

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



## ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΤΡΙΩΝ ΠΟΤΑΜΩΝ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

Διπλωματική Εργασία

**ΔΕΣΠΟΙΝΑ Γ. ΑΡΧΟΝΤΑΚΗ**

### Εξεταστική Επιτροπή

Αντώνιος Βαφείδης	Καθηγητής (Επιβλέπων)
Εμμανουήλ Μανούτσογλου	Επίκουρος Καθηγητής
Βασίλειος Περδικάτσης	Καθηγητής

Μάρτιος 2006

Χανιά

Αφιερώνεται στους γονείς μου,  
Γιώργο και Μαρία,  
και στην αδελφή μου Στέλλα

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος .....	v
Περίληψη .....	vi
<b>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγικό</b> .....	1
1.1 Το έργο .....	1
1.2 Γεωφυσικές μέθοδοι .....	3
1.3 Περιγραφή Διπλωματικής Εργασίας .....	6
<b>Κεφάλαιο 2 : Γεωλογία</b> .....	7
2.1 Η Γεωλογική δομή της Κρήτης .....	7
2.2 Ενότητα των Plattenkalk (των Πλακωδών Ασβεστολίθων) .....	9
2.2.1 Εισαγωγή .....	9
2.2.2 Η Ενότητα των Plattenkalk στην Κρήτη .....	11
2.3 Ενότητα Τρύπαλι .....	14
2.4 Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά .....	14
2.4.1 Γενικά.....	14
2.4.2 Η Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά στην Κρήτη .....	16
2.5 Οι σχηματισμοί της ζώνης Γαβρόβου-Τρίπολης στην Κρήτη .....	19
2.6 Γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής του έργου .....	21
2.6.1 Γεωμορφολογία .....	21
2.6.2 Στρωματογραφία .....	22
2.6.2.1 Ενότητα των Plattenkalk (Πλακωδών Ασβεστόλιθων) .....	22
2.6.2.2 Ενότητα Φυλλιτών-Χαλαζιτών .....	22
2.6.2.3 Ενότητα Τρίπολης .....	23
2.6.2.4 Νεογενείς και Τεταρτογενείς Αποθέσεις.....	23
<b>Κεφάλαιο 3: Ηλεκτρικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης</b> .....	25
3.1 Εισαγωγή .....	25
3.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης .....	25
3.2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	26
3.3 Εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης .....	31
3.3.1 Διάταξη ηλεκτροδίων ρεύματος (A, B) και δυναμικού (M, N) .....	31
3.3.2 Φαινόμενη ειδική αντίσταση .....	32
3.4 Τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων .....	33
3.5 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση .....	36
3.5.1 Εισαγωγή .....	36
3.5.2 Διεξαγωγή της Ηλεκτρικής Βυθοσκόπησης .....	37
3.5.3 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής βυθοσκόπησης.....	38
3.6 Ηλεκτρική Τομογραφία .....	39
3.6.1 Εισαγωγή .....	39
3.6.2 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων .....	39
3.6.3 Εξοπλισμός ηλεκτρικής τομογραφίας .....	41
3.6.4 Διεξαγωγή της ηλεκτρικής τομογραφίας .....	42
3.6.5 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας .....	42

<b>Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση και Ερμηνεία των μετρήσεων .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b> Εισαγωγή .....	44
<b>4.2</b> Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση .....	48
<b>4.2.1</b> Εισαγωγή .....	48
<b>4.2.2</b> Αντιστροφή των δεδομένων ηλεκτρικής βυθοσκόπησης .....	48
<b>4.2.3</b> Αποτελέσματα ηλεκτρικής βυθοσκόπησης .....	53
<b>4.2.4</b> Σύγκριση των δύο πακέτων επεξεργασίας .....	60
<b>4.2.5</b> Ερμηνεία αποτελεσμάτων Ηλεκτρικής Βυθοσκόπησης .....	61
<b>4.3</b> Παρουσίαση και Ερμηνεία Γεωλογικών .....	62
<b>4.3.1</b> Εισαγωγή .....	62
<b>4.3.2</b> Παρουσίαση και Ερμηνεία των Γεωλογικών Τομών .....	62
<b>4.4</b> Ηλεκτρική Τομογραφία .....	72
<b>4.4.1</b> Εισαγωγή .....	72
<b>4.4.2</b> Αντιστροφή των δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας .....	72
<b>4.4.3</b> Αποτελέσματα Γεωφυσικής διασκόπησης .....	74
<b>4.4.4</b> Ερμηνεία αποτελεσμάτων Ηλεκτρικής Τομογραφίας .....	79
 <b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις .....</b>	 <b>84</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>85</b>

## Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον κ. Βαφείδη Αντώνιο, Καθηγητη, που ανέλαβε την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, τον κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Επίκουρο Καθηγητή και τον κ. Περδικάτση Βασίλειο, Καθηγητή, που δέχθηκαν να συμμετέχουν στην εξεταστική επιτροπή.

Τον κ. Σιμιτζή Βασίλειο, Γεωλόγο, εργαζόμενο στον Ο.Α.ΔΥ.Κ. στο παράρτημα Ρεθύμνου, για τις σημαντικές πληροφορίες του για την περιοχή μελέτης,

Τον κ. Hamdan Hamdan, υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για τη σημαντική του βοήθεια καθ' όλη την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Τους Οικονόμου Νικόλαο, ΕΤΕΠ και Μουγκοπέτρου Ευαγγελία, Μηχανικό Ορυκτό Πόρων, για τη σημαντική τους βοήθεια στην πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Τον κ. Ρουμπεδάκη Στυλιανό, Γεωλόγο και μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για τη σημαντική του βοήθεια στην επεξεργασία του γεωλογικού μέρους αυτής της εργασίας.

Τον κ. Δουραμάνη Μιχαήλ, Μηχανικό Ορυκτό Πόρων, για την πολύτιμή του βοήθεια κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, αλλά και για την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου για την πολύτιμη βοήθεια και την αμέριστη συμπαράσταση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει χαρακτηρισμός των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής όπου έχει σχεδιαστεί να διανοιχθεί η σήραγγα μεταφοράς νερού στο φράγμα τριών ποταμών Αμαρίου, Ρεθύμνης.

Περιγράφεται η γεωλογία της Κρήτης και η γεωλογία της περιοχής μελέτης. Έγινε ψηφιοποίηση του τοπογραφικού και γεωλογικού χάρτη της υπό μελέτη περιοχής. Η εκτίμηση της στρωματογραφίας έγινε με γεωφυσικές διασκοπήσεις. Πραγματοποιήθηκαν δύο διασκοπήσεις με ηλεκτρικές μεθόδους, μια ηλεκτρική βυθοσκόπηση και μια ηλεκτρική τομογραφία. Η διεξαγωγή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης έγινε με τη διάταξη Schlumberger και η ηλεκτρική τομογραφία έγινε με τη διάταξη Wenner – Schlumberger.

Σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής εξήχθησαν συμπεράσματα για τη στρωματογραφία της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας. Από την ερμηνεία της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης προέκυψε ότι μέχρι το βάθος των 350 m συναντάται η ενότητα των Plattenkalk. Από την ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας εντοπίστηκε πιθανό μη επιφανειακό ρήγμα. Η σήραγγα θα συναντήσει κυρίως Plattenkalk, ενώ στο βόρειο τμήμα της θα συναντήσει και φυλλίτες – χαλαζίτες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Το Έργο

Στην πόλη του Ρεθύμνου, της νήσου Κρήτης, καθώς και στην ευρύτερη περιοχή του, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκε μια μεγάλη αύξηση του πληθυσμού και μια εκρηκτική ανάπτυξη της τουριστικής υποδομής. Συνέπεια αυτών είναι να δημιουργείται, ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, πρόβλημα ύδρευσης με αποτέλεσμα τις συνεχείς διακοπές υδροδότησης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έγιναν διάφορες τεχνικές μελέτες και προτάθηκαν διάφορες λύσεις όπως η μεταφορά από πηγές, μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού, η καλύτερη εκμετάλλευση των διάφορων υπόγειων υδροφορέων, η βελτίωση και επέκταση των δικτύων μεταφοράς, αποθήκευσης και διανομής του νερού. Στα πλαίσια αυτά, μελετήθηκε και κατασκευάζεται ήδη από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ., επί του χειμάρρου Πρασιανού, το φράγμα Αμαρίου, το οποίο βρίσκεται οριζοντιογραφικά σε απόσταση 12,5 km NNA /κα της πόλης του Ρεθύμνου.

Το φράγμα είναι χωμάτινο (με αργιλικό πυρήνα), έχει ύψος 50 m (ύψος στέψης 208 m) και μήκος 275 m. Τα επιμέρους έργα του φράγματος είναι τα έργα εκτροπής, υδροληψίας και εκκένωσης, ο υπερχειλιστής πλημμύρων, το φράγμα εκτροπής (το οποίο θα ενσωματωθεί στο κύριο σώμα του Φράγματος), ο αγωγός μεταφοράς των νερών του χειμάρρου Κοκκινόριζας για την ενίσχυση του ταμιευτήρα και ο αγωγός μεταφοράς του νερού.

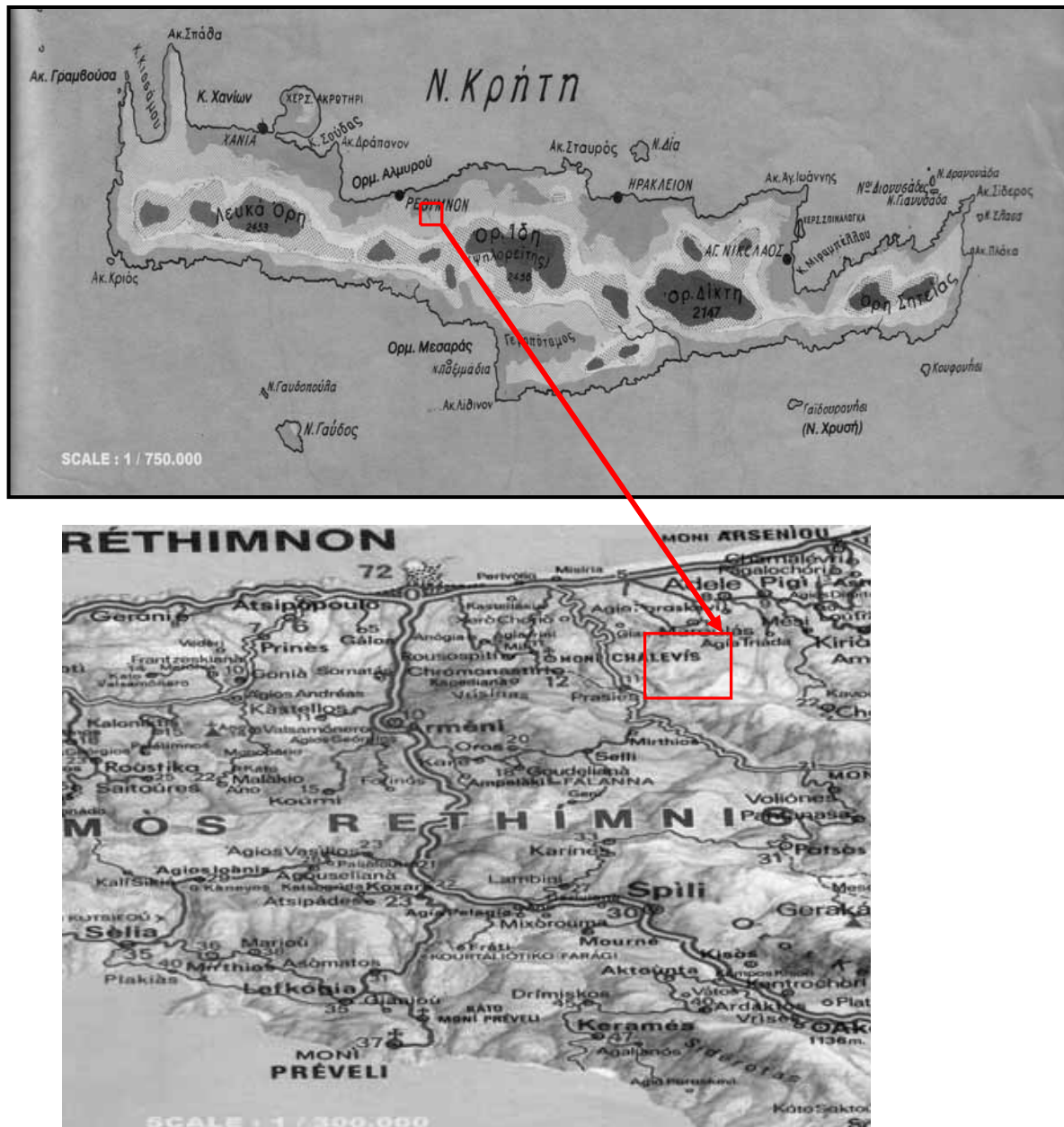
Ο αγωγός μεταφοράς του νερού θα έχει διάμετρο Φ1200 και στην αρχική του σχεδίαση αποτελείτο από δύο τμήματα : το πρώτο θα ήταν επιφανειακό στο δεξιό (ανατολικό) αντέρεισμα για μήκος περίπου 4100 m και το δεύτερο τμήμα θα ήταν υπόγειο (σήραγγα) και θα είχε μήκος περίπου 5000 m.

Μετά την οριστικοποίηση των περιβαλλοντικών όρων του έργου, σε συνεργασία με τον Ο.Α.ΔΥ.Κ., καθορίστηκε η χάραξη του αγωγού, οι περιοχές εισόδου και εξόδου της σήραγγας. Στη νέα χάραξη υπάρχει μείωση του συνολικού μήκους της σήραγγας σε 3.400 m. Στη συνέχεια θα πρέπει να κατασκευασθούν οι απαραίτητοι αγωγοί που θα οδηγήσουν το νερό στις διάφορες δεξαμενές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν σκοπό την αποκάλυψη της στρωματογραφίας της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη διεξαγω-

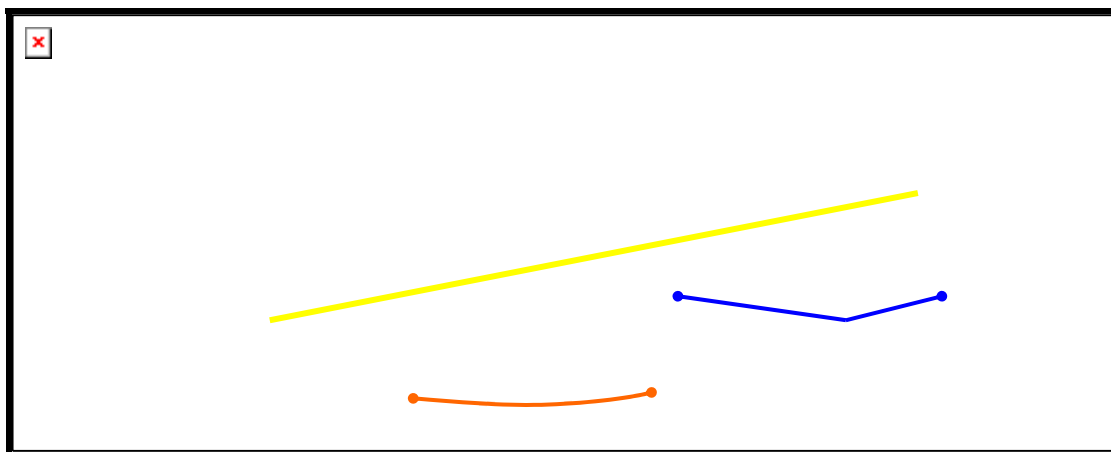
γή γεωφυσικών διασκοπήσεων με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης.

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται χάρτης της Κρήτης με την υπό μελέτη περιοχή. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται ο χάρτης της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας, καθώς και τα σημεία όπου διεξήχθησαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις.



Σχήμα 1.1: Χάρτης της Κρήτης με την υπό μελέτη περιοχή σε κόκκινο πλαίσιο.





**Σχήμα 1.2:** Ο χάρτης της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας σε κλίμακα 1:5000 (σχέδιο 1911-ΣΜΕΛ-007-005, «Αναθεωρημένη γεωλογική έκθεση για τη σήραγγα διέλευσης του αγωγού μεταφοράς του νερού, Δ.Ε.Η.», 2002). Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η περιοχή όπου έχει σχεδιαστεί να περάσει η σήραγγα, με πορτοκαλί φαίνεται η γραμμή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης και με μπλε φαίνεται η γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας.

## 1.2 Γεωφυσικές μέθοδοι

Οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι χρήσιμες, αξιόπιστες και αποτελεσματικές, γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων όπως για τον εντοπισμό δομών, που ευνοούν το σχηματισμό κοιτασμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου και μεταλλευμάτων. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, για τον εντοπισμό υδροφόρων οριζόντων, γεωθερμικών πεδίων, κ.ά. Επίσης, είναι οικονομικές, σχετικά γρήγορες και μη καταστροφικές.

Οι βασικότερες κατηγορίες των μεθόδων της γεωφυσικής διασκόπησης είναι:

Βαρυτικές Μέθοδοι. Άμεσος σκοπός αυτών των μεθόδων είναι ο καθορισμός των οριζόντιων μεταβολών της πυκνότητας των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μέτρηση των μεταβολών της έντασης του πεδίου βαρύτητας και των χωρικών παραγώγων αυτής.

Μαγνητικές Μέθοδοι. Βασίζονται στον εντοπισμό μεταβολών της μαγνήτησης των πετρωμάτων μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις στην επιφάνεια της γης μαγνητικών ανωμαλιών μικρής κλίμακας (τοπικών μεταβολών της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου).

Ηλεκτρικές Μέθοδοι. Με αυτές τις μεθόδους επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης.

Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων (ηλεκτρική τάση) στην επιφάνεια της γης.

Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι. Βασίζονται στον καθορισμό της ηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης με βάση τις ιδιότητες του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παράγεται μέσα στα στρώματα αυτά, σε σχέση με τις ιδιότητες του αρχικού (πρωτογενούς) πεδίου που είναι γνωστές.

Σεισμικές Μέθοδοι. Με τις μεθόδους σεισμικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των μεταβολών της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών (σεισμικών) κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις των χρόνων διαδρομής τους μέσα στα στρώματα αυτά και με εφαρμογή γνωστών νόμων της φυσικής, στους οποίους υπακούει η διάδοση αυτή (νόμοι διάθλασης, ανάκλασης, κλπ).

Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους εφαρμόζονται και άλλες, όπως είναι η θερμική μέθοδος και η ραδιομετρική μέθοδος. Όμως, ενώ οι αρχές πάνω στις οποίες στηρίζονται είναι πολύ απλές, πολλές από τις μεθόδους αυτές εμφανίζουν σημαντικές δυσκολίες στην εφαρμογή τους, λόγω του ότι η δομή της γης είναι πολύπλοκη.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια από τις πιο σημαντικές κατηγορίες της γεωφυσικής διασκόπησης. Ο όρος Γεωφυσική Διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή των νόμων της Φυσικής. Έχει σα στόχο της τον εντοπισμό περιοχών με οικονομική σημασία.

Στη γύρω περιοχή της σήραγγας πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Με δεδομένο το γεωλογικό χάρτη της περιοχής από τη Δ.Ε.Η. σε κλίμακα 1:5.000, καθώς και δύο γεωτρήσεων που είχαν διεξαχθεί από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ., έγινε προσπάθεια σύνδεσης των γεωλογικών στοιχείων με τα γεωφυσικά αποτελέσματα.

Πρόσφατες αναφορές έδειξαν ότι ο συνδυασμός γεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για τη δομή του υπεδάφους, την στρωματογραφία και τον εντοπισμό πιθανών ανωμαλιών στα πετρώματα. Παρακάτω, ακολουθούν αναφορές, για διάφορες περιοχές της Κρήτης, στις οποίες γίνεται συνδυασμός γεωλογικών και γεωφυσικών μεθόδων.

Οι H. Hamdan et al. (2002) στην εργασία τους με τίτλο «Τρισδιάστατη χαρτογραφική απεικόνιση πιθανών υδροφόρων σχηματισμών στην περιοχή Κισσάμου, Ν.

Χανίων» αναζήτησαν τους υδροφόρους σχηματισμούς με την χρήση ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και δημιούργησαν ένα τρισδιάστατο ομοίωμα - πρότυπο (μοντέλο) των γεωλογικών σχηματισμών και ιδιαίτερα αυτών που παρουσιάζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον για την περιοχή Κίσσαμου του νομού Χανίων.

Ο εντοπισμός/διαχωρισμός των γεωλογικών σχηματισμών έγινε με γεωηλεκτρική διασκόπηση. Το πάχος των επάλληλων γεωλογικών σχηματισμών, όπως αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων, στις διάφορες θέσεις των βυθοσκοπήσεων, εισάγεται σε λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιεί μεθόδους παρεμβολής για την δημιουργία τομών και τρισδιάστατων ομοιωμάτων της προσεγγιστικής γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης.

Οι Α. Βαφείδης et al. (2004) στην εργασία τους με τίτλο «Γεωφυσική διασκόπηση στο οροπέδιο του Ομαλού, Ν. Χανίων», συνδύασαν γεωφυσικές μεθόδους για τη διερεύνηση της γεωλογικής δομής στο οροπέδιο και κατέληξαν στο ότι η ηλεκτρική τομογραφία είναι η πλέον κατάλληλη για τον εντοπισμό των διαφόρων στρωμάτων του υπεδάφους και την απεικόνιση των ζητούμενων καρστικών μορφών.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν αποσκοπούσαν στον υπολογισμό του πάχους του εδαφικού καλύμματος και του συνόλου των κλαστικών σχηματισμών καθώς και στην απεικόνιση των δολίνων και καρστικών εγκοίλων τμήματος του οροπεδίου. Η μελέτη απέδειξε ότι η συνδυασμένη εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, με τη συμβολή πάντα της γεωλογίας, είναι σε θέση να εξάγει ορθά συμπεράσματα σχετικά με τις γεωλογικές μορφές στην περιοχή του Ομαλού και την ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και περιοχών ενδιαφέροντος.

Οι Α. Βαφείδης et al. (2004) στην εργασία τους με τίτλο «Συμβολή της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και της Σεισμικής Διάθλασης στην επιλογή θέσης για τη δημιουργία Λιμνοδεξαμενής στην Κουντούρα, Δ.Πελεκάνου, Ν.Χανίων», που είχε ως στόχο τον προσδιορισμό με γεωφυσικές μεθόδους του πάχους των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών πάνω στους οποίους θα εδραστεί η λιμνοδεξαμενή και την υπόδειξη θέσεων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, έδειξε ότι τόσο τα αποτελέσματα της Σεισμικής Διάθλασης όσο και αυτά της Ηλεκτρικής Τομογραφίας συμφωνούν μεταξύ τους και επιβεβαιώνονται από τα γεωτρητικά στοιχεία.

Οι Horeftaki G. et al. (2004) στην εργασία τους με τίτλο «Integrated Geophysical Survey at Zoforoi Quarry, Iraklion, Crete» περιγράφουν γεωφυσική έρευνα στο λατομείο ασβεστολίθων στην περιοχή Ζωφόροι του Ν. Ηρακλείου, προκειμένου να ανιχνευθούν πιθανές κοιλότητες με τις μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωρα-

ντάρ. Έδειξαν ότι υπάρχουν τρεις κοιλότητες στην υπό έρευνα περιοχή. Η μελέτη απέδειξε ότι με συνδυασμό γεωφυσικών μεθόδων σε ένα λατομείο, μπορεί να διευκολυνθεί η διαδικασία της εξόρυξης χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ποσότητα εκρηκτικών στις κοιλότητες, για την καλύτερη απόληψη του πετρώματος.

### 1.3 Περιγραφή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σαν σκοπό την εκτίμηση της στρωματογραφίας στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας με τη βοήθεια των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής, τα οποία υπήρχαν από δύο γεωτρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ., τη γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής και με τις γεωφυσικές διασκοπήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωλογία της Κρήτης και της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας. Το κύριο μέρος της επιφάνειας της περιοχής μελέτης καλύπτεται από τους Plattenkalk ή Πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας της περιοχής καλύπτεται από την ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών. Σ' ένα μικρότερο μέρος εμφανίζεται η ενότητα των ασβεστολίθων της Τρίπολης και οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των ηλεκτρικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στις γεωφυσικές διασκοπήσεις. Αναλύεται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και περιγράφονται οι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις. Επίσης, αναλύονται οι μέθοδοι της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων. Επίσης, γίνεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας σε συνδυασμό με τα γεωλογικά στοιχεία δύο γεωτρήσεων που διεξήχθησαν στην περιοχή. Τέλος, παρουσιάζεται ο τοπογραφικός και γεωλογικός χάρτης της υπό μελέτη περιοχής σε ψηφιοποιημένη μορφή.

Τέλος, στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών διασκοπήσεων σε συνδυασμό με τα γεωλογικά στοιχεία. Επίσης, γίνονται προτάσεις για την περαιτέρω επεξεργασία της περιοχής με γεωφυσικές μετρήσεις.

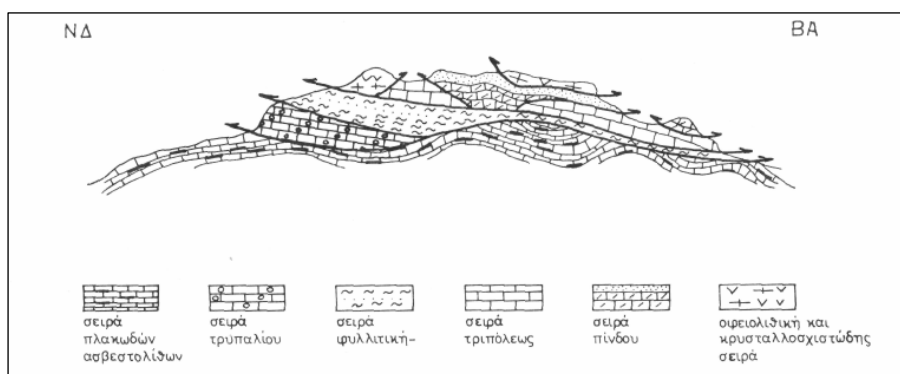
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΛΟΓΙΑ

### 2.1 Η Γεωλογική δομή της Κρήτης

Η γεωλογική δομή της Κρήτης χαρακτηρίζεται από τα αλληπάλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των γεωτεκτονικών ζωνών των Ελληνίδων οροσειρών, τα οποία συνωθούνται στο μικρό σχετικά γεωγραφικό χώρο του νησιού, με γενική κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο.

Γενικά, η Κρήτη συγκροτείται από ένα αυτόχθονο (ή σχετικά αυτόχθονο) σύστημα που είναι η ενότητα Ταλέα Όρη ή Πλακωδών Ασβεστολίθων (Plattenkalk) πάνω στο οποίο τοποθετούνται με λεπιοειδή τεκτονική διάταξη οι σειρές των πετρωμάτων των άλλων ζωνών και ενοτήτων (Σχήμα 2.1).

Η ενότητα *Ταλέα Όρη - Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι* περιλαμβάνει κυρίως τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους με πυριτικές ενστρώσεις και κερατολιθικούς κονδύλους, αλλά επίσης και άστρωτους ασβεστόλιθους, δολομίτες, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή και φυλλιτικές - χαλαζιτικές παρεμβολές. Η σειρά αυτή έχει ηλικία από το Πέρμιο μέχρι το Ηώκαινο, 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 παράθυρου κάτω από τα αλληπάλληλα επωθημένα καλύμματα. Μεγάλες μάζες των ορεινών όγκων των Λευκών ορέων και της Ίδης, δομούνται από τη σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων.



**Σχήμα 2.1** Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της Κρήτης με αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα. (Κατά Κίλια et al. 1985).

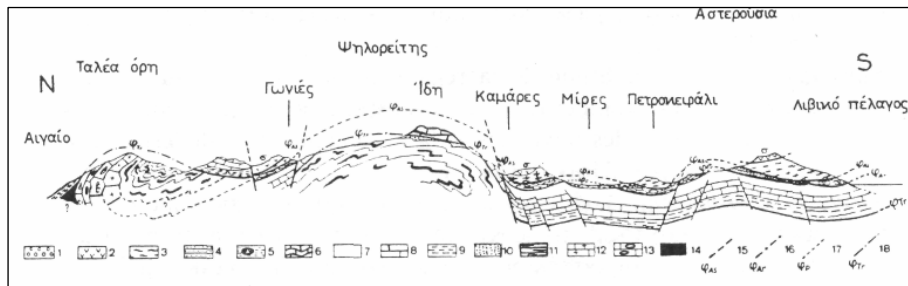
Πάνω στη σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων βρίσκεται μια σειρά κροκαλοπαγών - λατυποπαγών ασβεστόλιθων που ονομάζεται *σειρά Τρυπαλίου*. Η ηλικία της θεωρήθηκε Άνω Τριαδική - Κάτω Ιουρασική αν και δεν αποκλείεται και πολύ νεώτερη ηλικία. Από γεωτεκτονική άποψη η σειρά Τρυπαλίου θεωρείται από άλλους μεν ως ο υποκείμενος ορίζοντας της αμέσως ανώτερης φυλλιτικής σειράς, ενώ από άλλους θεωρείται ως επικλυσιογενής 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 στη σειρά Τρυπαλίου βρίσκεται μια *φυλλιτική - χαλαζιτική σειρά* ηλικίας Περμίου - Τριαδικού, που αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, μετά - κροκαλοπαγή, μετά - ψαμμίτες, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μεταβασίτες και μετά - ανδεσίτες. Η μεταμόρφωση της σειράς έγινε σε συνθήκες υψηλής πίεσης (γλαυκοφανιτική). Η γεωτεκτονική θέση της παραμένει άγνωστη. Άλλοι τη θεωρούν υπόβαθρο της Γαβρόβου - Τριπόλεως και άλλοι ανεξάρτητη μονάδα προερχόμενη με επώθηση από πιο εσωτερικά.

Πάνω στη 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 λείπια των εσωτερικών ζωνών*. Τέτοια είναι η ενότητα Άρβης 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.

Τέλος, πάνω σ' αυτούς τους αλπικούς σχηματισμούς κάθονται με στρωματογραφική ασυμφωνία *ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς* (κυρίως κλαστικά θαλάσσια ιζήματα) τα οποία έχουν μεγάλη εξάπλωση και πάχος στις παραλιακές περιοχές της Κρήτης (Δ. Μ. Μουντράκης, Γεωλογία της Ελλάδας, 1985, σελίδες:186-188).



**Σχήμα 2.2** Σχηματική γεωλογική τομή εγκάρσια στην Κεντρική Κρήτη. Απεικονίζεται η δομή των βουνών Ταλέα όρη, Ίδη και Αστερούσια. 1:Νεογενείς αποθέσεις, 2:Οφιόλιθοι, 3:Μεταμορφωμένα πετρώματα των Αστερουσίων, 4:Πρώτος φλύσχης της Πίνδου (Κάτω Κρητιδικό), 5:Ενότητα Άρβης, 6:Τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου, 7:Φλύσχης ζώνης Γαβρόβου-Τρίπολης, 8:Ασβεστόλιθοι Γαβρόβου-Τρίπολης, 9:Φυλλίτες, 10-14:Σειρά των πλακωδών ασβεστολίθων (Plattenkalk), 15-18:Επωθήσεις των διαφόρων τεκτονικών καλυμμάτων. (Κατά Bonneau 1973).

## 2.2 Ενότητα των Plattenkalk (των Πλακωδών Ασβεστολίθων)

### 2.2.1 Εισαγωγή

Το όνομα *Plattenkalk* (Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι) δόθηκε για πρώτη φορά από τον L. Chalikiopoulos το 1903 σε μια σειρά μαρμάρων μεγάλου πάχους, που μελέτησε στην Ανατολική Κρήτη, τα οποία εμφανίζονται σε στρώματα μικρού πάχους και φέρουν συνήθως λεπτές διαστρώσεις πυριτόλιθων.

Η σειρά των πλακωδών αυτών μαρμάρων, εκτός από την Ανατολική Κρήτη, απαντάται και σε πολλές άλλες περιοχές του νησιού, όπως στα Λασηθιώτικα Όρη, στην περιοχή του Αγίου Νικολάου, στην Ίδη, στα Λευκά Όρη και στον Ταΰγετο, στον Πάρνωνα, στα Κύθηρα, στην Κάσο, στη Ρόδο και στην Κάρπαθο. Στις περιοχές αυτές τα μάρμαρα αυτά κατέχουν, σχεδόν πάντοτε, την κατώτερη τεκτονική ενότητα στο οικοδόμημα των τεκτονικών καλυμμάτων των περιοχών αυτών και συνιστούν κατά κανόνα μια ομοιόμορφη σειρά ανθρακικών στρωμάτων, κυρίως από πελαγικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους ή μάρμαρα, με πυριτόλιθους, ανωιουρασικής έως και ηωκαινικής-κατωολιγοκαινικής ηλικίας.

Για την ονομασία της παραπάνω σειράς μαρμάρων χρησιμοποιείται σήμερα από τους περισσότερους ερευνητές ο όρος *Σειρά ή Ενότητα των Plattenkalk*, αν και στη σειρά αυτή έχουν περιληφθεί και βαθύτεροι στρωματογραφικοί ορίζοντες, δηλαδή προανωιουρασικοί και μάλιστα χωρίς τα στρώματα των οριζόντων αυτών να είναι πλακώδη.

Επίσης, εκτός από την ονομασία Σειρά ή Ενότητα των Plattenkalk, τα μάρμαρα αυτά, μαζί με τους υποκείμενους σ' αυτά σχηματισμούς, αναφέρονται και ως Σειρά των Ταλαίων Ορέων (M. Epting et al., 1972) ή ως ζώνη της Ίδης (J. Bonneau, 1973, 1975) ή ακόμα ως Ενότητα της Κρήτης - Μάνης (N. Φυτρολάκης, 1980).

Παλαιότερα, οι Plattenkalk είχαν θεωρηθεί ως μέλη της «Μεταμορφωμένης Μάζας Κεντρικής Πελοποννήσου - Κρήτης», η οποία, κατά τις τότε αντιλήψεις, αποτελούσε το παλαιοζωικό υπόβαθρο της σειράς σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης, που αργότερα ενοποιήθηκε με την υποζώνη Γαβρόβου (J. Dercourt, 1964). Η λεπτομερέστερη μελέτη, όμως, των κρυσταλλικών αυτών ασβεστόλιθων-μαρμάρων και κυρίως η ανεύρεση σ' αυτούς τριαδικής μικροπανίδας (M. Epting et al., 1972) και μικροπανίδας του Τριτογενούς (N. Φυτρολάκης, 1972 και J. Bonneau, 1973) στην Κρήτη και κατωολιγοκαινικής μικροπανίδας (G. Bizon & F. Thiebault, 1974) στην Πελοπόννησο, όπως και η ανεύρεση, αργότερα, απολιθωμάτων σε όλους σχεδόν τους ορίζοντες της σειράς των Plattenkalk που εμφανίζονται στην περιοχή του Ταΰγετου (Κ. Ψωνής 1981, F. Thiebault 1982 κ.ά.), είχε ως αποτέλεσμα τη διάκριση των Plattenkalk σε μια αυτόνομη σειρά σχηματισμών, μεσοζωικής-κατω-ολιγοκαινικής ηλικίας, η οποία σε μερικές περιοχές παρουσιάζεται μαζί με το παλαιοζωικό υπόβαθρο της.

Οι σχηματισμοί της σειράς των Plattenkalk έχουν υποστεί χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση, με αποτέλεσμα να έχει καταστραφεί ένα σημαντικό μέρος από τους πρωτογενείς ιζηματογενείς χαρακτήρες τους. Παρά τη μεταμόρφωση, όμως, των Plattenkalk, με βάση τους χαρακτήρες που έχουν παραμείνει σ' αυτούς, καθώς επίσης από το είδος της πανίδας που έχει βρεθεί σε πολλούς στρωματογραφικούς ορίζοντες τους, διαπιστώθηκε ότι η ιζηματογένεσή τους έλαβε χώρα σε σχετικά βαθιά θάλασσα.

Επίσης, με βάση τα παραπάνω στοιχεία, βρέθηκε ότι η λιθοστρωματογραφική επαλληλία της σειράς των Plattenkalk παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τη σειρά των μη - μεταμορφωμένων σχηματισμών της Ιόνιας ζώνης, οι οποίες, στο σύνολο τους, δικαιολογούν την ταύτιση των δύο αυτών σειρών. Πρέπει, όμως, να αναφέρουμε ότι οι παραπάνω ενότητες, εκτός από τις ομοιότητες που παρουσιάζουν μεταξύ τους, έχουν και μερικές διαφορές, όπως είναι η απουσία των μεγάλου πάχους εβαποριτών από την ενότητα των Plattenkalk. Η διαφορά, όμως, αυτή, όπως και μερικές άλλες, μεταξύ των οποίων είναι η έναρξη και η λήξη της πελαγικής ιζηματογένεσης στις δύο σειρές, δε δικαιολογούν την τοποθέτησή τους σε διαφορετικούς παλαιογεωγραφικούς χώρους ιζηματογένεσης.



Σήμερα, είναι παραδεκτό από τους περισσότερους ερευνητές ότι η μεταμορφωμένη σειρά των Plattenkalk αποτελεί την προς τα νότια προέκταση της μη μεταμορφωμένης σειράς σχηματισμών της Ιόνιας ζώνης, που εμφανίζεται στο δυτικό τμήμα της Ηπειρωτικής Ελλάδας και στα Ιόνια νησιά. Εκτός, όμως, από την άποψη της ταύτισης της Ιόνιας ζώνης με τη σειρά των Plattenkalk, υπάρχουν και ορισμένοι ερευνητές που θεωρούν ότι ο παλαιογεωγραφικός χώρος των Plattenkalk δεν ταυτιζόταν εξ' ολοκλήρου με αυτόν της Ιόνιας ζώνης, αλλά ότι αυτός βρισκόταν κυρίως μεταξύ του χώρου της ζώνης των Παξών και της Ιόνιας ζώνης ή ότι αυτός ταυτιζόταν με το χώρο της ζώνης Παξών.

### 2.2.2 Η Ενότητα των Plattenkalk στην Κρήτη

Η μεσοζωική-ηωκαινική σειρά των Plattenkalk που εμφανίζεται στην Κρήτη ταυτίζεται επίσης με τη μη μεταμορφωμένη σειρά σχηματισμών της Ιόνιας ζώνης. Οι σχηματισμοί της σειράς αυτής έχουν, γενικά, υποστεί μεγαλύτερη ανακρυστάλλωση, συγκριτικά με τους σχηματισμούς των Plattenkalk της Νότιας Πελοποννήσου, εμφανίζονται σε πολλές περιοχές του νησιού και μάλιστα, σε μερικές περιπτώσεις, μαζί με μεγάλου πάχους σχηματισμούς του νεοπαλαιοζωικού υποβάθρου της σειράς αυτής.

Μια περιοχή της Κρήτης στην οποία εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση οι σχηματισμοί της Ενότητας των Plattenkalk, συμπεριλαμβανομένου και του νεοπαλαιοζωικού υποβάθρου της, είναι η Κεντρική Κρήτη και πιο συγκεκριμένα η περιοχή των Ταλαίων Ορέων, που βρίσκεται δυτικά της πόλης του Ηρακλείου. Οι σχηματισμοί της Ενότητας των Plattenkalk στην περιοχή αυτή συνιστούν μια αναστραμμένη σειρά σχηματισμών, μεγάλου πάχους, την οποία μελέτησαν: οι M. Epting et al. (1972), S. Kuss et G. Thorbecke (1974), N. Φντρολάκης (1980) κ.ά. Η σειρά αυτή, με το νεοπαλαιοζωικό υπόβαθρο της, από τα κάτω προς τα πάνω, έχει όπως παρακάτω (Σχήμα 2.3):

— Σχηματισμός Φόδελε: Αποτελείται στο μεν κατώτερο τμήμα του από κλαστικά πετρώματα (κροκαλοπαγή, χαλαζίτες και φυλλίτες), στο δε ανώτερο του μόνο από ανθρακικά πετρώματα (κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και πλευρικά δολομίτες), που εγκλείουν πολλά Τρηματοφόρα, Κοράλλια και Βρυόζωα. Το συνολικό ορατό πάχος του σχηματισμού αυτού είναι 1750-2000m και έχει ηλικία Κατώτερου (;)-Μέσου και Ανώτερου Περμίου.

— Σχηματισμός Σισών: Αποτελεί την προς τα πάνω εξέλιξη του προηγούμενου σχηματισμού και έχει πολλές ομοιότητες με αυτόν. Αρχίζει με ένα δολομιτικό κροκαλοπαγές,

πάχους 100m περίπου, ανωπερμικής ηλικίας, και συνεχίζει προς τα πάνω με ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα, πάχους 600m περίπου. Τα μάρμαρα αυτά, πολλές φορές, είναι ωολιθικά και φέρουν ωοειδή. Η ηλικία τους είναι κάτω-μεσοτριάδικη.

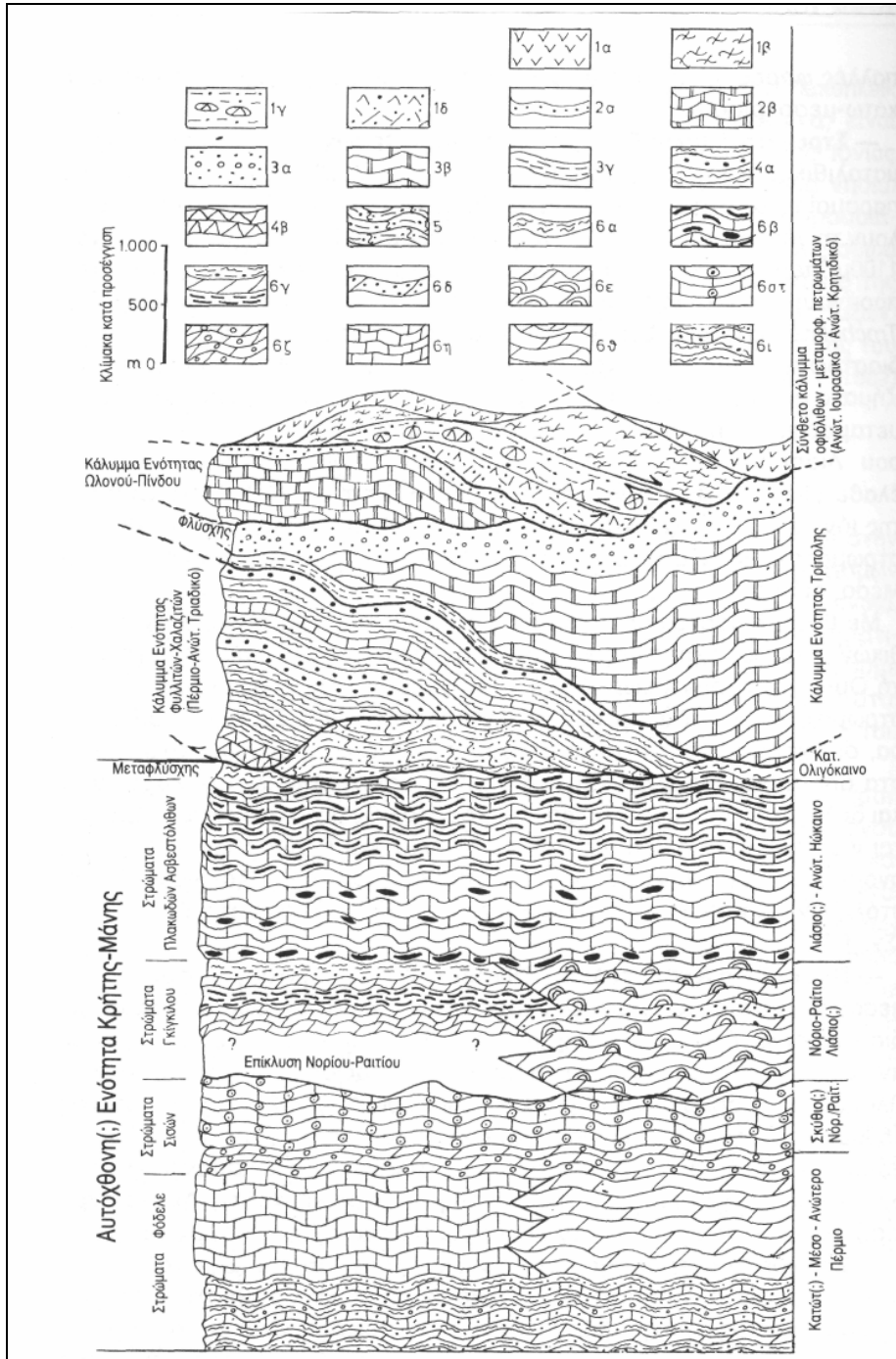
— Στρωματολιθικοί δολομίτες Ταλέων Ορέων: Ονομάστηκαν στρωματολιθικοί από τους M. Ertting et al. (1972), λόγω της συχνής παρουσίας σ' αυτούς στρωματολίθων, οι οποίοι, ως γνωστόν, οφείλουν τη γένεση τους στα Κυανοφύκη. Οι δολομίτες αυτοί έχουν πάχος 1100m περίπου, και βρίσκονται με ασυμφωνία επίκλυσης πάνω στον προηγούμενο σχηματισμό. Σε κροκαλοπαγή της βάσης τους βρέθηκε *Trocholina biconvexa*. Στο ανώτερο τμήμα τους περνούν σε μάρμαρα με διαστρώσεις πυριτικές και, γενικά, σε ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Τα ιζήματα αυτά φαίνεται ότι είναι τα αντίστοιχα των σχηματισμών της μη μεταμορφωμένης Ιόνιας ζώνης της Ηπείρου-Ακαρνανίας, του Ανώτερου Λιασίου-Ανώτερου Δογγερίου, των οποίων η ιζηματογένεση έλαθε χώρα, όταν η ανωτριάδικη-μεσολιάσια υποθαλάσσια τράπεζα της Ιόνιας ζώνης εξελίχθηκε σε βαθιά θαλάσσια αύλακα. Η ηλικία των στρωματολιθικών δολομιτών είναι: Ανώτερο Τριάδικό (Νόριο-Ραίτιο)-Μέσο Λιάσιο.

Με βάση λιθοστρωματογραφικά γνωρίσματα, ένα σύνολο σχιστολιθικών (κυρίως) σχηματισμών που απαντάται στη Δυτική Κρήτη (περιοχή Ομαλού) έχουν θεωρηθεί ότι αποτελούν πλευρική μετάβαση των στρωματολιθικών δολομιτών (N. Φυτρολάκης, 1980, Σχήμα 2.3). Ακριβέστερα, οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται από σχιστολιθικά στρώματα, στα οποία παρεμβάλλονται ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και δολομιτών και, μερικές φορές, κερατολιθικών στρωμάτων. Πρόκειται για τους σχηματισμούς που οι Τάταρης και Γ. Χριστοδούλου (1965) ονομάζουν «Σύστημα στρωμάτων υποκείμενων των Πλακωδών Ασβεστόλιθων» και οι N. Creutzburg et al. (1977) «Στρώματα Γκιγκίλου» (Σχήμα 2.3).

— Plattenkalk (Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι): Πρόκειται για τους λεπτο-μεσοστρωματώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, με διαστρώσεις ή/και βολβούς πυριτόλιθων, οι οποίοι λόγω της πολύ καλής στρώσης τους ονομάστηκαν Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι (L. Chalikiopoulos, 1903). Έχουν πάχος 1500m περίπου και η ιζηματογένεση τους έλαβε χώρα σε πελαγική θάλασσα. Εκτός από την περιοχή των Ταλέων Ορέων απαντώνται και σε πολλές άλλες περιοχές της Κρήτης (Ανατολική Κρήτη, Λευκά Όρη κ.ά.). Η ηλικία τους είναι: Μάλμιο (πολύ πιθανό) έως Ανώτερο Ηώκαινο.

— Στρώματα μετάβασης προς το φλύσχη: Είναι κυρίως εναλλασσόμενα στρώματα ασβεστιτικών σχιστόλιθων και ασθεστοφυλλιτών, μικρού πάχους (μέχρι 50m), χρώματος τεφροπράσινου ή βυσσινί, πάνω στα οποία είναι, κατά κανόνα, επωθημένοι σχημα-

τισμοί της Ενότητας Τρύπαλι ή της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς. Η ηλικία των μεταβατικών αυτών στρωμάτων είναι, κατά πάσα πιθανότητα, ανωηωκαινική έως και κατωολιγοκαινική.



**Σχήμα 2.3** Στρωματογραφικές – Τεκτονικές Ενότητες της νήσου Κρήτης (Ενότητα Plattenkalk, Ενότητα Τρύπαλι, Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά, ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, ζώνη Πίνδου. (Κατά Ν. Φυτρολάκη, 1980)

### **Υπόμνημα σχήματος 2.3:**

1α: Οφιόλιθοι, 1β: Κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα 1γ: Ανθρακικά ιζήματα με ερυθρές σχιστοφυείς μάργες και κερατόλιθους (Τριαδικό - Κρητιδικό), που συνοδεύονται από βασικούς ηφαιστίτες, 1δ: Φλυσχοειδή ιζήματα με διάβασες και ογκόλιθους. 2: Ενότητα Ωλονού - Πίνδου, (2α: Φλύσχης, 2β: Ασβεστόλιθοι με ραδιολαρίτες). 3: Ενότητα Τρίπολης, (3α: Φλύσχης, 3β: Ανθρακική σειρά, 3γ: Αργιλοσχιστολιθική - ανθρακική - φυλλιτική σειρά). 4: Ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών, (4α: Φυλλίτες - χαλαζίτες, 4β: Κυρίως ραουβάκες και εβαπορίτες). 5: Ενότητα Τρυπαλίου, 6: Ενότητα Κρήτης - Μάνης (των Plattenkalk). (6α: Μεταφλύσχης, 6β: Πλακώδεις ασβεστόλιθοι, 6γ: Στρώματα Γκιγκίλου, 6δ: Δολοαρενίτες και μικροκλαστικά ιζήματα, 6ε: Στρωματολιθικοί δολομίτες, 6στ: Κυρίως ωολιθικά ανθρακικά ιζήματα, 6ζ: Δολομιτικά κροκαλοπαγή, 6η: Ανοιχτόχρωμοι συμπαγείς ασβεστόλιθοι, 6θ: Στρωματώδεις βιτουμενιούχοι δολομίτες και 6ι: Εναλλαγές βιτουμενιούχων ανθρακικών μετακλαστικών ιζημάτων).

## **2.3 Ενότητα Τρύπαλι**

Η ενότητα αυτή εμφανίζεται μόνο στην Κρήτη (κυρίως στην Κεντροδυτική) και βρίσκεται πάντοτε επωθημένη πάνω σε σχηματισμούς της Ενότητας των Plattenkalk. Πρόκειται για την ενότητα που ο N. Creutzburg είχε ονομάσει, παλιότερα (1928) «adarakalke» και αργότερα (1975) μαζί με τον E. Siedel τη μετονόμασαν σε Ενότητα Τρύπαλι.

Οι σχηματισμοί της Ενότητας Τρύπαλι παρουσιάζουν, γενικά, πολλές ομοιότητες με τους τριαδικούς - λιάσιους σχηματισμούς της Ενότητας των Plattenkalk, δηλαδή με τους τριαδικούς δολομίτες και τους ασβεστόλιθους του Παντοκράτορα της Ιόνιας ζώνης, και θεωρούνται από πολλούς μελετητές ότι έχουν τοποθετηθεί τεκτονικά πάνω στην Ενότητα των Plattenkalk (B. Karakitsios & M. Bonneau, 1984). Αντίθετα, άλλοι μελετητές θεωρούν τους σχηματισμούς Τρύπαλι ότι είναι μέλη μιας εσωτερικότερης ενότητας από την ενότητα των Plattenkalk και άλλοι ότι αυτοί αποτελούν τα βαθύτερα μέλη της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς.

## **2.4 Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά**

### **2.4.1 Γενικά**

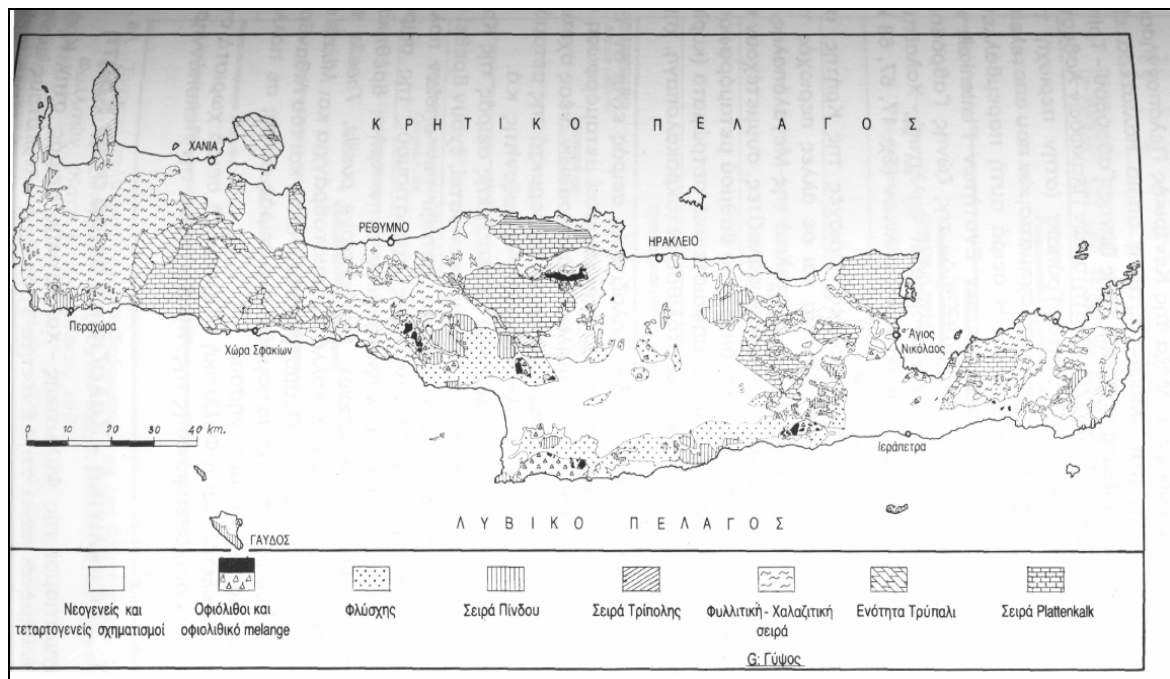
Πολλές ερευνητικές εργασίες διαφόρων μελετητών, που έγιναν κατά το σχετικά πρόσφατο παρελθόν στην ονομασθείσα από τον C. Renz (1940) «Μεταμορφωμένη Μάζα της Κεντρικής Πελοποννήσου - Κρήτης», έδειξαν ότι στη «Μάζα» αυτή, η οποία παλιότερα είχε θεωρηθεί ως το παλαιοζωικό υπόβαθρο της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπο-

λης, εκτός από τη μεταμορφωμένη Ενότητα των Plattenkalk (Πλακωδών Ασβεστόλιθων) και την Ενότητα Τρύπαλι (στην περιοχή της Κρήτης), συμμετέχει και μια άλλη σειρά σχηματισμών που αποτελείται κυρίως από φυλλίτες και χαλαζίτες. Η σειρά αυτή παρεμβάλλεται τεκτονικά μεταξύ των σχηματισμών των Ενοτήτων Plattenkalk και Τρύπαλι (υποκείμενοι) και των σχηματισμών της ζώνης Γαβρόβου -Τρίπολης (υπερκείμενοι) και έχει ονομαστεί Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά ή Φυλλιτικό Κάλυμμα ή σειρά των Φυλλιτών.

Σ' αυτή τη σειρά, εκτός από τους φυλλίτες και τους χαλαζίτες, συμμετέχουν και άλλα μεταμορφωμένα πετρώματα, διαφόρου βαθμού μεταμόρφωσης, όπως μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι, μεταφαιστειακά πετρώματα (κυρίως μεταβασάλτες), κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μετακροκαλοπαγή, χημικά ιζήματα (κοιτάσματα γύψου) κ.ά.

Χαρακτηριστικό της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς είναι ότι ένα μεγάλο τμήμα των σχηματισμών της έχει υποστεί μεταμόρφωση σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών, νέας σχετικά ηλικίας (του Κατώτερου Μειόκαινου), με τυπικά ορυκτά της μεταμόρφωσης αυτής, όπως είναι ο γλαυκοφανής, ο λωζονίτης κ.ά.

Στους σχηματισμούς της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς της Κρήτης, παρά τη μεταμόρφωση που αυτοί έχουν υποστεί, έχουν βρεθεί σε πολλές περιοχές διάφορα απολιθώματα, μεταξύ των οποίων πολλά χαρακτηριστικά, τα οποία δίνουν στους σχηματισμούς της σειράς αυτής περμοτριάδική ηλικία. Συγκεκριμένα στην Κρήτη βρέθηκαν: *Fusulinidae*, *Lutkevichinella simplex*, *Meandrospira pusilla*, *Theelia* sp., *Endothyranella* sp., Κωνόδοντα, πολλά Ελασματοβράγχια και *Mizzia* sp.



**Σχήμα 2.4** Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης. (Κατά V. Jacobshagen et al., 1986)

#### 2.4.2 Η Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά στην Κρήτη

Οι σχηματισμοί της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς στην Κρήτη είναι επωθημένοι πάνω στην Ενότητα Τρύπαλι ή πάνω στους ανώτερους ορίζοντες της Ενότητας των Plattenkalk (στους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους) ή στο μεταφλύσχη της Ενότητας αυτής. Αντίθετα, στην περιοχή των Ταλέων Ορέων η Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά είναι επωθημένη πάνω στους περμικούς σχηματισμούς της αναστραμμένης σειράς της Ενότητας των Plattenkalk (Σχήματα 2.3 και 2.4).

Η προς τα πάνω επαφή της σειράς αυτής είναι επίσης τεκτονική, χωρίς, όμως, να είναι δυνατή η ακριβής παρακολούθηση της τεκτονικής αυτής επαφής στο ύπαιθρο και η εκτίμηση του μεγέθους της.

Πιο συγκεκριμένα, στην Κρήτη πάνω στη Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά βρίσκεται τεκτονικά η ανθρακική σειρά της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης με το σχιστολιθικό (κατά κανόνα) υπόβαθρο της. Αυτό, όπως είναι φυσικό, έχει σαν συνέπεια να είναι δύσκολη η διάκριση της τεκτονικής αυτής επαφής, επειδή αυτή γίνεται μεταξύ σχιστολιθικών, γενικά, πετρωμάτων, του υποβάθρου της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης και της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς.

Το κατώτερο τμήμα της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς αποτελείται από δολομιτικούς ασβεστόλιθους, μαύρους αργιλικούς σχιστόλιθους, σχιστοψαμμίτες και ραουβάκες με κοιτάσματα γύψου - ανυδρίτη, όπως είναι τα κοιτάσματα: Αλτσί, Κάβο Σίδηρο, Στομίου και πολλά άλλα. Αντίθετα, το ανώτερο τμήμα της σειράς αυτής αποτελείται κυρίως από εναλλασσόμενους φυλλίτες και χαλαζίτες, με παρεμβολές λεπτοστρωματών μαρμάρων και μετακροκαλοπαγών, καθώς και σωμάτων μεταβασαλτών (N. Creuzburg & E. Siedel, 1975 κ.ά.).

Το πάχος της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς στην Ανατολική Κρήτη φτάνει τα 1000m περίπου, ενώ στη Δυτική είναι μεγαλύτερο από 1.500m (N. Φυτρολάκης, 1980).

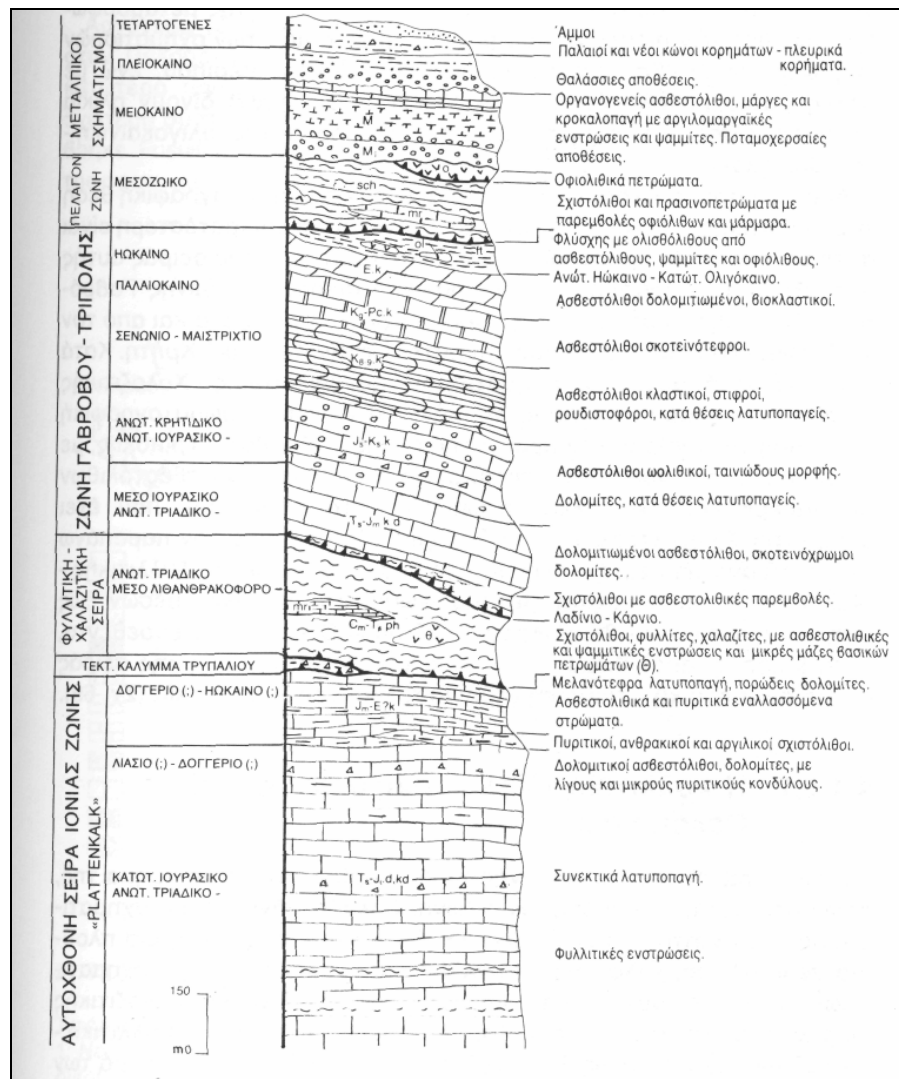
Σχετικά με την παλαιογεωγραφική θέση και την τεκτονική τοποθέτηση των σχηματισμών της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς υπάρχουν ερευνητές που θεωρούν ότι οι σχηματισμοί της σειράς αυτής αποτελούσαν το υπόβαθρο της ανθρακικής σειράς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης και ότι αυτοί, με τεκτονισμό, έχουν αποκολληθεί από αυτήν (K. Kopp & E. Ott 1977 και 1982, V. Karakitsios 1979 κ.ά.). Επίσης, υπάρχουν ερευνητές που υποστηρίζουν ότι οι σχηματισμοί της εν λόγω σειράς έχουν αποτεθεί σε διαφορετικό παλαιογεωγραφικό χώρο από το χώρο της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης και ότι αυτοί, ως σύνολο, αποτελούν μια ιδιαίτερη τεκτονική ενότητα (V. Jacobshagen et al. 1978 και 1979, N. Φυτρολάκης 1980 κ.ά.).

Επίσης, η ύπαρξη μεταμόρφωσης HP - LT (υψηλών πιέσεων -χαμηλών θερμοκρασιών) στους σχηματισμούς της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς, σε συνδυασμό και με το ότι η υπερκείμενη ανθρακική σειρά της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης δε φαίνεται να έχει υποστεί μια τέτοια μεταμόρφωση, οδήγησε ορισμένους ερευνητές (R. Altherr & E. Siedel, 1979 κ.ά.) να υποστηρίζουν ότι οι σχηματισμοί της σειράς αυτής αποτελούν ένα ξεχωριστό τεκτονικό κάλυμμα, ανεξάρτητο από τις άλλες ενότητες, και ότι το κάλυμμα αυτό αποτελεί ένα τμήμα μιας ωκεάνιας περιοχής που «καταβυθίστηκε» μεταξύ των παλαιογεωγραφικών χώρων της Ιόνιας ζώνης και της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης. Κατά τους E. Siedel et al. (1979), η Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά στην Κρήτη αποτελείται από δύο επί μέρους σειρές. Από τις σειρές αυτές, η πρώτη απαντάται σ' ολόκληρη την Κρήτη και στους σχηματισμούς της έχουν βρεθεί απολιθώματα ηερμικής και τριαδικής ηλικίας. Επίσης, οι σχηματισμοί της σειράς αυτής χαρακτηρίζονται από μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών. Αντίθετα, η δεύτερη σειρά απαντάται μόνο στην Ανατολική Κρήτη και χαρακτηρίζεται από αμφιθολίτες με πράσινη κερροστίλη και μοσχοβιτικούς σχιστόλιθους.

Με ραδιοχρονολογήσεις, που πραγματοποίησαν οι παραπάνω ερευνητές με τη μέθοδο K/Ar, διαπιστώθηκε ότι η ηλικία της μεταμόρφωσης των υψηλών πιέσεων - χαμηλών θερμοκρασιών των σχηματισμών της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς είναι 20m.y. περίπου, ενώ με άλλες ραδιοχρονολογήσεις οι E. Siedel et al (1982) δίνουν ηλικία μεταμόρφωσης των σχηματισμών της σειράς αυτής ολιγοκαινική - κατωμειοκαινική.

Από τις παραπάνω απόψεις, σχετικά με την παλαιογεωγραφική θέση της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς, φαίνεται ότι επικρατέστερη είναι αυτή με την οποία υποστηρίζεται ότι οι σχηματισμοί της σειράς αυτής αποτελούν το υπόβαθρο της ανθρακικής σειράς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης. Η άποψη αυτή υποστηρίχθηκε πρόσφατα και από τον V. Karakitsios (1987), ο οποίος εργάστηκε στην Κεντρική Κρήτη. Κατά τον ερευνητή αυτόν, οι σχηματισμοί της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς αποτελούν την προς τα κάτω κανονική στρωματογραφική μετάβαση της ανθρακικής σειράς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης, με τη μεσολάβηση ενός μεταβατικού ορίζοντα μαργαϊκών ασβεστόλιθων με παρεμβολές κλαστικών στρωμάτων στη βάση του, που έχει ονομαστεί *Σχηματισμός Ραβδούχων*. Επίσης, από τον παραπάνω μελετητή αναφέρεται ότι στην Κρήτη οι σχηματισμοί της Φυλλιτικής -Χαλαζιτικής σειράς έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες μέσων έως υψηλών πιέσεων και θερμοκρασίας 300-400°C και ότι τα ευρεθέντα, κατά καιρούς, απολιθώματα δίνουν στους σχηματισμούς της σειράς αυτής ανωπερμική - τριαδική (Κάρνιο ή λίγο νεότερη) ηλικία.





**Σχήμα 2.5** Οι στρωματογραφικές-τεκτονικές Ενότητες της Δυτικής Κρήτης, (Κατά Ι. Μυλωνάκη. Από γεω-λογικό χάρτη φύλλον «Ρέθυμνο», κλίμακας 1:50.000, Ι.Γ.Μ.Ε., 1988).

## 2.5 Οι σχηματισμοί της ζώνης Γαβρόβου -Τρίπολης στην Κρήτη

Στην περιοχή της Κρήτης εμφανίζεται ολόκληρη η ανθρακική σειρά της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης με το προαλπικό υπόβαθρο της. Συγκεκριμένα, η βάση της ανθρακικής μεσοζωικής σειράς (Μέσο - Ανώτερο Τριαδικό) της ζώνης αυτής περνά προς τα κάτω σε ένα σύνολο σχηματισμών από ηφαιστειακά πετρώματα με τα τοφφικά τους υλικά, πηλίτες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, φυλλίτες και χλωριτικούς, χαλαζιακούς και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους, με ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων, στους οποίους έχουν βρεθεί πανίδες του Λιθανθρακοφόρου - Περμίου και του Κατώτερου - Μέσου Τριαδικού.

Ο C. Ktenas (1924, 1926), ονόμασε τα υποκείμενα στρώματα της ανθρακικής σειράς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης *Στρώματα Τυρού*, από το όνομα του χωριού κοντά στο οποίο αυτά απαντώνται με την τυπική τους μορφή. Στην περιοχή αυτή, κατά το μελετητή αυτόν, τα στρώματα αυτά έχουν συνολικό πάχος 120m περίπου και αποτελούνται, από κάτω προς τα πάνω, από αργιλικούς σχιστόλιθους, με παρεμβολές τοφφιδίων και πορφυριτών με λαβραδόριο πράσινου χρώματος και ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και δολομιτών. Στη συνέχεια, προς τα πάνω, βρίσκονται τριαδικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της βάσης της ανθρακικής σειράς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης. Ο C. Ktenas συσχέτισε τα Στρώματα Τυρού με αυτά που απαντώνται με πορφυρίτες στην περιοχή των Κροκεών και έδωσε σ' αυτά περμοτριάδική ηλικία. Αργότερα, όμως, όταν βόρεια των Μολάων ο ίδιος βρήκε απολιθώματα *Fusulina* κ.ά. σε ασβεστόλιθους συνδεδεμένους με τόφφους και ψαμμίτες, έδωσε στα στρώματα αυτά νεοπαλαιοζωική ηλικία.

Η ηλικία των ηφαιστειακών πετρωμάτων των Στρωμάτων Τυρού, που κατά κανόνα συνοδεύονται και από πολλά πυροκλαστικά και τοφφικά υλικά, είναι με βεβαιότητα του Λαδινίου και ίσως και του Ανισίου. Η ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων αυτών, που συνήθως έχουν έναν τυπικό πορφυριτικό ιστό, είναι: πλαγιόκλαστα, κλινοπυρόξενοι, πρενίτης, πουμπελίτης, αλβίτης, πιστακίτης, χλωρίτης, ασβεστίτης κ.ά., έχουν δε υποστεί τα πετρώματα αυτά μια πολύ μικρού βαθμού μεταμόρφωση. Ο «κροκεάτης λίθος», που απαντάται στην περιοχή των Κροκεών, είναι ένα τυπικό παράδειγμα πορφυρίτη των μεσοτριάδικών αυτών ηφαιστειακών πετρωμάτων.

Η επαφή των στρωμάτων του υποβάθρου (των Στρωμάτων Τυρού) με την υπερκείμενη τους ανθρακική σειρά της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης είναι κατά κανόνα τεκτονισμένη. Υπάρχουν, όμως, θέσεις μη τεκτονισμένες, στις οποίες έχει διαπιστωθεί ότι η μεσοζωική ανθρακική σειρά της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης βρίσκεται με στρωματογραφική ασυμφωνία πάνω στα στρώματα του υποβάθρου της. Επίσης, έχουν βρεθεί θέσεις στις οποίες η μετάβαση των στρωμάτων του υποβάθρου προς τα πάνω είναι σύμφωνη. Αυτό γίνεται σε αρκετές περιοχές, όπου, συνήθως, αργιλοψαμμιτικά στρώματα με ασβεστολιθικές παρεμβολές, με ή χωρίς ηφαιστειακά πετρώματα, περνούν προς τα πάνω, με συμφωνία, προς δολομίτες (συνήθως) και ασβεστόλιθους, που συνιστούν τη βάση της ανθρακικής σειράς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης. Προς τα κάτω τα Στρώματα Τυρού, σε πολλές περιοχές, περνούν, όταν δεν είναι τεκτονισμένα, σε μια σειρά φυλλιδίων - χαλαζιτών και σχιστόλιθων, μεγάλου πάχους (μεγαλύτερου μερι-

κές φορές από 1000m), νεοπαλαιοζωικής κυρίως ηλικίας, η οποία έχει θεωρηθεί ότι συνιστά τα βαθύτερα μέλη του υποβάθρου της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης.

Στην Ανατολική Κρήτη, στη βάση ή μέσα στους σχηματισμούς του υποβάθρου της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης υπάρχουν, με μορφή τεκτονικών τεμαχών, πετρώματα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης (αμφιθολίτες, γρανατιτικοί σχιστόλιθοι κ.ά.), που με ραδιοχρονολογήσεις βρέθηκε ότι η μεταμόρφωση τους έλαβε χώρα κατά τον Ερκύνιο ορογενετικό κύκλο. Για τα μεταμορφωμένα αυτά πετρώματα υπάρχουν δύο απόψεις: Με τη μια από αυτές υποστηρίζεται ότι αυτά είναι σχηματισμοί του πραγματικού υποβάθρου της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης, ενώ με την άλλη γίνεται δεκτό ότι αυτά είναι ολισθόλιθοι ή τεκτονικά τεμάχια μέσα στους σχηματισμούς του υποβάθρου της ζώνης αυτής.

Σχετικά με τα βαθύτερα μέλη του υποβάθρου της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης, υπάρχουν και αντίθετες απόψεις πολλών ερευνητών που θεωρούν όλους αυτούς τους φυλλιτικούς - σχιστολιθικούς σχηματισμούς, που παρεμβάλλονται μεταξύ της βάσης της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης, δηλαδή των Στρωμάτων Τυρού, και της υποκείμενης ενότητας των Plattenkalk ή ότι αποτελούν μια ξεχωριστή παλαιογεωγραφική και τεκτονική ενότητα ή ότι πρόκειται για μεταμορφωμένους σχηματισμούς φλύσχη της σειράς των Plattenkalk (Γ. Χ. Κατσικάτσος, Γεωλογία της Ελλάδας, 1992, σελίδες: 132-133, 140-141, 144-150, 155-160, 169-170).

## **2.6 Γεωλογικοί Σχηματισμοί της περιοχής του έργου**

### **2.6.1 Γεωμορφολογία**

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερα ποικιλόμορφο ανάγλυφο, το οποίο οφείλεται στις γεωμορφολογικές συνθήκες που επικράτησαν στην περιοχή.

Η εξέλιξη του αναγλύφου επιτελείται από την αλληλεπίδραση των εξωγενών και των ενδογενών δυνάμεων. Ένα από τα χαρακτηριστικά στοιχεία του αναγλύφου είναι η κλίση του. Είναι ευνόητο ότι κάθε σημείο του δεν θα έχει την ίδια κλίση, γι' αυτό είναι πιο σωστό να γίνεται αναφορά για χωρική κατανομή της κλίσης.

Η περιοχή μελέτης, χαρακτηρίζεται από ένα ευρύ φάσμα τιμών κλίσεων. Άλλωστε η αντοχή στην αποσάθρωση (μια από τις κύριες αιτίες, μαζί με την τεκτονική, διαμόρφωσης κλίσης), διαφέρει από σχηματισμό σε σχηματισμό.

Σε περιοχές με έντονη διάβρωση η κλίση είναι 15 μοίρες, ενώ στους φυλλίτες συναντώνται ήπιες μορφολογικές κλίσεις έως 30 μοίρες. Αντίθετα, οι κλίσεις λαμβάνουν τιμές πάνω από 40 μοίρες, ενώ μέσα στο Πρασιανό Φαράγγι ακόμα και 70 μοίρες στην περίπτωση των Plattenkalk. Μέσες κλίσεις συναντώνται στους ασβεστόλιθους της ζώνης Γαβρόβρου – Τρίπολης, με τιμές από 30 έως 50 μοίρες. Τέλος, στις περιοχές των νεογενών παρουσιάζονται κλίσεις μικρότερες των 20 μοιρών ενώ στους βιογενείς ασβεστολίθους οι κλίσεις λαμβάνουν τιμές ακόμη και μέχρι τις 45 μοίρες.

## **2.6.2 Στρωματογραφία**

Η περιοχή μελέτης δομείται τόσο από ενότητες των κατώτερων καλυμμάτων όσο και των ανώτερων και φυσικά από τις τριτογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν συναντούνται ολόκληρες οι στρωματογραφικές ακολουθίες των ενοτήτων, παρά μονάχα κάποια τμήματα αυτών.

### **2.6.2.1 Ενότητα των Plattenkalk (Πλακώδων Ασβεστολίθων)**

Εμφανίζονται κατά τόπους άστρωτοι έως και παχυστρωματώδεις και είναι μικρο – μέσο κρυσταλλικοί. Λεπτές κερατολιθικές παρεμβολές υπό μορφή στρώσεων είναι μεμονωμένες. Ο σχηματισμός αυτός αποτελεί τους “sensu stricto” Plattenkalk και καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή, ειδικότερα, σχεδόν σε όλα τα πρανή του Πρασιανού φαράγγιού εμφανίζονται Plattenkalk, ενώ παρατηρούνται επίσης στα βορειοανατολικά, στα ανατολικά και στα νοτιοδυτικά της περιοχής.

### **2.6.2.2 Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών**

Η ενότητα αυτή είναι μεταμορφωμένη και βρίσκεται επωθημένη επί των προαναφερθέντων δολομιτών και δολομιτικών μαρμάρων, είναι δε ισχυρά πτυχωμένη σχεδόν σε όλες τις κλίμακες παρατήρησης ενώ μπορεί να διακριθεί σε δύο τμήματα: ένα κατώτερο αποτελούμενο από δολομίτες, ασβεστολίθους, αργιλικούς, γραφιτικούς, μαρμαρυγικούς, χλωριτικούς και χαλαζιτικούς σχιστολίθους και σε ένα ανώτερο αποτελούμενο

από ερυθρούς φυλλίτες και χαλαζίτες. Η επώθηση της επί των Plattenkalk εμφανίζει ζώνες κατάκλασης. Στα επιφανειακά της τμήματα εμφανίζει ισχυρή αποσάθρωση παρέχοντας εδαφικό κάλυμμα που κατά τόπους εμφανίζει πάχος περί το 1 m. Αξίζει να αναφερθούν οι φυλλιτικής προελεύσεως κροκάλες που παρατηρούνται κάτω από τους βιογενείς μειοκαινικούς ασβεστολίθους στο δυτικό αντέρεισμα του φαραγγιού. Η ενότητα αυτή καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση της στα νοτιοανατολικά της περιοχής ενώ δεν λείπουν εμφανίσεις της τόσο στα βόρεια όσο και στα δυτικά.

#### **2.6.2.3 Ενότητα Τρίπολης**

Η ενότητα της Τρίπολης εμφανίζεται στην περιοχή σε μικρή έκταση. Υπέρκειται του καλύμματος των Φυλλιτών – Χαλαζιτών και συνίσταται από ανακρυσταλλωμένους δολομιτωμένους ασβεστολίθους και δολομίτες, μέσο έως παχυ-στρωματώδεις. Κατά θέσεις, είναι έντονα τεκτονισμένοι ενώ έχουν χρώμα ανοιχτότεφρο.

#### **2.6.2.4 Νεογενείς και Τεταρτογενείς Αποθέσεις**

Οι Μειοκαινικές αποθέσεις καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στο δυτικό αντέρεισμα του Πρασιανού Φαραγγιού ενώ μπορούν να διαχωρισθούν σε δύο ορίζοντες: έναν κατώτερο (ομάδα Πρίνας – Τεφελίου) που περιλαμβάνει χαλαρά συνδεδεμένα κροκαλοπαγή χαλαζιτικής και ασβεστολιθικής προέλευσης με αργιλικό συνδετικό υλικό και κατά τόπους αργιλικές ενδιαστρώσεις, έναν ανώτερο ορίζοντα από οργανογενείς υφάλλωδεις ασβεστολίθους, υποκίτρινους έως υπόλευκους, με κοράλλια και φύκη, κατά τόπους βρέθηκαν και μάργες. Οι σχηματισμοί αυτοί επικάθονται ασύμφωνα επί της ενότητας φυλλιτών – χαλαζιτών και κατά τόπους της ενότητας των Plattenkalk. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι ο κατώτερος ορίζοντας (κυρίως χαλαρά συνδεδεμένα κροκαλοπαγή) βρέθηκε να υπόκειται των βιογενών ασβεστολίθων, μονάχα στα δυτικά του Πρασιανού Φαραγγιού, ενώ στα ανατολικά αυτού έχουμε απευθείας ασυμφωνία των βιογενών ασβεστολίθων άλλοτε επί των Plattenkalk και άλλοτε επί των Φυλλιτών – Χαλαζιτών.

Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί εμφανίζονται κυρίως στην νότια έξοδο του Πρασιανού φαραγγιού σε μικρή έκταση και συνίστανται από ασβεστολιθικές και μαργαϊκές

κροκάλες, καθώς επίσης και από αποστρογγυλωμένα χαλίκια συνθέτοντας τις εμφανιζόμενες αναβαθμίδες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

### 3.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν σαν στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Η μετρούμενη ποσότητα είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων και περιλαμβάνει:
  - Μέθοδο του φυσικού δυναμικού
  - Μέθοδο των τελλουρικών ρευμάτων
2. Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία και περιλαμβάνει:
  - Μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
  - Μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας
  - Μέθοδο των ισοδύναμων γραμμών

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία στη Γεωθερμία, στην Κοιτασματολογία, στην Τεχνική Γεωλογία και στην Αρχαιολογία.

### 3.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους, τόσο από τη λειτουργική πλευρά όσο και από την θεωρητική πλευρά.

Έχει σκοπό τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, ή καλύτερα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που ονομάζεται ηλεκτρική δομή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους. Επομένως, από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της δομής. Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της μεθόδου γίνεται παρακάτω η εξήγηση κάποιων εννοιών που είναι πολύ σημαντικές για την εφαρμογή της.

### 3.2.1 Ειδική ηλεκτρική Αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση. Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του Ohm:

Αν μια ορθογώνια ράβδος με διατομή  $A$  και μήκος  $L$  διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$ , η τάση  $V$  ανάμεσα στα άκρα της ράβδου θα είναι:

$$V = I R \quad (3.1)$$

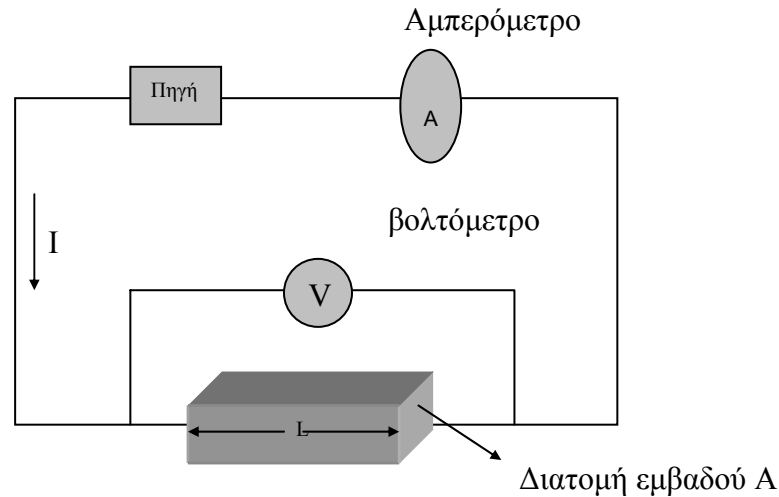
Όπου  $R$ , η ηλεκτρική αντίσταση (Ohm).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3.2)$$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το 1 Ohm.m, μερικές φορές, όμως, χρησιμοποιείται και η μονάδα 1 Ωcm, όπου 1 Ohm.m = 100 Ohm.cm. Το αντίστροφο,  $\sigma = 1/\rho$ , της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα, SI, το siemens/m.





**Σχήμα 3.1:** Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από  $10^{-6}$  Ohm.m σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι  $10^{15}$  Ohm.m σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα (Πίνακας 1). Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ  $10^{-6}$  Ohm.m και  $10^{-1}$  Ohm.m χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ  $10^8$  και  $10^{15}$  Ohm.m. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι: α) η λιθολογία, β) το πορώδες, γ) η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων, δ) η θερμοκρασία.

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
<b>ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ</b>	80-250
<b>ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ</b>	
Άργιλοι	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
<b>ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ</b>	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500

**Πίνακας 1:** Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων (Βαφείδης et al, 1991, Βαφείδης και Αμολοχίτης 1992).

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους συνδεδεμένα με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος δημιουργείται κλειστό κύκλωμα, στο οποίο η γη αποτελεί τον αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή, ο αέρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, όλο το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο διοχετεύεται στη γη.

Για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται ότι η γη είναι ομοιογενής και ισότροπη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$ . Επιπλέον τα ηλεκτρόδια θεωρούνται σημειακά, δηλαδή οι εξισώσεις που προκύπτουν, ισχύουν για σημειακή πηγή. Αρχικά η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων θεωρείται πολύ μεγάλη, ώστε να μπορεί να μελετηθεί το κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο η κίνηση των θετικών φορτίων γίνεται από το ηλεκτρόδιο προς τη γη. Επειδή, η γη θεωρείται ομοιογενής, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και οι γραμμές που απεικονίζουν τη ροή (γραμμές ρεύματος) μπορούν να θεωρηθούν ως ακτίνες ημισφαιρικών επιφανειών που έχουν κέντρο την πηγή. Η αντίσταση  $R$  στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, που παρουσιάζει μία ημισφαιρική δομή (αγωγός) ακτίνας  $d$ , δί-

νεται σύμφωνα με τη σχέση (3.3) από το γινόμενο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  με τον λόγο της ακτίνας  $d$  προς το εμβαδόν  $2\pi d^2$  της ημισφαιρικής επιφάνειας.

$$R = \rho \frac{d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad (3.3)$$

Η διαφορά  $\Delta V_d$  του δυναμικού  $V_o$  της πηγής από το δυναμικό  $V_d$  όλων των σημείων που απέχουν απόσταση  $d$  από την πηγή που προκαλείται από τη ροή ρεύματος, έντασης  $I$ , μέσα από την ημισφαιρική δομή είναι:

$$\Delta V_d = V_d - V_o = IR = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad (3.4)$$

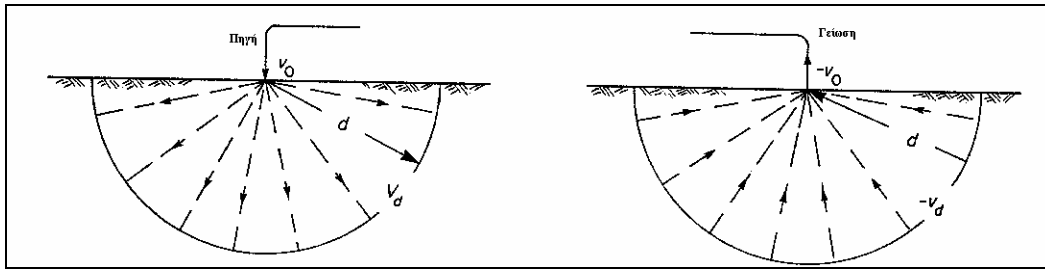
Η επιφάνεια που περιλαμβάνει όλα τα σημεία με το ίδιο δυναμικό ονομάζεται ισοδυναμική επιφάνεια.

Το δυναμικό στο απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής είναι  $-V_o$ . Το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο έλκει τα θετικά ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα οι γραμμές ρεύματος να συγκλίνουν προς αυτό από όλες τις διευθύνσεις. Μία ημισφαιρική δομή ακτίνας  $d$  με κέντρο αυτό το ηλεκτρόδιο θα παρουσιάζει αντίσταση  $R$  στη ροή του ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση (3.3).

Η διαφορά μεταξύ του δυναμικού  $-V_d$  όλων των σημείων που απέχουν απόσταση  $d$  από το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και του δυναμικού  $-V_o$  θα είναι:

$$-\Delta V_d = -V_d - (-V_o) = V_o - V_d = -IR = -\frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad (3.5)$$

Στην περίπτωση, λοιπόν, που το ηλεκτρόδιο είναι θετικά φορτισμένο, το ηλεκτρικό ρεύμα απομακρύνεται από αυτό, ενώ όταν το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικά φορτισμένο, το ρεύμα συγκλίνει προς αυτό. Και στις δύο περιπτώσεις οι γραμμές ρεύματος αρχίζουν ακτινικά από το ηλεκτρόδιο, ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο (σχήμα 3.2). Οι γραμμές ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες.

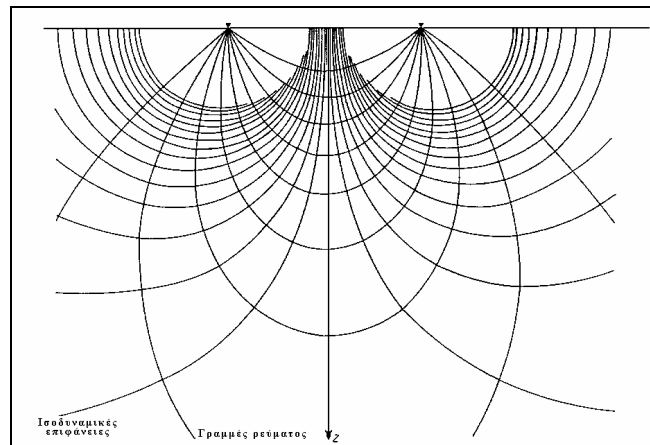


**Σχήμα 3.2:** Ομοιόμορφη ροή ηλεκτρίωνφορτίων προς όλες τις κατεθύνσεις σε ομοιογενές μέσο (Γκανιάτσος, 2000, Σούρλας, 2000).

Όταν η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων θεωρηθεί μικρή, τότε το δυναμικό όλων των σημείων στο έδαφος δίδεται από τη σχέση 3.6 (Βαφείδης, 2001):

$$V = V_{d1} + V_{d2} = V_{d1} - V_o + V_o + V_{d2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (3.6)$$

Γίνεται η σχεδίαση των ισοδυναμικών επιφανειών. Οι γραμμές ρεύματος σχεδιάζονται κάθετα στις ισοδυναμικές επιφάνειες. Τόσο οι γραμμές ρεύματος όσο και οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι συμμετρικές ως προς την ευθεία που τέμνει κάθετα και στο μέσο το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια.



**Σχήμα 3.3:** Απεικόνιση του δυναμικού πεδίου με δυναμικές γραμμές (Reynolds, 1997, Σούρλας 2000).

Το σχήμα 3.3 ισχύει για κάθε επίπεδο που περιέχει τα δύο ηλεκτρόδια, ανεξάρτητα από τη γωνία κλίσης του ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

### 3.3 Εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Για την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνδέονται δύο ηλεκτρόδια A, B με τους πόλους πηγής συνεχούς ρεύματος και εισάγονται στο έδαφος. Τα ηλεκτρόδια A, B λέγονται ηλεκτρόδια ρεύματος και τα ηλεκτρόδια M, N λέγονται ηλεκτρόδια δυναμικού. Συνήθως, αλλά όχι πάντα, και τα τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή.

#### 3.3.1 Διάταξη ηλεκτροδίων ρεύματος (A, B) και δυναμικού (M, N)

Το δυναμικό στο σημείο M που οφείλεται στο θετικό ηλεκτρόδιο A και στο αρνητικό ηλεκτρόδιο B, σύμφωνα με τη σχέση 3.7 είναι:

$$V_M = V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (3.7)$$

Αντίστοιχα, το δυναμικό στο σημείο N είναι:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (3.8)$$

Η διαφορά δυναμικού  $\Delta V = V_M - V_N$  που θα μετρηθεί από το βολτόμετρο, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = V_M - V_N = \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (3.9)$$

Λύνοντας ως προς  $\rho$  προκύπτει η σχέση που δίνει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} = K \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.10)$$

Η ποσότητα  $2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$  ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής, συμβολίζεται με K και η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί αν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι γνωστές.

Μετρώντας, λοιπόν, την τάση και γνωρίζοντας την ένταση του ρεύματος και τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων υπολογίζεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδά-

φους. Η τιμή της παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων, δηλαδή αν η ένταση του ρεύματος διατηρηθεί σταθερή και η θέση των ηλεκτροδίων μεταβληθεί, τότε αλλάζει και η τιμή της τάσης  $\Delta V$ , ώστε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση να παραμένει σταθερή.

### 3.3.2 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Η αντίσταση που υπολογίζεται από τη σχέση (3.10) εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ( $\rho_a$ ).

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. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$ , σε αντίθεση με τη φαινόμενη που είναι φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, είναι ιδιότητα των πετρωμάτων και των ορυκτών.

Επειδή δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος από μετρήσεις στην επιφάνεια της γης, υπολογίζεται αρχικά η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho_a$ , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων που θα περιγραφούν παρακάτω.

Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος όπως: α) την ορυκτολογική σύσταση, β) το πορώδες, τη φύση και τη θερμοκρασία των περιεχόμενων ρευστών, γ) τη κατάσταση ρηγμάτωσης και δ) το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων

## 3.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων

Οι τρεις πιο σημαντικές διατάξεις είναι:

- Διάταξη Wenner.

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, δηλαδή,  $AM = MN = NB = a$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4α. Έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho_a$  θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I},$$

με γεωμετρικό συντελεστή  $K = 2\pi \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi a$ . Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση που δίνει τη δομή του υπεδάφους, τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται κάθε φορά συμμετρικά ως προς ένα σημείο, που θεωρείται το κέντρο της βυθοσκόπησης.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής χαρτογράφησης, το  $a$  παραμένει σταθερό και τα τέσσερα ηλεκτρόδια μεταφέρονται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.

Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αλλά παρουσιάζει το φαινόμενο της διπλής κορυφής, δηλαδή μεγάλη τιμή πριν και μετά τη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα, ενώ δίνει μικρή τιμή ακριβώς πάνω από τη δομή. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η δομή έχει μικρότερη αντίσταση. Παρά τη γεωμετρική της απλότητα, παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, αφού κατά την πραγματοποίηση κάθε νέας μέτρησης πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια.

- Διάταξη Schlumberger.

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N είναι ανάμεσα στα A και B και σε απόσταση b από το κέντρο της διάταξης. Έτσι, είναι  $AB = 2L$  και  $MN = 2b = I$ , η απόσταση 2b μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση 2L μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4β. Έτσι, ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b}$$

Επειδή, όμως, ( $L \gg b$ ) τότε  $(L^2 - b^2) \sim L^2$ , η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i}$$

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Αντίθετα, η απόσταση για τα ηλεκτρόδια ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στη διάταξη Wenner.

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων, επειδή, αντίθετα με τις άλλες διάταξεις, απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την ηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει στον περιορισμό των ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες. Το μειονέκτημά της είναι ότι έχει μικρό σήμα, δηλαδή δε δίνει έντονα τη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Επίσης και σε αυτή τη μέθοδο παρατηρείται το φαινόμενο της διπλής κορυφής.

- Διάταξη Διπόλου – Διπόλου

Σε αυτή τη διάταξη η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος είναι ίση με  $a$ . Ομοίως,  $a$  είναι και το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγαριών των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη και ίση με  $na$  ( $n \gg 1$ ), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4γ.

Ο γεωμετρικός συντελεστής  $K$  για τη διάταξη διπόλου – διπόλου και για  $n \gg 1$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \pi n a (n + 1)(n + 2)$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από τη σχέση:

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

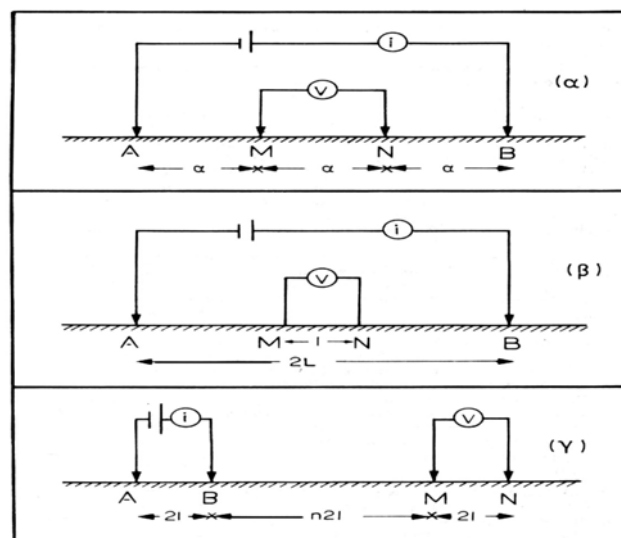
Πλεονεκτήματα της διάταξης αποτελούν: α) η απόσταση  $2na$ , ανάμεσα στα δίπολα ρεύματος και δυναμικού μπορεί να αυξηθεί αρκετά χωρίς να χρειάζονται μεγάλα μήκη καλωδίων και β) το πρόβλημα της διπλής κορυφής δεν εμφανίζεται στη διάταξη διπόλου – διπόλου. Το μειονέκτημά της είναι ότι επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλε-



κτροδίων ρεύματος είναι μικρή, περιορίζεται το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους.

Επίσης, απλά αναφέρονται οι παρακάτω διατάξεις:

- Τετραγωνική διάταξη. Στη διάταξη αυτή τα τέσσερα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις κορυφές τετραγώνου και αποτελούν τη βάση, πάνω στην οποία βρίσκεται το όργανο μέτρησης.
- Διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου. Μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από τη Wenner, αν τα ηλεκτρόδια N και B τοποθετηθούν σε απόσταση από τα άλλα δύο. Το ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων, τα A και M, παραμένει σταθερό και το άλλο, τα N και B, μετακινείται στην περιοχή μελέτης. Θεωρώντας σταθερό το ηλεκτρικό πεδίο, μεγάλες μεταβολές στη μετρούμενη τάση οφείλονται σε δομές που παρουσιάζουν αντίθεση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τα περιβάλλοντα πετρώματα, βρίσκονται κοντά στο κινούμενο ζευγάρι και ο εντοπισμός τους αποτελεί το στόχο της μεθόδου.



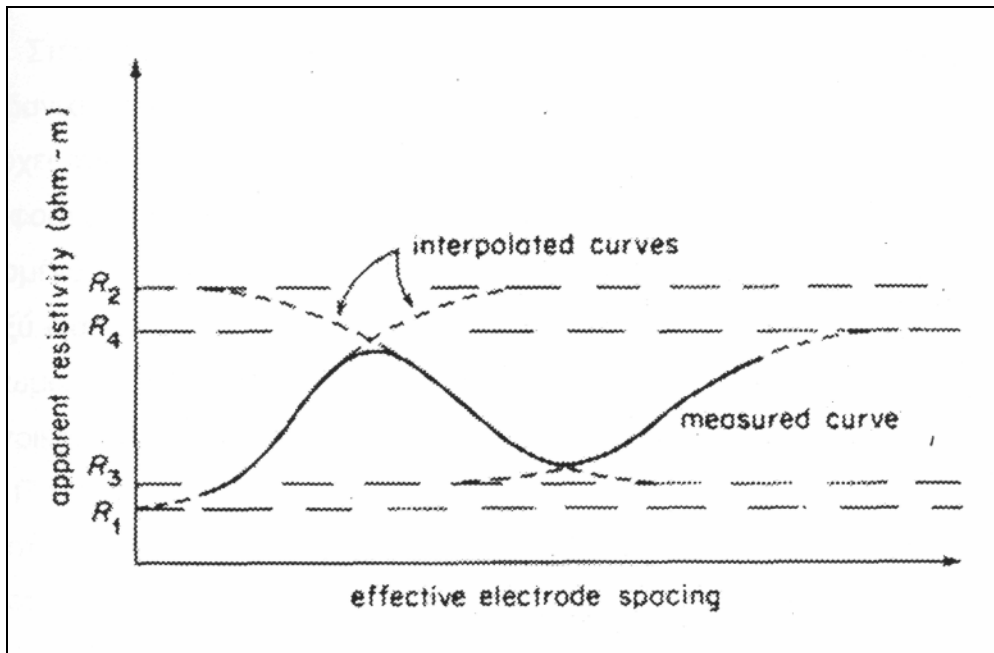
**Σχήμα 3.4:** Διατάξεις (α) Wenner, (β) Schlumberger και (γ) διπόλου-διπόλου (Παπαζάχος, 1986)

### 3.5 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση

### 3.5.1 Εισαγωγή

Με την ηλεκτρική βυθοσκόπηση προσδιορίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho_a$  σε σταθερό σημείο της επιφάνειας για διαδοχικά αυξανόμενες τιμές του γεωμετρικού συντελεστή  $K$ , με αποτέλεσμα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτό συμβαίνει αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος σταδιακά. Καθώς η διάταξη των ηλεκτροδίων απλώνεται, η ίδια ποσότητα ρεύματος κατανέμεται σε παχύτερη ζώνη. Αρα, η ηλεκτρική αντίσταση των βαθύτερων γεωλογικών στρωμάτων επηρεάζει τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Εναλλασσόμενα στρώματα υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης, μπορούν να εμφανισθούν σε γράφημα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος (σχήμα 3.5).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Schlumberger για τη διεξαγωγή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Ανάμεσα στις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, η διάταξη Wenner είναι η λιγότερο κατάλληλη για τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, λόγω της μετακίνησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων σε κάθε πρόσθετη μέτρηση. Αντίθετα, στη διάταξη Schlumberger τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν στην ίδια θέση, και μόνο τα ηλεκτρόδια του ρεύματος μετακινούνται για κάθε επιπλέον μέτρηση.



**Σχήμα 3.5:** Γράφημα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής και της αντίστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος, για τον υπολογισμό εναλλασσόμενων υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης στρωμάτων, με τη βοήθεια της διάταξης Wenner. (Robinson, Coruh, 1988).

### 3.5.2 Διεξαγωγή της Ηλεκτρικής Βυθοσκόπησης

Κατά την εκτέλεση της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Λαμβάνεται μέριμνα ώστε η ανάπτυξη των γραμμών ρεύματος να γίνεται σε ευθεία και όσο το δυνατόν παράλληλα στην παράταξη. Έτσι, ελέγχεται η περιοχή μελέτης πριν να ξεκινήσει η βυθοσκόπηση για την αποφυγή προβλημάτων όπως η ύπαρξη χειμάρρων, φαραγγιών, λόφων, οικημάτων, φρακτών κ.α.
- Συνδέεται το όργανο με τα καλώδια, και τοποθετείται στο σημείο που θα αποτελεί το κέντρο της βυθοσκόπησης, το οποίο επιλέγεται ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής.
- Τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος εκατέρωθεν του κέντρου σε απόσταση  $MN/2$  και  $AB/2$  αντίστοιχα. Στη συνέχεια γίνεται η σύνδεση των ηλεκτροδίων Α, Β με τα καλώδια, διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα και πραγματοποιείται η μέτρηση, όπου λαμβάνονται συγκεκριμένες

τιμές ρεύματος  $I$  και δυναμικού  $V$ . Στη συνέχεια τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια του ρεύματος σε μεγαλύτερη απόσταση  $AB/2$  και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

- Η συνάρτηση μεταβολής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho_a$ , με το βάθος σχεδιάζεται σε διπλό λογαριθμικό χαρτί κατά τη λήψη των μετρήσεων έτσι ώστε να ελέγχεται με ένα ακόμη τρόπο η αξιοπιστία των μετρήσεων.
- Η διαφορά δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης  $AB/2$ , ενώ όταν η τιμή προσεγγίζει το 0,1 mV, η μέτρηση θεωρείται μη αξιόπιστη. Σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται το  $MN/2$  και για το ίδιο  $AB/2$  λαμβάνεται νέα μέτρηση.
- Το μέγιστο μήκος της ανάπτυξης των ηλεκτροδίων ρεύματος καθορίζεται από το αν έχει εντοπιστεί γεωηλεκτρικά το πέτρωμα που στόχο έχει η βυθοσκόπηση.
- Η απόσταση του ημιαναπτύγματος  $AB/2$  και οι μετρούμενες τιμές της έντασης του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού καταγράφονται σε ειδικά διαμορφωμένα έντυπα για τη μετέπειτα επεξεργασία τους.

### 3.5.3 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής βυθοσκόπησης

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα Resix και Ipi2win, τα οποία είναι λογισμικά πακέτα επεξεργασίας και μοντελοποίησης των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Γίνεται εισαγωγή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που μετρήθηκε συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων και εξάγεται γεωηλεκτρικό μοντέλο της υπό μελέτη περιοχής.

## 3.6 Ηλεκτρική Τομογραφία

### 3.6.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Ο όρος τομογραφία παράγεται από τη λέξη «τομή» και σημαίνει απεικόνιση τομής π.χ. του υπεδάφους. Στην ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η εύρεση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατή με τους αλγόριθμους αντιστροφής. Αν και η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss – Newton με εξομάλυνση αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

Με την ηλεκτρική τομογραφία επιδιώκεται ο καθορισμός της ηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, δηλαδή η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

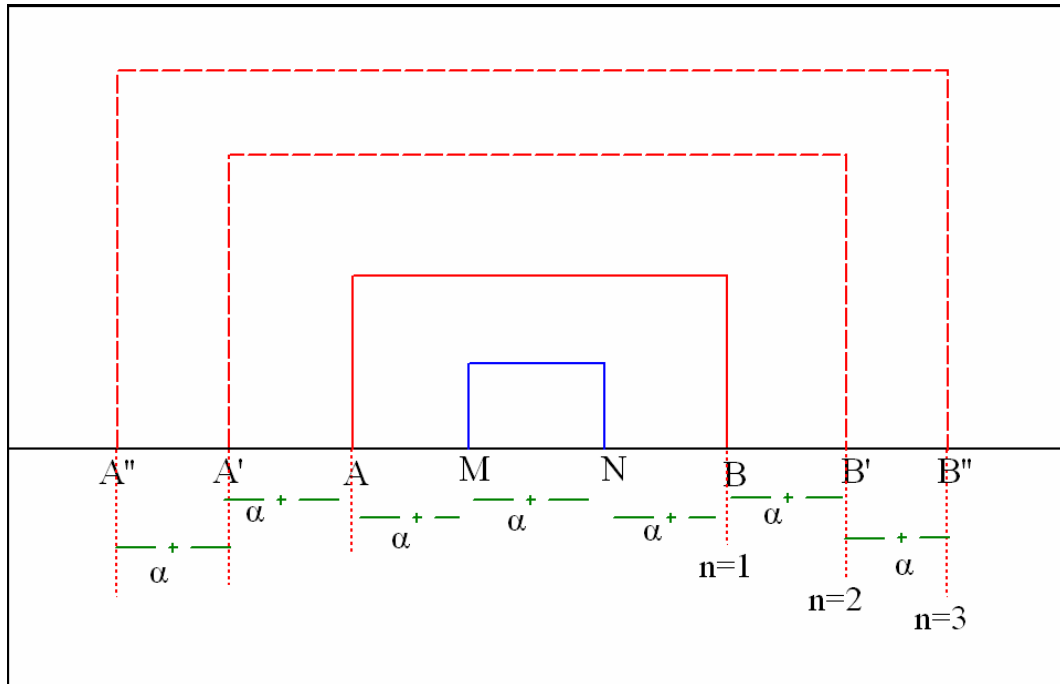
### 3.6.2 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων

Διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια της γης έχουν προταθεί για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Wenner - Schlumberger. Σε αυτή τη διάταξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, στην πρώτη μέτρηση τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (M, N) απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $a$ , καθώς και τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (A, B), όπως στη διάταξη Wenner. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική

αντίσταση, για αυτή τη μέτρηση, λαμβάνεται από τη σχέση:  $\rho_a = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I}$ . Από την επόμενη μέτρηση μετακινούνται τα ηλεκτρόδια ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά με μεταξύ τους απόσταση  $a$ . Συνεχίζοντας με την ίδια διαδι-

κασία η διάταξη εξελίσσεται σε Schlumberger και η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντί-

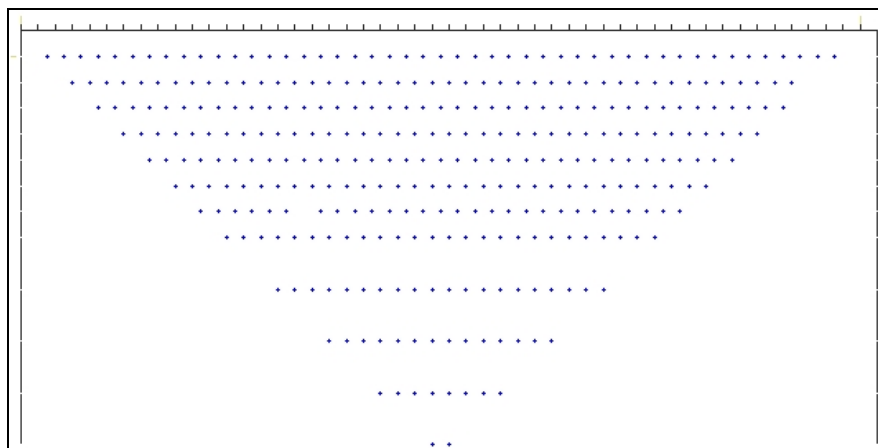
σταση λαμβάνεται από τη σχέση:  $\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i}$ , όπου  $\Delta V$  είναι η διαφορά δυναμικού στα δύο ηλεκτρόδια,  $I$  είναι η ένταση του ρεύματος,  $L$  ( $L = na$ ) είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και  $a$  είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού.



**Σχήμα 3.6:** Διάταξη Wenner – Schlumberger.

Για τη συλλογή των δεδομένων, κάθε ηλεκτρόδιο έχει έναν αριθμό για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων με αριθμητική σειρά. Όλες οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίστηκαν, τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο από την επιφάνεια του εδάφους που ονομάζεται επίπεδο δεδομένων.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (σχ. 3.7). Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



*Σχήμα 3.7: Διάταξη των δεδομένων στη ψευδοτομή του υπεδάφους (Σούρλας 2000).*

### 3.6.3 Εξοπλισμός ηλεκτρικής τομογραφίας

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται συνήθως κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελείται από: πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όργανα μέτρησης του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, ηλεκτρόδια και μονωμένα καλώδια μεγάλου μήκους.

Κατά την πραγματοποίηση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Δύο καρούλια το καθένα με καλώδιο των 500 m για την ανάπτυξη της γραμμής ηλεκτροδίων ρεύματος AB.
- Δύο καλώδια για τη σύνδεση των ηλεκτροδίων δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού είναι απλές ανοξείδωτοι ράβδοι από χάλυβα.
- Ακόντια και σημαίες για τη σήμανση της γραμμής ανάπτυξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού.
- Πολύμετρο για τη μέτρηση της αντίστασης επαφής του συστήματος "ηλεκτρόδιο - γη".
- Πυξίδα για το προσανατολισμό της γραμμής μελέτης.
- Δοχεία μεταφοράς αλατούχου ύδατος για τη βελτίωση επαφής του συστήματος "ηλεκτρόδιο - γη".
- Όργανο Μέτρησης: Κατά την εκτέλεση της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε όργανο μέτρησης ειδικών αντιστάσεων, STING-R1,

το οποίο: α) εισάγει στην γη ρεύμα AC, που η ένταση του κυμαίνεται μεταξύ 0,1-200 mA και β) μετράει τάση τάξης μεγέθους 0,05 Volt.

#### 3.6.4 Διεξαγωγή της ηλεκτρικής τομογραφίας

Κατά την εκτέλεση των εργασιών υπαίθρου ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Λαμβάνεται μέριμνα ώστε η ανάπτυξη των γραμμών μελέτης να γίνεται σε ευθεία και όσο το δυνατόν παράλληλα στην παράταξη.
- Τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια κατά μήκος της γραμμής μελέτης, όπου το κάθε ηλεκτρόδιο απέχει απόσταση  $a$  από το άλλο. Ταυτόχρονα τοποθετούνται αριθμημένες σημαίες δίπλα στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια.
- Συνδέεται το όργανο με τα καλώδια, και τοποθετείται δίπλα στη γραμμή μελέτης.
- Τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος εκατέρωθεν του επιλεγμένου κέντρου σε απόσταση  $MN/2$  και  $AB/2$  αντίστοιχα. Στη συνέχεια γίνεται η σύνδεση των ηλεκτροδίων A, B με τα καλώδια, διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα και πραγματοποιείται η μέτρηση, όπου λαμβάνονται συγκεκριμένες τιμές ρεύματος  $i$  και δυναμικού  $V$ . Στη συνέχεια τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετούνται σε μεγαλύτερη απόσταση  $AB/2$  και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.
- Το κέντρο μετακινείται κατά απόσταση  $a$  και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις όπως στο προηγούμενο βήμα.
- Οι αποστάσεις των ημιαναπτυγμάτων  $AB/2$  και οι μετρούμενες τιμές της έντασης του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού καταγράφονται σε ειδικά διαμορφωμένα έντυπα για την επεξεργασία τους.

#### 3.6.5 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα Res2dinv, το οποίο υπολογίζει τη πραγματική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  και στηρίζεται στην αντιστροφή των δεδομένων. Στο τέλος, διακρίνονται οι ψευδοτομές των μετρούμενων τιμών της φαινόμενης



αντίστασης, των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης αντίστασης, καθώς και το μοντέλο των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

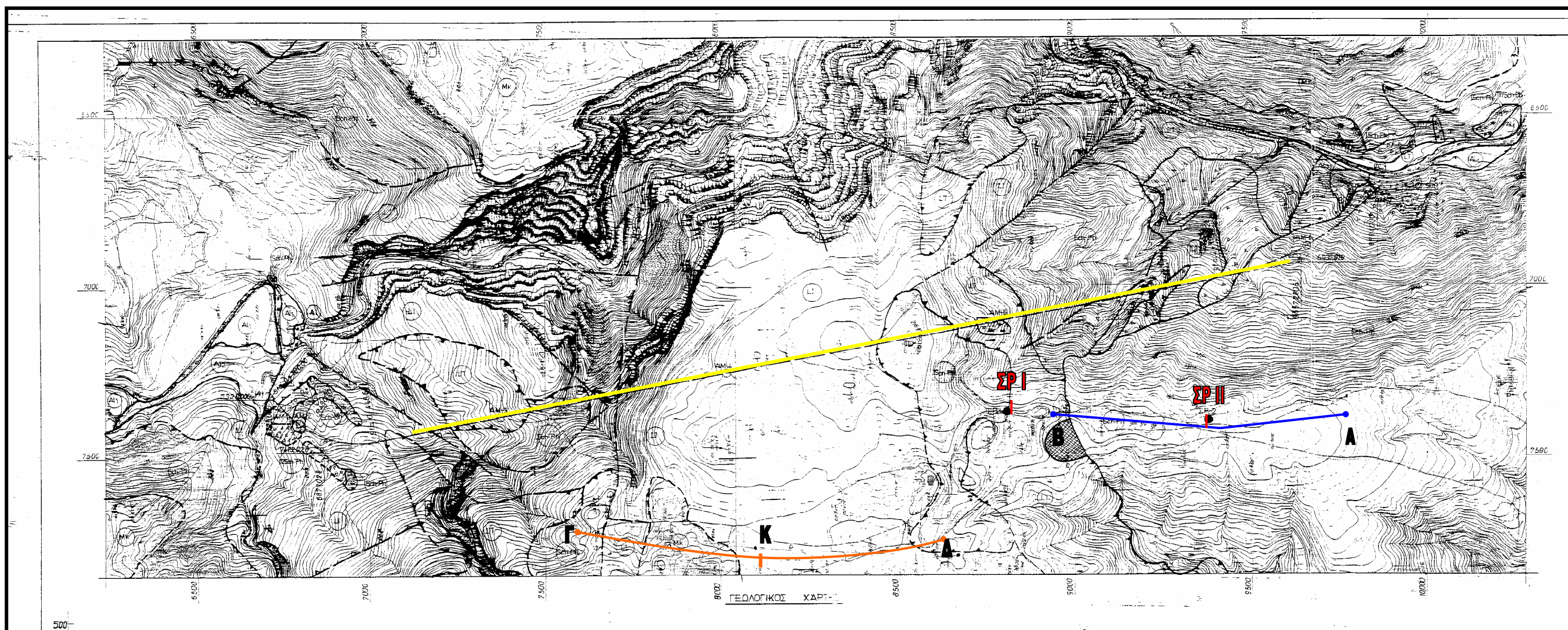
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Η περιοχή διάνοιξης της σήραγγας, διασκοπήθηκε με τις ηλεκτρικές μεθόδους της ηλεκτρικής τομογραφίας και της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Τα σημεία φαίνονται στον χάρτη του σχήματος 4.1 που ακολουθεί. Η ηλεκτρική βυθοσκόπηση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Schlumberger, με μέγιστο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων τα 950 m και η ηλεκτρική τομογραφία με τη μέθοδο Wenner – Schlumberger, με μήκος γραμμής 850 m και απόσταση ηλεκτροδίων  $a = 30$  m.

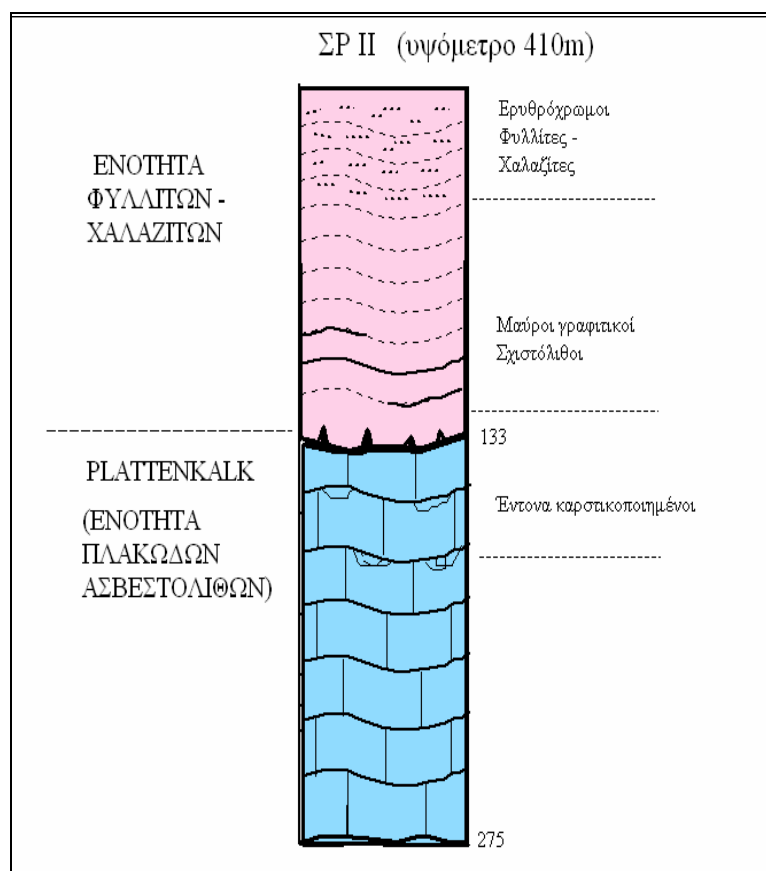
Η γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας ήταν αρκετά κοντά στην χάραξη της σήραγγας μεταφοράς νερού και ανάμεσα σε δύο γεωτρήσεις, χωρίς πυρηνοληψία, που είχαν γίνει από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ.

Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής όπου διεξήχθη η ηλεκτρική διασκόπηση ήταν ιδιαίτερα ανώμαλο. Η περιοχή όπου διεξήχθη η ηλεκτρική τομογραφία συνορεύει με χωματερή.



**Σχήμα 4.1:** Ο χάρτης της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας σε κλίμακα 1:5000 (σχέδιο 1911-ΣΜΕΛ-007-005, «Αναθεωρημένη γεωλογική έκθεση για τη σήραγγα διέλευσης του αγωγού μεταφοράς του νερού, Δ.Ε.Η.», 2002). Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η περιοχή όπου έχει σχεδιαστεί να περάσει η σήραγγα, με πορτοκαλί φαίνεται η γραμμή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης και με μπλε φαίνεται η γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας και με κόκκινο σημειώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων ΣΡ I και ΣΡ II

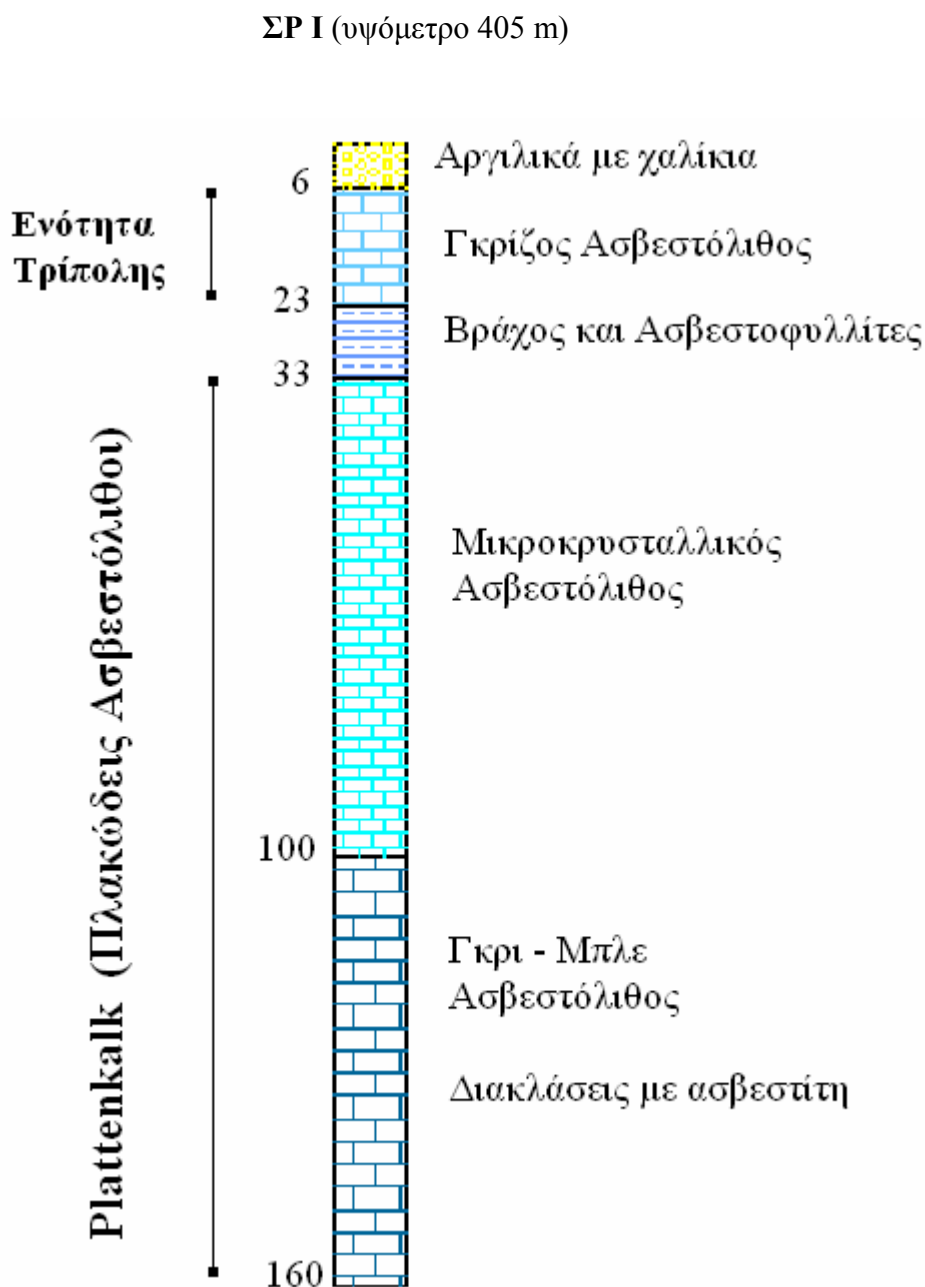
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η γεωλογική περιγραφή της γεώτρησης ΣΡ II, χωρίς πυρηνοληψία, που διεξήχθη από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ.. Παρατηρείται η εμφάνιση δύο γεωλογικών ενοτήτων: των φυλλιτών – χαλαζιτών και των Plattenkalk (πλακωδών ασβεστολίθων). Η γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας περιλαμβάνει το σημείο όπου διεξήχθη η γεώτρηση και μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο.



**Σχήμα 4.2:** Γεώτρηση χωρίς πυρηνοληψία που διεξήχθη από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ. στην περιοχή μελέτης (ΣΡ II).

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η γεωλογική περιγραφή της γεώτρησης ΣΡ I, χωρίς πυρηνοληψία, που διεξήχθη από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ.. Παρατηρείται η εμφάνιση τεσσάρων γεωλογικών ενοτήτων: των αργιλικών, των ασβεστόλιθων Τρίπολης, των φυλλιτών – χαλαζιτών και των Plattenkalk (πλακωδών ασβεστολίθων). Η θέση της γεώτρησης είναι 120 m μετά το τέλος της γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας προς το νότο, αλλά

μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συνδυασμός τους για μια εκτίμηση της στρωματογραφίας της περιοχής.



**Σχήμα 4.3:** Γεώτρηση χωρίς πυρηνοληψία που διεξήχθη από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ. κοντά στην περιοχή μελέτης (ΣΡ Ι).

## **4.2 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση**

### **4.2.1 Εισαγωγή**

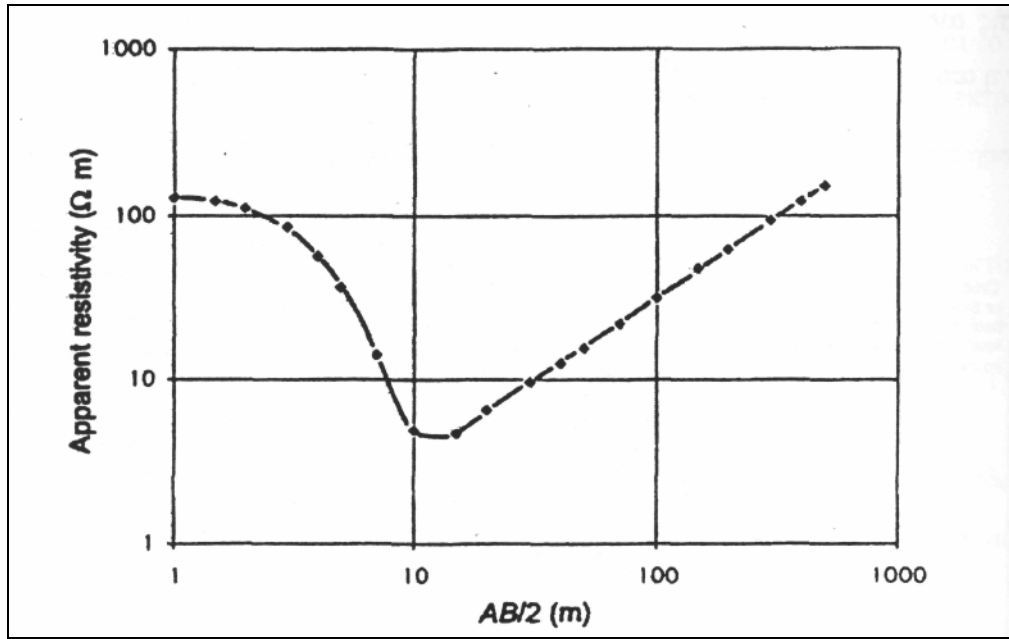
Το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης διαθέτει δύο λογισμικά πακέτα για την επεξεργασία των δεδομένων των ηλεκτρικών Βυθοσκοπήσεων, το Resix και το Ipi2Win. Το Resix είναι σχετικά παλιό λογισμικό πακέτο και έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά από το προσωπικό του εργαστηρίου, ενώ το Ipi2Win είναι πιο πρόσφατο. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν και τα δύο λογισμικά πακέτα για την επεξεργασία των δεδομένων και να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.

Η λειτουργία τους βασίζεται στη μονοδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων. Ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων έχει ως εξής:

Αρχικά, εισάγονται τα δεδομένα της βυθοσκόπησης (η ημιαπόσταση  $AB/2$ , η απόσταση  $MN$  και η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση), ακολουθεί η επιλογή της διάταξης και τέλος, εμφανίζεται ένα αρχικό μοντέλο με την ημιαπόσταση  $AB/2$  στον άξονα  $x$  και τις τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στον άξονα  $y$ . Μετά από τη διαδικασία της αντιστροφής, τις απαραίτητες διορθώσεις και τη μείωση του σφάλματος σε όσο το δυνατό μικρότερη τιμή, προκύπτει το τελικό μοντέλο.

### **4.2.2 Αντιστροφή των δεδομένων ηλεκτρικής βυθοσκόπησης**

Στην μέθοδο αυτή ο χρήστης επιλέγει ένα αρχικό μοντέλο. Σε διλογαριθμικό διάγραμμα σχεδιάζονται η γεωηλεκτρική καμπύλη και η πρότυπη καμπύλη που αντιστοιχεί στο αρχικό μοντέλο. Αλλάζοντας τις παραμέτρους του γεωηλεκτρικού μοντέλου επιδιώκεται η καλύτερη προσαρμογή της γεωηλεκτρικής καμπύλης με κάποια από τις πρότυπες.



Σχήμα 4.4 : Γεωηλεκτρική καμπύλη σχεδιασμένη σε διλογαριθμικό διάγραμμα (Reynolds, 1997).

Η αλλαγή των τιμών των παραμέτρων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (ridge regression, Inman, 1975). Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει ακριβέστερο προσδιορισμό των παραμέτρων των οριζόντιων γεωλογικών σχηματισμών σε σχέση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Marquardt, 1970, Hoerl, 1970 και Kennard, 1970).

Σύμφωνα με τον Inman (1973), η αντιστροφή δεδομένων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης με τη διάταξη Schlumberger και για οριζόντια στρωματομένο γεωλογικό μοντέλο απαιτεί την επίλυση μη γραμμικού προβλήματος. Δηλαδή, η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι μη γραμμικά εξαρτημένη από τις άγνωστες παραμέτρους της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πάχους. Μια τέτοια μη γραμμική συνάρτηση δίνεται στην παρακάτω εξίσωση για μοντέλο δύο στρωμάτων:

$$\rho_a = \rho_1 + \rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\kappa^n}{[1 + (2nz / L)^2]^{3/2}} \quad (4.1)$$

$$\text{όπου } \kappa = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Για τον υπολογισμό των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου (πάχος και  $\rho$ ), η συνάρτηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αναπτύσσεται σε σειρά Taylor ως προς αυτές τις παραμέτρους

$$\rho_a = \rho_a(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n, z_1, z_2, z_3, \dots, z_{n-1}, l, L) = \rho_a(\rho_1^0, \dots, \rho_n^0, z_1^0, \dots, z_{n-1}^0, l, L) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_j} \bigg|_{\rho_j = \rho_j^0} (\rho_j - \rho_j^0) + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \rho_a}{\partial z_j} \bigg|_{z_j = z_j^0} (z_j - z_j^0) + \text{όροι ανώτερης τάξης} \quad (4.2)$$

Το ανάπτυγμα σε σειρά Taylor με όρους μέχρι πρώτης τάξης ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, εκφράζεται υπό μορφή πίνακα:

$$\Delta G = A \Delta P + \varepsilon \quad (4.3)$$

$$[\Delta G]_i = \rho_a(P, L^i) - \rho_a(P^0, L^i); \quad i=1, N \quad (4.4)$$

$$[A]_{ij} = \frac{\partial \rho_a(P, L)}{\partial P_j} \bigg|_{P=P^0}^{L=L^i} \quad (4.5)$$

$$[\Delta P]_j = P_j - P_j^0; \quad j = 1, M \quad (4.6)$$

- όπου  $P$  : το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων (ειδική αντίσταση, πάχος)  
 $P^0$  : η αρχική εκτίμηση του  $P$   
 $L^i$  : το ημιανάπτυγμα των ηλεκτροδίων ρεύματος  
 $\rho_a(P^0, L^i)$  : η υπολογισμένη τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης για το αρχικό μοντέλο και για ημιανάπτυγμα  $L^i$   
 $\rho_a(P, L^i)$  : η μετρούμενη φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση για ημιανάπτυγμα  $L^i$   
 $A$  : η Ιακωβιανή  
 $\varepsilon$  : το διάνυσμα του σφάλματος στα δεδομένα.



Η λύση,  $\Delta P$ , της (4.10) δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta \hat{P}^* = (A_t A + kI)^{-1} A_t \Delta G \quad (4.7)$$

όπου  $I$ : ο μοναδιαίος πίνακας,  $k \geq 0$  και το σύμβολο  $t$  σημαίνει ανάστροφο πίνακα.

Η (4.7) εφαρμόζεται επαναληπτικά, καθώς η (4.3) αποτελεί προσέγγιση της (4.2). Οι ιδιοτιμές του πίνακα  $(A^t A + kI)$  είναι  $(\lambda_i^2 + k)$ , όπου  $\lambda_i$  οι ιδιοτιμές του πίνακα  $A$ . Η πρόσθεση της θετικής ποσότητας  $k$  στην κύρια διαγώνιο του πίνακα  $A^t A$  καθιστά το πρόβλημα της αντιστροφής ευσταθές. Το  $k$  επιλέγεται έτσι ώστε να μην επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια.

Η αντιστροφή των δεδομένων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης εξετάστηκε από τους Inman et al. (1973) και Glenn et al. (1973). Μικρές ιδιοτιμές του πίνακα  $(A^t A)$  υποδεικνύουν αστάθεια της προτεινόμενης λύσης, δηλαδή μικρή μεταβολή στις μετρήσεις που πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία τυχαίου θορύβου οδηγεί σε τελείως διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Η λύση καθίσταται ευσταθής όταν μερικές από τις πολύ μικρές ιδιοτιμές δεν περιλαμβάνονται στον υπολογισμό. Με τη πρόσθεση της παραμέτρου  $k$  στα διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $(A^t A)$ , περιορίζεται αυτόματα ο αριθμός των μικρών ιδιοτιμών του με αποτέλεσμα μικρή μεταβολή στη τιμή της μέτρησης να επιφέρει αντίστοιχη μεταβολή στις παραμέτρους (ευσταθής λύση).

Κάθε ιδιοδιάνυσμα είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των παραμέτρων του μοντέλου (αντίσταση και πάχος). Οι παράμετροι δίνουν καλύτερα καθορισμένους γραμμικούς συνδυασμούς για τις μεγαλύτερες ιδιοτιμές. Η ακρίβεια των παραμέτρων του γεωηλεκτρικού μοντέλου εκφράζεται συνήθως, από την κανονική απόκλιση ή εκτίμηση της οποίας είναι δύσκολη σε μη γραμμικά προβλήματα. Για τον εκτιμητή των ελαχίστων τετραγώνων η ακρίβεια των παραμέτρων περιγράφεται από τον πίνακα συμμεταβλητότητας (variance-covariance,  $P$ ):

$$\text{cov}(P) = \sigma^2 (A^t N^{-1} A)^{-1} \quad (4.8)$$

όπου  $N$  : πίνακας συντελεστή βαρύτητας

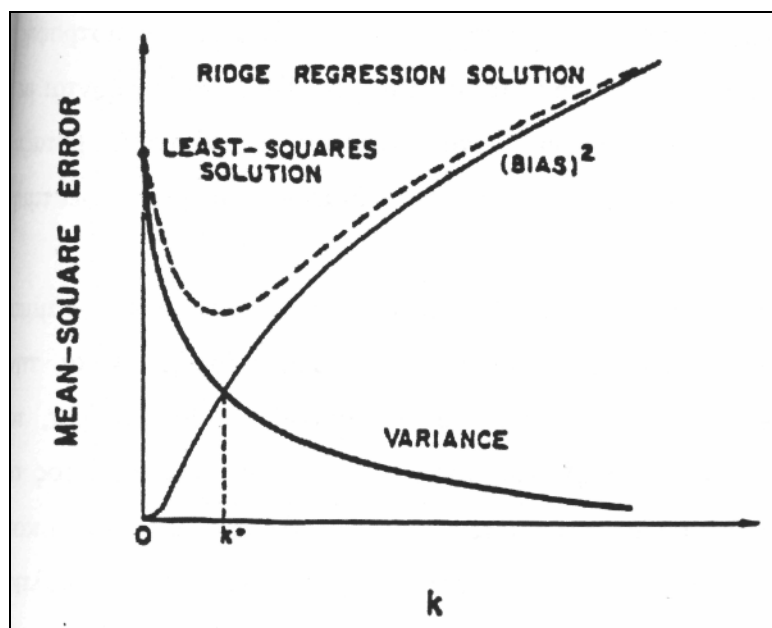
$\sigma^2$  : η διακύμανση (variance) του υπολειμματικού πεδίου (διαφοράς μετρούμενων και υπολογισμένων  $\rho_a$ ). Τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα συμμεταβλητότητας εκφράζουν την διασπορά της παραμέτρου. Ο πίνακας διακριτικής ικανότητας δίνει πληροφορίες σχετικά με την αξιοπιστία στον υπολογισμό των παραμέτρων.

Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ υπολογισμένης και μετρούμενης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι:

$$\Phi^*=(\Delta G^*)^T \Delta G^* \quad (4.9)$$

όπου  $\Delta G^*$ : το διάνυσμα των διαφορών μεταξύ υπολογισμένης και φαινόμενης αντίστασης.

Από την (4.7) προκύπτει η κλασσική λύση των ελαχίστων τετραγώνων για  $k=0$  η οποία είναι αποδεκτή όταν δεν υπάρχουν μηδενικές ιδιοτιμές. Για τη σύγκριση (Σχήμα 4.5) της κλασσικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων με τα σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα (4.7) (ridge regression), παριστάνεται γραφικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (bias) της λύσης από τα ελάχιστα τετράγωνα, καθώς και η διακύμανσή της (variance) συναρτήσει της παραμέτρου  $k$ . Η κλασσική λύση ελαχίστων τετραγώνων αντιστοιχεί σε σημείο όπου το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μηδέν αλλά η λύση παρουσιάζει σημαντική διασπορά.



Σχήμα 4.5: Σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων συναρτήσει της παραμέτρου  $k$  (Inman, 1975, Γεωργιά, 1998).

Η διασπορά για τα σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $k$ , ενώ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αυξάνει όσο μεγαλώνει το  $k$ . Γι' αυτό στην επιλογή του  $k$  χρησιμοποιείται ένα σύνθετο κριτήριο, το άθροισμα της διασποράς και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (διακεκομμένη γραμμή, Σχήμα 4.5). Η γραμμή αυτή εμφανίζει

ελάχιστο στο  $k^*$ , δηλαδή, η λύση παρουσιάζει μικρότερη διασπορά από την αντίστοιχη των ελαχίστων τετραγώνων.

Για γραμμικά προβλήματα επιλέγεται το  $k$  που αντιστοιχεί σε ελάχιστο άθροισμα των παραπάνω μεγεθών (π.χ. η τιμή  $k^*$  στο Σχήμα 4.5). Οι Hoerl και Kennard (1970) επιλέγουν την τιμή ώστε η λύση να παρουσιάζει ευστάθεια. Σε μη γραμμικά προβλήματα όπου απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση της λύσης, σε κάθε επανάληψη επιλέγεται διαφορετική τιμή της παραμέτρου  $k$ . Στον αλγόριθμο του Marquardt (1963) η παράμετρος  $k$  επιλέγεται έτσι ώστε η προκύπτουσα λύση να παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή των υπολογισμένων τιμών στις μετρήσεις υπαίθρου. Καθώς η διαδικασία αντιστροφής προσεγγίζει στη λύση, χρησιμοποιούνται μικρότερες τιμές της παραμέτρου  $k$ . Όταν η παράμετρος  $k$  τείνει στο μηδέν, η (4.7) ταυτίζεται με τη λύση των ελαχίστων τετραγώνων:

$$\Delta \hat{P}^* = (A^t A)^{-1} A^t \Delta G \quad (4.10)$$

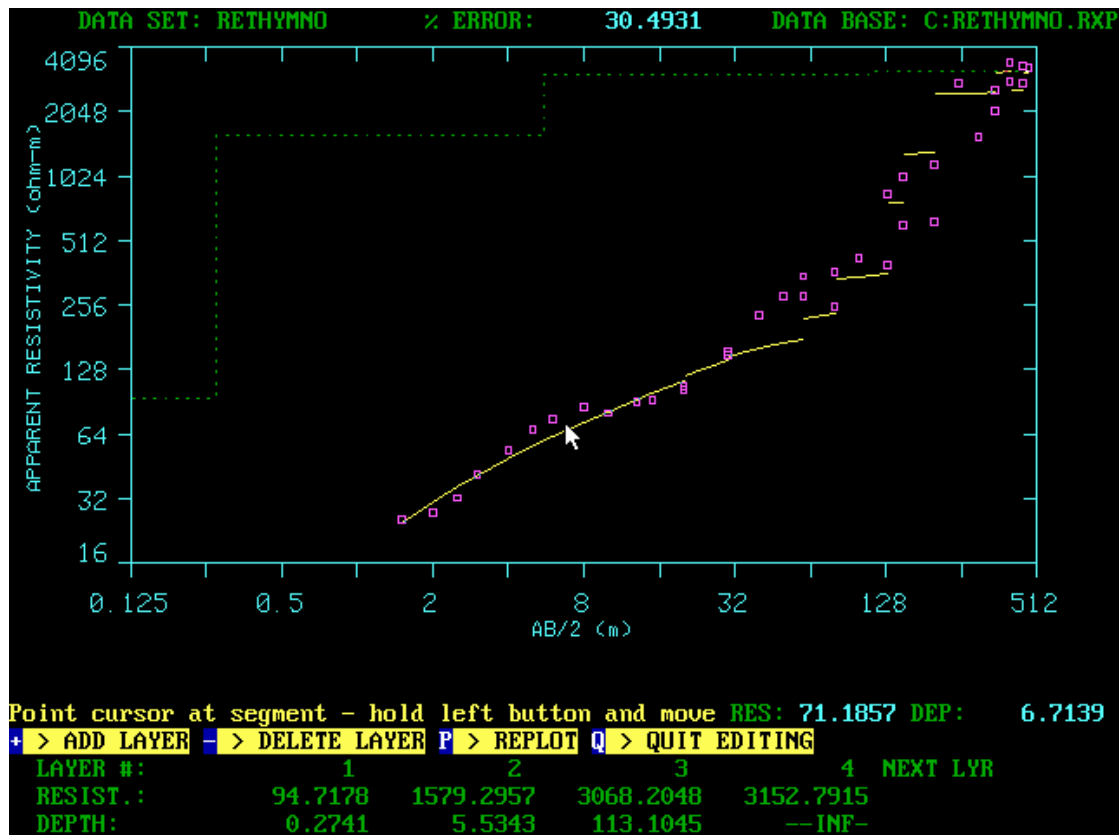
#### 4.2.3 Αποτελέσματα ηλεκτρικής βυθοσκόπησης

Τα δεδομένα της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης, της οποίας η θέση σημειώνεται με πορτοκαλί χρώμα στο σχήμα 4.1, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

AB/2 (m)	MN (m)	Ro_a (Ohm.m)
1.5	0.5	25.41
2	0.5	27.64
2.5	0.5	32.3
3	0.5	41.72
4	0.5	53.72
5	0.5	67.22
6	0.5	75.81
8	0.5	85.57
10	0.5	80.37
13	0.5	91.14
15	0.5	92.85
20	0.5	103
20	1.5	107.8
30	0.5	149.2

<b>AB/2 (m)</b>	<b>MN (m)</b>	<b>Ro_a (Ohm.m)</b>
30	1.5	155.6
40	1.5	229
50	1.5	284.2
60	3	281.9
60	1.5	349.1
80	3	252.1
80	1.5	366.5
100	3	423
130	3	391.2
130	7	838.7
150	3	601.3
150	7	1011
200	3	625
200	7	1166
250	7	1569
300	7	2757
350	14	2061
350	7	2567
400	14	3471
400	7	2834
450	14	2788
450	7	3366
475	14	3288

**Πίνακας 2:** Παρουσίαση δεδομένων ηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Η ημιαπόσταση  $AB/2$  σε  $m$ , εκφράζει την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος από το κέντρο της βυθοσκόπησης, η απόσταση  $MN$  σε  $m$ , εκφράζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού και το  $R_o a$  σε  $Ohm.m$  εκφράζει τη μετρούμενη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.



**Σχήμα 4.6:** Το αρχικό μοντέλο στο Resix με όλες τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Παρατηρείται η εμφάνιση 4 στρωμάτων: 1<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 0,27m και ηλεκτρική αντίσταση 94,72 Ohm.m, 2<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 5,53m και ηλεκτρική αντίσταση 1579,29 Ohm.m, 3<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 113,10m και ηλεκτρική αντίσταση 3068,20 Ohm.m, 4<sup>ο</sup> στρώμα με ηλεκτρική αντίσταση που φτάνει τα 3152,79 Ohm.m.

Ακολουθεί ο πίνακας διακριτικής ικανότητας (Resolution Matrix), για το παραπάνω μοντέλο:

RETHYMNO> COMMAND? SHOW RESOLUTION

PARAMETER RESOLUTION MATRIX:

"F" INDICATES FIXED PARAMETER

P 1 0.39

P 2 0.15 0.31

P 3 0.00 0.06 0.77

P 4 0.00 -0.03 0.13 0.43

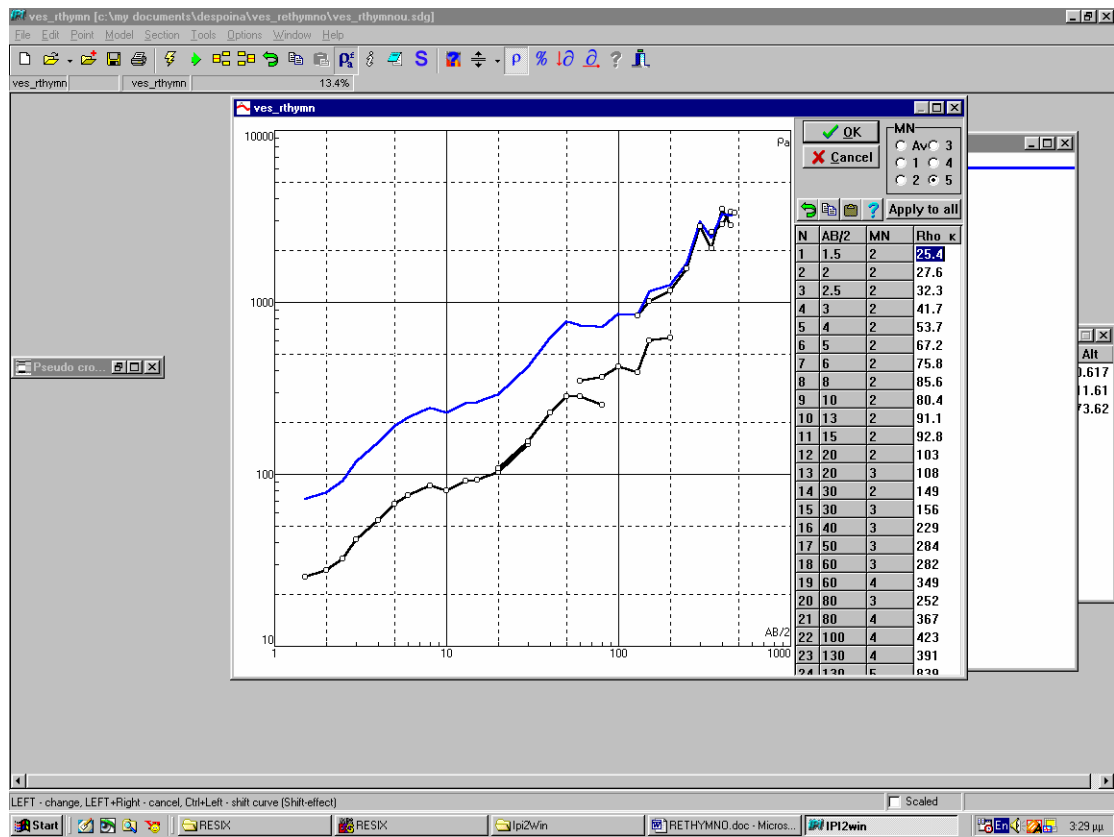
T 1 -0.40 -0.17 -0.01 0.00 0.40

T 2 -0.01 -0.21 -0.12 0.07 0.03 0.25

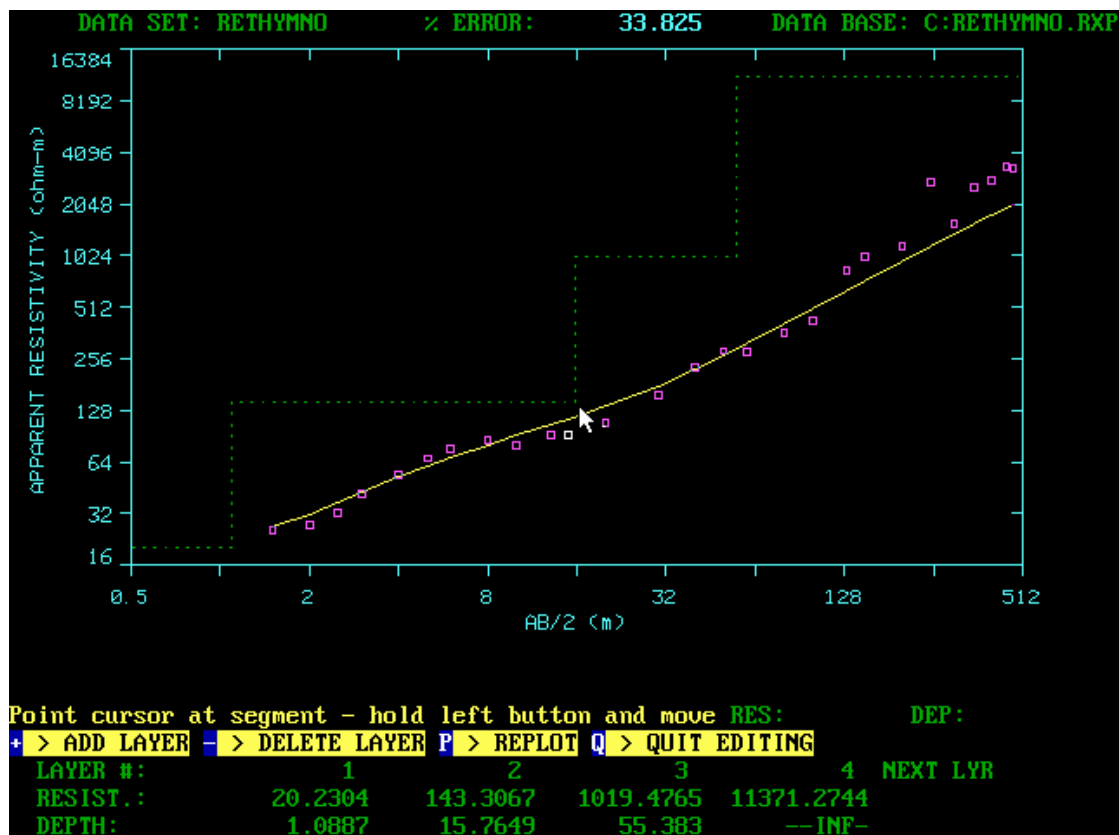
T 3 0.00 -0.03 0.14 0.24 0.00 0.06 0.16

P 1 P 2 P 3 P 4 T 1 T 2 T 3

PRESS ANY KEY TO CONTINUE...



Σχήμα 4.7: Το αρχικό μοντέλο του Ipi2Win με όλες τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης.



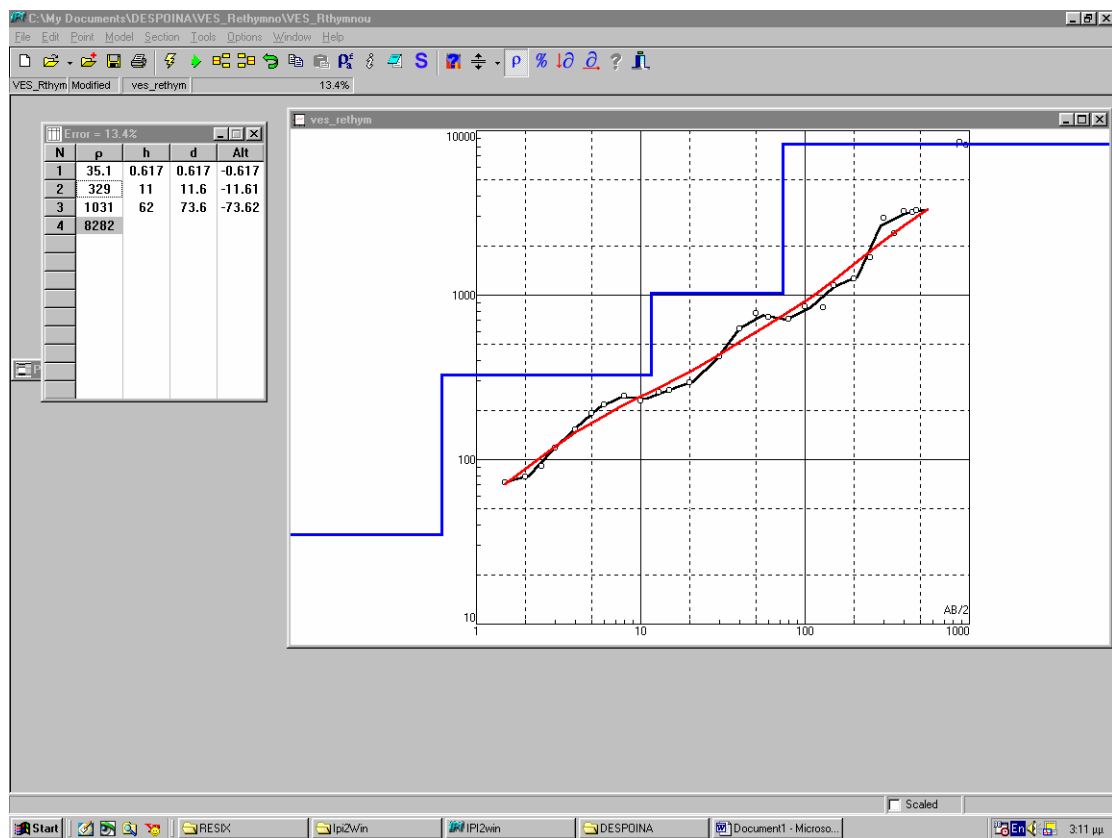
**Σχήμα 4.8:** Το τελικό μοντέλο του Resix. Παρατηρείται η εμφάνιση 4 στρωμάτων: 1<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 1,09 και ηλεκτρική αντίσταση 20,23 Ohm.m, 2<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 15,76m και ηλεκτρική αντίσταση 143,31 Ohm.m, 3<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 55,38m και ηλεκτρική αντίσταση 1019,48 Ohm.m, 4<sup>ο</sup> στρώμα με ηλεκτρική αντίσταση που φτάνει τα 11371,27 Ohm.m.

Ακολουθεί ο πίνακας διακριτικής ικανότητας (Resolution Matrix), για το παραπάνω μοντέλο:

RETHYMNO> COMMAND? SHOW RESOLUTION

PARAMETER RESOLUTION MATRIX:  
 "F" INDICATES FIXED PARAMETER  
 P 1 **0.44**  
 P 2 0.10 **0.54**  
 P 3 -0.02 0.10 **0.41**  
 P 4 0.00 -0.01 0.09 **0.14**  
 T 1 -0.42 -0.14 0.01 0.00 **0.41**  
 T 2 0.02 -0.20 -0.24 -0.02 -0.01 **0.23**  
 T 3 0.00 0.01 -0.27 -0.17 0.00 0.08 **0.35**  
 P 1 P 2 P 3 P 4 T 1 T 2 T 3

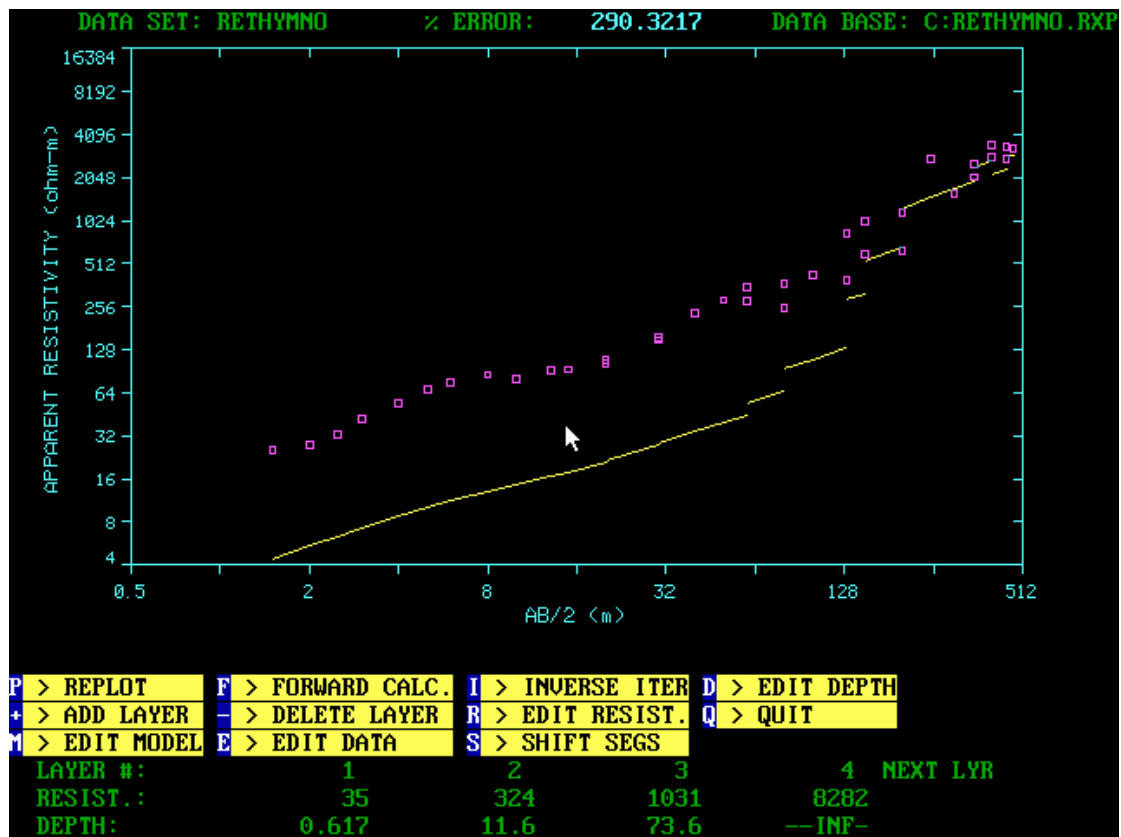
PRESS ANY KEY TO CONTINUE...



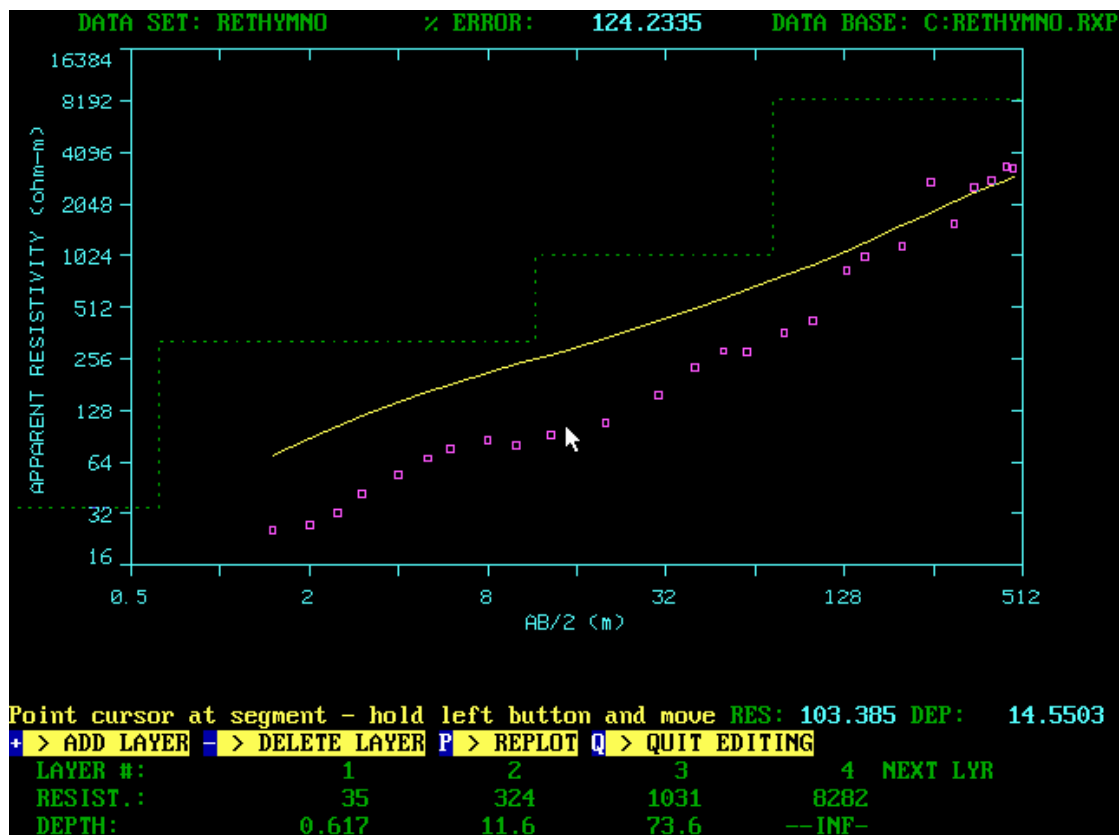
**Σχήμα 4.9:** Το τελικό μοντέλο του Ipi2Win. Παρατηρείται η εμφάνιση 4 στρωμάτων: 1<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 0,62m και ηλεκτρική αντίσταση 35,10 Ohm.m, 2<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 11,60m και ηλεκτρική αντίσταση 329,00 Ohm.m, 3<sup>ο</sup> στρώμα μέχρι το βάθος 73,60m και ηλεκτρική αντίσταση 1031,00 Ohm.m, 4<sup>ο</sup> στρώμα με ηλεκτρική αντίσταση που φτάνει τα 8282,00 Ohm.m.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της δοκιμής που έγιναν, εισάγοντας τις τιμές του αρχικού και του τελικού μοντέλου που εμφάνισε το Ipi2Win, στο Resix.





**Σχήμα 4.10:** Το αρχικό μοντέλο του Ipi2Win με τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία της καμπύλης.



**Σχήμα 4.11:** Οι εισαχθείσες τιμές στο Resix του τελικού μοντέλου του Ipi2Win, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία της καμπύλης.

Παρατηρείται ότι η καμπύλη από το Ipi2win δε συμπίπτει με την καμπύλη από το Resix, αλλά δεν αλλάζει σημαντικά η κατανομή των στρωμάτων.

#### 4.2.4 Σύγκριση των δύο πακέτων επεξεργασίας

Το Ipi2Win λειτουργεί σε περιβάλλον Windows και το καθιστά πιο εύχρηστο από το Resix, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον DOS. Το Resix παρέχει τη δυνατότητα της επιβεβαίωσης της ορθής επιλογής του αριθμού των στρωμάτων, μέσω του πίνακα διακριτικής ικανότητας (Show Resolution Matrix), που δίνει την "βαρύτητα" του κάθε στρώματος μέσα στο μοντέλο, περιλαμβάνοντας τη σχέση των παραμέτρων του μοντέλου. Το μοντέλο θεωρείται αποδεκτό όταν οι διαγώνιες τιμές του πίνακα έχουν τιμές από 0,8-1. Το Ipi2Win δεν παρέχει τέτοια δυνατότητα.

#### 4.2.5 Ερμηνεία αποτελεσμάτων Ηλεκτρικής Βυθοσκόπησης

Κατά την επεξεργασία με τα δύο λογισμικά πακέτα παρατηρήθηκε ότι εάν εισαχθεί το μοντέλο που εξάχθηκε από το Resix στο Ipi2win και το αντίστροφο, η καμπύλη έχει αποκλίσεις και το σφάλμα είναι πολύ μεγάλο. Παρατηρείται, όμως, ότι οι ηλεκτρικές αντιστάσεις και από τα δύο λογισμικά πακέτα αντιστοιχούν στους ίδιους τύπους πετρωμάτων. Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι τιμές του βάθους και της ηλεκτρικής αντίστασης από τα δύο λογισμικά πακέτα.

	Resix		Ipi2Win	
Αριθμός στρωμάτων	Βάθος (m)	Ηλεκτρική αντίσταση (Ohm.m)	Βάθος (m)	Ηλεκτρική αντίσταση (Ohm.m)
1 <sup>ο</sup>	1,09	20,23	0,62	35,10
2 <sup>ο</sup>	15,77	143,31	11,60	329,00
3 <sup>ο</sup>	55,38	1019,48	73,60	1031,00
4 <sup>ο</sup>	-	11371,27	-	8282,00

*Πίνακας 3: Οι τελικές τιμές του βάθους και της ηλεκτρικής αντίστασης στα δύο λογισμικά πακέτα Resix και Ipi2Win.*

Παρατηρείται ότι και με τα δύο λογισμικά πακέτα εξάγουμε τα ίδια αποτελέσματα στη στρωματογραφία, με πολύ μικρές αποκλίσεις. Παρατηρείται μια διάταξη τεσσάρων στρωμάτων. Το πρώτο στρώμα αντιστοιχεί στο εδαφικό κάλυμμα, πάχους 1m και έχει τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 20 Ohm.m. Το δεύτερο στρώμα αντιστοιχεί σε ασβεστόλιθο έντονα καρστικοποιημένο με προσμίξεις από προσχώσεις, βρίσκεται περίπου σε βάθος 16 m και έχει τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ανάμεσα στα 150 με 330 Ohm.m. Το τρίτο στρώμα φαίνεται να είναι ασβεστόλιθος, βρίσκεται σε βάθος 77 m από την επιφάνεια και έχει τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεγαλύτερες των 1000 Ohm.m. Τέλος, το

τέταρτο στρώμα είναι και αυτό ασβεστόλιθος με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεγαλύτερες των 10000 Ohm.m.

#### **4.3 Παρουσίαση και Ερμηνεία Γεωλογικών**

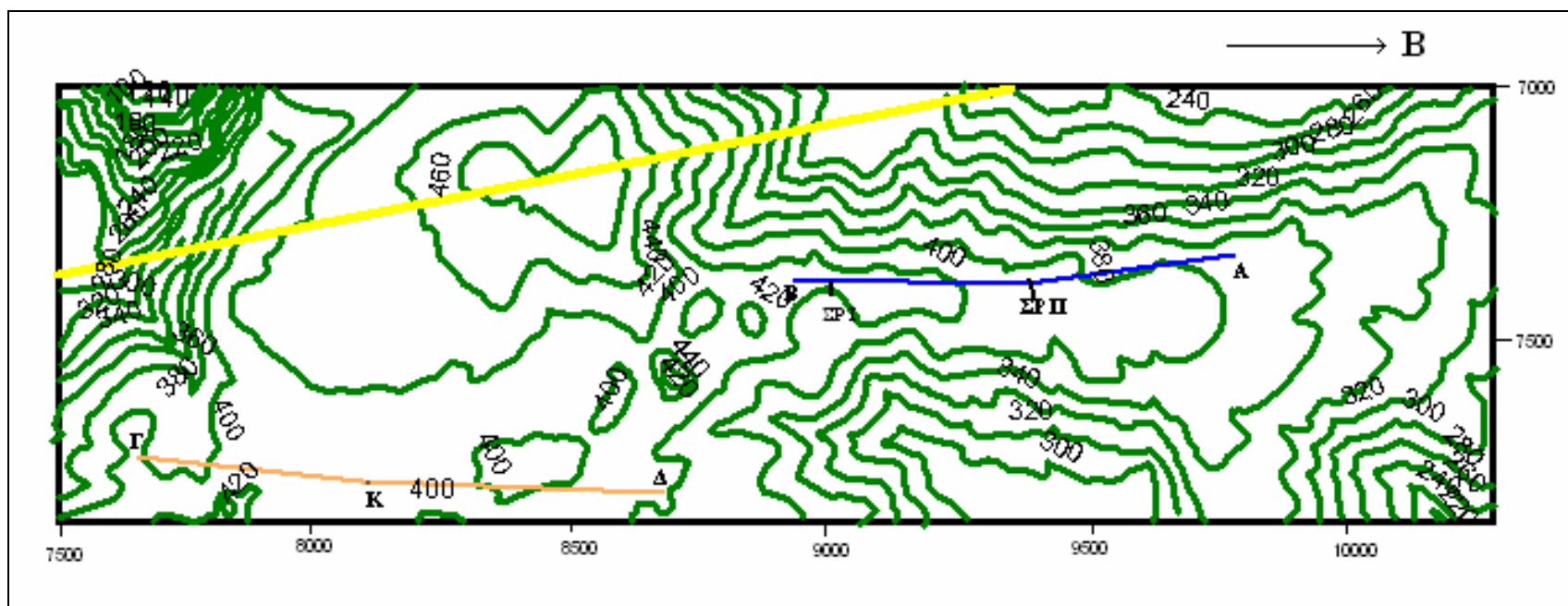
##### **4.3.1 Εισαγωγή**

Έγινε ψηφιοποίηση του τοπογραφικού χάρτη της υπό μελέτη περιοχής με το λογισμικό πακέτο MapInfo. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν δύο γεωλογικές τομές, μία για κάθε γραμμή μελέτης των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων.

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (Geographical Information Systems, GIS) αποτελούν μια κατηγορία υπολογιστικών προγραμμάτων. Έχουν σαν κύριο στόχο την επεξεργασία διαφόρων δεδομένων (ποσοτικά, αλλά και ποιοτικά) πάνω σε μια γεωγραφικά καθορισμένη βάση (Raster). Η βάση αυτή μπορεί να είναι είτε ένας χάρτης είτε ακόμα και μια εικόνα, αφού πρώτα τοποθετηθούν σ' έναν κάνναβο γεωγραφικών συντεταγμένων. Πάνω στη βάση μπορούν να προβληθούν και να επεξεργαστούν οι διάφορες κατηγορίες δεδομένων, υπό μορφή διάφανων επιπέδων (layers). Στην ελληνική αγορά τα πιο γνωστά GIS είναι το ArcInfo και το MapInfo.

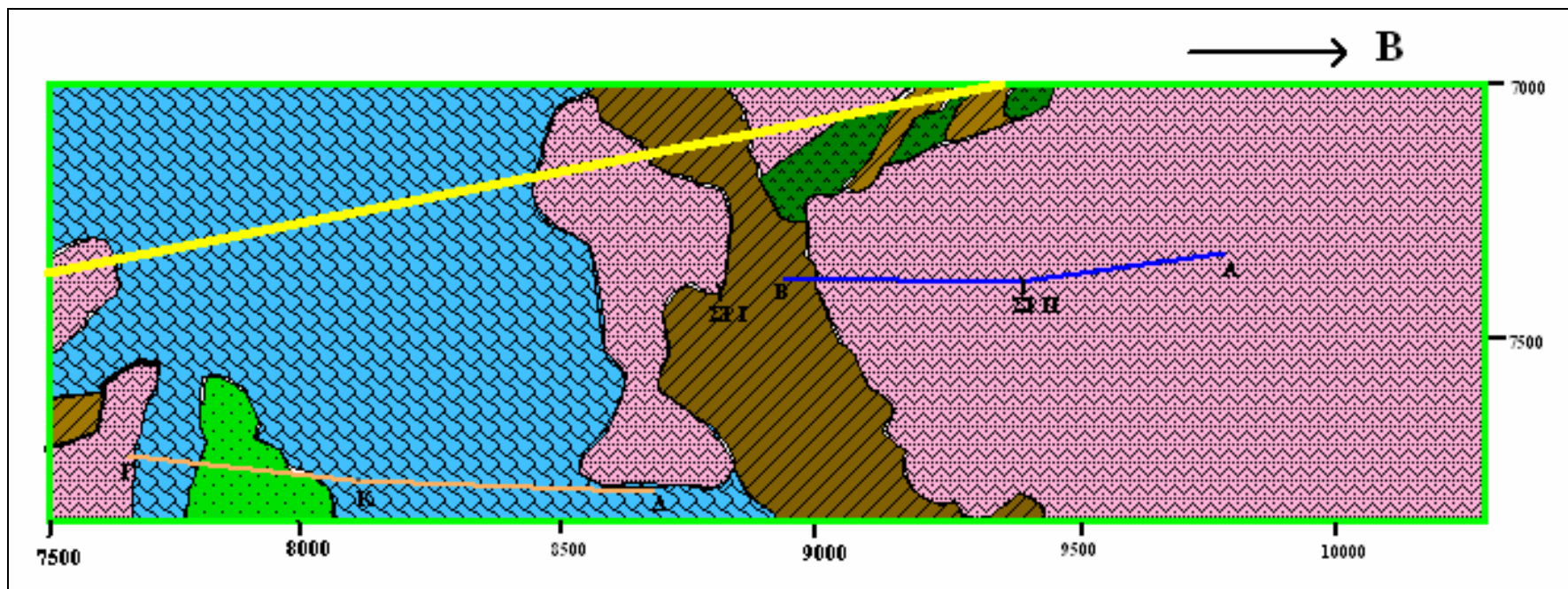
##### **4.3.2 Παρουσίαση και Ερμηνεία των Γεωλογικών Τομών**

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται ο ψηφιοποιημένος τοπογραφικός χάρτης της περιοχής διεξαγωγής των διασκοπήσεων, όπου οι ισοϋψείς έχουν σχεδιαστεί ανά 20 m.

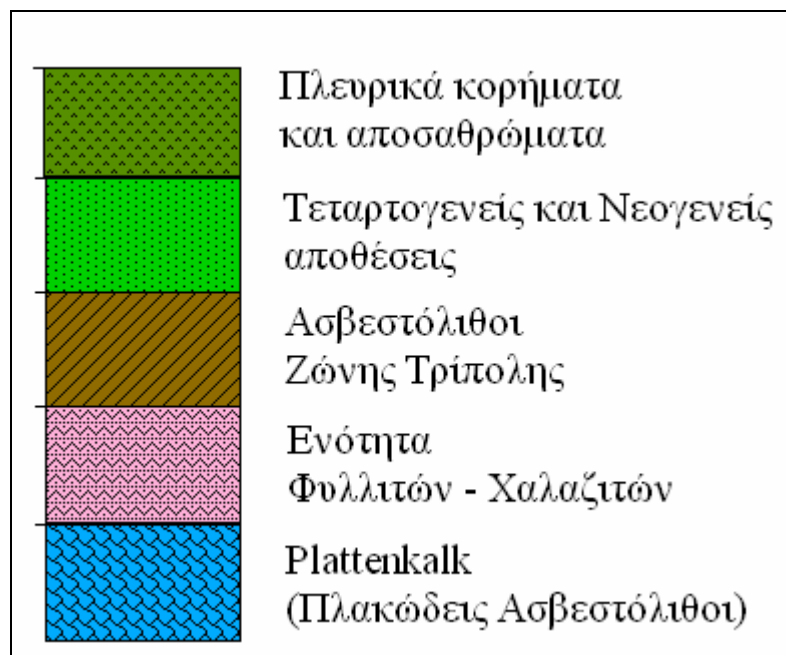


**Σχήμα 4.12:** Το ψηφιοποιημένο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι ισουψείς ανά 20m, με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η γραμμή διάνοιξης της σήραγγας, με πορτοκαλί χρώμα σημειώνεται η γραμμή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης Γ-Δ (με Κ σημειώνεται το κέντρο) και με μπλε η γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας Α-Β.

Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ο ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με σημειωμένες τις γραμμές μελέτης των διασκοπήσεων καθώς και τη γραμμή διάνοιξης της σήραγγας και στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται ο ψηφιοποιημένος γεωλογικός και τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης. Ακολουθεί το υπόμνημά τους στο σχήμα 4.14.

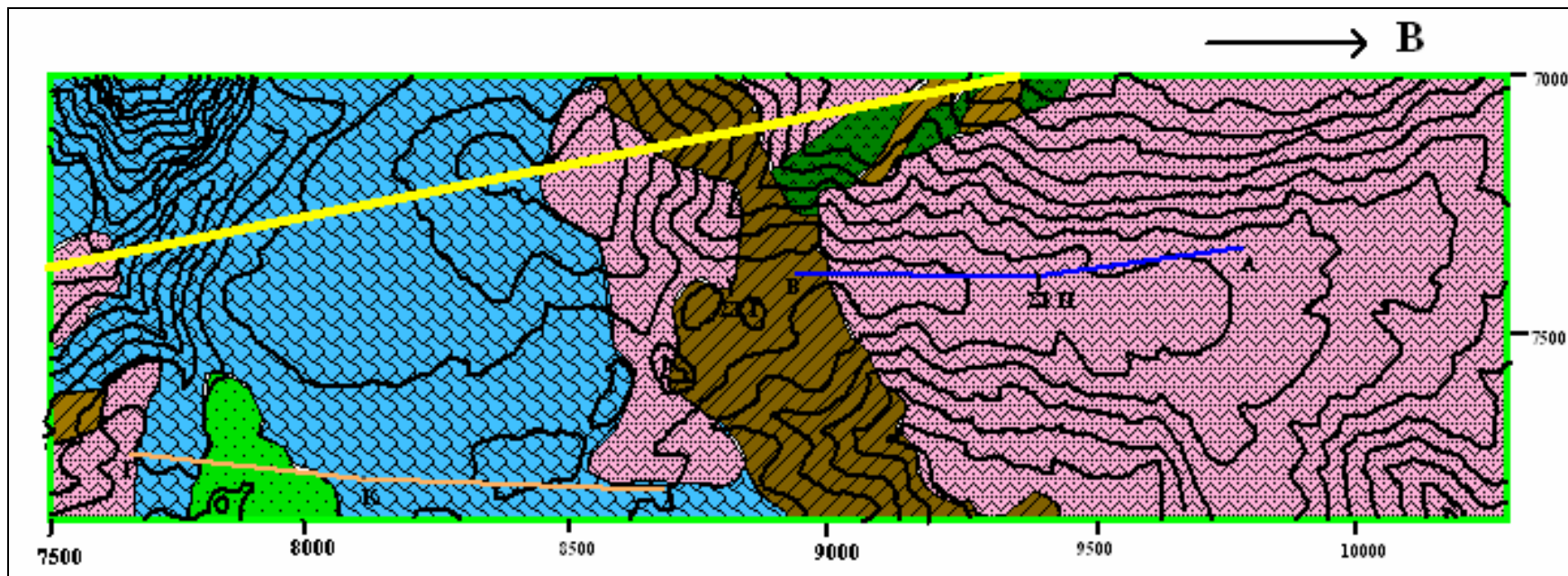


**Σχήμα 4.13:** Ο ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η γραμμή διάνοιξης της σήραγγας, με πορτοκαλί χρώμα σημειώνεται η γραμμή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης Γ-Δ (με Κ σημειώνεται το κέντρο) και με μπλε η γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας Α-Β.



*Σχήμα 4.14: Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη σχήματος 4.13 και 4.15.*

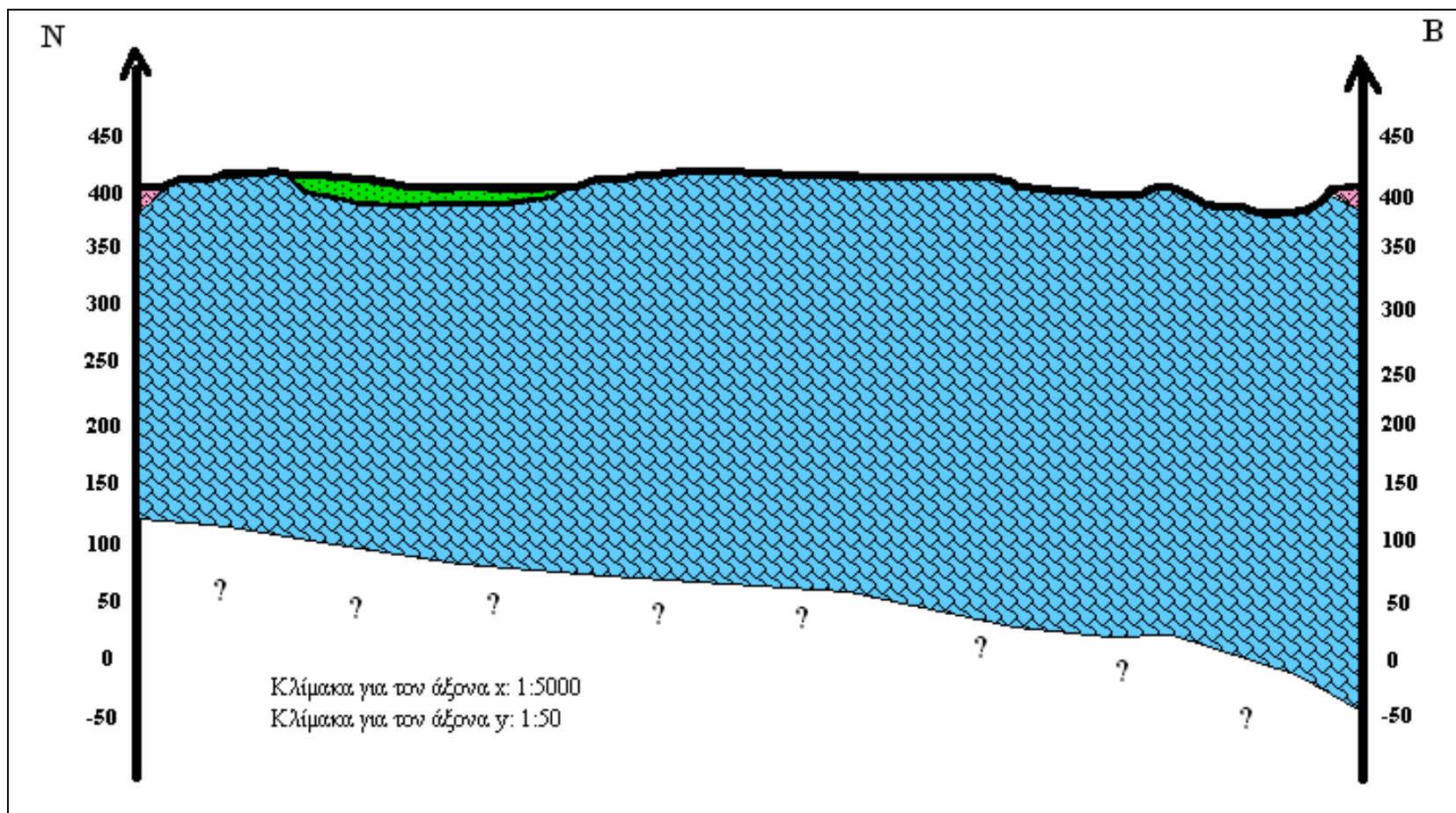




*Σχήμα 4.15: Ψηφιοποιημένος γεωλογικός και τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης.*

Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η γεωλογική τομή της γραμμής της ηλεκτρικής βυθοσκοπήσης, έχοντας συνδυάσει και τα στοιχεία της γεώτρησης ΣΡ II, όπου διακρίνονται τρία γεωλογικά στρώματα:

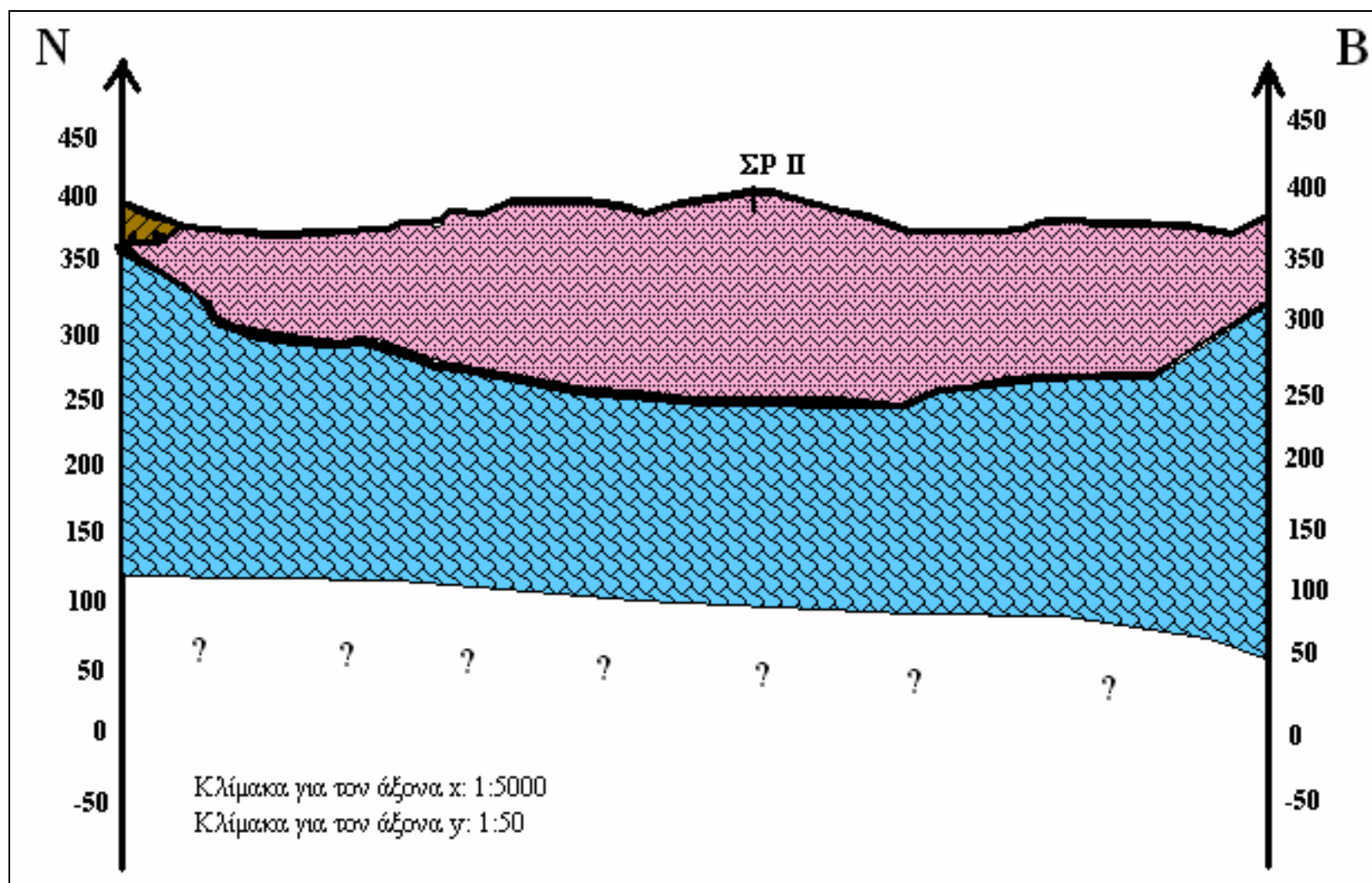
- Σ' ένα πολύ μικρό τμήμα στην επιφάνεια εμφανίζεται η ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών, η οποία απεικονίζεται με ροζ χρώμα.
- Σ' ένα άλλο τμήμα στην επιφάνεια εμφανίζονται τα νεογενή (βιογενείς μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι), τα οποία απεικονίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα.
- Στο κυρίως τμήμα της επιφάνειας, αλλά συνεχίζει και κάτω από αυτήν, εμφανίζονται οι Plattenkalk (ενότητα των πλακωδών ασβεστολίθων), οι οποίοι απεικονίζονται με γαλάζιο χρώμα.



**Σχήμα 4.16:** Παρουσιάζεται η γεωλογική τομή στη γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης, συνδυασμένη με τα στοιχεία της γεωφυσικής έρευνας. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται τα νεογενή, με ροζ χρώμα απεικονίζεται η ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών και με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται οι Plattenkalk. Η κλίμακα για τον άξονα x είναι 1:5000 και για τον άξονα y είναι 1:50.

Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η γεωλογική τομή της γραμμής της ηλεκτρικής τομογραφίας, όπου διακρίνονται τρία γεωλογικά στρώματα:

- Σ' ένα μικρό τμήμα πάνω αριστερά εμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι της Ζώνης Τρίπολης, το οποίο απεικονίζεται με καφέ χρώμα,
- Στο κυρίως μέρος της επιφάνειας εμφανίζεται η φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά, η οποία απεικονίζεται με ροζ χρώμα,
- Τέλος, κάτω από τη φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά υπόκεινται οι Plattenkalk (ενότητα των πλακωδών ασβεστολίθων), οι οποίοι απεικονίζονται με γαλάζιο χρώμα.



**Σχήμα 4.17:** Παρουσιάζεται η γεωλογική τομή στη γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας. Με καφέ χρώμα απεικονίζονται οι ασβεστόλιθοι της ενότητας Τρίπολης, με ροζ χρώμα η ενότητα των φυλλιτών-χαλαζιτών και με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται οι Plattenkalk. Η κλίμακα για τον άξονα x είναι 1:5000 και για τον άξονα y είναι 1:50.

## 4.4 Ηλεκτρική Τομογραφία

### 4.4.1 Εισαγωγή

Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας επεξεργάστηκαν με το λογισμικό πακέτο Res2Dinv, με το οποίο οι τιμές της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Η δημιουργία της γεωηλεκτρικής τομής βασίστηκε στη διδιάστατη αντιστροφή των γεωφυσικών δεδομένων.

### 4.4.2 Αντιστροφή των δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις μετρούμενες φαινόμενες. Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα τα δεδομένα συνδέονται με μη γραμμικές σχέσεις με τις παραμέτρους του μοντέλου. Έτσι και στην περίπτωση της αντιστροφής των φαινόμενων αντιστάσεων το πρόβλημα είναι μη γραμμικό. Επιπλέον, ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου.

Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζονται επαναληπτικές τεχνικές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αρχικά όμως γίνεται προσέγγιση του μη γραμμικού προβλήματος με γραμμικό με τη βοήθεια της σειράς Taylor.

Αν  $m=(m_1, m_2, \dots, m_M)$  είναι οι παράμετροι του μοντέλου και  $d_i=(d_1, d_2, \dots, d_N)$   $i=1, 2, \dots, N$  είναι οι μετρήσεις, η μη γραμμική σχέση που συνδέει τις μετρήσεις με τις παραμέτρους είναι (κατά Loke & Barker, 1996):

$$d_i = f_i(m_1, m_2, \dots, m_M) + e \quad (4.11)$$

όπου  $e$  το σφάλμα των μετρήσεων.

Για το αρχικό μοντέλο  $m^0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0)$  είναι:

$$d_i = f_i(m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0) + e$$

Προσεγγίζοντας τη συνάρτηση  $f_i$  με σειρά Taylor γύρω από το  $m^0$ :

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_M^0 + \delta m_M) \quad (4.12)$$

Το σφάλμα είναι:

$$e_i = d_i - f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right\}_{m_j=m_j^0} \cdot \delta m_j \quad (4.13)$$

Αν  $\Delta d = d_i - f_i(m^0)$  είναι το διάνυσμα των διαφορών ανάμεσα στις πραγματικές και θεωρητικές μετρήσεις,  $A$  ο πίνακας των μερικών παραγώγων της συνάρτησης  $f$  ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, και  $x$  το διάνυσμα των διορθώσεων  $\delta m$  που πρέπει να προστεθούν στο  $m^0$  για να προκύψει το βελτιωμένο μοντέλο, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad (4.14)$$

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα  $e_i$ , αλλά ο πιο κατάλληλος βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων, δηλαδή η ποσότητα

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad (4.15)$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το  $q$  ως προς  $x$  και εξισώνοντας την πρώτη παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται περιορισμός στον πίνακα  $x$  με στόχο να μη μεταβάλλονται απότομα οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η λύση  $x$  προστίθεται στο αρχικό μοντέλο  $m^0$  και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο  $m^1$

$$m^1 = m^0 + x \quad (4.16)$$

Λόγω όμως του ότι η λύση προκύπτει από προσέγγιση μη γραμμικού προβλήματος είναι απαραίτητο να εφαρμοσθεί επαναληπτικά η όλη διαδικασία χρησιμοποιώντας το  $m^1$  ως το νέο αρχικό μοντέλο. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) ,

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad (4.17)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των μετρήσεων, δίνει ένα μέτρο του πόσο καλά ταιριάζουν οι θεωρητικές μετρήσεις με τις πραγματικές για κάθε μοντέλο. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της αντιστροφής δεν έχει μονοσήμαντη λύση. Το μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα δε σημαίνει ότι είναι γεωλογικά αποδεκτό. Από τη χρήση γεωλογικών πληροφοριών βελτιώνεται η αξιοπιστία του προκύπτοντος μοντέλου. Στην όλη διαδικασία οι υπολογισμοί γίνονται με τους λογάριθμους των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φαινόμενης αντίστασης.

#### 4.4.3 Αποτελέσματα Γεωφυσικής διασκόπησης

Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

xlocation (m)	a (m)	n	dv/i (Ohm)	r <sub>a</sub> sting (Ohm.m)
315	30	1	0.4445	83.74
345	30	1	0.972	183.3
375	30	1	0.53	99.9
405	30	1	0.988	186.1
435	30	1	0.468	88.15
465	30	1	0.834	157.13
495	30	1	0.838	158



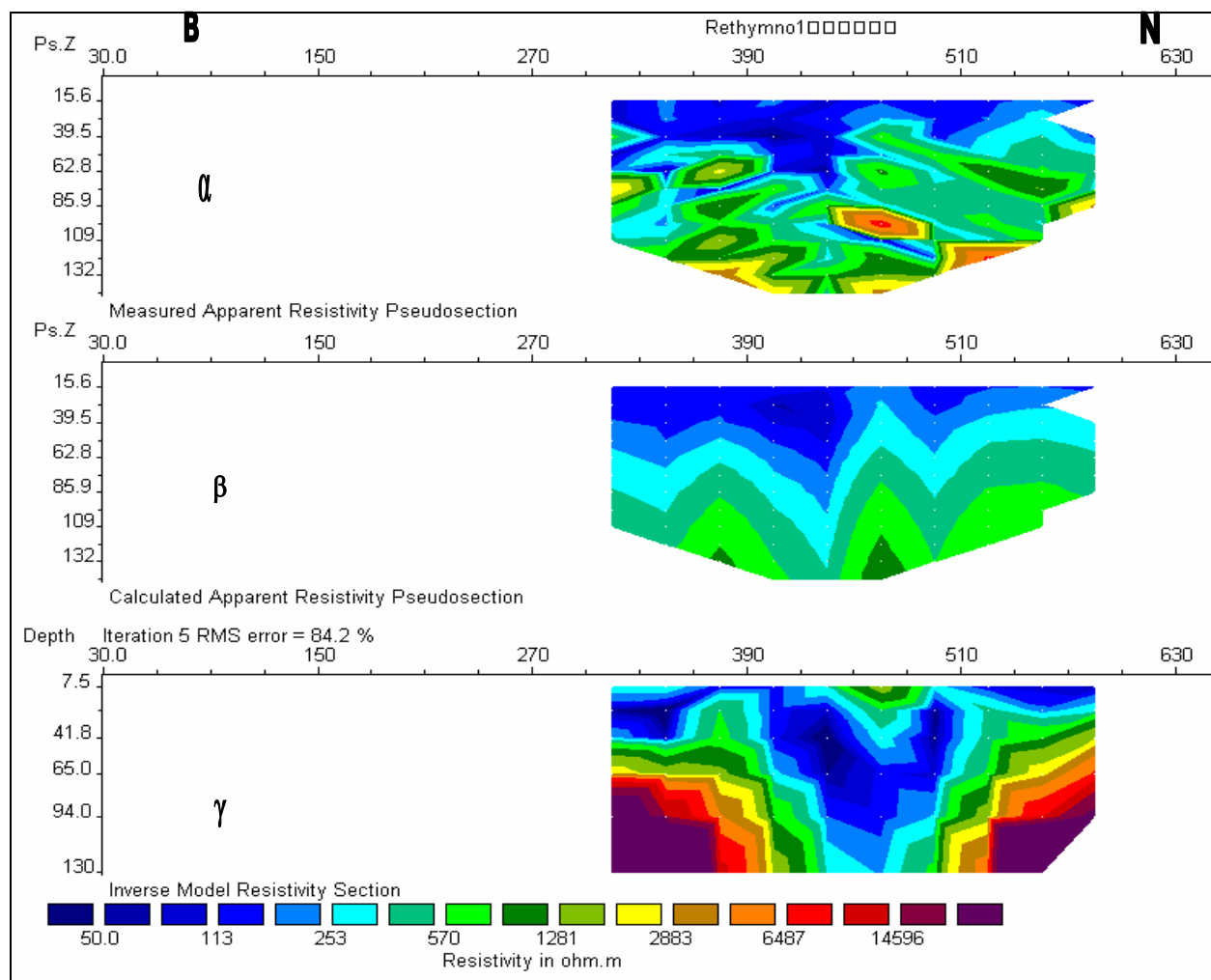
<b>xlocation (m)</b>	<b>a (m)</b>	<b>n</b>	<b>dv/i (Ohm)</b>	<b>r<sub>a</sub> sting (Ohm.m)</b>
525	30	1	0.737	138.9
555	30	1	1.046	206.6
585	30	1	0.565	106.5
315	30	2	0.15	84.88
345	30	2	0.315	178.3
375	30	2	0.231	130.9
405	30	2	0.175	99.09
435	30	2	0.251	141.7
465	30	2	0.4399	248.8
495	30	2	0.275	155.9
525	30	2	0.301	170.2
555	30	2	0.524	296.2
315	30	3	0.561	634.5
345	30	3	0.0993	112.3
375	30	3	0.0616	69.61
405	30	3	0.0314	36.09
435	30	3	0.0832	94.09
465	30	3	0.587	663.9
495	30	3	0.113	127.8
525	30	3	0.249	281.2
555	30	3	0.3443	389.4
585	30	3	0.132	149.8
315	30	4	0.0277	52.59
345	30	4	0.198	373.9
375	30	4	0.252	475.6
405	30	4	0.0825	155.5
435	30	4	0.0524	98.75
465	30	4	0.118	221.8
495	30	4	0.345	649.5
525	30	4	0.167	316.2
555	30	4	0.272	513.5
585	30	4	0.198	374
315	30	5	0.07037	194
345	30	5	0.0038	10.83
375	30	5	0.74	2092
405	30	5	0.0355	100.3
435	30	5	0.017	48.2
465	30	5	0.324	916.7
495	30	5	0.105	296.3
525	30	5	0.385	1089
555	30	5	0.2106	595.5
585	30	5	0.151	427
315	30	6	0.695	2754
345	30	6	0.0794	314.3
375	30	6	0.0157	62.3
405	30	6	0.179	711.1

<b>xlocation (m)</b>	<b>a (m)</b>	<b>n</b>	<b>dv/i (Ohm)</b>	<b>r<sub>a</sub> sting (Ohm.m)</b>
435	30	6	0.0399	157.9
465	30	6	0.144	570.2
495	30	6	0.104	411.8
525	30	6	0.124	491.4
555	30	6	0.33	1307
585	30	6	0.0715	283.2
315	30	7	0.161	847.7
345	30	7	0.0526	277.3
375	30	7	0.241	1274
405	30	7	0.025	132.2
435	30	7	0.149	788.5
465	30	7	0.062	329.3
495	30	7	0.0928	489.9
525	30	7	0.0976	515.2
555	30	7	0.087	456.4
585	30	7	0.575	3034
315	30	8	0.054	366.5
345	30	8	0.0326	221
375	30	8	0.104	707.2
405	30	8	0.071	482.2
435	30	8	0.0279	189.8
465	30	8	1.15	7801
495	30	8	0.05	345.4
525	30	8	0.094	636.9
555	30	8	0.053	361
315	30	9	0.046	391.2
345	30	9	0.0483	409.7
375	30	9	0.188	1597
405	30	9	0.0676	573.4
435	30	9	0.0476	403.8
465	30	9	0.0097	81.9
495	30	9	0.0639	5424
525	30	9	0.034	291.2
555	30	9	0.084	718.6
345	30	10	0.0843	874.1
375	30	10	0.0836	866.2
405	30	10	0.151	1569
435	30	10	0.0287	297.3
465	30	10	0.102	1052
495	30	10	0.014	154.5
525	30	10	0.67	6953
375	30	11	0.2969	3693
405	30	11	0.0543	676
435	30	11	0.062	770.932
465	30	11	0.1	1249
495	30	11	0.093	1148

xlocation (m)	a (m)	n	dv/i (Ohm)	r <sub>a</sub> sting (Ohm.m)
405	30	12	0.172	2531
435	30	12	0.027	404.1
465	30	12	0.222	3263

**Πίνακας 4:** Παρουσίαση δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην πρώτη στήλη παρουσιάζεται η απόσταση του κέντρου της κάθε μέτρησης από την αρχή της κάθε γραμμής μελέτης (xlocation), στη δεύτερη στήλη παρουσιάζεται η απόσταση ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια (a), στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται ο ακέραιος αριθμός που πολλαπλασιάζεται με το a για να προκύψει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος από το κέντρο (n), στην τέταρτη στήλη παρουσιάζεται ο λόγος της διαφοράς δυναμικού, που μετρήθηκε από το όργανο, προς την ένταση του ρεύματος (dv/i) και στην πέμπτη στήλη παρουσιάζεται η τιμή της φαινόμενης αντίστασης (r<sub>a</sub> sting). Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. §3.6.2.

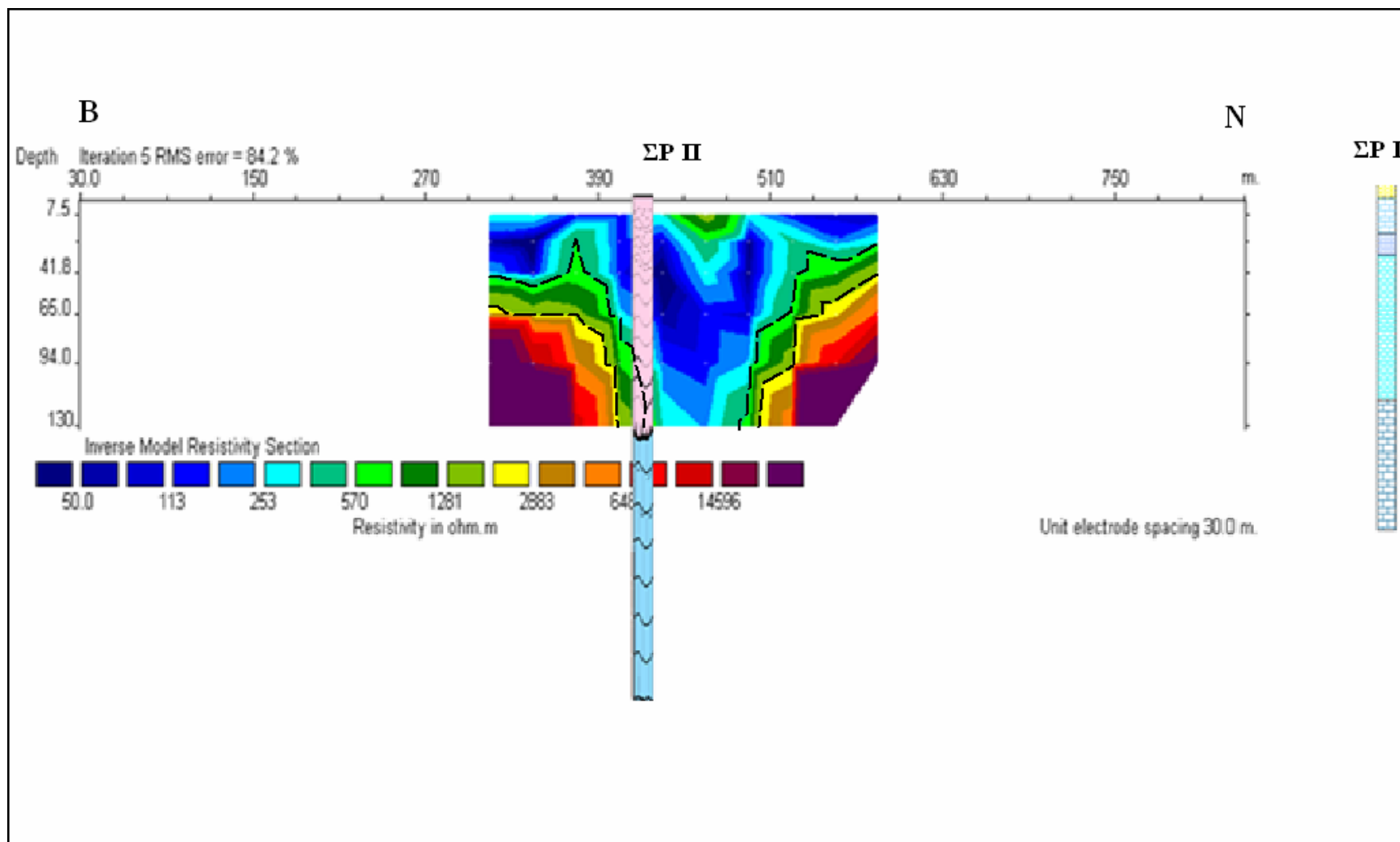
Ο προσανατολισμός της γραμμής μελέτης είναι Βορράς – Νότος (σχήμα 4.1). Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η γεωηλεκτρική τομή της γραμμής μελέτης, χωρίς την εισαγωγή του τοπογραφικού ανάγλυφου. Στην ψευδοτομή 4.18α απεικονίζεται η μετρούμενη φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση. Στην ψευδοτομή 4.18β απεικονίζεται η υπολογισμένη φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση. Στην τομή 4.18γ απεικονίζεται η πραγματική ηλεκτρική αντίσταση. Τα έντονα πορτοκαλί προς κόκκινα χρώματα των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχούν σε αυξημένες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και οι αποχρώσεις του μπλε σε μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



**Σχήμα 4.18:** Γεωηλεκτρική τομή στην οποία φαίνεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ανάλογα με το βάθος. **α:** ψευδοτομή των μετρούμενων τιμών της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, **β:** ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, **γ:** τομή του τελικού μοντέλου των τιμών της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης.

#### **4.4.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων Ηλεκτρικής Τομογραφίας**

Παρουσιάζεται η γεωηλεκτρική τομή του σχήματος 4.18 σε συνδυασμό με τη γεώτρηση ΣΡ ΙΙ του σχήματος 4.3 και τη γεώτρηση ΣΡ Ι του σχήματος 4.4. Σε αυτό το σχήμα παρατηρείται μια μη ομαλή κατανομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που αντιστοιχούν στους Plattenkalk (αριστερά και δεξιά της τομής), η οποία δύναται να δηλώνει την ύπαρξη ενός μη ορατού ρήγματος. Στη δεξιά πλευρά της τομής οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δηλώνουν τους Plattenkalk, παρατηρείται ότι παρουσιάζουν μια τάση να ανέλθουν πιο κοντά στην επιφάνεια. Αυτό δικαιολογείται από τη γεωλογία της περιοχής και τη γεώτρηση ΣΡ Ι χωρίς πυρηνοληψία, που διεξήχθει από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ., 120 m μετά το τέλος της γραμμής μελέτης προς Νότο και η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.



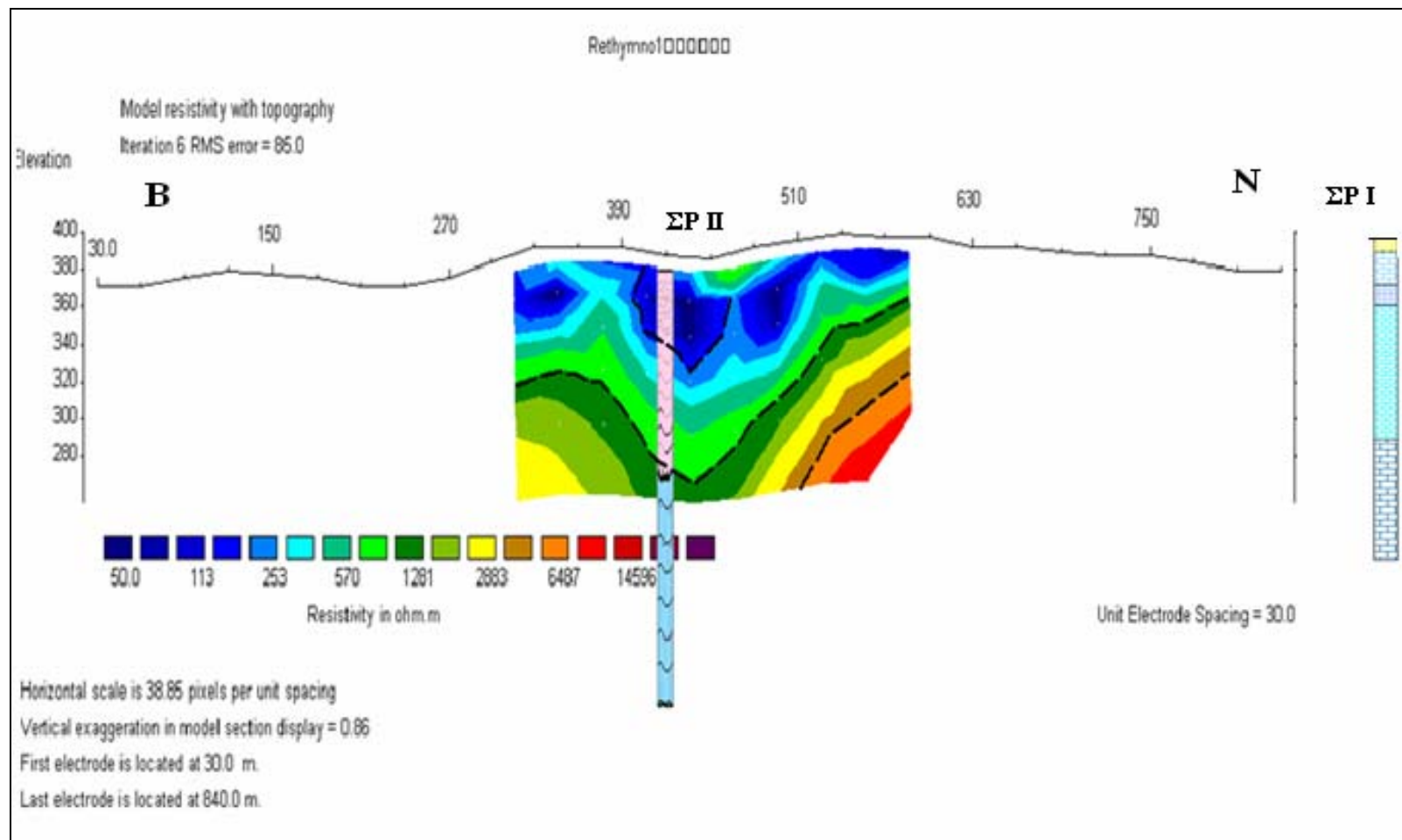
**Σχήμα 4.19:** Συνδυασμένη απεικόνιση της γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας με τις γεωτρήσεις ΣΡ II και ΣΡ I.

Παρουσιάζεται η γεωηλεκτρική τομή με το τοπογραφικό ανάγλυφο, σε συνδυασμό με τη γεώτρηση ΣΡ II του σχήματος 4.3 και τη γεώτρηση ΣΡ I του σχήματος 4.4.

Παρατηρείται ο διαχωρισμός ανάμεσα στα στρώματα των φυλλιτών – χαλαζιτών (στη γεώτρηση φαίνονται με ροζ χρώμα) και των Plattenkalk (στη γεώτρηση φαίνονται με γαλάζιο χρώμα). Τα στρώματα της ενότητας των φυλλιτών – χαλαζιτών παρουσιάζουν χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, λόγω της παρουσίας του γραφίτη. Τα στρώματα των Plattenkalk παρουσιάζουν αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Παρατηρείται μια αύξηση του πάχους της φυλλιτικής – χαλαζιτικής ζώνης στο μέσο της τομής. Το πάχος της κυμαίνεται από 60 m Βόρεια, 120 m στο μέσο και 20 m Νότια.

Παρατηρείται μεγάλο σφάλμα, το οποίο μπορεί να οφείλεται είτε στο έντονο ανάγλυφο κατά τη διεύθυνση Ανατολή – Δύση είτε σε πιθανό και μη ορατό ρήγμα.



**Σχήμα 4.20 :** Συνδυασμένη απεικόνιση της γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας (έχοντας εισάγει το τοπογραφικό ανάγλυφο) με τις γεωτρήσεις ΣΡ ΙΙ και ΣΡ Ι.



Και στα δύο σχήματα παρατηρείται ότι το σφάλμα είναι αρκετά μεγάλο, αλλά αφού τα στοιχεία της γεώτρησης συμβαδίζουν με το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής τομογραφίας, δε δημιουργείται πρόβλημα.

Από τη γεώτρηση και τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας παρατηρούνται τα εξής:

- Από το απόλυτο υψόμετρο 400 m και μέχρι τα 320 m περίπου, δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Οι τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης μέχρι τα 250 Ohm.m αντιστοιχούν στην ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών.
- Από το απόλυτο υψόμετρο 320 m και μέχρι το τέλος της διασκόπησης οι τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης αρχίζουν να αυξάνονται (>600 Ohm.m) και αντιστοιχούν στους Plattenkalk (πλακώδεις ασβεστόλιθους).
- Στο μέσο, περίπου, της τομής (στα 420 m οριζόντια απόσταση) παρατηρείται μια μη ομαλή κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αντιστοιχούν στην ενότητα των φυλλιτών - χαλαζιτών, η οποία πιθανώς να οφείλεται σε ρήγμα και το οποίο δεν φαίνεται στη γεώτρηση.

Άρα, η γεωλογική τομή του σχήματος 4.17 είναι δυνατό να εμπλουτισθεί με τα στοιχεία της γεωφυσικής έρευνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την ερμηνεία των μετρήσεων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης:

1. Από την ερμηνεία της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης βρέθηκε ότι μέχρι το βάθος 350 m συναντώνται οι Plattenkalk (πλακώδεις ασβεστόλιθοι).
2. Στην επεξεργασία της ηλεκτρικής τομογραφίας παρατηρήθηκε μεγάλο σφάλμα, το οποίο αποτελεί ένδειξη για ρήγμα μη επιφανειακό. Η ηλεκτρική τομογραφία έδειξε ότι μέχρι το βάθος 130 m εμφανίζεται η ενότητα των φυλλιτών - χαλαζιτών πάνω στην ενότητα των Plattenkalk (πλακώδεις ασβεστόλιθοι).
3. Η σήραγγα θα συναντήσει κυρίως πλακώδεις ασβεστόλιθους οι οποίοι είναι κατακερματισμένοι. Στο βόρειο τμήμα της θα συναντήσει και φυλλίτες – χαλαζίτες.

Για την πληρέστερη μελέτη της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας προτείνονται οι ακόλουθες περαιτέρω εργασίες:

1. Να διεξαχθεί γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας παράλληλα με τον υπόγειο αγωγό στο βόρειο τμήμα του όπου συναντά την ενότητα των φυλλιτών – χαλαζιτών.
2. Στην περιοχή όπου βρέθηκε το μη ορατό ρήγμα να διεξαχθεί ηλεκτρική τομογραφία με πύκνωση των γραμμών μελέτης για καλύτερο έλεγχο.
3. Να διεξαχθούν γεωφυσικές μετρήσεις κατά μήκος γραμμών μελέτης στη διεύθυνση Α-Δ (κάθετα στον άξονα του υπόγειου αγωγού) για καλύτερα αποτελέσματα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία:

1. **Βαφείδης Α. (2001).** Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II*, Χανιά.
2. **Βαφείδης Α., Μανούτσογλου Ε., Hamdan H., Ανδρονικίδης Ν., Κουκαδάκη Μ., Κρητικάκης Γ.Ι, Οικονόμου Ν. και Σπανουδάκης Ν. (2004).** *Γεωφυσική διασκόπηση στο οροπέδιο του Ομαλού, Ν. Χανίων*, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
3. **Βαφείδης Α., Hamdan H., Ανδρονικίδης Ν., Δασύρας Α., Κρητικάκης Γ., Κουκαδάκη Μ., Κουμάκης Ν., Λαμπαθάκης Σ., Μανούτσογλου Ε., Οικονόμου Ν., Παπακωνσταντίνου Κ., Σπανουδάκης Ν. (2004).** *Συμβολή της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και της Σεισμικής Διάθλασης στην επιλογή θέσης για τη δημιουργία Λιμνοδεξαμενής στην Κουντούρα, Δ.Πελεκάνου, Ν.Χανίων*, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
4. **Γεωργιλιά, Θ. Κ. (1998).** *Συμβολή της σεισμικής ανάκλασης στην επίλυση υδρογεωλογικών προβλημάτων*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. **Γιαλαμάς Ε. (2005).** *Συμβολή των γεωφυσικών μεθόδων σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας στην ολοκλήρωση της μελέτης κατασκευής της λιμνοδεξαμενής Κουντούρας Χανίων*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
6. **Γκανιάτσος Ι. (1995).** *Γεωηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη Wenner*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
7. **Γκανιάτσος Ι. (2000).** *Γεωηλεκτρική τομογραφία σε τρεις διαστάσεις*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

8. **Hamdan, H. (2002).** Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του Νομού Χανίων, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
9. **Hamdan, H., Ζήσης, Κ., Μανούτσογλου, Ε., Βαφείδης, Α., Σοφός, Φ. (2002).** Τρισδιάστατη χαρτογραφική απεικόνιση πιθανών υδροφόρων σχηματισμών στην περιοχή Κισσάμου, Ν. Χανίων.
10. **Ζήσης Κ. (2000).** Γεωηλεκτρική διασκόπηση στην περιοχή Κισσάμου Ν. Χανίων, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
11. **Κατσικάτσος Γ. (1992).** Γεωλογία της Ελλάδας, σελίδες 132-133, 140-141, 144-150, 155-160, 169-170, Αθήνα.
12. **Μουντράκης Δ. (1985).** Γεωλογία της Ελλάδας, σελίδες 186-188, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
13. **Ο.Α.ΔΥ.Κ. (2002).** Έργο Αμαρίου, Σήραγγα διέλευσης του αγωγού μεταφοράς του νερού, Αναθεωρημένη Γεωλογική Έκθεση, εκπόνηση από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων, Τομέας Γεωτεχνικών Γεωλογικών Μελετών.
14. **Ρουμπεδάκης Στ. (2004).** Η γεωλογική δομή του Πρασσιανού φαράγγιού, Ρέθυμνο Κρήτης, Πτυχιακή εργασία, Αθήνα.
15. **Σούρλας Γ. (2000).** Συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στην αναζήτηση θαμμένων αρχαιοτήτων στην Ίτανο Λασιθίου, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
16. **Χορευτάκη Γ. (2003).** Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και του υπεδάφειου ραντάρ στο λατομείο Ζωφόρων του Ν. Ηρακλείου, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

#### **Διεθνής Βιβλιογραφία:**

1. **Dobrin, M. B. (1976).** *Introduction to geophysical prospecting*, McGraw Hill Book Comp. Inc., New York, USA.

2. **Dobrin, M. B., and Savit, c. H. (1988).** *Introduction to Geophysical Prospecting*, 4<sup>th</sup> ed., McGraw Hill Book Comp. Inc., Singapore.
3. **Horeftaki G., Hamdan H., Vafidis A., Zervakis G. (2004).** *Integrated Geophysical Survey at Zoforoi Quarry, Iraklion, Crete.*
4. **Inman, R. J. (1975).** *Resistivity Inversion with Ridge Regression*, Geophysics, Vol. 40, No 5, p. 798-817.
5. **Loke, M. H. and Barker, R. D. (1996).** *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*, Geophysical Prospecting, 44 (1).
6. **Marquardt, D. W. (1963).** *An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters*, SIAM J. Appl. Math., 11, p. 431-441.
7. **Parasnis, D. S. (1986).** *Principles of Applied Geophysics*, 4<sup>th</sup> ed., Chapman and Hall, London.
8. **Reynolds, J. M. (1977)** *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Inc., England.
9. **Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A. (1976).** *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.