

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# <sup>(</sup>ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΟΠΙΣΜΟ ΕΓΚΟΙΛΩΝ . ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗ ΧΑΝΙΩΝ'



## ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Εξεταστική επιτροπή: Βαφείδης Αντώνιος , Καθηγητης (Επιβλέπων) Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Αν. Καθηγητής Στειακάκης Εμμανουήλ , Λέκτορας

> ΧΑΝΙΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πάνω από γνωστή σπηλιά στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη του δήμου Χανίων, στον περιβάλλοντα χώρο της εκκλησίας του αγίου Σπυρίδωνος τον Ιούλιο του 2007.

Για τη συλλογή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις διπόλου –διπόλου και Wenner- Schlumberger και η επεξεργασία των δεδομένων έγινε σε δύο και σε τρεις διαστάσεις. Χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα RES2DINV (για 2 Δ) και RES3DINV (για 3Δ). Η αντιστροφή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους , τη Κανονικοποίηση με Περιορισμούς Εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion) και τη Μέθοδο Αντιστροφής με τη Χρήση της Νόρμας L1 (Robust).

Κατασκευάστηκαν συνθετικά δεδομένα χρησιμοποιώντας δισδιάστατα ( RES2MOD) και τρισδιάστατα (RES3MOD) μοντέλα, τόσο για την ερμηνεία των πραγματικών δεδομένων όσο και για τον μελλοντικό σχεδιασμό γεωηλεκτρικών μετρήσεων πάνω από σπηλιές.

Από την παραπάνω έρευνα προέκυψαν τα εξής :

- Η αντιστροφή των πραγματικών δεδομένων από την μέθοδο διπόλου διπόλου οδήγησε σε ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο που απέχει πολύ από την πραγματικότητα.
- 2 Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2MOD το οποίο περιγράφει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου για δομές απείρου μήκους μη επηρεαζόμενες από πλευρικές επιδράσεις για να διερευνηθούν οι δυνατότητες εντοπισμού σπηλαίων από την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η προσομοίωση με την μέθοδο αυτή εντοπίζει την σπηλιά. Για την ερμηνεία των δεδομένων είναι απαραίτητη η προσομοίωση με την χρήση μοντέλων τριών διαστάσεων το οποίο περιγράφει τόσο το σπήλαιο όσο και το ανάγλυφο της περιοχής
- 3 Η ίδια διαδικασία έγινε και με την διάταξη Wenner-Schlumberger. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει προβλήματα ακόμα και στην περίπτωση δισδιάστατων δομών

Πρόταση για περεταίρω έρευνα είναι η πραγματοποίηση συμπληρωματικών μετρήσεων τουλάχιστον σε 2 γραμμές μελέτης με την διάταξη διπόλου –διπόλου και η τρισδιάστατη αντιστροφή τους.

#### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στον Ελλαδικό χώρο έχουν εντοπιστεί πολλά σπήλαια. Αρκετά από αυτά είναι διαμορφωμένα από φυσικούς παράγοντες, όπως είναι το νερό, ενώ άλλα από τον ίδιο τον άνθρωπο. Ο εντοπισμός τους συνήθως γίνεται τυχαία αφού είναι πολύ δύσκολα να βρει κανείς μια σπηλιά χωρίς να έχει πληροφορίες για την τοποθεσία της και το βάθος στο οποίο βρίσκεται. Η γεωφυσική έρευνα μπορεί να δώσει αυτές τις πληροφορίες.

Η διπλωματική εργασία αυτή με τίτλο << Συμβολή της δισδιάστατης και τρισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό σπηλαίων. Εφαρμογή στην περιοχή Αγίου Ιωάννη Χανίων >> ,αποσκοπεί στο κατά πόσο και κάτω από ποιες συνθήκες είναι δυνατόν η γεωφυσική μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής τομογραφίας να εντοπίσει μια σπηλιά.

Η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ο περιβάλλον χώρος της εκκλησίας του Αγίου Σπυρίδωνος ,στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη του δήμου Χανίων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Βαφείδη Αντώνιο για την υποστήριξή του και την βοήθειά του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, και τον κ. Εμμανουήλ Στειακάκη, Λέκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, οι οποίοι με τίμησαν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων κ. Hamdan Hamdan για τις συμβουλές του και την συνεχή βοήθειά του.

## Περιεχόμενα

ПЕРІЛНѰН	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας	5
1.2 Επισκόπηση ερευνητικού πεδίου και παρουσίαση εφαρμογών	5
1.3 Περιοχή μελέτης	8
1.4 Γεωλογία της περιοχής μελέτης	9
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	12
2.1 Εισαγωγή	12
2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη	12
Α	13
2.3 Το ευθύ πρόβλημα	16
2.4 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση	17
2.5 Τρόποι διάταξης ηλεκτροδίων	17
2.6 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων	21
2.7 Ηλεκτρική τομογραφία	22
2.7.1 Εισαγωγή	22
2.7.2. Θεωρία	23
2.7.3 Τρόπος Πραγματοποίησης των Μετρήσεων	23
2.7.4 Αντιστροφή των Δεδομένων	25
3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ 2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	29
3.1 Συλλογή μετρήσεων στο πεδίο	29
3.2 Επεξεργασία μετρήσεων	30
3.3 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων ,διάταξη διπόλου -διπόλ	ου32
3.2.1 Γραμμή μελέτης 1	32
3.3.2 Γραμμή μελέτης 2	34
3.3.3 Σύγκριση των γεωηλεκτρικών τομών	35
3.4 Συνθετικά δεδομένα , διάταξη διπόλου -διπόλου	37
3.4.1 Εισαγωγή	37
3.4.2 Μοντέλο 1 : Βόρειο τμήμα σπηλιάς	38
3.4.3 Μοντέλο 2 : Νότιο τμήμα σπηλιάς	39
3.4.4 Μοντέλο 3 :συνδυασμός βόρειου και νότιου τμήματος της σ χωρίς χρήση θορύβου	πηλιάς 40
3.4.5 Μοντέλο 4 : συνδυασμός βόρειου και νότιου τμήματος της ο χρήση μέγιστου θορύβου	σπηλιάς με 42
3.4.6 Μοντέλο 5	44
3.4.7 Μοντέλο 6	45

3.4.8 Μοντέλο 7	46
3.4.9 Μοντέλο 8	47
3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων και συνθετικο δεδομένων διπόλου - διπόλου	ών 49
3.6 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων ,διάταξη Wenner-Schlumb	erger 51
3.7 Συνθετικά δεδομένα με χρήση διάταξης Wenner - Schumberger	57
3.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών και συνθετικών δεδομένα διάταξη Wenner - Schlumberger	ων με την 57
4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ 3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	59
4.1 Εισαγωγή	59
4.1.1 Τρισδιάστατο μοντέλο	59
4.2 Δισδιάστατη αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων	61
4.2.1 Διάταξη διπόλου - διπόλου	62
4.2.2 Διάταξη Wenner – Schlumberger	67
4.3 Τρισδιάστατη αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων	69
4.3.1 Διάταξη διπόλου - διπόλου	69
4.1.3 Διάταξη Wenner – Schlumberger	72
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	74
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική αυτή εργασία είχε σαν στόχο την μελέτη της δυνατότητας της ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό σπηλαίων.

Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε γεωφυσική διασκόπηση με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε σε 2 διαστάσεις και σε 3 διαστάσεις.

Επίσης πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις των διαστάσεων της σπηλιάς , η οποία έχει πλήρη πρόσβαση από τον άνθρωπο .

#### 1.2 Επισκόπηση ερευνητικού πεδίου και παρουσίαση εφαρμογών

Ο BECHTEL (2006) περιγράφει μια γεωφυσική έρευνα για να εντοπίσει το χαμένο "Port Kennedy Bone Cave" στην κοιλάδα Forge του Εθνικού Πάρκου Φυσικής Ιστορίας. Το σπήλαιο περιέχει μέσα του απολιθώματα του Πλειστόκαινου που συλλέχθηκαν από διάσημους παλαιοντολόγους από τα τέλη του 1800, και ήταν νέα για την επιστήμη, με μερικά να μην βρίσκονται πουθενά αλλού.

Δεδομένου της πλήρωσης του σπήλαιου με αμίαντο, η άμεση διερεύνηση για κάποιο άνοιγμα συνεπάγεται κινδύνους για την υγεία των εργατών και το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, ο Doheny (UPenn, 2002) πρότεινε μια γεωφυσική μέθοδο. Μια ομάδα φοιτητών και των συναδέλφων του Doheny επέλεξε μικροβαρύτητα και 3-D απεικόνιση με τη χρήση της ηλεκτρικής τομογραφίας, σαν τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνολογίες γεωφυσικής. Το καλοκαίρι του 2004, το σπήλαιο εντοπίστηκε. Οι μέθοδοι παρείχαν αποδειξεις για τη χαμένη τοποθεσία του σπηλαίου.

Ο Matias και οι συνεργάτες του (2006) περιγράφουν την περίπτωση της εφαρμογής των γεωηλεκτρικών μεθόδων για την ανίχνευση ενός τάφου πιθανόν του Damião de Goes, εξέχοντα Πορτογάλου ανθρωπιστή που έζησε τον XVI αιώνα. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε εντός της Εκκλησίας Varzea με τις διάταξεις διπόλου-διπόλου, και πόλου-πόλου. Τα αποτελέσματα από την αντιστροφή των δεδομένων έδειξαν ανωμαλίες υψηλής αντίστασης κοντά στα τοιχώματα του τάφου. Ανωμαλίες

χαμηλής αντίστασης παρατηρήθηκαν όπου είχαν την υπόνοια παρουσίας του νερού που εμπλουτίζεται με ιόντα λόγω της αποσύνθεσης των ανθρώπινων οργάνων. Το αποτέλεσμα ενισχύεται από την απεικόνιση της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Από τις ανασκαφές, που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας των γεωηλεκτρικών, βρέθηκε με επιτυχία ένα τάφος 2,7  $\times$  0,8  $\times$  1,7 m, όπου είχαν συγκεντρωθεί πολλά ανθρώπινα οστά. Ένα 3D μοντέλο ηλεκτρικής αντίστασης που ενσωματώνει τα κύρια χαρακτηριστικά του τάφου κατασκευάστηκε μετά την ανασκαφή.

Η Muchaidze (2008) στην έρευνα της που έγινε για το τμήμα Μεταφορών του Missouri (MODOT) το οποίο σχεδίαζε να κατασκευάσει ένα νέο αυτοκινητόδρομο για την ανακούφιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά τις περιόδους αιχμής, το δρόμο 60/65. Το εργοτάξιο βρίσκεται στη νοτιοανατολική πλευρά του Springfield, Greene County, Missouri. Το υπόβαθρο της περιοχής που μελετήθηκε χαρακτηρίζεται από καρστικές δομές, όπως υπόγεια ρέματα, υπόγειες σπηλιές και καθιζήσεις. Ο κύριος στόχος ήταν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως κενά γεμάτα αέρα, τα οποία θα μπορούσαν να δημιουργήσουν πιθανά προβλήματα. Για το έργο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT). Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου - διπόλου διότι παρέχει γενικά την καλύτερη ανάλυση σε περιοχές με ιδιαίτερα μεταβλητό βάθος στο υπόστρωμα. Βάσει της ηλεκτρικής τομογραφίας τα κενά γεμάτα με αέρα δεν εντοπίστηκαν στο δρόμο 60/65.

Οι Leucci και De Giorgi (2005) στην γεωφυσική τους έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη νότια Ιταλία χρησιμοποίησαν την ηλεκτρική τομογραφία (ERT) και τα γεωραντάρ (GPR). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε για την απεικόνιση της οροφής του σπηλαίου και την ανίχνευση σε ανθρακικά πετρώματα γιατί είναι γνωστό ότι οι ρωγμές στα πετρώματα αποτελούν μια από τις κύριες αιτίες κατάρρευσης. Οι ρωγμές εντοπίστηκαν σε βάθος περίπου 2m χρησιμοποιώντας γεωραντάρ, η ηλεκτρική τομογραφία με διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου χαρτογράφησε κατακόρυφες δομές, όπως κενά, αλλά αποτελεί μια σχετικά φτωχή μέθοδο για τη χαρτογράφηση δομών σε οριζόντια διεύθυνση.

Ο Abu-Shariah (2009) χρησιμοποιεί την γεωηλεκτρική μέθοδο για τον εντοπισμό της θέσης και της έκτασης των υπογείων κοιλοτήτων. Έτσι, μια 2D γεωηλεκτρική τεχνική απεικόνισης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της γεωμετρίας μιας γνωστής υπόγειας κοιλότητας. Η χρήση της 2D γεωηλεκτρικής τεχνικής απεικόνισης έδειξε τις δυνατότητες της για την ανίχνευση κρυμμένων αντικείμενων.

Ο Leucci (2006) σε μια αρχαιολογική έρευνα για την αποκατάσταση της Εκκλησίας στο Botrugno της Ιταλίας που χρονολογείται από 1500-1600 π.Χ. χρησιμοποίησε τη 3D ηλεκτρική τομογραφία με σκοπό να προσδιορίσει την θεμελίωση της εκκλησίας και ειδικότερα η ύπαρξη κενών και ρωγμών στο υπόστρωμα. Η 3D ηλεκτρική τομογραφία κατάφερε να επιβεβαιώσει την παρουσία του νερού στο υπέδαφος και να εντοπίσει μια κοιλότητα σε περίπου 2 μέτρα σε βάθος.

Ο Gad El-Qady και οι συνεργάτες του (2005) αναφέρουν ότι: στο Ν.Α. Κάιρο, στη Αίγυπτο η εμφάνιση σπηλαίων και οι καθιζήσεις αποτελούν αιτίες καταστροφών σε κατοικημένες περιοχές. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν κατά την έρευνα είναι η ηλεκτρική τομογραφία και το γεωραντάρ. Η έρευνα διεξάχθηκε πάνω από ένα σπήλαιο. Από το συνδυασμό των μεθόδων απεικονίστηκε το σπήλαιο σε βάθος 2m και πλάτος 4m. Η έρευνα αποκάλυψε ότι η περιοχή επηρεάζεται επίσης από τις κατακόρυφες ζώνες ρηγμάτωσης του ασβεστόλιθου.

## 1.3 Περιοχή μελέτης

Η μελέτη της παρούσης διπλωματικής έγινε στον δήμο Χανίων στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη, στον περιβάλλοντα χώρο της εκκλησίας του Αγίου Σπυρίδωνα. Η περιοχή του Αγίου Ιωάννη βρίσκεται Ν-Α του κέντρου τον Χανίων. Στην εικόνα 1.1 διακρίνεται η εκκλησία του αγίου Σπυρίδωνος καθώς και (εικόνα 1.2) η μία εκ των εισόδων της σπηλιάς που μελετάται.



Εικόνα 1.1: Αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης όπου διακρίνεται η εκκλησία του αγίου Σπυρίδωνα. Η εικόνα είναι από το site maps.live.com

Στο μέρος πίσω από το ιερό υπάρχει πρανές με ύψος 5,5 μέτρων και μήκος περίπου 35 μέτρα. Η βαθμίδα αυτή έχει σαν πάτωμα το επίπεδο του προαύλιου χώρου της εκκλησίας και οροφή το επίπεδο του δρόμου πίσω από αυτήν. Η παράταξη της ορίζεται από Βορρά προς Νότο.



Εικόνα 1.2: Φωτογραφία από την περιοχή μελέτης

## 1.4 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (φύλλο ΧΑΝΙΑ, κλίμακα 1:50.000, 1996), στην υπό μελέτη περιοχή συναντώνται οι ακόλουθοι σχηματισμοί (σχήμα 1.2):



**Σχήμα 1.1**: Απόσπασμα από το φύλλο χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (Φύλλο Χανιά, κλίμακα 1:50.000, 1996) σε κλίμακα 1:25.000.

#### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ (ΟΛΟΚΑΙΝΟ)

**Αλλουβιακές προσχώσεις (Qall)**: Πηλοί, άργιλλοι, άμμοι και χαλίκια. Οι αποθέσεις αυτές είναι χαλαρές και μικρού πάχους (πάχος μικρότερο του ενός μέχρι και μερικά μέτρα).

**Προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογής (Qtr)**: Παρατηρούνται εντός καρστικών εγκοίλων.

#### MEIOKAINO

**Μάργες (Mim)**: Κιτρινόφαιες έως λευκοκίτρινες, πολλές φορές εναλλασσόμενες με στρώματα μαργαικών ψαμμιτών και πλακώδων μαργαικών ασβεστολίθων ενώ εγκλείουν απολιθώματα θαλάσσιων μαλακίων.

**Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος (Mik)**: Συμπαγής, λευκοκίτρινος έως λευκότεφρος, με θαλάσσια απολιθώματα (ελασματοβράχια, εχινόδερμα, βρυόζωα, εχίνους, θραύσματα οστρακόδερμων και πλούσια μικροπανίδα).

#### <u>ΤΡΙΑΔΙΚΟ - ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ</u>

#### Ζώνη Τρίπολης

**Ασβεστόλιθοι (T**<sub>R-kk</sub>): Συμπαγείς, λευκόφαιοι έως υποκύανοι, μικροκρυσταλλικοί έως στιφροί συνήθως με θραύσματα ρουδιστών, ενίοτε λατυποπαγείς, κατά τόπους δολομιτιωμένοι και ισχυρά καρστικοποιημένοι. Ενδεχομένως να περιλαμβάνονται και κατώτερα μέλη, ιουρασικής έως τριαδικής ηλικίας, χωρίς αυτό να επιβεβαιώνεται παλαιοντολογικά. Η στρωματογραφική στήλη από το σχετικό φύλλο χάρτη φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.2: Στρωματογραφική στήλη από Ι.Γ.Μ.Ε. (Φύλλο Χανιά).

Η περιοχή που μελετήθηκε σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη σε μειοκαινικές μάργες που είναι κιτρινόφαιες έως λευκοκίτρινες και εναλλάσσονται με στρώματα μαργαϊκών ψαμμιτών και πλακωδών μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Οι μάργες αυτές βρίσκονται πάνω από συμπαγής μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.

#### 2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών επιτεύχθηκε ο εντοπισμός φυσικού αερίου στη Ρουμανία το 1923 και αλατούχων δόμων στη Γαλλία το 1926. Η συστηματική εφαρμογή τους ξεκίνησε τη δεκαετία του '70 και αυτό λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γεγονός που βοήθησε τόσο στην αυτοματοποιημένη συλλογή των δεδομένων όσο και στην επεξεργασία τους.

Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Μετρούμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική τάση. Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο καθορισμός της τιμής, καθώς και η μελέτη των μεταβολών αυτής στα επιφανειακά στρώματα, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την εφαρμογή των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος. Η χρήση των ηλεκτρικών μεθόδων καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στις γεωεπιστήμες όπως είναι η κοιτασματολογία, η υδρογεωλογία, η τεχνική γεωλογία, η χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών αλλά και την αρχαιολογία.

Από τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης οι πιο σημαντικές είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων. Για τη συλλογή δεδομένων στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκεκριμένα η ηλεκτρική τομογραφία.

#### 2.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm, σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση R (σε

Ohm) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς δυναμικού ΔV (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση I (σε Ampere) του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$
(2.1)

Η αντίσταση ενός ομογενούς αγωγού είναι ανάλογη με το μήκος L του αγωγού, αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν Α της τομής του αγωγού και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$
(2.2)

όπου ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του αγωγού.



Διατομή Σχήμα 2.1: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το 1 Ωm. Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα 1Ωcm και είναι 1 Ωm = 100 Ωcm. 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  $10^{-6}$  Ωm σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι  $10^{15}$  Ωm σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ  $10^{-6}$  και  $10^{-1}$  Ωm χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ  $10^8$ και  $10^{15}$  Ωm. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι:α) η λιθολογία των πετρωμάτων, β) το πορώδες των πετρωμάτων.

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους συνδεμένα 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 μπαίνει στη γη.

Για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται ότι η γη είναι ομοιογενής και ισότροπη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ. 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 είναι 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 ακτίνας d, δίνεται σύμφωνα με τη σχέση (2.2) από το γινόμενο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ με τον λόγο της ακτίνας d προς το εμβαδόν 2πd<sup>2</sup> της ημισφαιρικής επιφάνειας.

$$R = \rho \frac{d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{d}$$
 (2.3)

Η διαφορά  $\Delta V_d$  του δυναμικού  $V_0$  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:

$$\Delta V_{d} = V_{d} - V_{0} = IR = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d}$$
(2.4)

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  $-V_0$ . 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 (2.2). Η διαφορά μεταξύ του δυναμικού  $-V_d$  όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και του δυναμικού του  $V_0$  θα είναι:

$$-\Delta V_{d} = -V_{d} - (-V_{0}) = V_{0} - V_{d} = -IR = -\frac{I\rho}{2\pi}\frac{1}{d}$$
(2.5)

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. Οι γραμμές ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες.



Σχήμα 2.2: Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη στην περίπτωση που δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. (Γκανιάτσος, 2000 Σούρλας Γ. (2000).

Όταν η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων θεωρηθεί μικρή, το ηλεκτρικό πεδίο του ενός ηλεκτροδίου αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο του άλλου ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα το δυναμικό σε ένα σημείο του υπεδάφους να ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών των ηλεκτρικών πεδίων των δύο ηλεκτροδίων. Το συνολικό δυναμικό V σε ένα σημείο του υπεδάφους που απέχει αποστάσεις d<sub>1</sub> και d<sub>2</sub> από την πηγή και τη γείωση αντίστοιχα, ισούται με το άθροισμα του δυναμικού V<sub>d1</sub> που οφείλεται στην πηγή, με το δυναμικό V<sub>d2</sub> που οφείλεται στη γείωση:

$$V = V_{d_1} + V_{d_2} = V_{d_1} - V_0 + V_{0+1} + V_{d_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)$$
(2.6)

Με βάση τη σχέση (2.6) υπολογίζεται το δυναμικό σε όλα τα σημεία του υπεδάφους και 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. Το σχήμα 2.3 ισχύει για κάθε επίπεδο που περιέχει τα δύο ηλεκτρόδια, ανεξάρτητα από τη γωνία κλίσης του ως προς το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 2.3: Ροή ηλεκτρικού ρεύματος στην περίπτωση που δύο ηλεκτρόδια εισάγονται σε ομοιογενές και ισότροπο έδαφος (Dobrin, 1976).

#### 2.3 Το ευθύ πρόβλημα

Όπως είναι γνωστό από το νόμο του Ohm ισχύει η ακόλουθη σχέση

$$J=\sigma E \tag{2.7}$$

Όπου J= πυκνότητα ρεύματος

σ= ηλεκτρική αγωγιμότητα

Ε=ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Επειδή είναι γνωστό ότι τα ηλεκτρικά πεδία είναι συντηρητικά ισχύει η ακόλουθη ισότητα

$$\mathbf{E} = -\Delta \Phi \tag{2.8}$$

Συνδυάζοντας τις δύο προηγούμενες εξισώσεις και εκτελώντας τις πράξεις μπορεί κάποιος να καταλήξει στην

$$\Delta J = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) \delta(x) \delta(y) \delta(z)$$
(2.9)

Όπου p= πυκνότητα φορτίου για συγκεκριμένο σημείο με συντεταγμένες (x , y, z)  $\delta$  = συνάρτηση Dirac

Η εξίσωση μπορεί να γραφτεί ειδικά για το τρισδιάστατο πρόβλημα και για ένα πολύ μικρό όγκο ΔV ως εξής

$$-\Delta[\sigma(x, y, z)\Delta\Phi(x, y, z)] = \frac{I}{\Delta V}\delta(x - \chi_s)\delta(y - \gamma_s)\delta(z - z_s)$$
(2.10)

Η εξίσωση (2.10) μπορεί να λυθεί αριθμητικά εφ'όσον ικανοποιούνται οι εξής προϋποθέσεις

- $\Phi(x,y,z)$  prépei na eínai sunechs sunárthon .
- Η πυκνότητα ρεύματος πρέπει να είναι και αυτή συνεχής

Εφ' όσον ικανοποιούνται τα παραπάνω είναι δυνατόν η προηγούμενη να λυθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

#### 2.4 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η αντίσταση που υπολογίζεται από τη προηγούμενη σχέση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ<sub>α</sub>).

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

#### 2.5 Τρόποι διάταξης ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων, το σχήμα 2.4 δείχνει τις τρεις πιο σημαντικές διατάξεις πού είναι:

#### α) Διάταξη Wenner

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, δηλαδή, AM = MN = NB = α, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.α, έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $ρ_{\alpha}$  θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi \alpha \frac{V_{MN}}{I}$$
(2.11)

17

Η ποσότητα

$$2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}\right) = 2\pi\alpha$$
 (2.12)

ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής και συμβολίζεται με Κ. Η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί αν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι γνωστές.

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση που δίνει την δομή του υπεδάφους, τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται κάθε φορά συμμετρικά ως προς ένα σημείο, που θεωρείται κέντρο της βυθοσκόπησης.

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

Η διάταξη Wenner παρά τη γεωμετρική της απλότητα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, αφού κατά την πραγματοποίηση κάθε νέας μέτρησης πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια.

#### β) 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 (σχήμα 2.4.b), η απόσταση 2b μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση 2L μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Έτσι ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L-b}\right)^{-1} = (L^2 - b^2)\frac{\pi}{2b}$$
(2.13)

Επειδή όμως (L>>b) τότε  $(L^2 - b^2) \sim L^2$ , και έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται από την σχέση

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2b} \, \frac{\Delta V}{I}$$

(2.14)

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 σχετική 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 διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες.

#### γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Σε αυτή τη διάταξη η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος είναι ίση με α. Ομοίως α είναι και το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγαριών των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη και ίση με πα  $(n >> \alpha)$ , όπως φαίνεται στο σχήμα  $(2.4.\gamma)$ .

Ο γεωμετρικός συντελεστής Κ για την διάταξη διπόλου–διπόλου και για n>>1, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = n\pi\alpha(n+1)(n+2)$$
 (2.15)

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την σχέση

$$\rho_{\alpha} = n\pi\alpha(n+1)(n+2)\frac{\Delta V}{i}$$
(2.16)

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης αποτελεί η απόσταση 2na, ανάμεσα στα δίπολα ρεύματος και δυναμικού, που μπορεί να αυξηθεί αρκετά χωρίς να χρειάζονται μεγάλα μήκη καλωδίων. Η διάταξη περιορίζεται μόνο από τη δυνατότητα των καταγραφικών οργάνων και από τον εδαφικό θόρυβο.

Επίσης απλά αναφέρονται οι παρακάτω:

#### δ) Τετραγωνική διάταξη

Στη διάταξη αυτή τα τέσσερα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις κορυφές τετραγώνου και αποτελούν τη βάση, πάνω στην οποία βρίσκεται το όργανο μέτρησης.

ε) 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 τον στόχο της μεθόδου.



**Σχήμα 2.4:** Διατάξεις Wenner (α), Schlumberger (β), διπόλου-διπόλου (γ) (Παπαζάχος, 1986, σελ. 253).

Κάθε διάταξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη θέση και τον σκοπό, για τον οποίο εφαρμόζεται. Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη μεταβολή της φαινόμενης 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. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζει και η διάταξη Schlumberger με το επιπλέον πρόβλημα του μικρού σήματος, δηλαδή δε δίνει έντονα τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης. Το πρόβλημα της διπλής κορυφής δεν εμφανίζεται στις διατάξεις διπόλου – διπόλου και διδύμου ηλεκτροδίου. Η διάταξη διπόλου – διπόλου δίνει καθαρά τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι, επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι μικρή περιορίζεται το

βάθος διείσδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους. Η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου έχει πλευρική διακριτική ικανότητα α, δηλαδή για να ξεχωρίσει δύο δομές πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά την οριζόντια διεύθυνση απόσταση α, με α να είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων κάθε ζευγαριού. Απαιτεί τη μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση. Όμως η εύκολη και γρήγορη εφαρμογή της και η έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης που δίνει, την έχουν κάνει μια από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις.

#### 2.6 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις. Η διάταξη των ηλεκτροδίων δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι παράγοντες-κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπ'όψιν πριν τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι οι κάτωθι.

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο

Ως προς τον παράγοντα αυτό κατά σειρά προτεραιότητας οι διατάξεις είναι: Wenner, Schlumberger, διπόλου-διπόλου.

2. Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες

Οι οριζόντιες ανομοιογένειες φαίνεται να προκαλούν μεγαλύτερη ευαισθησία στην διάταξη διπόλου-διπόλου και λιγότερη σε Wenner και Schlumberger.

 Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος

Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

 Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος (Επίδραση του επιδερμικού φαινομένου)

Το επιδερμικό φαινόμενο επηρεάζει την ικανότητα διείσδυσης σε μεγάλα βάθη. Η δυνατότητα μεγάλου ανοίγματος ηλεκτροδίων ρεύματος της διάταξης Schlumberger μαζί με την ευαισθησία σε βάθος που έχει, της παρέχουν ένα σαφές προβάδισμα.

5. Βάθος διασκόπησης

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κυρίως από το οριζόντιο ανάπτυγμα (απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων), που σημαίνει ότι η διάταξη Schlumberger πλεονεκτεί. Επίσης το βάθος διασκόπησης επηρεάζεται από τις ανομοιογένειες, την τοπογραφία, την κλίση των στρωμάτων, το ανάγλυφο του υπόβαθρου και από το μοντέλο των στρωμάτων του υπεδάφους.

6. Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

Η διάταξη διπόλου-διπόλου υπερτερεί των άλλων διατάξεων στην περίπτωση των γεωλογικών ανωμαλιών.

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραίωση των ρευματικών γραμμών. Άρα οι διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

## 2.7 Ηλεκτρική τομογραφία

#### 2.7.1 Εισαγωγή

Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας επιτυγχάνεται η λεπτομερής 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 σε οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση. Έτσι λοιπόν το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα δύο διαστάσεων. Ευθύ πρόβλημα στη μέθοδο μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζουμε τον υπολογισμό της διαφοράς δυναμικού και εν συνεχεία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις ήδη γνωστές πραγματικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Αντίστροφο πρόβλημα ονομάζουμε τον υπολογισμό των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες (Γκανιάτσος,1995). Η εύρεση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής 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.

#### 2.7.2. Θεωρία

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

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 ρ<sub>α</sub>, η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ, σε αντίθεση με τη φαινόμενη που είναι φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, είναι ιδιότητα των πετρωμάτων και των ορυκτών.

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
- δ) το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων.

#### 2.7.3 Τρόπος Πραγματοποίησης των Μετρήσεων

Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι διάταξεις Wenner – Schlumberger και διπόλου-διπόλου. Η πρώτη πρόκειται για ένα συνδυασμό των δύο διατάξεων, όπου η διάταξη των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος για την πρώτη μέτρηση πραγματοποιείται σύμφωνα με τη διάταξη Wenner. Εν συνεχεία η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού παραμένει σταθερή από το κέντρο της διάταξης και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, πάντα συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης (τρόπος πραγματοποίησης μετρήσεων με τη διάταξη Schlumberger). Στη διάταξη Wenner η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή και ίση με α και όλη η διάταξη μετακινείται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση :

$$\rho_{\alpha} = 2\pi \alpha \frac{V_{MN}}{I}$$
(2.17)

Στη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα βάθη, αυξάνεται σταδιακά η απόσταση σε 2α,3α κ.ο.κ.

Στη διάταξη Schlumberger η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, συμμετρικά πάντα με το κέντρο της όλης διάταξης. Στη συγκεκριμένη διάταξη η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i}$$
(2.18)

Για την επίτευξη διέλευσης ρεύματος σε μεγαλύτερα βάθη αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (σχ.2.6). Στην ψευδοτομή (pseudosection) οι φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις είναι σχεδιασμένες σε μία τομή κατά τέτοιο τρόπο όπως οι πραγματικές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις σε σημεία ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και σε βάθος που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διάταξη (σχ.2.5).

Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει μια προσεγγιστική εικόνα της κατανομής των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στο επίπεδο της τομής. Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο το επόμενο βήμα είναι η λύση του ευθέως προβλήματος, στο οποίο υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Οι θεωρητικές αυτές τιμές, συγκρίνονται με τις πραγματικές μετρήσεις. Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής, όπου επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων με αγνώστους τις παραμέτρους του μοντέλου. Υπολογίζεται με τη διαδικασία αυτή ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο. Η βελτίωση αφορά μόνο τις παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τη σειρά τους με τις πραγματικές μετρήσεις. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο που να δίνει φαινόμενες αντιστάσεις όσο το δυνατό πιο κοντά στις μετρήσεις.



Σχήμα 2.5 Ψευδοτομή (pseudosection) φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων



Σχήμα 2.6: Διάταξη των δεδομένων στην ψευδοτομή του υπεδάφους(manual Res2dinv).

### 2.7.4 Αντιστροφή των Δεδομένων

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα που χρησιμοποιείται η αντιστροφή, 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 το πρόβλημα είναι υπερπροσδιορισμένο, δηλαδή 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.

An m=(m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>, ....,m<sub>M</sub>) είναι οι παράμετροι του μοντέλου και d<sub>i</sub>=(d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, ....,d<sub>N</sub>) i=1, 2,...,N είναι οι μετρήσεις, η μη γραμμική σχέση που συνδέει τις μετρήσεις με τις παραμέτρους είναι:

$$d_i = f_i(m_1, m_2, ..., m_M) + e$$
 (2.19)

όπου ε το σφάλμα των μετρήσεων.

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

$$d_{i} = f_{i}(m_{1}^{0}, m_{2}^{0}, ..., m_{M}^{0}) + e$$
(2.20)

Προσεγγίζοντας τη συνάρτηση  $f_i$  με σειρά Taylor γύρω από το m<sup>o</sup> προκύπτει:

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, ..., m_M^0 + \delta m_M)$$
(2.21)

Το σφάλμα από τη σχέση (2.19) είναι:

$$\mathbf{e}_{i} = \mathbf{d}_{i} - \mathbf{f}_{i}(\mathbf{m}) \approx \mathbf{d}_{i} - \mathbf{f}_{i}(\mathbf{m}^{0}) - \sum_{j=1}^{M} \left\{ \frac{\partial \mathbf{f}_{i}(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_{j}} \right|_{\mathbf{m}_{j} = \mathbf{m}_{j}^{0}} \cdot \delta \mathbf{m}_{j} \right\}$$
(2.22)

Αν  $\Delta d = d_i - f_i(m^0)$  είναι ο πίνακας στήλη των διαφορών ανάμεσα στις πραγματικές μετρήσεις και στις θεωρητικές, Α ο πίνακας των μερικών παραγώγων της συνάρτησης f ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, και x ο πίνακας στήλη των

διορθώσεων δm που πρέπει να προστεθούν στο m° για να προκύψει το βελτιωμένο μοντέλο, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\mathbf{e}_{i} \approx \Delta \mathbf{d} - \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{2.23}$$

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα e<sub>i</sub>, αλλά ο πιο κατάλληλος βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων, δηλαδή η ποσότητα

$$q = \sum_{i=1}^{N} e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax)$$
(2.24)

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το q ως προς x και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται περιορισμός στον πίνακα x με στόχο να μην αυξάνονται απότομα οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διαδοχικών ορθογωνίων παραλληλογράμμων του μοντέλου. Η λύση x προστίθεται στο αρχικό μοντέλο m<sup>o</sup> και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο m<sup>1</sup>

$$m^1 = m^0 + x$$
 (2.25)

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

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^{T} \Delta d}{N}}$$
 (2.26)

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 δεν 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. Από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν (Παπαδόπουλος 2007) οι κανονικές εξισώσεις:

$$(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\mathbf{A})\mathbf{x} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{D})\Delta\mathbf{d}$$
(2.27)

όπου D είναι ο MxM πίνακας στατιστικών βαρών, τα στοιχεία του οποίου είναι τα σχετικά βάρη που εξαρτώνται από την ακρίβεια κάθε μέτρησης.

Επίλυση τους ως προς x προκύπτει η νέα εξίσωση :

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{D})\Delta \mathbf{d}$$
(2.28)

όπου το  $(A^T D^T D A)^{-1}$  είναι ο ψευδοαντίστροφος του A

Με βάση την παραπάνω εξίσωση (2.24) μπορεί να καθοριστεί ένας επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος. Έστω ότι κατά την κ επανάληψη η εκτίμηση του μοντέλου της αντίστασης είναι m<sub>k</sub> τότε:

 Υπολογίζονται οι θεωρητικές φαινόμενες αντιστάσεις f(m<sub>k</sub>) και ο Ιακωβιανός πίνακας A<sub>k</sub> για την κατανομή της αντίστασης m<sub>k</sub>, μέσω της επίλυσης του ευθέος προβλήματος.

• Υπολογίζεται το διάνυσμα διόρθωσης του μοντέλου των αντιστάσεων

$$\mathbf{x}_{k} = (A_{K}^{T} \mathbf{D}^{T} \mathbf{D} \mathbf{A}_{k})^{-1} (A_{K}^{T} \mathbf{D}^{T} \mathbf{D}) \Delta \mathbf{d}_{k} \text{ όπου } \Delta \mathbf{d}_{k} = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_{k})$$
(2.29)

• Το βελτιωμένο μοντέλο των αντιστάσεων προκύπτει από την πρόσθεση της διόρθωσης στο προηγούμενο μοντέλο  $m_{k+1} = m_k + x_k$ 

Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν κάποια προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού.

# 3. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ 2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

## 3.1 Συλλογή μετρήσεων στο πεδίο



Σχήμα 3.1 :Συνδυασμένη κάτοψη και πλάγια όξη των γραμμών μελέτης σε σχέση με τη σπηλιά.

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η θέση 2 γραμμών μέτρησης ( line 1 , line 2 ) όπως είναι διατεταγμένες στο χώρο πάνω από τη σπηλιά . Η line 1 βρίσκεται παράλληλα ως προς το μέτωπο του πρανούς και η απόστασή της από αυτό είναι 1,5 μέτρο. Ενώ η line 2 είναι παράλληλη με την line 1 και με απόσταση από αυτή 1 μέτρο. Οι γραμμές έχουν προσανατολισμό Βορρά – Νότο και το μήκος τους είναι 33,8 μέτρα . Χρησιμοποιήθηκαν 27 ηλεκτρόδια σε κάθε γραμμή και η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων είναι 1,3 μέτρα .Οι μετρήσεις έγιναν με τις μεθόδους Διπόλου – Διπόλου και Wenner – Schlumberger . Στο σχήμα 3.1.(Β) παρατηρείται επίσης και η πλάγια όψη όπου φαίνονται οι 2 είσοδοι της σπηλιάς .

Έγινε χαρτογράφηση τη σπηλιάς ( μέτρηση των διαστάσεων της ). Η σπηλιά έχει σχήμα ημικυκλίου και έχει 2 εισόδους. Η Βόρεια είσοδος βρίσκεται 11 μέτρα από τη βόρεια άκρη του κανάβου παράλληλα με τις δυο γραμμές μελέτης, έχει πλάτος 2 μέτρα και ύψος 2,5. Η οροφή της εισόδου βρίσκεται 2,5 μέτρα κάτω από την επίπεδο του εδάφους, στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις, ενώ το πάτωμα της στα 5 μέτρα. Η σπηλιά προχωράει 2,5 μέτρα με διεύθυνση από Δύση προς Ανατολή, κάθετα στις γραμμές μελέτης, μετά αλλάζει διεύθυνση προς την διεύθυνση Βορράς – Νότος συνεχίζει για 8 μέτρα και ξανά αλλάζει διεύθυνση προς τα Δυτικά. Εκεί συνεχίζει για 3 μέτρα μέτρα και ύψος 2,5 μέτρα και ύψος 2,5 μέτρα και ύψος 2,5 μέτρα ). Καθ'όλο το μήκος της η σπηλιά διατηρεί το ύψος της ( 2,5 μέτρα ) και το πλάτος της ( 2 μέτρα ). Η Βόρεια είσοδος βρίσκεται 21 μέτρα από την αρχή των γραμμών μελέτης.

#### 3.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου Res2dinv. Το Res2dinv (έκδοση 3.4) καθορίζει αυτόματα δισδιάστατο (2-D) μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Griffiths and Barker 1993). Αυτό το πρόγραμμα αντιστρέφει δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν με τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων.

Χρησιμοποιείται μη γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων για την αντιστροφή των δεδομένων (deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Loke and Barker, 1996a) τα οποία συλλέχθησαν με οποιαδήποτε από τις παρακάτω διατάξεις: Wenner, πόλου- πόλου, διπόλου-διπόλου, πόλου-δίπολου, Schlumberger, Wenner - Schlumberger και τις ορθογώνιες σειρές. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί ψευδοτομές με έως και 650 ηλεκτρόδια και 6500 δεδομένα.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα, εισάγονται τα δεδομένα από το αρχείο σε μορφή dat. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές. Η πρώτη τομή είναι η ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη τομή είναι η ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη

είναι η γεωηλεκρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. Υπάρχει η δυνατότητα να μην ληφθούν υπόψη μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής. Ακόμα, στα αποτελέσματα του προγράμματος συγκαταλέγεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS.



Ως παράδειγμα παραθέτεται το σχήμα 3.2 πιο κάτω.

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στον Άγιο Σπυρίδωνα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι αντιστροφής. Η πρώτη είναι η μέθοδος Α: Κανονικοποίησης με περιορισμούς εζομάλυνσης (Default, Smoothness-constrained least-squares method), η δεύτερη είναι η μέθοδος Β: με την χρήση της νόρμας L1 (Robust).

Πιο αναλυτικά η μέθοδος A: (de Groot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992), υπαγορεύει ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό τρόπο.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων, που βασίζεται στην τεχνική της βελτιστοποίησης του Quasi-

Σχήμα 3.2: Γεωηλεκτρική τομή από το πακέτο Res2dinv A) ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, B) ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή.

Newton(Loke and Barker1996). Αυτή η τεχνική είναι αρκετά πιο γρήγορη από τη συμβατική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, ειδική για μεγάλο όγκο δεδομένων και απαιτεί λιγότερη υπολογιστική μνήμη.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει ένα μοντέλο με ομαλή κατανομή της ειδικής αντίστασης. Αυτή η προσέγγιση είναι αποδεκτή μόνο σε περίπτωση που οι πραγματικές τιμές της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο.

Η μέθοδος B: (Claerbout and Mur 1973), χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υπεδάφος αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ναι μεν είναι ομοιογενείς στο εσωτερικό τους, παρουσιάζουν δε απότομες αλλαγές μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιστροφής είναι λιγότερο ευαίσθητη στις μετρήσεις με υψηλό θόρυβο, συνεπώς ικανή να δώσει μικρό σφάλμα ειδικής αντίστασης.

# 3.3 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων ,διάταξη διπόλου - διπόλου



#### 3.2.1 Γραμμή μελέτης 1

Σχήμα 3.3 : Γεωηλεκρικές τομές της γραμμής μελέτης 1 που προκύπτουν μετά την αντιστροφη (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Β) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Robust Στην γραμμή 1 (line 1 ) των μετρήσεων παρατηρούνται ανωμαλίες αυξημένης ηλεκτρικής αντιστάσεως στις θέσεις A1 (16,9 έως 18 μ. μήκος από την αρχή της γραμμής μελέτης και 0.5 – 3.5 μ. βάθος ), A2 (23-26 μ. μήκος και 1.5 – 4 βάθος ), λιγότερο αυξημένης αντίστασης στη θέση A3 (13-14 μ. μήκος και 1.5 – 5 μ. βάθος) και ανωμαλίες με ηλεκτρικές αντιστάσεις κατά πολύ μικρότερες από αυτές του περιβάλλον πετρώματος στις θέσεις A4 (3 – 6 μ. μήκος και 1-3 μ. βάθος ), A5 (8 – 11 μ. μήκος και 2.5 – 4 μ. βάθος) , A6 (19 – 21 μ. μήκος και 1-3 μ. βάθος ), A7 (19 - 22 μ. μήκος και 4 – 5.5 μ. βάθος ). Η αντιστροφή με τη μέθοδο *Kavovικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης* και μετά από 5 επαναλήψεις δίνει σφάλμα 9,6% (Σχήμα A) ενώ με την αντιστροφή Robust και μετά από 6 επαναλήψεις το σφάλμα είναι της τάξεως του 6% (Σχήμα B).

Τα αποτελέσματα των 2 παραπάνω μεθόδων είναι περίπου όμοια , με μόνη διαφορά τις πολύ πιο απότομες αλλαγές των αντιστάσεων στη μέθοδο *Robust*. Το παραπάνω αποτέλεσμα αποκλίνει αρκετά από το αναμενόμενο, δηλαδή δεν αντικατοπτρίζεται την εικόνα που παρατηρείται στο πεδίο. Τα άσπρα παραλληλόγραμμα πάνω στο σχήμα υποδεικνύουν τις θέσεις στις οποίες αναμενόταν να βρεθούν, σύμφωνα με την χαρτογράφηση που έγινε στο πεδίο, οι είσοδοι της σπηλιάς.

## 3.3.2 Γραμμή μελέτης 2



Εικόνα 3.4 : Γεωηλεκρικές τομές της γραμμής μελέτης 2 που προκύπτουν μετά την αντιστροφη (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Β) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Robust

Στην γραμμή 2 (line 2) παρατηρούνται , όπως και στην γραμμή 1 , ανωμαλίες πολύ υψηλής όπως και πολύ χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης. Υψηλές αντιστάσεις υπάρχουν στις θέσεις : **B1** (8 - 10.5 μ. μήκος και 0-2.5 μ. βάθος) , **B2** (11 – 13 μ. μήκος και 1-2 μ. βάθος) , **B3** (17 – 19 μ. μήκος και 1.5-3.5 μ. βάθος) , **B4** (23- 25 μ. μήκος και 1-3 μ. βάθος) . Ενώ πολύ χαμηλές αντιστάσεις εμφανίζονται στις θέσεις **B5** (3 - 11 μ. μήκος και 1.5-4 μ. βάθος) και **B6** (19 – 23 μ. μήκος και 3 – 5.5 μ. βάθος).

Η μέθοδος Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης με 6 επαναλήψεις δίνει σφάλμα 10,9% (Σχήμα Α) ενώ η μέθοδος Robust με 6 επαναλήψεις δίνει σφάλμα 7,4% (Σχήμα Β). Ομοίως για την γραμμή 2 διαφορές μεταξύ Smoothnessconstrained και Robust δεν υπάρχουν. Όπως επίσης δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα αφού και για αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ γεωμετρικής τομής και των παρατηρήσεων στο πεδίο.

## 3.3.3 Σύγκριση των γεωηλεκτρικών τομών

Συγκρίνοντας τις γεωηλεκτρικές τομές παρατηρούνται μικρές διαφορές χωρίς όμως να αλλάζει δραματικά η εικόνα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά για κάθε μέθοδο αντιστροφής.

Μέθοδο αντιστροφής κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης. Η πάνω τομή αντιστοιχεί στην γραμμή 1 και η κάτω στην γραμμή 2.



Εικόνα 3.5 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν μετά την αντιστροφή με την μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης(ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γεωηλεκτρική τομή γραμμής μελέτης 1 Β) γεωηλεκρική τομή γραμμής μελέτης 2

Οι διαφορές βρίσκονται στις παρακάτω περιοχές:

- Γ1, όπου οι αντιστάσεις είναι πιο μικρές στην γραμμή 2 από την γραμμή 1 (περίπου στο μισό της τιμής των).
- Γ2, η οποία εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση στην γραμμή 2 και επεκτείνεται σε μεγαλύτερο βάθος.
- Γ3 όπου οι αντιστάσεις είναι κατά 100 Ωm μεγαλύτερες στην γραμμή 1 από αυτές στην γραμμή 2
- Γ4 όπου πάλι οι αντιστάσεις στην γραμμή 1 εμφανίζονται μεγαλύτερες από αυτές στην 2 ( σε αυτή την περίπτωση η διαφορά είναι περίπου στα 200 Ωm.).



Εικόνα 3.6: Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν μετά την αντιστροφή με την μέθοδο Robust (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γεωηλεκτρική τομή γραμμής μελέτης 1 Β) γεωηλεκρική τομή γραμμής μελέτης 2

Μέθοδος αντιστροφής *Robust*. Οι διαφορές παρατηρούνται στις περιοχές Δ1 και Δ2. Για την γραμμή 1 η τομή παρουσιάζει μεγαλύτερες αντιστάσεις και στις 2 περιοχές. Η χρωματική κλίμακα παραμένει η ίδια και στις 2 περιπτώσεις με αποτέλεσμα και οι 2 γεωηλεκτρικές τομές να χαρακτηριστούν όμοιες.

### 3.4 Συνθετικά δεδομένα, διάταξη διπόλου -διπόλου

### 3.4.1 Εισαγωγή

Με το πρόγραμμα RES2MOD γίνεται κατασκευή συνθετικών δεδομένων έτσι ώστε να γίνει ερμηνεία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο . Στο πρόγραμμα αυτό εισάγονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χειροκίνητα από τον χρήστη. Κατασκευάζει δηλαδή συνθετικές μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια από το πρόγραμμα RES2DINV για την δημιουργία γεωηλεκτρικής τομής. Χωρίζει την περιοχή σε μικρά ορθογώνια. Κάθε ορθογώνιο μπορεί να δεχτεί ξεχωριστή τιμή αντίστασης έτσι ώστε να κατασκευαστεί το εκάστοτε μοντέλο. Οι τιμές των αντιστάσεων καθορίζονται τις περισσότερες φορές σύμφωνα με την βιβλιογραφία, αφού το κάθε πέτρωμα έχει συγκεκριμένο εύρος αντιστάσεων .Το εν λόγω πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα να προστεθεί και θόρυβος. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική για περιστή. Με το πρόγραμμα RES2MOD είναι έτσι δυνατόν να κατασκευαστούν συνθετικά δεδομένα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάστηκαν διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση των πειραματικών μετρήσεων.



3.4.2 Μοντέλο 1 : Βόρειο τμήμα σπηλιάς

Σχήμα 3.7: 1° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης),Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Σε περιβάλλον πέτρωμα αντίστασης 500 Ωm τοποθετείται ορθογώνια δομή ύψους 2,5 μέτρων και πλάτους 2 μέτρων και αντίστασης 50000 Ωm που περιγράφει το βόρειο τμήμα της σπηλιάς στη θέση 11 έως 13 μ. από την αρχή της γραμμής μελέτης και βάθος 2,5 έως 5 μ. από την επιφάνεια. Στο σχήμα 3.7.Α παρατηρείται το γεωηλεκτρικό μοντέλο.

Τα σχήματα 3.7. Β και 3.7. Γ δίνουν τα αποτελέσματα μετά την αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων. Το παρόν συνθετικό διάγραμμα έχει υπολογιστεί με μηδενικό θόρυβο .Οι γεωηλεκτρικές τομές δείχνουν μια ζώνη μεγάλων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη θέση της σπηλιάς (50000 Ωm). Η γεωηλεκτρική τομή από την αντιστροφή Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης και μετά από 5

επαναλήψεις έχει σφάλμα 0.56% ενώ αυτή με αντιστροφή *Robust* 0.25%. Οι δύο μέθοδοι αντιστροφής δεν παρουσιάζουν διαφορές ως προς το αποτέλεσμα.

Οι τιμές της ειδικής αντίστασης για το περιβάλλον πέτρωμα είναι κοντά στα 500 Ωm όπως αναμενόταν . Η θέση του βορείου τμήματος της σπηλιάς συμπίπτει με τη δομή υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της γεωηλεκτρικής τομής και τα δεδομένα που δοθήκαν στο RES2MOD.



3.4.3 Μοντέλο 2 : Νότιο τμήμα σπηλιάς

Σχήμα 3.8 : 2° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης),Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κσνονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Ομοίως με το προηγούμενο μοντέλο. Η διαφορά βρίσκεται πως αυτή τη φορά προσομοιάζεται το νότιο τμήμα της σπηλιάς με ακριβώς τους ίδιους αριθμούς αντιστάσεων 500 Ωm για το περιβάλλον πέτρωμα και 50000 Ωm για τη θέση της σπηλιάς.

Σε αυτήν την περίπτωση η ανωμαλία βρίσκεται στη θέση 21-23 μ.από την αρχή της γραμμής μελέτης και 2,5 με 5 μ. βάθος και ο θόρυβος έχει επιλεχθεί να είναι μηδενικός.

Το σφάλμα για *Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης* και *Robust* μετά από 5 επαναλήψεις είναι 0.53% και 0.26% αντίστοιχα. Το περιβάλλον πέτρωμα δεν παρουσιάζει διαταραχές και μένει σε τιμές της τάξεων των 500 Ωm ως είχε οριστεί. Όπως και με την προσομοίωση του βορείου τμήματος η θέση της σπηλιάς στην τομή μετά την αντιστροφή αντιστοιχεί σε μήκος και βάθος με το μοντέλο συνθετικών δεδομένων.

# 3.4.4 Μοντέλο 3 :συνδυασμός βόρειου και νότιου τμήματος της σπηλιάς χωρίς χρήση θορύβου



Σχήμα 3.9 : 3° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης), ,Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Το μοντέλο αυτό συνδυάζει τα δυο παραπάνω σενάρια. Δηλαδή το βόρειο τμήμα στην θέση 11 έως 13 μ. μήκος 2,5 με 5 μ. βάθος και αντίσταση 50000 Ωm και το νότιο με θέση 21 έως 23 μ. μήκος 2,5 με 5 μ. βάθος και αντίσταση επίσης 50000 Ωm σε περιβάλλον πέτρωμα αντίστασης 500 Ωm και με επιφανειακό στρώμα αντίστασης 300 Ωm (παρουσιάζονται μικρότερες αντιστάσεις στην επιφάνεια ).

Στο σχήμα 3.9. Β φαίνεται η αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης με σφάλμα 0,66% ενώ η μέθοδος Robust δίνει σφάλμα 0,33 %.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής περιγράφουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα συνθετικά δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα RES2MOD. Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα μετά την αντιστροφή το περιβάλλον πέτρωμα εμφανίζεται αδιατάραχτο με τιμές περίπου στα 500 Ωm ενώ ελάχιστα μειωμένες είναι στην επιφάνεια. Οι θέσεις των τμημάτων της σπηλιάς αντιστοιχούν σε αυτές των συνθετικών δεδομένων.





Σχήμα 3.10 : 4° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άζονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) ,Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Για την προσαρμογή των μοντέλων σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιείται η δυνατότητα που έχει το πρόγραμμα RES2MOD να προσθέτει θόρυβο στα συνθετικά δεδομένα. Η κλίμακα του θορύβου είναι 0 με 10 όπου 10 είναι το μέγιστο.

Επιλέχθηκε ο μέγιστος θόρυβος (τιμή 10) γιατί η περιοχή μελέτης βρίσκεται μέσα σε κατοικημένη περιοχή. Η προσθήκη του θορύβου έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση των αντιστάσεων στο περιβάλλον πέτρωμα.

Εκτός από τα δύο τμήματα της σπηλιάς (παρουσιάζονται ως μέγιστο στην χρωματική κλίμακα των αντιστάσεων ) εμφανίζονται περιοχές μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τιμές άνω των 500 Ωm (ως έχει οριστεί για το περιβάλλον

πέτρωμα ) μέχρι περίπου 700 Ωm , όπως στην περιοχή ανάμεσα στα δύο τμήματα της σπηλιάς και σε βάθος περίπου μέχρι τα 2,5 μ. (700 με 900 Ω) (4α).

Επίσης περιοχές μεγάλων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων βρίσκονται στις θέσεις 26,5 με 27,5 μ. μήκος 1,30 με 2,6 μ. βάθος (4β) και 29,9 με 31,2 μ. μήκος 1,3 με 2,6 μ. βάθος (4γ) οι οποίες φτάνουν έως τα 1000 Ωm.

Η μέθοδος Κανονικοποίηση με περιορισμούς εζομάλυνσης παρουσιάζει σφάλμα 9,2% μετά από 6 επαναλήψεις ενώ η μέθοδος Robust 6,8 % επίσης μετά από 6 επαναλήψεις.

Για μια ακόμη περίπτωση οι διαφορές των 2 μεθόδων είναι στις απότομες αλλαγές της μεθόδου Robust σε αντίθεση με την Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης η οποία προχωρεί σε σταδιακή εξομάλυνση των αντιστάσεων.

Και σε αυτή την περίπτωση όμως η θέση των τμημάτων της σπηλιάς σε σχέση με τα συνθετικά δεδομένα έχουν παραμείνει ίδιες.





Σχήμα 3.11 : 5° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Για την προσομοίωση των αποτελεσμάτων αντιστροφής στα πραγματικά δεδομένα μετακινήθηκαν οι 2 είσοδοι του σπηλαίου κατά 2,5 μέτρα προς τα νότια μειώνοντας παράλληλα και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του βορείου τμήματος της σπηλιάς από 50000 Ωm σε 800 Ωm

Επίσης στο ενδιάμεσο των τμημάτων της σπηλιάς τοποθετήθηκε περιοχή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 5000 Ωm ,από 17,8 έως 18,5 μ. μήκος και 0,5 έως 1,5 μ. βάθος (5α).

Τέλος για τον εντοπισμό της περιοχής με χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση τοποθετήθηκε περιοχή αντίστασης 80 Ωm με μήκος από 8,45 έως 11,05 και βάθος από 1,3 μ. έως 2,8 μ. (5β).

Το σφάλμα της μεθόδου Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης μετά από 5 επαναλήψεις αντιστροφής είναι 9,1% ενώ αυτό της Robust μετά από 6 επαναλήψεις είναι 6,7%.

Μετά την κατασκευή και αυτού του γεωηλεκτρικού μοντέλου η γεωηλεκτρική τομή μοιάζει με την τομή των πραγματικών δεδομένων.



### 3.4.7 Μοντέλο 6

Σχήμα 3.12 : 6° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Επιπλέον του μοντέλου 5 στο 6 έχουν τοποθετηθεί περιοχές χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις θέσεις 20 έως 21,5 μ. μήκος 1,3 έως 2,8 μ. βάθος με τιμή 40 Ωm (6α) και 20 έως 21,5 μ. μήκος , και βάθος 4,1 μ. έως 5,9 μ. με τιμή 80 Ωm (6β).

Οι γεωηλεκτρικές τομές μετά την αντιστροφή εμφανίζουν τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις θέσεις που βρίσκονται και στο μοντέλο των συνθετικών δεδομένων.

Τα σφάλματα που δίνουν οι δύο μέθοδοι αντιστροφής είναι 9,1 % για την Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης και 6,7 % για την Robust μετά από 5 και 6 επαναλήψεις αντιστροφής αντίστοιχα.



3.4.8 Μοντέλο 7

Σχήμα 3.13 : 7° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α)Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε Β) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust Στο μοντέλο 7 έγινε αλλαγή στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος από τα 500 Ωm στα 1200 Ωm .Η αλλαγή αυτή έγινε βάση των γεωηλεκτρικών τομών αντιστροφής από πραγματικά δεδομένα μετά τα 6 ,5 μ. από την αρχή της γραμμής μετρήσεων. Το πάχος του επιφανειακού στρώματος είναι 0,3 μ.

Μετά την αντιστροφή των δεδομένων του μοντέλου παρατηρείται ότι έχει επηρεαστεί η περιοχή (7α), 15,6 μ. έως 19,5 μ. μήκος και 2,5 έως 5 μ. βάθος, αφού εμφανίζεται με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάτω των 200 Ωm. Η περιοχή αυτή παρατηρείται εντονότερα στην αντιστροφή με την μέθοδο *Robust*.

Το σφάλμα της μεθόδου Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης μετά από 5 επαναλήψεις αντιστροφής είναι 8,7% ενώ της μεθόδου Robust μετά από επίσης 5 επαναλήψεις είναι 6,6%.



#### 3.4.9 Μοντέλο 8

Σχήμα 3.14: 8° μοντέλο συνθετικών δεδομένων (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α)Μοντέλο που

χρησιμοποιήθηκε B) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Γ) γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust

Το τελευταίο μοντέλο των πειραματικών δεδομένων διαφέρει από το προηγούμενο στη θέση 8α (3,9 έως 6,5 μ. μήκος και 0,6 έως 2,3 μ. βάθος) με μια περιοχή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 80 Ω.

Σημαντικό είναι ότι προσθέτοντας αυτή την περιοχή επηρεάζεται η θέση 8β αφού φαίνεται να μειώνεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της. Ειδικά στην αντιστροφή με τη μέθοδο *Robust* η μείωση είναι μεγάλη.

Το σφάλμα για την μέθοδο αντιστροφής Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης μετά από 5 επαναλήψεις είναι 8,9% ενώ αυτό για την μέθοδο Robust ,μετά από 7 επαναλήψεις είναι 6,4%.

Από το αποτέλεσμα της αντιστροφής παρατηρείται ότι τα τμήματα της σπηλιάς δεν αντιστοιχούν σε περιοχές με αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

# 3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων και συνθετικών δεδομένων διπόλου - διπόλου



Σχήμα 3.15 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από την αντιστροφή με την μέθοδο Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γραμμή μελέτης 1 Β) γραμμή μελέτης 2 Γ) συνθετική γραμμή μελέτης



Σχήμα 3.16 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από την αντιστροφή με την μέθοδο Robust (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γραμμή μελέτης 1 Β) γραμμή μελέτης 2 Γ) συνθετική γραμμή μελέτης

Σύμφωνα με τα σχήματα 3.15 και 3.16 οι τομές που προκύπτουν από την αντιστροφή των πειραματικών και συνθετικών δεδομένων εμφανίζουν τις ίδιες κύριες ανωμαλίες ..

Η μόνη ζώνη που δεν προσδιορίστηκε είναι η Α7 , η οποία βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό της γεωηλεκτρικής τομής των συνθετικών δεδομένων.

Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι το γεωηλεκτρικό μοντέλο το οποίο αντιστοιχεί στο σχήμα 3.16 Γ και 3.15 Γ δεν αντικατοπτρίζει τα τμήματα της σπηλιάς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το νότιο τμήμα απεικονίζεται κατά 2 μ. νότια (A2) ενώ δεν απεικονίζει την βόρεια είσοδο.

# 3.6 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων ,διάταξη Wenner-Schlumberger



Σχήμα 3.17: Γεωηλεκρικές τομές της γραμμής μελέτης 1 που προκύπτουν μετά την αντιστροφη (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Β) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Robust



Σχήμα 3.18 : Γεωηλεκρικές τομές της γραμμής μελέτης 1 που προκύπτουν μετά την αντιστροφη (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης Β) γεωηλεκτρική τομή με αντιστροφή Robust

Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και με τη διάταξη Wenner – Schlumberger. Στα σχήματα 3.17 και 3.18 βρίσκονται οι γεωηλεκτρικές τομές των γραμμών μελέτης 1 και 2 αντίστοιχα ( με χρήση των μεθόδων αντιστροφής *Κανονικοποίησης με* περιορισμούς εξομάλυνσης (Α) και Robust (Β) ). Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τρείς γεωηλεκτρικές ζώνες.

Στην γραμμή μελέτης 1 η πρώτη ζώνη είναι επιφανειακή με μεγάλες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις (W1) της τάξεως των 1000 Ωm . Η δεύτερη είναι η κυρίαρχη στην τομή (περιβάλλον πέτρωμα) με ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις από 300 έως 500 Ωm και η Τρίτη είναι στη θέση W2 με ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις κάτω από 200 Ωm.

Στην θέση W3 του σχήματος 3.17 Β παρατηρείται μια περιοχή ηλεκτρικών ειδικών αντιστάσεων 700 έως 900 Ωm η οποία ίσως είναι η μόνη ένδειξη για την ύπαρξη σπηλιάς στην συγκεκριμένη περιοχή.

Ομοίως και για την γραμμή μελέτης 2. Το επιφανειακό στρώμα S3 . Το περιβάλλον πέτρωμα , και αυτό χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης S1 και S2.

Η διάταξη Wenner – Schlumberger όπως φαίνεται στις γραμμές μελέτης παρουσιάζει προβλήματα στον εντοπισμό σπηλαίων στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 3.19 :Αριστερά βρίσκονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και δεξιά η γεωηλεκτρική τομή που προέκυψε μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) 1° μοντέλο Β) 2° μοντέλο Γ) 3° μοντέλο Δ) 4° μοντέλο Ε) 5° μοντέλο ΣΤ) 6° μοντέλο Ζ) 7° μοντέλο Η) 8°μοντέλο



Σχήμα 3.19 :Αριστερά βρίσκονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και δεξιά η γεωηλεκτρική τομή που προέκυψε μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) A) 1° μοντέλο B) 2° μοντέλο Γ) 3° μοντέλο Δ) 4° μοντέλο E) 5° μοντέλο ΣΤ) 6° μοντέλο Ζ) 7° μοντέλο Η) 8°μοντέλο



Σχήμα 3.20: Αριστερά βρίσκονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και δεξιά η γεωηλεκτρική τομή που προέκυψε μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) A) 1° μοντέλο B) 2° μοντέλο Γ) 3° μοντέλο Δ) 4° μοντέλο E) 5° μοντέλο ΣΤ) 6° μοντέλο Ζ) 7° μοντέλο H) 8° σενάριο



Σχήμα 3.20: Αριστερά βρίσκονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και δεξιά η γεωηλεκτρική τομή που προέκυψε μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) 1° μοντέλο Β) 2° μοντέλο Γ) 3° μοντέλο Δ) 4° μοντέλο Ε) 5° μοντέλο ΣΤ) 6° μοντέλο Ζ) 7° μοντέλο Η) 8° σενάριο

### 3.7 Συνθετικά δεδομένα με χρήση διάταξης Wenner - Schumberger

Στο Σχήμα 3.19 φαίνεται το μοντέλο και δίπλα η γεωηλεκτρική τομή από την αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων με την μέθοδο *Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης*, ενώ στο σχήμα 3.20 οι γεωηλεκτρικές τομές είναι από την μέθοδο αντιστροφής Robust.

# 3.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών και συνθετικών δεδομένων με την διάταξη Wenner - Schlumberger



Σχήμα 3.21 : : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από την αντιστροφή με την μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γραμμή μελέτης 1 Β) γραμμή μελέτης 2 Γ) συνθετική γραμμή μελέτης



Σχήμα 3.22: : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από την αντιστροφή με την μέθοδο Robust (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γραμμή μελέτης 1 Β) γραμμή μελέτης 2 Γ) συνθετική γραμμή μελέτης

Η διάταξη Wenner – Schlumberger δεν εντοπίζει την σπηλιά. Οι γεωηλεκτρικές τομές που δημιουργηθήκαν μετά την αντιστροφή σχήμα 3.21 Γ (μέθοδος αντιστροφής *Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης*) και 3.22 Γ (μέθοδος αντιστροφής *Robust*) των συνθετικών δεδομένων δεν απεικονίζουν τα τμήματα της σπηλιάς.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής των συνθετικών δεδομένων 3.21 Γ και 3.22 Γ διαφέρουν από αυτά των πειραματικών μετρήσεων 3.21 A, 3.22 A (γραμμή μελέτης 1 ) και 3.21 B, 3.22 B (γραμμή μελέτης 2).

# 4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ 3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

## 4.1 Εισαγωγή

Για την ακριβέστερη προσομοίωση των συνθηκών στην υπό μελέτη περιοχή κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων. Το πρόγραμμα RES3MOD κατασκευάζει 3D μοντέλα. Για την δημιουργία συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις Διπόλου – Διπόλου και Wenner – Schlumberger. Τα συνθετικά δεδομένα από την παραπάνω διαδικασία αντιστοιχούν σε γραμμές μελέτης παράλληλες με αυτές των πραγματικών δεδομένων.

### 4.1.1 Τρισδιάστατο μοντέλο

Το σχήμα 4.1 δείχνει του τρισδιάστατο μοντέλο . Αποτελείται από 15 οριζόντιες τομές των οποίων τα βάθη αναγράφονται πάνω από κάθε τομή . Το μήκος της κάθε τομής είναι ίσο με το μήκος της γραμμής μελέτης 33,8 μ. ενώ το πλάτος της είναι 4 μέτρα .

Οι τομές αποτελούνται από το περιβάλλον πέτρωμα (500 Ωm) και την ελεύθερη επιφάνεια (50000 Ωm) η οποία βρίσκεται στο δυτικό άκρο του μοντέλου .Σε βάθος από τα 2,5 έως και τα 5 μ. έχει τοποθετηθεί η σπηλιάς στις θέσεις 11 έως 13 και 21 έως 23 μ στην διεύθυνση Βορράς - Νότος.



Σχήμα 4.1 : Μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της τρισδιάστατης μορφής δεδομένων. Με Z πάνω από κάθε τομή αναγράφεται το βάθος της.

### 4.2 Δισδιάστατη αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων.

Για την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων του τρισδιάστατου μοντέλου, το πρόγραμμα RES3MOD δημιούργησε 5 γραμμές μελέτης διεύθυνσης Boppá-Nóτου (σχήμα 4.2). Στη συνέχεια τα δεδομένα από κάθε μιας από τις 5 γραμμές μελέτης αντεστράφησαν με το πρόγραμμα RES2DINV. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η Διπόλου –Διπόλου και η Wenner – Schlumberger . η αντιστροφή των δεδομένων σε κάθε διάταξη έγινε με τις μεθόδους αντιστροφής *Kavovικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης* και *Robust*.Στο σχήμα 4.2 με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι γραμμές των πειραματικών μετρήσεων. Η θέση τους δηλαδή σε σχέση με τις γραμμές του προγράμματος RES3MOD.



Σχήμα 4.2: Κάτοψη της περιοχής των γραμμών μελέτης που έχει δημιουργήσει το πρόγραμμα RES3MOD



### 4.2.1 Διάταξη διπόλου - διπόλου

 Σχήμα 4.3 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από το πακέτο RES2DINV μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης)
Α) γραμμή μελέτης 1 B) γραμμή μελέτης 2 Γ) γραμμή μελέτης 3 Δ) γραμμή μελέτης 4 E) γραμμή μελέτης 5

# 4.2.1.1 Μέθοδος αντιστροφής Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης

Στην τομή A του σχήματος 4.5 (γραμμή 1) εντοπίζονται τα 2 τμήματα της σπηλιάς στις θέσεις 11 με 13 μ.-21 με 23 μ. από την αρχή των γραμμών που δημιούργησε το πρόγραμμα RES3MOD και με βάθος από 2,5 έως 5 μ . Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για το περιβάλλον πέτρωμα είναι αυξημένη από αυτή του μοντέλου (500 Ωm). Στην τομή A πραγματοποιήθηκαν 5 επαναλήψεις αντιστροφής με το σφάλμα όμως να είναι στο 1,16 %.

Η τομή Β εντοπίζει το Νότιο και το Βόρειο τμήμα της σπηλιάς σε σωστή θέση σύμφωνα με το μοντέλο. Το περιβάλλον πέτρωμα όμως κάτω από το βάθος των 2 μ. παρουσιάζει σημαντικές διαταραχές, όπως αύξηση της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην τομή Β οι επαναλήψεις αντιστροφής ήταν 5 αλλά το σφάλμα 14%.

Στην τομή Γ τα τμήματα της σπηλιάς που παρουσιάζουν υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μετατοπισμένα πιο ρηχά κατά 1 μέτρο. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του περιβάλλον πετρώματος είναι μεγαλύτερες από 1000 Ωm. Οι επαναλήψεις αντιστροφής είναι 5 και το σφάλμα 1,03%.

Όσο οι γραμμές μελέτης πλησιάζουν προς την ελεύθερη επιφάνεια παρουσιάζουν μεγάλες αλλοιώσεις. Στην γραμμή μελέτης 4 (τομή Δ) το σφάλμα μετά από 5 επαναλήψεις αντιστροφής είναι 30 %. Κάτι που φαίνεται και από το αποτέλεσμα μετά την αντιστροφή. Οι τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν αντιστοιχούν στο μοντέλο που έχει δημιουργηθεί με το πρόγραμμα RES3MOD.

Η τομή Ε βρίσκεται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια οπότε πλησιάζει τα 50000 Ωm . Πραγματοποιήθηκαν 5 επαναλήψεις αντιστροφής με σφάλμα 4,6 %



Σχήμα 4.4 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από το πακέτο RES2DINV μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust. (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης)Α) γραμμή μελέτης 1 B) γραμμή μελέτης 2 Γ) γραμμή μελέτης 3 Δ) γραμμή μελέτης 4 E) γραμμή μελέτης 5

#### 4.2.1.2 Μέθοδος αντιστροφής Robust

Αντιστροφή των συνθετικών τρισδιάστατων δεδομένων έγινε και με την μέθοδο *Robust*. Εντοπισμός των τμημάτων της σπηλιάς γίνεται στις τομές A, B, Γ και Δ., αλλά όχι στην τομή E η οποία βρίσκεται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε κάθε τομή υπάρχει διαφορά στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση του περιβάλλοντος πετρώματος. Η τομή A παρουσιάζει την χαμηλότερη και αυξάνεται όσο οι τομές πλησιάζουν την ελεύθερη επιφάνεια.

Το αποτέλεσμα της αντιστροφής σε κάθε γραμμή βγήκε μετά από 5 επαναλήψεις αντιστροφής και τα σφάλματα από την γραμμή 1 έως την 5 είναι : 0.67%, 1.22%, 0.52%, 1.98% και 0,55%.



Σχήμα 4.5 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από το πακέτο RES2DINV μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης . (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γραμμή μελέτης 1 Β) γραμμή μελέτης 2 Γ) γραμμή μελέτης 3 Δ) γραμμή μελέτης 4 Ε) γραμμή μελέτης 5

### 4.2.2 Διάταξη Wenner – Schlumberger

Η διάταξη Wenner – Schlumberger δεν εντοπίζει τα τμήματα της σπηλιάς. Στην τομή Α παρατηρούνται δύο γεωηλεκτρικά στρώματα. Ένα στρώμα χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πάνω από τα δύο μέτρα με τιμή περίπου 500 Ωm και ένα κάτω από τα δύο μέτρα του οποίου οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι πάνω από 1000 Ωm. Ο διαχωρισμός των δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων μετατοπίζεται σε πιο μικρά βάθη όσο οι τομές πλησιάζουν την ελεύθερη επιφάνεια με αποτέλεσμα στην τομή  $\Delta$  να παρατηρείται ένα στρώμα υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Οι επαναλήψεις αντιστροφής είναι 5 σε κάθε γραμμή και το σφάλμα σε κάθε περίπτωση κυμαίνεται γύρω στο 0,5 %.



Σχήμα 4.6 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από το πακέτο RES2DINV μετά την αντιστροφή με τη μέθοδο Robust. (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) γραμμή μελέτης 1 Β) γραμμή μελέτης 2 Γ) γραμμή μελέτης 3 Δ) γραμμή μελέτης 4 Ε) γραμμή μελέτης 5

### 4.3 Τρισδιάστατη αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων

### 4.3.1 Διάταξη διπόλου - διπόλου

Χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα της διάταξης διπόλου- διπόλου για τις γραμμές 1 έως 5 και αντιστρέφοντας ( πρόγραμμα RES3DINV) με την μέθοδο *Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης* προκύπτουν οι παρακάτω γεωηλεκτρικές τομές που περιγράφουν την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε τρείς διαστάσεις (σχήμα 4.7). Οι τομές είναι στο επίπεδο X-Z. Έχουν μήκος 33,8 μ. και το βάθος τους φτάνει ως τα 9 περίπου μέτρα. Οι τομές έχουν ισαπόσταση ένα μέτρο και ξεκινάνε από ανατολικά προς τα δυτικά. Η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων κατά τον X άξονα έχει οριστεί στα 1,3 μ. ενώ κατά τον ψ στο 1 μ.Η διάταξή τους είναι στο μέσο της απόστασης ενδιάμεσα των γραμμών που έχει δημιουργήσει το πρόγραμμα RES3MOD (σχήμα 4.2) αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τομή Β να συμπίπτει στον χώρο με την γραμμή μελέτης 2 και η τομή Γ με την γραμμή μελέτης 1. Σημαντικό ρόλο στην τρισδιάστατη αντιστροφή αποτελεί το γεγονός ότι το αποτέλεσμα επηρεάζεται από ολόκληρη τη δομή.



Σχήμα 4.7 :Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από το πακέτο αντιστροφής RES3DINV με διάταξη Διπόλου-Διπόλου (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) Τομή από 0 έως 1 μ. Β) Τομή από 1 έως 2 μ. Γ) Τομή από 2 έως 3 μ. Δ) Τομή από 3 έως 4 μ.

Στο σχήμα 4.7 η τομή Α βρίσκεται 3,5 μέτρα ανατολικά από το πρανές. Με μια γρήγορη ματιά φαίνεται πως η συγκεκριμένη τομή απεικονίζει τις σπηλιές (άσπρα ορθογώνια) αρκετά καλά.

Στην πραγματικότητα όμως οι ζώνες υψηλής αντίστασης που αντιστοιχούν στην σπηλιά επεκτείνονται σε μεγαλύτερο βάθος.

Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των ζωνών αυτών πλησιάζουν τα 1100 Ωm ξεκινώντας από τα 700 Ωm .Ενώ το περιβάλλον πέτρωμα παρουσιάζει αντίσταση περίπου 500 Ωm .

Η τομή Β, η οποία βρίσκεται στα 2,5 μ. δυτικά από την ελεύθερη επιφάνεια, αντιστοιχεί στην γραμμή μελέτης 2 των πειραματικών μετρήσεων. Ομοίως με την τομή Α έτσι και εδώ οι κύριες ζώνες υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος από αυτές του μοντέλου.

Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για το περιβάλλον πέτρωμα έχουν αυξηθεί με τιμές κοντά στα 1000 Ωm ενώ στις θέσεις των σπηλαίων οι τιμές έχουν ξεπεράσει τα 2000 Ω που είναι και οι μέγιστες τιμές της χρωματικής κλίμακας που χρησιμοποιείται.

Η τομή Γ βρίσκεται 1,5 μ . δυτικά από την ελεύθερη επιφάνεια, η οποία αντιστοιχεί στην γραμμή μελέτης 1 των πειραματικών μετρήσεων .

Η τομή Γ επηρεάζεται από τις αντιστάσεις της ελεύθερης επιφάνειας. Παρατηρείται ένα επιφανειακό στρώμα με βάθος έως τα 2,5 μ. και ένα δεύτερο στρώμα μέχρι το μέγιστο βάθος της τομής το οποίο εμφανίζει τιμές αυξημένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης άνω των 2000 Ωm.

Η τομή  $\Delta$  η οποία είναι 0,5 μ. δυτικά της ελεύθερης επιφάνειας, δεν παρουσιάζει αποτελέσματα ως προς τον εντοπισμό της σπηλιάς. Διακρίνονται μόνο πολύ αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ( ύπαρξη κενού ).

Το σφάλμα μετά από 6 επαναλήψεις αντιστροφής είναι 2,90 %.

Συμπέρασμα της τρισδιάστατης αντιστροφής είναι ότι όσο πιο κοντά βρίσκονται οι γραμμές μελέτης σε ελεύθερη επιφάνεια τόσο περισσότερο επηρεάζονται από αυτήν αλλοιώνοντας το αποτέλεσμα της αντιστροφής.
### 4.1.3 Διάταξη Wenner – Schlumberger

Η ίδια επεξεργασία έγινε χρησιμοποιώντας την διάταξη Wenner – Schlumberger . Η αντιστροφή έγινε με τη μέθοδο Κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο σχήμα 4.3 .



Σχήμα 4.8 : Γεωηλεκτρικές τομές που προκύπτουν από το πακέτο αντιστροφής RES3DINV με διάταξη Wenner – Schlumberger (ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος και ο οριζόντιος την απόσταση από την αρχή της γραμμής μελέτης) Α) Τομή από 0 έως 1 μ. Β) Τομή από 1 έως 2 μ. Γ) Τομή από 2 έως 3 μ. Δ) Τομή από 3 έως 4 μ.

Η τομή Α του σχήματος 4.3 δείχνει ότι ο σχηματισμός αποτελείται από 3 γεωηλεκτρικά στρώματα, ένα επιφανειακό με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των 800 με 1000 Ωm, ένα στρώμα ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων κάτω από 300 Ωm το οποίο βρίσκεται σε βάθος από 0,5 έως 3,5 μ., και ένα στρώμα από τα 3 ,5 μ μέχρι το μέγιστο βάθος της τομής με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεγαλύτερες από αυτές που μπορεί να παρουσιάσει η χρωματική κλίμακα που

χρησιμοποιείται . Η τομή Β και Γ δείχνουν μια σύμπτυξη των κατώτερων στρωμάτων προς τα πάνω. Ενώ η τομή Δ παρουσιάζει την εικόνα του κενού . Πραγματοποιήθηκαν 6 επαναλήψεις αντιστροφής με το σφάλμα να είναι στο 3,87%.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η διάταξη Wenner – Schlumberger δεν μπορεί να χαρακτηριστεί αξιόπιστη για τον εντοπισμό σπηλαίων .Οι τομές και στην τρισδιάστατη αντιστροφή δεν δίνουν αποτέλεσμα.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

# 5.1ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η αντιστροφή των πραγματικών δεδομένων από την μέθοδο διπόλου διπόλου οδήγησε σε ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο που απέχει πολύ από την πραγματικότητα.
- 2 Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2MOD το οποίο περιγράφει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου για δομές απείρου μήκους μη επηρεαζόμενες από πλευρικές επιδράσεις για να διερευνηθούν οι δυνατότητες εντοπισμού σπηλαίων από την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η προσομοίωση με την μέθοδο αυτή εντοπίζει την σπηλιά. Για την ερμηνεία των δεδομένων είναι απαραίτητη η προσομοίωση με την χρήση μοντέλων τριών διαστάσεων το οποίο περιγράφει τόσο το σπήλαιο όσο και το ανάγλυφο της περιοχής.
- 3 Η ίδια διαδικασία έγινε και με την διάταξη Wenner-Schlumberger. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει προβλήματα ακόμα και στην περίπτωση δισδιάστατων δομών

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

.

Οι προτάσεις που μπορούν να γίνουν για την εξέλιξη της παραπάνω μελέτης είναι οι εξής:

- Κατασκευή πιο ρεαλιστικού τρισδιάστατου μοντέλου για την απεικόνιση της σπηλιάς του Αγίου Σπυρίδωνος με την χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας
- 2 Απαραίτητη η πραγματοποίηση συμπληρωματικών μετρήσεων τουλάχιστον σε 2 γραμμές μελέτης με την διάταξη διπόλου –διπόλου και η τρισδιάστατη αντιστροφή τους.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαφείδης Α. (2001). " Εφαρμοσμενη Γεωφυσική ΙΙ"
  Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Αλευράς, Νικόλαος Α., (2006), Γεωηλεκτρική Διασκόπηση για τον Προσδιορισμό Καρστικών Δομών στο Οροπέδιο του Ομαλού, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.
- 3. Βαφείδης Α., Μανούτσογλου Ε., Hamdan Η., Ανδρονικίδης Ν., Κουκαδάκη Μ., Κρητικάκης Γ., Οικονόμου Ν., Σπανουδάκης Ν. (2004) : Γεωφυσική διασκόπηση στο οροπέδιο του ομαλού, Ν. Χανιών, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. ΧΧΧVΙ, 2004, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004
- Παπαζάχος Β. (1986), "Εισαγωγή Στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική", Εκδόσεις "Ζήτα", Θεσσαλονίκη
- 5. Ι.Γ.Μ.Ε., Γεωλογικός χάρτης (φύλλο Χανιά, κλίμακα 1:50.000, 1996)
- Γκανιάτσος Ι. (2000). Γεωηλεκτρική τομογραφία σε τρεις διαστάσεις, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Σούρλας Γ. (2000). Συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στην αναζήτηση θαμ-μένων αρχαιοτήτων στην Ιτανο Λασιθίου, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχα-νικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Παπαδόπουλος, Ν., (2007), Ανάπτυξη Αλγορίθμων για την Τρισδιάστατη Αντιστροφή Γεωηλεκτρικών Δεδομένων που προέρχονται από Αρχαιολογικούς Χώρους, Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.

### ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΦΙΑ

 Bechtel, Timothy D. (2006): Geophysical detection and imaging of a lost mid-pleistocene bone cave beneath valley forge national historical park, PA, 2006 Philadelphia Annual Meeting (22–25 October 2006) Paper No. 128-5

- Hugo C. Matias, Fernando A. Monteiro Santos, Fernando E. Rodrigues Ferreira, Conceição Machado, Rafael Luzio (2006) : Detection of graves using the micro-resistivity method, Annals of Geophysics, Vol. 49, N. 6
- 3. **Muchaidze Iana (2008):** Imaging in karst terrain using electrical resistivity tomography, Master thesis, Missouri University of Science And Technology
- 4. G. Leucci and L. De Giorgi (2005): Integrated geophysical surveys to assess the structural conditions of a karstic cave of archaeological importance, Natural Hazards and Earth System Sciences (2005) 5: 17–22
- Mohammed I.I. Abu-Shariah (2009): Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model, Engineering Geology 105 (2009) 239–244
- Giovanni Leucci (2006):Contribution of Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography to identify the cavity and fractures under the main Church in Botrugno (Lecce, Italy), Journal of Archaeological Science 33 (2006) 1194-1204
- Gad El-Qady, Mahfooz Hafez, Mohamed A. Abdalla, And Keisuke Ushijima (2005): Imaging subsurface cavities using geoelectric tomographyand ground-penetrating radar, Journal of Cave and Karst Studies, v. 67, no. 3, p. 174–181
- Crawford, Nicholas C., Croft Leigh Ann, Cesin, Gina, Wilson Stacy (2006): Detection of bedrock caves, regolith voids and clandestine tunnels: microgravity and electrical resistivity techniques, 2006 Philadelphia Annual Meeting (22–25 October 2006) Paper No. 218-1
- G. Leucci, D. De Domenico, M. T. Carrozzo: Geophysical survey to study the stability of a karstic cave, GNGTS – Atti del 22° Convegno Nazionale / 11.18
- 10. Vafidis, A. Sarris, G. Sourlas, Y. Ganiatsos (1998) : Two and three dimensional electrical tomography investigations in the archaeological site of

Itanos, Crete, Greece, Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition, July 5 – 9, 1999, Istanbul.

- 11. Advanced Geosciences , Inc. : <u>www.agiusa.com</u>
- 12. R. G. Antonio-Carpio, M. A. Perez-Flores, D. Camargo-Guzman, and A. Alanis-Alcantar (2004): Use of resistivity measurements to detect urban caves in Mexico City and to assess the related hazard, Natural Hazards and Earth System Sciences (2004) 4: 541–547
- 13. **Dobrin, M. B. (1976).** Introduction to geophysical prospecting, McGraw Hill Book Comp. Inc., New York, USA.
- Loke, M. H. and Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of appar-ent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, Geophysical Prospect-ing, 44 (1).
- 15. **Reynolds, M. J., (1997)**, "An Introduction To Applied And Environmental Geophysics", John Wiley & Sons Ltd, Chichester, ISBN 0-471-95555-8