Δ. Καραγεωργίου, τα έτη 1951-1969. Στρωματογραφία: Σ. Τσαϊλά-Μονώπολη), απόσπασμα του οποίου, με την περιοχή έρευνας παρατίθεται στον ακόλουθο χάρτη (Σχήμα 2.2).

Σύμφωνα με το φύλλο χάρτη για την περιοχή έρευνας, απαντούν οι ακόλουθοι σχηματισμοί:

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ-ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Αλλουβιακές προσχώσεις (Qal₁) μικρού πάχους, αποτελούμενες κυρίως από πηλούς, αργίλλους, άμμους και χάλικες, αποτυπώνονται κυρίως στο Νοτιοανατολικό τμήμα του χάρτη.

Προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογής (Qtr), παρατηρούνται εντός των καρστικών εγκούλων των ανθρακικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή.

ΤΡΙΤΟΓΕΝΕΣ-ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

Μάργες (Mim). Εμφανίζονται κυρίως στο Βόρειο και το Νοτιοανατολικό τμήμα του χάρτη. Είναι κιτρινόφαιες έως λευκοκίτρινες, οι οποίες σε πολλές θέσεις εναλλάσσονται με μαργαϊκούς ψαμμίτες και πλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Εγκλείονται απολιθώματα θαλάσσιων μαλακίων.

Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (Mik). Έχουν αποτεθεί έπειτα από επίκλιση επάνω στους ασβεστολίθους της Τρίπολης. Ανάμεσα στους δύο σχηματισμούς κατά θέσεις είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το ψαμμιτομαργαϊκό κροκαλοπαγές επίκλισης. Είναι ασβεστόλιθοι συμπαγείς, λευκοκίτρινοι έως λευκότεφροι, οι οποίοι εγκλείονται θαλάσσια απολιθώματα Ελασματοβραχίων, Εχινοδέρμων, Βρυοζώων, Εχίνων και θραύσματα οστρακοδέρμων.

ΜΕΣΟΖΩΙΚΟ-ΤΡΙΑΔΙΚΟ(;)-ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

ΖΩΝΗ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

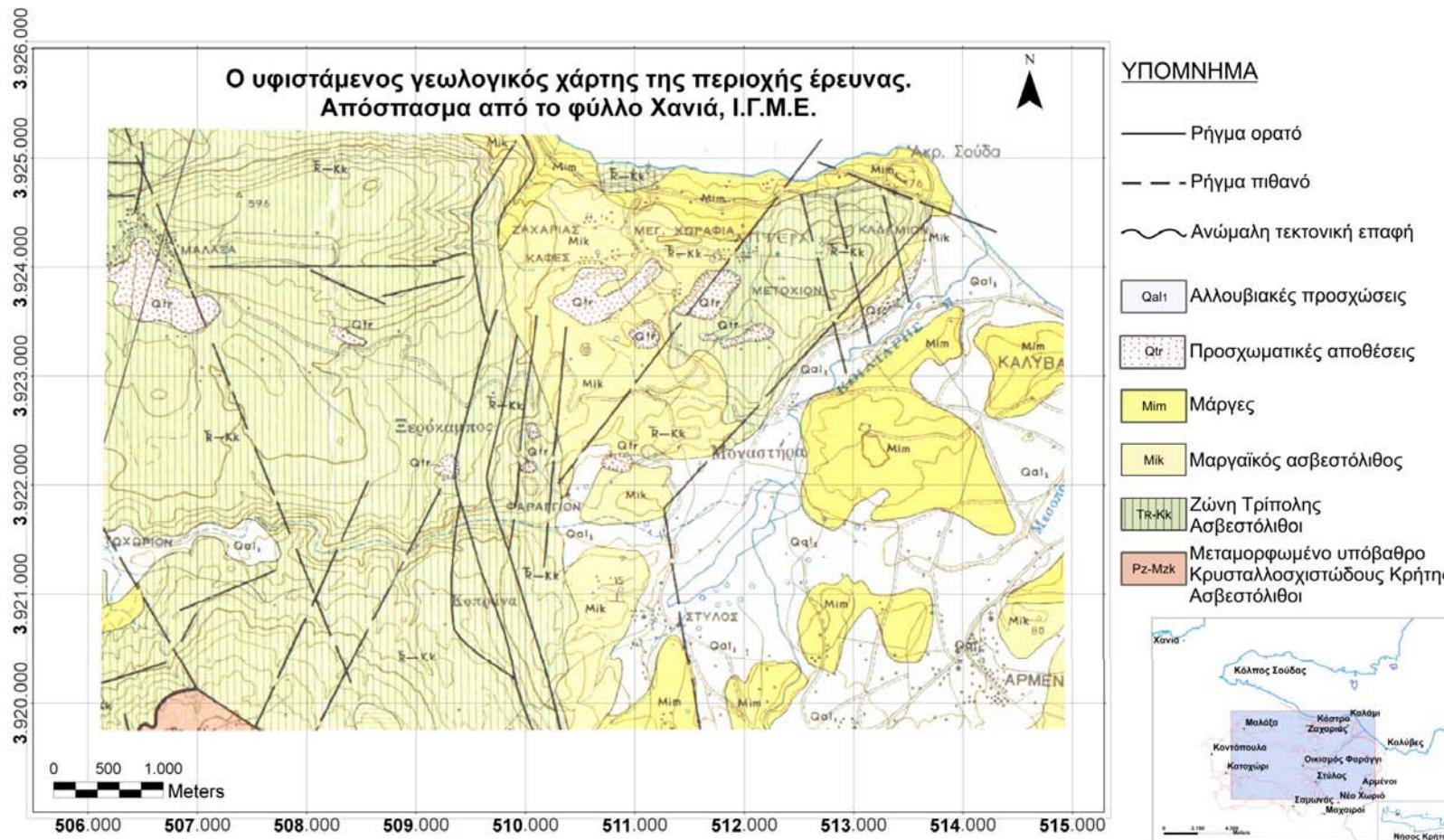
Σύμφωνα με το φύλλο χάρτη για την περιοχή έρευνας, απαντούν κυρίως **ασβεστόλιθοι της ζώνης Τριπόλεως (Τ_R-Κk)**. Πρόκειται για ασβεστόλιθους συμπαγείς, λευκόφαιοις έως υποκύανους, μικροκρυσταλλικούς έως στιφρούς, συνήθως με θραύσματα ρουδιστών, ορισμένες φορές λατυποπαγείς, κατά τόπους δολομιτιωμένους, ισχυρά καρστικοποιημένους. Πιθανόν αυτοί να περιλαμβάνουν και κατώτερα μέλη, Ιουρασικής έως Τριαδικής ηλικίας, χωρίς όμως αυτό να έχει αποδειχθεί παλαιοντολογικά. Η ηλικία τους είναι Τριαδικό(;)-Κρητιδικό.

ΠΑΛΑΙΟΖΩΙΚΟ-ΜΕΣΟΖΩΙΚΟ(;)

ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΣΧΙΣΤΩΔΟΥΣ ΚΡΗΤΗΣ

Οι ασβεστόλιθοι της ζώνης Τριπόλεως υπέρκεινται με ανώμαλη τεκτονική επαφή **ασβεστολίθων του μεταμορφωμένου κρυσταλλοσχιστώδους υπόβαθρου της Κρήτης (Ρ_z-Μ_{zk})**. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί εμφανίζονται στο Νοτιοδυτικό τμήμα του χάρτη (περιοχή Κεφάλια). Πρόκειται για ασβεστόλιθους συμπαγείς, κρυσταλλικούς, λευκούς έως λευκόφαιοις, κατά τόπους υπομέλανους, κυανόφαιοις, λεπτοπλακώδεις, ορισμένες φορές δολομιτικούς ή και κατά τόπους δολομίτες του αυτόχθονου συστήματος της νήσου Κρήτης. Η ηλικία τους δεν έχει προσδιοριστεί. Πιθανόν να είναι ηλικίας Παλαιοζωϊκού-Μεσοζωϊκού(;).

Κεφάλαιο 2: Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας



2.4 Ο λεπτομερής γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας

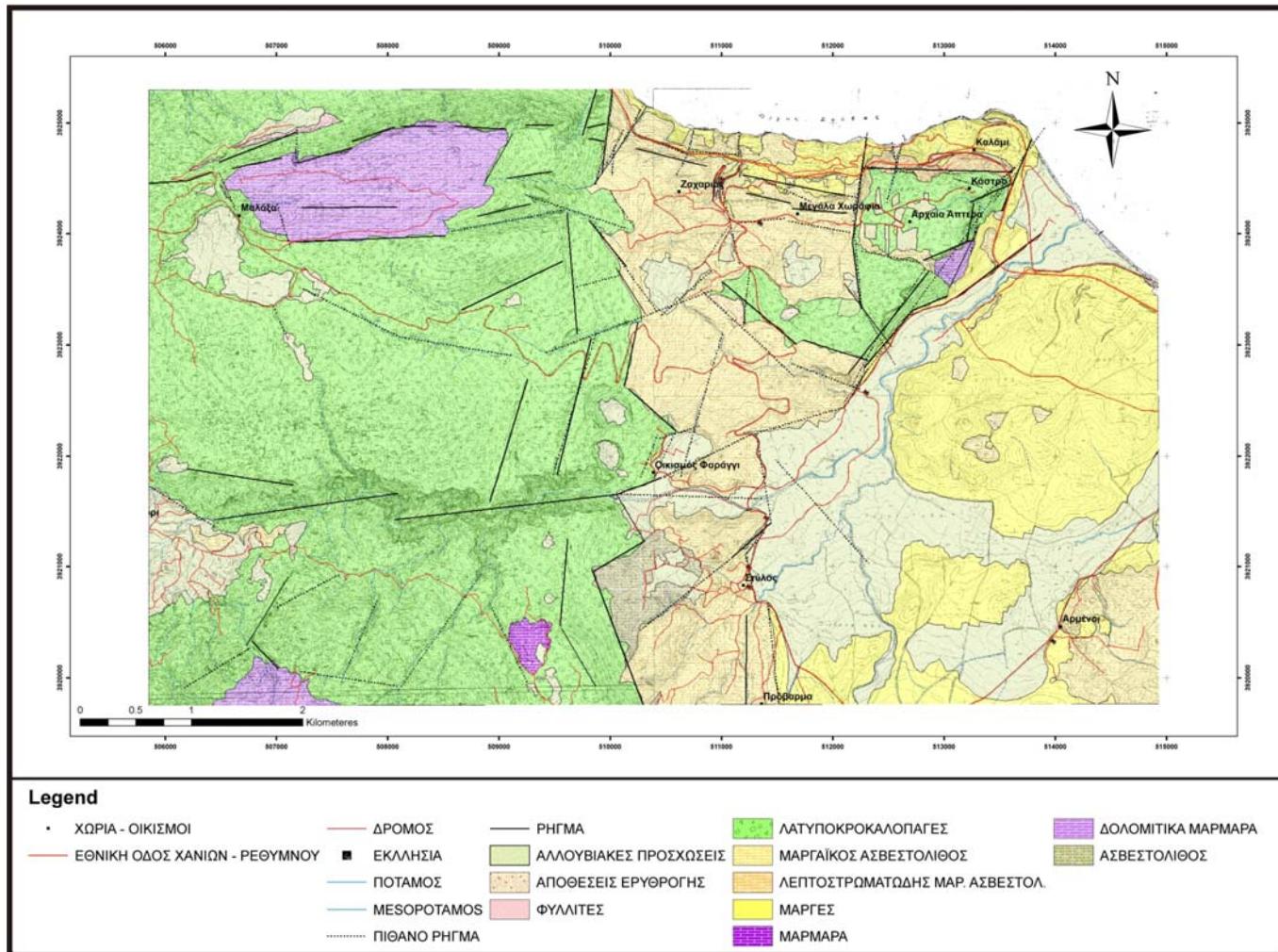
Για την περιοχή έρευνας υπάρχει ο λεπτομερής γεωλογικός χάρτης σε κλίμακα 1: 5.000, ο οποίος είναι το αποτέλεσμα εργασιών στην περιοχή οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος: «Περιβάλλον – Πυθαγόρας II : “Συνδυασμένη γεωφυσική έρευνα για την ανίχνευση του μετώπου υφαλμύρινσης και την διαχείρηση των υπογείων νερών στην περιοχή Στύλος Χανίων”».

Σύμφωνα με τον χάρτη αυτό (σχήμα 2.3) αναδεικνύονται τα ακόλουθα για την περιοχή:

- Η τεκτονικά κατώτερη στρωματογραφική ενότητα στην περιοχή είναι τα ανθρακικά πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων
- Η επόμενη στρωματογραφικά ενότητα η οποία έχει και την μεγαλύτερη επιφανειακή εξάπλωση στην περιοχή που δομείται από το αλπικό υπόβαθρο είναι λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα πιθανώς της Ενότητας του Τρυπαλίου.
- Η λεκάνη του Νεογενούς έχει δημιουργηθεί από κανονικά ρήγματα που η διεύθυνση τους είναι γενικά BBΔ – NNA.
- Εντός της λεκάνης του Νεογενούς παρατηρείται ευδιάκριτα μια νεότερη λεκάνη πιθανώς του Τεταρτογενούς που έχει δημιουργηθεί από ρήγματα διεύθυνσης BBA – NNΔ.
- Υπάρχει άμεση γεωμετρική σχέση με την δημιουργία της λεκάνης του Τεταρτογενούς και την ανύψωση του τεκτονικού κέρατος των Απτέρων.

Η ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της γεωφυσικής διασκόπησης απαιτεί την αξιολόγηση κατά κύριο λόγο της διαθέσιμης γεωλογικής πληροφορίας. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί μια σύνοψη της γεωλογικής πληροφορίας που απορρέει από τον χάρτη του σχήματος 2.3, η οποία και θα αξιολογηθεί για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας.

Κεφάλαιο 2: Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 2.3 Ο λεπτομερής γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας κλίμακας 1: 5.000, «Περιβάλλον – Πυθαγόρας II : “Συνδυασμένη γεωφυσική έρευνα για την ανίχνευση του μετώπου υφαλμύρινσης και την διαχείριση των υπογείων νερών στην περιοχή Στύλος Χανίων”»

Κεφάλαιο 2: Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας

Στο κεντρικό τμήμα του λεπτομερούς γεωλογικού χάρτη (Σχήμα 2.3) βρίσκεται η πόλη, η οποία είναι και η μεγαλύτερη που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή έρευνας και βρίσκεται Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι. Σε αυτήν επιφανειακά απαντούν μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με το πάχος τους να φτάνει τα 20 m για την συγκεκριμένη περιοχή. Η πόλη είναι πληρωμένη με ιζήματα του Τεταρτογενούς (κυρίως πηλοί και άργιλοι), ενώ η βλάστηση της είναι ελώδης. Η παρουσία της πόλης στην περιοχή αποτελεί σημαντικό δείκτη του έντονου βαθμού καρστικοποίησης των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής.

Κατά θέσεις είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το υποκείμενο αλπικό υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από λατυποπαγή μεταμορφωμένα πετρώματα πιθανώς της ενότητας του Τρυπαλίου. Το αλπικό υπόβαθρο εμφανίζεται στα Δυτικά της πόλης όπου και αποκτά μεγάλη επιφανειακή εμφάνιση. Η πόλη βρίσκεται στο Ανατολικό όριο του σχηματισμού για την ευρύτερη περιοχή, όπου κανονικά ρήγματα γενικής διεύθυνσης BBΔ – NNA οριοθετούν το αλπικό υπόβαθρο με την λεκάνη του Νεογενούς στα Ανατολικά. Η λεκάνη του Νεογενούς η οποία αποτυπώνεται στο Ανατολικό τμήμα του χάρτη χαρακτηρίζεται από εναλλαγές μαργών και μαργαϊκών ασβεστολίθων. Εντός της λεκάνης του Νεογενούς παρατηρείται νεότερη λεκάνη (πιθανώς του Τεταρτογενούς), η οποία έχει δημιουργηθεί από ρήγματα διεύθυνσης BBA – NNΔ, στην οποία απαντούν ιζήματα του Τεταρτογενούς. Η δημιουργία της νεότερης αυτής λεκάνης έχει άμεση γεωμετρική σχέση με το τεκτονικό κέρας των Απτέρων.

Δυτικά του τεκτονικού κέρατος και Βόρεια της πόλης, στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού Μεγάλα Χωράφια το πάχος των σχηματισμών του Νεογενούς ξεπερνάει κατά θέσεις τα 60m, ενώ η διεύθυνση κλίσης των μαργαϊκών ασβεστολίθων είναι σε γενικές γραμμές προς Βορρά με μικρές τιμές στις γωνίες κλίσης (περίπου 25°).

Η ομάδα των πλακωδών ασβεστολίθων αποτελεί την τεκτονικά κατώτερη στρωματογραφική ενότητα της περιοχής. Παρατηρείται στον ορεινό όγκο της Μαλάξας (Βορειοδυτικό τμήμα του χάρτη), στα Νοτιοδυτικά του, ενώ η λειτουργία κατά το παρελθόν λατομείου Νότια των Απτέρων, είχε ως αποτέλεσμα το να αποκαλύψει την παρουσία τους και στον χώρο λειτουργίας του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΕΡΜΗΝΕΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Ο όρος γεωφυσική διασκόπηση αναφέρεται στην έρευνα της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση γεωλογικών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό επιτυγχάνεται με βάση τους νόμους της φυσικής, πραγματοποιώντας μετρήσεις χαρακτηριστικών φυσικών μεγεθών του υπεδάφους.

Τα τελευταία χρόνια οι γεωφυσικές μέθοδοι παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται στην απεικόνιση της δομής του υπεδάφους. Έχουν καθιερωθεί πλέον σε τομείς, όπως η μεταλλευτική έρευνα, η ανίχνευση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εφαρμοσμένη μηχανική και η αρχαιομετρία. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραδοσιακές γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονταν στην ανίχνευση μεταλλευμάτων και πετρελαίου βρίσκουν πια πρόσφορο έδαφος στον εντοπισμό της ρύπανσης του εδάφους.

Πρόσφατα αναπτύχθηκε ένας καινούριος κλάδος της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ο οποίος πραγματεύεται κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την ανίχνευση και χαρτογράφηση ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά. Η Περιβαλλοντική Γεωφυσική εμφανίζει αυξημένες δυνατότητες στη γρήγορη, μη-καταστρεπτική αξιολόγηση των ορίων μίας ρυπασμένης περιοχής, ενώ μπορεί να βοηθήσει στη χαρτογράφηση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους.

Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται στην ανίχνευση της ρύπανσης του εδάφους και στον έλεγχο της ποιότητας των υπογείων υδάτων ποικίλουν. Η επιλογή τους εξαρτάται κάθε φορά από τον επιθυμητό στόχο και τη φύση του προβλήματος που διερευνάται. Ειδικότερα, οι μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του γεωραντάρ είναι σε θέση να ανιχνεύσουν άμεσα την παρουσία ρύπανσης στο υπέδαφος, μετρώντας τη μεταβολή στην αγωγιμότητα του, η οποία προκαλείται από τους ρυπογόνους παράγοντες. Αντίθετα, άλλες γεωφυσικές τεχνικές όπως η σεισμική ανάκλαση-διάθλαση και η μαγνητομετρία μπορούν έμμεσα να βοηθήσουν στην ανίχνευση της ρύπανσης του υπεδάφους. δίδοντας πληροφορίες για την αναγνώριση λιθολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών του υπεδάφους, οι οποίες συμβάλλουν στην εξάπλωση της ρύπανσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων δεν αποτελεί πάντοτε ένα εύκολο ή απλό εγχείρημα. Για το λόγο αυτό απαιτείται η συμβολή περισσοτέρων από μίας γεωφυσικών μεθόδων σε συνδυασμό με άλλες επιστημες (υδρογεωλογία, γεωλογία, υδροχημεία, γεωχημεία).

3.2 Οι μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης στην έρευνα για την ρύπανση του υπεδάφους

Οι κυριότερες γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανίχνευση και οριοθέτηση της ρύπανσης του υπεδάφους (Κουκαδάκη, Τζιμούρτος, 2002), εφαρμόζουν τις ακόλουθες μεθόδους:

- Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων (Electromagnetometry)
- Σεισμική Ανάκλαση (Seismic Reflection)
- Σεισμική Διάθλαση (Seismic Refraction)
- Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetometry)
- Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (Self Potential)
- Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization)
- Βαρυτική μέθοδος (Gravity)
- Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)
- Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Electrical Resistivity)

Κάθε μία από τις γεωφυσικές μεθόδους εφαρμόζεται για συγκεκριμένο σκοπό, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και τον επιθυμητό στόχο της έρευνας. Ιδιαίτερα για τον εντοπισμό ζωνών υφαλμύρινσης χρησιμοποιείται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η μέθοδος είναι άμεση και προσφέρει σημαντικές πληροφορίες. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής οφείλεται στην επίδραση που έχει ο υδροχημικός χαρακτήρας του νερού των σχηματισμών στην γεωηλεκτρική ανταπόκριση του υπεδάφους. Η ανίχνευση-προσδιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρινσης βασίζεται στην επίδραση ανίχνευση του υδροχημικού χαρακτήρα των ιόντων του χλωρίου το οποίο είναι ένα από τα πιο ηλεκτρικά ενεργά ιόντα που εμφανίζονται στη φύση, επιτρέποντας έτσι την ανίχνευση του φαινομένου της διείσδυσης αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Ετερογένεια και ανισοτροπία στις ηλεκτρικές ιδιότητες μπορεί να σχετίζονται με παρόμοιες καταστάσεις στις υδροχημικές ιδιότητες.

3.3 Οι μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στον εντοπισμό και χαρτογράφηση των ζωνών μίξης του θαλασσινού με το γλυκό νερό

Οι γεωφυσικές μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, κυρίως η ηλεκτρική βυθοσκόπηση και η ηλεκτρική τομογραφία, έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για τον εντοπισμό και χαρτογράφηση των ζωνών μίξης του θαλασσινού με το γλυκό νερό, καθώς οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των διαφόρων πετρωμάτων επηρεάζονται από την αλατότητα του νερού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα με τις μεθόδους αυτές να είναι δυνατόν να γίνει διαχωρισμός πετρωμάτων που περιέχουν υφαλμυρό νερό από αυτά με γλυκό νερό.

Οι Singh-Das-Hodlur (2004) κατάφεραν να χαρτογραφήσουν το μέτωπο γλυκού και θαλασσινού νερού στην περιοχή της Orissa της Ινδίας, χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης, ενώ οι Abdul Nassir-Loke-Nawawi (2000) απέδειξαν ότι η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την χαρτογράφηση του μετώπου μίξης αλμυρού και γλυκού νερού, καθώς με αυτήν την μέθοδο μπορεί να απεικονιστεί η πλευρική διαφοροποίηση αλατότητας των υπογείων νερών μέσα σε περατούς γεωλογικούς σχηματισμούς στην περιοχή Yan της Μαλαισίας.

Στην περιοχή Korin του Ιράν, ο Lashkaripour (2003) πραγματοποίησε ένα πυκνό δίκτυο ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων με σκοπό τον προσδιορισμό του πάχους, του βάθους και της θέσης του υδροφόρου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τον ποσοτικό και ποιοτικό προσδιορισμό της υδροφορίας της περιοχής για μελλοντική εκμετάλλευση. Επίσης, εκτιμήθηκε η ποιότητα υπόγειου νερού και εντοπίστηκε και το μέτωπο μίξης του με το θαλασσινό νερό στην παράκτια περιοχή Chennai της Ινδίας από τους Gnanasundar-Elango (1999) χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική βυθοσκόπηση.

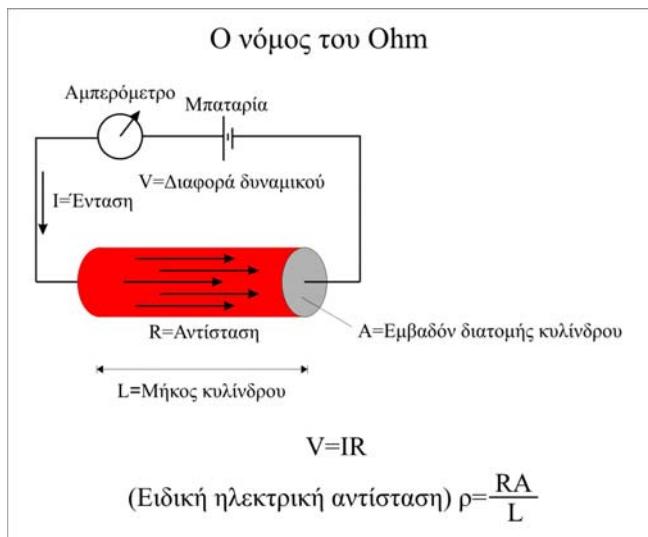
Οι Imhof-Guell-Villagra (2001) χρησιμοποίησαν την ηλεκτρική βυθοσκόπηση για την οριοθέτηση των ζωνών υφαλμύρινσης στην περιοχή Colonia Lloveras της Αργεντινής με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Ο υδροφόρος ορίζοντας σε αλλονβιακές προσχώσεις εντοπίστηκε από τους Singh-Yadav (1982) στην περιοχή της Allahabad της Ινδίας χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις. Εντυπωσιακά είναι τα αποτελέσματα που έδωσε η εφαρμογή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης στην περιοχή Omaruru της Ναμίμπιας, όπου ο υδροφόρος ορίζοντας εντοπίστηκε σε αλλονβιακές προσχώσεις από τους Beer-Joubert-Zijl (1981).

3.4 Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Δημιουργούνται τεχνητά ηλεκτρικά πεδία από τα οποία καθορίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος (γεωηλεκτρική δομή). Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους. Μετρώντας το ηλεκτρικό δυναμικό με συγκεκριμένες διατάξεις σε καθορισμένες θέσεις μπορούμε να προσδιορίσουμε την γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

3.4.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που χρησιμοποιείται στις μεθόδους ηλεκτρικής διασκόπησης. Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του Ohm (σχήμα 3.1) : $V=IR$, όπου V η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα κυλινδρικής αντίστασης (Volt), I η ένταση του ρεύματος που την διαρέει (Ampere) και R η ηλεκτρική της αντίσταση (Ohm)



Σχήμα 3.1 Ονόμος του Ohm και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση

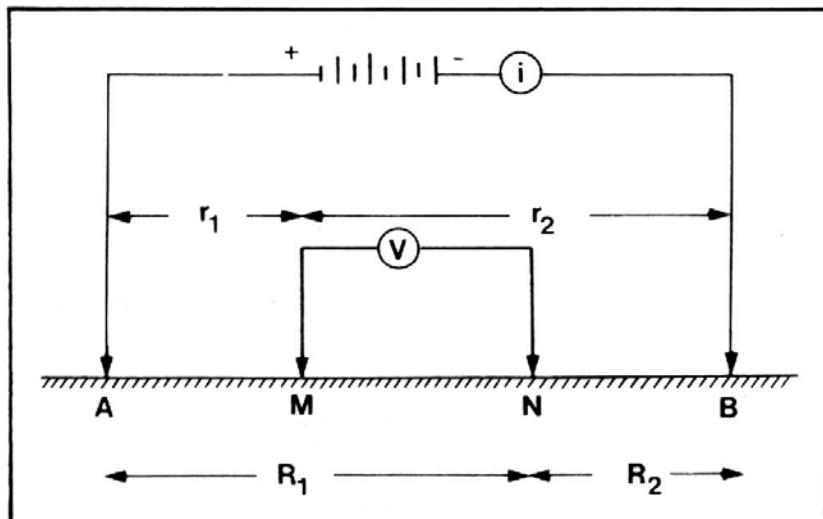
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από την σχέση $\rho = \frac{RA}{L}$, όπου

R - η ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)

A - το εμβαδό της διατομής του κυλίνδρου (m^2), και

L - το μήκος του κυλίνδρου (m)

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) είναι το Ohm.m. Το αντίστροφο μέγεθος, $\sigma = \frac{1}{\rho}$, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα S.I., το siemens / m.



Σχήμα 3.2 Διατάξεις ηλεκτροδίων (Reynolds, 1997).

Το σχήμα 3.2 αντιπροσωπεύει μια τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν τα ηλεκτρόδια ρεύματος AB που είναι συνδεδεμένα με ένα αμπερόμετρο για τον υπολογισμό της έντασης I του ρεύματος που εισάγεται στο έδαφος, ενώ τα ηλεκτρόδια MN είναι τα ηλεκτρόδια τάσης, που συνδέονται με βολτόμετρο για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού (V_{MN}). Οι σχετικές αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι r₁, r₂, R₁, R₂ (Σχήμα 3.2). Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm και θεωρώντας ότι το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ισότροπο και ομογενές μέσο προκύπτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}, \quad (1)$$

3.4.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ορυκτών και πετρωμάτων αποτελούν αντικείμενο μελέτης για σχεδόν δύο αιώνες. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η

ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Το αντίστροφο, $\sigma = 1 / \rho$, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα περισσότερα ορυκτά και πετρώματα δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Μόνο τα μεταλλικά ορυκτά και τα πετρώματα με σημαντική συγκέντρωση σε αυτά τα ορυκτά παρουσιάζουν αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της αγωγής του ηλεκτρισμού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του πλέγματος των μετάλλων (ηλεκτρονική αγωγή).

Τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές του ρ σε σχέση με τα ιζηματογενή. Αυτό οφείλεται στο ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ιζηματογενών κυρίως πετρωμάτων επηρεάζεται από το πορώδες και τη περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα (ηλεκτρολυτική αγωγή). Η ακόλουθη εμπειρική σχέση συνδέει την ειδική αντίσταση ρ των ιζηματογενών πετρωμάτων και το πορώδες φ:

$$\rho = a \rho_v \varphi^{-m}, \text{ όπου}$$

ρ_v : η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος,
 φ : ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες), και
 a, m : σταθερές (με τιμές κατά προσέγγιση 0,5-2,5 για το a και 1,3-2,5 για το m (Telford et al 1976, Grant and West 1965, Παπαζάχος 1986). Η σχέση αυτή γνωστή και ως νόμος του Archie, δείχνει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Η λιθολογία και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Με το πέρασμα του χρόνου, το συνολικό πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων μεγαλώνει με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα υποκείμενα. Άρα τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα παρουσιάζουν αυξημένη συνοχή, μικρό πορώδες και μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Ο γενικός αυτός κανόνας δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα τα οποία έχοντας σχηματιστεί σε γλυκό νερό, κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό, αφού η περιεκτικότητα σε ιόντα παίζει ως γνωστό αποφασιστικό ρόλο στη διέλευση του ρεύματος.

Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό υπάρχει έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας καθώς οι δύο παράγοντες αυτοί καθορίζουν το πορώδες. Στα κρυσταλλικά

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

πετρώματα των οποίων το πορώδες είναι εξαιρετικά χαμηλό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά σχεδόν, στις ρωγμές που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ηλεκτρολυτών είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας:

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_{\theta}(\theta - 18^{\circ})}, \text{όπου}$$

ρ_{θ} : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία $\theta^{\circ}\text{C}$

ρ_{18} : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία 18°C

α_{θ} : ο θερμικός συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες $\alpha_{\theta} = 0,025 / ^{\circ}\text{C}$).

Συνοψίζοντας, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- του όγκου του νερού στο πέτρωμα
- της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- της θερμοκρασίας (αύξηση της ευκινησίας των ιόντων)
- της περιεκτικότητας σε αργίλους
- του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- της καρστικοποίησης
- της εξαλοιώσης.

Στις διασκοπήσεις μικρού βάθους, η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος επιτυγχάνεται κυρίως από διαλυμένα άλατα όπως το ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό νάτριο που υπάρχουν στο ίδιο το έδαφος – κυρίως για αργιλώδη εδάφη – ή προέρχονται από τα υποκείμενα γεωλογικά στρώματα, βροχοπτώσεις, σύγχρονα γεωργικά λιπάσματα ή άλλες ανθρωπογενείς διαδικασίες. Επίσης συγκεντρώσεις ριζών και κολλοειδών στο νερό επηρεάζουν την αγωγιμότητα.

Εδώ θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι σε περίπτωση κορεσμού του εδάφους σε νερό η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από τη σύνδεση μεταξύ των πόρων. Όταν πρόκειται για ξηρά εδάφη ακόμα και οι ελάχιστες ποσότητες νερού που συγκρατούνται σε πολύ μικρούς πόρους είναι σημαντική.

Συνήθως το μέγεθος των ανωμαλιών είναι μεγαλύτερο μετά από μία μακρά περίοδο ξηρού και θερμού καιρού, με την παρατήρηση ότι σημαντικό ρόλο παίζει η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Διακρίνοντας τα εδάφη σε κοκκώδη, και συμπαγή παρατηρήθηκε διαφορετική μεταβολή στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

μεταξύ περιόδων διαφορετικής υγρασίας. Κατά τη διάρκεια λοιπόν της υγρής περιόδου, όπου το επίπεδο της υγρασίας γίνεται μέγιστο, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση γίνεται ελάχιστη στα κοκκώδη εδάφη, ενώ στα συμπαγή εδάφη η υγρασία παραμένει μικρή και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεγάλη. Αντίθετα τη ξηρή περίοδο μόνο οι μικροί πόροι είναι πληρωμένοι με νερό με αποτέλεσμα τα αργιλώδη να είναι πιο αγώγιμα από τα κοκκώδη εδάφη.

Είναι φανερό ότι συμπαγή πετρώματα όπως ο γρανίτης είναι ελάχιστα αγώγιμα, οι πιο πορώδεις δολομίτες είναι πολύ περισσότερο, ενώ ακόμη καλύτεροι αγωγοί είναι η άμμος και η άργιλος.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψαν από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις αναφοράς σε θέσεις επιφανειακής εμφάνισης διαφόρων σχηματισμών στην Κρήτη.

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Ohm.m)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Συμπαγής δολομίτης	>104
Πορώδης δολομίτης	100-1000
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	10²-10⁶

Πίνακας 3.1 Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων

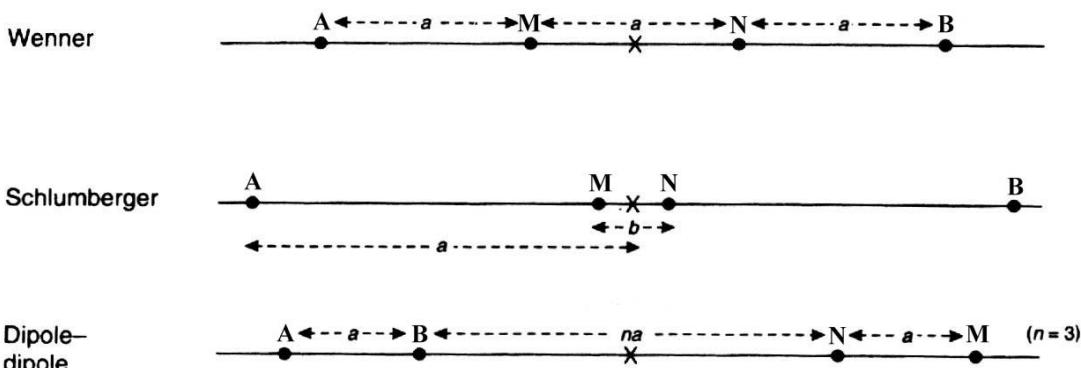
3.4.3 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Η σχέση (1) προέκυψε θεωρώντας ότι τα επιφανειακά στρώματα της Γης είναι ομογενή και ισότροπα, γεγονός όμως που δεν ισχύει στην πραγματικότητα και συνεπώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι σταθερή σε αυτά. Η αντίσταση που υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση εκφράζει την συνολική αντίσταση των

σχηματισμών (επιφανειακών στρωμάτων) που διαπέρασε το ηλεκτρικό ρεύμα έως ότου μετρηθεί στα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων.

Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στο ύπαιθρο, ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Στο σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στην θέση του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 3.3 Οι πιο συνηθισμένοι τύποι διάταξης τεσσάρων ηλεκτροδίων

Τα κυριότερα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης είναι το επιθυμητό (μέγιστο) βάθος διασκόπησης, καθώς και η διακριτική της ικανότητα. Οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δίπολα (twin - probe, πόλου – διπόλου) παρέχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και διπόλου – διπόλου παρέχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα στο ίδιο βάθος σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

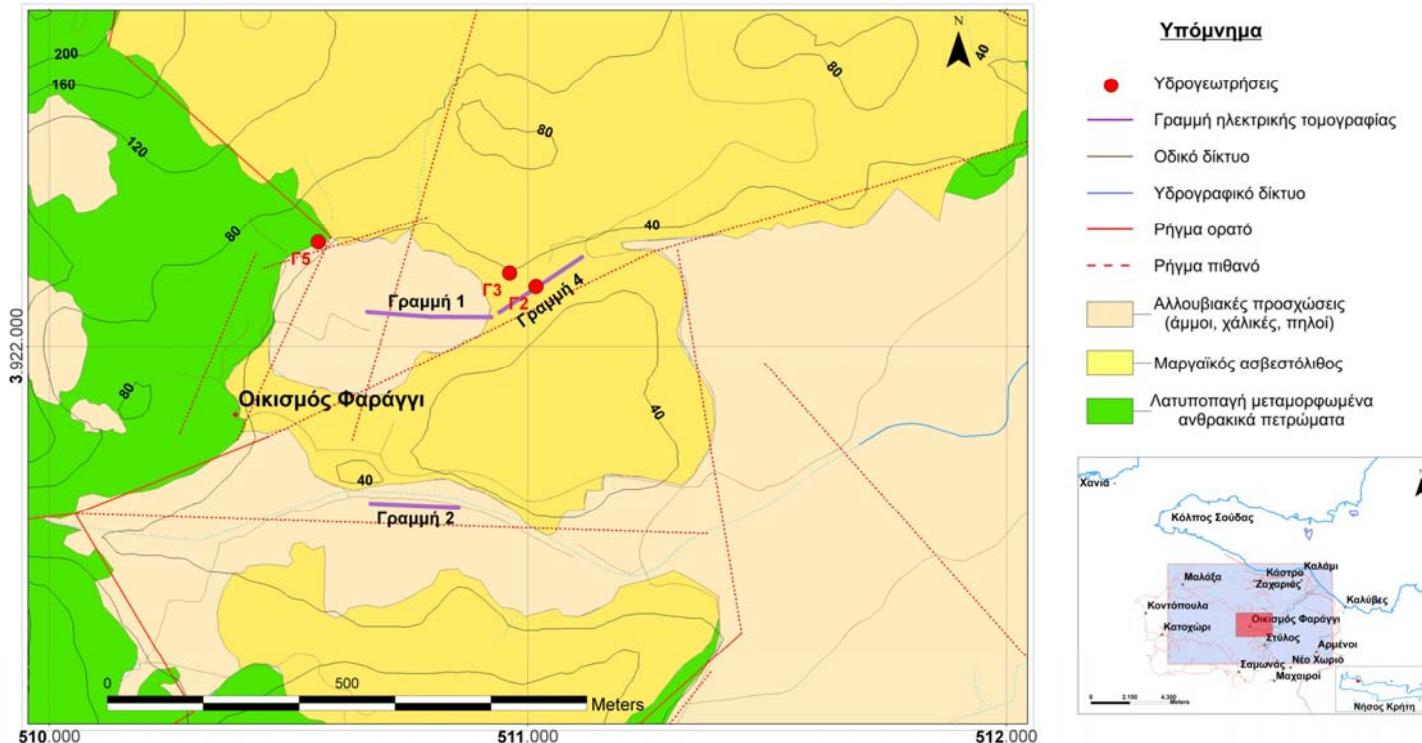
3.5 Μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή έρευνας

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται 4 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας (σχήμα 3.4 και 3.5). Η γραμμή 1 βρίσκεται στο εσωτερικό πόλγης που βρίσκεται Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι. Στη γραμμή 2 νοτιότερα οι μετρήσεις της πραγματοποιήθηκαν σε 2 διακριτές χρονικές περιόδους. Οι θέσεις των γραμμών 1 και 2 και 4 προβάλλονται στον χάρτη 3.1. Η γραμμή 3 βρίσκεται παράλληλα κοντά στην ακτογραμμή κοντά στην υφάλμυρη πηγή Π3. Η θέση της γραμμής 3 προβάλλεται στο σχήμα 3.5.

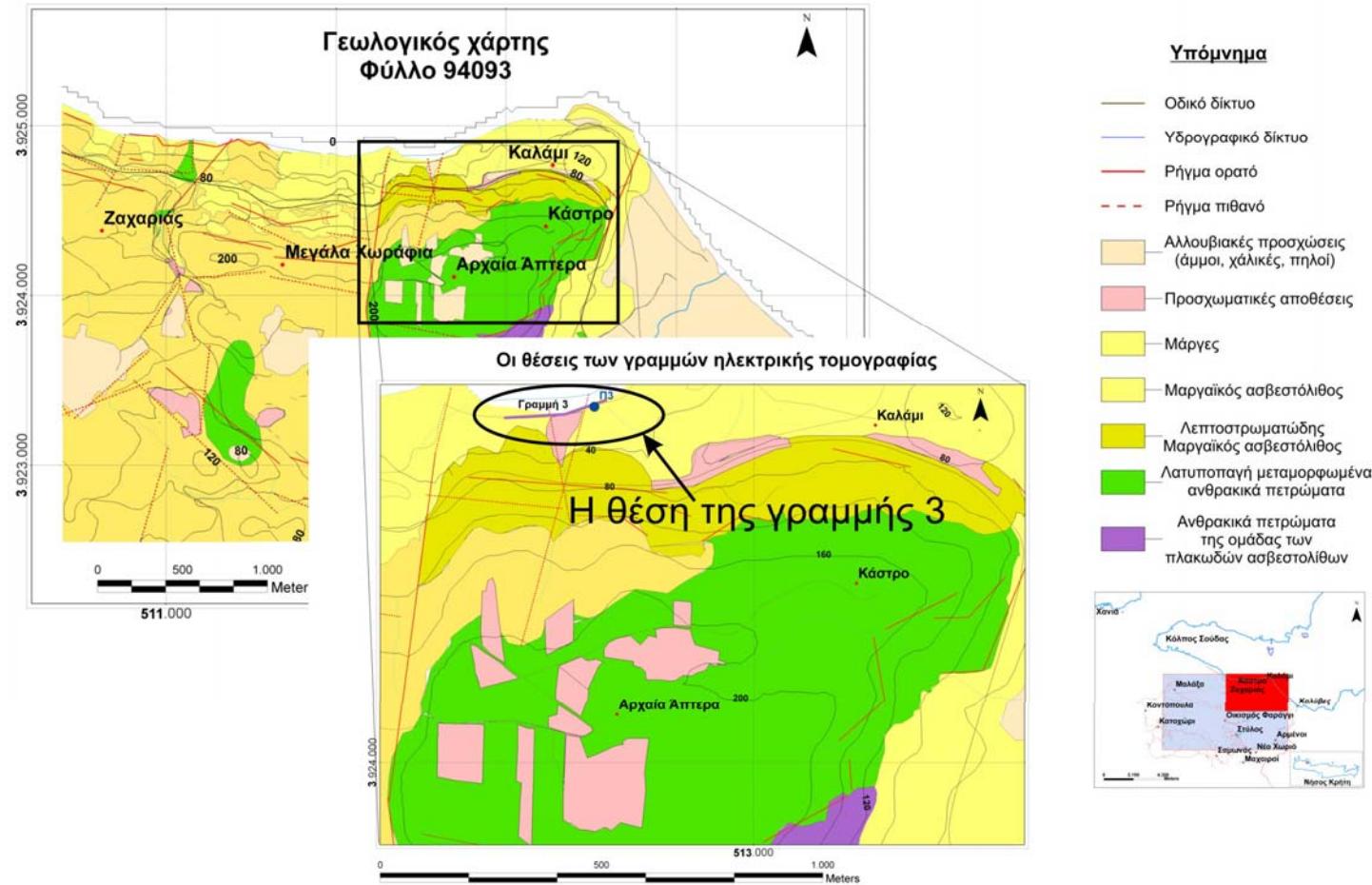
Η συλλογή των δεδομένων έγινε με τη διάταξη Wenner – Schlumberger. Η διάταξη αυτή παρέχει καλή αναλογία σήματος / θορύβου, ενώ δίδει καλύτερη εικόνα για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Αποτελεί συνδυασμό των διατάξεων Wenner και Schlumberger (σχήμα 3.6). Τα ηλεκτρόδια έχουν τοποθετηθεί σε ευθεία γραμμή. Στην πρώτη μέτρηση ($n = 1$) τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (M, N) απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , ενώ τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (A, B), απέχουν απόσταση $3a$ (απόσταση α εκατέρωθεν του μήκους MN το οποίο προσδιορίζεται από τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια δυναμικού) ακολουθώντας δηλαδή τη διάταξη Wenner. Από την επόμενη μέτρηση ($n = 2$) απομακρύνονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος πάνω στην ίδια ευθεία κατά $2a$ (επιπλέον απόσταση α εκατέρωθεν του μήκους MN), η μεταξύ τους απόσταση έχει γίνει $5a$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Συνεχίζοντας με την ίδια διαδικασία η διάταξη σταδιακά εξελίσσεται σε Schlumberger.

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

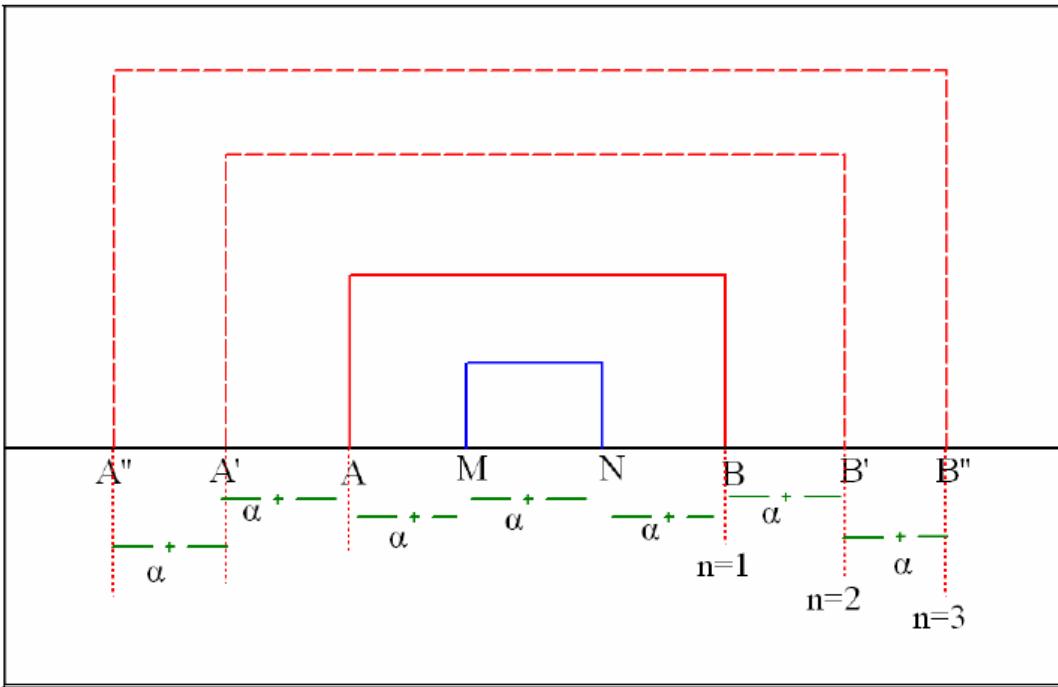
Οι θέσεις των γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας



Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία



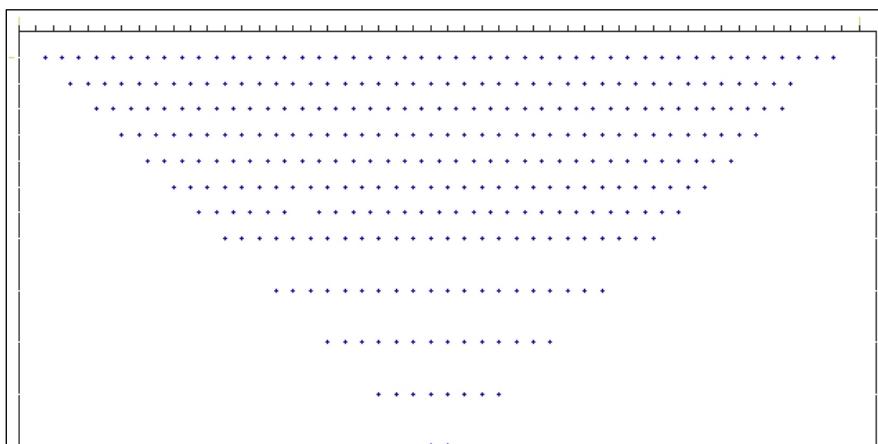
Σχήμα 3.5 Η θέση της γραμμής 3 ηλεκτρικής τομογραφίας στην παράκτια θέση όπου αναβλύζει η νφάλμυρη πηγή Π3 σε απόσπασμα τον λεπτομερές γεωλογικό χάρτη της περιοχής.



Σχήμα 3.6 Διάταξη Wenner – Schlumberger

Οι τιμές των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο ύπαιθρο με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας αντιστοιχούν σε τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Το σχήμα 3.7 αποδίδει την διάταξη των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε τομή του υπεδάφους (ψευδοτομή).

Το επόμενο στάδιο των εργασιών ήταν ο υπολογισμός των τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, από τις τιμές της φαινόμενης και ο προσδιορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους.



Σχήμα 3.7 Σχηματική απεικόνιση των μετρήσεων σε τομή του υπεδάφους (ψευδοτομή)

Ο προσδιορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού πακέτου RES2DINV (version 3.55). Το λογισμικό αυτό πρόγραμμα χωρίζει το υπέδαφος σε ένα πλήθος παραλληλογράμμων, ενώ για κάθε ένα από αυτά θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Στη συνέχεια θέτοντας ορισμένη τιμή για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση συνθέτει ένα αρχικό μοντέλο για το οποίο υπολογίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και τις συγκρίνει με τις τιμές της που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο. Ακολουθούν διαδοχικές επαναλήψεις της διαδικασίας με διαφορετικές τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκρίνοντας τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίζονται από το λογισμικό με αυτές που μετρήθηκαν. Με την διαδικασία αυτή το σφάλμα των τιμών που υπολογίζει το λογισμικό σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν μειώνεται συνεχώς. Όταν η επαναληπτική αυτή διαδικασία παρουσιάσει σύγκλιση, δηλαδή επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα, επιλέγεται το μοντέλο αυτό με το μικρότερο σφάλμα.

Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των δεδομένων είναι η σύνθεση 3 εικόνων στις οποίες αποδίδεται σε τομή η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με χρωματική κλίμακα. Η πρώτη εικόνα έχει δημιουργηθεί από τις τιμές της μετρούμενης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο ύπαιθρο, η δεύτερη από τις τιμές της που υπολογίστηκαν από το λογισμικό, ενώ η τελευταία παρουσιάζει την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, δηλαδή την γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους (Σχήματα 3.8 – 3.11).

Το σύνολο των διαθέσιμων πληροφοριών (γεωλογία - τεκτονική, υδρογεωλογία) για την περιοχή που πραγματοποιήθηκε η ηλεκτρική τομογραφία αξιολογούνται για την ερμηνεία της γεωηλεκτρικής δομής και τον προσδιορισμό της δομής του υπεδάφους.

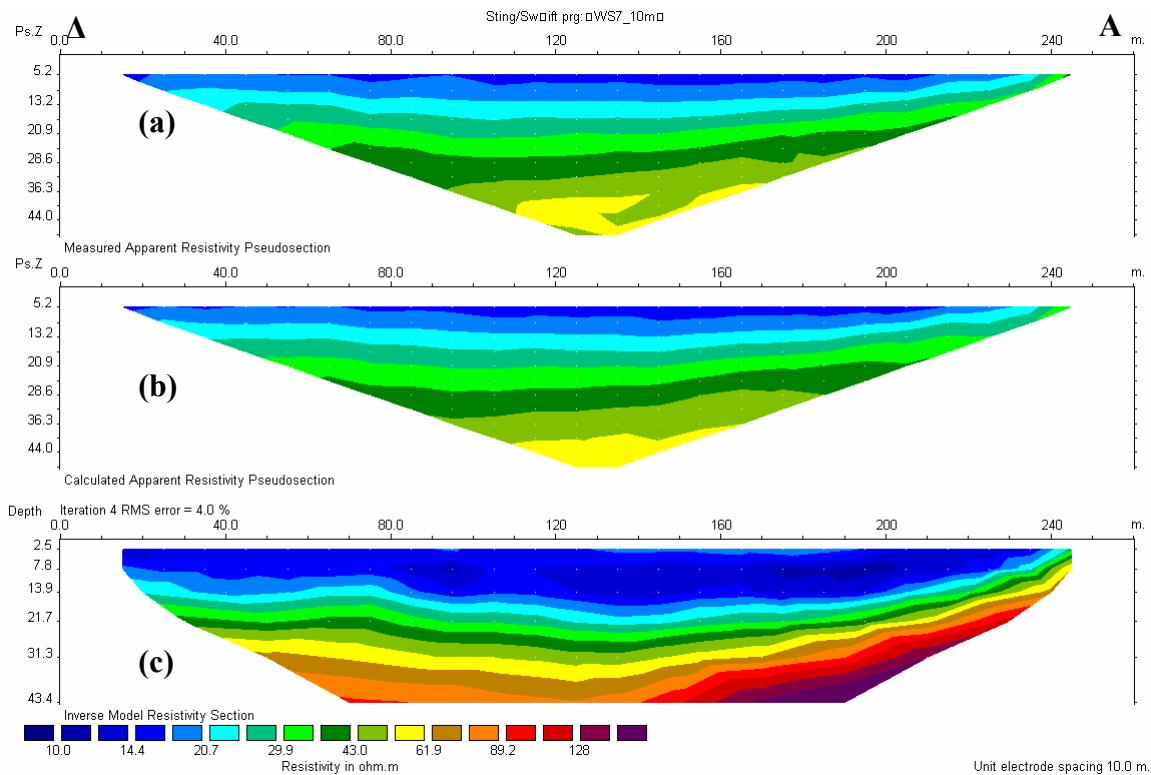
3.6 Αποτελέσματα - ερμηνεία

3.6.1 Ηλεκτρική τομογραφία - Γραμμή 1 (μέσα στην πόλη)

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από την ηλεκτρική τομογραφία (γραμμή 1) με διάταξη Wenner - Schlumberger. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2006 μέσα στην πόλη που βρίσκεται Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι. Η διεύθυνση της

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

τομογραφίας είναι $\Delta - A$ (σχήμα 3.4). Χρησιμοποιήθηκαν 27 ηλεκτρόδια με μεταξύ τους απόσταση $a = 10m$ (συνολικό μήκος γραμμής 260m).



Σχήμα 3.8 Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 1). (a), (b) ψευδοτομές των μετρούμενων, υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντίστοιχα, (c) γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μετά από αντιστροφή. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων είναι η Wenner – Schlumberger.

Διακρίνονται δύο γεωηλεκτρικά στρώματα:

- Το ανώτερο γεωηλεκτρικό στρώμα παρουσιάζει τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 10 έως 25 Ohm.m. Το πάχος του εκτιμάται στα 15m, ενώ μειώνεται σημαντικά στα Ανατολικά της τομογραφίας (<5m).
- Το κατώτερο γεωηλεκτρικό στρώμα παρουσιάζει τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 100 έως 200 Ohm.m.

Από τα αποτελέσματα της γεωλογικής χαρτογράφησης και την αξιολόγηση του συνόλου των διαθέσιμων πληροφοριών για την ευρύτερη περιοχή της πόλης

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

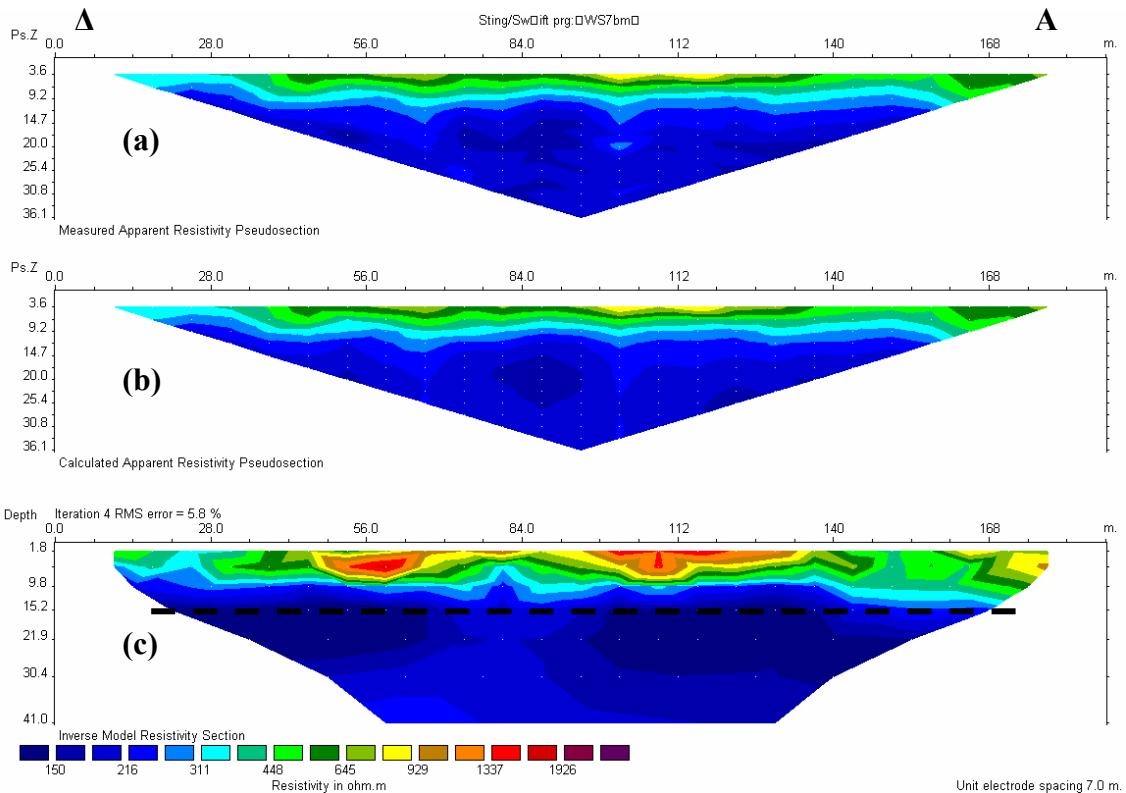
(δελτία απογραφής γεωτρήσεων, πιεζόμετρικές συνθήκες, υδρογεωλογικό καθεστός) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το ανώτερο γεωηλεκτρικό στρώμα αποδίδεται στις προσχωματικές αποθέσεις (χάλικες, πηλοί, άργιλοι) που παρατηρούνται επιφανειακά μέσα στην πόλη. Οι χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζει το στρώμα των προσχωματικών αποθέσεων οφείλονται στον κορεσμό του στρώματος σε νερό.
- Το πάχος των αποθέσεων στην θέση της τομογραφίας εκτιμάται στα 15m. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4 η γραμμή 1 ηλεκτρικής τομογραφίας έχει πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της λεκάνης που έχει διαμορφωθεί επιφανειακά στην θέση της πόλης και σταματά στο τέλος της λεκάνης στα Ανατολικά.
- Το κατώτερο γεωηλεκτρικό στρώμα αποδίδεται στα λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα που απαντούν επιφανειακά στην ευρύτερη περιοχή της πόλης και αναμένεται η πιθανή συνέχειά τους κάτω από το στρώμα των προσχωματικών αποθέσεων. Ο σχηματισμός είναι κορεσμένος σε νερό, γεγονός που δικαιολογεί τις χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτουν για αυτόν από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Από την επιφανειακή εκδήλωση του σχηματισμού στην ευρύτερη περιοχή διαπιστώνεται ο έντονος βαθμός καρστικής διάλυσης στο σώμα του, ενώ η υδροφορία του στο βάθος αυτό τεκμηριώνεται από την στάθμη (πιεζόμετρικές συνθήκες) του καρστικού υδροφόρου στην περιοχή.

Παρατήρηση: Από μετρήσεις στάθμης στις υδρογεωτρήσεις Γ2, Γ3 στην περιοχή της πόλης η απόλυτη στάθμη του καρστικού υδροφόρου ήταν ~10,2m την περίοδο των μετρήσεων.

3.6.2 Ηλεκτρική τομογραφία-Γραμμή 2 (Νότια της πόλης)

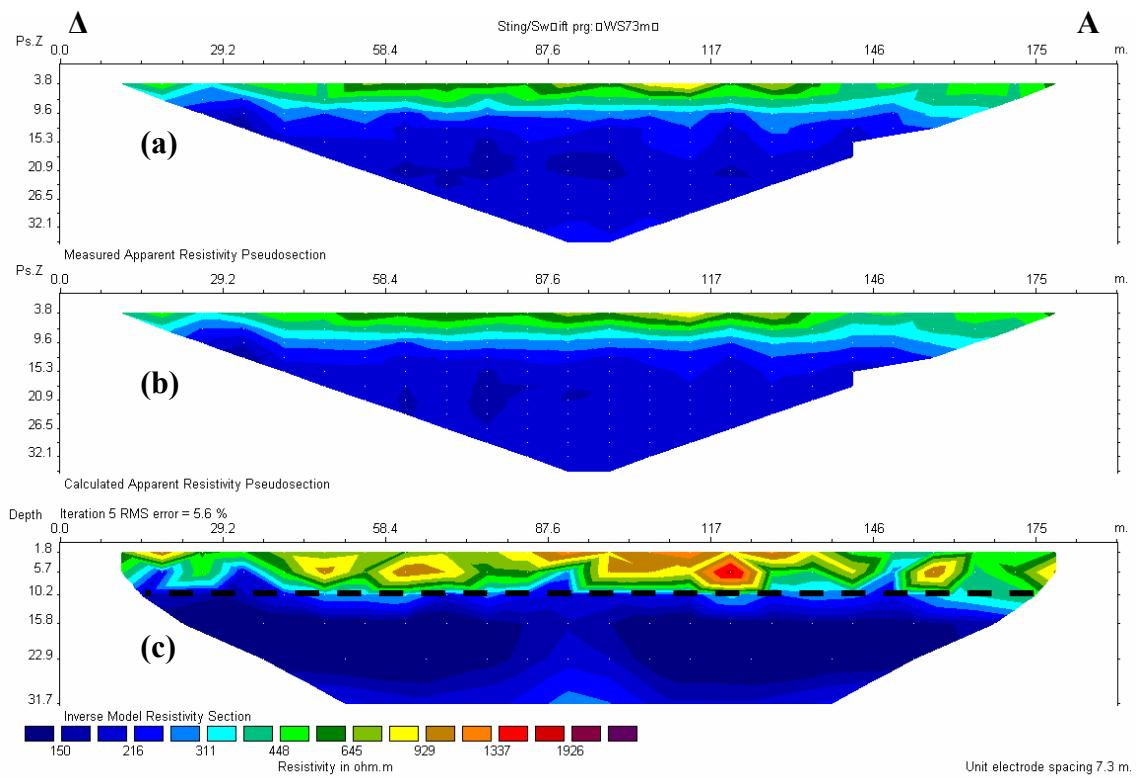
Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας 2 πραγματοποιήθηκε 200m περίπου Νοτιοανατολικά της πόλης του οικισμού Φαράγγι. Η διεύθυνση της γραμμής είναι Δ - Α, ενώ για την συλλογή των δεδομένων επιλέχτηκε η διάταξη Wenner – Schlumberger.



Σχήμα 3.9 Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 2). (a), (b) ψευδοτομές των μετρούμενων, υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντίστοιχα, (c) γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μετά από αντιστροφή. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή δείχνει την στάθμη της επιφάνειας του υδροφόρου την περίοδο των μετρήσεων (Ιούλιος 2005).

Στα σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από την ηλεκτρική τομογραφία (γραμμή 2) σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η διεξαγωγή των μετρήσεων σε δύο διακριτές χρονικές περιόδους αποσκοπούσε στην σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την χρονική διακύμανση της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου στην περιοχή.

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία



Σχήμα 3.10 Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 1). (a), (b) ψευδοτομές των μετρούμενων, υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντίστοιχα, (c) γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μετά από αντιστροφή. Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή δείχνει την στάθμη της επιφάνειας του υδροφόρου την περίοδο των μετρήσεων (Μάρτιος 2006).

Η πρώτη φάση των μετρήσεων (σχήμα 3.9) πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2005. Χρησιμοποιήθηκαν 28 ηλεκτρόδια. Η μεταξύ τους απόσταση ήταν $\alpha = 7\text{m}$ (συνολικό μήκος γραμμής 189m).

Η δεύτερη φάση των μετρήσεων (σχήμα 3.10) πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο του 2006. Χρησιμοποιήθηκαν 27 ηλεκτρόδια. Η μεταξύ τους απόσταση ήταν $\alpha = 7.3\text{m}$ (συνολικό μήκος γραμμής 189,8m).

Από την γενική εικόνα των αποτελεσμάτων και των δύο μετρήσεων διακρίνονται 2 γεωηλεκτρικά στρώματα:

- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 600 έως 1000 Ohm.m. Διακριτά σώματα του γεωηλεκτρικού στρώματος εμφανίζονται κατά την οριζόντια διεύθυνση (δεν εμφανίζεται συνεχές). Το πάχος του προκύπτει να είναι 8 - 10m, ενώ φαίνεται να αποκτά μεγαλύτερο πάχος (~ 15m) στα Ανατολικά της ηλεκτρικής τομογραφίας.

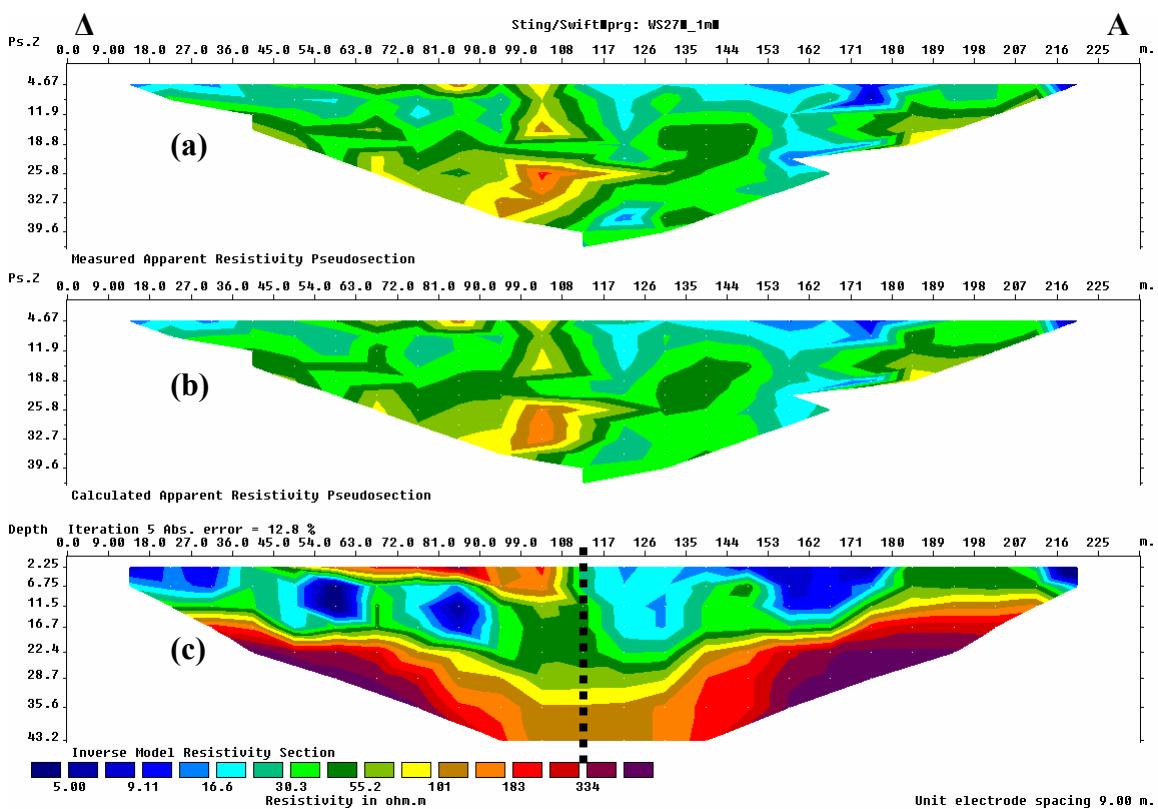
- Ένα υποκείμενο γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 200 – 300 Ohm.m. Εντός του γεωηλεκτρικού αυτού στρώματος παρατηρούνται 2 διακριτά σώματα με χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (100 – 180) Ohm.m.

Από τα αποτελέσματα της γεωλογικής χαρτογράφησης και την αξιολόγηση του συνόλου των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Κάτω από ένα μικρού πάχους στρώμα αλλουβιακών προσχώσεων (χάλικες, πηλοί, άργιλοι), και πλευρικών κορημάτων διακρίνεται ένα στρώμα μαργαϊκού ασβεστολίθου πιθανόν κατακερματισμένου, εκτίμηση που προκύπτει από τις σχετικά μεγάλες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Οι χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζει συνολικά το υποκείμενο γεωηλεκτρικό στρώμα πρέπει να οφείλονται στο γεγονός ότι το έντονα καρστικοποιημένο αυτό στρώμα (μαργαϊκός ασβεστόλιθος) είναι κορεσμένο σε νερό.
- Η παρατήρηση εντός του υποκείμενου γεωηλεκτρικού στρώματος 2 διακριτών σωμάτων με χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, εκτιμάται ότι οφείλονται στην καρστικοποίηση του σχηματισμού. Καρστικά έγκοιλα και μικρές σπηλαιώσεις που παρατηρούνται επιφανειακά στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο αναμένεται να έχουν διαμορφωθεί και σε βαθύτερα στρώματα.
- Το μέσο υψόμετρο της γραμμής στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ~ 25m. Η διάκριση της επιφάνειας του υδροφόρου από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας σε βάθος ~ 10m συμφωνεί με τις γενικές πιεζομετρικές συνθήκες που προσδιορίστηκαν για την περιοχή. Από μετρήσεις στάθμης σε παρακείμενες υδρογεωτρήσεις προκύπτει ότι η απόλυτη στάθμη του υδροφόρου (στην περιοχή των μετρήσεων) τον Ιούλιο του 2005 ήταν ~ 10m, ενώ τον Μάρτιο του 2006 ~ 12m. Η διακριτική ικανότητα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας με την συγκεκριμένη διάταξη (Wenner - Schlumberger, $a = 7m$) δεν ήταν αρκετή για τον εντοπισμό της μεταβολής της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου (~ 2m) για τα διακριτά χρονικά διαστήματα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

3.6.3 Ηλεκτρική τομογραφία-Γραμμή 3 (Πηγή Π3)

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από την ηλεκτρική τομογραφία (γραμμή 3) με την διάταξη Wenner - Schlumberger. Οι μετρήσεις της γραμμής 3 της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν παράλληλα στην ακτογραμμή με γενική διεύθυνση Δ - Α (Σχήμα 3.5) τον Μάρτιο του 2007. Λίγα μέτρα νοτιότερα αναβλύζει η υφάλμυρη πηγή Π3. Χρησιμοποιήθηκαν 27 ηλεκτρόδια με την μεταξύ τους απόσταση να είναι $\alpha = 9\text{m}$ (συνολικό μήκος γραμμής 234m).



Σχήμα 3.11 Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 3). (a), (b) ψευδοτομές των μετρούμενων, υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντίστοιχα, (c) γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μετά από αντιστροφή. Στο μέσο της γεωηλεκτρικής τομής (c) με την μάυρη διακεκομένη γραμμή εκτιμάται η ύπαρξη πιθανού ρήγματος (ζώνης διάρρηξης), όπως προκύπτει από την αξιολόγηση της γεωλογικής πληροφορίας στην θέση όπου πραγματοποιήθηκε η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στην ηλεκτρική τομογραφία διακρίνονται 3 γεωηλεκτρικά στρώματα:

- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα μικρού πάχους παρατηρείται στο Δυτικό τμήμα της γραμμής. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής του αντίστασης κυμαίνονται από 100 έως 300 Ohm.m.

- Ένα γεωηλεκτρικό στρώμα με μικρές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (15 - 55 Ohm.m) με σημαντικές διαφοροποιήσεις στο πάχος του (5 - 20m) διακρίνεται στο σύνολο της τομογραφίας. Μέσα σε αυτό παρατηρούνται διακριτά σώματα με ακόμη μικρότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (< 10 Ohm.m).
- Σε βάθος ~ 15m διακρίνεται γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 150 - 350 Ohm.m. Το στρώμα δεν εμφανίζεται συνεχές κατά την οριζόντια διεύθυνση, αλλά αποτελείται από 2 διακριτά σώματα.

Από την γεωλογική πληροφόρηση και την αξιολόγηση του συνόλου των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Μικρού πάχους αποθέσεις άμμων, χαλικών και πηλών απαντούν επιφανειακά στην παραθαλάσσια περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Το γεωηλεκτρικό στρώμα που διακρίνεται επιφανειακά στο Δυτικό τμήμα της ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 3), εκτιμάται ότι αποτελεί πλευρικά κορήματα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5 στην θέση αυτή η γραμμή τέμνει μικρό ρέμα. Επιφανειακά διακρίνονται πλευρικά κορήματα στην θέση αυτή. Το γεωηλεκτρικό στρώμα που παρατηρείται επιφανειακά στην τομογραφία με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 100 - 300 Ohm.m εκτιμάται ότι αποτελεί την συνεκτικές παρενστρώσεις πιθανώς του Τεταρτογενούς.
- Το γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 15 - 55 Ohm.m εκτιμάται ότι προσδιορίζει τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο (κατά θέσεις εναλλάσσεται με μάργες) που παρατηρείται και επιφανειακά στην ευρύτερη περιοχή. Η γεωηλεκτρική εικόνα του σχηματισμού επηρεάζεται από το θαλασσινό νερό. Ο σχηματισμός βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της στάθμης της θάλασσας, είναι κορεσμένος σε θαλασσινό νερό γεγονός που δικαιολογεί τις μικρές σχετικά τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίστηκαν.
- Το γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 150 - 350 Ohm.m εκτιμάται ότι προσδιορίζει τα λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα. Ο σχηματισμός παρατηρείται επιφανειακά νοτιότερα. Η εκτίμηση είναι σύμφωνη με την στρωματογραφία της περιοχής. Ο

κορεσμός του σχηματισμού σε θαλασσινό νερό δικαιολογεί τις σχετικά μικρές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

- Η διάκριση 2 σωμάτων στο κατώτερο γεωηλεκτρικό στρώμα εκτιμάται ότι οφείλεται στο πιθανό ρήγμα που έχει χαρτογραφηθεί στην περιοχή και σχετίζεται με το ρέμα που προαναφέρθηκε. Η περιοχή στο γεωηλεκτρικό αυτό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\sim 100 \text{ Ohm.m}$ ανάμεσα στα 2 διακριτά μέλη του σχηματισμού (λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα) πιθανόν να προσδιορίζουν την ζώνη διάρρηξης - συνέχεια του ρέματος (πιθανού ρήγματος) στην θέση αυτή.

3.7 Δοκιμαστική άντληση – Ηλεκτρική τομογραφία

3.7.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική άντληση στην υδρογεώτρηση Γ3 (φωτογραφία 3.5.1). Σε μικρή απόσταση από την θέση της υδρογεώτρησης πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική τομογραφία (γραμμή 4) σε 4 διακριτές χρονικές περιόδους. Σκοπός της δοκιμαστικής άντλησης (πέρα από την ποιοτική παρακολούθηση του καρστικού υδροφόρου συστήματος κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της) ήταν η παρακολούθηση (αξιολόγηση) της επίδρασής της στην κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή στα ακόλουθα διακριτά χρονικά διαστήματα:

1. Στις 31/7/2007 (2 εβδομάδες πριν την εκτέλεση της δοκιμαστικής άντλησης)
2. Στις 13/8/2007 (την ημέρα της άντλησης, ~ 10 ώρες από την έναρξη της αντλητικής δοκιμής)
3. Στις 14/8/2007 (24 ώρες αφού η δοκιμή είχε ολοκληρωθεί)
4. Στις 24/8/2007 (10 ημέρες αργότερα)



Φωτογραφία 3.1



Φωτογραφία 3.2



Φωτογραφία 3.3



Φωτογραφία 3.4

3.7.2 Δοκιμαστική άντληση

Κατά τη διάρκεια των ερευνητικών εργασιών πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική αντλήση σε υφιστάμενη υδρογεώτρηση (Γ3) στην πόλη που βρίσκεται Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι. Η γεώτρηση εκτελέστηκε το 1981 από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ (Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης) για την εκμετάλλευση του καρστικού υδροφόρου. Από τότε παραμένει ανενεργή έπειτα από την διαπίστωση του φαινομένου της υφαλμύρινσης στην περιοχή. Η αντλητική δοκιμασία είχε αρχικά προγραμματιστεί για την υδρογεώτρηση Γ2 αλλά τεχνικές δυσκολίες δεν επέτρεψαν την εκτέλεση της δοκιμασίας σε αυτή. Οι υδρογεωτρήσεις Γ2 και Γ5 που αποτυπώνονται στον χάρτη είχαν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια του ίδιου γεωτρητικού - ερευνητικού προγράμματος του Ο.Α.ΔΥ.Κ. (1981-1982).

Σκοπός της δοκιμαστικής άντλησης ήταν ο προσδιορισμός της ποιοτικής συμπεριφοράς του καρστικού υδροφόρου συστήματος. Η δοκιμαστική άντληση πραγματοποιήθηκε με σταθερή παροχή ($Q = \sim 135\text{m}^3/\text{h}$) για χρονικό διάστημα 12hrs.

Πέρα από την παρακολούθηση της στάθμης η οποία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα ($\sim 30\text{sec}$) σταθεροποιήθηκε (πτώση στάθμης, $\Delta s = \sim 0,55\text{m}$), σε διακριτά

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

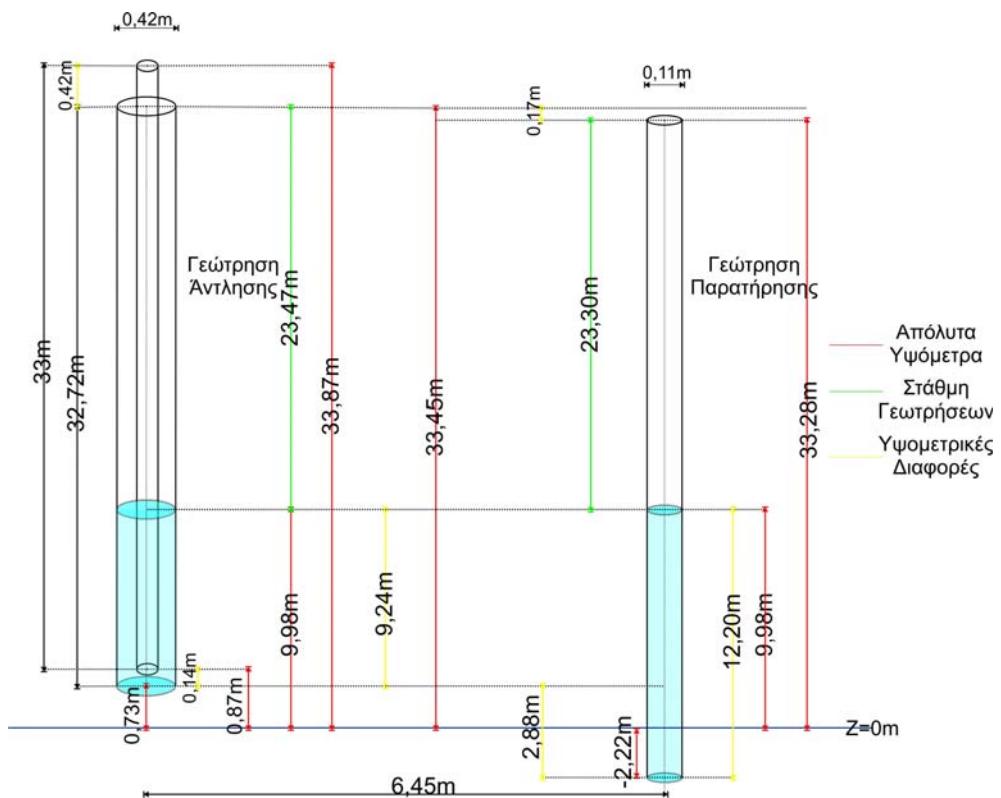
χρονικά διάστηματα λάμβαναν χώρα μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και της συγκέντρωσης των Cl^- (ppm). Συχνές μετρήσεις στην παροχή άντλησης $Q(\text{m}^3/\text{h})$ πραγματοποιήθηκαν για την διατήρηση-ρύθμιση της παροχής άντλησης σε σταθερή (φωτογραφία 3.3). Η θερμοκρασία (T) και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) μετρήθηκαν με φορητό θερμόμετρο/αγωγιμόμετρο. Όλες οι τιμές της E.C. αναφέρονται στην θερμοκρασία των 25°C . Το pH μετρήθηκε με την ποτενσιομετρική μέθοδο, σε φορητό pH - μετρο .

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των Cl^- (ppm), πραγματοποιήθηκαν επί τόπου στο ύπαιθρο (φωτογραφία 3.4), με την ογκομετρική μέθοδο AgNO_3 , παράλληλα με την εκτέλεση της δοκιμαστικής άντλησης. Στα διακριτά χρονικά διαστήματα (1^η , 8^η , και 12^η h από την έναρξη της άντλησης) έγινε δειγματοληψία νερού. Στα δείγματα πραγματοποιήθηκε χημική αναλύση στο εργαστήριο χημείας του Ι.Γ.Μ.Ε. Τέλος, έγινε επαλήθευση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων υπαίθρου με αυτά της εργαστηριακής αναλύσης.

Παράλληλα με την εκτέλεση της δοκιμαστικής άντλησης πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερού από την υφάλμυρη πηγή Π3. Η δειγματοληψία του νερού από την Π3 έγινε ενώ ήδη είχε παρέλθει 1h από την έναρξη της άντλησης.

Σε απόσταση 6,45m από την υδρογεώτρηση Γ3 βρίσκεται η γεώτρηση παρατήρησης (φωτογραφία 3.2) στην οποία παράλληλα με τις μετρήσεις στην γεώτρηση άντλησης λάμβαναν χώρα μετρήσεις στάθμης κατά την διάρκεια της αντλητικής δοκιμής.

Οι τιμές της στάθμης της γεώτρησης άντλησης και παρατήρησης πριν την έναρξη της άντλησης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Η σχεδιαστική απεικόνιση της γεώτρησης άντλησης (Γ3) και της γεώτρησης παρατήρησης. Οι τιμές της στάθμης της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πρίν την έναρξη της αντλητικής δοκιμής.

3.7.2.1 Επεξεργασία αντλητικών δεδομένων

Κατά την δοκιμαστική άντληση που εκτελέστηκε στον καρστικό υδροφόρο στην θέση της πόλυγης παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Με την έναρξη της άντλησης (πρώτα δευτερόλεπτα) παρατηρήθηκε ένας απότομος υποβιβασμός της στάθμης της γεώτρησης, της τάξης του 1 m.
- Η πτώση στάθμης αυτή οφείλεται στην άντληση του αποθηκευμένου νερού της γεώτρησης και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του έργου.
- Αμέσως μετά την απότομη πτώση στάθμης ακολούθησε μία ταχύτατη ανύψωση της υδροστατικής επιφάνειας μέχρι το επίπεδο ισορροπίας, η διάρκεια της οποίας ήταν της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παροχή άντλησης δεν επαρκούσε για να προκαλέσει σημαντική πτώση στάθμης στη γεώτρηση.

- Το αποτέλεσμα της άντλησης δεν γίνονταν αισθητό σε απόσταση μεγαλύτερη των μερικών μέτρων (γεώτρηση παρατήρησης) από την αντλούμενη γεώτρηση, γεγονός που μαρτυρά εξαιρετικά μικρή ακτίνα επίδρασης.
- Μετά τη σταθεροποίηση της δυναμικής στάθμης και την 12ωρη παρακολούθηση της ποιοτικής συμπεριφοράς του υδροφόρου, ακολουθησε διακοπή της άντλησης και μέτρηση της στάθμης επαναφοράς. Η επαναφορά της στάθμης στο αρχικό επίπεδο ηρεμίας επήλθε σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, της τάξης των 20 sec.

Για την εκτέλεση σωστών δοκιμαστικών αντλήσεων στον καρστικό υδροφόρο απαιτούνται αντλητικά συγκροτήματα πολύ μεγαλύτερης απόδοσης, κάτι όμως που δεν έγινε εφικτό να πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας έρευνας.

Η κατανομή των δεδομένων της μεταβολής της στάθμης του καρστικού υδροφόρου κατά την διάρκεια της άντλησης δεν επιτρέπουν τον ασφαλή προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων του. Για τον λόγο αυτό οι υδραυλικές παράμετροι του καρστικού υδροφόρου σχηματισμού: *μεταβιβαστικότητα, T* (Transmissivity), *συντελεστής υδροχωρητικότητας* ή *αποθηκευτικότητας, S* (Storativity) και η *υδραυλική αγωγιμότητα* ή *υδροπερατότητα, K* (Hydraulic conductivity) δεν υπολογίζονται στα πλαίσια της παρούσας.

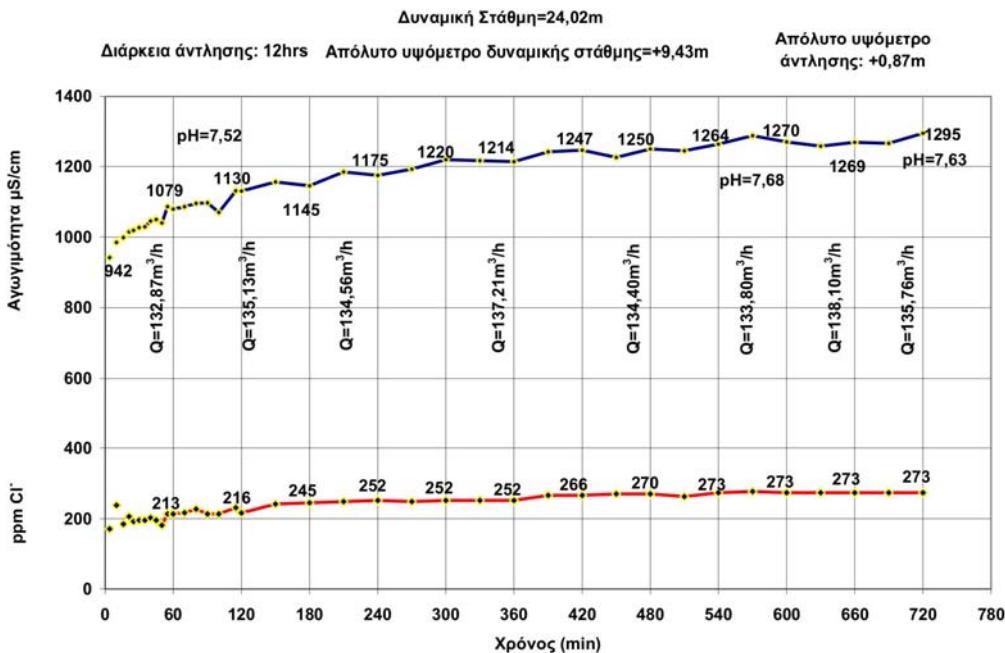
Η επεξεργασία των αντλητικών δεδομένων περιορίζεται στον προσδιορισμό της ποιοτικής συμπεριφοράς του καρστικού συστήματος στην περιοχή της πόλης κατά την διάρκεια της δοκιμαστικής άντλησης, καθώς και στην επίδραση που επέφερε αυτή στις μετρήσεις της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

3.7.2.2 Αποτελέσματα δοκιμαστικής άντλησης

Στο σχήμα 3.13 προβάλλονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αγωγιμότητας E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και της συγκέντρωσης των Cl^- (ppm), στην θέση της υδρογεώτρησης Γ3.

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

**Μεταβολή Αγωγιμότητας (E.C.) και Cl^- (ppm) κατά τη διάρκεια της Άντλησης
($Q \approx 135 \text{ m}^3/\text{h}$, $T \text{ H}_2\text{O} = 17^\circ\text{C}$)**



Σχήμα 3.13 Τα αποτελέσματα της παρακολούθησης της ποιοτικής συμπεριφοράς του καρστικού συστήματος στην θέση της υδρογεώτρησης Γ3, όπου πραγματοποιήθηκε η δοκιμαστική άντληση.

Από την μεταβολή των δύο μεγεθών σε σχέση με τον χρόνο άντλησης διατηρώντας την παροχή άντλησης σταθερή ($Q = \sim 135 \text{ m}^3/\text{h}$), προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

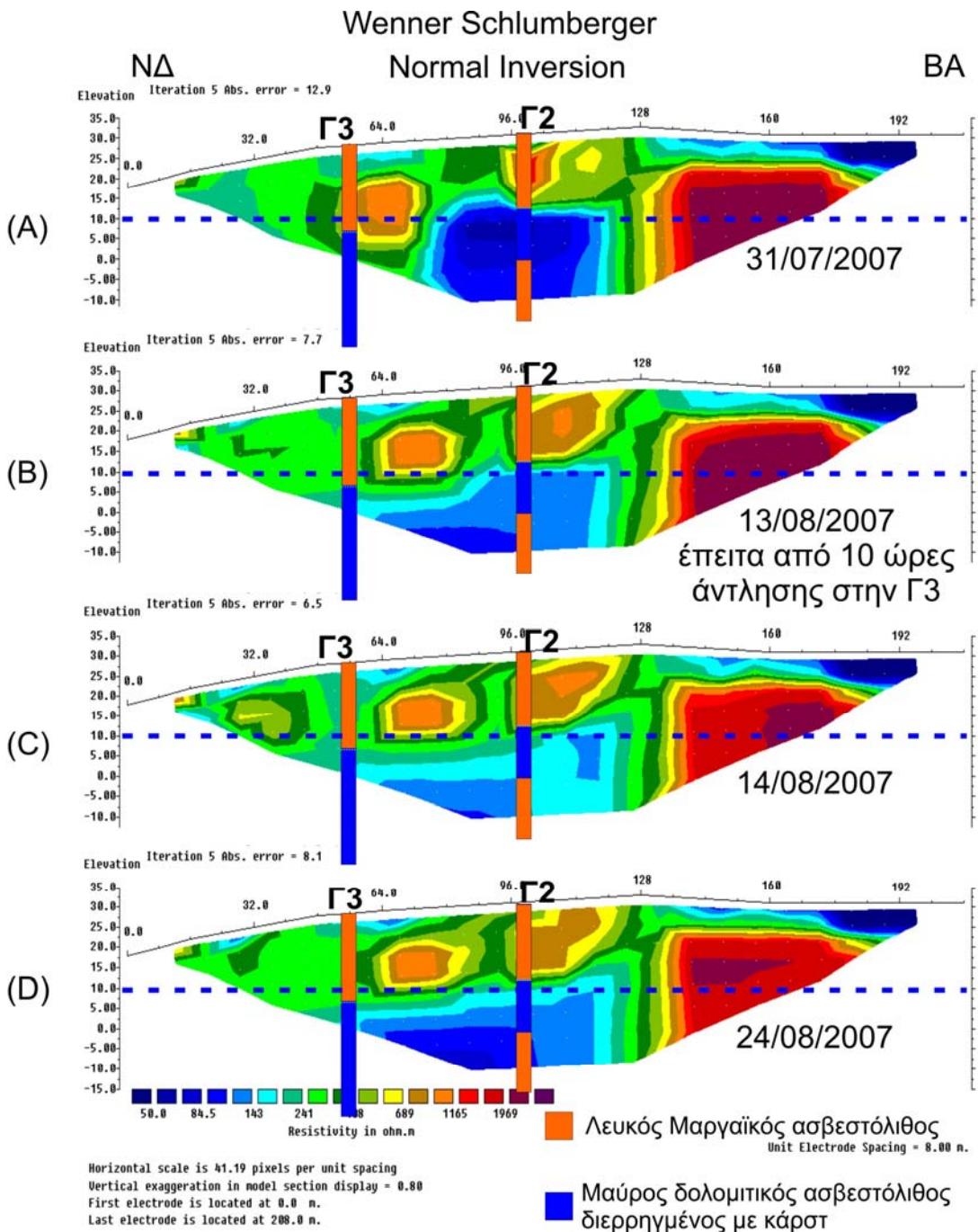
- Από την αρχή της αντλητικής δοκιμής παρατηρείται μία συνεχής αύξηση των τιμών της αγωγιμότητας (E.C.) και των ppm Cl^- στο νερό.
- Έπειτα από την διέλευση χρόνου άντλησης ~ 8 ωρών παρατηρείται η τάση να σταθεροποιηθούν τα δύο μεγέθη. Συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα του νερού τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή $\sim 1270 \mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ τα Cl^- στην τιμή των 273 ppm.
- Επιβεβαιώνεται ο υφάλμυρος υδροχημικός χαρακτήρας του καρστικού συστήματος στην συγκεκριμένη περιοχή.
- Η υφαλμύρινση του καρστικού συστήματος στην περιοχή που πραγματοποιήθηκε η αντλητική δοκιμή οφείλεται στην επίδραση της θάλασσας.

- Η μεταβολή των δύο μεγεθών για την δεδομένη τιμή άντλησης ($Q = \sim 135m^3/h$), δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Συγκεκριμένα, έπειτα από ~ 8 ώρες η αγωγιμότητα του νερού αυξήθηκε ~ 300 $\mu S/cm$, ενώ τα Cl^- του ~ 70ppm.
- Η κατανομή των δεδομένων της μεταβολής της στάθμης του καρστικού υδροφόρου κατά την διάρκεια της άντλησης δεν επέτρεψε τον ασφαλή προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων του.

Παρατήρηση: Το απόλυτο ύψος του κάτω άκρου του αντλητικού συγκροτήματος ήταν +0,87m. Η άντληση πραγματοποιήθηκε σε απόλυτο υψόμετρο μεγαλύτερο της στάθμης της θάλασσας.

3.7.3 Αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας

Στο ακόλουθο σχήμα συνοψίζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους) στα 4 διακριτά χρονικά διαστήματα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, σε περιοχή που γειτνιάζει στην θέση που πραγματοποιήθηκε η αντλητική δοκιμή (γραμμή 4).



Σχήμα 3.14 Η γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους για τους 4 διακριτούς χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας (διάταξη Wenner-Schlumberger). Η μαύρη διακεκομένη γραμμή αντιστοιχεί στην κάθετη προβολή της θέσης της υδρογεώτρησης Γ3 στην γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας (απόσταση ~65m). Οι ψευδοτομές (A), (B), (C) και (D) αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα 4 διακριτά χρονικά διαστήματα. Η γαλάζια οριζόντια διακεκομένη γραμμή δείχνει την στάθμη της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου (~ +10m) την περίοδο της δοκιμής.

Από την σύγκριση των γεωηλεκτρικών τομών στην θέση της γραμμής 4, (Σχήμα 3.14) για τους 4 διακριτούς χρόνους μετρήσεων διακρίνονται τα ακόλουθα:

1. Ένα ανώτερο γεωηλεκτρικό στρώμα με χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 50 - 140 Ohm.m. Η εμφάνιση του δεν είναι συνεχής στο μήκος της γραμμής. Με μεγαλύτερο πάχος παρατηρείται στα Βορειοανατολικά της τομής.
2. Ένα υποκείμενο γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 240 - 400 Ohm.m.
3. Εντός του γεωηλεκτρικού στρώματος (2) διακρίνονται 2 γεωηλεκτρικά σώματα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 700 - 1150 Ohm.m.
4. Στο δεξιό τμήμα του συνόλου των τομών (Βορειοανατολικό τμήμα της γραμμής 4) διακρίνεται γεωηλεκτρικό στρώμα με πολύ μεγάλες τιμές στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση (1200 - 2000 Ohm.m) σε βάθος ~ 5m από την επιφάνεια του εδάφους.
5. Στην θέση της προβολής της υδρογεώτρησης Γ3 στην γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας (διακεκομένη γραμμή στο σχήμα 2) σε βάθος ~ 30m διακρίνεται γεωηλεκτρικό σώμα χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (50 - 140 Ohm.m)

Παρατηρήσεις: Η στάθμη ηρεμίας του καρστικού υδροφόρου την ημέρα της άντλησης στην περιοχή της πόλης ήταν +9,98m. Στην περιοχή που πραγματοποιήθηκε η γραμμή 4 επιφανειακά απαντά μαργαΐκός ασβεστόλιθος. Σπήλαιο μικρού μεγέθους βρίσκεται στο Βόρειο τμήμα της πόλης, γεγονός το οποίο (πέρα από την παρουσία της ίδιας της πόλης) μαρτυρά τον έντονο βαθμό καρστικής διάλυσης στην περιοχή. Προσχωματικές αποθέσεις παρατηρούνται εντός καρστικών εγκοίλων στην ευρύτερη περιοχή. Το Βορειοανατολικό τμήμα της γραμμής βρίσκεται εντός ελαιώνα στον οποίο το πάχος των προσχωματικών αποθέσεων γίνεται μεγαλύτερο.

Έπειτα από την αξιολόγηση του συνόλου των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Το γεωηλεκτρικό στρώμα με τις χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που απαντά επιφανειακά, αποδίδεται στις προσχωματικές αποθέσεις που παρατηρούνται εντός των καρστικών εγκοίλων. Στο Βορειοανατολικό τμήμα της γραμμής οι αποθέσεις αποκτούν μεγαλύτερο πάχος.

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρική τομογραφία – Μετρήσεις – Επεξεργασία - Ερμηνεία

- Το γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 240 - 400 Ohm.m αποδίδεται στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο, ο οποίος απαντά επιφανειακά στην περιοχή που πραγματοποιήθηκε η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας.
- Τα 2 γεωηλεκτρικά σώματα εντός του μαργαϊκού ασβεστολίθου αποδίδονται στην ύπαρξη καρστικών εγκοίλων (πληρωμένων ή μη), όπως εκτιμάται από την συνολική εμφάνιση του σχηματισμού στην ευρύτερη περιοχή. Τα δύο σώματα που εμφανίζονται στις ψευδοτομές βρίσκονται πάνω από την στάθμη του καρστικού υδροφόρου.
- Οι μεγάλες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζει το γεωηλεκτρικό σώμα στα Βορειοανατολικά της γραμμής 4, πιθανόν να οφείλονται είτε στην παρουσία μεγάλου καρστικού εγκοίλου, είτε σε έξαρση του υποκείμενου γεωλογικού στρώματος (λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα).

Από την σύγκριση των 4 ψευδοτομών που προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην γραμμή 4 προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους στην θέση όπου πραγματοποιήθηκε η γραμμή 4 ηλεκτρικής τομογραφίας, έπειτα από την εκτέλεση της αντλητικής δοκιμής στην υδρογεώτρηση Γ3.
- Οι μικρές διαφοροποιήσεις της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους εντάσσονται στα περιθώρια σφάλματος της μεθόδου, τόσο κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους.
- Στις γεωηλεκτρικές τομές (B) και (C) του σχήματος 3.14, παρατηρούνται ενδείξεις μείωσης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στη θέση της υδρογεώτρησης Γ3.

3.7.4 Παρατηρήσεις συμπεράσματα

Από την δοκιμαστική άντληση και την ηλεκτρική τομογραφία προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Για την εκτέλεση σωστών δοκιμαστικών αντλήσεων στον καρστικό υδροφόρο απαιτούνται αντλητικά συγκροτήματα πολύ μεγαλύτερης απόδοσης, κάτι όμως που δεν έγινε εφικτό να πραγματοποιηθεί στα πλαίσια των εργασιών της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.
- Η μικρή απόδοση του αντλητικού συγκροτήματος καθώς και το μικρό σχετικά χρονικό διάστημα που πραγματοποιήθηκε η άντληση, δεν επέφεραν σημαντική διαφοροποίηση στον υδροχημικό χαρακτήρα του καρστικού υδροφόρου στην θέση της δοκιμής. Η επίδραση της αντλητικής δοκιμασίας στον υδροχημικό χαρακτήρα του υπογείου νερού ήταν μικρή, ενώ σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα επήλθε ισορροπία του συστήματος.
- Δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή στην γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους έπειτα από την εκτέλεση της αντλητικής δοκιμής.
- Η θέση που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 4) απέχει από την θέση της υδρογεώτρησης ~ 65m. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μικρή επίδραση που προκάλεσε η αντλητική δοκιμή στον καρστικό υδροφόρο στην θέση της υδρογεώτρησης (ακτίνα επίδρασης της αντλητικής δοκιμής < 6,45m, όπως προέκυψε από μετρήσεις στάθμης στην γεώτρηση παρατήρησης), δεν επέτρεψε σημαντική διαφοροποίηση στην γεωηλεκτρική τομή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή στα πλαίσια της γεωφυσικής διασκόπησης.

4.2 Γεωλογικά στοιχεία

Η υφιστάμενη γεωλογική πληροφορία για την περιοχή συνοψίζεται στα ακόλουθα όπως προκύπτει από τον λεπτομερή γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Κεφάλαιο 2):

- Η τεκτονικά κατώτερη στρωματογραφική ενότητα στην περιοχή είναι τα ανθρακικά πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων
- Η επόμενη στρωματογραφικά ενότητα η οποία έχει και την μεγαλύτερη επιφανειακή εξάπλωση στην περιοχή που δομείται από το αλπικό υπόβαθρο είναι λατυποπαγή μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα πιθανώς της Ενότητας του Τρυπαλίου.
- Η λεκάνη του Νεογενούς έχει δημιουργηθεί από κανονικά ρήγματα που η διεύθυνση τους είναι γενικά BBΔ – NNA.
- Εντός της λεκάνης του Νεογενούς παρατηρείται ευδιάκριτα μια νεότερη λεκάνη πιθανώς του Τεταρτογενούς που έχει δημιουργηθεί από ρήγματα διεύθυνσης BBA – NNΔ (Σχήμα 4.2).
- Υπάρχει άμεση γεωμετρική σχέση με την δημιουργία της λεκάνης του Τεταρτογενούς και την ανύψωση του τεκτονικού κέρατος των Απτέρων.

Παρατήρηση: Σύμφωνα με τα υπάρχοντα στοιχεία η υφαλμύρινση στην περιοχή της πόλης εκτιμάται ότι συσχετίζεται με την παρουσία του ρήγματος (ρηξιγενής ζώνη) διεύθυνσης BBA – NNΔ, που έχει διαμορφώσει την λεκάνη του Τεταρτογενούς. Εκτιμάται ότι η μίξη γλυκού – θαλασσινού νερού ακολουθεί μια επιλεκτική διαδρομή, η οποία διαμορφώνεται από την παρουσία του ρήγματος στην περιοχή.



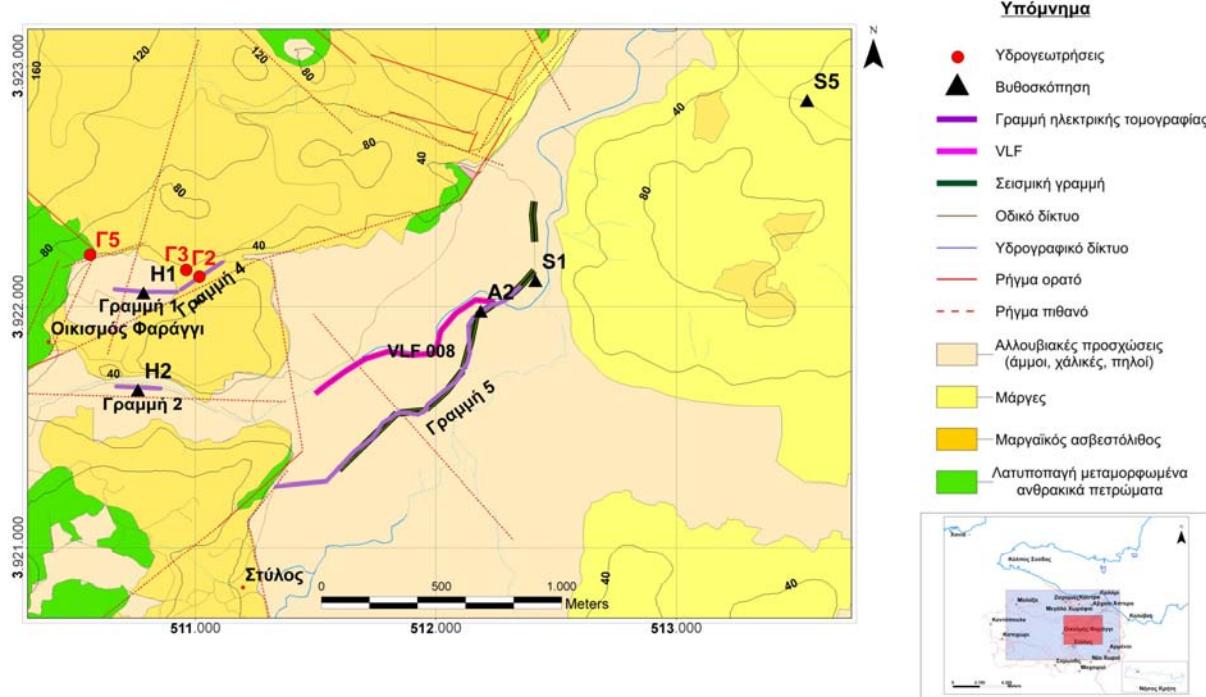
Σχήμα 4.1 Φωτογραφία από την περιοχή έρευνας όπου φαίνεται η λεκάνη του Τεταρτογενούς καθώς και τα ρήγματα διεύθυνσης $BBA - NNA$ (με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) που την έχουν διαμορφώσει

4.3 Γεωφυσική διασκόπηση στην περιοχή έρευνας

Η γεωφυσική διασκόπηση περιελάμβανε τις μεθόδους:

- 1) Σεισμική διάθλαση P & S κυμάτων
- 2) Σεισμική τομογραφία
- 3) Ανάλυση επιφανειακών κυμάτων
- 4) Ηλεκτρική βυθοσκόπηση και τομογραφία
- 5) Ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (VLF)

Η περιοχή η οποία απεικονίζεται στον ακόλουθο χάρτη είναι η ευρύτερη περιοχή της πόλης στα Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι (Βόρεια και Βορειοανατολικά του οικισμού Στύλος). Στον χάρτη απεικονίζεται ένα μέρος από τις θέσεις της γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “Περιβάλλον – Πυθαγόρας II”. Οι γραμμές 1 και 2 ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση των



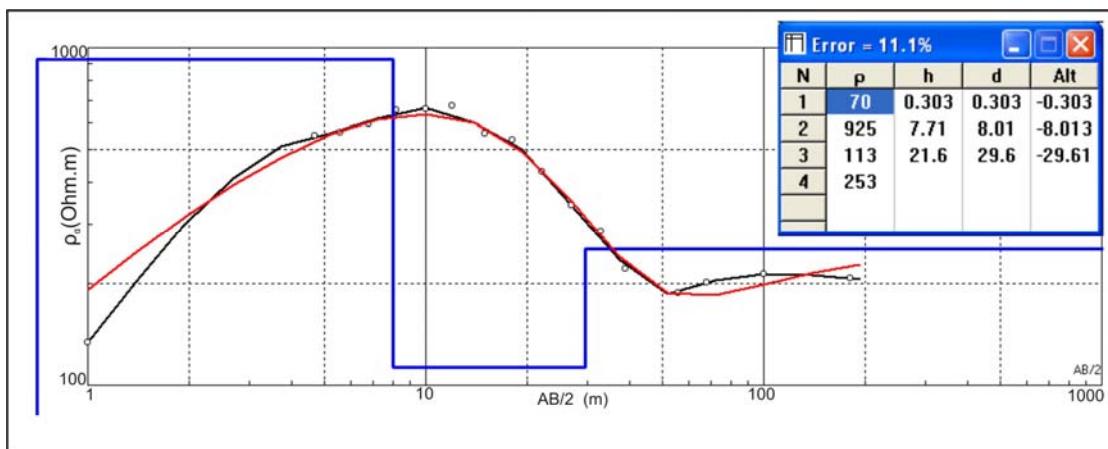
Σχήμα 4.2 Απόσπασμα από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής έρευνας. Η περιοχή η οποία απεικονίζεται στον χάρτη είναι η ευρύτερη περιοχή της πόλης στα Βορειοανατολικά του οικισμού Φαράγγι (Βόρεια και Βορειοανατολικά του οικισμού Στύλος). Στον χάρτη απεικονίζεται ένα μέρος από τις θέσεις της γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “Περιβάλλον – Πυθαγόρας II”. Οι γραμμές 1 και 2 ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση των βυθοσκοπήσεων H1 και H2. Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας 4 πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας (Κεφάλαιο 3, 3.7.1 – 3.7.3). Η γραμμή 5 ηλεκτρικής τομογραφίας βρίσκεται εντός της κοιλάδας του ποταμού Κοιλιάρη. Στην ίδια γραμμή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τις σεισμικής διάθλασης. Σε θέσεις της γραμμής 5 ηλεκτρικής τομογραφίας είχαν προηγηθεί οι ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις A2 και S1. Η θέση της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης S5 βρίσκεται στα Βορειοανατολικά του χάρτη. Τέλος, η όδευση 008 με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF βρίσκεται σχεδόν παράλληλα με κλάδο του ποταμού Κοιλιάρη.

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

βυθοσκοπήσεων H1 και H2. Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας 4 πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας (Κεφάλαιο 3, 3.7.1 – 3.7.3). Η γραμμή 5 ηλεκτρικής τομογραφίας βρίσκεται εντός της κοιλάδας του ποταμού Κοιλιάρη. Στην ίδια γραμμή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τις μεθόδους της σεισμικής διάθλασης. Σε θέσεις της γραμμής 5 ηλεκτρικής τομογραφίας είχαν προηγηθεί οι ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις A2 και S1. Η θέση της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης S5 βρίσκεται στα Βορειοανατολικά του χάρτη. Τέλος, η όδευση 008 με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF βρίσκεται σχεδόν παράλληλα με κλάδο του ποταμού Κοιλιάρη, ενώ πραγματοποιήθηκε από Βορειοανατολικά προς τα Νοτιοδυτικά.

4.4 Μετρήσεις σε διαφορετικές περιόδους

Στα πλαίσια της γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην ίδια θέση σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.



Σχήμα 4.3 Γεωηλεκτρική καμπύλη της βυθοσκόπησης H2. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης, ενώ η γαλάζια στο τελικό γεωηλεκτρικό μοντέλο (ρ : Πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, h πάχος σχηματισμού, d βάθος σχηματισμού), όπως φαίνονται στον πίνακα δεξιά του σχήματος

Αρχικά είχε πραγματοποιηθεί η βυθοσκόπηση H2, Νότια της πόλης του οικισμού Φαράγγι. (Σχήμα 4.3). Η διεύθυνση του αναπτύγματος ήταν Δ – Α, ενώ το μέγιστο ανάπτυγμα 360 m. Τα αποτελέσματα της βυθοσκόπησης H2 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3. όπου παρατηρούνται τέσσερα γεωηλεκτρικά στρώματα:

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

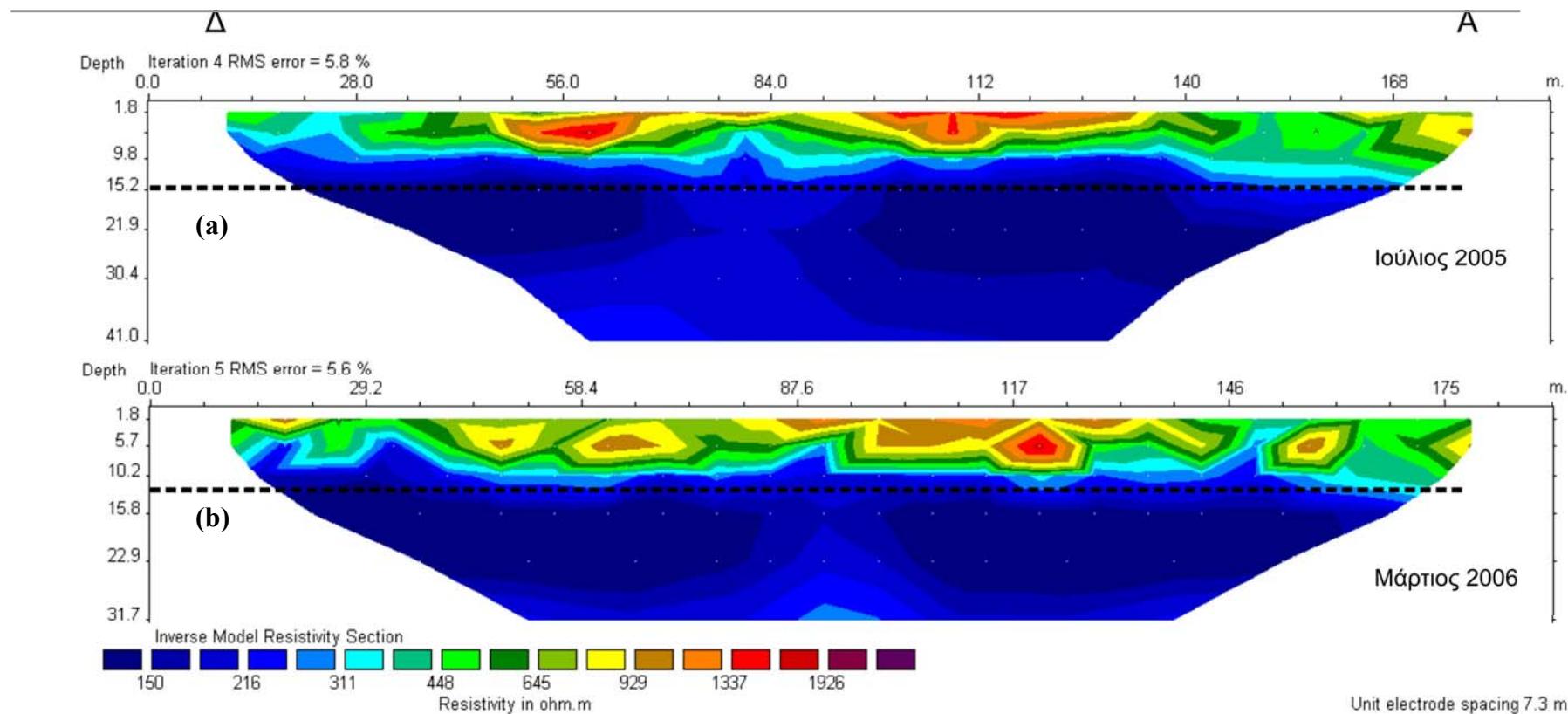
- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα μικρού πάχους (0.5 m) με τιμές τις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στα 70 Ohm.m.
- Ένα δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα πάχους 8 m περίπου, με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στα 925 Ohm.m.
- Το τρίτο γεωηλεκτρικό στρώμα βρίσκεται σε βάθος 8 m περίπου, και έχει πάχος 22 m περίπου. Έχει τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στα 115 Ohm.m.
- Ο τέταρτος γεωηλεκτρικός σχηματισμός βρίσκεται σε βάθος 30 m από την επιφάνεια, και έχει ειδική ηλεκτρική αντίσταση 250 Ohm.m.

Η γραμμή 2 ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε 200 m περίπου Νοτιοανατολικά της πόλης του οικισμού Φαράγγι, κοντά στην θέση της βυθοσκόπησης H2 για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της βυθοσκόπησης (Σχήμα 4.2).

Η εποχική διακύμανση της στάθμης του καρστικού υδροφόρου στην περιοχή (υγρή – ξηρή περίοδος) αποτέλεσε την αφορμή για την επανάληψη των μετρήσεων κατά μήκος της γραμμής 2, με σκοπό την αξιολόγηση της ηλεκτρικής τομογραφίας στη διάκριση της μεταβολής της στάθμης ενός υδροφόρου συστήματος. Έγινε δυνατή η επανάληψη των μετρήσεων στην ίδια γραμμή τον Μάρτιο του 2006 (υγρή περίοδος). Οι πρώτες μετρήσεις είχαν πραγματοποιηθεί τον Ιούλιο του 2005 (ξηρή περίοδος). Στο σχήμα 4.4 προβάλλονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των 2 περιόδων. Η ερμηνεία αυτών των μετρήσεων έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.6.2.

Το μέσο υψόμετρο της γραμμής στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ~ 25m. Η διάκριση της επιφάνειας του υδροφόρου από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας σε βάθος ~ 10m συμφωνεί με τις γενικές πιεζομετρικές συνθήκες που προσδιορίστηκαν για την περιοχή. Από μετρήσεις στάθμης σε παρακείμενες υδρογεωτρήσεις προκύπτει ότι η απόλυτη στάθμη του υδροφόρου (στην περιοχή των μετρήσεων) τον Ιούλιο του 2005 ήταν ~ 10m, ενώ τον Μάρτιο του 2006 ~ 12m. Η διακριτική ικανότητα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας με την συγκεκριμένη διάταξη (Wenner - Schlumberger, $a = 7m$) δεν ήταν αρκετή για τον εντοπισμό της μεταβολής της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου (~ 2m) για τα διακριτά χρονικά διαστήματα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

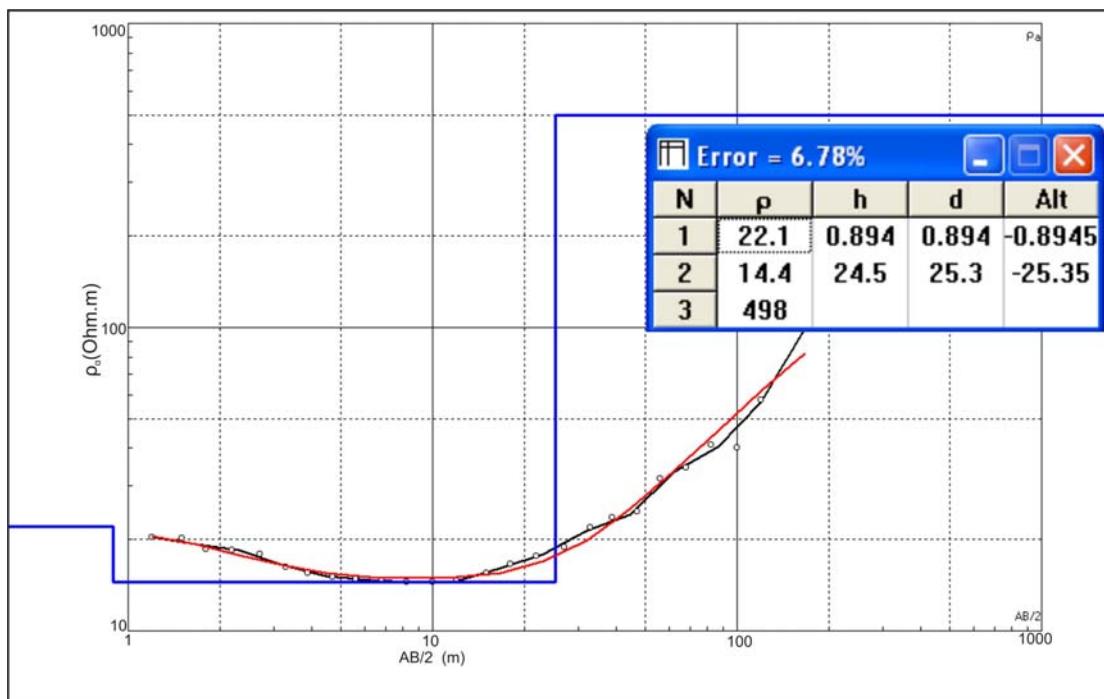
Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 4.4 Γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την γραμμή 2 με διεύθυνση Δ – Α.. Στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η απόσταση από την αρχή της γραμμής ενώ στον κατακόρυφο άξονα το βάθος από την επιφάνεια των εδάφους. Με χρωματική κλίμακα απεικονίζονται οι διάφορες τιμές της ειδικής αντίστασης. Η διακεκομένη οριζόντια μαύρη γραμμή δείχνει την στάθμη του νερού κατά την διάρκεια των μετρήσεων. (a) Γεωηλεκτρική τομή των μετρήσεων του Ιουλίου του 2005, (b) Γεωηλεκτρική τομή των μετρήσεων του Μαρτίου του 2006.

4.5 Απεικόνιση καρστικής δομής.

Η γραμμή 1 ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε μέσα στην πόλη του οικισμού Φαράγγι, κοντά στην θέση της βυθοσκόπησης H1 για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της βυθοσκόπησης (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.5 Γεωηλεκτρική καμπύλη της βυθοσκόπησης H1. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης, και η γαλάζια στο τελικό γεωηλεκτρικό μοντέλο (ρ : Πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, h πάχος σχηματισμού, d βάθος σχηματισμού), όπως φαίνονται στον πίνακα δεξιά του σχήματος.

Η βυθοσκόπηση H1 πραγματοποιήθηκε μέσα στην πόλη του οικισμού Φαράγγι. Η διεύθυνση του αναπτύγματος ήταν ΝΔ – ΒΑ, ενώ το μέγιστο ανάπτυγμα 360 m. Τα αποτελέσματα της βυθοσκόπησης H1 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.5, όπου παρατηρούνται τρία γεωηλεκτρικά στρώματα:

- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα μικρού πάχους (1 m) με τιμές τις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ~ 22 Ohm.m.
- Ένα δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα πάχους 25 m περίπου, με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίσταση ~ 14 Ohm.m.
- Το τελευταίο γεωηλεκτρικό στρώμα βρίσκεται σε βάθος 26 m περίπου, με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ~ 500 Ohm.m.

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

Η διεύθυνση της γραμμής 1 ηλεκτρικής τομογραφίας ήταν Δ - Α, ενώ δύο διάταξεις επιλέχτηκαν για την συλλογή των δεδομένων: Η διάταξη Wenner-Schlumberger και η διάταξη διπόλου - διπόλου.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2006 χρησιμοποιώντας 27 ηλεκτρόδια (απόσταση ηλεκτροδίων $a = 10$ m). Το συνολικό μήκος γραμμής είναι 260 m.

Τα αποτελέσματα των δύο διατάξεων φαίνονται στο σχήμα 4.6 όπου παρατηρούνται δύο γεωηλεκτρικά στρώματα:

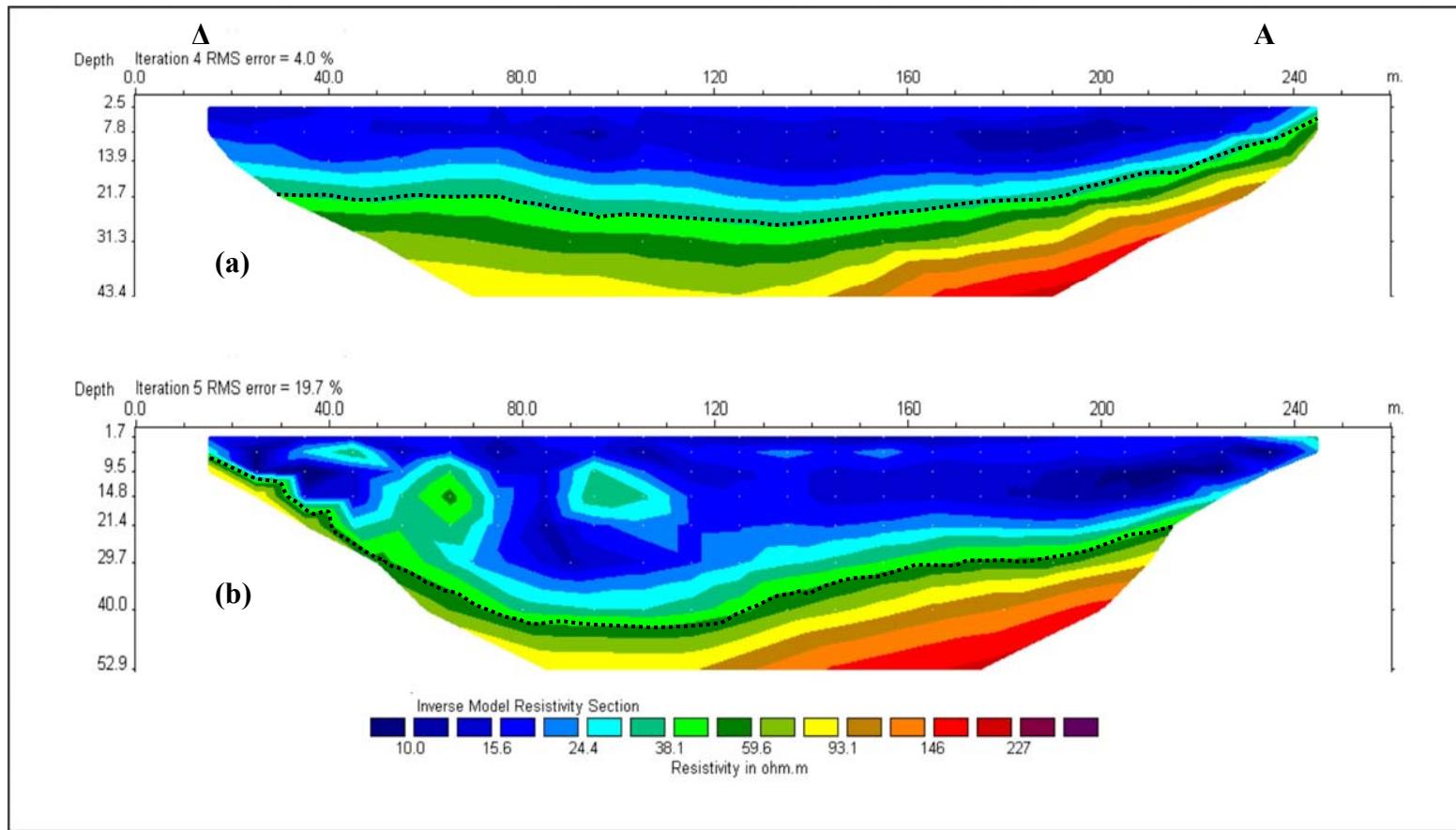
- Ένα γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 10 - 25 Ohm.m. Το πάχος του δεν ξεπερνά τα 15 m ανατολικά της γραμμής μελέτης, φτάνει τα 25 m στο κέντρο της (αν και στην διάταξη διπόλου - διπόλου φτάνει και τα 40 m), ενώ δυτικά της γραμμής μελέτης είναι μικρότερο των 5 m (παρόλο που στην διάταξη διπόλου - διπόλου φτάνει τα 15 m).
- Το δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα έχει τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 100 - 200 Ohm.m.

Παρατηρείται πιο έντονη πλευρική μεταβολή των γεωηλεκτρικών στρωμάτων στην διάταξη διπόλου - διπόλου, γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη ευαισθησία που παρέχει αυτή η διάταξη στις τοπικές ανωμαλίες.

Η ανομοιογένεια του υπεδάφους στην θέση των μετρήσεων (εσωτερικό της πόλης) εκτιμάται σημαντική, εκτίμηση η οποία διαμορφώνεται από την παρουσία καρστικών εγκοίλων, σπηλαιώσεων αλλά και της ίδιας της πόλης στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Τα αποτελεσμάτα των μετρήσεων σε καρστικές δομές με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και την διάταξη διπόλου – διπόλου δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα λόγω της ιδιαιτερότητας των καρστικών δομών (η ανομοιογένεια του υπεδάφους στις καρστικές δομές συνήθως είναι σημαντική), γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από το σημαντικό σφάλμα των μετρήσεων.

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 4.6 Γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την γραμμή 1. Η διεύθυνση της γραμμής είναι Δ – Α.. Στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η απόσταση από την αρχή της γραμμής, ενώ στον κατακόρυφο άξονα το βάθος από την επιφάνεια των εδάφους. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης αποδίδονται με χρωματική κλίμακα, ενώ η διακεκομμένη μαύρη γραμμή δείχνει τα όρια των γεωηλεκτρικών στρωμάτων. (a) Γεωηλεκτρική τομή των μετρήσεων με την διάταξη Wenner - Schlumberger, (b) Γεωηλεκτρική τομή των μετρήσεων με την διάταξη διπόλου - διπόλου.

Η παρουσία του karst στην περιοχή έχει ως αποτέλεσμα το να παρουσιάζεται αυξημένο το σφάλμα των μετρήσεων της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή.

Το σύνολο των γεωηλεκτρικών τομών στην περιοχή έρευνας παρουσιάζει αυξημένο σφάλμα. Τα φαινόμενα της καρστικής διάλυσης στην περιοχή είναι έντονα. Το αυξημένο σφάλμα παρατηρείται, στις τομές :

- μέσα στην πόλη (γραμμή 1, διάταξη Wenner – Schlumberger και διπόλου – διπόλου, Σχήμα 4.6.a και b),
- στο διπλό πείραμα Νότια της πόλης (γραμμή 2, διάταξη Wenner – Schlumberger), τόσο στις μετρήσεις του Ιουλίου του 2005, όσο και στις μετρήσεις του Μαρτίου του 2006,
- στην γραμμή 4 και στις 4 μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα Βορειοανατολικά της πόλης (Κεφάλαιο 3)
- στην γραμμή 5 το σφάλμα των μετρήσεων παρατηρείται ιδιαίτερα αυξημένο 37,8 % (Σχήμα 4.7).

4.6 Γεωφυσική γραμμή μελέτης 5

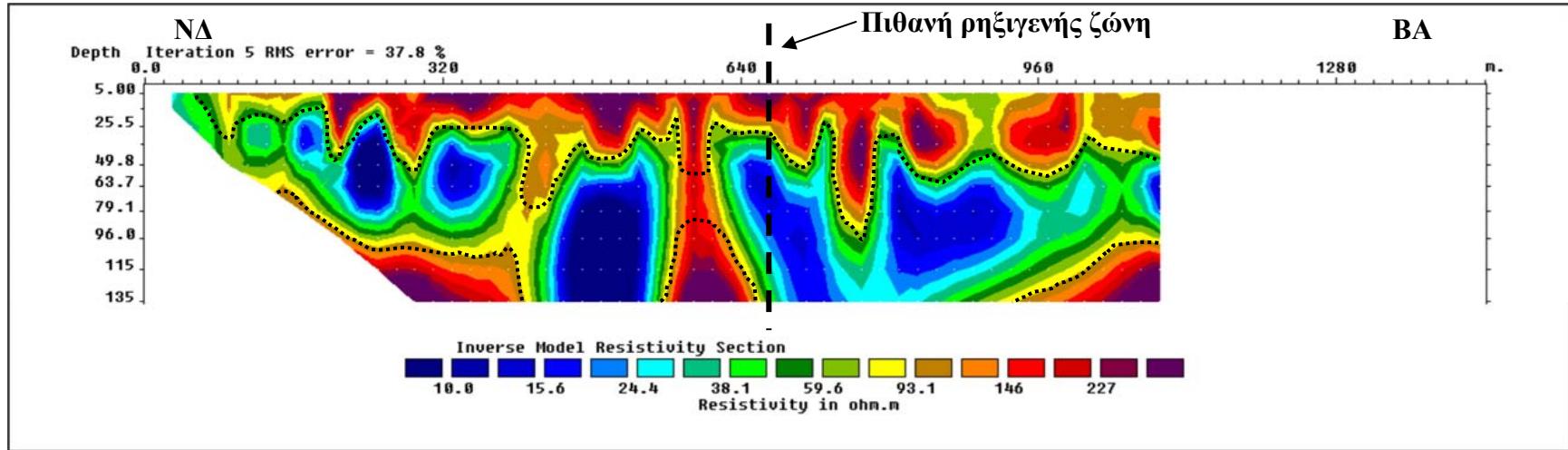
Η γραμμή 5 ηλεκτρικής τομογραφίας βρίσκεται Βόρεια του οικισμού Στύλος (Σχήμα 4.2). Η διεύθυνση της γραμμής μελέτης ήταν ΝΔ προς ΒΑ, ενώ επιλέχτηκε για την συλλογή των δεδομένων η διάταξη Wenner - Schlumberger.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Σεπτέμβριο - Οκτώβριο του 2006, χρησιμοποιώντας 73 ηλεκτρόδια με απόσταση ηλεκτροδίων $\alpha = 20$ m. Το συνολικό μήκος της γραμμής είναι 1440 m.

Η γεωηλεκτρική τομή 5 φαίνεται στο σχήμα 4.7, στην οποία παρατηρούνται τρία γεωηλεκτρικά στρώματα:

- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 100 - 300 Ohm.m. Το στρώμα εμφανίζει έντονη πλευρική ανομοιογένεια, ενώ το πάχος του ποικίλει σημαντικά (25 - 60 m).
- Το δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα εμφανίζει πολύ χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (< 20 Ohm.m), ενώ χαρακτηρίζεται από έντονη πλευρική ανομοιογένεια. Το πάχος του είναι σχετικά μικρό (20 – 30 m), και ενώ φαίνεται να ξεπερνά τα 100 m στο κεντρικό τμήμα της γεωηλεκτρικής τομής, στο τέλος της δεν ξεπερνά τα 50 m.

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 4.7 Γεωηλεκτρική τομή των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την γραμμή 5, με διεύθυνση $N\Delta - BA$, και υψόμετρο από 12 – 20m περίπου. Στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η απόσταση από την αρχή της γραμμής, ενώ στον κατακόρυφο το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Με χρωματική κλίμακα αποδίδονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης. Η διακεκομένη μαύρη γραμμή δείχνει τα όρια των γεωηλεκτρικών στρωμάτων. Γεωηλεκτρική τομή των μετρήσεων με την διάταξη Wenner – Schlumberger. Στα ~600m από την αρχή της γραμμής με την κατακόρυφη μαύρη διακεκομένη γραμμή σημειώνεται θέση πιθανού ρήγματος σε συμφωνία με το χαρτογραφημένο πιθανό ρήγμα που απεικονίζεται στον γεωλογικό χάρτη.

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

- Το τελευταίο γεωηλεκτρικό στρώμα, που εντοπίζεται μόνο στην αρχή και στο τέλος της γραμμής σε βάθος 100 m περίπου από την επιφάνεια, έχει τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 300 – 500 Ohm.m.

Παρατήρηση: Η γεωηλεκτρική τομή απεικονίζει δομή σε μεγαλύτερο βάθος, όπου εμφανίζονται ζώνες χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης. Το σφάλμα των μετρήσεων εμφανίζεται αυξημένο (RMS = 37,8%) γεγονός το οποίο αποδίδεται στην σημαντική ανομοιογένεια της υπεδάφιας δομής στην θέση των μετρήσεων, εκτίμηση η οποία διαμορφώνεται από τις γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής των μετρήσεων.

Στο σχήμα 4.8 απεικονίζονται σε τομή υπέρθεσης τα αποτελέσματα της ενοποιημένης σεισμικής γραμμής (STS1 - 7) που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων με τις μεθόδους της σεισμικής διάθλασης (ταχύτητες με την ένδειξη Vp, διακεκομμένη τεθλασμένη γραμμή), της σεισμικής τομογραφίας (ασπρόμαυρες ισότιμες καμπύλες ταχυτήτων διάδοσης των P - κυμάτων) σε αντιπαράθεση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία.

Αξιολογώντας το σύνολο των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις γεωφυσικής διασκόπησης προκύπτουν τα ακόλουθα :

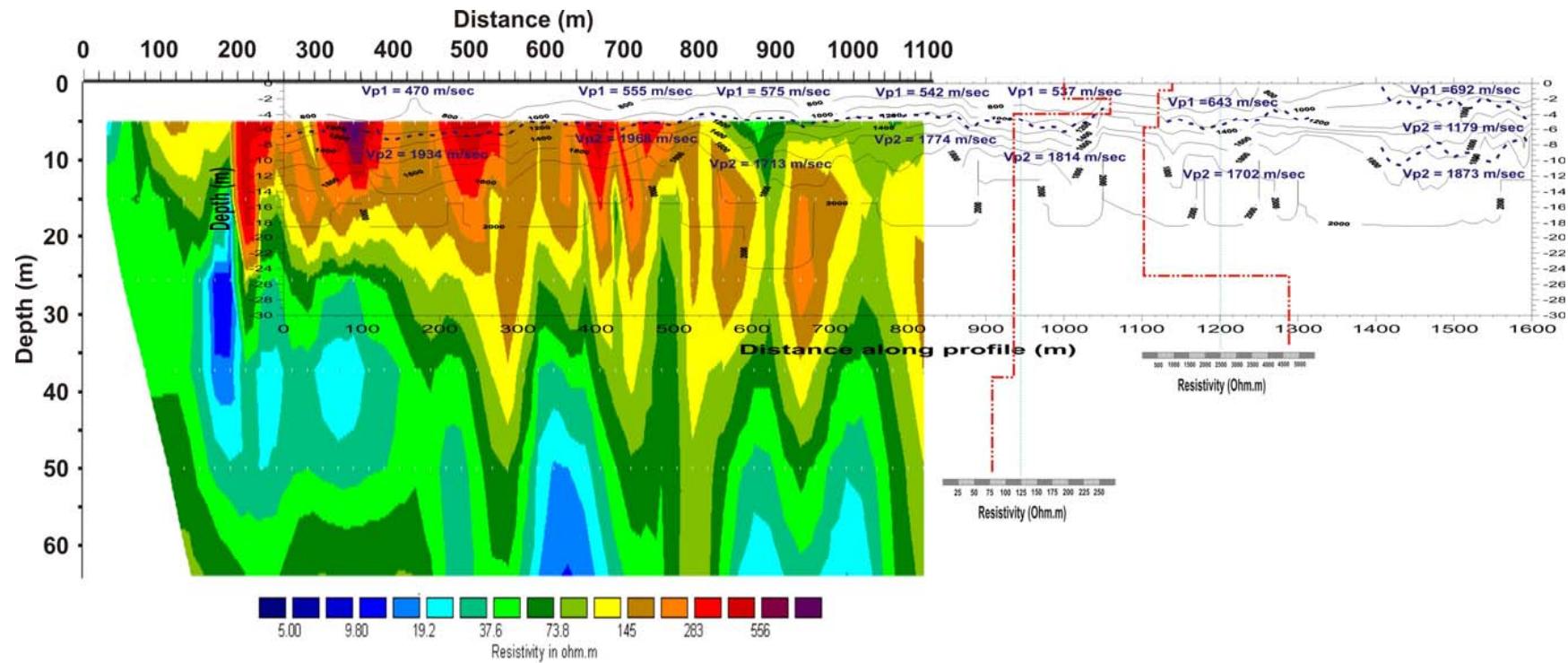
- Επιφανειακά, εντοπίζεται ένα στρώμα με ταχύτητες διάδοσης των P – κυμάτων που κυμαίνονται από 400 έως 1000 m/sec. Το στρώμα αυτό εμφανίζεται να έχει πάχος 5 – 7 m μέχρι τα 1300 m της σεισμικής γραμμής, ενώ στα τελευταία 200 m της σεισμικής γραμμής, το πάχος του δεν υπερβαίνει τα 4 m. Το στρώμα αυτό δεν εμφανίζεται στην ηλεκτρική τομογραφία, εφόσον τα δεδομένα των μετρήσεων της προέρχονται από βάθος μεγαλύτερο των 5 m, λόγω της μεγάλης ισαπόστασης (20 m) των ηλεκτροδίων. Το συγκεκριμένο στρώμα αποδίδεται σε ακόρεστες (λόγω των υψηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων που προέκυψαν από τις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις) αλουβιακές προσχώσεις.
- Στα τελευταία 200 m της σεισμικής γραμμής (1400 m – 1600 m) εμφανίζεται ένα ενδιάμεσο σεισμικό στρώμα με ταχύτητες διάδοσης των P κυμάτων 1000 – 1800 m/sec. Το στρώμα αυτό αποδίδεται σε μάργες του Νεογενούς οι οποίες

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

φαίνεται να αποσφηνώνονται προς τα ΝΔ της περιοχής, εφόσον δεν εμφανίζονται στην υπόλοιπη γραμμή μελέτης.

- Ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος απαντάται κάτω από τις επιφανειακές αλουβιακές προσχώσεις ή τις μάργες του Νεογενούς. Στα Νοτιοδυτικά της περιοχής εμφανίζεται ακόρεστος μέχρι τα 13 – 15 m (αντιστάσεις μεγαλύτερες από 250 Ohm.m), ενώ στα Βορειοανατολικά της περιοχής, σύμφωνα με τις βυθοσκοπήσεις A2 και S1, η ακόρεστη ζώνη εμφανίζεται ρηχότερα (5 – 7 m).
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας, μέσα στον κορεσμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο εμφανίζεται μια ζώνη πολύ χαμηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων (10 – 50 Ohm.m) που πιθανόν να οφείλεται σε έντονα καρστικοποιημένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο με αργιλικές προσμίξεις κορεσμένο σε νερό.
- Στην βυθοσκόπηση S1 απαντάται, κάτω από τη ζώνη χαμηλών ειδικών αντιστάσεων (> 25 m), ένας γεωηλεκτρικός σχηματισμός με υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης (> 4000 Ohm.m), ο οποίος πιθανόν αποδίδεται σε δολομιτικό ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός αυτός απαντάται και στην ηλεκτρική τομογραφία (Σχήμα 4.8) σε βάθη μεγαλύτερα των 90 m.
- Στα ~600m από την αρχή της γραμμής 5 ηλεκτρικής τομογραφίας εκτιμάται η παρουσία πιθανής ρηξιγενής ζώνης σε συμφωνία με το χαρτογραφημένο πιθανό ρήγμα που απεικονίζεται στον γεωλογικό χάρτη.

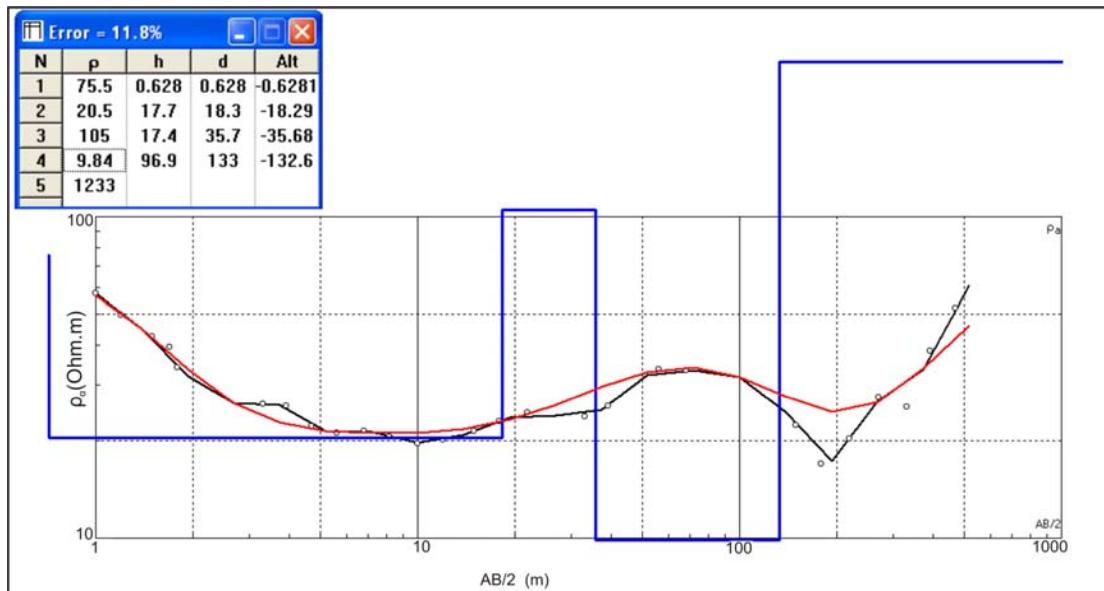
Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 4.8 Υπέρθεση των αποτελεσμάτων της ενοποιημένης σεισμικής γραμμής STS1-7 και της ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 5). Οι ταχύτητες με την ένδειξη V_p , καθώς και η διακεκομμένη τεθλασμένη γραμμή που οριοθετεί την διεπιφάνεια των σεισμικών στρωμάτων, προέκυψαν από την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης. Οι ασπρόμαυρες ισότιμες καμπύλες ταχυτήτων διάδοσης των P -κυμάτων προέκυψαν από την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας ενώ οι έγχρωμες ισότιμες καμπύλες της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία. Η τομή της σεισμικής τομογραφίας έχει τοποθετηθεί στις σωστές συντεταγμένες και με ίδιες αναλογίες της οριζόντιας απόστασης και του βάθους σε σχέση με την ηλεκτρική τομογραφία. Η γραμμή μελέτης βρίσκεται σε υψόμετρο από 12 – 20m περίπου Στα 945 m και τα 1200 m της σεισμικής γραμμής παρατίθενται τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων A2 και S1, αντίστοιχα.

4.7 Η ηλεκτρική βυθοσκόπηση εντοπίζει στρώμα χαμηλής αντίστασης σε απόσταση ~2Km από την ακτογραμμή

Η βυθοσκόπηση S5 πραγματοποιήθηκε στα Βορειοανατολικά της περιοχής έρευνας, (Σχήμα 4.2). Η διεύθυνση του αναπτύγματος ήταν Δ-ΒΔ – Α-ΒΑ, με μέγιστο ανάπτυγμα 1480 m. Τα αποτελέσματα της βυθοσκόπησης S5 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Γεωηλεκτρική καμπύλη της βυθοσκόπησης S5. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης, ενώ η γαλάζια στο τελικό γεωηλεκτρικό μοντέλο (ρ: Πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, h πάχος σχηματισμού, d βάθος σχηματισμού), όπως φαίνονται στον πίνακα αριστερά του σχήματος.

Παρατηρούνται πέντε γεωηλεκτρικά στρώματα:

- Ένα επιφανειακό γεωηλεκτρικό στρώμα μικρού πάχους (0.5 m) με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ~ 75 Ohm.m.
- Ένα δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα πάχους 18 m περίπου, με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ~ 20 Ohm.m.
- Το τρίτο γεωηλεκτρικό στρώμα βρίσκεται σε βάθος 18 m, με πάχος 17 m περίπου. Έχει τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ~ 100 Ohm.m.
- Ο τέταρτος γεωηλεκτρικός σχηματισμός βρίσκεται σε βάθος 36 m από την επιφάνεια, και έχει πολύ χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (~ 10 Ohm.m).

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

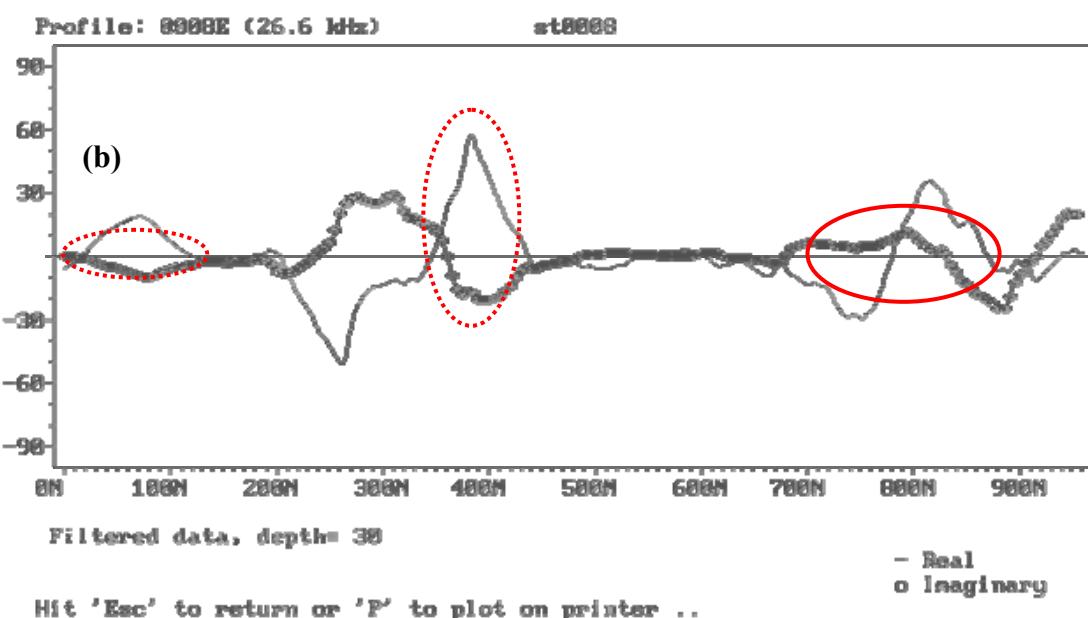
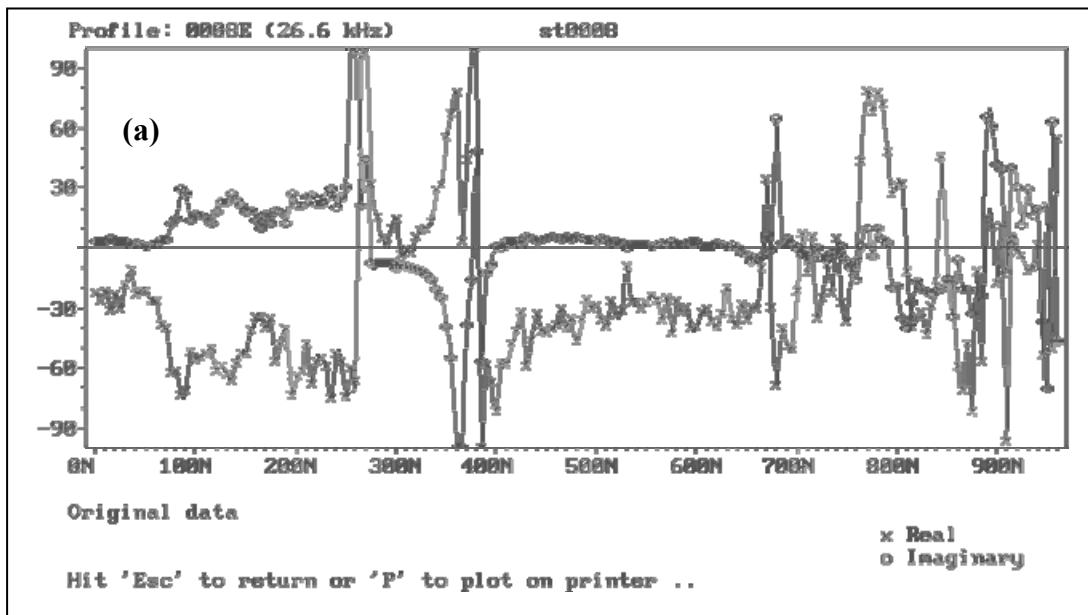
- Τέλος, ο πέμπτος γεωηλεκτρικός σχηματισμός βρίσκεται σε βάθος 133 m από την επιφάνεια, και έχει υψηλές τιμές της ειδική ηλεκτρική αντίσταση (πάνω από 1000 Ohm.m).

Οπως φαίνεται και από τον γεωλογικό χάρτη του σχήματος 4.2, η ηλεκτρική βυθοσκόπηση πραγματοποιήθηκε σε μικρό λόφο (Νοτιοανατολικά του ποταμού Κοιλιάρη), στον οποίο επιφανειακά απαντούν μάργες. Το υποκείμενο γεωηλεκτρικό στρώμα που προσδιορίστηκε με την ηλεκτρική βυθοσκόπηση (πάχους ~18m) εκτιμάται ότι αποτελεί το στρώμα των μαργών κάτω από ένα μικρού πάχους προσχώσεων στην θέση των μετρήσεων. Το γεωηλεκτρικό στρώμα (~ 100Ohm.m) που προσδιορίστηκε να υπόκειται των μαργών αποδίδεται σε μαργαϊκό ασβεστόλιθο, γεγονός που συμφωνεί με την στρωματογραφική ακολουθία των σχηματισμών στην περιοχή. Σημειώνεται το γεγονός ότι μικροεμφανίσεις του μαργαϊκού ασβεστολίθου (εξάρσεις) παρατηρούνται στον ευρύτερο χώρο του λόφου. Στο βάθος των ~36m (επίπεδο στάθμης θάλασσας) ο γεωηλεκτρικός σχηματισμός που προσδιορίστηκε εκτιμάται ότι αποτελεί τον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό (μαργαϊκός ασβεστόλιθος), με την διαφορά ότι το βάθος στο οποίο προσδιορίστηκε το γεωηλεκτρικό στρώμα εκτιμάται ότι είναι κορεσμένο σε νερό. Ο προσδιορισμός - ερμηνεία του γεωηλεκτρικού σχηματισμού που εμφανίζει μεγάλες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (> 1000 Ohm.m) σε βάθος 133m, αποτελεί δύσκολο εγχείρημα. Στην θέση προτείνεται η πραγματοποίηση ηλεκτρικής τομογραφίας για την πληρέστερη αξιολόγηση της υπεδάφιας δομής.

4.8 Ενδείξεις για την ζώνη χαμηλής αντίστασης προκύπτουν και από την χαρτογράφηση με την μέθοδο VLF

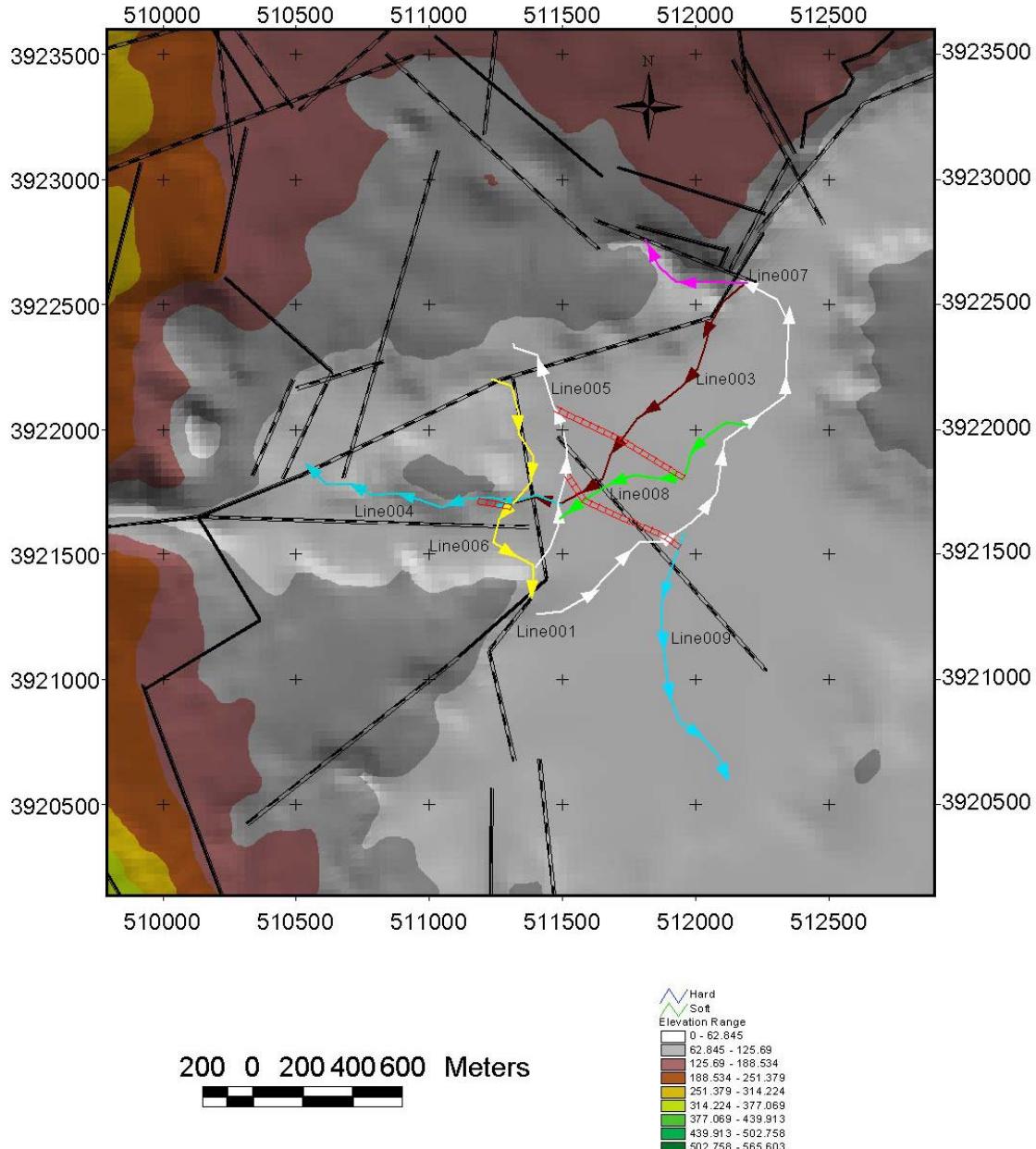
Ενδεικτικά παρουσιάζονται στην συνέχεια τα αποτελέσματα της όδευσης 008 με την ηλεκτρική μέθοδο VLF. Στην όδευση 008 (Σχήματα 4.2 και 4.11) διακρίνεται ανωμαλία στα 800-850 μέτρα περίπου από την αρχή της γραμμής, η οποία συνδέεται με πιθανό ρήγμα (όπως προβάλλεται στον λεπτομερές γεωλογικό χάρτη). Ακόμη παρατηρούνται ανωμαλίες, οι οποίες δεν συνδέονται με κάποια γεωλογική αναφορά σε ρήγμα (περίπου στα 70 και στα 400 μέτρα από την αρχή της γραμμής μελέτης).

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 4.10 Τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF για την όδευση 008. (a) τα δεδομένα πριν την εφαρμογή φίλτρου (b) Τα δεδομένα έπειτα από την εφαρμογή φίλτρου. Η κόκκινη έλλειψη στα δεξιά του γραφήματος δείχνει την θέση της ανωμαλίας η οποία συσχετίζεται με το πιθανό χαρτογραφημένο ρήγμα στην περιοχή. Οι κόκκινες διακεκομμένες ελλείψεις στα αριστερά και στο κέντρο δείχνουν τις ανωμαλίες που προέκυψαν για την περιοχή και πιθανόν να σχετίζονται με ρηξιγενής ζώνη στην θέση παρατήρησής τους.

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας



Σχήμα 4.11 Ανάγλυφο της περιοχής μελέτης στον Στύλο Χανίων. Με διαφορετικά χρώματα φαίνονται οι γραμμές μελέτης VLF, με μαύρες συνεχείς γραμμές τα ορατά ρήγματα, με μαύρες διακεκομένες γραμμές τα πιθανά ρήγματα και με κόκκινες γραμμές ο συνδυασμός των ανωμαλιών VLF. Οι κόκκινες γραμμές έχουν προκύψει από τον συνδυασμό και αξιολόγηση των ανωμαλιών που χαρτογραφήθηκαν από το σύνολο των οδεύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή.

Στον χάρτη του σχήματος 4.11, προβάλλονται οι οδεύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή έρευνας. Αξιολογώντας και συνθέτωντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την μέθοδο VLF έχουν προκύψει οι κόκκινες γραμμές του σχήματος 4.11. Οι γραμμές αυτές προσδιορίζουν πιθανές ρηξιγενείς

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή έρευνας

ζώνες. Με βάση τον λεπτομερή γεωλογικό χάρτη της περιοχής έρευνας (Σχήμα 4.2) στην θέση όπου προβάλλονται οι πιθανές ρηξιγενείς ζώνες που προσδιορίστηκαν με την μέθοδο VLF, υπάρχει χαρτογραφημένο πιθανό ρήγμα.

Η ζώνη χαμηλών αντιστάσεων που προσδιορίστηκε με την ηλεκτρική τομογραφία (γραμμή 5) στα 650m από την αρχή της γραμμής, επιβεβαιώνεται και από την όδευση 001, η οποία στην αντίστοιχη θέση διακρίνει ανωμαλία η οποία αποδίδεται σε πιθανό ρήγμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση των συνθηκών στην περιοχή έρευνας, καθώς και από την αξιολόγηση των μετρήσεων γεωφυσικής διασκόπησης που είχαν πραγματοποιηθεί στην περιοχή στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “Περιβάλλον – Πυθαγόρας II”, καθώς και του διπλού πειράματος που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπυχιακής εργασίας.

5.2 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα υπάρχοντα στοιχεία η υφαλμύρινση στην περιοχή της πόλης αποδίδεται στην παρουσία του ρήγματος διεύθυνσης BBA – ΝΝΔ, που έχει διαμορφώσει την λεκάνη του Τεταρτογενούς. Εκτιμάται ότι η μίξη γλυκού – θαλασσινού νερού ακολουθεί μια επιλεκτική διαδρομή η οποία αποδίδεται στην παρουσία του ρήγματος στην περιοχή. Η εκτίμηση αυτή δεν απορρίπτεται από την γεωφυσική διασκόπηση που έχει πραγματοποιηθεί στην περιοχή και αξιολογήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπυχιακής εργασίας.

Αναδεικνύεται το γεγονός ότι η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας μπορεί να βρει πρακτική εφαρμογή στον εντοπισμό της ρύπανσης (υφαλμύρινσης) του υπογείου νερού ακόμα και σε δομές καρστ. Όπως προέκυψε από το διπλό πείραμα (γραμμή 4 ηλεκτρικής τομογραφίας – δοκιμαστική άντληση) υπάρχουν ενδείξεις για την ανίχνευση της μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία προκλήθηκε από την αντλητική δοκιμή στην θέση του πειράματος.

Οι ζώνες χαμηλής αντίστασης που προσδιορίστηκαν με την γραμμή 5 ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελούν μία ακόμη ένδειξη για την εκτίμηση του ότι μέσω μίας επιλεκτικής διαδρομής έχει διαμορφωθεί η ποιοτική υποβάθμιση του υδροφόρου (υφαλμύρινση) στην περιοχή της πόλης.

Η μικρή σχετικά εποχική διακύμανση της επιφάνειας του καρστικού υδροφόρου στο πείραμα Νότια της πόλης (γραμμή 2) δεν έγινε ανιχνεύσιμη με την συγκεκριμένη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (σχετικά μεγάλη ισαπόσταση ηλεκτροδίων) με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Αναδεικνύεται το γεγονός ότι η χαρτογράφηση καρστικών δομών με την χρήση της γεωφυσικής διασκόπησης αποτελεί δύσκολο εγχείρημα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων VLF (όδευση 008), καθώς και της ηλεκτρικής τομογραφίας (γραμμή 5) δεν απορρίπτουν την ύπαρξη του πιθανού ρήγματος που έχει χαρτογραφηθεί στην κοιλάδα του ποταμού Κοιλιάρη.

5.3 Προτάσεις

Προτείνεται ανάπτυξη νέας μεθοδολογίας για την απεικόνιση καρστικών δομών που θα συνδυάζει γεωφυσικές μεθόδους και θα προσαρμόζεται ανάλογα με το βάθος διασκόπησης.

Απαιτείται πληρέστερη υδρογεωλογική έρευνα η οποία θα περιλαμβάνει το σύνολο της υδρολογικής και υδρογεωλογικής λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη, για την διαπίστωση των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή και έχουν ως αποτέλεσμα την παρατήρηση του φαινομένου της υφαλμύρινσης σε μεγάλες σχετικά αποστάσεις από την ακτογραμμή. Η εκτέλεση ερευνητικών γεωτρήσεων σε συνδυασμό με την πραγματοποίηση δοκιμαστικών αντλήσεων Νότια της πόλης και εντός της κοιλάδας του ποταμού Κοιλιάρη εκτιμάται ότι θα επικουρούσε σημαντικά στην αποσαφήνιση του υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Οι προτεινόμενες αυτές θέσεις απορρέουν από την αξιολόγηση της γεωφυσικής διασκόπησης στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Η επανάληψη του διπλού πειράματος στην υφάλμυρη περιοχή της πόλης προσπερνώντας τις τεχνικές δυσκολίες που προέκυψαν κατά την διεξαγωγή του, είναι δυνατόν να αποσαφηνίσει την διακριτική ικανότητα της μεθόδου σε μεταβολές του υδροχημικού χαρακτήρα του υπογείου νερού, επικουρώντας στο δύσκολο εγχείρημα της χαρτογράφησης της ρύπανσης του υπογείου νερού.

Στην θέση της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης S5, προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, για την αποσαφήνιση της ζώνης μεγάλης αντίστασης που προσδιορίστηκε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Abdul Nassir S.S., Loke M.H., Nawawi M.N.**, (2004), “Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys”, *Geophysical Prospecting*, 48, pp 647-661.
2. **Ahmed S., Marsily G, Talbot A.** (1988)., “Combined use of hydraulic and electrical properties of an aquifer in a geostatistical estimation of transmissivity”, *Ground Water*, vol. 26, issue 1, pp.78-85.
3. **Balia R., Gavaudo E., Ardau F., Ghiglieri.**, (2003) “Geophysical approach to the environmental study of a coastal plaign”, *Geophysics*, Vol.68, No.5, pp 1446-1459.
4. **Beer J.H., Joubert S.J., Van Zijl J.S.**, (1981), “Resistivity studies of an Alluvial aquifer in the Omaruru Delta, southwest Africa/Namibia”, *Transaction of the Geological Society of South Africa*, Volume 84. pp 115-122, 1981.
5. **Bonneau M.**, (1973), Sur les affinités ionniennes des “calcaires en plaquettes” épimétamorphiques de la Crète, le charriage de la série de Gavrovo-Tripolitza et la structure de l’ arc égéen. – C. R. Acad. Sc. Paris, **277**: 2453-2456, Paris.
6. **Creutzburg N., & Seidel E.**, (1975): ”Zum Stand der Geologie des Praeneogens auf Kreta”, *N. Jb. Geol. Palaeont. Abh.*, **149**: 363-383, Stuttgart.
7. **Epting M., Kudrass H.R., Lepping U. & Schaefer A.** (1972): “Geologie der Talea Ori/Kreta“, *Neues Jahrbuch Geol. Palaeont. Abh.*, **141**, 259-285, Stuttgart.
8. **Gnanasundar D., Elango L.**, (1999), “Groundwater quality assessment of a coastal aquifer using geoelectrical techniques”, *Journal of Environmental Hydrology*, Volume 7, paper 2, 1999.
9. **Greiling, R. & Skala, W.**, (1977), “The petrofabrics of the phyllite quarzit series of Western Crete as an example of the pre-neogenian structures of the Cretan arc”, VI Coll. Geol. Aegean Region, Proc., **1**: 97-102, Athens.
10. **Greiling, R. & Skala, W.**, (1979), “Das tektonische Gefuege der Phyllit-Serie West-Kretas“, *Geol. Rundschau*, **68**, 1, 236-252, Stuttgart

Βιβλιογραφία

11. **Haeni F.P.**, (1986), “Application of seismic refraction methods in groundwater modeling studies in New England”, *Geophysics*, Volume 51, No. 2, pp 236-249.
12. **Haxhiu P., Uci A.**, (1994), “The determination of unpolluted underground water bounds in the Lushnja (Albania) seaside region”, *Publication of the academy of Finland*, Volume 4, pp 119-124.
13. **Imhof A.L., Guell A.E., Villagra S.M., (2001)**, “Resistivity sounding method applied to saline horizons’ determination in Colonia Lloveras-San Juan Province-Argentina”, *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol.19 (3).
14. **Jarvis K.D., Knight R.J.**, (2002), “Aquifer heterogeneity from SH-wave seismic impedance inversion”, *Geophysics*, Vol.67, No.5.
15. **Kuss S.E. & Thorbecke G.**, (1974), “Die praeneogenen Gesteine der InselKreta und ihre Korrelierbarkeit im aegaeischen Raum”, Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br., **64**: 39-75, Freiburg.
16. **Lashkaripour G.R.**, (2003), “An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity method: A case study in Korin aquifer, southeast Iran”, *Journal of Spatial Hydrology*, Vol.3, No.1, Fall 2003.
17. **Mela K.**, (1997), “Viability of using seismic data to predict hydrogeological parameters ”, *SAGEEP*.
18. **Meulenkamp et al**, (1994), *Tectonophysics*, 234, 53-72
19. **Prakash D., Kumar K.V., Tata S.N.**, (1980), “Geophysical studies for ground water exploration in Deccan Traps ”, *Annual Convention and seminar on Exploration Geophysics*, pp 25-26.
20. **Singh C.L., Yadav G.S.**, (1982), “Geoelectrical soundings for the study of suitable aquifers in the Gangetic alluvium of Allahabad region”, *Proceeding of the Indian academy of Science*, vol.91, No.1, pp. 21-28.
21. **Singh U.K., Das R.K., Hodlur G.K.**, (2004), “Significance of Dar-Zarrouk parameters in the expoloration of quality affected coastal aquifer systems”, *Environmental Geology*, pp 697-702.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

22. **Βαφείδης, Α., Μονόπωλης, Δ., Αμολοχίτης, Γ. και Στειακάκης, Μ.**, (1991): “Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις στην κοιλάδα του Κερίτη ποταμού”, Έκθεση, ΓΓΕΤ, ΟΑΔΥΚ, Πολυτεχνείο Κρήτης.
23. **I.G.M.E.**: Φύλλο Χάρτη Χανιά, κλίμακα 1:50.000.
24. **I.G.M.E.**, (1993) “Έκθεση επί των αποτελεσμάτων ιχνηθέτησης στην περιοχή των πηγών Στύλου Χανίων”, Κνιθάκης Μαν., Οκτώβριος 1993. Ρέθυμνο.
25. **Ζερβογιάννης Γ., Χατζηαγοράκης Δ.** (1969), “Υδρογεωλογική μελέτη της περιοχής Στύλου-Αρμένων-Καλυβών, νομού Χανίων Κρήτης”, Υπουργείο Γεωργίας. Αθήνα.
26. **Κουκαδάκη Μ., Τζιμούρτος Μ.**, (2002), “Συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στη μελέτη της ρύπανσης των εδαφών και υπογείων νερών”, *Διπλωματική εργασία*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά, σελ. 1-11.
27. **Κουκαδάκη Μ.**, (2004), “Χαρακτηρισμός υδροφορέα και ζώνης υφαλμύρωσης με χρήση γεωφυσικών μεθόδων με χρήση γεωφυσικών μεθόδων – μοντελοποίηση ροής και μεταφοράς μάζας”, *Μεταπτυχιακή εργασία*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, σελ. 50-65.
28. **Καλλέργης, Γ. Α.**, (2000), “Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Δεύτερος τόμος”, Αθήνα.
29. **Μουντράκης, Δ. Μ.**, (1985), “Γεωλογία της Ελλάδας”, Θεσσαλονίκη.
30. **Πυθαγόρας ΙΙ**, (2006), Τεχνική έκθεση με τίτλο “Έκθεση συνδυαστικών αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης και των υδρογεωτρήσεων, 118 σελ.
31. **Σούλιος, Γ. Κ.**, (1996), “Γενική υδρογεωλογία, Δεύτερος τόμος, Ροή του υπόγειου νερού προς τα υδρομαστευτικά έργα”, Θεσσαλονίκη.
32. **Ο.Α.ΔΥ.Κ.**, (1982), Δελτία απογραφής των γεωτρήσεων ΥΓΦ1, ΥΓΦ2, και ΥΓΦ5. Μαυρίδης Βασίλης, 1981-1982. Χανιά.
33. **Φυτρολάκης, Ν.** (1978), “Συμβολή της στη γεωλογική έρευνα της Κρήτης”, *Δελτ. Ελλην. Γεωλ.* **XIII/2**, 101-115, Αθήνα.
34. **Φυτρολάκης, Ν.** (1980), “Η γεωλογική δομή της Κρήτης”, *Διατριβή επί υφηγεσία*, ΕΜΠ, Αθήνα, 146 S.