

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ Σχολή Θετικών Επιστήμων Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβαλλοντος Τομέας Γεωφυσικής - Γεωθερμίας

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ** ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: **ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ - ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ**

# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΜΕ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΧΙΟΥ

ΔΙΛΑΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ Γεωλόγος

Επιβλέπων: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΤΑΞΙΑΡΧΗΣ Καθηγητής Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

AOHNA 2009

## ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- Δρ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΤΑΞΙΑΡΧΗΣ (επιβλέπων)
   Καθηγητής
   Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ
   Δρ. ΦΟΥΝΤΟΥΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
   Επικ. Καθηγητής
   Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ
- Δρ. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
   Λέκτορας

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ

Στην οικογένεια μου

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, με τίτλο 'ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΜΕ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ, ΣΕ ΕΠΙΔΕΓΜΕΝΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΧΙΟΥ, που μου ανατέθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Ειδίκευση: Γεωφυσική – Σεισμολογία), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος), που πραγματοποιήθηκε σε περιοχές της νήσου Χίου, στα πλαίσια διερεύνησης της υπεδαφικής δομής. Απώτερος στόχος, ήταν η συμβολή στον καθορισμό των υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών των περιοχών.

Η ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε από τον Δρ. Παπαδόπουλο Ταξιάρχη, Καθηγητή Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη, τη βοήθεια, την υποστήριξη που προσέφερε, καθώς και για τις επιστημονικές συζητήσεις και συμβουλές του σε θέματα εφαρμοσμένης γεωφυσικής, στα οποία οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος η ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Η με κάθε τρόπο υποστήριξη και το αδιάλειπτο ενδιαφέρον του για ένα σωστά τεκμηριωμένο επιστημονικό αποτέλεσμα, υπήρξαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής.

Τις θερμές ευχαριστίες μου εκφράζω στο Δρ. Ιωάννη Αλεξόπουλο, Λέκτορα Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής. Η συνεργασία μας υπήρξε καθοριστική στη λήψη μετρήσεων υπαίθρου, στην επεξεργασία, στην ερμηνεία και στην αξιολόγηση των γεωφυσικών δεδομένων και γενικότερα στη διαμόρφωση της γεωλογικής μου σκέψης. Η συνεχής υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχε, καθ' όλη τη περίοδο εκπόνησης της εργασίας μου, ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της.

Τις θερμές ευχαριστίες μου εκφράζω στο Δρ. Ιωάννη Φουντούλη, Επικ. Καθηγητή του Τομέα Δυναμικής-Τεκτονικής-Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για τη βοήθεια και τις υποδείξεις του σε θέματα γεωλογίας και αξιολόγηση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων.

Επί πλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Πιππίδη Μιχαήλ, Γεωλόγο της Νομαρχίας Χίου, για τις πολύτιμες συζητήσεις και προσωπικές πληροφορίες επί γεωλογικών θεμάτων της νήσου Χίου, καθώς και για την καθοδήγηση του κατά τις πρώτες επισκέψεις στο νησί. Τις ευχαριστίες μου εκφράζω στην κα Τομαρά Βασιλική, MSc γεωλόγοπεριβαλλοντολόγο, για τη βοήθεια που μου παρείχε στην αρχική προετοιμασία για τη διαχείριση και απεικόνιση των πληροφοριών σε ψηφιακή μορφή, αλλά και για τη συμμετοχή της στη λήψη των μετρήσεων υπαίθρου

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω το Δρ. Βασιλάκη Εμμανουήλ, γεωλόγο, για τη βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε σε θέματα διαχείρισης των γεωπληροφοριών.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μουρούνα Ιωάννη, Πρόεδρο της Δημοτικής Εταιρείας Ύδρευσης και Αποχέτευσης Χίου (Δ.Ε.Υ.Α.Χ.), μέσω του οποίου ξεκίνησε, προωθήθηκε και στηρίχθηκε η συγκεκριμένη έρευνα στο νησί της Χίου.

Θεωρώ υποχρέωση μου, να ευχαριστήσω θερμά, τους συνάδελφους γεωλόγους και αγαπητούς φίλους, Γκούμα Γεώργιο, MSc γεωλόγο-γεωφυσικό και Δροσοπούλου Ελευθερία, για την πολύτιμη συμβολή τους στη διαδικασία λήψης των μετρήσεων υπαίθρου και τη γενικότερη συμπαράσταση τους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον προπτυχιακό φοιτητή, Σταύρου Αναστάσιο, για την συμμετοχή και βοήθεια τους στις εργασίες υπαίθρου

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Monteiro Santos F.A., Καθηγητή του Πανεπιστημίου της Λισσαβόνας, για την ευγενική παροχή του προγράμματος αντιστροφής *Inv2DVLF*, αλλά και για τη βοήθεια του κατά τη διαδικασία αντιστροφής και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τα οικεία μου άτομα, τόσο για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση σε αυτήν την προσπάθεια μου, όσο και για την υπομονή τους.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ПЕРІЛНѰН	1
SUMMARY	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1. ГЕЛІКА	7
1.1 σκοπος μελετής και μεθοδΟλογία ερεύνας	7
1.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ	9
1.3 Μορφολογικά στοιχεία	
1.4 κλιματολογικά στοιχεία	13
2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	14
2.1 βιβλιογραφικά δεδομένα	14
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ	
2.2.α. Περιοχή Λελφινίου.	
2.2.β. Περιοχή Κορακάρη	
2.2.γ. Περιοχή Κατράρη	
2.3 ТЕКТОЛІКН ЕЗЕЛІЕН	
2.4 υδρογεωλογικές σύνθηκες	
2.4.α. Γενικά υδρογεωλογικά στοιχεία	
2.4.β. Υδρογεωλογικός διαχωρισμός του νησιού	
2.4.γ. Υδρογεωλογική λεκάνη Δελφινίου	
2.4.δ. Υδρογεωλογική ζώνη Κορακάρη	
2.4.ε. Υδρογεωλογική ζώνη Κατράρη	
3. ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	41
3.1 Θεωρητικά στοιχεία ηλεκτρικής μεθόδου διασκοπήσης	
3.1.α Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος	
3.1.β Φαινόμενη ειδική αντίσταση	
3.1.γ Γεωηλεκτρικές παράμετροι	
3.1.δ Διάταξη Schlumberger	
3.1.ε Βαθος ερευνας	
3.2 ΕΠΕΞΕΡΙ ΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
3.2.α Ποιοτική παρουσίαση και ερμηνεία γεωηλεκτρικων δεδομένων	
3.2.β Ποσοτική ερμηνεία	
3.2.α.1 Γραφική μεθοδος ποσοτικής ερμηνείας	
3.2 ν Ποσοτική παρουσίαση νεωηλεκτρικων δεδομένων	
3.2.γ.1 Κατασκευή τομών ειδικής αντίστασης	
3.2.γ.2 Κατασκευή χαρτών ειδικής αντίστασης	
3.2.δ Περιορισμοί της μεθόδου	
3.2.8.1 Αρχές της ισοδυναμίας και της επικάλυψης	
3.2.0.2 Ζχετικό παχός στρωματών	
3.3.α Εζοπλισμος και οργανα μετρησης	
5.5.ρ Διεζαγωγή εργαοιων υπαιθρου	
3.4.α. Γεωηλεκτρική έρευνα στην περιοχή του Δελφινίου	
<ul> <li>3.4.α.1 Ηλεκτρικες ιδιοτητες των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας</li></ul>	
5.7.u.2. Hupobolitori notorikuv unoteneoputuv	

3.4.α.3. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων	71
3.4.α.4. Αξιολόγηση γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων περιοχής Δελφινίου	74
3.4.β. Γεωηλεκτρική έρευνα στην περιοχή του Μεσοβουνίου (Κορακάρης)	76
3.4.β.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας	76 70
3.4.β.3. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων	80
3.4.β.4. Αξιολόγηση γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων περιοχής Μεσοβουνίου	
4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	86
4 1 θεορητική θεμελίοση ηλεκτρομάγνητικής μεθολού λιασκοπήσης	87
	07
4.1.α Πλεκιρομαγνητική επαγωγη θε αγωγιμα μεσα	/ ۵ 80
4.1.β.1 Μαννητικό πεδίο επιμήκους καλωδίου – Νόμος Biot - Savart	89
4.1.β.2 Διανυσματικό δυναμικό στοιχείου ρεύματος	
4.1. γ Χαρακτηριστικά δευτερεύοντος πεδίου	90
4.1.δ Ελλειπτική πόλωση	92
4.1.ε Αμοιβαία επαγωγή	94
4.1.στ. Συνάρτηση απόκρισης	95
4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ VLF	96
4.2.α Πρωτεύον πεδίο	97
4.2.α.Ι Κατακορυφο ηλεκτρικο διπολο	98
4.2.ρ Επίδερμικο ραθος	100 101
4.2.γ Επισραση τοπογραφικου αναγλυφου 4.2.δ Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου	101 103
4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΛΟΜΕΝΟΝ VI Ε	104
	105
4.5.0. ΠΟΙΟΤΙΚή Ερμηνεία Οεοομενών V LF	103 108
4.3.β 1 Τοπονοαωικές διορθώσεις	100
4.3.β.2 Φίλτρο κατά Fraser	113
4.3.β.3 Φίλτρο κατά Karous-Hjelt	114
4.3.β.4 Τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος	115
4.3.β.5 Λογισμικά αυτοματοποιημένης ημι-ποσοτικής επεξεργασίας	115
4.3. γ Ποσοτική παρουσιασή δεδομενών VLF	110
4.3.9.1 Λαρτες καμπυλών VLF	110 117
4.4 Εξοπλισμός - εργασίες Υπαιθρού	119
4.4.α Εζοπλισμός και όργανα μέτρησης	119
4.5 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ	121
45 α. Ηλεκτοομαννητική έφερνα στην περιοχή του Λελαινίου	123
4.4.α.1. Παρουσίαση ημι-ποσοτικών αποτελεσμάτων φιλτοαρισμένων καμπύλων	
4.4.α.2. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων – Συγκριτική απεικόνιση με ψευδό-τομές κατανομής	
ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος	142
4.5.β. Ηλεκτρομαγνητική ερευνα στην περιοχή του Κορακαρη	138 159
4.4.9.1. Παρουσίαση ημι-ποσοτικών αποτελεσμάτων φιλιραρισμένων καμπολών	138
ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος	162
4.5.γ. Ηλεκτρομαγνητική έρευνα στην περιοχή του Κατράρη	166
4.4.γ.1. Παρουσίαση ημι-ποσοτικών αποτελεσμάτων φιλτραρισμένων καμπύλων	166
4.4.γ.2. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων – Συγκριτική απεικόνιση με ψευδό-τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας οεύματος	174
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	197
5. $E$ i which the matrix $-$ in 0 i along $1$	102
5.1. ΠΕΡΙΟΛΠ ΔΕΛΨΙΝΙΟΥ	102
5.2. ПЕРІОХН КОРАКАРН	185
5.3. ПЕРІОХН КАТРАРН	187
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	189

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε γεωφυσική έρευνα, που πραγματοποιήθηκε σε περιοχές της νήσου Χίου και στα αποτελέσματα της, τα οποία συνέβαλαν στη διερεύνηση της υπεδαφικής γεωλογικής δομής, με απώτερο στόχο τον καθορισμό των υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών των περιοχών αυτών.

Γεωλογικά το νησί της Χίου διαρθρώνεται από τρεις τεκτονο-στρωματογραφικές ενότητες. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την αυτόχθονη ενότητα του νησιού, στην οποία περιλαμβάνονται ακόμα και παλαιοζωικοί σχηματισμοί, την αλλόχθονη ενότητα, δηλαδή ένα τεκτονικό κάλυμμα και την παραυτόχθονη ενότητα που εντοπίζεται ανάμεσα τους και πρόκειται για ανεστραμμένα τμήματα της αυτόχθονης ενότητας.

Για τη γεωφυσική έρευνα επιλέχθηκε καταρχήν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF, προκειμένου να εντοπιστούν κατακόρυφες ή ημί-κατακόρυφες θαμμένες αγώγιμες ζώνες. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν εικοσιοκτώ VLF τομές συνολικού μήκους 7.045 μέτρων. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και η γεωηλεκτρική μέθοδος διερεύνησης της κατακόρυφης κατανομής της ειδικής αντίστασης, με τη διάταξη *Schlumberger*, προκειμένου να διερευνηθεί κυρίως η υπεδαφική γεωλογική δομή μικρών λεκανών καλυμμένων από νεογενείς αποθέσεις. Για αυτό το λόγο, εκτελέστηκαν εικοσιοκτώ γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις (VES) και τρεις 'επιτόπου' μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων.

Τα γεωηλεκτρικά δεδομένα ερμηνεύτηκαν συνδυαστικά με τη γραφική μέθοδο βοηθητικού σημείου και με λογισμικά πακέτα επεξεργασίας δεδομένων, προκειμένου να κατασκευαστούν τομές και χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, γεωλογικές - γεωφυσικές τομές και ψευδο-τρισδιάστατοι χάρτες γεωηλεκτρικού υποβάθρου. Στα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα VLF, πραγματοποιήθηκε ημι-ποσοτική επεξεργασία με την εφαρμογή τοπογραφικών διορθώσεων κατά Eberle και Baker & Myers, την εφαρμογή των φίλτρων κατά Fraser και Karous-Hjelt καθώς και την κατασκευή τομών κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος. Ακολούθησε η ποσοτική επεξεργασία των δεδομένων, με την κατασκευή τομών κατανομής ειδικής αντίστασης που προέκυψαν μετά από αντιστροφή των δεδομένων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, βάσει του λογισμικού Inv2DVLF.

1

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων, προέκυψαν χρήσιμα στοιχεία για τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες στις περιοχές έρευνας. Έτσι, στην περιοχή του Δελφινίου, στη ΒΑ Χίο, προέκυψαν στοιχεία για τον μηχανισμό λειτουργίας των υφιστάμενων πηγών που βρίσκονται σε θετικά υψόμετρα (+4μ.), τους λόγους υφαλμύρινσης τους και την τροφοδοσία ολόκληρης της λεκάνης, που οφείλεται τόσο στην παρουσία ρηγμάτων ΝΔ-ΒΑ διεύθυνσης που εντοπίζονται στην επιφάνεια, όσο και στην προέκταση αυτών κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις. Σημαντική είναι η παρουσία του ρήγματος ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, κατά μήκος των νότιων παρυφών της Μεσορράχης, που συμβάλλει στην υφαλμύρινση του υδροφόρου ορίζοντα.

Στην περιοχή του Μεσοβουνίου, στη κεντρική Χίο, προέκυψαν χρήσιμα στοιχεία που συνέβαλαν στην γνώση της υπεδαφικής γεωλογικής δομής της λεκάνης, με στοιχεία για την κλίση των στρωμάτων προς Νότο και συνεπώς για τις διόδους τροφοδοσίας με νερό από Βορρά, όπου εκλείπουν τα αδιαπέρατα πετρώματα στην επιφάνεια. Στην παραπλήσια περιοχή της Αγ.Παρασκευής, μετά την αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων, σκιαγραφήθηκαν υπό-παράλληλες ρηξιγενείς ζώνες που φαίνεται να υδροφορούν.

Τέλος, στην ευρύτερη περιοχή του Κατράρη (στη Ν Χίος), στις λεκάνες του Κοντύλοπου και του Άνυδρου, η αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων προσδιόρισε την προέκταση επιφανειακών ρηξιγενών ζωνών κάτω από τις Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Συμπερασματικά, με βάση τα αποτελεσμάτα της γεωφυσικής έρευνας, προτάθηκαν συνολικά οκτώ (8) θέσεις ανόρυξης νέων υδροληπτικών γεωτρήσεων. Μέχρι τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, είχαν πραγματοποιηθεί τέσσερις γεωτρήσεις, εκ των οποίων οι τρεις ήταν επιτυχείς. Στοιχεία για δυο γεωτρήσεις στην περιοχή «Δελφίνι», αναφέρουν παροχή 80 μ<sup>3</sup>/ώρα εκάστηςασ.

## SUMMARY

This thesis refers to the geophysical research and its results, applied at some areas of Chios Island, in order to explore the subsurface geological structure, aiming at the determination of the hydrogeological and environmental conditions of the investigated areas.

The geology of Chios Island is structured of three tectono-stratigraphic units. Specifically, there is the autochthonous unit, which includes also Paleozoic formations, the allochthonous unit, which is a tectonic cover and the parautochthonous unit located between the foresaid units which comes from reversed parts of the autochthonous unit.

The electromagnetic method of VLF was initially applied, in order to detect vertical or sub-vertical buried conductive zones. Twenty eight VLF sections were carried out, of total length 7.045 meters. Moreover, the *Schlumberger* geoelectrical method was also applied to investigate the vertical distribution of earth resistivity and the subsurface geological structure of small basins covered with neocene deposits. Twenty eight geoelectrical soundings (VES) were carried out together with three *in situ* resistivity measurements for calibrating the results.

The geoelectrical data were interpreted by applying the graphical method and appropriate geoelectrical software, in order to produce sections and maps of resistivity distribution, geological – geophysical sections and pseudo-threedimensional maps of the geoelectrical bedrock. A semi-quantitative process was initially applied to VLF data, including topographical corrections based on *Eberle and Baker & Myers* methods and the application of *Fraser* and *Karous-Hjelt* filters, as well as the construction of pseudo-sections for the distribution of equivalent current density. Furthermore, following a quantitative approach, sections of resistivity distribution were produced, by applying *finite element* inversion to the data, based on *Inv2DVLF* software package.

The geophysical investigation gave useful results for the geological and hydrogeological conditions of the investigated areas. So, for the *Delfini* area, at NE *Chios* island, the geophysical research explained the feeding mechanism of springs, located at positive elevations (+4 m), the reasons of brackishness of these springs and the water feeding paths of the whole basin. This is due to the existence of tectonic

zones with running in SW-NE direction, which are extended northward under the alluvial deposits. The existence of the NW-SE direction fault, along the south foothills of *Mesorrachi*, contributes to the brackishness of the water table.

Moreover, at *Mesovouni* area, at central *Chios*, important results came up contributing in the knowledge of the subsurface geological structure of the alluvial basin, the determination of the subsurface layers northward and consequently for the water feeding paths coming from the North, where the impermeable formations disappear. At the neighboring area of *Ag.Paraskeyi*, after the evaluation of the electromagnetic results, sub-parallel tectonic zones were outlined, possibly filled with flowing water.

Furthermore, at the greater area of *Katraris*, at south *Chios*, at the small neocene basins of *Kontylopos* and *Anydros*, the evaluation of the electromagnetic results, outlined the extension of surface tectonic zones under the neocene deposits.

In conclusion, based on the results of the geophysical research, eight new borehole locations were proposed for water exploitation purposes. Up to date, three out of four boreholes were drilled successfully. Two boreholes at the *Delfini* area gave water supply of 80 m<sup>3</sup> / hour for each.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νησί της Χίου, τα τελευταία 20 χρόνια, έχει καλυφτεί σε μεγάλο βαθμό από γεωτρήσεις άντλησης και εκμετάλλευσης νερού για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης των περιοχών της. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί σε συγκεκριμένες υποσχόμενες περιοχές, όπως η υδρογεωλογική περιοχή του 'Κορακάρη', από την οποία προέρχεται το νερό για το 80% της ύδρευσης και 70% της άρδευσης του νησιού. Εξαιτίας όμως της υπερεκμετάλλευσης και υπεράντλησης στην περιοχή αυτή, πλέον παρατηρούνται αυξημένες τιμές υδράργυρου και χλωριόντων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, περίοδο όπου αυξάνεται και η κατασκευή φραγμάτων, τα οποία καθυστερούν λόγω οικονομικών προβλημάτων. Επίσης, στο νησί λειτουργεί ήδη μια μονάδα αφαλάτωσης, της οποίας το κόστος συντήρησης είναι μεγάλο.

Στα πλαίσια αντιμετώπισης της υδροδότησης του νησιού, οι τοπικές αρχές και πιο συγκεκριμένα η Δημοτική Εταιρεία Ύδρευσης & Αποχέτευσης Χίου (Δ.Ε.Υ.Α.Χ.), πρότειναν την διερεύνηση νέων περιοχών, οι οποίες πιθανόν να μπορούν να δώσουν αξιόλογα αποθέματα νερού. Οι περιοχές αυτές, θα πρέπει να είναι προσβάσιμες από γεωτρητικά οχήματα αλλά και πλησίον του υδροδοτικού δικτύου του νησιού, για να είναι εφικτή η εκμετάλλευση υδροφορίας που πιθανόν να εντοπισθεί.

Έτσι, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να καθοριστούν, με τη χρήση γεωφυσικών τεχνικών, οι υπεδαφικές γεωλογικές δομές που καθορίζουν τις υδρογεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες τριών περιοχών, που υποδείχτηκαν από τις τοπικές αρχές.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε (5) επιμέρους κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται σύντομη αναφορά στα μορφολογικά και κλιματολογικά στοιχεία της νήσου Χίου και καθορίζονται γεωγραφικά οι θέσεις των τριών επιμέρους περιοχών μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται τα γεωλογικά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν για την ευρύτερη περιοχή μελέτης και παρατίθενται τα γεωλογικά στοιχεία (στρωματογραφικά, τεκτονικά, υδρογεωλογικά) που συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια της έρευνας.

5

Στο Κεφάλαιο 3, μετά από σύντομη περιγραφή της γεωηλεκτρικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, ερμηνείας και αξιολόγησης των γεωφυσικών δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4, αναλύεται σύντομα η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (VLF) που χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, ερμηνείας και αξιολόγησης των δεδομένων αυτής της μεθοδολογίας, και τέλος

Στο Κεφάλαιο 5, παρατίθενται συνδυασμένα αποτελέσματα και αξιολόγηση από τις δύο γεωφυσικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν. Ακολούθως, διατυπώνονται συμπεράσματα για τις γεωλογικές συνθήκες βάθους, τα οποία συνδράμουν στην διευθέτηση των υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στις περιοχές έρευνας, οδηγώντας σε κάποιες προτάσεις.

## **1. ΓΕΝΙΚΑ**

Στα πλαίσια μιας γεωλογικής - υδρογεωλογικής μελέτης, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των γεωλογικών συνθηκών πεδίου, προκειμένου να καθοριστούν οι άξονες της έρευνας. Μάλιστα, όταν πρόκειται να εφαρμοστούν γεωφυσικές διασκοπήσεις, είναι απαραίτητη η σαφής γνώση των επιφανειακών γεωλογικών πληροφοριών, προκειμένου να επιλεγούν, σχεδιαστούν και εκτελεστούν σωστά οι πλέον κατάλληλες γεωφυσικές μεθοδολογίες.

#### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εστιάζει το ενδιαφέρον της σε τρεις ευρύτερες περιοχές έρευνας, που εντοπίζονται στο βορειοανατολικό, κεντρικό και νότιο κομμάτι της νήσου Χίου. Έχει ως απώτερο σκοπό, τη εφαρμογή των γεωφυσικών τεχνικών στην υδρογεωλογική και περιβαλλοντική διερεύνηση της περιοχής, λόγω των προβλημάτων υδροδότησης του νησιού, τα οποία έχουν προέλθει κυρίως από υπερεκμεταλλεύσεις συγκεκριμένων υδρογεωλογικών λεκανών (αύξηση περιεκτικότητας σε χλωριόντα και υδράργυρο), αλλά και καθυστερήσεων κατασκευής τεχνικών έργων (φραγμάτων).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, θα πρέπει να διερευνηθούν πιθανώς υποσχόμενες περιοχές στις οποίες δεν έχουν γίνει μέχρι τώρα υδροληπτικά έργα (γεωτρήσεις). Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορέσει να περιοριστεί η άντληση από τις υπερεκμεταλλευμένες περιοχές, το οποίο θα οδηγήσει και στην πτώση των εμπεριεχόμενων επιβλαβών στοιχείων, ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί και αυτό για την υδροδότηση και πάλι.

Όλα αυτά, καθορίζονται ουσιαστικά από τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Υπάρχουν περιοχές στο νησί, οι οποίες δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως και στις οποίες υπάρχουν ερωτήματα για τις επικρατούσες γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες. Έτσι, αποφασίστηκε η διερεύνηση των υπεδαφικών συνθηκών σε κάποιες από αυτές τις περιοχές, με τη χρήση γεωφυσικών τεχνικών.

Έτσι, επιλέχθηκε καταρχήν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF, προκειμένου να εντοπιστούν κατακόρυφες ή υπο-κατακόρυφες θαμμένες αγώγιμες ζώνες, δηλαδή θαμμένες ρηξιγενείς ζώνες μέσω των οποίων γίνεται η κίνηση του νερού σε μεγάλες ποσότητες.

7

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η γεωηλεκτρική μέθοδος διερεύνησης της κατακόρυφης κατανομής της ειδικής αντίστασης, με τη διάταξη Schlumberger, προκειμένου να διερευνηθεί η υπεδαφική γεωλογική δομή λεκανών καλυμμένων από αλλουβιακές αποθέσεις. Η διασαφήνιση της υπεδαφικής γεωλογικής δομής θα συντελέσει σε σημαντικό βαθμό, στην διευθέτηση και του υδρογεωλογικού καθεστώτος.

Έτσι, μετά την συγκέντρωση των απαραίτητων βιβλιογραφικών δεδομένων, ακολούθησαν δύο επισκέψεις στη νήσο Χίο, τον Ιούλιο του 2007 και τον Ιούλιο του 2008. Σε αυτές τις περιόδους, πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές γεωλογικές παρατηρήσεις, απογραφή γεωτρήσεων και φρεάτων (όπου ήταν δυνατό), καθώς και η εκτέλεση εικοσιοκτώ (28) γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων (VES), τριών (3) 'επιτόπου' μετρήσεων της ειδικής αντίστασης και εικοσιοκτώ (28) VLF τομών, συνολικού μήκους 7.045 μ.



Εικόνα 1.1: Περιοχές μελέτης (κόκκινα πλαίσια) στη νήσο Χίο.

## 1.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Οι **τρεις επιμέρους περιοχές μελέτης**, εντοπίζονται στη νήσο Χίο (εικόνα 1.1). Οι περιοχές αυτές ανήκουν γεωγραφικά στα τοπογραφικά διαγράμματα «Χίος -Βροντάδος» και «Χίος - Θυμιανά», κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.).

#### Α. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 'ΔΕΛΦΙΝΙ'

Η περιοχή Δελφινίου βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Χίου και οριοθετείται από τις παράλληλους Β 38° 29' και Β 38° 31', καθώς και από τους μεσημβρινούς Α 26° 06' και 26° 08'.

Πρόκειται ουσιαστικά για την ευρύτερη περιοχή της κοιλάδας του Δελφινίου (εικόνα 1.2), οριοθετείται βόρεια από τη Μεσορράχη, δυτικά από το όρος Τούμπα και νότια από το όρος Τσουμπί και την περιοχή Στούραι. Στα ανατολικά οριοθετείται από την παράκτια ζώνη.



Εικόνα 1.2: Απόσπασμα Τοπογραφικού Διαγράμματος 1:50.000, Γ.Υ.Σ, της περιοχής μελέτης Δελφινίου.

#### <u>Β. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 'ΚΟΡΑΚΑΡΗΣ'</u>

Η περιοχή εντοπίζεται στη κεντρική Χίο, βορειοδυτικά του όρους Κορακάρη και οριοθετείται από τις παράλληλους Β 38° 21′ και Β 38° 23′, καθώς και από τους μεσημβρινούς Α 26° 04′ και 26° 06′.

Στην περιοχή μελέτης (εικόνα 1.3) εντοπίζονται δύο επιμέρους λεκάνες, οι οποίες διαχωρίζονται από το όρος Κεφαλοβούνι. Ανατολικά του όρους βρίσκεται η λεκάνη του Μεσοβουνίου, η οποία νότια και ανατολικά περιορίζεται από το όρος του Κορακάρη. Δυτικά του όρους Κεφαλοβουνίου, εντοπίζεται η λεκάνη της Αγ. Παρασκευής.



Εικόνα 1.3: Απόσπασμα Τοπογραφικού Διαγράμματος 1:50.000, Γ.Υ.Σ, της περιοχής μελέτης Κορακάρη.

#### Γ. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 'ΚΑΤΡΑΡΗΣ'

Η περιοχή του Κατράρη βρίσκεται στο νότιο μέρος της Χίου, μεταξύ της περιοχής που περικλείεται από τα χωριά Βέσσα, Θολοποτάμι και Αρμόλια. Οριοθετείται από τις παράλληλους Β 38° 16΄ και Β 38° 18΄, καθώς και από τους μεσημβρινούς Α 26° 01΄ και 26° 04΄.

Στην περιοχή μελέτης (εικόνα 1.4) εντοπίζονται δύο επιμέρους λεκάνες. Στο ανατολικό τμήμα της περιοχής, βρίσκεται η μικρή ορεινή λεκάνη του Άνυδρου, η

οποία δυτικά περιορίζεται από το όρος Λυκούρι, βόρεια από τις Πετροκοτσιφιές, ανατολικά την κορυφή Σταυρί και νότια από το όρος Πρινιάς. Πιο ανατολικά, εντοπίζεται το δεύτερο κομμάτι της περιοχής, γνωστή ως Κοντύλοπος, που ουσιαστικά είναι τμήμα της κοιλάδας του ποταμού Κατράρη. Νοτιοδυτικά οριοθετείται από την κορυφή Σταυρί, βόρεια από την περιοχή Αμάλι και ανατολικά από τον Αγ. Ταξιάρχη.



Εικόνα 1.4: Απόσπασμα Τοπογραφικού Διαγράμματος 1:50.000, Γ.Υ.Σ, της περιοχής μελέτης Κατράρη.

## 1.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Γενικά, το ανάγλυφο στο νησί της Χίου, στο μεγαλύτερο μέρος του είναι ορεινό, με εξαίρεση στα νότια και νοτιοανατολικά όπου σχηματίζονται μικρές πεδινές εκτάσεις (εικόνα 1.5). Στο βόρειο τμήμα του νησιού, εντοπίζονται τα όρη Πεληναίο με τις κορυφές του Προφήτη Ηλία (1.297 μ.), Όρος (1.126 μ.) και στα βορειοδυτικά το όρος Αμανή (809 μ.). Στο κεντρικό μέρος του νησιού εντοπίζονται το Μαραθόβουνο και Πιγκανιάς. Στην περιοχή του Δελφινίου, τα υψόμετρα κυμαίνονται από 0 έως 200 μ., αλλά στην κοιλάδα περιορίζονται στα 30μ. Εντοπίζονται σημεία με έντονο ανάγλυφο, κυρίως στα βόρεια και δυτικά τμήματα της περιοχής.

Η περιοχή του Κορακάρη χαρακτηρίζεται από πιο μεγάλα υψόμετρα, με τη λεκάνη του Μεσοβουνίου να βρίσκεται στα 130-150 μ. και την παράπλευρη λεκάνη της Αγ. Παρασκευής στα 160-260 μ., αφού στο νότιο τμήμα της το ανάγλυφο γίνεται πιο απότομο.

Τέλος, η περιοχή του Κατράρη βρίσκεται ακόμα πιο ορεινά. Η επιμέρους λεκάνη του Άνυδρου, έχει υψόμετρο περίπου 270 μ., όταν στον Κοντύλοπο εντοπίζονται υψόμετρα από 150 μέχρι 230 μ.



Εικόνα 1.5: Τοπογραφικός – Μορφολογικός χάρτης της νήσου Χίου.

#### 1.4 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στη νήσο Χίο επικρατεί το ήπιο μεσογειακό κλίμα, που χαρακτηριστικά του είναι τα θερμά και σχετικά ξηρά καλοκαίρια, με βασικό στοιχείο την ηλιοφάνεια που διαρκεί σχεδόν όλο το χρόνο, αλλά και οι ήπιοι βροχεροί χειμώνες. Η περίοδος των βροχοπτώσεων είναι από τον Οκτώβριο ως και τον Μάρτιο, με μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 680 χιλιοστά (150-250 χιλιοστά/μήνα). Η υγρασία στο νησί είναι σχετικά υψηλή, με μέση τιμή 62%.

Η μέση θερμοκρασία που επικρατεί κατά το χειμώνα είναι 12° C και κατά το θέρος 29° C, αφού μετριάζονται από τους δροσερούς Β-ΒΔ ανέμους που συνήθως επικρατούν στο Αιγαίο.

## 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Προκειμένου να καθοριστεί η γεωλογική δομή των περιοχών έρευνας, σε πρώτη φάση συγκεντρώθηκε η απαραίτητη βιβλιογραφία. Μετά από προσωπικές μακροσκοπικές παρατηρήσεις και πληροφορίες άλλων ερευνητών, προέκυψε η τελική γεωλογική δομή των περιοχών μελέτης.

#### 2.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η νήσος της Χίου, δεδομένης της γεωλογικής ιδιαιτερότητας της (πολύπλοκη δομή, πιθανή προέλευση ιζημάτων της από Παλαιοτηθύ), έχει μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές.

Πρώτος ο TELLER (1880), μετά από μελέτες καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι ψαμμίτες και οι αργιλικοί σχίστες στο νησί έχουν ηλικία Λιθανθρακοφόρο – Πέρμιο.

Ο ΚΤΕΝΑΣ (1928), μετά από επιτόπιες έρευνες του στο νησί, συμπεραίνει ότι οι ασβεστόλιθοι με φουσουλίνες που εντοπίζονται στο νησί, αποτελούν οροφή των παλαιοζωικών σχηματισμών.

Μεταξύ 1965-1976, χαρτογραφήθηκε αναλυτικά ολόκληρο το νησί της Χίου, από μία ομάδα Γερμανών υποψήφιων διδακτόρων (BESENECKER, HERGET, JACOBSAGEN, RHOTH, TIETZE, KAUFFMAN, LUEDKE, DUERR), από το Πανεπιστήμιο του Marburg, οι οποίοι προσδιόρισαν τρεις (3) κύριες στρωματογραφικές ενότητες (*Besenecker et al., 1968, 1971* – Εικόνα 2.1). Η χαρτογράφηση των Γερμανών χρησιμοποιήθηκε και για την κατασκευή του γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. για το νησί της Χίου.

Συνοπτικά, η κατώτερη ενότητα - αυτόχθονο σύστημα, που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού, αποτελείται από τους κάτωθι σχηματισμούς (από αρχαιότερο σε νεότερο):

- Επιζωνικά μεταμορφωμένα, όπως χαλαζίτες, γραουβάκες και κροκαλοπαγή.
- Μη-μεταμορφωμένα παλαιοζωικά πετρώματα (Σιλούριο Λιθανθρακοφόρο),
   αποτελούμενα από γραουβάκες, αργιλικούς σχιστόλιθους, με ενδιαστρώσεις
   κροκαλοπαγών, χαλαζιτών, πυριτικών σχιστόλιθων αλλά και ασβεστολιθικούς

φακούς, που διαπερνώνται από ηφαιστειακά πετρώματα (διαβάσες, τόφφους κ.ά.), του Κατ. Λιθανθρακοφόρου.

- Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και συμπαγείς ασβεστόλιθους, που επικάθονται με γωνιακή ασυμφωνία στα παλαιοζωικά.
- Η 'πολύχρωμος σειρά', που περιλαμβάνει κροκαλοπαγή, μάργες, ασβεστόλιθους
   και τόφφους ηλικίας έως Αν. Ανίσιο
- Δολομίτες του Λαδίνιου Λιάσιου, με ορίζοντες ανάδυσης από αργιλικούς
   σχιστόλιθους, ψαμμίτες και χαλαζιακά κροκαλοπαγή.



Εικόνα 2.1: Χάρτης διάρθρωσης γεωλογικών ενοτήτων νήσου Χίου (Besenecker et al., 1971).

Όσον αφορά την **ανώτερη ενότητα** - **αλλόχθονο** σύστημα, πρόκειται για ένα τεκτονικό κάλυμμα, που πιθανολογείται ότι προέρχεται από την περιοχή μεταξύ Χίου και Λέσβου και καλύπτει την αυτόχθονη ενότητα σε αρκετά μέρη του νησιού. Περιλαμβάνει τα εξής πετρώματα (αρχαιότερο προς νεότερο):

- Στη βάση, γραουβάκες, αργιλικούς σχιστόλιθους και ασβεστόλιθους με φουσουλίνες του Αν. Λιθανθρακοφόρου.
- Κλαστικά πετρώματα του Πέρμιου, ασβεστόλιθοι και κροκαλοπαγή.
- Ανθρακική σειρά Μ. Πέρμιου
- Κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργιλικοί σχιστόλιθοι
- Ασβεστόλιθοι και δολομίτες του Λιάσιου.

Κατά τόπους, ενδιάμεσα από τις δύο προαναφερθείσες ενότητες, εντοπίζεται η παραυτόχθονη ενότητα, που ουσιαστικά πρόκειται για ανεστραμμένα τμήματα της αυτόχθονης σειράς, εξαιτίας της τεκτονικής ολίσθησης του αλλόχθονου συστήματος.

Οι Νεογενείς αποθέσεις, αποτελούμενες από ψαμμίτες, αργίλους, άμμους και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, καλύπτουν την αλλόχθονη και την παραυτόχθονη σειρά. Στο τέλος του Νεογενούς, υπήρξε ηφαιστειακή δραστηριότητα που έδωσε δακίτες, ρυόλιθους, βασάλτες και ανδεσίτες.

Το 1970, ο BENDER, διαπίστωσε βάσει απολιθωμάτων αμμωνιτών και κονόδοντων ότι ο λόφος του Μαραθόβουνου έχει ηλικία Κατ. Τριαδικό – Κατ. Ανίσιο, ενώ ο ASSERETO (1974) περιόρισε την ηλικία στο Κατ. Ανίσιο, ο οποίος αργότερα προσπάθησε να καθορίσει επακριβώς το όριο Σκύθιου / Ανίσιου (Assereto et al., 1980).

Η χαοτική χωρική κατανομή ανθρακικών μπλοκ (μεγέθους από 10μ. έως και χιλιόμετρο) και λυδιτών μέσα στους γραουβάκες του αυτόχθονου συστήματος, ηλικίας Σιλούριο – Κατ. Δεβόνιο, καθώς και τα ασύμφωνα στρωματογραφικά και λιθοφασικά χαρακτηριστικά τους, οδήγησαν τους ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ & ΣΙΔΕΡΗΣ, το 1983, να θεωρήσουν τον παλαιοζωικό σχηματισμό της βάσης της αυτόχθονης ενότητας ως σχηματισμό άγριου φλύσχη, με ολισθόλιθους ηφαιστειακών πετρωμάτων. Οι ίδιοι συγγραφείς, το 1989, πρότειναν ηλικία Πενσυλβάνιο - Πέρμιο για το υλικό ιζηματογένεσης του σχηματισμού αυτού, συνδέοντας τα νεότερα σε αυτό κλαστικά, με τα υπερκείμενα τριαδικά στρώματα. Οι PE-PIPER & KOTOPOULI (1994) αναφερόμενοι κι αυτοί στον παλαιοζωικό σχηματισμό, τον θεώρησαν ως μια σφήνα *mélange* από ηφαιστειακά, κατά την προτριαδική περίοδο, αναγνωρίζοντας λάβες, υπερβασικά πετρώματα αλλά και πυροκλαστικά.

Σύμφωνα με τους GAETANI et al. (1992), στη Χίο μπορούν να αναγνωριστούν 6 ιζηματολογικές ενότητες (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Μπλοκ διάγραμμα όπου κατηγοριοποιείται η ιζηματολογική διάρθρωση της νήσου Χίου σε 6 ιζηματολογικές ενότητες (*Gaetani et al., 1992*).

Το 2000, οι ROBERTSON & PICKETT, πρότειναν ότι το 'mélange' της Χίου, προέρχεται από ένα περιβάλλον τάφρου, μέσα σε μια σταθερή και βαθειά θάλασσα.

Οι GROVES et al. (2003), μελετώντας μικρό-απολιθώματα από το παλαιοζωικό υπόβαθρο της Χίου, προσδιόρισαν κονόδοντα ηλικίας Μ. Λιθανθρακοφόρου (Αν. Βιζαίο – Κατ. Ναμούριο) από το σχηματισμό του λεγόμενου 'άγριου φλύσχη'. Βάσει αυτού, θεώρησαν ότι το παλαιοζωικό υπόβαθρο της νήσου, προήλθε από την δημιουργία ενός προσαυξητικού πρίσματος - σφήνας, ενώ το συνδέουν με την Ερκύνια ορογένεση, δεδομένης της ομοιότητας του σχηματισμού με αντίστοιχους σε άλλα μέρη της Μεσόγειου.

Οι ZANCHI et al (2003), μέσω απολιθωμάτων, δίνουν στους τουρβιδίτες και ολισθόλιθους του Παλαιοζωικού, ηλικία Βιζαίο-Σερπουκόβιο (τέλη Κατ. Λιθανθρακοφόρου), παραπλήσια με των Groves et al. (2003). Προσδιορίζοντας υλικά αποσάθρωσης μέσα στους τουρβιδίτες, που καταδεικνύουν μετακίνηση μεγάλης κλίμακας, προερχόμενη από την Βαρύσκια ζώνη επιβεβαιώνουν και πάλι τους Groves et al. (2003). Από επιτόπιες έρευνες εντοπίστηκε, άγνωστη μέχρι τότε γωνιώδη ασυμφωνία, που διαχωρίζει τους τουρβιδίτες από τους υπερκείμενους σχηματισμούς του Μεσοζωικού, καταδεικνύοντας ότι η τουρβιδιτική αποσφήνωση ακολουθήθηκε από έντονη παραμόρφωση και ανύψωση, χωρίς τη συμμετοχή σε ζώνη ηπειρωτικής σύγκλισης.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση χωρικής σχέσης της Χίου με τα υπόλοιπα παλαιογεωγραφικά στοιχεία του ενεργού βόρειου ορίου στα τέλη του Κατ. Λιθανθρακοφόρου (Zanchi et al., 2003 – modified from Scotese, 2001). AL: Alborz, K: Kirsehir, M: Menderes.

Βάσει των ανωτέρω οι Zanchi et al. (2003), θεωρούν ότι το παλαιοζωικό υπόβαθρο της Χίου, είναι υπόλειμμα του θαλάσσιου κόλπου, ένας κόλπος της Παλαιοτηθύος, το οποίο συνδέεται και τροφοδοτείται από την Βαρύσκια ζώνη (εικόνα 2.3). Θεωρείται πιθανόν η ιζηματογένεση να διαδραματιζόταν ενώ η ο ωκεάνιος φλοιός της Παλαιοτηθύς βυθιζόταν κάτω από την Λαυρασία. Έτσι, η Χίος μπορεί να θεωρηθεί ως το δυτικό όριο του τόξου υποβύθισης της Παλαιοτηθύος.

#### 2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η γεωλογική δομή η οποία παρατίθεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τις περιοχές μελέτης, αποτελεί συνδυασμό βιβλιογραφικών δεδομένων και στοιχείων (βλ. §2.1), προσωπικών παρατηρήσεων και πληροφοριών που μου παρείχε ο κ. Πιππίδης Μιχάλης, Γεωλόγος – Υδρογεωλόγος της Νομαρχίας Χίου, τον οποίο και ευχαριστώ.

#### 2.2.α. Περιοχή Δελφινίου

Η περιοχή του Δελφινίου είναι η πιο περιπλοκή από άποψη γεωλογικής άποψης, αφού μέσα σε μια σχετικά μικρή έκταση, εμφανίζονται και οι 3 τεκτονοστρωματογραφικές σειρές του νησιού (εικόνα 2.4).



**Εικόνα 2.4**: Οι τρεις κύριες τεκτονο-στρωματογραφικές ενότητες και οι κύριες τεκτονικές ζώνες της ευρύτερης περιοχής του Δελφινίου (*Kauffman*, 1968).





Υπόμνημα: Q al: Αλλόυβια & παράκτιες αποθέσεις, Qs: Πλευρικά κορήματα, Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), Jis: Κροκαλοπαγείς ψαμμίτες & Ψαμμιτικοί αργ. σχιστόλιθοι (Μ.Περμίο), Pm: Ασβεστόλιθοι (Μ.Περμίου), C-pi: Ασβεστόλιθοι (Λιθανθρακοφόρο – Κ.Πέρμιο), Ci:Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων, Tr m-S: Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο - Κάρνιο), Tr m: Δολομίτες & Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο), Tr m2: Ανώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr is: Βασικοί Ψαμμίτες & Κροκαλοπαγή, Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό) Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζεται ο αναλυτικός χάρτης της περιοχής του Δελφινίου, όπως χαρτογραφήθηκε λεπτομερώς από το Γερμανό υποψήφιο διδάκτορα, *Kauffman*, το 1968 και δημοσιεύτηκε από τους *Besenecker et al*, το 1971, για το Ι.Γ.Μ.Ε.

Παρακάτω αναλύονται τα πετρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή, από το αρχαιότερο προς το νεότερο.

#### <u>Αυτόχθονη Ενότητα</u>

#### <u>i. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Tr s-j) Κάρνιου – Ιουρασικού</u>

Ο σχηματισμός αυτός εντοπίζεται στο δυτικό κομμάτι της περιοχής, με παχυστρωματώδεις και συμπαγείς ασβεστόλιθους, τεφρούς έως ερυθρόχρωους, πάχους άνω των 1.000 μέτρων (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Ασβεστόλιθοι και δολομίτες (Tr s-j) Κάρνιου - Ιουρασικού.

Εντός του σχηματισμού εντοπίζονται 3 τουλάχιστον ορίζοντες ανάδυσης, συνοδευόμενοι από ενδιαστρώσεις αργιλικών σχιστόλιθων, ψαμμίτων και χαλαζιακών κροκαλοπαγών, πάχους έως 60 μέτρων.

#### Παραυτόχθονη Ενότητα

#### i. Βασικοί Ψαμμίτες και Κροκαλοπαγή (Tr is)

Το ανώτερο μέρος, συμπεριλαμβάνει φαιότεφρους και πράσινους ψαμμίτες, που μεταβαίνουν προς τους υπερκείμενους ασβεστόλιθους της βάσης, με πάχος έως 50μ.

Το κατώτερο μέρος, αποτελείται από βασικά κροκαλοπαγή με ενδιαστρώσεις ψαμμιτών. Εντοπίζονται κροκάλες χαλαζίτη και λυδίτη, ενώ το πάχος δεν ξεπερνάει τα 50μ.

#### <u>ii. Δολομίτες (Tr i) Σκύθιο – Κατ. Ανίσιο</u>

Πρόκειται για συμπαγείς ασβεστόλιθους και δολομίτες, όχι καλά στρωματοποιημένους, ανοικτότεφρους ή και ροδόχρωους (εικόνα 2.7). Είναι ανακρυσταλλωμένοι, ενώ τοπικά εντοπίζονται ωόλιθοι και λατυποπαγή. Πλευρικά και κατακόρυφα, οι συμπαγείς ασβεστόλιθοι, μεταπίπτουν στους κατώτερους ασβεστόλιθους της βάσης. Οι έως πάνω συμπαγείς ασβεστόλιθοι μπλέκονται με τον καλά στρωματοποιημένο ασβεστόλιθο της φάσης Hallstatt. Το πάχος του σχηματισμού ανέρχεται στα 500μ.



Εικόνα 2.7: Δολομίτες (Tr i) Σκύθιο – Κατ. Ανίσιο

#### <u>iii. Πολύχρωμος σειρά – Κατώτερο μέρος (Tr m1)</u>

Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από έντονες εναλλαγές κλαστικών ιζημάτων, πυριτόλιθων, ραδιολαριτών, τεφρών και ερυθρών ασβεστόλιθων, τεφρών και πράσινων μαργών, αμμώδεις ψαμμίτες, κροκαλοπαγή με ογκόλιθους (έως διαμέτρου 1μ.) πετρωμάτων του Κατ. Τριαδικού και Παλαιοζωικού. Εμφανίζονται και παρεμβολές τοφφιτών, που το μέγιστο τους πάχος στην κεντρική Χίο είναι στα 100μ, ελλατούμενο προς Βορρά και Νότο.

#### iv. Πολύχρωμος σειρά – Ανώτερο μέρος (Tr m2)

Καλά στρωματοποιημένος τεφρός έως σκοτεινότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος, συχνά κονδυλώδης και με παρεμβολές μαργών (εικόνα 2.8). Το περιβάλλον ιζηματογένεσης του φαίνεται να είναι αβαθές νηρητικό και το πάχος του σχηματισμού να ξεπερνάει τα 100μ.



**Εικόνα 2.8**: Πολύχρωμος σειρά – Ανώτερο μέρος (*Tr m2*)



Εικόνα 2.9: Δολομίτες και Ασβεστόλιθοι (Tr m) Λαδίνιο

#### <u>ν. Δολομίτες και Ασβεστόλιθοι (Tr m) Λαδίνιο</u>

Πρόκειται για παχυστρωματώδεις, ανοιχτόχρωμοι και θραυσματογενείς με λεπτή στρώση και πάχος αρκετών εκατοντάδων μέτρων (εικόνα 2.9). Καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης.

#### <u>vi. Ασβεστόλιθοι (Tr m-S) Λαδίνιο – Κάρνιο</u>

Ανοιχτόχρωμοι με φύκη και πάχος έως 150μ. Εντοπίζεται στο βόρειο και βορειοανατολικό κομμάτι της περιοχής.

#### <u>Αλλόχθονη Ενότητα</u>

#### i. Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων (Ci)

Στην περιοχή εμφανίζεται επιφανειακά στο κεντρικό και δυτικό κομμάτι. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από γραουβάκες κόκκων ποικίλου μεγέθους, πράσινους ψαμμίτες, φαιοπράσινους έως υποπράσινους αργιλικούς σχιστόλιθους και λυδίτες (εικόνα 2.10). Στη Βόρεια Χίο, εμφανίζονται παρεμβολές κροκαλοπαγών και λατυποπαγών στο ανώτερο μέρος.



Εικόνα 2.10: Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων (Ci)

#### <u>ii. Ασβεστόλιθοι (C-pi) Λιθανθρακοφόρο – Κατ. Πέρμιο</u>

Χαρακτηρίζονται ως συμπαγείς και στρωματοποιημένοι, ανοικτότεφροι ως μεσότεφροι, και εν μέρει κονδυλώδεις. Για το Κ. Πέρμιο, το μέγιστο πάχος στη Β. Χίο είναι 30μ. ενώ για το Αν. Λιθανθρακοφόρο 70μ στη κεντρική Χίο. Στην περιοχή εντοπίζονται μικρές επιφανειακές εμφανίσεις.

#### <u>iii. Ασβεστόλιθοι (Pm) Μέσο Πέρμιο</u>

Είναι φαιοί, βιτουμενιούχοι, λεπτό-μεσοστρωματώδεις και απολιθωματοφόροι. Ενίοτε εντοπίζονται κίτρινες μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι. Μέγιστο πάχος του σχηματισμού είναι τα 60μ., ελαττωμένο νότια και δυτικά. Μικρή εξάπλωση στην περιοχή.

## iv. Κροκαλοπαγείς Ψαμμίτες και Ψαμμιτικοί Αργιλικοί Σχιστόλιθοι (*Jis*) Μέσο Πέρμιο

Χαρακτηρίζονται από ερυθρό χρωματισμό και εμφανίζονται επικαθήμενοι επικλυσιγενώς στα νέο-παλαιοζωικά πετρώματα, με πάχος έως 20μ. Μικρή εξάπλωση στην περιοχή.



Εικόνα 2.11: Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Ji) Λιάσιο

#### <u>ν. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Ji) Λιάσιο</u>

Πρόκειται για παχυστρωματώδεις ανθρακικούς σχηματισμούς, που πολλές φορές εντοπίζονται και λεπτοστρωματώδεις (εικόνα 2.11). Το πάχος τους ξεπερνά τα 300μ. Στην περιοχή μας καταλαμβάνουν κυρίως το νοτιοανατολικό κομμάτι, χωρίς να απουσιάζουν και από το κεντρικό και δυτικό.

#### <u>Τεταρτογενή</u>

#### i. Αλλούβια και παράκτιες αποθέσεις (Q al)

Καλύπτουν την παραυτόχθονη και αλλόχθονη ενότητα στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής, δημιουργώντας την κοιλάδα του Δελφινίου. Πάνω στο σχηματισμό αυτό πραγματοποιήθηκε το μεγαλύτερο μέρος της γεωφυσικής έρευνας στην περιοχή.

#### <u>ii. Πρόσφατα Πλευρικά Κορήματα (Qs)</u>

Μικρές εμφανίσεις.

#### 2.2.β. Περιοχή Κορακάρη

Πρόκειται για δύο τμήματα μιας ευρύτερης περιοχής ΒΔ του ασβεστολιθικού όγκου του Κορακάρη. Η περιοχή του Μεσοβουνίου (ανατολικά του Κεφαλοβουνίου), είναι ουσιαστικά μια μικρή ορεινή λεκάνη καλυμμένη από τεταρτογενείς αποθέσεις, ενώ η περιοχή της Αγ. Παρασκευής (δυτικά του Κεφαλοβουνίου) είναι μια περιοχή που καλύπτεται κυρίως από το Παλαιοζωικό, με μικρές ασβεστολιθικές εμφανίσεις. Πιο αναλυτικά η γεωλογία της περιοχής φαίνεται στην Εικόνα 2.12.

Στην περιοχή εντοπίζονται κάποια από τα πετρώματα που εμφανιζόταν στην προαναφερθείσα περιοχή Δελφινίου, γι' αυτό θα αναφερθούν απλά ονομαστικά.

#### <u>Αυτόχθονη Ενότητα</u>

#### <u>i. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Tr s-j) Κάρνιου – Ιουρασικού (βλ.§2.2.α.)</u>

Εμφανίζονται στο δυτικό τμήμα της περιοχής.

#### <u>ii. Κλαστικά πετρώματα Παλαιοζωικού (S-C) Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο</u>

Αποτελούνται κυρίως από γραουβάκες με παρεμβολές κροκαλοπαγών, σχιστόλιθων και πυριτόλιθων (εικόνα 2.13), ενώ το πάχος του μπορεί να ξεπεράσει



Εικόνα 2.12: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Κορακάρη, όπου απεικονίζεται και η τοπογραφία καθώς και οι υπάρχουσες πηγές (βλ. § 2.4.δ). Κλίμακα 1:7.500.

Υπόμνημα: Qs: Πλευρικά κορήματα, Qb: Λατυποπαγή, Mss: Σιδιρούχοι Ψαμμίτες, Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), C-pi: Ασβεστόλιθοι (Λιθανθρακοφόρο – Κ.Πέρμιο), Ci: Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων, Tr mj: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες, Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr m2: Ανώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό), S-C: Κλαστικά πετρώματα (Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο). τα 1.000μ. Καλύπτουν κυρίως το βόρειο κομμάτι της περιοχής, αλλά εμφανίζονται και δυτικά στην περιοχή της Αγ. Παρασκευής.



Εικόνα 2.13: Κλαστικά πετρώματα Παλαιοζωικού (S-C) Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο

## <u>Παραυτόχθονη Ενότητα</u>

<u>i. Δολομίτες (Tr i) Σκύθιο – Κατ. Ανίσιο (βλ. §2.2.α.)</u>

Περιορισμένες εμφανίσεις στο κεντρικό και ανατολικό μέρος της περιοχής.

ii. Πολύχρωμος σειρά – Κατώτερο μέρος (Tr m1) (βλ. §2.2.α.)

Εμφανίζεται στο κεντρικό και ανατολικό μέρος της περιοχής.

<u>iii. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Tr mj)</u>

Με ορίζοντες ανάδυσης, στα νοτιοανατολικά της περιοχής.

## <u>Αλλόχθονη Ενότητα</u>

i. Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων (Ci) (βλ. §2.2.α.)

Πολύ περιορισμένες εμφανίσεις στα δυτικά.

<u>ii. Ασβεστόλιθοι (C-pi) Λιθανθρακοφόρο – Κατ. Πέρμιο (βλ. §2.2.α.)</u>

Παρουσιάζονται στα δυτικά της περιοχής.

iii. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Ji) Λιάσιο (βλ. §2.2.α.)

Περιορισμένοι στα νοτιοανατολικά.

#### Νεογενή - Τεταρτογενή

i. Πρόσφατα Πλευρικά Κορήματα (Qs)

<u>ii. Λατυποπαγή (Qb)</u>

#### <u>iii. Σιδηρούχοι Ψαμμίτες (Mss)</u>

Εντοπίζονται σε μικρές επιφανειακές εμφανίσεις κυρίως στην περιοχή του Μεσοβουνίου και νότια της. Είναι υπόφαιοι έως ερυθροί, πλούσιοι σε ίλυ, ελαφρώς ανθρακούχοι και ενίοτε κροκαλοπαγείς. Εμφανίζονται και παρεμβολές ιλυωδών μαργών και το πάχος είναι περίπου 150μ.

#### 2.2.γ. Περιοχή Κατράρη

Πρόκειται για δύο τμήματα, μιας ευρύτερης περιοχής, ανάμεσα στα χωριά Βέσσα, Θολοποτάμι και Αρμόλια.. Η λεκάνη του Άνυδρου, είναι μια μικρή ορεινή λεκάνη ενώ η περιοχή του Κοντύλωπου είναι ουσιαστικά τμήμα της κοιλάδας του ποταμού Κατράρη. Πιο αναλυτικά η γεωλογία της περιοχής φαίνεται στην Εικόνα 2.14.

Στην περιοχή εντοπίζονται κάποια από τα πετρώματα που εμφανιζόταν στις προαναφερθείσες περιοχές, γι' αυτό θα αναφερθούν απλά ονομαστικά.

#### <u>Αυτόχθονη Ενότητα</u>

<u>i. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Tr s-j) Κάρνιου – Ιουρασικού (βλ. §2.2.α.)</u>

Καλύπτει μεγάλο μέρος της περιοχής γύρω από την κοιλάδα του Κατράρη.

<u>ii. Κλαστικά πετρώματα Παλαιοζωικού (S-C) Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο (βλ. §2.2.β.)</u>
 Μικρή εμφάνιση στα ανατολικά.


Εικόνα 2.14: Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Κατράρη, όπου απεικονίζεται και η τοπογραφία. Κλίμακα 1:7.500.

Υπόμνημα: Q al: Αλλόυβια & παράκτιες αποθέσεις, Qs: Πλευρικά κορήματα, Msc: Ποικίλα κροκαλοπαγή (Av. Μειόκαινο), Ms1: Ορίζοντας κισηρώδους τόφου (Av. Μειόκαινο), Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), Tr mj: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες, Tr m: Δολομίτες & Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο), Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr i1: Ασβεστόλιθοι βάσεως, Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό), S-C: Κλαστικά πετρώματα (Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο), Vo: Εκρηξιγενή.

# Παραυτόχθονη Ενότητα

# i. Ασβεστόλιθοι βάσεως (Tr i1)

Καλά στρωματοποιημένοι, τεφροί έως σκοτεινότεφροι πάχους έως 120μ. Στη βάση είναι μαργαικοί, ενώ παρατηρείται αμμούχος μετάβαση προς τα βασικά κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Άφθονα τα συγγενετικά κροκαλοπαγή και οι ψευδολιθικοί ασβεστόλιθοι εντός. Τοπικά παρεμβάλλονται παχιά δολομιτικά στρώματα. Καλύπτουν σημαντική επιφάνεια δυτικά του Κοντύλοπου.

ii. Δολομίτες (Tr i) Σκύθιο – Κατ. Ανίσιο (βλ. §2.2.α.)

Λιγοστές εμφανίσεις.

iii. Πολύχρωμος σειρά – Κατώτερο μέρος (Tr m1) (βλ. §2.2.α.)

Περιορισμένες εμφανίσεις στα δυτικά.

iv. Δολομίτες και Ασβεστόλιθοι (Tr m) Λαδίνιο (βλ. §2.2.α.)

Λιγοστές εμφανίσεις.

ν. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Tr mj) (βλ. §2.2.β.)

Καλύπτει όλη την περιοχή γύρω από τη λεκάνη του Άνυδρου.

# <u>Αλλόχθονη Ενότητα</u>

<u>i. Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες (Ji) Λιάσιο (βλ. §2.2.α.)</u>

Περιορισμένη εμφάνιση στα βορειοανατολικά.

#### Νεογενή - Τεταρτογενή

- i. Πρόσφατα Πλευρικά Κορήματα (Qs)
- <u>ii. Ορίζοντας ανοικτού χρώματος κισηρώδους τόφφου (Ms1) Αν. Μειόκαινο</u>

Μικρή εμφάνιση στα ανατολικά

iii. Ποικίλα κροκαλοπαγή (Msc) Αν. Μειόκαινο

Περιορισμένη εμφάνιση στα ανατολικά

# <u>Εκρηξιγενή</u>

<u>i. Σερπεντίνης (Vo)</u>

# 2.3 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Ο βασικότερος, ίσως, τεκτονισμός που εντοπίζεται στη νήσο της Χίου, είναι η επώθηση του τεκτονικού καλύμματος της αλλόχθονης ενότητας, πάνω στην αυτόχθονη. Αναφέρεται η κίνηση του από Βορρά προς Νότο, θεωρώντας ότι βρισκόταν κάπου μεταξύ Χίου και Λέσβου (*Besenecker et al., 1971*). Εξαιτίας αυτής της ολίσθησης κατά το Αν. Κρητιδικό, προκλήθηκε και η έντονη παραμόρφωση τμημάτων της αυτόχθονης ενότητας, που αναστράφηκαν σχεδόν πλήρως, δίνοντας την παραυτόχθονη ενότητα.

Πιο έντονα τεκτονισμένη φαίνεται να είναι η κατώτερη ενότητα της Χίου (αυτόχθονη) που μάλιστα στη βάση της εντοπίζονται και τα μεταμορφωμένα πετρώματα. Αμεταμόρφωτη και ηπιότερα τεκτονισμένη είναι η ανώτερη ενότητα.

#### <u>Αυτόχθονη ενότητα</u>

Οι <u>παλαιοζωικοί σχηματισμοί</u> (χαοτικό σύμπλεγμα ιζημάτων με ολισθόλιθους), φαίνεται να έχουν έντονη πτύχωση και μεγάλες διατμητικές ζώνες. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται άξονες πτυχώσεων κατεύθυνσης B-N και BBΔ-NNA, με αξονικά επίπεδα κατακόρυφα ή με κλίση προς ανατολικά. Οι πτυχές είναι σχεδόν ισοκλινείς με καλή πλακοειδή σχιστότητα.

Έντονη αναστάτωση των παράλληλων στρωμάτων παρατηρείται εξαιτίας της ύπαρξης παχιών διατμητικών ζωνών, κατεύθυνσης Β-Ν έως ΒΒΔ-ΝΝΑ. Από πάνω, επικάθονται πτυχώσεις τύπου V κατεύθυνσης Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ, ενώ πτυχώσεις κατεύθυνσης Α-Δ φαίνεται να επικρατούν στην επαφή με την ανώτερη ενότητα.

Αντιθέτως, μεταμόρφωση εξαιτίας του τεκτονισμού δεν εντοπίζεται σε μεγάλο βαθμό, με εξαίρεση ήπια πράσινο-σχιστολιθική φάση στην βορειοανατολική άκρη του νησιού και τις Οινούσσες.

Κατά τους Zanchi et al. (2003), ο έντονος τεκτονισμός των παλαιοζωικών πετρωμάτων, που προαναφέρθηκε, μπορεί να πραγματοποιήθηκε στη άκρη ενός προσαυξητικού πρίσματος (εικόνα 2.3), οδηγώντας στο σχηματισμό του τεκτονικού *mélange*. Έτσι, θεωρείται ότι η Χίος αντιπροσωπεύει το δυτικότερο κομμάτι της Παλαιοτηθύος, το όποιο 'απέφυγε' την σύγκρουση Γκοντβάνας - Λαυρασίας στο Λιθανθρακοφόρο, αλλά συγκέντρωσε θραυσματογενή ιζήματα από την Βαρύσκεια ορογένεση.

Το <u>Μεσοζωικό κομμάτι</u> της αυτόχθονης ενότητας, έχει αρκετά ηπιότερο τεκτονισμό, με πτυχώσεις κατεύθυνσης BA-NΔ, που κατά τον *Herget* (1968), μπορούν να συνδεθούν με την εξέλιξη της επώθησης σε ρηχή θάλασσα. Οι Besenecker et al. (1986), πρώτοι ανέφεραν ότι η Μεσοζωική σειρά της αυτόχθονης ενότητας επικάθεται στην παλαιοζωική σειρά μέσω γωνιώδους ασυμφωνίας, την οποία δεν είχαν εντοπίσει, μέχρι το 2003, που την εντόπισαν οι Zanchi et al.

#### <u>Αλλόχθονη ενότητα</u>

Στην ενότητα αυτή παρατηρούνται απομονωμένα 'klippen' μετατοπισμένα από κύρια ρήγματα, των οποίων η δράση συνδέεται με το άνοιγμα του Αιγαίου. Στο βορειανατολικό τμήμα του νησιού εντοπίζονται παράλληλες πτυχές τύπου V, κατεύθυνσης από Α-Δ έως ΑΝΑ-ΔΒΔ, κατά μήκος των μετώπων των κύριων ρηγμάτων. Δευτερεύουσες πτυχώσεις, παρατηρούνται στη Τριαδική σειρά, με κατεύθυνση και πάλι Α-Δ, ενώ ΒΑ-ΝΔ πτυχές, παλαιότερες της κίνησης του καλύμματος, εντοπίζονται στην ανεστραμμένη σειρά του Κατ. Τριαδικού στην περιοχή της Σκούκλας.

#### Νεοτεκτονική

Τα νεογενή είναι σε γενικές γραμμές απτύχωτα, αλλά υφίστανται μετακινήσεις κυρίως από κανονικά ρήγματα, διεύθυνσης ΔΒΔ έως ΒΔ, αλλά και κάθετα σε αυτά. Αυτά φαίνεται να επηρεάζουν και το παλαιοζωικό και θεωρείται ότι έχουν σχέση με την εν εξελίξει καταβύθιση του Αιγαίου. Θα πρέπει να αναφερθεί και η Ολιγο-Μειοκαινική ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Οι MUTTONI, KENT & GAETANI (1995), έπειτα από μαγνητο-στρωματογραφικές μελέτες στους σχηματισμούς του Κατ.-Μ. Τριαδικού στον λόφο του Μαραθοβουνίου, διαπίστωσαν έντονες αριστερόστροφες περιστροφές που υπολογίζονται περίπου στο Κατ.-Μ. Τριαδικό, το Αν. Κρητιδικό-Ηώκαινο αλλά και στο Νεογενές (Kondopoulou et al, 1993). Επίσης, διαπίστωσαν θαλάσσιο μαγνητο-στρωματογραφικό κενό από το Μ. Τριαδικό έως το Αν. Ανίσιο.

# 2.4 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

# 2.4.α. Γενικά υδρογεωλογικά στοιχεία

Εξαιτίας της διαφορετικής υδρογεωλογική συμπεριφοράς των πετρωμάτων, του έντονο τεκτονισμού (ρήγματα, πτυχές), που επιτρέπει την επικοινωνία υδροφόρων και υπόγειων ταμιευτήρων, αλλά και του έντονου ανάγλυφου της Χίου, εμφανίζονται ποικίλα υδρογεωλογικά φαινόμενα.

Λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τη λιθολογική τους σύσταση αλλά και τον τεκτονισμό τους, οι σχηματισμοί της περιοχής κατατάσσονται στις παρακάτω υδρογεωλογικές κατηγορίες:

#### <u> Υδατοστεγανοί – Αδιαπέρατοι σχηματισμοί</u>

Πετρώματα που περιέχουν κυρίως αργιλικά υλικά κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία. Πιο συγκεκριμένα, τέτοια πετρώματα είναι τα εξής:

- Γραουβάκες, αργιλικοί σχιστόλιθοι, χαλαζίτες και ψαμμίτες του Παλαιοζωικού.
- Ηφαίστειο-ιζηματογενή και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι 'πολύχρωμης σειράς' του
   Ανίσιου.
- Μάργες και αργιλικοί σχιστόλιθοι των 'οριζόντων ανάδυσης' του Κάρνιου.
- Γραουβάκες και αργιλικοί σχιστόλιθοι της βάσης της επώθησης του τεκτονικού καλύμματος.
- Αργιλοι και μάργες του Νεογενούς (κυρίως στη ΝΑ Χίο).

# Υδατοπερατοί σχηματισμοί πρωτογενούς πορώδους

Τέτοια πετρώματα είναι:

- Τα κροκαλοπαγή και οι ψαμμιτικοί ορίζοντες της βάσης του Παλαιοζωικού.
- Τα κροκαλοπαγή και οι ψαμμίτες της βάσης της Τριαδικής σειράς.
- Τα κροκαλοπαγή της πολύχρωμης σειράς.
- Οι ψαμμίτες και τα χαλαζιακά κροκαλοπαγή των 'οριζόντων ανάδυσης'.
- Οι ψαμμίτες και οι τόφφοι του Νεογενούς.
- Πλευρικά κορήματα και αλλούβια του Τεταρτογενούς.

#### <u>Υδατοπερατοί σχηματισμοί δευτερογενούς πορώδους</u>

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι και δολομίτες, καθώς και οι τεκτονισμένοι ηφαιστίτες.

#### <u>Υδρολογία</u>

Από στοιχεία των Μπάνος et al. (1995) προκύπτουν κάποια χρήσιμα στοιχεία για την υδρολογία της νήσου Χίου. Το μέσο ύψος των ετήσιων βροχοπτώσεων, από στοιχεία των ετών 1944-1994, είναι περίπου 680 χιλ./έτος. Δεδομένου ότι το νησί έχει συνολική επιφάνεια περίπου 840 χλμ<sup>2</sup>., προκύπτει ένας όγκος βροχόπτωσης 571.200.000 μ<sup>3</sup> / έτος. Από αυτόν τον όγκο, οι *Μπάνος et al.* (1995), υπολόγισαν ότι εξατμίζονται 228.448.000 μ<sup>3</sup> / έτος, απορρέουν στη θάλασσα 175 εκατομμύρια μ<sup>3</sup> / έτος και κατεισδύουν 165 εκατομμύρια μ<sup>3</sup> / έτος. Η δυνατότητα εκμετάλλευσης είναι 10-15% και 5-15% αντίστοιχα.

# 2.4.β. Υδρογεωλογικός διαχωρισμός του νησιού

Οι Ζεληλίδης & Αβραμίδης (2001), χώρισαν το νησί σε τρεις υδρογεωλογικές περιοχές (εικόνα 2.15), στηριζόμενοι στη στρωματογραφική διάρθρωση, την τεκτονική, τη γεωμορφολογία, την οικιστική ανάπτυξη και τις ανάγκες ύδρευσης & άρδευσης. Οι περιοχές αυτές είναι οι εξής:

### Περιοχή Α (ΒΔ Χίος)

Γεωλογικά στην περιοχή επικρατούν τα παλαιοζωικά πετρώματα, ηλικίας Σιλούριου – Πέρμιου. Έχει μικρή οικιστική ανάπτυξη, κυρίως ανάγκες άρδευσης και έντονα ανάγλυφα. Η ύδρευση πραγματοποιείται κυρίως μέσω των υπαρχουσών πηγών (κυρίως επαφής), που οφείλονται στις εναλλαγές κλαστικών αποθέσεων (υδροπερατών και μη) ή των ενδιαστρώσεων ανθρακικών πετρωμάτων και λιγοστών γεωτρήσεων

# Περιοχή Β (Δ-ΝΔ Χίος)

Στην περιοχή φαίνεται να επικρατούν τα Μεσοζωικά πετρώματα των δυο ενοτήτων και σε μικρότερη έκταση τα παλαιοζωικά, ενώ επικρατούν ρήγματα διεύθυνσης BA και ΝΔ. Χαρακτηρίζεται από μέτρια οικιστική ανάπτυξη, ομαλά ανάγλυφα και έντονη αγροτική δραστηριότητα. Τα ανθρακικά πετρώματα είναι έντονα καρστικοποιημένα, εντοπίζονται σημεία απορροής στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ οι υδρολογικές ανάγκες καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από την υδρογεωλογική λεκάνη Γ.

#### <u>Περιοχή Γ</u>

Η περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον και χωρίζεται από τους συγγραφείς σε τρεις υποπεριοχές.



Εικόνα 2.15: Γεωλογικός χάρτης Χίου, όπου διακρίνονται οι υδρογεωλογικές περιοχές που χωρίστηκε η νήσος κατά Ζεληλίδη & Αβραμίδη (2001).

#### Υποπεριοχή 1 (ΒΑ Χίος)

Γεωλογικά εντοπίζεται το κατώτερο κομμάτι της Μεσοζωικής ακολουθίας στα δυτικά της περιοχής αλλά και εμφανίσεις παλαιοζωικών πετρωμάτων. Η επαφή τους ρυθμίζεται από ρήγματα διεύθυνσης BBA, τα οποία διοχετεύουν μεγάλες ποσότητες νερού στην παράκτια ζώνη στα βόρεια του νησιού (Γιοσώνα & Νάγος). Μορφολογικά στο δυτικό της τμήμα το ανάγλυφο είναι έντονο σε αντίθεση με το ανατολικό τμήμα. Οικιστικά και αγροτικά δεν έχει ανάπτυξη ιδιαίτερη. Η ύδρευση & άρδευση γίνεται από πηγές (επαφής και υπερπλήρωσης) και γεωτρήσεις.

#### Υποπεριοχή 2 (Κ Χίος)

Στο κεντρικό τμήμα, κυριαρχούν οι κλαστικές αποθέσεις του Καινοζωικού και το ήπιο ανάγλυφο. Στο βόρειο τμήμα εμφανίζονται τα παλαιοζωικά πετρώματα, δυτικά το κατώτερο Μεσοζωικό, με ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ και ΒΑ και έντονο ανάγλυφο (π.χ. Μαραθόβουνο). Στις περιοχές Ανάβατου – Νέας Μονής, εντοπίζονται εκφορτίσεις λόγω των ενδιαστρώσεων των κλαστικών μέσα στα ανθρακικά. Εντός της υποπεριοχής αυτής, εντοπίζεται και η υπερ-εκμεταλλευμένη υδρογεωλογική λεκάνη του Κορακάρη (>80% ύδρευσης & >70% άρδευσης νησιού), ενός ανθρακικού όγκου μέσα στα κλαστικά. Επίσης σημαντική περιοχή είναι αυτή της Λαγκάδας – Παντουκιού – Βροντάδος, με αρκετές επιφανειακές εκφορτίσεις στην στάθμη της θάλασσας.

#### Υποπεριοχή 3 (ΝΑ Χίος)

Γεωλογικά επικρατούν τα Καινοζωικά ιζήματα, ενώ στο δυτικό τμήμα εμφανίζονται και Μεσοζωικά πετρώματα.. Κυριαρχούν τα ομαλά ανάγλυφα, η έντονη οικιστική και αγροτική ανάπτυξη και τα ρήγματα BA και ΝΔ διεύθυνσης. Η ύδρευση και άρδευση καλύπτεται κυρίως από την υδρογεωλογική λεκάνη της Καλαμωτής. Επιφανειακές εκφορτίσεις εντοπίζονται στον Αγ. Γεώργιο Συκούσης, στην επαφή ανθρακικών και κλαστικών.

#### 2.4.γ. Υδρογεωλογική λεκάνη Δελφινίου

Η δυναμικότητα της περιοχής του Παντουκιού - Δελφινίου (90 χλμ<sup>2</sup>), ανέρχεται στα 30 εκατομμύρια μ<sup>3</sup> / έτος. Η βάση του υδροφόρου πρέπει να αναπτύσσεται στην αυτόχθονη ενότητα η οποία φαίνεται να καλύπτεται από αδιαπέρατους σχηματισμούς της αλλόχθονης και παραυτόχθονης ενότητας, συνεισφέροντας έτσι στην προστασία του υδροφόρου, που εκφορτίζει σημαντικές ποσότητες νερού (~ 500.000 μ<sup>3</sup> / έτος) στην πηγή του Γιουβαρίου (SP3 – εικόνα 2.5). Η πηγή ρέει στην τομή του ρήγματος Κρικέλη (εικόνα 2.16), με το παχύ κάλυμμα αργίλου του Τεταρτογενούς στον πυθμένα του κολπίσκου της πηγής, σε μηδενικό απόλυτο υψόμετρο. Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης του Δελφινίου, εντοπίζονται δύο πηγές, κατά μήκος της τεκτονικής ζώνης της Μεσοράχης, σε υψόμετρα +2.6 και +0.9 μέτρα (εικόνα 2.5), με ετήσια παροχή περίπου 5 εκατομμύρια μ<sup>3</sup>.

Οι πηγές συνεισφέρουν στο δίκτυο ύδρευσης λόγω της καλής ποιότητας του νησιού, αλλά κατά τους θερινούς μήνες η παροχή πέφτει και παρατηρείται υφαλμύρυνση των πηγών. Ο μηχανισμός τροφοδότησης των πηγών αυτών δεν έχει καθοριστεί μέχρι τώρα αν και πιθανολογείται η τροφοδοσία από υπο-παράλληλα ρήγματα του Κρικέλη, που επηρεάζουν το υπόβαθρο του αυτόχθονου. Η είσοδος της θάλασσας φαίνεται να εμποδίζεται από τα αλλούβια αλλά και τα αδιαπέρατα του παραυτόχθονου. Ένας από τους σκοπούς της συγκεκριμένης μελέτης είναι να δοθεί απάντηση στο παραπάνω ερώτημα.

Στον κόλπο του Παντουκιού, το ρήγμα Τρία-Πέντε πηγάδια εκφορτίζει ποσότητες καρστικού νερού σε βάθος ~30 μέτρων.



Εικόνα 2.16: Υδρογεωλογική λεκάνη Δελφινίου και κύριες ρηξιγενείς ζώνες επιρροής της (Papadopoulos et al. 2008).



Εικόνα 2.17: Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής του Δελφινίου. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι υδατοπερατοί σχηματισμοί, με κόκκινο οι αδιαπέρατοι και με κίτρινο οι ημιπερατοί σχηματισμοί.

# 2.4.δ. Υδρογεωλογική ζώνη Κορακάρη

Η δυναμικότητα της περιοχής του Κορακάρη, ανέρχεται στα 4 εκατομμύρια μ<sup>3</sup> / έτος, αλλά λόγω της υπεράντλησης στην περιοχή του Κορακάρη (>80% ύδρευσης & >70% άρδευσης νησιού), έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση των περιεχόμενων χλωριόντων στις αντλούμενες γεωτρήσεις (από 100 ppm στα 1200 ppm), αλλά και του υδράργυρου. Η υπάρχουσα υδροφορία εντοπίζεται στο νότιο τμήμα του συγκεκριμένου ανθρακικού όγκου (Χαλκειός, Βασιλειόνικο) και οφείλεται σε ένα ρήγμα BBA διεύθυνσης σε συνάρτηση με κλίση των στρωμάτων προς ΝΑ. Στην Εικόνα 2.12 αποτυπώνονται και οι θέσεις μια ομάδας πηγών ΒΔ του Κορακάρη.

# 2.4.ε. Υδρογεωλογική ζώνη Κατράρη

Είναι μια εξίσου σημαντική υδρογεωλογική λεκάνη, στην οποία στο παρελθόν έχουν εμφανιστεί προβλήματα με υπάρχουσες γεωτρήσεις, με ιδιαίτερη μείωση της παροχής τους.



**Εικόνα 2.18**: Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής του Κορακάρη. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι υδατοπερατοί σχηματισμοί, με κόκκινο οι αδιαπέρατοι και με κίτρινο οι ημιπερατοί σχηματισμοί..



**Εικόνα 2.19**: Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής του Κατράρη. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι υδατοπερατοί σχηματισμοί, με κόκκινο οι αδιαπέρατοι και με κίτρινο οι ημιπερατοί σχηματισμοί..

# 3. ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Για να προσδιοριστούν οι υδρογεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες των περιοχών, είναι απαραίτητος ο σαφής καθορισμός του γεωλογικού περιβάλλοντος. Οι επιφανειακές γεωλογικές συνθήκες, έχουν αποτυπωθεί σε χάρτες, ενώ για τον καθορισμό των γεωλογικών συνθηκών βάθους πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα. Τμήμα της γεωφυσικής αυτής έρευνας, πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής διασκόπησης, διότι:

- το γεωλογικό περιβάλλον αναδεικνύει διαφοροποιήσεις στις ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται,
- οι γεωμορφολογικές συνθήκες και η έκταση του πεδίου, απαιτούν μια ευέλικτη και γρήγορη μέθοδο,
- απαιτείτο δυνατότητα επιτόπου ποιοτικού ελέγχου των μετρήσεων και
- η δαπάνη των εργασιών υπαίθρου, σε σχέση με την έκταση της περιοχής, είναι σχετικά μικρή.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά εικοσιοκτώ (28) γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις, μέγιστου ημι-αναπτύγματος ηλεκτροδίων ρεύματος AB/2 = 316μ., και τρεις (3) 'επί τόπου' (in situ) μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε επιφανειακές εμφανίσεις των γεωλογικών σχηματισμών, προκειμένου να αξιολογηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα αποτελέσματα των διασκοπήσεων.

Οι θέσεις των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων, επελέγησαν έτσι ώστε να παρέχουν την πληρέστερη κάλυψη της περιοχής, όσο αυτό ήταν δυνατό από την έντονη φυτοκάλυψη και προσπελασιμότητα. Από την επεξεργασία των μετρήσεων, κατέστη δυνατή η μελέτη της κατανομής της ειδικής αντίστασης τόσο με το βάθος όσο και πλευρικά, με σκοπό τη συγκέντρωση πληροφοριών για το πάχος, τη λιθολογία και τη φύση των γεωλογικών σχηματισμών, τα οποία θα αναδείξουν τις υπεδαφικές συνθήκες και θα συμπληρώσουν τη γεωλογική γνώση για τον καθορισμό των υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών.

# 3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

<u>Γεωηλεκτρική βαθοσκόπηση</u> (ή βυθοσκόπηση ή βαθομέτρηση ή βυθομέτρηση), ονομάζεται η διαδικασία της κατακόρυφης διερεύνησης της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, κατατάσσεται στην κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων που χρησιμοποιούν τεχνητή πηγή. Ειδικότερα, η τεχνική της βασίζεται στη διέλευση ελεγχόμενου συνεχούς ρεύματος ή εναλλασσόμενου, χαμηλής συχνότητας (μικρότερης των 5 Hz), μέσω δυο μεταλλικών πασσάλων (ηλεκτρόδια ρεύματος) και την ταυτόχρονη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μέσω δύο άλλων μεταλλικών πασσάλων (ηλεκτρόδια δυναμικού). Στηριζόμενοι στο ότι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υπεδαφικών στρωμάτων που διαρρέει το ρεύμα, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ειδική αντίσταση, χρησιμοποιώντας την ωμική αντίσταση.

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορους σκοπούς, όπως ο προσδιορισμός του καλύμματος των μεταλπικών ιζημάτων, ο προσδιορισμός τεκτονικών ζωνών, ο προσδιορισμός υδροφόρων οριζόντων καθώς και της διαφοροποίησης γλυκού και αλμυρού νερού (μέτωπα υφαλμύρυνσης), κ.ά. εφαρμογών.

Η ειδική αντίσταση των γεωλογικών υλικών εξαρτάται από:

Το πορώδες, αφού έλλειψη πόρων σημαίνει συμπαγείς σχηματισμοί, που έχουν υψηλή ειδική αντίσταση.

Την περιεκτικότητα σε νερό, όπου σχηματισμοί με έλλειψη νερού στους πόρους έχουν υψηλή ειδική αντίσταση, σε αντίθεση με τους διαποτισμένους.

Την ποιότητα του νερού, όπου σχηματισμός διαποτισμένος με αλμυρό νερό (ιόντα αλάτων), παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική αντίσταση από τον αντίστοιχο με γλυκό νερό.

Την περιεκτικότητα σε αργίλους, γιατί η παρουσία αργιλικών ορυκτών ελαττώνει την ειδική αντίσταση (περιέχουν νερό και ελεύθερα ιόντα).

Τη *θερμοκρασία*, με το παγωμένο έδαφος να έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από το έδαφος που βρίσκεται σε κανονική θερμοκρασία.

#### 3.1.α Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί, στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς, με τρεις τρόπους: ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά. Ο πρώτος τρόπος (ηλεκτρονικά) είναι και ο πλέον συνηθισμένος σε υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα. Ηλεκτρολυτικά, το ρεύμα μεταφέρεται από τα ιόντα, τα οποία όμως μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. Τέλος, διηλεκτρικά μεταδίδεται το ρεύμα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές, στους οποίους οι ελεύθεροι φορείς είναι ελάχιστοι έως και μηδενικοί. Γενικά σε γεωλογικά περιβάλλοντα, ο τρόπος διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος είναι εκείνος της <u>ηλεκτρονικής – ωμικής μετάδοσης</u>.

Σε έναν κυλινδρικό αγωγό μήκους *L*, διατομής *A*, που παρουσιάζει ωμική αντίσταση *R*, εάν εφαρμοστεί συνεχή διαφορά δυναμικού Δ*V*, προκαλώντας συνεχή ροή ρεύματος έντασης *I*, η *ωμική του αντίσταση*, από το γνωστό νόμο του Ohm, θα δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \qquad (3.1)$$

Η <u>ηλεκτρική ειδική αντίσταση, ρ</u>, του υλικού, είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του, που μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

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

όπου A σε  $\mu^2$ , L σε  $\mu$ . και η ειδική αντίσταση υπολογίζεται σε μονάδες Ohm.m. Η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο μέγεθος της ειδικής αντίστασης.

## 3.1.β Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Στην εικόνα 3.1 φαίνεται η γεωμετρία μιας γεωηλεκτρικής διάταξης, που αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια ρεύματος ( $C_1$  και  $C_2$ ) και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού ( $P_1$  και  $P_2$ ).



Εικόνα 3.1: Γεωηλεκτρική διάταξη, με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυο ηλεκτρόδια δυναμικού, στην επιφάνεια ομογενούς και ισοτροπικού εδάφους ειδικής αντίστασης ρ (*Telford et al, 1990*).

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων  $P_1$  και  $P_2$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]$$
(3.3)

Επιλύοντας τη σχέση αυτή, ως προς  $\rho$ , έχουμε τη σχέση:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} = \left(\frac{2\pi\Delta V}{I}\right)k$$
(3.4)

στον οποίο ο παράγοντας k εξαρτάται από την γεωμετρία της διάταξης και δίδεται από τη σχέση:

$$k = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]}$$
(3.5)

Από τις παραπάνω σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της διάταξης (αποστάσεις ηλεκτροδίων), μπορεί να υπολογιστεί η ειδική αντίσταση, *ρ*.

Αν πρόκειται για ένα μέσο ομογενές, ισότροπο και απείρου βάθους, η τιμή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης,  $\rho$ , θα είναι σταθερή, ανεξάρτητα της τιμής του γεωμετρικού παράγοντα k. Αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ένταση του παρεχόμενου ρεύματος, αν μεταβληθεί η γεωμετρία της διάταξης θα πρέπει να μεταβληθεί ο λόγος  $k\frac{\Delta V}{I}$ , ώστε να παραμένει πάντα σταθερός και η τιμή  $\rho$  πάντα ίδια. Στην περίπτωση όμως, πολλών στρωματοποιημένων, οριζοντίων και ομογενών μέσων, ο λόγος αυτός θα μεταβάλλεται με αποτέλεσμα τη λήψη διαφορετικών τιμών ειδικής αντίστασης,  $\rho$ , σε κάθε θέση των ηλεκτροδίων, λόγω της παραμόρφωσης των γραμμών ροής ρεύματος και των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιείται ο όρος <u>φαινόμενη ειδική αντίσταση</u>,  $\rho_{\alpha_3}$  ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{2\pi\Delta V}{I}k \qquad (3.6)$$

Έτσι, η  $\rho_{\alpha}$  θα ισούται με την ειδική αντίσταση του ανώτερου σχηματισμού,  $\rho_{1}$ , όταν η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι μικρή σχετικά με το πάχος του, όπου το ποσοστό του ρεύματος που διέρχεται στο κατώτερο στρώμα είναι το ελάχιστο δυνατό. Σε μεγάλες όμως αποστάσεις ηλεκτροδίων, συγκριτικά με το πάχος του πρώτου σχηματισμού, η φαινόμενη ειδική αντίσταση πλησιάζει την πραγματική ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος,  $\rho_{2}$ , αφού σε αυτή την περίπτωση η διερχόμενη ποσότητα ρεύματος από το ανώτερο στρώμα είναι ελάχιστη.



Απόσταση ηλεκτροδίων ρεύματος L

Εικόνα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με την απόσταση των ηλεκτροδίων, για περίπτωση δύο οριζοντίων στρωμάτων (Dobrin, Savit, 1988).

#### 3.1.γ Γεωηλεκτρικές παράμετροι

Ένας σημαντικός παράγοντας στις μεθόδους προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης είναι η ανισοτροπία του υλικού στις διάφορες διευθύνσεις, κάτι σύνηθες στα στρωματοποιημένα πετρώματα, τα οποία είναι περισσότερο αγώγιμα παράλληλα προς τη στρώση τους παρά κάθετα προς αυτήν. Γι' αυτό ορίζεται ο συντελεστής ανισοτροπίας  $\lambda$ , που είναι ο λόγος της μέγιστης ειδικής αντίστασης,  $\rho_t$ , προς την ελάχιστη,  $\rho_L$ , η οποία κυμαίνεται κατά μέσο όρο μεταξύ 1-1,2. Φυσικά όταν πρόκειται για ισότροπο μέσο, θα είναι  $\lambda$ =1.

Η σχέση που αναδεικνύει την ανισοτροπία ενός σχηματισμού είναι:  $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}}$  (3.7).

Γνωρίζοντας ότι ένα γεωηλεκτρικό στρώμα προσδιορίζεται από δυο θεμελιώδεις παραμέτρους, την ειδική αντίσταση, ρ, και το πάχος, h, θα πρέπει να αναφερθούν οι <u>γεωηλεκτρικές παράμετροι</u>, που είναι:

- Η διαμήκης αγωγιμότητα, S=h/ρ
- Η εγκάρσια αντίσταση, T=h.p
- Η διαμήκης ειδική αντίσταση, ρ<sub>L</sub>=h/S
- Η εγκάρσια ειδική αντίσταση, ρ<sub>t</sub>=T/h

Όταν πρόκειται για συνθήκες ν στρωμάτων, τα παραπάνω υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$S = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_{\nu}}{\rho_{\nu}}$$
(3.8)  
$$T = \sum_{i=1}^{\nu} h_i \cdot \rho_i = h_1 \cdot \rho_1 + h_2 \cdot \rho_2 + \dots + h_{\nu} \cdot \rho_{\nu}$$
(3.9)  
$$\rho_L = \frac{H}{S} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} h_i}{\sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i}}$$
(3.10)  
$$\rho_t = \frac{T}{H} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} h_i \rho_i}{\sum_{i=1}^{\nu} h_i}$$
(3.11)  
$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}} = \frac{\sqrt{TS}}{H}$$
(3.12)

## 3.1.δ Διάταζη Schlumberger

Η διάταξη που προτείνει ο Schlumberger (εικόνα 3.3), είναι ευρέως διαδεδομένη στη γεωηλεκτρική έρευνα της κατακόρυφης μεταβολής της ειδικής αντίστασης. Τα τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε μια ευθεία γραμμή, πάνω στην οποία μετακινούνται καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.



Εικόνα 3.3: Διάταξη Schlumberger

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού είναι συμμετρικά τοποθετημένα, ως προς το σημειακό κέντρο της διάταξης. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πρέπει η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού MN (P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>) να είναι μικρότερη του 40% της ημι-απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, AB/2 (C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>/2), για τη διατήρηση του θορύβου σε χαμηλά επίπεδα (signal to ratio).

Στηριζόμενοι στους γενικούς τύπους για τον υπολογισμό του γεωμετρικού παράγοντα, k, και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης,  $\rho_{\alpha}$  (βλ. §1.2), προκύπτουν οι εξής τύποι για τη διάταξη Schlumberger:

$$k = \frac{L^2 - l^2}{4l}$$
 για το γεωμετρικό παράγοντα k (3.13)  

$$\rho_{\alpha} = \pi \frac{L^2 - l^2}{4l} \frac{\Delta V}{I}$$
 για τη φαινόμενη ειδική αντίσταση (3.14)

#### 3.1.ε Βάθος έρευνας

Το βάθος έρευνας κατά τη διάρκεια μιας γεωηλεκτρικής διασκόπησης, εξαρτάται από το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος. Το ρεύμα ακολουθεί τοξοειδείς διαδρομές μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων ρεύματος και αν πρόκειται για ένα ομογενές στρώμα, τουλάχιστον το 50% του ηλεκτρικού ρεύματος, ρέει σε ένα βάθος μικρότερου της απόστασης των ηλεκτροδίων (AB). Με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος διείσδυσης (Z) του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος, οπότε και το βάθος διερεύνησης (εικόνα 3.4). Η απόσταση AB, πρέπει να είναι πάντα τέτοια, ώστε να μπορεί να κλείνει το κύκλωμα του ρεύματος, δηλαδή εξαρτάται από τη δυνατότητα παροχής ρεύματος της πηγής και τη διακριτική ικανότητα του οργάνου μέτρησης που χρησιμοποιείται.

Αναφέρεται ότι εμπειρικά και ειδικά για τις γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις με τη διάταξη Schlumberger, βάθος διερεύνησης, το θεωρείται ίσο με το 1/4 - 1/5απόστασης της AB των ηλεκτροδίων ρεύματος.



Εικόνα 3.4: Αναλογία ρεύματος που ρέει σε βάθος Ζ (σε μέτρα), όπου L η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος (*Telford et al, 1990*).

# 3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι μετρήσεις των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων με τη διάταξη Schlumberger, προβάλλονται γραφικά σε ένα δι-λογαριθμικό διάγραμμα. Οι τιμές του ημι-αναπτύγματος AB/2 των ηλεκτροδίων ρεύματος, τοποθετούνται στον οριζόντιο άξονα, ενώ οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που έχουν καταγραφεί σε κάθε ημι-ανάπτυγμα, τοποθετούνται στον κατακόρυφο άξονα. Έτσι, προκύπτουν οι <u>γεωηλεκτρικές καμπύλες</u> φαινόμενης ειδικής αντίστασης ( $\rho_{\alpha}=f(AB/2)$ ) (εικόνα 3.5).



S12

Εικόνα 3.5: Διάγραμμα απεικόνισης των στοιχείων γεωηλεκτρικής βαθοσκόπησης.

Τα πλεονεκτήματα της προβολής των στοιχείων σε διλογαριθμική κλίμακα, είναι:

Διευκόλυνση της σύγκρισης των καμπύλων υπαίθρου, με τις αντίστοιχες θεωρητικές της επεξεργασίας και ερμηνείας.

Όταν υπάρχει μεταβολή των τιμών της ειδικής αντίστασης και του πάχους, αλλά οι λόγοι  $\rho_i/\rho_1$  και  $h_i/h_1$  (i=2,3,..,v) παραμένουν σταθεροί, η καμπύλη θα μετατοπίζεται κατακόρυφα, για μεταβολή της ειδικής αντίστασης και οριζόντια, για μεταβολή του βάθους. Οπότε, δύο καμπύλες με διαφορετικές τιμές  $\rho$  και h, αλλά με ίσους λόγους, μπορούν να ταυτιστούν αν μετατοπιστεί η μια πάνω στην άλλη.

Μείωση της επίδρασης της μεταβολής του πάχους των στρωμάτων για μεγάλα βάθη και της μεταβολής των υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης. Επίσης, ενισχύεται η μεταβολή του

πάχους των στρωμάτων για μικρά βάθη και η μεταβολή των χαμηλών τιμών ειδικής αντίστασης.

Το μεγάλο φάσμα τιμών ειδικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και τα μεγάλα αναπτύγματα ηλεκτροδίων ρεύματος, που απαιτούνται για τη διερεύνηση μεγάλων βαθών.

Η μονοσήμαντη ποιοτική και ποσοτική ερμηνεία μιας γεωηλεκτρικής βαθοσκόπησης, είναι πολύ σπάνια και γι' αυτό το λόγο πρέπει να γίνεται σύγκριση των κοινών χαρακτηριστικών, γειτονικών γεωηλεκτρικών βαθομετρήσεων, σε συνδυασμό με την κατασκευή γεωηλεκτρικών τομών και χαρτών που περιορίζουν τις επιλογές ερμηνείας.

Στις γεωηλεκτρικές καμπύλες, πολλές φορές, παρουσιάζονται φαινόμενα που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής. Ένα τέτοιο φαινόμενο, είναι η εμφάνιση ενός ή περισσοτέρων 'κεράτων' (cusps) (εικόνα 3.6α). Πρόκειται για υψίσυχνη ανωμαλία







Εικόνα 3.6β: Παράδειγμα ασυνεχούς γεωηλεκτρικής καμπύλης και διαδικασία επαναφοράς (Zohdy, 1974).

της γεωηλεκτρικής καμπύλης και μπορεί να οφείλεται είτε σε τοπική γεωλογική ανομοιογένεια, είτε σε μεγάλη αντίσταση επαφής ή ακόμα και σε λανθασμένη μέτρηση. Αυτή η ανωμαλία, συνήθως αντιμετωπίζεται με εξομάλυνση της καμπύλης. Επιπλέον, ίσως εντοπίζονται κατακόρυφες παράλληλες μετατοπίσεις ενός τμήματος της καμπύλης σε σχέση με το υπόλοιπο (εικόνα 3.6β), κάτι που υποδηλώνει πιθανή πλευρική ανομοιογένεια ευρείας κλίμακας, η οποία τοποθετείται μετά από αυτή τη μετατόπιση. Μπορεί να οφείλεται ακόμη και σε διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από κατακόρυφο ρήγμα, που βρίσκεται περίπου στο σημείο που ξεκινά η παράλληλη μετατόπιση.

#### 3.2.α Ποιοτική παρουσίαση και ερμηνεία γεωηλεκτρικων δεδομένων.

Προκειμένου να ελεγχθεί η πλευρική ανομοιογένεια των γεωλογικών σχηματισμών μιας περιοχής, κατασκευάζονται τομές και χάρτες (ή οριζοντιογραφίες) κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των απεικονίσεων, είναι ότι χρησιμοποιούνται τα πρωτογενή δεδομένα των μετρήσεων, χωρίς την επέμβαση κάποιου αλγορίθμου ποσοτικής ερμηνείας, αποδίδοντας έτσι μια καλύτερη εικόνα της στρωματογραφικής δομής της περιοχής.

Αναφερόμενοι στις τομές, αν προκύψουν σχεδόν οριζόντιες και παράλληλες ισότιμες καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.7), καταδεικνύεται μια πιθανά οριζόντια στρωματοποιημένη δομή, ενώ αν στην τομή υπάρχει απότομη βύθιση των ισότιμων καμπύλων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.8), αναμένεται πιθανή πλευρική ανομοιογένεια στην περιοχή αυτή, όπως για παράδειγμα μια ρηξιγενής ζώνη. Έτσι, αντλείται μια πρώτη εκτίμηση της γεωλογικής δομής.

Για να <u>κατασκευαστούν οι τομές κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης</u>, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται, σε γραμμική κλίμακα, οι θέσεις των συνευθειακών κέντρων διάταξης (ΚΔ) των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων της τομής.
- Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετούνται, σε γραμμική κλίμακα, οι υπολογισθείσες
   τιμές των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων, σε σχέση με τις ημι-αποστάσεις των
   ηλεκτροδίων ρεύματος (AB/2).
- Στη συνέχεια, χαράσσονται οι ισότιμες καμπύλες ρ<sub>a</sub>, σκιαγραφώντας έτσι την κατανομή της ρ<sub>a</sub> (ψευδό-βάθος).

Να σημειωθεί ότι το τοπογραφικό ανάγλυφο, δεν λαμβάνεται υπόψη στις τομές κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, αφού έτσι κι αλλιώς το ανάγλυφο θεωρείται ομαλό, ενώ χρησιμοποιείται η γραμμική κλίμακα για μεγαλύτερη λεπτομέρεια της κατανομής της  $\rho_{\alpha}$ , αντί για τη λογαριθμική. Το AB/2 να σημειωθεί ότι δεν πρέπει να συγχέεται με το βάθος.



#### ΤΟΜΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Εικόνα 3.7: Τομή κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που υποδηλώνει σχεδόν οριζόντια στρωματοποιημένη δομή.



#### ΤΟΜΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Εικόνα 3.8: Τομή κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που υποδηλώνει πλευρική ανομοιογένεια (μεταξύ των θέσεων S13 και S12).

Οι χάρτες απεικονίζουν την κατανομή της  $\rho_{\alpha}$  για διαφορετικά ημι-αναπτύγματα ηλεκτροδίων ρεύματος, θεωρώντας την επιφάνεια επίπεδη. Παραθέτοντας κατακόρυφα και παράλληλα τους χάρτες για τα αυξανόμενα ημι-αναπτύγματα, διαμορφώνεται μια ψευδό-απεικόνιση της κατανομής της  $\rho_{\alpha}$  σε τρεις διαστάσεις. Να σημειωθεί ότι ο χάρτης, για ένα συγκεκριμένο ημι-ανάπτυγμα, δεν δίνει πληροφορίες για το αντίστοιχο βάθος.

Για να κατασκευαστεί ένας <u>χάρτης (ή οριζοντιογραφία) κατανομής της φαινόμενης</u> ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.9), ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Τοποθετούνται οι θέσεις των κέντρων διάταξης (ΚΔ) των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων, βάσει των συντεταγμένων τους, έχοντας στον οριζόντιο άξονα τις συντεταγμένες X και στον κατακόρυφο τις συντεταγμένες Y.
- Τοποθετούνται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης όλων των βυθοσκοπήσεων,
   για το συγκεκριμένο ημι-ανάπτυγμα AB/2 του κάθε χάρτη.
- Χαράσσονται, βάσει των προηγούμενων σημείων, οι ισότιμες καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης στον κάθε χάρτη.
- Τέλος, για την αίσθηση της ψευδό-3D απεικόνισης, που επιθυμείται, τοποθετούνται οι οριζοντιογραφίες, με αυξανόμενο ημι-ανάπτυγμα από πάνω προς τα κάτω, με σκοπό την παρουσίαση του ψευδό-βάθους.



ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΑΒ/2=10μ.

Εικόνα 3.9: Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, για ημι-ανάπτυγμα AB/2=10μ.

Όλες οι τομές και οι χάρτες κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στην παρούσα εργασία, κατασκευάστηκαν με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος <u>Surfer</u> (*Golden Software*) και ως μέθοδος χάραξης των ισότιμων καμπύλων επελέγη η μέθοδος kriging, που χρησιμοποιείται σε τέτοιες εφαρμογές (*Αλεξόπουλος I., 1998*).

Η μέθοδος kriging, χρησιμοποιήθηκε για την προβολή της χωρικής κατανομής και συνέχειας των γεωηλεκτρικών παραμέτρων. Είναι μια γεωστατιστική μέθοδος, που αναφέρεται στη στατιστική επεξεργασία μεταβλητών που παρουσιάζουν συνέχεια από

σημείο σε σημείο. Εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας το κανονικοποιημένο άθροισμα των σημείων μιας ζώνης επιρροής, βάσει συντελεστών βαρύτητας.

Η μέθοδος kriging λαμβάνει υπόψη κατά την εφαρμογή της, τρεις παραμέτρους:

- την απόσταση,
- την ομαδοποίηση και
- τη χωρική συσχέτιση, καθοριζόμενη από συντελεστές.

Όλες αυτές οι διαδικασίες στηρίζονται σε πολύπλοκες εξισώσεις, που αποσκοπούν στην καλύτερη δυνατή χάραξη των ισότιμων καμπύλων.

# 3.2.β Ποσοτική ερμηνεία

Μετά την ποιοτική ερμηνεία, ακολουθεί η ποσοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων, με τη <u>χρήση υπολογιστικών μεθόδων, γραφικών και ηλεκτρονικών</u>. Μέσω αυτής της ποσοτικοποίησης, παίρνουμε μονοδιάστατα, διδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, που ικανοποιούν τις μετρήσεις υπαίθρου. Σε ένα <u>μονοδιάστατο γεωηλεκτρικό</u> μοντέλο, το οποίο ουσιαστικά αποτελείται από το πάχος και την τιμή της (πραγματικής) ειδικής αντίστασης των γεωηλεκτρικών στρωμάτων τα οποία διερευνάει κάθε βαθοσκόπηση, θεωρείται ότι η ειδική αντίσταση δεν μεταβάλλεται απότομα πλευρικά.

Στην παρούσα εργασία, η ποσοτική ερμηνεία πραγματοποιήθηκε με τους εξής τρόπους:

Γραφικά, με τη μέθοδο του βοηθητικού σημείου και τη χρήση των πρότυπων καμπύλων δυο στρωμάτων και των βοηθητικών καμπύλων των Orellana & Mooney (1966) και

Ηλεκτρονικά, με τη χρήση τεσσάρων διαφορετικών λογισμικών, διαφορετικής λογικής ποσοτικοποίησης, του SCHLINV (Merrick, 1977), του ATO (Zohdy & Bisdorf, 1989), του WinSev 6.1 της Geosoft και του IX1D v.3 της Interprex, που αναλύονται παρακάτω.

# <u>3.2.α.1 Γραφική μέθοδος ποσοτικής ερμηνείας</u>

Η γραφική μέθοδος της ποσοτικής ερμηνεία, γίνεται με τη χρήση των πρότυπων καμπύλων δυο στρωμάτων (εικόνα 3.10) και των τεσσάρων βοηθητικών καμπύλων των *Orellana & Mooney* (εικόνες 3.11-3.14).



Εικόνα 3.10: Πρότυπες καμπύλες δύο στρωμάτων (Orellana & Mooney, 1966)

Αρχικά, γίνεται προσπάθεια ανάλυσης του πρώτου, αριστερού τμήματος της καμπύλης υπαίθρου, που έχει χαραχθεί σε διλογαριθμικό χαρτί. Τοποθετώντας το διαφανές διλογαριθμικό χαρτί, πάνω στις πρότυπες καμπύλες δυο στρωμάτων και μετακινώντας το πάνω-κάτω και αριστερά-δεξιά (διατηρώντας τη παραλληλία των αξόνων), γίνεται προσπάθεια ταύτισης της καμπύλης με κάποια από τις πρότυπες καμπύλες δυο στρωμάτων. Μετά την ταύτιση, σημειώνεται η θέση του πρώτου σταυρού και ο αριθμός  $\lambda_1$ . Από την προβολή του σταυρού, μπορεί να υπολογισθεί η ειδική αντίσταση,  $\rho_1$ , του πρώτου στρώματος και από την τεταγμένη του, το πάχος,  $h_1$ , του. Επίσης, υπολογίζεται και η ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος,  $\rho_2$ , από τη σχέση  $\rho_2 = \lambda_1 * \rho_1$ .

Εάν η γεωηλεκτρική καμπύλη υπαίθρου αποτυπώνει τρία ή περισσότερα στρώματα, η ερμηνεία της συνεχίζεται με την επιλογή και χρήση της κατάλληλης βοηθητικής καμπύλης (εικόνες 3.11-3.14). Στην περίπτωση, που για τις ειδικές αντιστάσεις των τριών στρωμάτων ισχύει  $\rho_{1>}$   $\rho_{2<}$   $\rho_{3}$ , θα χρησιμοποιηθεί η καμπύλη <u>τύπου Η</u> (εικόνα 3.11), συνδυάζοντας τα δυο πρώτα στρώματα σε ένα ισοδύναμο (φανταστικό). Αυτό, επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι το ρεύμα ρέει στα δυο επιφανειακά στρώματα παράλληλα

προς τη στρώση τους. Αν ισχύει η σχέση ρ1< ρ2< ρ3, θα χρησιμοποιηθεί η καμπύλη τύπου A (εικόνα 3.12), όπου το ισοδύναμο στρώμα είναι παχύτερο του συνδυασμού των δυο στρωμάτων, λόγω του συντελεστή ανισοτροπίας. Εάν ισχύει ρ1< ρ2> ρ3, θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος K (εικόνα 3.13), όπου το ισοδύναμο στρώμα έχει εκτιμηθεί ότι είναι παχύτερο από το άθροισμα των δύο επιφανειακών. Τέλος, για την περίπτωση όπου ρ1> ρ2> ρ3, υπάρχει ο τύπος Q (εικόνα 3.14) με το ισοδύναμο στρώμα να εκτιμάται ότι είναι μικρότερο των δύο συμβαλλόμενων στρωμάτων.



Εικόνα 3.11: Βοηθητική καμπύλη τύπου Η.



Εικόνα 3.13: Βοηθητική καμπύλη τύπου Κ.



Εικόνα 3.12: Βοηθητική καμπύλη τύπου Α.



Εικόνα 3.14: Βοηθητική καμπύλη τύπου Q.

Αφότου επιλεγεί κατά περίπτωση η αντίστοιχη βοηθητική καμπύλη, τοποθετείται η καμπύλη υπαίθρου πάνω στη βοηθητική, έτσι ώστε ο πρώτος σταυρός (λ1) να βρίσκεται στην αρχή των αξόνων, για τους τύπους Q και Η ή στον κατακόρυφο άξονα στην

αντίστοιχη τιμή, λ<sub>1</sub>, για τους τύπους Α και Κ. Με διακεκομμένη γραμμή χαράσσεται η βοηθητική καμπύλη για το συγκεκριμένο λ<sub>1</sub>.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η ταύτιση του τμήματος του τρίτου στρώματος της καμπύλης, με τις πρότυπες καμπύλες δυο στρωμάτων, όπως και στην πρώτη φάση (μετακινώντας παράλληλα προς τους άξονες), αλλά αυτή τη φορά μετακινώντας τη διακεκομμένη βοηθητική γραμμή πάνω στο σταυρό των πρότυπων καμπύλων. Μόλις ταυτιστεί και αυτό το τμήμα, χαράσσεται ο δεύτερος σταυρός, του οποίου οι προβολές στους άξονες μας δίνουν τα  $p_f$  και  $h_f$  του ισοδύναμου στρώματος. Από τη σχέση  $p_3 = \lambda_2 * p_f$  υπολογίζεται το  $p_3$ .

Επιστρέφοντας στη βοηθητική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε και τοποθετώντας τον πρώτο σταυρό στη σωστή θέση, από τη θέση του δεύτερου σταυρού και με τη βοήθεια των κάθετων (τύποι Η, Q) ή παραβολικών γραμμών (τύποι Α, Κ) της αντίστοιχης βοηθητικής καμπύλης, υπολογίζουμε το μ<sub>1</sub>. Από τη σχέση  $\mu_1 = h_2 / h_1 \Rightarrow h_2 = \mu_1 . h_1$ , υπολογίζεται το πάχος του δεύτερου στρώματος. Με την ίδια λογική και τις ίδιες διαδικασίες, συνεχίζεται η ερμηνεία της καμπύλης, αν αποτελείται από τέσσερα ή και παραπάνω γεωηλεκτρικά στρώματα.

Μετά από αυτή τη διαδικασία, που εξαρτάται από τον αριθμό ν των γεωηλεκτρικών στρωμάτων, έχει υπολογισθεί το πλήρες γεωηλεκτρικό μοντέλο της καμπύλης υπαίθρου, το οποίο αποτελείται από τις ειδικές αντιστάσεις ρ<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub>..., ρ<sub>ν</sub> και τα πάχη h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>,..., h<sub>ν-1</sub>.

# 3.2.α.2 Ηλεκτρονική μέθοδος ποσοτικής ερμηνείας.

#### <u>Λογισμικό SCHLINV</u>

Το λογισμικό αυτό, απαιτεί σαν πρωτογενή στοιχεία, ένα αρχικό μοντέλο ερμηνείας, που συνήθως προέρχεται από τη γραφική μέθοδο ποσοτικής επεξεργασίας της 'εξομαλυμένης' γεωηλεκτρικής καμπύλης υπαίθρου.

Με τη διαδικασία των διαδοχικών προσεγγίσεων, υπολογίζονται οι μετασχηματισμοί της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, της γεωηλεκτρικής καμπύλης και του μοντέλου που έχει εισαχθεί, υπολογίζοντας τις θεωρητικές τιμές των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων για το μοντέλο αυτό. Συγκρίνει τους δύο αυτούς μετασχηματισμούς, μέχρι η θεωρητική καμπύλη του μοντέλου να συμφωνεί με αυτήν της καμπύλης υπαίθρου, με σφάλμα απόκλισης λιγότερο του 2%, τροποποιώντας τα πάχη και τις ειδικές αντιστάσεις του μοντέλου.

Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων του προγράμματος αυτού με της γραφικής μεθόδου, περιορίζει αρκετά τις λύσεις της καμπύλης, πλησιάζοντας πιο πολύ στην έννοια του μονοσήμαντου μοντέλου.

#### <u>Λογισμικό ΑΤΟ</u>

Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί μια μοναδική μέθοδο αντιστροφής, η οποία καθορίζει τόσα στρώματα όσα είναι τα ψηφιοποιημένα σημεία της γεωηλεκτρικής καμπύλης υπαίθρου. Είναι μια ευφυής μέθοδος αξιόπιστων αποτελεσμάτων, που χρησιμοποιείται κυρίως για περιβάλλοντα ιζηματογενών λεκανών (YUNGUL, 1996). Βασίζεται στις παρατηρούμενες μορφολογικές σχέσεις μεταξύ των καμπύλων, που προκύπτουν από τη σχέση της ειδικής αντίστασης με το βάθος και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με το ημι-ανάπτυγμα AB/2 των ηλεκτροδίων ρεύματος. Δηλαδή μπορεί να είναι παράλληλες αυτές, αλλά κάποια χαρακτηριστικά τους σημεία να μετατοπίζονται οριζόντια ή κατακόρυφα μεταξύ τους (εικόνα 3.15). Οι διαδοχικές προσεγγίσεις τροποποιούν το μοντέλο σε τέτοιες διευθύνσεις.



Εικόνα 3.15: Δύο καμπύλες Schlumberger πέντε στρωμάτων και διάταξη των στρωμάτων, απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ των αποστάσεων των ηλεκτροδίων, των φαινόμενων αντιστάσεων, βαθών και πραγματικών αντιστάσεων. Τα διαγράμματα, δείχνουν επίσης ότι η μέγιστη αλλαγή στη φαινόμενη αντίσταση, είναι περίπου ίση με τη μεταβολή στην πραγματική αντίσταση (Zohdy, 1989).

Μάλιστα, το συγκεκριμένο λογισμικό, δεν απαιτεί την εισαγωγή κάποιου αρχικού γεωηλεκτρικού μοντέλου, αλλά το λαμβάνει αυτόματα κατά την έναρξη του, από την ψηφιοποίηση της καμπύλης υπαίθρου. Έτσι, δεν είναι απαραίτητη η προέκταση ούτε του αρχικού, ούτε του τελικού κλάδου της καμπύλης, στις αντίστοιχες ασύμπτωτες καμπύλες. Τα ψηφιοποιημένα στρώματα που προκύπτουν – που είναι όσα τα σημεία της ψηφιοποιημένης καμπύλης – τοποθετούνται ομοιόμορφα σε μια λογαριθμική κλίμακα βάθους.

Ο υπολογισμός του μοντέλου από την καμπύλη υπαίθρου, γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Από μια τέτοια εφαρμογή, προέκυψε η κλιμακωτή (step) συνάρτηση της εικόνας 3.16. Τα 'ανώμαλα' στρώματα λόγω θορύβου, απαλείφονται πολύ καλά με αυτό το πρόγραμμα. Η ακολουθία των στρωμάτων που δίνεται, παρέχει τη δυνατότητα τροποποίησης τους, βάσει και των γεωλογικών δεδομένων.



Εικόνα 3.16: Τελική διάταξη, μετά από αρκετές επαναλήψεις, με την υπολογισμένη καμπύλη να ταιριάζει με την παρατηρούμενη καμπύλη (*Zohdy*, 1989).

#### 3.2.γ Ποσοτική παρουσίαση γεωηλεκτρικων δεδομένων.

Μετά την ποσοτική ανάλυση των γεωηλεκτρικών δεδομένων και των καμπύλων υπαίθρου, με τη γραφική μέθοδο αλλά και με τα λογισμικά πακέτα, προκύπτει ένα κοινό ή πολύ κοντινό γεωηλεκτρικό μοντέλο, από όλους τους τρόπους. Αυτό το κοινό γεωηλεκτρικό μοντέλο, αφού έχει προέλθει από τρεις διαφορετικές μεθόδους, που επεξεργάζονται τα δεδομένα με διαφορετικό τρόπο, τείνει να γίνει μονοσήμαντο.

Για την ποσοτική παρουσίαση των γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούνται τα μονοδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα, τα οποία προκύπτουν έπειτα από την προαναφερόμενη ποσοτική ανάλυση (γραφική και ηλεκτρονική), για την <u>κατασκευή</u> <u>τομών και χαρτών κατανομής της ειδικής αντίστασης</u>, συναρτήσει του βάθους. Αυτό δίνει την απεικόνιση της κατανομής της ειδικής αντίστασης, σε δύο (ψευδό-2D) και σε τρεις (ψευδό-3D) διαστάσεις αντίστοιχα, ελέγχοντας έτσι την πλευρική και την κατακόρυφη κατανομή της *ρ*.

Για την κατασκευή των τομών και χαρτών της ποσοτικής ερμηνείας, χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, το λογισμικό <u>Surfer</u> (*Golden Software*) και η μέθοδος *kriging* (βλ. § 3.2.α).

#### 3.2.γ.1 Κατασκευή τομών ειδικής αντίστασης.

Στην παρούσα εργασία, έχουν κατασκευαστεί δυο ειδών τομές ποσοτικής παρουσίασης των γεωηλεκτρικών δεδομένων.

Αρχικά, κατασκευάστηκαν τομές κατανομής της (πραγματικής) ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.17), εκμεταλλευόμενοι τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μεθόδου του λογισμικού ΑΤΟ, που λόγω του τρόπου επεξεργασίας του (τόσα στρώματα όσα τα ψηφιοποιημένα σημεία της καμπύλης υπαίθρου), υπολογίζονται οι 'πραγματικές' ειδικές αντιστάσεις, συναρτήσει του βάθους. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται, σε γραμμική κλίμακα, οι θέσεις των συνευθειακών κέντρων διάταξης (ΚΔ) των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων της τομής.
- Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετούνται, σε γραμμική κλίμακα, οι υπολογισθείσες
   τιμές των ειδικών αντιστάσεων σε σχέση με το βάθος.
- Στη συνέχεια χαράσσονται οι ισότιμες καμπύλες ρ, σκιαγραφώντας έτσι την κατανομή της ρ (ψευδό-βάθος).



#### ΤΟΜΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Εικόνα 3.17: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, από τα αποτελέσματα του λογισμικού ΑΤΟ.

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν τομές ποσοτικής παρουσίασης (<u>γεωηλεκτρικές τομές</u>) (εικόνα 3.18), στις οποίες λαμβάνονται υπόψη όλα τα υπολογισθέντα γεωηλεκτρικά μοντέλα από τη γραφική και ηλεκτρονική διαδικασία επεξεργασίας. Οι απεικονίσεις αυτές αποδίδουν τη δομή των γεωηλεκτρικών σχηματισμών, σε δυο διαστάσεις (ψευδό-2D), βάσει των υπολογισθέντων γεωηλεκτρικών μοντέλων. Δηλαδή, γίνεται μια προσπάθεια πλευρικής ενοποίησης των κοινών – πιθανώς – γεωηλεκτρικών σχηματισμών των βυθοσκοπήσεων, στηριζόμενοι στις τιμές των ειδικών αντιστάσεων που παρουσιάζουν, καθώς και στον εντοπισμό πιθανών πλευρικών γεωηλεκτρικών ασυνεχειών.

Για την κατασκευή των γεωηλεκτρικών τομών ακολουθείται η κάτωθι διαδικασία:

Στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται, σε γραμμική κλίμακα, οι θέσεις των συνευθειακών κέντρων διάταξης (ΚΔ) των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων της τομής, λαμβάνοντας υπόψη και το απόλυτο υψόμετρο της κάθε θέσης.

- Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετούνται, κάτω από κάθε θέση βαθοσκόπησης, τα σημεία που αντιστοιχούν στο βάθος z του κάθε γεωηλεκτρικού στρώματος, που προέκυψαν από την ποσοτική ερμηνεία.
- Αναγράφονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης του κάθε γεωηλεκτρικού στρώματος, που προέκυψαν από την ποσοτική ερμηνεία.
- Στη συνέχεια, παρατηρώντας τη σχέση των τιμών  $\rho$  και της χωρικής τοποθέτησης τους, χαράσσονται τα όρια των γεωηλεκτρικών στρωμάτων, ενώ πιθανές πλευρικές ασυνέχειες, που προέρχονται από τη διαφοροποίηση της  $\rho$ , κατά μήκος της τομής, χαράσσονται με κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή.



ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΗ

Εικόνα 3.18: Γεωηλεκτρική τομή, από τα υπολογισθέντα γεωηλεκτρικά μοντέλα με τη γραφική και ηλεκτρονική διαδικασία επεξεργασίας (με μαύρη εστιγμένη γραμμή καθορίζονται τα γεωηλεκτρικά στρώματα, ενώ με κόκκινη τεθλασμένη γραμμή οι εκτιμώμενες πλευρικές ασυνέχειες).

# 3.2.γ.2 Κατασκευή χαρτών ειδικής αντίστασης.

Η κατασκευή των γεωηλεκτρικών χαρτών ή οριζοντιογραφιών κατανομής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους (εικόνα 3.19), πραγματοποιήθηκε από τα στοιχεία της επεξεργασίας του λογισμικού ΑΤΟ, χρησιμοποιώντας το λογισμικό PICKDPTH (Zohdy & Bisdorf, 1989), που παρέχει τις τιμές της ειδικής αντίστασης για συγκεκριμένα βάθη. Θεωρώντας την επιφάνεια επίπεδη, τοποθετούνται κατακόρυφα και παράλληλα οι γάρτες για τα αυξανόμενα βάθη, παρέχοντας έτσι μια ψευδό-απεικόνιση της κατανομής της ρ σε τρεις διαστάσεις.

Για την κατασκευή των χαρτών κατανομής της ειδικής αντίστασης, ακολουθείται η κάτωθι διαδικασία:

- Τοποθετούνται οι θέσεις των κέντρων διάταξης (ΚΔ) των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων, βάσει των συντεταγμένων τους, έχοντας στον οριζόντιο άξονα τις συντεταγμένες X και στον κατακόρυφο τις συντεταγμένες Y.
- Τοποθετούνται οι τιμές της (πραγματικής) ειδικής αντίστασης, όλων των βυθοσκοπήσεων, για το συγκεκριμένο βάθος του κάθε χάρτη.

- Χαράσσονται, βάσει των προηγούμενων σημείων, οι ισότιμες καμπύλες της ειδικής αντίστασης στον κάθε χάρτη.
- Τέλος, για την ψευδό-3D απεικόνιση, τοποθετούνται οι οριζοντιογραφίες κατά αυξανόμενο βάθος απεικόνισης, από πάνω προς τα κάτω, με σκοπό την παρουσίαση του ψευδό-βάθους.



ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 20μ.

Εικόνα 3.19: Χάρτης κατανομής της ειδικής αντίστασης, για βάθος 20 μέτρων.

### 3.2.δ Περιορισμοί της μεθόδου

Όπως έχει προαναφερθεί, η ερμηνεία της γεωηλεκτρικής καμπύλης δεν είναι μονοσήμαντη, από τη στιγμή που μπορεί να αντιστοιχεί σε παραπάνω του ενός συνδυασμούς παχών και αντιστάσεων γεωηλεκτρικών στρωμάτων. Από τις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις, ουσιαστικά ορίζονται η εγκάρσια αντίσταση, *T* και η διαμήκης αγωγιμότητα, *S*, ως κύριες γεωηλεκτρικές παράμετροι (βλ. § 3.1.γ).

# 3.2.δ.1 Αρχές της ισοδυναμίας και της επικάλυψης

Η <u>αρχή της ισοδυναμίας</u>, αναφέρεται σε μοντέλα τριών στρωμάτων και στις καμπύλες τύπου K (εικόνα 3.13) και H (εικόνα 3.11), όπου εντοπίζεται ένα αντιστατικό στρώμα, μεταξύ δυο αγώγιμων και αντίστοιχα ένα αγώγιμο στρώμα, μεταξύ δυο αντιστατικών. Στην καμπύλη τύπου K, το αντιστατικό στρώμα παρουσιάζεται μέσω της εγκάρσιας αντίστασης του, T, ενώ στην καμπύλη τύπου H το αγώγιμο στρώμα εμφανίζεται λόγω της διαμήκους αγωγιμότητας του, S. Έτσι, μπορεί να διαμορφώνονται όμοιες καμπύλες τύπου K, όταν τα γινόμενα του πάχους και της αντίστασης (εγκάρσια αντίσταση, T) του ενδιάμεσου αντιστατικού στρώματος είναι ίσα. Ανάλογα μπορεί να διαμορφώνονται όμοιες καμπύλες τύπου Η, όταν οι λόγοι των παχών προς τις αντιστάσεις (διαμήκης αγωγιμότητα S) των ενδιάμεσων αγώγιμων στρωμάτων, είναι ίσοι. Αυτοί οι λόγοι, καθιστούν πολύ δύσκολη τη διάκριση τέτοιων στρωμάτων, με διαφορετικές αντιστάσεις και πάχη, όταν οι αντίστοιχες 'προβληματικές' γεωηλεκτρικές παράμετροι είναι ίσες.

Η <u>αρχή της επικάλυψης</u>, σχετίζεται με στρώματα μικρού πάχους, των οποίων οι αντιστάσεις είναι ενδιάμεσες των περιβαλλόντων στρωμάτων και των οποίων η επίδραση στην καμπύλη είναι ελάχιστη. Πρόκειται για τις καμπύλες τύπου A (εικόνα 3.12) ή Q (εικόνα 3.14), όπου οι αντιστάσεις των στρωμάτων αυξάνονται ή μειώνονται διαδοχικά. Τα στρώματα είναι δύσκολα αναγνωρίσιμα, ακόμα και στην περίπτωση που αρχίζει να αυξάνεται το πάχος τους, κάτι που θα επηρεάσει την καμπύλη. Αυτό συμβαίνει, γιατί πριν αναγνωρισθεί η επίδραση τους, θα παραμένει απροσδιόριστη, λόγω της μεταβολής του πάχους ή των αντιστάσεων των περιβαλλόντων σχηματισμών.

#### 3.2.δ.2 Σχετικό πάχος στρωμάτων

Η ευκολία διερεύνησης ενός γεωηλεκτρικού στρώματος, γνωστής ειδικής αντίστασης, εξαρτάται από το 'σχετικό πάχος', το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του πάχους του στρώματος, προς το βάθος στο οποίο εντοπίζεται. Μικρότερο σχετικό πάχος ενός στρώματος, συνεπάγεται μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης του στην γεωηλεκτρική καμπύλη. Για ένα μοντέλο τεσσάρων ή περισσότερων στρωμάτων, η παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι το 'ενεργό σχετικό πάχος' ενός στρώματος (Flathe, 1963), που ορίζεται ως ο λόγος των υπερκείμενων στρωμάτων.

Κάποιοι τρόποι που μπορούν να εξασφαλίσουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια στα αποτελέσματα των επεξεργασιών είναι οι εξής:

- Καλή γνώση της γεωλογίας της περιοχής.
- Γνώση των γεωηλεκτρικών παραμέτρων των σχηματισμών της περιοχής.
- Εκμετάλλευση γεωτρητικών στοιχείων, για συσχετισμό των γεωηλεκτρικών παραμέτρων.
- Συσχέτιση γεωηλεκτρικών καμπύλων.
- Διεξαγωγή βυθοσκοπήσεων σε διαφορετικές διευθύνσεις (συνήθως κάθετες).

# 3.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ – ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

#### 3.3.α Εξοπλισμός και όργανα μέτρησης

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, είναι υψηλής πιστότητας και αξιοπιστίας. Για τη μέτρηση των αντιστάσεων, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα TERRAMETER SAS του οίκου ABEM, αποτελούμενο από τη βασική του μονάδα Terrameter SAS 300B (εικόνα 3.20) και τη συνοδευτική βοηθητική μονάδα



Εικόνα 3.20: Η γεωηλεκτρική συσκευή Terrameter SAS 300B.

*Terrameter SAS 2000 Booster*, του Εργαστηρίου Γεωφυσικής, του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Το σύστημα αυτό, έχει τη δυνατότητα πολλαπλών, αυτόματων διαδοχικών μετρήσεων κάθε φορά, υπολογίζοντας την ωμική αντίσταση μέσω της αυτόματης μεθόδου προσδιορισμού της μέσης τιμής (που υποδηλώνεται και από τα αρχικά της SAS), που καθιστά το σύστημα αξιόπιστο.

Η μονάδα Terrameter SAS 300B, υπολογίζει αυτόματα την αντίσταση, δηλαδή το λόγο ΔV/I, μέσω ενός μικροεπεξεργαστή, αφού διοχετεύσει την επιθυμητή ποσότητα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και μετρήσει τη διαφορά δυναμικού, διαχωρίζοντας το θόρυβο, που προέρχεται από τα τελλουρικά ρεύματα, τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος ή και τις ηλεκτροχημικές μεταβολές ηλεκτροδίων δυναμικού. Η μονάδα Terrameter SAS 2000 Booster χρησιμοποιείται για την αύξηση του διοχετευόμενου ρεύματος και της δυνατότητας μέτρησης των διαφορών δυναμικού, κάτι απαραίτητο για μεγάλα αναπτύγματα (μεγάλο βάθος διερεύνησης) ή κατά τη διερεύνηση εξαιρετικά αγώγιμων στρωμάτων.

Ο <u>υπόλοιπος εξοπλισμός</u>, που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων αποτελείται (εικόνα 3.21) από τα εξής:

- Μεταλλικούς επιχαλκωμένους πάσσαλους-ηλεκτρόδια, με πυρήνα χάλυβα, για τη διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος και τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού.
- Δύο εκτυλίκτριες και δυο μονοπολικά καλώδια υψηλής αντοχής, μονωμένα με ισχυρό πλαστικό, μήκους περίπου 1.000 μέτρων το καθένα, για τη διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Δυο μονοπολικά καλώδια, μήκους 150 μέτρων το καθένα, για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού.
- Καλώδιο 'αναφοράς', μήκους 100 μέτρων, με προσημειωμένες τις πρώτες θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, για την ταχύτερη λήψη των μετρήσεων, αλλά και τη διευκόλυνση του προσδιορισμού της διεύθυνσης ανάπτυξης.
- Συσκευές φορητών ασυρμάτων, για την επικοινωνία και το συντονισμό των μελών της ερευνητικής ομάδας.
- Φορητή συσκευή GPS, για τον προσδιορισμό των θέσεων των κέντρων διάταξης των βυθοσκοπήσεων.
- Βαριοπούλες, για την πάκτωση των ηλεκτροδίων, δοχεία μεταφοράς αλατούχου νερού για τη διαπότιση των σημείων επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος, ώστε να μειωθεί η αντίσταση επαφής και παρελκόμενος εξοπλισμός (πυξίδα, μετροταινίες, ανταλλακτικά εξαρτήματα και εργαλεία).



Εικόνα 3.21: Ανάπτυξη γεωηλεκτρικής βαθοσκόπησης στην ύπαιθρο.

# 3.3.β Διεξαγωγή εργασιών υπαίθρου

Η πρώτη και βασικότερη μέριμνα, κατά την εκτέλεση της γεωηλεκτρικής έρευνας, ήταν ο εντοπισμός και η επιλογή των κατάλληλων σημείων για την τοποθέτηση του κέντρου της διάταξης, έτσι ώστε η ανάπτυξη της βυθοσκόπησης να μην συναντά φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, για το επιθυμητό ημι-ανάπτυγμα AB/2 και να διατηρείται η ευθύγραμμη ανάπτυξη της διάταξης. Η αποφυγή εμποδίων δεν ήταν πάντα προβλέψιμη, με αποτέλεσμα την αντιμετώπιση διαφόρων δυσκολιών, εξαιτίας κυρίως της πυκνής βλάστησης, των οικιών, των περιφράξεων, του οδικού δικτύου και των, κατά θέσεις, έντονων τοπογραφικών ανάγλυφων. Όλα αυτά τα εμπόδια, δυσχέραιναν και καθυστερούσαν χρονικά την ομαλή ανάπτυξη της μεθόδου, αλλά εκτιμάται ότι τηρήθηκαν σε μεγάλο βαθμό οι προδιαγραφές της διάταξης και τα σφάλματα που εισήχθησαν ήταν πολύ μικρά.
# 3.4 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η γεωηλεκτρική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιοχές μελέτης, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή του Δελφινίου αλλά και του Μεσοβουνίου (ευρύτερη περιοχή Κορακάρη), διότι σε αυτές τις περιοχές εντοπίζονται λεκάνες απόθεσης τεταρτογενών αποθέσεων (αλλούβια ή και κορήματα). Σε αυτές τις περιοχές ενδείκνυται η χρήση της γεωηλεκτρικής μεθόδου, για την διερεύνηση της υπεδαφικής γεωλογικής δομής, αφού συνήθως εμφανίζονται διαφοροποιήσεις γεωηλεκτρικών αντιστάσεων (ιζήματα & υπόβαθρο). Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, έγιναν με γνώμονα όλα τα θεωρητικά και πρακτικά στοιχεία, που έχρηζαν προσοχής και έχουν ήδη αναφερθεί.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν εικοσιοκτώ (28) γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις, και τρεις (3) 'επιτόπου' (in situ) μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε επιφανειακές εμφανίσεις πετρωμάτων για την καλύτερη αξιολόγηση των μετρήσεων.

#### 3.4.α. Γεωηλεκτρική έρευνα στην περιοχή του Δελφινίου

Στην περιοχή του Δελφινίου πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη γεωηλεκτρική έρευνα, προκειμένου να προσδιοριστεί η δομή του υποβάθρου της λεκάνης και γενικότερα να δοθούν στοιχεία για την γεωλογία της περιοχής.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά δεκαεπτά (17) γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις, μέγιστου ημι-αναπτύγματος AB/2 = 147 μέτρων, καθώς και τρεις (3) 'επιτόπου' (in situ) μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε επιφανειακές εμφανίσεις του ασβεστόλιθου της περιοχής (εικόνα 3.22).

Μετά την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών στοιχείων υπαίθρου για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκαν:

- Δύο (2) τομές (κατανομής ρ<sub>α</sub>, κατανομής ρ και γεωφυσικές γεωλογικές), οι θέσεις των οποίων απεικονίζονται στο χάρτη της εικόνας 3.22, ήτοι:
- i) Тоµή I (D07, D01, D02, D09, D14 кал D04),
- ii) Тоµή II (D01, D02, D03, D05 кал D13),
- <u>Χάρτες-οριζοντιογραφίες</u> (ρ<sub>α</sub> και ρ), της περιοχής και
- Ψευδο-τρισδιάστατος χάρτη του γεωηλεκτρικού υποβάθρου





Υπόμνημα: Q al: Αλλόυβια & παράκτιες αποθέσεις, Qs: Πλευρικά κορήματα, Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), Jis: Κροκαλοπαγείς ψαμμίτες & Ψαμμιτικοί αργ. σχιστόλιθοι (Μ.Περμίο), Pm: Ασβεστόλιθοι (Μ.Περμίου), C-pi: Ασβεστόλιθοι (Λιθανθρακοφόρο – Κ.Πέρμιο), Ci:Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων, Tr m-S: Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο - Κάρνιο), Tr m: Δολομίτες & Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο), Tr m2: Ανώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr is: Βασικοί Ψαμμίτες & Κροκαλοπαγή, Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό)

## 3.4.α.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας

Γενική παραδοχή των γεωεπιστημόνων διεθνώς, είναι ότι για την αξιόπιστη ερμηνεία των γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων μιας έρευνας, απαραίτητη είναι η γνώση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή. Αυτό, επιτεύχθηκε με την πραγματοποίηση τριών (3) 'επιτόπου' (in situ) μετρήσεων της ειδικής αντίστασης, σε επιφανειακές εμφανίσεις ανθρακικών σχηματισμών.

Οι θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν 'επιτόπου' μετρήσεις ειδικής αντίστασης (εικόνα 3.22), ήταν πάνω στον **ανθρακικό σχηματισμό** *Ji* του Λιασίου. Οι τιμές ειδικής αντίστασης που προέκυψαν για τον σχηματισμό ήταν μεγαλύτερες των **300 Ohm.m**.

Αντίστοιχες πληροφορίες μπορούμε να πάρουμε από την βαθοσκόπηση *D08*, που πραγματοποιήθηκε πάνω σε επιφανειακή εμφάνιση του σχηματισμού *Ci* (διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων), στα περιθώρια της λεκάνης των αλλούβιων. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης που προέκυψαν είναι **80-110 Ohm.m**.

#### 3.4.α.2. Παρουσίαση ποιοτικών αποτελεσμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, μετά την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων, χαράχτηκαν δύο (2) τομές (εικόνα 3.22), για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

#### Τομή Ι κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Η τομή Ι, περιλαμβάνει τα σημεία *D07, D01, D02, D09, D14 και D04*, διασχίζει τη λεκάνη με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και έχει συνολικό μήκος 490 μέτρα (εικόνα 3.23).



Εικόνα 3.23: Τομή Ι κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Σε γενικές γραμμές, στην τομή Ι, φαίνεται να επικρατεί μια κλίση των ισότιμων καμπύλων φαινόμενης ειδικής αντίστασης, προς ΒΑ, κάτι που πιθανότατα υποδεικνύει μια παρόμοια

κλίση των στρωμάτων. Το μόνο τμήμα που διαφοροποιείται είναι το αρχικό της τομής, όπου στην περιοχή μεταξύ των θέσεων D07 και D01, η κλίση των ισότιμων καμπύλων είναι πιο ήπια, αλλά αντίθετη, προς NΔ και με έντονη την αύξηση των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων με το βάθος.

#### <u>Τομή ΙΙ κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης</u>

Η τομή Ι, περιλαμβάνει τα σημεία *D01, D02, D03, D05 και D13*, διασχίζει τη λεκάνη με διεύθυνση σχεδόν N-B και έχει συνολικό μήκος 220 μέτρα (εικόνα 3.24).



Εικόνα 3.24: Τομή ΙΙ κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Γενικά, από την μορφή των ισότιμων καμπύλων στην τομή αυτή, μεταξύ των θέσεων D02 και D13, υποδηλώνεται μια ομαλή στρωματοποιημένη δομή. Αντίθετα, στο αρχικό τμήμα της τομής, μεταξύ των θέσεων D01 και D02, παρατηρείται μια σχετικά απότομη βύθιση των ισότιμων καμπύλων προς τα BA, καταδεικνύοντας μια πιθανή πλευρική ασυνέχεια στο σημείο αυτό.

#### Χάρτες κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Κατασκευάστηκαν συνολικά οκτώ (8) χάρτες κατανομής της  $\rho_{\alpha}$  για AB/2 ίσα με 3,16μ., 6,81μ., 10μ., 14,7μ., 21,5μ., 31,6μ., 46,4μ. και 68,1μ. (εικόνα 3.25).



Εικόνα 3.25: Χάρτες κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης στην περιοχή του Δελφινίου.

Σε όλους τους χάρτες , οι τιμές  $\rho_{\alpha}$  κυμαίνονται από 1,0 έως και 250 Ohm.m. οι μικρότερες τιμές ( <50 Ohm.m) εμφανίζονται κυρίως στο ανατολικό και κεντρικό τμήμα της λεκάνης, όταν στο υπόλοιπο μέρος οι τιμές της  $\rho_{\alpha}$  είναι άνω των 100 Ohm.m και ειδικά στα μεγάλα βάθη αυξάνονται ακόμα περισσότερο.

## 3.4.α.3. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων

Μετά από την παρουσίαση και ερμηνεία των ποιοτικών αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκαν και οι αντίστοιχες τομές και χάρτες κατανομής της ειδικής αντίστασης. Για την κατασκευή τους υιοθετήθηκε κοινή χρωματική κλίμακα.

## Τομή Ι κατανομής ειδικής αντίστασης

Στην τομή Ι (εικόνα 3.26), για μικρά βάθη (έως 20μ.), παρατηρούνται χαμηλές τιμές ειδικές αντίστασης, μέχρι 50 Ohm.m. Στην περιοχή μεταξύ D07 και D01 τα βάθη αυτά είναι πιο περιορισμένα, έως 15μ, διότι σε αυτή την περιοχή, εμφανίζεται μια μικρή 'αναθόλωση' της κατανομής των αυξημένων ειδικών αντιστάσεων



Εικόνα 3.26: Τομή Ι κατανομής ειδικής αντίστασης.

#### Τομή ΙΙ κατανομής ειδικής αντίστασης

Κατά μήκος της τομής αυτής (εικόνα 3.27), παρατηρείται επιφανειακά ένα σχεδόν οριζόντιο γεωηλεκτρικό στρώμα μικρής ειδικής αντίστασης ( <50 Ohm.m). Οι ειδικές αντιστάσεις αυξάνονται πιο βαθειά με αρκετά πιο έντονη αύξηση στην νοτιοδυτική περιοχή της τομής και μια πιθανή ελαφρά κλίση προς BA.



Εικόνα 3. 27: Τομή ΙΙ κατανομής ειδικής αντίστασης.

#### Χάρτες κατανομής ειδικής αντίστασης

Αντίστοιχα με τους χάρτες κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, κατασκευάστηκαν οκτώ (8) χάρτες κατανομής ειδικής αντίστασης για βάθη 2μ., 4,5μ., 7μ., 10μ., 15μ., 20μ., 30μ. και 45 μέτρων (εικόνα 3.28). Οι ειδικές αντιστάσεις κυμαίνονται από 1 έως και 250 Ohm.m.

Μέχρι το βάθος των 20 μέτρων, στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα των χαρτών, εντοπίζονται ειδικές αντιστάσεις μικρότερες των 80 Ohm.m, οι οποίες στα μεγαλύτερα βάθη αυξάνονται μέχρι και τα 600 Ohm.m. Στο νότιο τμήμα διαφαίνονται από τα 15μ. βάθος, ειδικές αντιστάσεις άνω των 100 Ohm.m, αυξανόμενες με το βάθος.



Εικόνα 3.28: Χάρτες κατανομής ειδικής αντίστασης στην περιοχή του Δελφινίου.

## 3.4.α.4. Αξιολόγηση γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων περιοχής Δελφινίου

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας – ερμηνείας των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες γεωλογικές – γεωφυσικές τομές (εικόνα 3.29), καθώς και ένας ψευδοτρισδιάστατος χάρτης της οροφής του γεωηλεκτρικού υποβάθρου (εικόνα 3.30).



Εικόνα 3.29: Γεωλογικές – Γεωφυσικές τομές στην περιοχή του Δελφινίου.

## Γεωλογικές – Γεωφυσικές Τομές

Και στις δυο γεωλογικές – γεωφυσικές τομές (εικόνα 3.29), εντοπίζεται επιφανειακά, πέραν του στρώματος των αλλουβίων, με ειδικές αντιστάσεις μικρότερες των 25 Ohm.m, ένα χαρακτηριστικό στρώμα ειδικής αντίστασης 35-50 Ohm.m, που πιθανότατα αντιστοιχεί σε αποσαθρωμένα κλαστικά ιζήματα της περιοχής, τα οποία θεωρούνται και αδιαπέρατα. Αυτό το στρώμα πιθανόν να παίζει και καθοριστικό ρόλο στην είσοδο της θάλασσας στην λεκάνη, που οδηγεί σε υφαλμύρινση των υπαρχουσών πηγών.

Από κάτω, εντοπίζονται τα ανθρακικά πετρώματα της περιοχής, με κυρίαρχο τον ασβεστόλιθο *Ji*, με ειδικές αντιστάσεις που κυμαίνονται από 150 έως και 1000 Ohm.m. Οι μικρές τιμές, οφείλονται στην υδροφορία του σχηματισμού, λόγω πιθανής καρστικοποίησης. Κάτω από τον σχηματισμό αυτό, αναμένεται να είναι ο σχηματισμός των κλαστικών, που ως αδιαπέρατος, επιτρέπει την υδροφορία του υπερκείμενου ασβεστόλιθου.

#### Ψευδο-τρισδιάστατος γάρτης γεωηλεκτρικού υποβάθρου

Στο χάρτη της Εικόνας 3.30, απεικονίζεται ουσιαστικά η οροφή του γεωηλεκτρικού υποβάθρου, που στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για του ασβεστόλιθους και τους δολομίτες της αλλόχθονης ενότητας. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει ουσιαστικά, το πάχος των ιζημάτων και η επαφή τους με τα ανθρακικά (αδιαπέρατα και περατά αντίστοιχα).



Εικόνα 3.30: Ψευδο-τρισδιάστατος χάρτης γεωηλεκτρικού υποβάθρου

Γενικά, παρατηρούνται ότι δημιουργούνται δυο υπο-λεκάνες, μια σχετικά ρηχή και απομονωμένη προς τα ΝΔ (περιοχή μεταξύ D07 και D01) καθώς και μία άλλη κύρια λεκάνη, της οποίας τα μεγαλύτερα βάθη (~30μ.) εντοπίζονται στην περιοχή μεταξύ των βαθοσκοπήσεων D03, D09 και D10.

#### 3.4.β. Γεωηλεκτρική έρευνα στην περιοχή του Μεσοβουνίου (Κορακάρης)

Στην περιοχή του Μεσοβουνίου πραγματοποιήθηκε γεωηλεκτρική έρευνα, προκειμένου να προσδιοριστεί το βάθος του αυτόχθονου υποβάθρου της λεκάνης και γενικότερα να δοθούν στοιχεία για την γεωλογία της περιοχής.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά εννέα (9) γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις, μέγιστου ημιαναπτύγματος AB/2 = 316 μέτρων (εικόνα 3.31). Μετά την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών στοιχείων υπαίθρου, για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκαν:

- Δύο (2) τομές (κατανομής ρ<sub>α</sub>, κατανομής ρ και γεωφυσικές γεωλογικές), οι θέσεις των οποίων απεικονίζονται στο χάρτη της εικόνας 3.31, ήτοι:
- iii) Тоµή III (M01,M03 кал M02),
- iv) Τομή IV (M05, M03 και M09),
- <u>Χάρτες-οριζοντιογραφίες</u> (ρ<sub>α</sub> και ρ), της περιοχής και
- <u>Ψευδο-τρισδιάστατος χάρτη του γεωηλεκτρικού υποβάθρου</u>

# 3.4.β.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας

Στην συγκεκριμένη περιοχή, παρόλο που δεν πραγματοποιήθηκαν 'επιτόπου' (*in-situ*) μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, πληροφορίες προκύπτουν από δύο εκ των βαθοσκοπήσεων (*M01 και M04*), δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκαν πάνω σε σχηματισμούς στα περιθώρια της λεκάνης των κορημάτων.

Συνεπώς, από την ερμηνεία της βαθοσκόπησης M01, που πραγματοποιήθηκε πάνω στο σχηματισμό Mss, των σιδηρούχων ψαμμιτών, προκύπτει ότι η ειδική αντίσταση του σχηματισμού είναι περίπου 20-30 Ohm.m. Η βαθοσκόπηση M04, εκτελέστηκε πάνω στον σχηματισμό Tr m2, δηλαδή το ανώτερο μέρος της πολύχρωμης σειράς (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με παρεμβολές μαργών). Η ειδική αντίσταση που φαίνεται να χαρακτηρίζει τον σχηματισμό αυτό είναι 20-30 Ohm.m.



Εικόνα 3.31: Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Μεσοβουνίου, με τις θέσεις των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων

Υπόμνημα: Qs: Πλευρικά κορήματα, Qb: Λατυποπαγή, Mss: Σιδιρούχοι Ψαμμίτες, Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), C-pi: Ασβεστόλιθοι (Λιθανθρακοφόρο – Κ.Πέρμιο), Ci: Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων, Tr mj: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες, Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr m2: Ανώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό), S-C: Κλαστικά πετρώματα (Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο).

# 3.4.β.2. Παρουσίαση ποιοτικών αποτελεσμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, μετά την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων, χαράχτηκαν δύο (2) τομές (εικόνα 3.31), για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

#### Τομή ΙΙΙ κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Η τομή ΙΙΙ, περιλαμβάνει τα σημεία *M01,M03 και M02* και τέμνει τη λεκάνη με διεύθυνση Δ-Α, με συνολικό μήκος 70 μέτρα (εικόνα 3.32).

Για τα μικρά AB/2, παρατηρείται μια σχετικά έντονη κλίση των ισότιμων καμπύλων προς τα δυτικά καθώς και μια τοπική ανωμαλία κάτω από την θέση *M02*.

Σε μεγαλύτερα AB/2, οι ισότιμες καμπύλες, πλέον, καταδεικνύουν μια στρωματοποιημένη οριζόντια δομή.



**Εικόνα 3.32**: Τομή ΙΙΙ κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Εικόνα 3.33: Τομή ΙV κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

## Τομή ΙV κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Η τομή IV, περιλαμβάνει τα σημεία *M05, M03 και M09* και τέμνει τη λεκάνη με διεύθυνση B-N, κάθετα με την τομή III και έχει μήκος 215 μέτρα (εικόνα 3.33).

Χαρακτηριστικό αυτής της τομής, είναι η ήπια κλίση των ισότιμων καμπύλων προς βορρά.



Εικόνα 3.34: Χάρτες κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης στην περιοχή του Μεσοβουνίου.

## Χάρτες κατανομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Κατασκευάστηκαν συνολικά έντεκα (11) χάρτες κατανομής της  $\rho_{\alpha}$  για AB/2 ίσα με 3,16μ., 6,81μ., 10μ., 14,7μ., 21,5μ., 31,6μ., 46,4μ., 68,1μ., 100μ., 147μ. και 215μ. (εικόνα 3.34).

Για AB/2 μέχρι και 68μ., οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στο δυτικό και κεντρικό τμήμα του χάρτη κυμαίνονται μεταξύ 20 και 80 Ohm.m, όταν στο ανατολικό τμήμα, οι τιμές είναι ελαφρώς πιο υψηλές (80 – 140 Ohm.m). Στα μεγαλύτερα AB/2, η φαινόμενη ειδική αντίσταση λαμβάνει τιμές άνω των 180 Ohm.m.

## 3.4.β.3. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων

Μετά από την παρουσίαση και ερμηνεία των ποιοτικών αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκαν και οι αντίστοιχες τομές και χάρτες κατανομής της ειδικής αντίστασης. Για την κατασκευή τους υιοθετήθηκε κοινή χρωματική κλίμακα.

## Τομή ΙΙΙ κατανομής ειδικής αντίστασης

Στην τομή ΙΙΙ (εικόνα 3.35), διαφαίνεται μια μέτρια κλίση των γεωηλεκτρικών στρωμάτων προς τα ανατολικά. Σχετικά αγώγιμα στρώματα (ρ<80 Ohm.m) εντοπίζονται μέχρι βάθη 20-30 μέτρων, ενώ βαθύτερα οι ειδικές αντιστάσεις αυξάνονται σταδιακά, μέχρι και 600 Ohm.m.



Εικόνα 3.35: Τομή ΙΙΙ κατανομής ειδικής αντίστασης.

#### Τομή ΙV κατανομής ειδικής αντίστασης

Χαρακτηριστικό της τομής IV (εικόνα 3.36), είναι η σχεδόν οριζόντια στρωματοποιημένη γεωηλεκτρική δομή, όπου σχετικά αγώγιμα στρώματα (ρ<80 Ohm.m) εντοπίζονται μέχρι βάθη 20-30 μέτρων, ενώ βαθύτερα οι ειδικές αντιστάσεις αυξάνονται σταδιακά, μέχρι και τα 600 Ohm.m.



Εικόνα 3.36: Τομή ΙV κατανομής ειδικής αντίστασης.

#### Χάρτες κατανομής ειδικής αντίστασης

Αντίστοιχα με τους χάρτες κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, κατασκευάστηκαν εννέα (9) χάρτες κατανομής ειδικής αντίστασης για βάθη 2μ., 4,5μ., 7μ., 10μ., 15μ., 20μ., 30μ., 45μ. και 70 μέτρων (εικόνα 3.37). Οι ειδικές αντιστάσεις κυμαίνονται από 1 έως και 600 Ohm.m.

Μέχρι το βάθος των 30 μέτρων, σχεδόν σε ολόκληρη την περιοχή, εντοπίζονται σχετικά αγώγιμα υλικά ( $\rho$ <80 Ohm.m), με εξαίρεση το κεντρικό και ανατολικό τμήμα, όπου σε μικρά βάθη εμφανίζονται τιμές περίπου 100 Ohm.m. Στα βάθη των 45 και 70 μέτρων, οι ειδικές αντιστάσεις που παρατηρούνται είναι άνω των 300 Ohm.m.



Εικόνα 3.37: Χάρτες κατανομής της ειδικής αντίστασης στην περιοχή του Μεσοβουνίου.

# 3.4.β.4. Αξιολόγηση γεωηλεκτρικών αποτελεσμάτων περιοχής Μεσοβουνίου

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας – ερμηνείας των γεωηλεκτρικών βαθοσκοπήσεων κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες γεωλογικές – γεωφυσικές τομές (εικόνα 3.38), καθώς και ένας ψευδοτρισδιάστατος χάρτης της οροφής του γεωηλεκτρικού – τοπικού γεωλογικού υποβάθρου (εικόνα 3.39).



Εικόνα 3.38: Γεωλογικές – Γεωφυσικές τομές στην περιοχή του Μεσοβουνίου.

#### Γεωλογικές – Γεωφυσικές Τομές

Αρχικά, παρατηρούμε ότι το πάχος των κορημάτων στη λεκάνη του Μεσοβουνίου, είναι τουλάχιστον 20 μέτρα. Κάτω από τα κορήματα, φαίνεται να εντοπίζεται η πολύχρωμη σειρά, με το ανώτερο (*Tr m2 – μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι & μάργες*), αλλά και το κατώτερο μέρος της (*Tr m1 – κλαστικά & ενδιαστρώσεις κροκαλοπαγών*) που έχει πάχη μέχρι και 60μ. Η κλίση των στρωμάτων της παραυτόχθονης σειράς, είναι προς ΝΑ και πιθανόν η πολύχρωμη σειρά να αποσφήνωνεται προς νότο, εξαιτίας του υποβάθρου που φαίνεται ελαφρώς ανυψωμένο (βλ. τομή IV).

Στην τομή ΙΙΙ, φαίνεται να εντοπίζεται πιθανό υπεδαφικό ρήγμα, διεύθυνσης B-N, το οποίο πιθανότατα συμμετέχει στη δημιουργία της λεκάνης, αλλά και στη καταβύθιση του υποβάθρου στα ανατολικά.

Το ανθρακικό υπόβαθρο πιθανόν υδροφορεί και πρέπει να είναι καρστικοποιημένο. Λαμβάνοντας υπόψη, ότι σε μεγαλύτερα βάθη, βρίσκονται τα κλαστικά ιζήματα του Παλαιοζωικού, που είναι αδιαπέρατα, είναι δυνατόν να ότι δημιουργηθούν κατάλληλες συνθήκες υδροφορίας. Επιπλέον, δυνατότητα υδροφορίας έχουν και τα κροκαλοπαγή του κατώτερου μέρους της πολύχρωμου σειράς (*Tr m1*).

Η κατείσδυση του νερού στα κατώτερα στρώματα, που είναι υδατοπερατά, γίνεται από τα βόρεια (βλ. τομή IV), όπου δεν εντοπίζεται το αδιαπέρατο στρώμα των μαργαϊκών ασβεστόλιθων, του ανώτερου μέρους της πολύχρωμης σειράς (**Tr m2**).

#### Ψευδο-τρισδιάστατος χάρτης γεωηλεκτρικού υποβάθρου

Στο χάρτη της Εικόνας 3.39, απεικονίζεται ουσιαστικά η οροφή του γεωηλεκτρικού υποβάθρου (σε απόλυτα υψόμετρα), σε σχέση με την τοπογραφία της περιοχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το γεωηλεκτρικό υπόβαθρο, πιθανόν αντιστοιχεί στους ασβεστόλιθους και τους δολομίτες της αυτόχθονης ενότητας, που απαρτίζουν και το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής.

Παρατηρώντας το χάρτη, σκιαγραφείται η 'κλιμακωτή' δομή της λεκάνης, λόγω πιθανού τεκτονισμού, όντας πιο σαφής κατά τη διεύθυνση Δ-Α, κάτι το οποίο έχει ήδη παρατηρηθεί από την γεωλογική – γεωφυσική τομή ΙΙΙ, της Εικόνας 3.38. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής, το γεωηλεκτρικό υπόβαθρο φαίνεται να έχει κατέβει αρκετά χαμηλά σε σχέση με την υπόλοιπη λεκάνη, κάτι που ενισχύεται και από την γενικότερη κλίση των στρωμάτων της περιοχής προς τα νοτιοανατολικά.



Εικόνα 3.39: Ψευδο-τρισδιάστατος χάρτης της περιοχής του Μεσοβουνίου, όπου το επάνω επίπεδο αντιπροσωπεύει την τοπογραφία της επιφάνειας, ενώ το κάτω επίπεδο αντιπροσωπεύει το επίπεδο της οροφής του γεωηλεκτρικού ανάγλυφου.

# 4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανίχνευση αγώγιμων κοιτασμάτων, με τις πρώτες εφαρμογές της περίπου στο 1920 στην Σκανδιναβία, τον Καναδά και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Η εφαρμογή τους στην μελέτη για τον εντοπισμό πετρελαϊκών κοιτασμάτων δεν είναι εφικτή λόγω του μεγάλου βάθους που συνήθως εντοπίζονται τα κοιτάσματα αυτά. Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι, πλέον, χρησιμοποιούνται ευρέως σε θέματα τεχνικής γεωλογίας, στον προσδιορισμό θαμμένων αγωγών και καλωδίων, στον εντοπισμό υδροφόρων ζωνών καθώς και στην χαρτογράφηση μολυσμένων εδαφών, όπως σε περιπτώσεις διαρροών από Χώρους Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Α).

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι, χρησιμοποιούν τη διάδοση συνεχών κυμάτων ή παροδικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μέσα και πάνω στη γη. Υπάρχει μεγάλο εύρος μεθοδολογιών που βοηθάνε στην επιλογή της κατάλληλης, ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο διερεύνησης. Επίσης, πρόκειται για μη καταστροφικές μεθόδους, σε μεγάλο ποσοστό, αφού δεν είναι απαραίτητη η απευθείας επαφή με το έδαφος, όπως για παράδειγμα στις ηλεκτρικές και σεισμικές μεθόδους (πάκτωση ηλεκτροδίων και γεωφώνων αντίστοιχα). Διαδεδομένη είναι πλέον και η λήψη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων από αέρος χρησιμοποιώντας αεροπλάνα ή ελικόπτερα.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι ταξινομούνται σε δυο κατηγορίες:

- Χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου (time domain-TEM), όπου οι μετρήσεις
   πραγματοποιούνται συναρτήσει του χρόνου και
- Μεταβαλλόμενων συχνοτήτων του πεδίου (*frequency domain-FEM*), όπου για τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται μία ή και περισσότερες συχνότητες.

# 4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

#### 4.1.α Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή σε αγώγιμα μέσα

Κατά το 1820, ο *Oersted*, απέδειξε ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Μαθηματικά εκφράζεται με το **νόμο του** *Ampere* που διατυπώνεται ως εξής:

$$\oint \mathbf{B} \cdot dl = \mu_0 I \qquad (4.1)$$

όπου *B* το μαγνητικό πεδίο,  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού με τιμή ίση με 4π x 10<sup>-7</sup> Henry / m και *I* η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από κλειστή τροχιά μήκους *l*.

Ο νόμος του *Ampere* ισχύει μόνο για ρεύματα σταθερά ως προς το χρόνο. Προκειμένου να έχει γενική ισχύ, ο *Maxwell* τον τροποποίησε προσθέτοντας έναν ακόμη όρο, το επονομαζόμενο *ρεύμα μετατόπισης*, *I*<sub>d</sub>, που μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$I_{d} \equiv \varepsilon_{0} \, \frac{d\Phi_{e}}{dt} \qquad (4.2)$$

όπου  $\Phi_e$  η ροή του ηλεκτρικού πεδίου και  $\varepsilon_o$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού με τιμή 8,854 x 10<sup>-12</sup> farad/m.

Έτσι προκύπτει ο γενικευμένος νόμος των Ampere-Maxwell, ο οποίος του οποίου η μαθηματική έκφραση είναι η εξής:

$$\oint \mathbf{B} \cdot dl = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_e}{dt}$$
(4.3)

Από το 1831, ο Άγγλος Michael Faraday, αλλά και ταυτόχρονα ο Αμερικανός Joseph Henry, απέδειξαν ότι μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία επάγουν ηλεκτρικά ρεύματα και έτσι διατύπωσαν το **νόμο επαγωγής του Faraday**, που μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} \qquad (4.4)$$

όπου ε είναι η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη και  $Φ_m$  είναι η μαγνητική ροή που διαπερνά το κύκλωμα και ισούται με:

$$\Phi_m = \int \mathbf{B} \cdot dA \qquad (4.5)$$

όπου Β είναι το μαγνητικό πεδίο και Α η επιφάνεια διατομής.

Ο νόμος του *Gauss* για το ηλεκτρικό πεδίο ορίζει ότι η ολική ροή ηλεκτρικού πεδίου, *E*, που διαπερνά μια κλειστή επιφάνεια, *A*, ισούται με το πηλίκο του ολικού φορτίου, *Q*, το οποίο είναι εγκλωβισμένο από την επιφάνεια δια της διαπερατότητας του κενού ε<sub>0</sub>, εκφραζόμενο μαθηματικά ως εξής:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad (4.6)$$

Ο νόμος του *Gauss* για το μαγνητικό πεδίο, ορίζει ότι η ολική μαγνητική ροή, *B*, που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια, *A*, είναι μηδενική και διατυπώνεται μαθηματικά:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \qquad (4.7)$$

Από τις εξισώσεις (4.3), (4.4), (4.6) και (4.7) προκύπτουν οι τέσσερις (4) εξισώσεις του Maxwell, που σε καρτεσιανό σύστημα και με διαφορική μορφή γράφονται ως εξής:

$$\nabla \times H = J + \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.8)$$
$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (4.9)$$
$$\nabla \cdot H = 0 \quad (4.10) \quad \text{kal} \quad \nabla \cdot B = 0$$

(4.11)

Η εξίσωση (4.8) των Ampere-Maxwell, αναπαριστά την παραγωγή μαγνητικού πεδίου από τη ροή ηλεκτρικού ωμικού / γαλβανικού ρεύματος και ρεύματος μετατόπισης σε αγωγό.

Στην εξίσωση (4.9) του Faraday, διατυπώνεται ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη ροή μαγνητικού πεδίου δημιουργεί πάντοτε ηλεκτρικό πεδίο, ακόμη και στο κενό, όπου δεν υπάρχουν ηλεκτρικά φορτία.

Η εξίσωση του Gauss για τον ηλεκτρισμό (4.10), αναφέρει ότι η ολική ηλεκτρική ροή μέσω κλειστής επιφανείας είναι μηδενική, δηλαδή ότι θεωρείται χώρος ελεύθερος ηλεκτρικών πηγών. Η εξίσωση του Gauss για τον μαγνητισμό (4.11), ουσιαστικά εκφράζει ότι η ολική ροή του μαγνητικού πεδίου μέσω κλειστής επιφανείας είναι μηδενική, οπότε όση ενέργεια εισέρχεται στον χώρο, τόση τον εγκαταλείπει και έτσι δεν παράγεται ούτε καταναλώνεται μαγνητικό πεδίο.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθούν κάποιες επιπλέον σχέσεις σχετικά με τις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες της ύλης.

Αρχικά είναι η *αγωγιμότητα ή ειδική αντίσταση*, εκφραζόμενη από τον μαθηματικό τύπο *J=σE*, όπου *J* η πυκνότητα ρεύματος σε αγωγό, σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου και *E* η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Επίσης, είναι η διηλεκτρική σταθερά, που διατυπώνεται ως  $D = \varepsilon E$ , όπου D η μετατόπιση και ε η διηλεκτρική σταθερά και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Τέλος, είναι η μαγνητική διαπερατότητα, **B**=μH, όπου B είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου, Η μαγνητική επαγωγή και μ η μαγνητική διαπερατότητα.

## 4.1.β Δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους τα πρωτεύοντα πεδία που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως εναλλασσόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που προέρχονται από επιμήκη καλώδια ή βρόχους. Το μαγνητικό πεδίο που επάγεται από ένα αγώγιμο μέσο, ονομάζεται δευτερεύον πεδίο. Σε αυτό το αντικείμενο θα ασχοληθούμε ουσιαστικά με την δημιουργία και την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

## 4.1.β.1 Μαγνητικό πεδίο επιμήκους καλωδίου – Νόμος Biot - Savart

Οι *Biot - Savart* έπειτα από πειραματικές μετρήσεις κατέληξαν σε εμπειρικό νόμο που προσδιόριζε το μαγνητικό πεδίο σε σημείο αγωγού ρεύματος που οφειλόταν στο πεδίο στη ροή του ρεύματος. Έτσι, **ο νόμος των** *Biot – Savart*, ορίζει ότι εάν ένα σύρμα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα, *I*, τότε ένα στοιχειώδες τμήμα, *ds*, του σύρματος δημιουργεί σε ένα σημείο *A* μαγνητικό πεδίο *dB* και μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$dB = k_m \frac{I \cdot ds \times r}{r^2} \tag{4.12}$$

όπου  $k_m$  σταθερά που ισούται με 10<sup>-7</sup> Wb/A.m και r η απόσταση του σημείου A από το τμήμα ds.

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται σε απόσταση α ένα πολύ μεγάλου μήκους ευθύγραμμο σύρμα, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης *I* δίνεται από τον τύπο:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi\alpha} \quad (4.13)$$

όπου  $\mu_0$  η διαπερατότητα του κενού που παίρνει τιμή ίση με 4π x 10<sup>-7</sup> Wb/A.m.

## <u>4.1.β.2 Διανυσματικό δυναμικό στοιχείου ρεύματος</u>

Για να υπολογίσουμε σε ένα στοιχείο ρεύματος *Idl* το δυναμικό *P*, θεωρούμε αμελητέα όλα τα ρεύματα που πιθανόν να εντοπίζονται (συμπεριλαμβανομένων και των ρευμάτων μετατόπισης) εκτός εκείνου που επάγεται από τον αγωγό. Έτσι, στην εξίσωση (4.14) θεωρήσαμε ότι  $d^2P/dt^2=0$  και ότι  $\varphi=0$ , με αποτέλεσμα την εξίσωση (4.15).

$$\nabla \times \nabla \times P + \mu \varepsilon \left[ \frac{d^2 P}{dt^2} + \nabla \left( \frac{d\varphi}{dt} \right) \right] = \mu \cdot J \Longrightarrow \qquad (4.14)$$
$$\nabla \times \nabla \times P = \mu \cdot J \qquad (4.15)$$

όπου J η πυκνότητα ρεύματος και μ η μαγνητική διαπερατότητα.

Όμως όταν  $\varphi=0$  ισχύει  $\nabla \cdot P=0$ , οπότε η εξίσωση (4.15) θα τροποποιηθεί δίνοντας την ακόλουθη εξίσωση που είναι ουσιαστικά η εξίσωση *Poisson* για τα μαγνητικά:

$$\nabla^2 P = -\mu \cdot J \tag{4.16}$$

Η λύση της (4.16) για το στοιχείο ρεύματος Idl είναι:

$$P = \left(\frac{\mu}{4\pi}\right)_{V} J \frac{dv}{r} = \left(\frac{\mu}{4\pi}\right) \oint I \frac{dl}{r} \qquad (4.17)$$

όπου P το δυναμικό στο σημείο A(x,y,z) και r η απόσταση του A από το dl.

## 4.1.γ Χαρακτηριστικά δευτερεύοντος πεδίου

Κατά τη διάδοση ενός πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου πάνω από έναν αγωγό, επάγεται ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο, το οποίο υπόκειται σε μια καθυστέρηση φάσης σχετικά με το πρωτεύον, λόγω της διέλευσης του από τον αγωγό, διατηρώντας όμως την συχνότητα.

Το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο μπορούμε να το προσομοιάσουμε με την σύζευξη τριών πηνίων γνωστής επαγωγής και αντίστασης, αλλά και αμελητέας χωρητικότητας, εκ των οποίων το πρώτο είναι η πηγή, το δεύτερο αντιστοιχεί στον αγωγό και το τρίτο στο δέκτη. Το πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε σημείο κοντά στον αγωγό, εξαιτίας διέλευσης ρεύματος έντασης *i<sub>p</sub>* από το πηνίο, είναι:

$$H_{P} = Ki_{P} = KI_{P}\eta\mu\omega t \qquad (4.18)$$

όπου το K είναι σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία του συστήματος, τον αριθμό και το εμβαδόν των σπειρών του πρωτεύοντος πηνίου και την εξασθένηση του κύματος. Στο δεύτερο πηνίο επάγεται νέο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με καθυστέρηση σχετικά με το πρωτεύον κατά π/2:

$$e_{s} = -M \frac{di_{p}}{dt} = -\omega MI_{p} \sigma \upsilon v \omega t = \omega MI_{p} \eta \mu (\omega t - \pi/2) = \frac{-j\omega \omega M_{p}}{K} \quad (4.19)$$

όπου  $M=M_{TC}=a\mu o i \beta a i a επαγωγή$  μεταξύ των πηνίων 1 και 2. Έτσι, το ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο 2 θα είναι:

$$i_s = \frac{e_s}{z_s} = \frac{e_s}{(r_s + j\omega L_s)} \qquad (4.20)$$

όπου  $z_s = (r_s + j\omega L_s)$  είναι η εμπέδηση του αγωγού αντίστασης  $r_s$  και επαγωγής  $L_s$ . Το δευτερεύον πεδίο κοντά στον δέκτη, που είναι αποτέλεσμα αυτού του ρεύματος θα είναι ίσο με :

$$H_{s} = K'i_{s} = \frac{-K'j\omega MH_{P}}{K(r_{s} + j\omega L_{s})} = \frac{-K'MH_{P}(j\omega r_{s} + \omega^{2}L_{s})}{K'(r_{s}^{2} + \omega^{2}L_{s}^{2})} = \frac{-K'MH_{P}(Q^{2} + jQ)}{KL_{s}(1 + Q^{2})} \quad (4.21)$$

όπου K' είναι μια παρόμοια σταθερά με το K και  $Q=\omega L_s/r_s$  είναι η τιμή της αξίας (figure of merit). Το πρωτεύον πεδίο στο δέκτη (πηνίο 3) θα είναι:

$$H'_{\rm p} = K''_{\rm i_p} = K''_{\rm p} \eta \mu \omega t = \frac{K'' H_{\rm p}}{K}$$
 (4.22)

όπου K''είναι παρόμοιο με το K' και το K.

Έτσι, το σχετικό μέγεθος των πεδίων στον δέκτη θα είναι:

$$\left|\frac{H_{s}}{H_{P}'}\right| = \frac{K'i_{s}}{K''i_{p}} = \frac{K'M}{K''L_{s}} \left\{\frac{Q^{4}}{\left(1+Q^{2}\right)^{2}} + \frac{Q^{2}}{\left(1+Q^{2}\right)^{2}}\right\}^{1/2} = \frac{K'M}{K''L_{s}} \frac{1}{\left(1+\frac{1}{Q^{2}}\right)^{1/2}}$$
(4.23)

Δεδομένου ότι ο λόγος  $K'M / K''L_s$  είναι γενικά πολύ μικρός, ο λόγος  $H_s / H'_P$  είναι μικρός, ανεξάρτητα από την τιμή του Q.



**Εικόνα 4.1**: Διάγραμμα που καταδεικνύει τη διαφορά φάσης μεταξύ  $H_S$  και  $H_P$  (*Telford et al., 1990*)

Η διαφορά φάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πεδίου (εικόνα 4.1) δίδεται από τον τύπο:

$$\theta_{\rm P} - \theta_{\rm S} = \left(\frac{\pi}{2} + \varepsilon \phi^{-1} \frac{\omega L_{\rm S}}{r_{\rm S}}\right) = \left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)$$
(4.24)

όπου  $\varepsilon \varphi \varphi = \omega L_s / r_s$ . Η καθυστέρηση της φάσης κατά  $\pi/2$  οφείλεται στην επαγωγική σύζευξη μεταξύ των πηνίων 1 και 2, ενώ η επιπρόσθετη καθυστέρηση φάσης  $\varphi$ , οφείλεται στις ιδιότητες του αγωγού (όπως σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα). Συνεπώς έχουμε:

$$H_{s} = K'I_{s}\eta\mu\left\{\omega t - \left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)\right\} = -K'I_{s}\sigma\nu\nu(\omega t - \phi) \qquad (4.25)$$

Όταν έχουμε πολύ καλό αγωγό, ισχύει  $Q = \omega L_s / r_s \rightarrow \infty$  και  $\phi \rightarrow \pi / 2$ , οπότε η φάση του δευτερεύοντος πεδίου θα έχει πρακτικά καθυστέρηση 180° (π) σχετικά με το πρωτεύον. Όταν πρόκειται για πολύ φτωχό αγωγό, ισχύει  $Q = \omega L_s / r_s \rightarrow 0$  και  $\phi \rightarrow 0$ , που συνεπάγεται ότι η καθυστέρηση φάσης του δευτερεύοντος πεδίου θα είναι π/2. Γενικά, η συνιστώσα  $H_s$  κυμαίνεται μεταξύ π/2 και π εκτός φάσης από τη συνιστώσα  $H_P$ .

Η συνιστώσα  $H_s$  με καθυστέρηση 180° από την  $H_P$ , είναι  $H_s\eta\mu\varphi$ , ενώ αυτή με καθυστέρηση 90° είναι  $H_s\sigma\nu\nu\varphi$ . Η πρώτη συνιστώσα (καθυστέρηση 180°) ονομάζεται πραγματική (real) ή εντός φάσης (in-phase), ενώ η δεύτερη περίπτωση (καθυστέρηση 90°) ονομάζεται φανταστική (imaginary) ή εκτός φάσης (out-of-phase) ή τετραγωνική (quadrature). Από την Εικόνα 4.1 μπορούμε να διατυπώσουμε και την εξής σημαντική εξίσωση:

$$\varepsilon\phi\phi = \left[\frac{\mathrm{Im}\{H_{S}\}}{\mathrm{Re}\{H_{S}\}}\right] \tag{4.26}$$

#### 4.1.δ Ελλειπτική πόλωση

Όταν έχουμε υπέρθεση πολλών μαγνητικών πεδίων (ημιτονοειδών) διαφορετικής φάσης και διεύθυνσης διάδοσης, το ολικό πεδίο που εν τέλει θα καταγραφεί από τον δέκτη κατά τη διάρκεια ηλεκτρομαγνητικών γεωφυσικών μετρήσεων, θα είναι ελλειπτικά πολωμένο, δηλαδή θα μεταβάλλει συνεχώς το πλάτος του και θα περιστρέφεται στο χώρο. Γνωρίζουμε ότι ισχύει:

$$H_{\rm P} = A \eta \mu \omega t$$
 (4.27)  $\kappa \alpha i \quad H_{\rm S} = B \sigma \upsilon v (\omega t - \phi)$  (4.28)

όπου A και B είναι συναρτήσεις της γεωμετρίας του πομπού, του αγωγού και του δέκτη. Επειδή ισχύει:

$$\sigma \upsilon v (\omega t - \phi) = \sigma \upsilon v \omega t \sigma \sigma \upsilon \phi + \eta \mu \omega t \eta \eta \phi = \left(1 - \frac{H_P^2}{A^2}\right)^{1/2} \sigma \upsilon v \phi + \frac{H_P \eta \mu \phi}{A} = \frac{H_S}{B} \qquad (4.29)$$

παίρνουμε:

$$\frac{H_{\rm P}^2}{A^2} + \frac{H_{\rm S}^2}{B^2} - \frac{2H_{\rm P}H_{\rm S}\eta\mu\phi}{AB} = \sigma \upsilon \upsilon^2 \phi \Longrightarrow \frac{H_{\rm P}^2}{A^2\sigma \upsilon \upsilon^2 \phi} + \frac{H_{\rm S}^2}{B^2\sigma \upsilon \upsilon^2 \phi} - \frac{2H_{\rm P}H_{\rm S}\eta\mu\phi}{ABB\sigma \upsilon^2 \phi} = 1 \quad (4.30)$$

που ουσιαστικά πρόκειται για εξίσωση μιας έλλειψης:  $Lz^2 - 2Mxz + Nx^2 = 1$ .

Στην προηγούμενη εξίσωση θα πρέπει να γίνουν δυο απλουστευτικές υποθέσεις. Η μια είναι ότι  $H_P$  και  $H_S$  είναι ορθογώνιες στο χώρο, κάτι που ουσιαστικά είναι λανθασμένο. Παραταύτα, η γωνία μεταξύ τους είναι  $\alpha \neq \pi/2$ , οπότε τα διανύσματα μπορούν να

αναλυθούν σε δυο ορθογώνιες συνιστώσες ,όπως  $H_Z = H_P + H_S \sigma \upsilon v \alpha$  και  $H_X = H_S \eta \mu \alpha$ . Η δεύτερη υπόθεση είναι ότι το  $H_S$  οφείλεται μονάχα στη διέλευση του ρεύματος μόνο από έναν αγωγό. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου θα υπάρχουν περισσότερα του ενός διανύσματα, με διαφορετικά πλάτη, κατευθύνσεις και φάσεις, υπάρχει η δυνατότητα απλούστευσης τους σε ένα διάνυσμα  $H_S$ .

Συνεπώς, η επικάλυψη των πεδίων παράγει ένα ελλειπτικά πολωμένο πεδίο, όπου το διάνυσμα είναι πεπερασμένο σε όλες τις περιπτώσεις και περιστρέφεται στο χώρο με συνεχείς εναλλαγές πλάτους, διαγράφοντας έτσι έλλειψη. Αυτή η έλλειψη μπορεί να εντοπίζεται σε κάθε επίπεδο του χώρου, παρότι θα πρέπει μόνο να σχηματίζει μικρή γωνία με το οριζόντιο ή το κάθετο επίπεδο, εφόσον ο κύριος άξονας της έλλειψης καθορίζεται από το  $H_P$  (επειδή  $H_P > H_S$ ).

Η εξίσωση (4.30) μπορεί να γραφτεί για δυο ειδικές περιπτώσεις:

Η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο της έλλειψης πόλωσης σε σχέση με την οριζόντια διεύθυνση (εικόνα 4.1α), ονομάζεται κλίση (dip) του ολικού πεδίου και η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας της έλλειψης με την αντίστοιχη οριζόντια ονομάζεται γωνία κλίσης (tilt) του πεδίου. Οι τιμές τους μπορούν να υπολογισθούν εύκολα αν θεωρήσουμε ένα κατακόρυφο πρωτεύον πεδίο, οπότε ανεξάρτητα της γωνίας μεταξύ του δευτερεύοντος πεδίου και της οριζόντιας διεύθυνσης, το επίπεδο πόλωσης θα είναι κατακόρυφο (κλίση 90°). η γωνία όμως μεταξύ του μεγάλου άξονα της έλλειψης και της





οριζόντιας διεύθυνσης δεν θα είναι 90°. Αζιμούθιο του πεδίου ονομάζουμε τη γωνία μεταξύ μιας καθορισμένης διεύθυνσης και της γραμμής διατομής του επιπέδου της έλλειψης με την οριζόντια διεύθυνση. Αυτές είναι οι χωρικές ιδιότητες του ολικού πεδίου.

# 4.1.ε Αμοιβαία επαγωγή.

Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο για τη μεταβολή φάσης (4.1.γ) και οφείλεται στην αλληλεπίδραση δυο κυκλωμάτων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον υπολογισμό του πλάτους σήματος στον δέκτη κατόπιν επηρεασμού και από τον αγωγό και τον πομπό. Εξομοιώνοντας και πάλι τον πομπό, τον αγωγό και τον δέκτη με τρία συζευγμένα πηνία, έχουμε αντίστοιχα τρεις διαφορετικούς συντελεστές αμοιβαίας επαγωγής,  $M_{II}$ ,  $M_A$  και  $M_{\Delta}$ . Έχει ήδη καταδειχθεί ότι το επαγόμενο ρεύμα είναι ίσο με:

$$i_{S} = -\frac{j\omega M_{TC}i_{P}}{r_{S} + j\omega L_{S}} = -\frac{M_{TC}}{L_{S}} \frac{(Q^{2} + jQ)i_{P}}{1 + Q^{2}}$$
(4.31)

όπου  $Q = \omega L_S / r_S$  σχετίζεται με τον αγωγό. Αυτό το ρεύμα, σε ροή, θα επάγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στον δέκτη που θα ισούται με:

$$e_{CR} = -j\omega M_{CR} \cdot i_{S} = \frac{j\omega M_{CR} M_{TC}}{L_{S}} \frac{(Q^{2} + jQ)i_{P}}{1 + Q^{2}}$$
(4.32)

Ταυτόχρονα, στον δέκτη το πρωτεύον πεδίο παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη:

$$e_{TR} = -j\omega M_{TR} i_P \qquad (4.33)$$

Αφού το δευτερεύον πεδίο μετράται μαζί με το πρωτεύον, θα είναι:

$$\frac{e_{CR}}{e_{TR}} = -\frac{M_{CR}M_{TC}}{M_{TR}L_S} \left(\frac{Q^2 + jQ}{1 + Q^2}\right) \qquad (4.34)$$

Η αμοιβαία επαγωγή μπορεί επίσης να γραφτεί συναρτήσει των συντελεστών συζευγμένων αυτεπαγωγών:

$$M_{CR} = k_{CR} (L_S L_R)^{1/2} \qquad (4.35)$$
$$M_{TC} = k_{TC} (L_S L_T)^{1/2} \qquad (4.36)$$
$$M_{TR} = k_{TR} (L_T L_R)^{1/2} \qquad (4.37)$$

όπου  $k_{CR}$ ,  $k_{TC}$  και  $k_{TR}$  είναι οι συντελεστές ζεύξης μεταξύ αγωγού-δέκτη, πομπούαγωγού και πομπού-δέκτη αντίστοιχα και  $L_T$  και  $L_R$  οι συντελεστές αυτεπαγωγής του δέκτη και του πομπού αντίστοιχα. Οπότε η εξίσωση (4.34), βάσει των εξισώσεων (4.35), (4.36) και (4.37) μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\frac{e_{CR}}{e_{TR}} = -\frac{k_{CR}k_{TC}}{k_{TR}} \left(\frac{Q^2 + jQ}{1 + Q^2}\right)$$
(4.38)

Αν και εξαλείφθηκε η παράμετρος  $L_S$ , το πρώτο σκέλος της εξίσωσης δεν απλοποιείται ιδιαίτερα διότι οι συντελεστές σύζευξης k εξαρτώνται κι αυτοί από τη γεωμετρία του συστήματος, που είναι πολύ σημαντική. Αυτό το πρώτο σκέλος της εξίσωσης ( $k_{CR}k_{TC}/k_{TR}$ ), ονομάζεται παράμετρος σύζευξης και έχει πολύ μικρή τιμή, αφού ο συντελεστής  $k_{TR}$  τείνει να είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τους άλλους δύο συντελεστές του αριθμητή, δεδομένου ότι πρακτικά η σύζευξη πομπού και δέκτη γίνεται μέσω αέρα, με μηδενική εξασθένηση.

#### 4.1.στ. Συνάρτηση απόκρισης.

Στην εξίσωση (4.38), το δεύτερο σκέλος της  $(Q^2 + jQ/1 + Q^2)$ , εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του αγωγού και τη συχνότητα. Η παράμετρος Qονομάζεται παράμετρος απόκρισης του αγωγού, ενώ το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης (4.38) ονομάζεται συνάρτηση απόκρισης.

Еа́v παραστήσουμε γραφικά σε διάγραμμα τη συνάρτηση απόκρισης σε σχέση με το Q, θα πάρουμε το διάγραμμα της Εικόνας 4.2 και δυο καμπύλες, μια για το πραγματικό μέρος της συνάρτησης και μια για το φανταστικό, όπου  $A = Q^2 / (1 + Q^2)$  και  $B = Q / (1 + Q^2)$ , με τα A και B να είναι πραγματικά.



Εικόνα 4.2: Συνάρτηση απόκρισης αγωγού σε συνεχές πεδίο (Telford et al. 1990 – after Grant & West, 1965)

Όταν το Q είναι πολύ μικρό, πραγματικό και φανταστικό μέρος της συνάρτησης είναι πολύ μικρά. Όσο η παράμετρος απόκρισης, Q, αυξάνεται, το φανταστικό κομμάτι αυξάνει αρχικά ταχύτερα και το πλάτος του είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό κλάσμα, μέχρι Q=1, όπου και τα δύο θα ισούται με 0,5. Από αυτό το σημείο και πέρα, το φανταστικό μέρος μειώνεται μέχρι να ξαναπάρει μηδενικές τιμές, σε μεγάλες τιμές του Q.

Όταν η τιμή του Q είναι ιδιαίτερα μικρή, η γωνία φάσης της συνάρτησης θα είναι ίση με  $\pi/2$ , όταν Q=1, θα είναι  $3\pi/4$  και θα αυξάνεται στο  $\pi$  για πολύ καλούς αγωγούς. Για  $0 \le Q \le 1$  η φανταστική συνιστώσα θα είναι μεγαλύτερη από την πραγματική, ενώ όταν  $1 \le Q \le \infty$  θα ισχύει το αντίστροφο.

Η σύγκριση της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας, είναι μια αξιόλογη ποιοτική εκτίμηση της αγωγιμότητας ενός στόχου (εφόσον είναι απομονωμένος), αφού οι καλοί αγωγοί έχουν μεγαλύτερη πραγματική συνιστώσα από φανταστική.

# 4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ VLF

Η μέθοδος VLF ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους ελεγχόμενης πηγής πεδίου συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μια μέθοδο μέτρησης της γωνίας κλίσης (εικόνα 4.3), που σχηματίζει ο μέγιστος άξονας της έλλειψης πόλωσης του ολικού πεδίου, σε σχέση με την οριζόντια διεύθυνση, και της ελλειπτικότητας. Η μέτρηση αυτή γίνεται με ένα συνδυασμό ίδιων αλλά κατακόρυφων μεταξύ τους πηνίων.



Εικόνα 4.3: Μεταβολή της γωνίας κλίσης θ, κατά μήκος τομής πάνω από αγωγό. (Παπαζάχος, 1986).

Χρησιμοποιείται ευρέως λόγω των φθηνών σχετικά οργάνων αλλά και της ευχρηστίας και ταχύτητας λήψης των μετρήσεων. Κυριότερες εφαρμογές της είναι ο προσδιορισμός κατακόρυφων υδροφόρων ή γεωθερμικών ζωνών, θειούχων κοιτασμάτων και γενικότερα η διερεύνηση τεκτονικών ζωνών, με τις πρώτες τις εφαρμογές να εντοπίζονται πίσω στο 1964.

# 4.2.α Πρωτεύον πεδίο

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η μέθοδος VLF χρησιμοποιεί τα χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικά σήματα (15-30 kHz), που προέρχονται από ισχυρούς στρατιωτικούς και ναυτιλιακούς πομπούς από όλο τον κόσμο. Οι σταθμοί αυτοί είναι έτσι κατανεμημένοι ώστε τουλάχιστον 2 από αυτούς να μπορούν να εντοπισθούν από κάθε σημείο της γης (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Μερικοί από τους μεγαλύτερους σταθμούς – πομπούς VLF και η κατανομή τους στη γη.

Στον Πίνακα 1 παρατίθενται μερικοί από τους κυριότερους σταθμούς εκπομπής VLF κυμάτων ανά τον κόσμο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

<u>Χώρα – Περιοχή</u>	<u>Κωδικός</u>	<u>Συχνότητα (kHz)</u>
Γαλλία, Le Blanc	HWU	18,3
Ιταλία, Tavolara	ICV	20,3
Γερμανία, Burlage	DHO38	23,3

Γαλλία, Assisse	FTA	20,9 & 16,8
Ηνωμ. Βασίλειο, Rugby	GQD – GBZ – GBR	22,1 - 19,6 - 16.0 &22,6
Παναμάς. Balboa	NBA	24,0
Н.П.А., Oso Wash	NLK	24,5
Γαλλία, Croix	FUO	15,1
Ρωσία, Moscow	UMS	17,1
Nopβηγία, Helgeland	JXN	16,4
Ιαπωνία, Yokosukaichi	NDT	17,4

#### 4.2.α.1 Κατακόρυφο ηλεκτρικό δίπολο

Ουσιαστικά οι VLF πομποί είναι κατακόρυφα καλώδια εκατοντάδων μέτρων ύψους, οι οποίοι λειτουργούν ως πολωμένα ηλεκτρικά δίπολα και εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία σε ιδιαίτερα μεγαλύτερες αποστάσεις από ένα μήκος κύματος διαδίδονται ως συνδυασμός ενός κύματος εδάφους κι ενός κύματος αέρος. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει το επιφανειακό κύμα εδάφους που διαδίδεται, όταν έχουμε ανακλάσεις και διαθλάσεις του από την ιονόσφαιρα. Οπότε, σε μεγάλες αποστάσεις από την κεραία VLF τα δύο κύματα φαίνεται ως ένα και η εξασθένηση είναι πολύ μικρή.



Εικόνα 4.5: Πεδίο κατακόρυφου ηλεκτρικού δίπολου σε απόμακρο σημείο (Telford et al., 1990).

Στην εικόνα 4.5 παρατηρούμε ένα κατακόρυφο ηλεκτρικό δίπολο, με τις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου  $E_r$  και  $E_{\theta}$ , για σφαιρικές συντεταγμένες, και την μαγνητική συνιστώσα  $H_{\varphi}$ . Το διανυσματικό δυναμικό, P, στοιχειώδους ρεύματος *Idl* δίνεται από την εξίσωση (σφαιρικών συντεταγμένων):

$$P = \frac{\mu \cdot Idl e^{-j\omega t} * i_z}{4\pi r} = \frac{\mu \cdot Idl e^{-j\omega t} (\sigma \upsilon v \theta i_r - \eta \mu \theta i_\theta)}{4\pi r} \qquad (4.39)$$

όπου η ροή του ρεύματος γίνεται κατά τον άξονα z, οπότε  $t^* = t - \frac{r}{c} = t - r(\mu \varepsilon)^{1/2}$  με c την ταχύτητα του φωτός (ίση με 3\*10<sup>8</sup> m/s). Το διανυσματικό τμήμα,  $\varphi'$ , προκύπτει από το άθροισμα του διανυσματικού δυναμικού και ένα όρο που σχετίζεται με την διαφορά φάσης για τα χρονικά μεταβαλλόμενα δυναμικά και δίνεται από την εξίσωση:

$$\phi' = \frac{Idl \cdot \sigma \upsilon \nu \theta \left(\frac{\omega}{\mathrm{cr}} + \frac{1}{r^2}\right) \cdot e^{-j\omega t^*}}{4\pi\varepsilon\omega}$$
(4.40)

Έτσι, προκύπτουν οι εξισώσεις των δυο ηλεκτρικών συνιστωσών και της μιας μαγνητικής, που για τις σφαιρικές συντεταγμένες είναι:

$$H_{\phi} = \frac{Idl \eta \mu \partial e^{-j\omega t *} \left(\frac{\omega}{cr} + \frac{1}{r^{2}}\right)}{4\pi} \qquad (4.41)$$
$$E_{r} = Idl \sigma \upsilon \upsilon \partial e^{-j\omega \sigma *} \times \frac{\left(\frac{\omega}{cr} + \frac{1}{r^{2}}\right)}{2\pi\varepsilon} \qquad (4.42)$$
$$E_{\theta} = Idl \eta \mu \partial e^{-j\omega \sigma *} \times \frac{\left(\frac{j\omega}{c^{2}r} + \frac{1}{cr^{2}} - \frac{j}{\omega r^{3}}\right)}{4\pi\varepsilon} \qquad (4.43)$$

Οι τρεις αυτές συνιστώσες μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά και για κυλινδρικές συντεταγμένες, εάν αμελήσουμε τους όρους  $1/r^2$  και  $1/r^3$ :

$$E_{\rho} \approx \frac{3j\omega\mu Idlz\rho e^{-j\omega t*}}{4\pi \left(\rho^{2} + z^{2}\right)^{3/2}} \qquad (4.44)$$
$$E_{z} = 0 \qquad (4.24)$$
$$H_{\phi} = \frac{j\omega(\mu\varepsilon)^{1/2} Idl\rho e^{-j\omega t*}}{4\pi \left(\rho^{2} + z^{2}\right)} \qquad (4.45)$$

Το VLF σύστημα είναι ειδικά σχεδιασμένο για μεγάλες αποστάσεις διάδοσης κυμάτων. Το πλάτος των VLF κυμάτων μειώνεται μόνο κατά 1/r όταν η ισχύς του πομπού κυμαίνεται από 100 ως και 1000 kW, καθίσταται δυνατό να ανιχνευτούν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, που μπορεί να φτάσουν και το ήμισυ της Γης. Έτσι, σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή, η συνιστώσα  $E_r$  θα είναι αμελητέα και το διάνυσμα **E** θα εμφανίζεται σχεδόν κατακόρυφο. Ωστόσο, υπάρχει οριζόντια συνιστώσα στην διεύθυνση διάδοσης και οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου είναι οριζόντιοι ομόκεντροι κύκλοι σχετικά με την κεραία VLF (εικόνα 4.6). Σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων το πεδίο είναι πρακτικά ενιαίο και διαδίδεται παράλληλα προς την επιφάνεια της Γης, διεισδύοντας κατακορύφως ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης.



Εικόνα 4.6: Σκαρίφημα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στη μέθοδο VLF, σε αγωγό παράταξης παράλληλης με τη διεύθυνση διάδοσης του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου (Τζάνης, 2003).

# 4.2.β Επιδερμικό βάθος

Βασικό στοιχείο σε μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF είναι το επιδερμικό βάθος (skin depth) και το βάθος διείσδυσης, άρα και διερεύνησης, του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το επιδερμικό βάθος σχετίζεται με την εξασθένιση του πλάτους του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, κατά τη διάδοση του στο υπέδαφος, σε σχέση με την αρχική του τιμή. Το επιδερμικό βάθος είναι σε τέτοιο βάθος από την επιφάνεια, όπου το πεδίο έχει μειωθεί στο *l/e* της αρχικής τιμής του (ή περίπου στο 37%). Σε ομοιογενή περιβάλλοντα η εξασθένηση του κύματος είναι εκθετική. Σε βάθη μεγαλύτερα του επιδερμικού, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειας του, καθιστώντας το αδύνατο να δημιουργήσει επαγωγικά ρεύματα σε κάποιον αγωγό που βρίσκεται σε αυτά τα βάθη.

Το επιδερμικό βάθος,  $\delta$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega\mu\sigma}\right)^{1/2} \qquad (4.46)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα (σε H/m), σ η αγωγιμότητα (σε S/m) και  $\omega = 2\pi f$  (σε rad/sec) με f την συχνότητα (σε Hz). Συνήθως θεωρείται ότι  $\mu = \mu_0 = 4\pi x \ 10^{-7} H/m$ , όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, οπότε η εξίσωση (4.46) θα γραφτεί ως εξής:

$$\delta = 500 \left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2} \qquad (4.47)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση σε Ohm.m. Συνεπώς, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από τις ειδικές αντιστάσεις του διερευνώμενου υπεδάφους αλλά και τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα. Το επιδερμικό βάθος, μειώνεται όταν μειώνεται η ειδική αντίσταση του περιβάλλοντος μέσου και όταν αυξάνεται η συχνότητα. Η μέθοδος VLF χρησιμοποιείται για διερεύνηση σε μέτρια βάθη, συνήθως όχι πάνω από 100μ. Στον Πίνακα 2 παρατίθενται διάφορες τιμές ειδικών αντιστάσεων αλλά και συχνοτήτων, με τα αντίστοιχα βάθη διερεύνησης για τη μέθοδο VLF. Εμπειρικά, το βάθος διερεύνησης υπολογίζεται περίπου στο ήμισυ του επιδερμικού βάθους.

<u>Πέτρωμα - Υλικό</u>	<u>Ειδική αντίσταση (Ohm.m)</u>	<u>Βάθος διείσδυσης (μ.)</u>
Γρανίτης	> 5.000	> 300
Άργιλος	10 - 100	15 - 40
Στεγνή Άμμος	200 - 5.000	50 - 300
Υγρή άμμος	50 - 200	30 - 60
Γλυκό νερό	50 - 200	30 - 60
Αλμυρό νερό	1 - 10	4 - 15

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Σε περιπτώσεις ύπαρξης ιδιαίτερα αγώγιμων επιφανειακών σχηματισμών (ρ<100 Ohm.m) μπορεί να επέλθει δραστική μείωση του βάθους διείσδυσης του κύματος, δημιουργώντας έντονα προβλήματα στις μετρήσεις.

#### 4.2.γ Επίδραση τοπογραφικού ανάγλυφου.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι το επαγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από έναν αγωγό τείνει να διεισδύει κατακόρυφα προς την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, όταν υπάρχουν τοπογραφικές ανωμαλίες στην περιοχή λήψη των μετρήσεων VLF, η διείσδυση θα γίνεται κάθετα με τη εκάστοτε μέση τοπική κλίση του εδάφους. Αντιθέτως, το πρωτεύον πεδίο παραμένει οριζόντιο.

Σημαντικό ρόλο, παίζει και η σχέση μεταξύ διεύθυνσης όδευσης και διεύθυνσης της παράταξης της τοπογραφίας. Όταν η παράταξη της τοπογραφίας είναι παράλληλη προς
την διεύθυνση διάδοσης του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος (εικόνα 4.7), το άνυσμα του ολικού μαγνητικού πεδίου τείνει να γίνει παράλληλο με την τοπογραφία και έτσι δεν παραμορφώνεται καθώς και η γωνία κλίσης που τελικά μετρείται, εφόσον το επιδερμικό βάθος είναι μικρότερο από το μέγεθος της τοπογραφικής ανωμαλίας. Εάν από την άλλη μεριά, η παράταξη της τοπογραφίας είναι κάθετη προς την διεύθυνση διάδοσης του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τότε οι μετρήσεις της γωνίας κλίσης υφίστανται την επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου.



Εικόνα 4.7: Η επίδραση των τοπογραφικών ανωμαλιών ανάλογα με την διεύθυνση όδευσης
Α) Διεύθυνση διάδοσης του κύματος VLF παράλληλη με την παράταξη της τοπογραφίας
B) Διεύθυνση διάδοσης του κύματος VLF κάθετη με την παράταξη της τοπογραφίας (Τζάνης, 2003).

Γενικότερα, σχετικά με την επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου στις μετρήσεις VLF, θεωρείται ότι οι μετρούμενες τιμές στο δέκτη θα αυξάνονται όταν η όδευση γίνεται προς τ' ανάντη μιας πλαγιάς, ενώ θα μειώνονται όταν η όδευση γίνεται προς τα κατάντη της πλαγιάς. Αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης του τοπογραφικού ανάγλυφου, είναι η εμφάνιση στην πραγματική συνιστώσα ενός σημείου καμπής στην κορυφή μιας κλιτύος ή στο βαθύτερο σημείο μιας κοιλάδας.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η επίδραση της τοπογραφίας έχουν προταθεί κάποιες διαδικασίες φιλτραρίσματος των μετρήσεων υπαίθρου από κάποιους επιστήμονες, οι οποίες θα αναλυθούν αργότερα.

# 4.2.δ Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου VLF είναι:

- Τα σχετικά φτηνά, εύχρηστα και φορητά όργανα αλλά και η χρήση του σήματος
   στρατιωτικών πομπών (δεν χρειάζεται πομπός), μειώνει την πολυπλοκότητα του
   συστήματος και δεν απαιτούνται πολλά άτομα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Η γρήγορη ταχύτητα λήψης των μετρήσεων.
- Αξιόλογη διεισδυτική ικανότητα, ειδικά σε περισσότερο αντιστατικά σώματα.
- Η δυνατότητα εντοπισμού σωμάτων μικρών διαστάσεων, λόγω των σχετικά υψηλών συχνοτήτων των πεδίων
- Λήψεις μετρήσεων σε περιοχές με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, αφού υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσης τοπογραφικών επιδράσεων.

Τα μειονεκτήματα που έχει η μέθοδος VLF είναι τα εξής:

- Επηρεασμός των μετρήσεων από ηλεκτροφόρα καλώδια και υπεδαφικές τεχνητές κατασκευές.
- Η δυσκολία διάκρισης των ανωμαλιών που οφείλονται σε αλλαγές της αγωγιμότητας των υπερκείμενων στρωμάτων από ανωμαλίες που δημιουργούνται εξαιτίας αγώγιμου σώματος εντός του γεωλογικού υποβάθρου.
- Προβλήματα διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε δομές όπου υπάρχουν πολύ αγώγιμα επιφανειακά στρώματα, λόγω απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

# 4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ VLF

Γνωρίζουμε ήδη ότι κατά την διάρκεια των μετρήσεων VLF σε μία περιοχή, όταν η μαγνητική συνιστώσα του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος τμήσει κάθετα (Εγκάρσια Μαγνητική πόλωση) έναν υπό κλίση αγωγό, θα παρατηρηθεί μια ανωμαλία στην καμπύλη των μετρήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, η ανωμαλία θα αφορά την καμπύλη της πραγματικής συνιστώσας (γωνίας κλίσης). Η πιο απλή περίπτωση αναφέρεται σε μεμονωμένο υπό κλίση αγώγιμο σώμα φυλλοειδούς μορφής και πεπερασμένης διάστασης, που γεωλογικά συνήθως αντιστοιχεί σε υδροφόρο ή μεταλλοφόρο ρήγμα ή και φλέβα. Σε αυτή την περίπτωση, η καμπύλη θα χαρακτηρίζεται από ένα θετικό μέγιστο, το οποίο θα εντοπίζεται πριν από το αγώγιμο σώμα, αλλά και ένα αρνητικό ελάχιστο, που θα εντοπίζεται μετά τη θέση του αγωγού (εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Τυπική καμπύλη μετρήσεων VLF (πραγματική συνιστώσα), για περίπτωση μεμονωμένου κεκλιμένου αγώγιμου σώματος φυλλοειδούς μορφής.

Από την άλλη μεριά, η φανταστική συνιστώσα εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του αγώγιμου σώματος αλλά και των περιβαλλόντων και υπερκείμενων υλικών. Ανάλογα με το πλήθος των αγώγιμων στόχων, το βάθος, την κλίση τους, τη γεωμετρία τους και τις ειδικές αντιστάσεις αγωγού και περιβαλλόντων υλικών διαμορφώνεται και η καμπύλη.

# 4.3.α Ποιοτική ερμηνεία δεδομένων VLF

Προκειμένου να βγουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη η ποιοτική ερμηνεία που μπορεί να εφαρμοστεί στις καμπύλες που διαγράφονται από τα δεδομένα. Έτσι, ανάλογα με τη μορφή των καμπύλων των δεδομένων υπαίθρου και έχοντας υπόψη κάποια θεωρητικά μοντέλα, μπορούν να βγουν ποιοτικά στοιχεία για την κλίση, το βάθος αλλά και τη διάσταση του αγώγιμου σώματος, εφόσον παρουσιάζεται ανωμαλία που να καταδεικνύει κάτι τέτοιο.



**Εικόνα 4.9**: Μεταβολή της καμπύλης μετρήσεων VLF συναρτήσει της κλίση του φυλλοειδούς αγωγού (*Telford et al., 1990*).

Στις Εικόνες 4.9 ως 4.11, παρατίθενται οι διαφοροποιήσεις των διαγραμμάτων μετρήσεων VLF, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων του στόχου, που πρόκειται για την απλούστερη <u>περίπτωση φυλλοειδούς κεκλιμένης δομής</u>. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4.9, απεικονίζεται η μεταβολή της καμπύλης VLF για δυο διαφορετικές κλίσεις του φυλλοειδούς αγωγού, 30° και 60°. Παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλη η κλίση του αγωγού, τόσο μεγαλύτερο πλάτος εμφανίζεται η οροφή (ή το ρηχότερο σημείο) του αγωγού.

Στην Εικόνα 4.10, απεικονίζεται η μεταβολή της καμπύλης υπαίθρου συναρτήσει της κατακόρυφης διάστασης του αγωγού. Παρατηρείται ότι για μικρότερες διαστάσεις, τα

τοπικά ακρότατα εμφανίζονται σχετικά πιο ήπια σε πλάτος, ενώ για μεγαλύτερες διαστάσεις οι καμπύλες εμφανίζονται με μεγαλύτερο πλάτος αλλά σχετικά πιο εξομαλυμένους λοβούς τοπικών ακρότατων.



Εικόνα 4.10: Μεταβολή της καμπύλης μετρήσεων VLF συναρτήσει της κατακόρυφης διάστασης του κεκλιμένου φυλλοειδούς αγωγού (*Telford et al., 1990*).

Στην Εικόνα 4.11, φαίνεται η μεταβολή της καμπύλης υπαίθρου συναρτήσει του βάθους εντοπισμού του αγωγού, όπου παρατηρείται ότι όσο ρηχότερα εντοπίζεται ο αγωγός, τόσο πιο έντονη είναι η ανωμαλία, με απότομη κλίση μετάβασης και μεγαλύτερα τοπικά ακρότατα. Όσο πιο βαθιά φαίνεται να βρίσκεται ο αγωγός, η ανωμαλία που θα προκαλέσει στην καμπύλη θα είναι σχετικά ηπιότερη, δηλαδή με μικρότερα τοπικά ακρότατα αλλά, πιο ήπια μετάβαση μεταξύ τους και πλατύτερους λοβούς.

Τέλος, στην Εικόνα 4.12 παρατηρούμε τη διαφοροποίηση της καμπύλης μετρήσεων VLF ανάλογα με την διεύθυνση όδευσης ως προς την διεύθυνση της παράταξης του αγώγιμου σώματος για σταθερό βάθος ταφής. Για μικρότερη γωνία μεταξύ διεύθυνση όδευσης και παράταξης, εμφανίζεται εντονότερη ασυμμετρία στην καμπύλη.



Εικόνα 4.11: Μεταβολή της καμπύλης μετρήσεων VLF συναρτήσει του βάθους εντοπισμού του κεκλιμένου φυλλοειδούς αγωγού (*Telford et al., 1990*).



**Εικόνα 4.12**: Μεταβολή της καμπύλης μετρήσεων VLF συναρτήσει της διεύθυνσης όδευσης πάνω από σχετικά άπειρο κατακόρυφο φυλλοειδή αγωγό (*Telford et al., 1990*).

Βέβαια υπάρχει και μια άλλη περίπτωση εμφάνισης παρεμφερών ανωμαλιών σε καμπύλες VLF, που δεν οφείλονται στην ύπαρξη θαμμένου αγωγού αλλά στην ύπαρξη κατακόρυφων γεωλογικών επαφών, μεταξύ διαφορετικής ειδικής αντίστασης στρωμάτων. Σε αυτή την περίπτωση, η καμπύλη είναι ανέρχεται μεταβαίνοντας από την

αντιστατικότερη στην αγωγιμότερη πλευρά. Πάνω από την επαφή η πραγματική συνιστώσα εμφανίζει τοπικό μέγιστο ενώ η φανταστική συνιστώσα, τοπικό ελάχιστο (εικόνα 4.13<sup>A</sup>). Το αντίστροφο συμβαίνει για την μετάβαση από την αγωγιμότερη στην αντιστατικότερη πλευρά (εικόνα 4.13<sup>B</sup>).



Εικόνα 4.13: Ανωμαλίες VLF πάνω από κατακόρυφες γεωλογικές επαφές στρωμάτων διαφορετικών ειδικών αντιστάσεων (*Telford et al., 1990*).

### 4.3.β Ημι-Ποσοτική ερμηνεία

Μετά την ποιοτική ερμηνεία, ακολουθεί η ημί-ποσοτική ερμηνεία με την χρήση αλγορίθμων και λογισμικών προγραμμάτων που στηρίζονται πάνω στους πρώτους. Μέσω αυτής της ημι-ποσοτικοποίησης, παίρνουμε διδιάστατα, αλλά ακόμα και τρισδιάστατα μοντέλα, που ικανοποιούν τις μετρήσεις υπαίθρου. Στην παρούσα εργασία θα περιοριστούμε στη διδιάστατη ποσοτικοποίηση.

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η ημι-ποσοτική ερμηνεία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των φίλτρων *Fraser* και *Karous-Hjelt*, αφού πρώτα πραγματοποιήθηκαν τοπογραφικές διορθώσεις στα δεδομένα υπαίθρου, με τη μέθοδο που πρότειναν οι *Baker & Mayers* και *Eberle*. Ακολούθως, κατασκευάστηκαν και οι τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος, που στηρίζονται στην εφαρμογή του

φίλτρου Karous-Hjelt για διαφορετικά βάθη (Karous and Hjelt, 1983; Ogilvy R.D. and Lee A.C., 1989;1991).

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι πριν την εφαρμογή του οποιουδήποτε φίλτρου, οι καμπύλες των δεδομένων εξομαλύνθηκαν, όπως γενικά προτείνεται, προκειμένου να απαλειφθούν τυχόν πλευρικές μεταβολές από τυχαία επαγόμενα ρεύματα. Χρησιμοποιήθηκε εξομάλυνση τριών σημείων, που δίνεται από τον τύπο  $a_v=(a_{v-1}+2a_v+a_{v+1})/4$ .

Για την εφαρμογή των προαναφερόμενων φίλτρων, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά *KHFFILT, IXVLF* και *RAMAG*, καθώς και λογιστικά φύλλα excel.

### <u>4.3.β.1 Τοπογραφικές διορθώσεις</u>

Όπως ήδη έχει προαναφερθεί (βλ. 4.2.γ), το τοπογραφικό ανάγλυφο έχει αποδειχτεί ότι επηρεάζει τις μετρήσεις VLF. Γενικά, φαίνεται ότι η τοπογραφική επίδραση είναι ανάλογη με την κλίση της περιοχής, αφού τα πεδία VLF διεισδύουν κάθετα προς την τοπική κλίση του εδάφους. Με την επίδραση της τοπογραφίας στις μετρήσεις VLF έχουν ασχοληθεί διάφοροι επιστήμονες, εκ των οποίων τέσσερις φαίνεται να έχουν προτείνει και κάποιες τεχνικές ή αλγόριθμους απαλοιφής αυτής της επίδρασης, που αναλύονται ακολούθως.

Ο πρώτος που ασχολήθηκε με τις τοπογραφικές επιδράσεις των μετρήσεων VLF ήταν ο *Whittles*, το 1969, που πρότεινε δύο (2) τρόπους απαλοιφής των. Ο πρώτος τρόπος ήταν γραφικός και επρόκειτο για ομαλοποίηση των καταγραφέντων γωνιών κλίσης θεωρώντας ότι οι κλίσεις οφείλονταν στο τοπογραφικό ανάγλυφο. Ως δεύτερο τρόπο, πρότεινε τον υπολογισμό και την προβολή της πρώτης παραγώγου της πραγματικής συνιστώσας των δεδομένων υπαίθρου, κάτι το οποίο είχε αποτελέσματα μόνο σε περιοχές ομοιόμορφων κλίσεων. Με αυτόν τον τρόπο, η διάκριση μιας πραγματικής ανωμαλίας από ένα θαμμένο αγωγό και μιας ψευδό-ανωμαλίας προκαλούμενης από την τοπογραφία ενός τοπικού λόφου, δεν ήταν εφικτή.

Το 1978, ο *Karous M.R* πρότεινε μια διαδικασία για τον αναλυτικό υπολογισμό της τοπογραφικής επίδρασης για τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους με απομακρυσμένη πηγή, η οποία όμως, απαιτεί αρκετούς υπολογισμούς. Αυτό την καθιστά δύσχρηστη και μη εφαρμόσιμη κατά τις μετρήσεις υπαίθρου.

Μετά από ένα χρόνο, το 1979, οι *Baker H.A* και *Myers J.O*, μετά από μια σειρά πειραματικών μοντέλων (εικόνα 4.14) πρότεινε έναν απλούστερο τρόπο για την τοπογραφική διόρθωση της πραγματικής συνιστώσας. Στην εργασία του αυτή, ενισχύεται η εκδοχή της επίδρασης ανάλογα με την κλίση του εδάφους. Προκειμένου να γίνουν οι διορθώσεις στα πειραματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, υιοθετήθηκαν δυο τεχνικές. Πρώτα, θεωρώντας τα δεδομένα ίσα με την προτεινόμενη γωνία κλίσης του πηνίου και έπειτα υπολογίζοντας τον μέσο όρο των τιμών της πραγματικής συνιστώσας, χρησιμοποιώντας τα ως δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρήθηκαν και φαινόμενα μικρής ενίσχυσης (για κλίσεις 15°-30°) ή εξασθένησης (για κλίση 10°) των ανωμαλιών των υπεδαφικών αγωγών.



# ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Κλίση (πηνίου πεδίου)	dR%	Κλίση (μοντέλου)	dR%				
				0	0,0	0	0,0
				5	6,0	5	6,0
10	12,0	10,9	13,0				
15	18,0	14,6	17,4				
20	23,8	19,1	23,2				
25	29,9	24,9	29,9				
30	36,0	29,3	35				

**Εικόνα 4.14**: Πειραματικά μοντέλα πραγματικής συνιστώσας για διάφορες κλίσεις

Στον Πίνακα 3, φαίνονται οι μέγιστες αποκλίσεις dR για διάφορες κλίσεις μέχρι 30°, όπου dR είναι η διαφορά σε R% μεταξύ του μέγιστου της καμπύλης VLF για τη συγκεκριμένη κλίση και του μέγιστου της καμπύλης για μηδενική τοπογραφική κλίση (οριζόντια). Από τα δύο σετ του Πίνακα 3, κατασκευάστηκε το διάγραμμα της Εικόνας 4.15, το οποίο χρησιμεύει για τον υπολογισμό της τοπογραφικής διόρθωσης. Αφού υπολογίσουμε τους μέσους όρους των διαδοχικών σταθμών μέτρησης της ω, τον καταγράφουμε στο μέσο της απόστασης τους.

Έπειτα, από το διάγραμμα της Εικόνας 4.15, γνωρίζοντας την κλίση της περιοχής, προσδιορίζουμε την τοπογραφική διόρθωση, που προσθέτουμε ή αφαιρούμε στον μέσο όρο του ενδιάμεσου σημείου, που υπολογίσαμε πιο πριν. Στην περίπτωση κατηφορικού ανάγλυφου, η τοπογραφική διόρθωση προστίθεται στον μέσο όρο της πραγματικής συνιστώσας, ενώ στην περίπτωση *ανηφορικού ανάγλυφου*, αφαιρείται. Έτσι, ο τύπος της τοπογραφικής διόρθωσης που προτείνουν οι **Baker &Myers** είναι:  $\frac{(R_1\% + R_2\%)}{2} \pm T.\Delta$ , όπου  $R_1$  και  $R_2$  οι τιμές πραγματικής συνιστώσας των δυο διαδοχικών σταθμών (προτεινόμενη απόσταση 20μ) και T.Δ. η τοπογραφική διόρθωση που προκύπτει από το

διάγραμμα.



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα συσχέτισης γωνίας κλίσης και dR (Baker H.A and Myers J.O, 1980)

Τέλος, το 1981, ο *Eberle D*., δημοσίευσε έναν τρόπο εφαρμογής της τοπογραφικής διόρθωσης και για τις δύο συνιστώσες των μετρήσεων VLF, της γωνίας κλίσης και της

εκκεντρικότητας. Πραγματοποιώντας πειράματα σε μη στρωματοποιημένα υπεδάφη με απουσία υπεδαφικών αγωγών, συναρτήσει της κλίσης, κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του πρωτεύοντος κύματος VLF, κατασκεύασε ένα νομογράφημα (εικόνα 4.16), στηριζόμενος στις διαφορές των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών, εξαιτίας της τοπογραφίας, χρησιμοποιώντας την εξίσωση που δίνει τη γωνία πρόσπτωσης:

$$\varepsilon\phi\tau = \varepsilon\phi\tau' \cdot \frac{\eta\mu\xi_2}{\eta\mu\xi_1} \tag{4.48}$$

Όπου τ΄ η φαινόμενη γωνία πρόσπτωσης βάσει τοπογραφικών χαρτών,  $\xi_1$  η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του πρωτεύοντος μαγνητικού κύματος και της παράταξης της μορφολογίας και  $\xi_2$  η γωνία μεταξύ της τομής μετρήσεων και της παράταξης της μορφολογίας.



**Εικόνα 4.16**: Διάγραμμα συσχέτισης πραγματικής (εφφ<sub>top</sub>) και φανταστικής (q<sub>top</sub>) συνιστώσας, συναρτήσει της πραγματικής γωνίας πρόσπτωσης τ. (Τροποποιημένο από Eberle, 1981).

Από αυτό το διάγραμμα, γνωρίζοντας τη γωνία κλίσης (90-τ), μπορεί να υπολογισθεί η τοπογραφική διόρθωση για τις δυο συνιστώσες. Οι διορθωμένες τιμές γωνίας κλίσης που προκύπτουν, δεν διαφέρουν ιδιαίτερα με τις αντίστοιχες από την εφαρμογή της διόρθωσης των **Baker & Myers**, και ειδικά για γωνίες μέχρι 15° και γωνίες πρόπτωσης κύματος μέχρι 75°.

Εάν θεωρήσουμε ότι οι γωνίες  $\xi_1$  και  $\xi_2$  είναι 90°, τότε η εξίσωση 4.48 απλοποιείται και ουσιαστικά προκύπτει ότι η γωνία πρόπτωσης τ ισούται με την κλίση της τοπογραφίας. Αυτή η παραδοχή είναι κοινή και ουσιαστικά προκύπτει από τις προϋποθέσεις της σωστής διαδικασίας λήψης των μετρήσεων υπαίθρου, που προτείνουν η όδευση να τέμνει κάθετα την παράταξη της μορφολογίας ( $\xi_2=90^\circ$ ) και ο πομπός VLF να τοποθετείται κάθετα στην τομή, ώστε να το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο (+90°) να έχει την διεύθυνση της όδευσης και εφόσον αυτή είναι κάθετη στην μορφολογία, όπως προαναφέραμε, θα είναι  $\xi_1=90^\circ$ .

## <u>4.3.β.2 Φίλτρο κατά Fraser</u>

Το 1969, ο *Fraser*, πρότεινε έναν απλό αριθμητικό διαφορικό φίλτρο που θα διευκόλυνε την ερμηνεία των καμπύλων VLF. Κατά την εφαρμογή του φίλτρου αυτού, <u>τα</u> σημεία καμπής ή μηδενικά σημεία διάβασης, που υποδείκνυαν πιθανούς υπεδαφικούς αγωγούς, σε μια καμπύλη VLF, μετατρέπονται σε κορυφές (εικόνα 4.17), διευκολύνοντας τον προσδιορισμό αυτών αλλά και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών. Επίσης, αφαιρεί τις τοπογραφικές επιδράσεις με μήκη κύματος μεγαλύτερο των προσδιορισθέντων αγωγών, εάν αυτές υφίστανται. Το φίλτρο εφαρμόζεται σε 4 διαδοχικά διακριτά σημεία της καμπύλης VLF και ο τύπος που εφαρμόζεται είναι:

$$f_{23} = (M_3 + M_4) - (M_1 + M_2) \tag{4.48}$$

όπου  $M_i$  η μέτρηση στο σταθμό *i*. Η υπολογισθείσα τιμή προβάλλεται στο ήμισυ της απόστασης μεταξύ  $M_2$  και  $M_3$ . Προκειμένου οι θετικές ανωμαλίες να αντιστοιχούν και σε θετικές κορυφές – ακρότατα, το φίλτρο πρέπει να αντιστραφεί και να πάρει τη μορφή

$$f_{2,3} = (M_1 + M_2) - (M_3 + M_4) \qquad (4.48-\beta)$$

Τα χαρακτηριστικά του φίλτρου είναι τα εξής:

- Προσθέτει στις μετρήσεις 90°
- Ο θόρυβος με μήκος κύματος ίσο με την ισο-απόσταση των σταθμών μέτρησης αφαιρείται πλήρως.
- Μέγιστα πλάτη παρατηρούνται για μήκη κύματος 75 μέτρων ή πενταπλάσια της ισο-απόστασης των σταθμών μέτρησης.

Μετά την εφαρμογή του φίλτρου *Fraser* υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής και χαρτών ισόβαθμων καμπύλων, εφόσον υπάρχουν παράλληλες τομές VLF σε μια περιοχή, δεδομένου ότι δεν θα υπάρχουν μετά το φιλτράρισμα αρνητικές τιμές.



Εικόνα 4.17: Καμπύλη VLF μετά την εφαρμογή του φίλτρου κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### 4.3.β.3 Φίλτρο κατά Karous-Hjelt

Το 1983, οι Karous-Hjelt, πρότειναν ένα διακριτό γραμμικό φίλτρο για τα δεδομένα VLF, που ουσιαστικά πρόκειται για μια προέκταση του προαναφερθέντος φίλτρου κατά *Fraser*, χρησιμοποιώντας έξι (6) διακριτά σημεία και με ακρίβεια 8%. Το αποτέλεσμα εκφράζεται σε **ισοδύναμη πυκνότητα ρεύματος** σε συγκεκριμένο βάθος, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει δευτερεύον μαγνητικό πεδίο ίσο με αυτό που μετρήθηκε. Παρόμοια με το φίλτρο *Fraser* και αυτό το φίλτρο μετατρέπει τα μηδενικά σημεία διάβασης, σε κορυφές (εικόνα 4.17). Οι ανωμαλίες θεωρούμε ότι προέρχονται από επιμηκυμένους αγωγούς, κάθετους στη γραμμή όδευσης.

Μαθηματικά το συμμετρικό φίλτρο για βάθος z δίδεται ως εξής:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} \cdot \overline{I_a}(0) = -0.102 \cdot M_{-3} + 0.059 \cdot M_{-2} - 0.561 \cdot M_{-1} + 0.561 \cdot M_1 - 0.059 \cdot M_2 + 0.102 \cdot M_3$$

$$(4.49) \quad \text{kat} \quad \overline{I}(0) = \frac{1}{2} \left[ I\left(\frac{\Delta x}{2}\right) + I\left(-\frac{\Delta x}{2}\right) \right] \quad (4.50).$$

όπου  $M_i$  η μέτρηση στο σταθμό I,  $\Delta x$  η απόσταση μεταξύ των σημείων, που καθορίζεται από το βάθος διερεύνησης που θέλουμε να επιτύχουμε. Εάν αντιστρέψουμε

τα πρόσημα των συντελεστών τις παραπάνω εξίσωσης, οι θετικές ανωμαλίες θα αντιστοιχούν και σε θετικές κορυφές.

# 4.3.β.4 Τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος

Οι ψευδο-τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος (Karous and Hjelt, 1983; Ogilvy R.D. and Lee A.C., 1989;1991) προκύπτουν από την διαδοχική εφαρμογή του φίλτρου Karous-Hjelt για διάφορα βάθη. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του φίλτρου από όλα τα βάθη, προκύπτει ουσιαστικά πληροφορία και για τη διάσταση του βάθους (εικόνα 4.18). Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να εκμαιευτούν πληροφορίες για την κλίση αλλά και το βάθος μέχρι το οποίο εκτείνεται ένας αγωγός.



Εικόνα 4.18: Ψευδο-τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος ( από την εφαρμογή του φίλτρου Karous and Hjelt για διάφορα βάθη .

### 4.3.β.5 Λογισμικά αυτοματοποιημένης ημι-ποσοτικής επεξεργασίας

### ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ RAMAG

Το λογισμικό αυτό, μετά τη μεταφορά των δεδομένων υπαίθρου από το όργανο (ABEM WADI) στον υπολογιστή, βοηθάει στην αυτοματοποιημένη εφαρμογή του φίλτρου κατά Karous-Hjelt, πάνω στα δεδομένα υπαίθρου, αφού πρώτα εξομαλύνει την καμπύλη. Το φιλτράρισμα μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε πολλά σετ δεδομένων (προφίλ) ταυτόχρονα.

Με το συγκεκριμένο λογισμικό, είναι δυνατή και η αυτοματοποιημένη κατασκευή ψευδό-τομών κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος, που ουσιαστικά προκύπτουν από την διαδοχική εφαρμογή του φίλτρου Karous-Hjelt για διάφορα βάθη.

### <u>ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ KHFFILT</u>

Με το συγκεκριμένο λογισμικό (*Pirttijarvi, 2004*) είναι εφικτή η εφαρμογή των δυο προαναφερθέντων φίλτρων, με ταυτόχρονη εφαρμογή εξασθένησης ανάλογα με το επιδερμικό βάθος για τις ψευδό-τομές κατανομής της ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος. Υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής των φίλτρων, ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη, ώστε οι θετικές ανωμαλίες να αντιστοιχούν σε θετικά ακρότατα ή το αντίστροφο. Επίσης, όπως και στο λογισμικό IXVLF, υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων εφαρμογής των φίλτρων για κάθε θέση, σε αρχείο κειμένου.

### ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΙΧΥLF

Στο λογισμικό αυτό δίνεται η δυνατότητα να εισαχθούν ως δεδομένα υπαίθρου είτε η πραγματική και φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου είτε η γωνία κλίσης και η ελλειπτικότητα. Με τη χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος έχουμε τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης εφαρμογής των φίλτρων *Fraser* και *Karous-Hjelt* καθώς και την κατασκευή ψευδο-τομής κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος, βάσει του φίλτρου *Karous-Hjelt*. Το λογισμικό IXVLF, επιτρέπει και την απεικόνιση σε ένα γράφημα, πολλαπλών παράλληλων τομών VLF, είτε πρόκειται για τα δεδομένα υπαίθρου, είτε για τα δεδομένα που προέκυψαν από την εφαρμογή κάποιου εκ των φίλτρων. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων εφαρμογής των φίλτρων για κάθε θέση, σε αρχείο κειμένου.

# 4.3.γ Ποσοτική παρουσίαση δεδομένων VLF

Από τις πρώτες τεχνικές ποσοτικής παρουσίασης των δεδομένων VLF, ήταν η κατασκευή χαρτών κατανομής ειδικής αντίστασης (*Fraser, 1969*).

Η ποσοτική ερμηνεία των δεδομένων VLF, έχει εξεταστεί και από πολλούς νεότερους ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με την διδιάστατη αντιστροφή και απεικόνιση (Beamish, 1994; Chouteau et al., 1996; Kaikkonen and Sharma, 1998; Beamish, 2000; Monteiro Santos F.A. et al, 2006), καταδεικνύοντας την κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος, ή και από ειδικούς αλγόριθμους μοντελοποίησης (Nissen, 1986).

# 4.3.γ.1 Χάρτες καμπύλων VLF

Ο Fraser, το 1969, όταν πρωτοπαρουσίασε το φίλτρο του, σαν βασική του χρήση έδινε την κατασκευή χαρτών από δεδομένα παράλληλων τομών VLF. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου Fraser, οι αγώγιμες ζώνες εμφανίζονται ως θετικές κορυφές – ακρότατα (εικόνα 4.19). Με αυτόν τον τρόπο, ήταν εφικτός ο σαφής προσδιορισμός αγώγιμων ζωνών, όπως κοιτάσματα.



Εικόνα 4.19: Χάρτες καμπύλων VLF, μετά πό εφαρμογή του φίλτρου Fraser (Telford et al., 1990).

# <u>4.3.γ.2 Τομές κατανομής ειδικής αντίστασης</u>

### <u>Λογισμικό INV2DVLF</u>

Το λογισμικό *Inv2DVLF (Monteiro Santos F.A. et al, 2006)* είναι ουσιαστικά ένας <u>αλγόριθμος αντιστροφής κανονικοποιημένων δεδομένων VLF</u> (κάναβος επιμέρους τετράγωνων - εικόνα 4.20), που αναπτύχθηκε πάνω στο απευθείας πρόβλημα (*Sasaki, 1989;2001*) μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (*finite element*). Σκοπός της συγκεκριμένης αντιστροφής είναι να προσδιοριστεί η υπεδαφική κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, που θα ανταποκρίνεται κατάλληλα στα δεδομένα υπαίθρου, μέσα στα όρια σφάλματος.

Ως μέθοδος αντιστροφής χρησιμοποιείται η εξομάλυνση ελαχίστων τετραγώνων (smoothness-constrained least squares), ευρέως διαδεδομένη για τη διδιάστατη και τρισδιάστατη αντιστροφή ηλεκτρομαγνητικών και γεωηλεκτρικών δεδομένων (Sasaki, 1989; DeGroot-Hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1994; Loke and Barker, 1996; Sasaki, 2001). Στην προκειμένη περίπτωση η μέθοδος στηρίζεται στο βαθμωτό μέτρο B (scalar tipper), που προκύπτει από τη σχέση κατακόρυφης ( $H_Z$ ) και οριζόντιας ( $H_Y$ ) συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου,  $H_Z=B^*H_Y$ , που εξαρτάται μόνο από την υπεδαφική δομή. Υπενθυμίζουμε ότι ο συντελεστής αυτός προέρχεται από την διαφορά φάσης των ανωτέρω συνιστωσών, λόγω των επαγωγικών φαινομένων.



**Εικόνα 4.20**: Κανονικοποιημένος κάναβος μοντέλου εισαγωγής στο λογισμικό *Inv2DVLF*. Έχει πλήθος τετραγώνων N<sub>x</sub>=22, N<sub>z</sub>=14 και N<sub>αέρα</sub>=3. Το υπεδαφικό μοντέλο έχει 9 επιμέρους *blocks*.

Με την εισαγωγή των δεδομένων (θέσεις μετρήσεων, τιμές μέτρησης πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας αλλά και τοπογραφία), στο βοηθητικό λογισμικό *PrepVLF*, κατασκευάζεται αυτόματα (ή και χειρωνακτικά) ο κανονικοποιημένος κάναβος και τα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό *Inv2DVLF* για την αντιστροφή. Μετά από τον προκαθορισμένο, από το χρήστη, αριθμό προσπαθειών (*iterations*), προκύπτει ο κάναβος με το τελικό μοντέλο κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.21) καθώς και η απόκριση του συγκεκριμένου μοντέλου, σε σύγκριση με τα δεδομένα υπαίθρου.



Εικόνα 4.21: Τελικό μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, μετά από αντιστροφή δεδομένων VLF με το λογισμικό *Inv2DVLF*.

# 4.4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ – ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

# 4.4.α Εξοπλισμός και όργανα μέτρησης

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, είναι υψηλής πιστότητας και αξιοπιστίας. Για την μέτρηση της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας του ολικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης <u>WADI του οίκου ABEM</u> (εικόνα 4.22) του Εργαστηρίου Γεωφυσικής, του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Το όργανο WADI είναι ένα σύγχρονο και εύχρηστο όργανο και ουσιαστικά πρόκειται για μια ζώνη μέσης που πάνω της είναι στερεωμένες οι τρεις αλληλένδετες μονάδες του συστήματος WADI:

- Την μονάδα κεραίας, που αποτελείται από δύο κάθετα μεταξύ τους πηνία, μήκους 15 εκατοστών έκαστο. Το ένα πηνίο ανιχνεύει την οριζόντια συνιστώσα και το άλλο την κατακόρυφη. Το κλισίμετρο που είναι ενσωματωμένο στην κεραία, βοηθάει στην αυτόματη διόρθωση των αποκλίσεων δημιουργούνται από τυχόν κλίση της κεραίας.
- Την μονάδα μετρήσεων, που περιέχει ένα δέκτη αναλογικών σημάτων, ενισχυτή και αναλογικά φίλτρα αλλά και τις μπαταρίες για την παροχή ενέργειας στο σύστημα.
- Την μονάδα ελέγχου, η οποία έχει ένα πληκτρολόγιο 24 πλήκτρων για τη διαχείριση των μετρήσεων, την εισαγωγή συντεταγμένων και την επιλογή του κατάλληλου πομπού αλλά και μια οθόνη. Βασικά, όμως, είναι και ο μικροεπεξεργαστής που περιέχει, ο οποίος χρησιμεύει για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και η μνήμη όπου αποθηκεύονται ηλεκτρονικά όλες οι πραγματοποιηθείσες μετρήσεις.



Εικόνα 4.22:. Το όργανο μέτρησης VLF δεδομένων Wadi, του οίκου ABEM,

# 4.4.β Διεξαγωγή εργασιών υπαίθρου

Γενική αρχή της μεθόδου VLF κατά την διάρκεια των μετρήσεων στην ύπαιθρο είναι να επιλέγονται σταθμοί εκπομπής τέτοιοι, ώστε ουσιαστικά να βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση με αυτήν της παράταξης του στόχου (ή της διεύθυνσης του επιμήκους άξονα του), με μια αποδεκτή απόκλιση της τάξεως των 20°. Ο λόγος είναι ότι το ηλεκτρικό πεδίο που ακολουθεί τη διεύθυνση σταθμού – δέκτη, είναι παράλληλο προς την παράταξη του στόχου, όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο εμφανίζοντας την καλύτερη σύζευξη με το στόχο.

Έτσι, βασική μέριμνα, κατά την εκτέλεση της ηλεκτρομαγνητικής έρευνας με τη μέθοδο VLF, ήταν ο εντοπισμός κατάλληλων οδεύσεων σε θέσεις όπου υπήρχαν πιθανές θαμμένες και καλυμμένες αγώγιμες τεκτονικές ζώνες. Οι οδεύσεις, έπρεπε να τηρούν τις βασικές προϋποθέσεις τις μεθοδολογίας, όπως:

- Η κάθετη όδευση σχετικά με την παράταξη (ή τον επιμήκη άξονα) του αγώγιμου σώματος
- Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος παράλληλα με αυτήν, που συνεπάγεται τον εντοπισμό σταθμού εκπομπής πρωτεύοντος πεδίου, ο οποίος έπρεπε να βρίσκεται στην ίδια διεύθυνση με αυτήν της παράταξης του αγωγού και να έχει αρκετά ισχυρό σήμα για τη διενέργεια των μετρήσεων.
- Η σταθερή και κατακόρυφη θέση της κεραίας του δέκτη.

Βέβαια, απαραίτητη ήταν και η δυνατή προσπέλαση κατά μήκος της ευθύγραμμης όδευσης, λόγω της πυκνής βλάστησης, αλλά και η αποφυγή πηγών πιθανού θορύβου, όπως μεταλλικές περιφράξεις, υπέργεια και υπόγεια ηλεκτροφόρα καλώδια αλλά και οικίες.

Όλα αυτά τα εμπόδια, δυσχέραιναν και καθυστερούσαν χρονικά την ομαλή ανάπτυξη της μεθόδου, αλλά εκτιμάται ότι τηρήθηκαν σε μεγάλο βαθμό οι προδιαγραφές της διάταξης και τα σφάλματα που εισήχθησαν ήταν πολύ μικρά.

# 4.5 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η ηλεκτρομαγνητική έρευνα με τη μέθοδο VLF πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιοχές μελέτης, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή του Δελφινίου, προκειμένου να προσδιοριστούν κατακόρυφες ή υποκατακόρυφες θαμμένες αγώγιμες ζώνες. Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωλογία των περιοχών μελέτης και ιδιαίτερα τον τεκτονισμό τους, διερευνήθηκαν σε βάθος ρηξιγενείς ζώνες, προκειμένου να εντοπιστεί πιθανή υδροφορία τους. Επίσης, η μέθοδος VLF, χρησιμοποιήθηκε κατά τόπους, προκειμένου να διερευνηθεί και να σκιαγραφηθεί η πιθανή προέκταση υπαρχόντων ρηγμάτων, θαμμένων κάτω από τα αλλούβια.

Η μέθοδος VLF, ενδείκνυται για τον εντοπισμό κατακόρυφων θαμμένων αγώγιμων ζωνών, μέσα σε τεκτονισμένα πετρώματα (σχετικά αντιστατικά), αφού δεν επηρεάζεται από το σχετικά έντονο ανάγλυφο (εφαρμόζονται διορθώσεις) και μπορεί να πραγματοποιηθεί όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί η γεωηλεκτρική μεθοδολογία, λόγω προσπελασιμότητας. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, έγιναν με γνώμονα όλα τα θεωρητικά και πρακτικά στοιχεία, που έχριζαν προσοχής και έχουν ήδη αναφερθεί. Βασικότερο από αυτά, ήταν η όδευση της VLF τομής να είναι κάθετη στην παράταξη του ρήγματος (πιθανού αγωγού), και ο πομπός να είναι περίπου στην ίδια διεύθυνση με την παράταξη του ρήγματος.

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν εικοσιοκτώ (28) τομές με τη μέθοδο VLF, συνολικού μήκους 7.045 μέτρων., με βήμα διασκόπησης πέντε (5) μέτρα.

Σε όλες τις τομές VLF, πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία ημι-ποσοτικοποίησης (βλ. 4.3.β.):

- 1. Εξομάλυνση καμπύλης με τη μέθοδο τριών σημείων.
- Εφαρμογή τοπογραφικών διορθώσεων κατά Bakers & Myers και κατά Eberle (για συγκριτικά αποτελέσματα).
- Εφαρμογή φίλτρων Fraser και Karous-Hjelt, στις τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά Eberle (προτιμήθηκε διότι εφαρμόζεται και στις δύο συνιστώσες).
- 4. Κατασκευή ψευδο-τομών κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ποσοτική ερμηνεία, με τις τομές κατανομής της ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 4.23: Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Δελφινίου με τις θέσεις των τομών VLF.

Υπόμνημα: Q al: Αλλόυβια & παράκτιες αποθέσεις, Qs: Πλευρικά κορήματα, Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), Jis: Κροκαλοπαγείς ψαμμίτες & Ψαμμιτικοί αργ. σχιστόλιθοι (Μ.Περμίο), Pm: Ασβεστόλιθοι (Μ.Περμίου), C-pi: Ασβεστόλιθοι (Λιθανθρακοφόρο – Κ.Πέρμιο), Ci:Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων, Tr m-S: Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο - Κάρνιο), Tr m: Δολομίτες & Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο), Tr m2: Ανώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr is: Βασικοί Ψαμμίτες & Κροκαλοπαγή, Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό)

# 4.5.α. Ηλεκτρομαγνητική έρευνα στην περιοχή του Δελφινίου

Στην περιοχή του Δελφινίου εφαρμόστηκε η μέθοδος VLF, σε διάφορες θέσεις της ευρύτερης περιοχή του Δελφινίου. Έμφαση δόθηκε, στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Δελφινίου με απώτερο σκοπό, τον επακριβή καθορισμό της θέσης της πιθανής προέκτασης των ρηγμάτων F1 & F2, μέσα στη λεκάνη των αλλούβιων, Η σαφής σκιαγράφηση των ρηγμάτων αυτών, εφόσον υδροφορούν, θα δώσει πολύ σημαντικά στοιχεία για το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής.

Συνολικά στην περιοχή πραγματοποιήθηκαν δεκαέξι (16) τομές VLF (0010-0160), συνολικού μήκους **3.965 μέτρων** (εικόνα 4.23).

### 4.4.α.1. Παρουσίαση ημι-ποσοτικών αποτελεσμάτων φιλτραρισμένων καμπύλων

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, θα απεικονιστούν και θα σχολιαστούν οι τοπογραφικές διορθώσεις που εφαρμόστηκαν στις καμπύλες υπαίθρου, καθώς και τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt*.

### <u>Τομή 0010</u>

Η τομή 0010 έχει μήκος 225μ., με βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από ΝΑ προς ΒΔ (εικόνα 4.23). Χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *DHO38* (*Burlage, Γερμανία*), με συχνότητα 23,4 kHz, οπότε το επίπεδο διάδοσης του πρωτεύοντος κύματος σχηματίζει γωνία 90° με την τομή.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής ήταν αρκετά έντονο, με κλίσεις έως και 40°. Στην Εικόνα 4.24 απεικονίζονται τα δεδομένα υπαίθρου της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας, καθώς και οι αντίστοιχες τοπογραφικές διορθώσεις κατά *Baker-Myers* και *Eberle*. Οι καμπύλες μετά από τις τοπογραφικές διορθώσεις, δεν έχουν ιδιαίτερες διαφορές, ενώ οι κατά *Eberle* είναι πιο κοντά στις μετρήσεις.

Ακολούθως εφαρμόστηκαν τα φίλτρα *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.25). Δυστυχώς τα δεδομένα εμπεριέχουν αρκετό θόρυβο και γι' αυτό το λόγο απεικονίζονται έντονες και πυκνές εναλλαγές ακρότατων τιμών, καθιστώντας δύσκολη την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των φίλτρων. Παραυταύτα, διαφαίνονται κάποιες θετικές κορυφές, ιδιαίτερα μεγάλων τιμών, στα 110-150μ. και 190-210μ., των οποίων οι εμφανίσεις προηγούνται από σχεδόν αντικατοπτρικές αρνητικές κορυφές.



Εικόνα 4.24:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.25:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0020</u>

Η τομή 0020 έχει μήκος 200μ., με βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από Δ προς Α (εικόνα 4.23). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *DHO38* (*Burlage, Γερμανία*), με συχνότητα 23,4 kHz, έτσι 'ώστε το επίπεδο διάδοσης του πρωτεύοντος κύματος να σχηματίζει περίπου γωνία 55° με την τομή.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής ήταν αρκετά έντονο, λόγω της διέλευσης της τομής κάθετα σε παρακείμενη κοίτη. Στην Εικόνα 4.26, απεικονίζονται τα δεδομένα υπαίθρου της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας, καθώς και οι αντίστοιχες τοπογραφικές διορθώσεις κατά *Baker-Myers* και *Eberle*. Στα πρώτα εκατό μέτρα, οι τοπογραφικές διορθώσεις είναι σχετικά μεγάλες, διαφοροποιώντας αρκετά τις καμπύλες υπαίθρου, ενώ στο υπόλοιπο μήκος της τομής οι αποκλίσεις είναι πιο ήπιες.

Στις φιλτραρισμένες καμπύλες κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.27), εντοπίζονται τρεις συνεχόμενες θετικές κορυφές, μεταξύ 80-135μ., με την πιο έντονη αυτή στα 90μ. περίπου.



**Εικόνα 4.26**:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.27:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0030</u>

Η τομή 0030 έχει μήκος 270μ., βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από Ν προς Β (εικόνα 4.23). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *DHO38 (Burlage, Γερμανία*), με συχνότητα 23,4 kHz.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής ήταν αρκετά έντονο με καθοδική κλίση. Μετά την εφαρμογή των τοπογραφικών διορθώσεων (εικόνα 4.28), παρατηρείται ουσιαστικά παράλληλη μετατόπιση των καμπύλων υπαίθρου προς τα πάνω, σε διαφορετικό βαθμό για την κάθε μεθοδολογία τοπογραφικής διόρθωσης, με εξαίρεση τα τελευταία πενήντα μέτρα, όπου σχεδόν ταυτίζονται οι δύο καμπύλες.

Η εφαρμογή των φίλτρων κατά Fraser και Karous-Hjelt (εικόνα 4.29), αναδεικνύει δύο ήπιες θετικές κορυφές σχετικά αυξημένου πλάτους, οι οποίες εντοπίζονται περίπου στα 80-110μ και 125-150μ. Στα τελευταία πενήντα μέτρα, εντοπίζεται και μία ήπια αρνητική κορυφή.





Εικόνα 4.28:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά Baker-Myers και Eberle.



Εικόνα 4.29:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

## <u>Τομή 0040</u>

100

Η τομή 0040 πραγματοποιήθηκε με κατεύθυνση από ΝΑ προς ΒΔ, έχει μήκος 350μ. και βήμα μέτρησης 5μ. Ως πομπός χρησιμοποιήθηκε ο ICV (Tavolara, Ιταλία), με συχνότητα 20,2 kHz. Η γωνία μεταξύ πρωτεύοντος κύματος και τομής, υπολογίζεται σε περίπου 60°.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής ήταν επίπεδο σε γενικές γραμμές, με εξαίρεση τις θέσεις μεταξύ 50-90μ. και τα τελευταία σαράντα μέτρα, όπου υπήρχε μια ήπια κλίση.

Άλλωστε, σε αυτές τις θέσεις, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεταξύ των καμπύλων υπαίθρου και των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων (εικόνα 4.30). Στο υπόλοιπο μήκος της τομής, ουσιαστικά δεν χρειάστηκε να εφαρμοστούν τοπογραφικές διορθώσεις.

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.31), προέκυψαν δύο ήπιες θετικές κορυφές, στις θέσεις μεταξύ 110-150μ. και 285-310μ. Εμφανείς είναι και οι δύο αρνητικές κορυφές που εντοπίζονται μεταξύ 50 και 100μ.

TOMH 0040



Εικόνα 4.30:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.31:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0050</u>

Η όδευση της τομής 0050 είναι από ΝΝΔ προς BBΔ, με συνολικό μήκος 340μ. και βήμα μέτρησης 5μ. Για την τομή αυτή χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *TBB* (*Bafa, Tovpκία*), με συχνότητα 26,7 kHz.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής ήταν επίπεδο σε γενικές γραμμές, με εξαίρεση τις θέσεις μεταξύ 70-110μ. και λιγότερο τα τελευταία πενήντα μέτρα, όπου υπήρχαν υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων. Και σε αυτή την περίπτωση, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των καμπύλων υπαίθρου και των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων (εικόνα 4.32) εντοπίζονται σε αυτές τις θέσεις. Στο υπόλοιπο μήκος της τομής (110-250μ.), ουσιαστικά δεν απαιτούνταν τοπογραφικές διορθώσεις.

Οι φιλτραρισμένες καμπύλες κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.33), αναδεικνύουν στα πρώτα 125 μέτρα της τομής συνεχείς εναλλαγές θετικών και αρνητικών κορυφώσεων. Ακόμα μια θετική κορυφή, εντοπίζεται με κέντρο στα 220μ.



Εικόνα 4.32:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.33:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0060</u>

Η τομή 0060 έχει συνολικό μήκος 350μ., κατεύθυνση από ΝΑ προς ΒΔ και βήμα μέτρησης 5μ. Για την τομή αυτή χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *ICV* (*Tavolara, Ιταλία*), συχνότητας 20,2 kHz..

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής ήταν επίπεδο σε γενικές γραμμές, με εξαίρεση τις θέσεις μεταξύ 90-130μ. και 290-350μ., όπου υπήρχαν υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων. Και σε αυτή την περίπτωση, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των καμπύλων υπαίθρου και των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων (εικόνα 4.34) παρατηρούνται μεταξύ των προαναφερόμενων θέσεων. Στο υπόλοιπο τμήμα της τομής (130-290μ.), οι τοπογραφικές διορθώσεις ήταν μηδαμινές.



Εικόνα 4.34:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.35:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

Οι φιλτραρισμένες καμπύλες κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.35), αναδεικνύουν στα 50-150μ. της τομής συνεχείς εναλλαγές θετικών και αρνητικών κορυφώσεων, με εντονότερη τη θετική κορύφωση της οποίας το κέντρο υπολογίζεται στα 125μ. Ακόμα μια θετική κορυφή, εντοπίζεται με κέντρο στα 295μ.

### <u>Τομή 0070</u>

Η τομή 0070 έχει κατεύθυνση από Β προς Ν, με συνολικό μήκος 355μ. και βήμα μέτρησης 5μ. Για την τομή αυτή χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *GQD* (*Antorn, Ηνωμ.Βασίλειο*), με συχνότητα 22,1 kHz.

Κατά μήκος της τομής παρατηρούνται σχετικά έντονες υψομετρικές διαφοροποιήσεις, κυρίως με καθοδική κλίση, κάτι που δικαιολογεί τη σχετικά παράλληλη μετατόπιση των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων, σε σχέση με τις καμπύλες υπαίθρου (εικόνα 4.36).

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.37), αναδεικνύονται εναλλαγές θετικών και αρνητικών κορυφώσεων στα τελευταία 125μ. της τομής. Σαφέστερες είναι οι δύο θετικές κορυφές με κέντρα περίπου στα 230 και 330μ.



Εικόνα 4.36:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

#### 131

#### **TOMH 0070**



Εικόνα 4.37:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0080</u>

Η τομή 0080 έχει συνολικό μήκος 250μ., όδευση από Β προς Ν, με βήμα μέτρησης 5μ. Για την τομή αυτή χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz. Το πρωτεύον κύμα σχηματίζει γωνία με την τομή περίπου 70°.

Κατά μήκος της τομής παρατηρούνται ιδιαίτερα έντονες υψομετρικές διαφοροποιήσεις, κυρίως με καθοδική κλίση μέχρι και τα 200μ., κάτι που δικαιολογεί τη σχετικά παράλληλη μετατόπιση των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων, στις θέσεις αυτές (εικόνα 4.38).

Εφαρμόζοντας τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.39), προέκυψε μια έντονη θετική ανωμαλία, περίπου στα 200μ. καθώς και μια αρνητική στα 120μ. Πιθανότατα αυτές οι ανωμαλίες δεν θα εμφανίζονταν εάν δεν είχαν εφαρμοστεί οι τοπογραφικές διορθώσεις και θα υποσκιάζονταν εξαιτίας της αλλαγής της τοπογραφίας.

# **TOMH 0080**



Εικόνα 4.38:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.39:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0090</u>

Η τομή 0090 έχει συνολικό μήκος 220μ., όδευση από Ν προς Β και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz. Το πρωτεύον κύμα σχηματίζει γωνία με την τομή περίπου 70°. Κατά μήκος της τομής τα υψόμετρα δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα, κάτι που δικαιολογεί τη μικρή απόκλιση της τοπογραφικά διορθωμένης καμπύλης κατά *Baker-Myers*, αλλά και την ταύτιση της τοπογραφικά διορθωμένης καμπύλης με την καμπύλη υπαίθρου (εικόνα 4.40).

Φιλτράροντας τις τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες με τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.41), αναδεικνύονται δυο θετικές ανωμαλίες με κέντρα περίπου στα 100 και 140μ.



Εικόνα 4.40:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.41:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0100</u>

Η τομή 0100 έχει συνολικό μήκος 150μ., όδευση από Ν προς Β και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz. Το πρωτεύον κύμα σχηματίζει γωνία με την τομή περίπου 70°.

Κατά μήκος της τομής τα υψόμετρα μειώνονται ήπια. Στην Εικόνα 4.42, η τοπογραφικά διορθωμένη καμπύλη κατά *Eberle*, μετά τα 60μ, έχει έντονη απόκλιση σχετικά με την καμπύλη υπαίθρου, παρόλο που τα υψόμετρα δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα Αυτή η ιδιαιτερότητα, οφείλεται στο ότι σε εκείνο το κομμάτι η τομή είναι σχεδόν παράλληλη με την παράταξη της τοπογραφίας, κάτι που λαμβάνεται υπόψη στις τοπογραφικές διορθώσεις κατά *Eberle*.

Εφαρμόζοντας τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.43), αναδεικνύονται εναλλαγή θετικών και αρνητικών ακρότατων, με το θετικό να εντοπίζεται περίπου μεταξύ 80-110μ.



**Εικόνα 4.42**:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.43:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0110</u>

Η τομή 0110, μήκους 300μ., έχει κατεύθυνση από ΝΑ προς ΒΔ και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz.

Κατά μήκος της τομής τα υψόμετρα μειώνονται σχετικά ήπια. Συνεπαγόμενο αυτού, είναι η μικρή απόκλιση των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων από τις καμπύλες υπαίθρου (εικόνα 4.44). Μάλιστα, στο δεύτερο μισό της τομής οι διορθώσεις κατά *Eberle* είναι μηδαμινές.



Εικόνα 4.44:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Η εφαρμογή των φίλτρων *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.45), δεν αναδεικνύουν ιδιαίτερες ανωμαλίες, παρά μόνο κάποιες ήπιες, όπου οι θετικές εντοπίζονται με κέντρα περίπου στα 60, 140 και 240μ.



Εικόνα 4.45:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

## <u>Τομή 0120</u>

Η τομή 0120 έχει μήκος 215μ., κατεύθυνση από ΝΑ προς ΒΔ και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*) και συχνότητα 18,3 kHz.



Εικόνα 4.46:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.
Στα πρώτα εκατό μέτρα της τομής οι διαφοροποιήσεις του υψομέτρου είναι σχετικά έντονες, όταν το υπόλοιπο τμήμα της τομής είναι σχεδόν επίπεδο. Με αυτά τα δεδομένα, δικαιολογούνται οι αποκλίσεις των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων στα πρώτα εκατό μέτρα (εικόνα 4.46).

Μία κύρια θετική κορύφωση εντοπίζεται μεταξύ 100-130 μέτρων, έπειτα από το φιλτράρισμα των καμπύλων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.47). Επίσης, μεταξύ των 30-75μ. αλλά και 85-100μ. διαφαίνονται και τρεις ήπιες αρνητικές ανωμαλίες.

Εικόνα 4.47:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0130</u>

Η τομή 0130 έχει μήκος 100μ., κατεύθυνση από ΝΝΑ προς BBΔ και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*) και συχνότητα 18,3 kHz.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής είναι καθοδικό με ήπια κλίση, μετατοπίζοντας έτσι παράλληλα τις τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες (εικόνα 4.48).

Τα φίλτρα *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.49) αναδεικνύουν μια μεγάλου πλάτους θετική ανωμαλία, μεταξύ 30-80μ. και μια εντονότερη αρνητική με κέντρο περί τα 80μ.



Εικόνα 4.48:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Εικόνα 4.49:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0140</u>

Το συνολικό μήκος της τομής 0140 είναι 180μ., με κατεύθυνση από NNA προς BBΔ και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz.



Εικόνα 4.50:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Από άποψη τοπογραφίας, η τομή είναι σχετικά επίπεδη σε όλο το μήκος της. Ουσιαστικά οι τοπογραφικές διορθώσεις δεν είναι απαραίτητες.

Εφαρμόζοντας τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.51), αναδεικνύονται δύο θετικές ανωμαλίες, στις θέσεις 25-50μ και 60-80μ., ενώ από τα 80 μέχρι και τα 150 μέτρα, εντοπίζεται ουσιαστικά μια αρνητική ανωμαλία, μεγάλου πλάτους, με τις υψηλότερες τιμές να εντοπίζονται περί τα 175μ.



Εικόνα 4.51:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0150</u>

Η τομή 0150 έχει μήκος ίσο με 300μ., με κατεύθυνση από ΝΝΑ προς BBΔ και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz. Μεταξύ τομής και διεύθυνσης πρωτεύοντος κύματος, σχηματίζεται γωνία περίπου 60°.

Από άποψη τοπογραφίας, παρουσιάζονται σχετικά ήπιες διαφοροποιήσεις, όπου μάλιστα εντοπίζονται και κομμάτια επίπεδα. Πέραν των τμημάτων αυτών, που οι τοπογραφικές διορθώσεις είναι μηδαμινές, οι δύο μεθοδολογίες τοπογραφικής διορθώσεις δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται ιδιαίτερα (εικόνα 4.52).

Ακολουθεί το φιλτράρισμα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.53), που αναδεικνύει θετικές ανωμαλίες στις θέσεις 85-125μ. και 230-285μ. Σαφής είναι και η ύπαρξη της αρνητικής ανωμαλίας, στις θέσεις 160-225μ.

#### TOMH 0150



Εικόνα 4.52:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.53:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0160</u>

Η τομή 0160 έχει μήκος ίσο με 145μ., με κατεύθυνση από Ν προς Β και βήμα μέτρησης 5μ. Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz.

Τοπογραφικά, η τομή είναι επίπεδη. Συνεπώς έχει και μηδαμινές τοπογραφικές διορθώσεις.

Το φιλτράρισμα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.55), αναδεικνύει μονάχα μια πολύ ήπια θετική ανωμαλία στις θέσεις 25-65μ.



Εικόνα 4.54:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.55:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>4.4.α.2. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων – Συγκριτική απεικόνιση με ψευδό-</u> τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά αποτελέσματα της ημιποσοτικής και της ποσοτικής επεξεργασίας των τομών VLF που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, θα απεικονιστούν οι ψευδό-τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος, που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου *Karous-Hjelt*, για διάφορα βάθη, καθώς και οι τομές κατανομής της ειδικής αντίστασης, που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων υπαίθρου, με το πρόγραμμα *Inv2DVLF (χρησιμοποιήθηκε* παράμετρος Lagrange ίση με 0,3). Πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι οι τομές που προέκυψαν από την αντιστροφή απεικονίζονται συναρτήσει της τοπογραφίας, ενώ οι τιμές αρχικής ειδικής αντίστασης που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστροφή, προήλθαν από στοιχεία της γεωηλεκτρικής έρευνας που προηγήθηκε.

### <u>Τομή 0010</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.56, παρατηρείται αυξημένη θετική πυκνότητα ρεύματος στις θέσεις 100-150μ., όπου μάλιστα διαφαίνεται ένας κεκλιμένος αγωγός (κλίση περίπου 45°), που θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε ρηξιγενή αγώγιμη ζώνη. Ένας δεύτερος αγωγός, μικρότερης έκτασης και έντασης, εμφανίζεται περίπου στα 60μ.



TOMH 0010

Εικόνα 4.56:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.57**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 29,56, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

Όσον αφορά την κατανομή της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.57), στο μεγαλύτερο τμήμα της οι αντιστάσεις είναι μεγάλες ( >1.000Ohm.m), με εξαίρεση τα πρώτα 100μ., όπου εντοπίζονται κάποιες αγώγιμες, στα πρώτα 10 μέτρα και στα 50-110μ.. Οι δύο τομές

διαφοροποιούνται έντονα, με μοναδική ομοιότητα τις αγώγιμες ζώνες των πρώτων 100μ. Η διαφοροποίηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στα έντονα θορυβώδη δεδομένα υπαίθρου, που καθιστούν δύσκολη την αντιστροφή τους, κάτι που καταδεικνύεται και από το μεγάλο σφάλμα rms.

## <u>Τομή 0020</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.58, εντοπίζονται θετικές πυκνότητες ρεύματος από τα 60 έως τα 140 μέτρα, με μέγιστες τιμές μεταξύ 80 και 120μ., όπου και διαφαίνεται μια κλίση περίπου 45°.

Οι ειδικές αντιστάσεις είναι γενικά αυξημένες στο μεγαλύτερο τμήμα της τομής, αν και μετά τα πρώτα ενενήντα μέτρα, εντοπίζεται αγώγιμη περιοχή, μέχρι τα 170μ. Πιθανότατα είναι η ίδια αγώγιμη ζώνη με της Εικόνας 4.58, αλλά μετατοπισμένη ίσως εξαιτίας της συμβολής της τοπογραφίας.



Εικόνα 4.58:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.59**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 9.23, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

# <u>Τομή 0030</u>

Η τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.60), καταδεικνύει μια περιοχή από τα 80 έως τα 160μ., με σχετικά αυξημένη πυκνότητα ρεύματος. Κάποια κλίση δεν είναι ευδιάκριτη.

Η ίδια αγώγιμη περιοχή εντοπίζεται και στην τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, ελαφρώς εκτεταμένη μέχρι τα 210μ. Το υπόλοιπο τμήμα της τομής καταλαμβάνεται από πιο αντιστατικές περιοχές.



Εικόνα 4.60:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



TOMH 0030

**Εικόνα 4.61**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 3.47, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

# <u>Τομή 0040</u>

Στην τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.62), σκιαγραφείται σαφώς ένας αγωγός κλίσης περί τις 45-50° προς τα ΒΔ, ενδιάμεσα από αντιστατικές περιοχές, στα 120-180μ. Είναι ίσως, η καλύτερη προσομοίωση της εικόνας που θα έδινε μια αγώγιμη ρηξιγενής ζώνη μέσα σε αντιστατικά σώματα. Μικρότερου μεγέθους αγωγός εντοπίζεται και στα 300μ.

Δυστυχώς, στην τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.63), εμφανίζεται μόνο μια επιφανειακή αγώγιμη ζώνη στα πρώτα 60μ., και μια ομοιόμορφα αντιστατική περιοχή. Η μόνη πιθανή εξήγηση για την αποτυχημένη κατάδειξη της αγώγιμης περιοχή από την αντιστροφή των δεδομένων, είναι η τοπογραφία. Παρόλο που κατά την διαδικασία αντιστροφής, λαμβάνεται υπόψη, φαίνεται ότι η διόρθωση δεν είναι η κατάλληλη ώστε να μην επισκιαστεί η αγώγιμη ζώνη εξαιτίας της τοπογραφικής διαφοροποίησης στο τμήμα αυτό της περιοχής.



Εικόνα 4.62:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.63**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 5.33, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 1000 Ohm.m).

### <u>Τομή 0050</u>

Στην τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.64), σκιαγραφείται σαφώς ένας αγωγός κλίσης περί τις 45° προς τα ΒΔ, στα 100-160μ., με παραπλήσια εικόνα με της τομής 0040. Ένας δεύτερος αγωγός εντοπίζεται με κέντρο περίπου στα 270μ.

Δυστυχώς, παρόμοια με την τομή 0050 (εικόνα 4.63), στην τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.65), δεν εμφανίζεται η κύρια αγώγιμη ζώνη, παρότι στο υπόλοιπο τμήμα οι ειδικές αντιστάσεις είναι παρεμφερείς. Μόνο στα άκρα της τομή παρατηρούνται δύο αγώγιμες ζώνες. Η αγώγιμη ζώνη στο τέλος της τομής, πιθανόν να αντιστοιχεί σε αυτήν στο τέλος της τομής της πυκνότητας ρεύματος. Και σε αυτή την περίπτωση, η μόνη πιθανή εξήγηση για την αποτυχημένη κατάδειξη της αγώγιμης περιοχή από την αντιστροφή των δεδομένων, είναι η συμβολή της τοπογραφίας.



Εικόνα 4.64:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.65**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 12.72, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

# <u>Τομή 0060</u>

Από την τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.66), σκιαγραφείται σαφώς ένας αγωγός στην περιοχή 110-180μ. κλίσης περίπου τις 45-50° προς τα ΒΔ, όπως και στις τομές 0040 και 0050 (υποπαράλληλες).

Και σε αυτήν την περίπτωση (όπως και στις τομές 0040 και 0050) δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της έντονα αγώγιμης αυτής ζώνης (εικόνα 4.67). Όμως, στη συγκεκριμένη τομή, εμφανίζεται έντονα αγώγιμη ζώνη στα πρώτα ενενήντα μέτρα της τομής κατανομής ειδικής αντίστασης, που μάλιστα εκτείνεται και σε βάθος. Δεν είναι σαφές, εάν οι δύο αγώγιμες περιοχές στις δύο τομές (πυκνότητας ρεύματος και ειδικής αντίστασης), είναι η ίδια, μετατοπισμένη λόγω συμβολής της τοπογραφίας.



Εικόνα 4.66:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.67**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 5.37, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

# <u>Τομή 0070</u>

Στην τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.68), διαφαίνονται δύο αγώγιμες περιοχές, μια ήπια μεταξύ 120-160μ. και μια με μεγαλύτερα ποσοστά πυκνότητας ρεύματος, από τα 260μ μέχρι το τέλος της τομής. Σαφώς σκιαγραφείται και ένας αντιστάτης, κλίσης περίπου 50° προς Β.

Η τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, αναδεικνύει μια σχετικά διαφοροποιημένη γεωηλεκτρική δομή, καθώς κυριαρχούν σχετικά αγώγιμα σώματα σε όλο το μήκος. Πανομοιότυπη εικόνα έχουμε στα τελευταία εβδομήντα μέτρα, όπου εντοπίζεται μια ιδιαίτερα αγώγιμη ζώνη, με ειδικές αντιστάσεις μικρότερες των 100 Ohm.m.



Εικόνα 4.68:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.69**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 11.08, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 250 Ohm.m).

# <u>Τομή 0080</u>

Για την τομή 0080, η τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.70), απεικονίζει δύο αγώγιμες περιοχές, με χαμηλές προς μέτριες θετικές πυκνότητες ρεύματος, στα πρώτα 80 μέτρα της τομής και στα 180-210μ.

Στην τομή της Εικόνας 4.70, η κατανομή της ειδικής αντίστασης, είναι παρεμφερής με αυτή της τομής 0070 (εικόνα 4.69), αφού διακατέχεται από μικρές αντιστάσεις. Στα πρώτα 100 μέτρα, εντοπίζονται οι πιο αγώγιμες περιοχές, με ειδικές αντιστάσεις μικρότερες των 100 Ohm.m. Οι τομές κατανομής ειδικής αντίστασης των τομών 0070 και 0080 (εικόνες 4.69 και 4.71 αντίστοιχα), διακατέχονται από μικρές ειδικές αντιστάσεις, δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκαν πάνω στον σχετικά αγώγιμο σχηματισμό *Ci* (διαδοχή κλαστικών). Από 'επιτόπου' μετρήσεις της ειδικής αντίστασης (βλ.§3.4.α.1) προέκυψαν τιμές 80-100 Ohm.m.



Εικόνα 4.70:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.71**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 7.74, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 250 Ohm.m).

### <u>Τομή 0090</u>

Η τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.72), απεικονίζει μια ευρεία ζώνη με μικρές θετικές πυκνότητες ρεύματος. Αυτή η περιοχή εντοπίζεται στα 82-180μ.

Όσον αφορά την κατανομή της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.72), επικρατούν μικρές ειδικές αντιστάσεις (<350 Ohm.m) σχεδόν σε όλο το μήκος της τομής (εκτός από τα τελευταία 30μ.) παρατηρείται μια σχετικά αντιστατική ζώνη.



Εικόνα 4.72:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.73**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 7.58, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0100</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.74, στην περιοχή 80-100μ., παρατηρείται μια σχετικά αγώγιμη ζώνη.

Αντίθετα, η αγώγιμη ζώνη στην τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.75), εντοπίζεται στα 30-75μ. Και πάλι, η διαφοροποίηση τους οφείλεται στην τοπογραφία, διότι στο δεύτερο μισό της, η τομή ήταν σχεδόν παράλληλη στην τοπογραφία, που επηρεάζει τις τοπογραφικές διορθώσεις κατά *Eberle*, που εμπεριέχονται στην διαδικασία για την κατασκευή της τομής της Εικόνας 4.74. Αυτή η παραλληλία δεν φαίνεται να επηρεάζει τα δεδομένα της αντιστροφής.



Εικόνα 4.74:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.75**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 7.02, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

### <u>Τομή 0110</u>

Για την τομή 0110, οι τομές πυκνότητας ρεύματος και κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνες 4.76 και 4.77 αντίστοιχα), παρουσιάζουν παραπλήσια αποτελέσματα. Και στις δύο τομές, κυριαρχούν οι αντιστατικές περιοχές, με εξαίρεση τα πρώτα ογδόντα μέτρα και την περιοχή στα 230-265μ., όπου σχετικά επιφανειακά, εντοπίζονται αγώγιμες ζώνες.



Εικόνα 4.76:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.77**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 2.91, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

## <u>Τομή 0120</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.78, εντοπίζεται στα 90-150μ., περιοχή με θετικές τιμές πυκνότητας ρεύματος, ενώ στα πρώτα 90 μέτρα της τομής οι πυκνότητες είναι αρνητικές.



Εικόνα 4.78:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.79**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 5.39, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

Η κατανομή της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.79), καταδεικνύει δύο αγώγιμες περιοχές, μια που καταλαμβάνει σχεδόν όλη την περιοχή από τα 110 μέχρι τα 210μ. και ακόμα μια, σχετικά επιφανειακή, στα πρώτα πενήντα μέτρα της τομής. Η πρώτη, πιθανότατα να αντιστοιχεί σε αυτή της Εικόνας 4.78, ελαφρώς μετατοπισμένη και εκτεταμένη.

## <u>Τομή 0130</u>

Για την τομή 0130, η τομή πυκνότητας ρεύματος δεν αναδεικνύει κάποια ιδιαίτερα στοιχεία, παρά μόνο μια σχετικά ήπια, ομοιόμορφα κατανεμημένη, αντιστατική περιοχή.

Αντιθέτως, στην κατανομή της ειδικής αντίστασης, παρατηρείται αγώγιμη ζώνη στην περιοχή 30-70 μέτρα, η οποία εκτείνεται και σε βάθος.



Εικόνα 4.80:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



## <u>Τομή 0140</u>

Για την τομή 0140, οι τομές πυκνότητας ρεύματος και κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνες 4.82 και 4.83 αντίστοιχα), απεικονίζουν πολύ παρεμφερή αποτελέσματα. Και στις δύο τομές, κυριαρχούν οι αντιστατικές περιοχές, με εξαίρεση τα πρώτα 80 μέτρα της τομής, τα οποία διακατέχονται από μια αγώγιμη περιοχή, η οποία εκτείνεται και σε βάθος.



Εικόνα 4.82:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.83**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 11.32 αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

# <u>Τομή 0150</u>

Στην τομή πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.83), παρατηρείται μια κύρια αγώγιμη ζώνη στην περιοχή 90-150μ., καθώς και μια ηπιότερη στα 140-260μ. Ενδιάμεσα τους, εντοπίζεται αντιστατική περιοχή. Από την κατανομή της ειδικής αντίστασης, προκύπτει μόνο μια αγώγιμη ζώνη, εκτεινόμενη στα πρώτα εκατό μέτρα της τομής, που πιθανόν να είναι η ίδια με της εικόνας 4.83, μετατοπισμένη λόγω τοπογραφίας.



Εικόνα 4.83:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.84**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 4.4 αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

# <u>Τομή 0160</u>

Για την τομή 0160, από την κατανομή πυκνότητας ρεύματος, δεν προκύπτουν κάποια ιδιαίτερα στοιχεία, ενώ η κατανομή της ειδικής αντίστασης διακατέχεται από μικρές τιμές ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 4.85:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.86**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 2.59 αρχική αντίσταση αντιστροφής = 250 Ohm.m).



Εικόνα 4.87:. Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Κορακάρη με τις θέσεις των τομών VLF.

Υπόμνημα: Qs: Πλευρικά κορήματα, Qb: Λατυποπαγή, Mss: Σιδιρούχοι Ψαμμίτες, Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), C-pi: Ασβεστόλιθοι (Λιθανθρακοφόρο – Κ.Πέρμιο), Ci: Διαδοχή κλαστικών πετρωμάτων, Tr mj: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες, Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr m2: Ανώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό), S-C: Κλαστικά πετρώματα (Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο).

# 4.5.β. Ηλεκτρομαγνητική έρευνα στην περιοχή του Κορακάρη

Στην ευρύτερη περιοχή του Κορακάρη πραγματοποιήθηκαν συνολικά **τρεις** (**3**) τομές VLF συνολικού μήκους **1.160 μέτρων**. Η τομή *0001* πραγματοποιήθηκε στην λεκάνη του Μεσοβουνίου, ενώ οι τομές *0100ag* και *0200* στην περιοχή της Αγ. Παρασκευής (εικόνα 4.87).

# 4.4.β.1. Παρουσίαση ημι-ποσοτικών αποτελεσμάτων φιλτραρισμένων καμπύλων

Στο συγκεκριμένο κομμάτι, θα απεικονιστούν και θα σχολιαστούν οι τοπογραφικές διορθώσεις που εφαρμόστηκαν στις καμπύλες υπαίθρου, καθώς και τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt*.

## <u>Τομή 0001</u>

Η τομή 0001 έχει συνολικό μήκος 250μ., με βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από Δ προς Α (εικόνα 4.87). Χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *TBB (Bafa, Τουρκία*), με συχνότητα 26,7 kHz, οπότε το επίπεδο διάδοσης του πρωτεύοντος κύματος σχηματίζει γωνία 60° με την τομή.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής έχει ήπιες διαφοροποιήσεις. Οι τοπογραφικές διορθώσεις με τις δυο διαφορετικές μεθοδολογίες, δεν διαφέρουν ιδιαίτερα.

Εφαρμόζοντας τα φίλτρα Fraser και Karous-Hjelt (εικόνα 4.89), αναδεικνύονται συνεχείς εναλλαγές θετικών και αρνητικών κορυφών. Οι πιο έντονες θετικές ανωμαλίες εντοπίζονται με κέντρα περίπου στα 175 και 230μ., ενώ η εντονότερη αρνητική ανωμαλία προσδιορίζεται στα 125μ.



Εικόνα 4.88:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.89:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

## <u>Τομή 0100ag</u>

Η τομή 0100ag, έχει συνολικό μήκος 650μ., βήμα μέτρησης 5μ., και κατεύθυνση από ΒΑ προς ΝΔ (εικόνα 4.87). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *TBB* (*Bafa, Τουρκία*), με συχνότητα 26,7 kHz.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής έχει ήπιες διαφοροποιήσεις μέχρι τα πρώτα 400μ, αλλά μετά (400-650μ.), οι κλίσεις είναι πιο έντονες. Για αυτό, οι τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες, έχουν εντονότερες διαφοροποιήσεις στα τελευταία 250μ. (εικόνα 4.90)

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων Fraser και Karous-Hjelt (εικόνα 4.91), παρατηρούνται αρκετές κορυφές. Έξι είναι οι κυριότερες θετικές ανωμαλίες, των οποίων οι θέσεις προσδιορίζονται στα 30-80μ., 100-150μ., 240-260μ., 430-460μ., 485-545μ. και 560-580μ. Σαφής είναι και η παρουσία αρνητικών ανωμαλιών, στις θέσεις 70-100μ., 155-240μ., 260-280μ., 300-390μ. και 460-480μ. Κάποιες από αυτές τις ανωμαλίες (θα διερευνηθεί αργότερα), οφείλονται σε επιρροή από ηλεκτροφόρα καλώδια.



Εικόνα 4.90:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά Baker-Myers και Eberle.



Εικόνα 4.91:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

#### <u>Τομή 0200</u>

Η τομή 0200, έχει μήκος 260μ., βήμα μέτρησης 5μ., και κατεύθυνση από ΒΑ προς ΝΔ (εικόνα 4.87). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *TBB* (*Bafa, Tovpκία*), με συχνότητα 26,7 kHz.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής έχει μέτριες κλίσεις και είναι καθοδικό. Σε αυτό οφείλεται και η παράλληλη μετατόπιση των τοπογραφικά διορθωμένων καμπύλων

Φιλτράροντας τις καμπύλες κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.93), αναδεικνύονται δύο ήπιες θετικές ανωμαλίες στα 20-70μ. και 85-130μ., καθώς και μια εντονότερη στις θέσεις 185-240μ. Με κέντρο τα 75μ., παρατηρείται και μια αρνητική.



Εικόνα 4.92:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.93:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>4.4.β.2. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων – Συγκριτική απεικόνιση με ψευδότομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος</u>

Στο κομμάτι αυτό θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά αποτελέσματα της ημι-ποσοτικής και της ποσοτικής επεξεργασίας των τομών VLF που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, θα απεικονιστούν οι τομές που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου *Karous-Hjelt*, για διάφορα βάθη, καθώς και οι τομές κατανομής της ειδικής αντίστασης, που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων υπαίθρου, με το πρόγραμμα *Inv2DVLF*.

# <u>Τομή 0001</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.94, παρατηρούνται τρεις αγώγιμες περιοχές, μια στα 20-90μ., μια επιμήκης στα 140-160μ., με κλίση περίπου 45°, καθώς και μια παράλληλη στα 180μ.

Η τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.95), κυριαρχείται από χαμηλές ειδικές αντιστάσεις. Ειδικά στα πρώτα 80μ. και στα τελευταία 60μ. της τομής, εντοπίζονται οι πιο αγώγιμες ζώνες. Από την γεωηλεκτρική έρευνα στην περιοχή (βλ. 3.4.β.), είχαν προκύψει σχετικά χαμηλές ειδικές αντιστάσεις, δικαιολογώντας τη συγκεκριμένη κατανομή της ειδικής αντίστασης.



**TOMH 0001** 

Εικόνα 4.94:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.95**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 5.75, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 250 Ohm.m).





Εικόνα 4.96:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.97**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 14.17, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

### <u>Τομή 0100ag</u>

Η τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.96), καταδεικνύει πέντε αγώγιμες ζώνες. Οι θέσεις που εντοπίζονται είναι στα περίπου στα 40-60μ., 110-150μ., 220-280μ., 410-460μ. και 490-530μ. Οι δύο τελευταίες έχουν μια κλίση προς ΒΑ, περίπου 45°. Η πολύ έντονη ανωμαλία στις θέσεις 220-280μ. οφείλεται σε ηλεκτροφόρα καλώδια τα οποία διέσχιζε από κάτω η τομή, συνεπώς δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη.

Η τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.97), καταδεικνύει αντίστοιχες αγώγιμες περιοχές, σχεδόν στις ίδιες περιοχές, αλλά πιο περιορισμένες σε εύρος και πιο οριζόντια.

#### <u>Τομή 0200</u>

Από την κατανομή της πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.98), σκιαγραφούνται αγώγιμες περιοχές. Οι θέσεις που εντοπίζονται είναι στα περίπου στα 100-130μ. και 180-240μ.

Αντίστοιχα, στην κατανομή της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.99), σχεδόν σε όλο το μήκος της τομής, για βάθος μέχρι και είκοσι μέτρα, εντοπίζεται μια ενιαία αγώγιμη ζώνη, η οποία στα 170μ. μειώνεται έντονα σε πάχος.



Εικόνα 4.98:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.99**:. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 10.74 αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).



Εικόνα 4.100:. Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Κατράρη με τις θέσεις των τομών VLF

Υπόμνημα: Q al: Αλλόυβια & παράκτιες αποθέσεις, Qs: Πλευρικά κορήματα, Msc: Ποικίλα κροκαλοπαγή (Av. Μειόκαινο), Ms1: Ορίζοντας κισηρώδους τόφου (Av. Μειόκαινο), Ji: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Λιάσιο), Tr mj: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες, Tr m: Δολομίτες & Ασβεστόλιθοι (Λαδίνιο), Tr m1: Κατώτερο μέρος Πολύχρωμου σειράς, Tr i: Δολομίτες (Σκύθιο – Κ.Ανίσιο), Tr i1: Ασβεστόλιθοι βάσεως, Tr s-j: Ασβεστόλιθοι & Δολομίτες (Κάρνιο - Ιουρασικό), S-C: Κλαστικά πετρώματα (Σιλούριο – Λιθανθρακοφόρο), Vo: Εκρηξιγενή..

# 4.5.γ. Ηλεκτρομαγνητική έρευνα στην περιοχή του Κατράρη

Στην ευρύτερη περιοχή του Κορακάρη πραγματοποιήθηκαν συνολικά εννέα (9) τομές VLF συνολικού μήκους 1.935 μέτρων. Οι τομές 0201-0205 πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Κοντύλοπου, ενώ οι τομές 0301-0304 στη λεκάνη του Άνυδρου (εικόνα 4.100). Κύριος στόχος ήταν η διερεύνηση υπαρχόντων ρηξιγενών ζωνών, για πιθανή υδροφορία.

## 4.4.γ.1. Παρουσίαση ημι-ποσοτικών αποτελεσμάτων φιλτραρισμένων καμπύλων

Στο συγκεκριμένο κομμάτι, θα απεικονιστούν και θα σχολιαστούν οι τοπογραφικές διορθώσεις που εφαρμόστηκαν στις καμπύλες υπαίθρου, καθώς και τα φίλτρα κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt*.

### <u>Τομή 0201</u>

Η τομή 0201 έχει συνολικό μήκος 350μ., βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από ΒΔ προς ΝΑ (εικόνα 4.100). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc*, *Γαλλία*), με συχνότητα 18,3 kHz.



**Εικόνα 4.101**:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Μέχρι τα 300μ., η τομή έχει σταθερή καθοδική κλίση, ενώ στα τελευταία 50μ., η τοπογραφία είναι ανοδική. Εξαιτίας αυτού, οι τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες, είναι μετατοπισμένες παράλληλα στα πρώτα 300μ. (εικόνα 4.101)

Εφαρμόζοντας τα φίλτρα *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.102), αναδεικνύονται συνεχόμενες εναλλαγές θετικών και αρνητικών κορυφών στις θέσεις 40-120μ. και 225-340μ. οι εντονότερες θετικές ανωμαλίες εντοπίζονται στα 40-75μ. και στα 285-305μ.



Εικόνα 4.102:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

## <u>Τομή 0202</u>

Το μήκος της τομής 0202 είναι 215μ., με βήμα μέτρησης 5μ., και κατεύθυνση από ΒΔ προς ΝΑ (εικόνα 4.100). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), με συχνότητα 18,3 kHz.



Εικόνα 4.103:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Μέχρι τα 150μ., η τομή έχει σταθερή καθοδική κλίση, ενώ ακολουθεί ανοδική κλίση μέχρι το τέλος. Σχετικά έντονες είναι οι διαφοροποιήσεις από την εφαρμογή των τοπογραφικών διορθώσεων (εικόνα 4.103).

Το φιλτράρισμα των καμπύλων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.104), κατέδειξε μια θετική ανωμαλία, σχετικά μεγάλου πλάτους (120-175μ.) και μια ηπιότερη αρνητική με κέντρο περίπου στα 35μ.



Εικόνα 4.104:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0203</u>

Η τομή 0203 έχει συνολικό μήκος 150μ., βήμα μέτρησης 5μ., ενώ η κατεύθυνση της είναι από BBA προς NNΔ (εικόνα 4.100). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc*, Γαλλία), συχνότητας 18,3 kHz.

Με εξαίρεση τα πρώτα 50μ. της τομής, όπου παρατηρείται ήπια κλίση, στο υπόλοιπο μήκος της, η τομή είναι σχεδόν επίπεδη. Έτσι, οι τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες, διαφοροποιούνται κυρίως στα άκρα της συγκεκριμένης τομής (εικόνα 4.105)

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.106), παρατηρούνται τρεις θετικές κορυφώσεις, σχεδόν ομοιόμορφης έντασης, με κέντρα περίπου στα 55, 75 και 120μ.



Εικόνα 4.105:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.106:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

## <u>Τομή 0204</u>

Η τομή 0204 έχει συνολικό μήκος 250μ., βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από Α προς Δ (εικόνα 4.100). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), με συχνότητα 18,3 kHz.

Κατά μήκος της τομής, οι υψομετρικές διαφοροποιήσεις είναι ήπιες, οπότε και οι τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα.

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.108), παρατηρούνται σχεδόν σε όλο το μήκος θετικές ανωμαλίες μεγάλων πλατών, αλλά και μια μονάχα αρνητική με κέντρο στα 140μ.



Εικόνα 4.107:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.108:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0205</u>

Το μήκος της τομής είναι 200μ., έχει βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από Α προς Δ (εικόνα 4.100). Χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), με συχνότητα 18,3 kHz.

Το ανάγλυφο κατά μήκος της τομής έχει αρκετές διακυμάνσεις και ειδικότερα στα άκρα της τομής. Διαφοροποίηση των δύο μεθοδολογιών τοπογραφικής διόρθωσης παρατηρούνται και ιδιαίτερα στα πρώτα 50μ. της τομής (εικόνα 4.109).



Εικόνα 4.109:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Το φιλτράρισμα των καμπύλων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.110), κατέδειξε δύο κύριες αγώγιμες ζώνες, στα 35-60μ. και 75-135μ. Με κέντρο τα 30μ., εντοπίζεται και μια αρνητική ανωμαλία.



Εικόνα 4.110:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

# <u>Τομή 0301</u>

Η τομή έχει συνολικό μήκος 295μ., βήμα μέτρησης 5μ., και κατεύθυνση από ΝΝΔ προς BBA (εικόνα 4.100). Χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz.

Η τομή, δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκες μέσα στη λεκάνη του Άνυδρου, έχει σχεδόν επίπεδη τοπογραφία. Συνεπώς, οι τοπογραφικές διορθώσεις είναι μηδαμινές.



Εικόνα 4.111:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Μετά την εφαρμογή των φίλτρων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.108), παρατηρείται μια θετική ανωμαλία, μεγάλου πλάτους, στην περιοχή 60-175μ., και μια ηπιότερη αρνητική ανωμαλία στα 190-235μ.



Εικόνα 4.112:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

## <u>Τομή 0302</u>

Η τομή έχει συνολικό μήκος 150μ., βήμα μέτρησης 5μ., και φορά όδευσης από ΝΝΔ προς BBA (εικόνα 4.100). Ο πομπός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *HWU* (*LeBlanc*, Γαλλία), με συχνότητα 18,3 kHz.







Εικόνα 4.114:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

Δεδομένης της σχεδόν επίπεδης τοπογραφίας στο μεγαλύτερο κομμάτι της τομής, οι τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα από τις καμπύλες υπαίθρου.

Εφαρμόζοντας τα φίλτρα *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.114), εντοπίζεται θετική ανωμαλία με κέντρο στα 120μ.

# <u>Τομή 0303</u>

Η τομή έχει συνολικό μήκος 150μ., βήμα μέτρησης 5μ., και κατεύθυνση από ΝΔ προς BA (εικόνα 4.100). Χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz.

Κατά μήκος της τομής παρατηρείται έντονη καθοδική κλίση που οδηγεί στην παράλληλη μετατόπιση των καμπύλων υπαίθρου, μετά τις τοπογραφικές διορθώσεις (εικόνα 4.115).

Η εφαρμογή των φίλτρων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.116), καταδεικνύει δύο θετικές ανωμαλίες, με κέντρα περίπου στις θέσεις 90μ. και 135μ.





Εικόνα 4.115:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.

Εικόνα 4.116:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>Τομή 0304</u>

Η τομή έχει συνολικό μήκος 175μ., βήμα μέτρησης 5μ., και όδευση από ΝΔ προς ΒΑ (εικόνα 4.100). Χρησιμοποιήθηκε ο πομπός *HWU* (*LeBlanc, Γαλλία*), συχνότητας 18,3 kHz.
Κατά μήκος της τομής παρατηρείται ήπια ανοδική κλίση μετά τα 100μ. που οδηγεί στην παράλληλη μετατόπιση των καμπύλων υπαίθρου, μετά τις τοπογραφικές διορθώσεις (εικόνα 4.117).

Η εφαρμογή των φίλτρων κατά *Fraser* και *Karous-Hjelt* (εικόνα 4.118), καταδεικνύει τρεις ήπιες θετικές ανωμαλίες, με κέντρα περίπου στις θέσεις 70μ., 100μ. και 135μ.



Εικόνα 4.117:. Καμπύλες υπαίθρου (πραγματική και φανταστική συνιστώσα) και τοπογραφικά διορθωμένες καμπύλες κατά *Baker-Myers* και *Eberle*.



Εικόνα 4.118:. Φιλτραρισμένες καμπύλες κατά Fraser και Karous-Hjelt.

### <u>4.4.γ.2. Παρουσίαση ποσοτικών αποτελεσμάτων – Συγκριτική απεικόνιση με ψευδό-</u> τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά αποτελέσματα της ημιποσοτικής και της ποσοτικής επεξεργασίας των τομών VLF που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, θα απεικονιστούν οι ψευδό-τομές κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος, που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου Karous-Hjelt, για διάφορα βάθη, καθώς και οι τομές κατανομής της ειδικής αντίστασης, που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων υπαίθρου, με το πρόγραμμα Inv2DVLF (χρησιμοποιήθηκε παράμετρος Lagrange ίση με 0,3).

#### <u>Τομή 0201</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.119, παρατηρούνται δύο αγώγιμες περιοχές. Η πρώτη εντοπίζεται από τα 40μ. και βυθιζόμενη έως και τα 180μ., ενώ η δεύτερη βρίσκεται στην περιοχή 240-300μ.

Στην τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.120), απεικονίζεται μια σαφής αγώγιμη περιοχή στα πρώτα 180μ., που εκτείνεται και σε βάθος. Στα 280-330μ. εντοπίζεται και η δεύτερη αγώγιμη περιοχή, όπως και στην Εικόνα 4.119, αλλά σχετικά μετατοπισμένη.



Εικόνα 4.119:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.120**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 4.91, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0202</u>

Στην τομή κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εικόνας 4.121), απεικονίζεται αγώγιμη περιοχή στο δεύτερο μισό της τομής. Αντιθέτως στην τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.122), η αγώγιμη ζώνη εντοπίζεται στα πρώτα 90 μέτρα της τομής.



Εικόνα 4.121:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.122**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 4.73, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0203</u>

Στην τομή της Εικόνας 4.123, όπου απεικονίζεται η κατανομή πυκνότητας ρεύματος, αλλά και στην Εικόνα 4.124, κατανομής της ειδικής αντίστασης, εντοπίζεται αγώγιμη περιοχή στην περιοχή 50-110μ., η οποία φαίνεται να εκτείνεται και σε βάθος, τουλάχιστον στην τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.123).



Εικόνα 4.123:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.124**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 2.34, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

<u>Τομή 0204</u>

Στην τομή πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.125), απεικονίζονται κάποιες ασαφείς περιοχές μικρών ποσοστών θετικής πυκνότητας ρεύματος μεταξύ των περιοχών 80-120μ. και πιο σαφής στα 160-210μ.

Η κατανομή της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.126) απεικονίζει σαφέστερα μια ενιαία αγώγιμη περιοχή από τα 80 έως τα 210 μέτρα, που πιθανόν να αντιστοιχεί και στις δύο αγώγιμες περιοχές της Εικόνας 4.125.



Εικόνα 4.125:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.126**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 3.07, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0205</u>

Σαφής είναι η κατάδειξη, και στις δύο τομές ποσοτικής ερμηνείας (εικόνες 4.127 & 4.128), της αγώγιμης περιοχής μεταξύ 70-130μ.



Εικόνα 4.127:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.128**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 6.63, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0301</u>

Και σε αυτή την τομή τα σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα, των κατανομών πυκνότητας ρεύματος και ειδικής αντίστασης, καταδεικνύουν σαφώς την αγώγιμη περιοχή στα 50-180μ., η οποία φαίνεται να εκτείνεται σε βάθος.





Εικόνα 4.129:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.130**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 7.77, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0302</u>

Κατά μήκος αυτής της τομής σε καμία από τις δύο τομές (εικόνες 4.131 & 4.132), δεν παρατηρείται κάτι ιδιαίτερο, παρά μόνο μια πολύ ζώνη χαμηλών ποσοστών πυκνότητας ρεύματος στην Εικόνα 4.131.



Εικόνα 4.131:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.132**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 2.88, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 1000 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0303</u>

Στην τομή πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.133), μεταξύ 80 και 100 μέτρων, εντοπίζεται περιοχή χαμηλών θετικών ποσοστών πυκνότητας ρεύματος. Όμως, στην κατανομή της ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.134) διαφαίνεται μια σειρά σχετικά κατακόρυφων αγώγιμων ζωνών, μεταξύ των θέσεων 20-110μ.



Εικόνα 4.133:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.134**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 2.68, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 500 Ohm.m).

#### <u>Τομή 0304</u>

Παρατηρώντας τις τομές πυκνότητας ρεύματος (εικόνα 4.135) και της κατανομής ειδικής αντίστασης (εικόνα 4.136), εντοπίζεται μια σχετικά αγώγιμη ζώνη, στην πρώτη τομή στις θέσεις 70-110μ. και στη δεύτερη στα 50-80μ.



Εικόνα 4.135:. Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος



**Εικόνα 4.136**. Τομή κατανομής ειδικής αντίστασης (σφάλμα rms = 1.1, αρχική αντίσταση αντιστροφής = 750 Ohm.m).

# 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η γεωφυσική έρευνα που διεξήχθη στη νήσο Χίο, είχε ως κύριο στόχο την διασαφήνιση των υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, που χαρακτήριζαν τις περιοχές έρευνας. Μετά από τις ποιοτικές ερμηνείες, τις ποσοτικές επεξεργασίες και τις αξιολογήσεις των γεωηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών, προέκυψαν χρήσιμα στοιχεία για τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιηθήκαν συνολικά εικοσιοκτώ (28) τομές με τη μέθοδο VLF, συνολικού μήκους 7.045 μέτρων., με βήμα διασκόπησης πέντε (5) μέτρα, εικοσιοκτώ (28) γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις, και τρεις (3) 'επιτόπου' (in situ) μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε επιφανειακές εμφανίσεις πετρωμάτων.

#### 5.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΕΛΦΙΝΙΟΥ

Στην περιοχή του Δελφινίου δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση, προκειμένου να προσδιοριστεί με ποιον τρόπο και από που τροφοδοτείται η λεκάνη, καθώς και να προσδιοριστούν τυχόν προσοδοφόρες θέσεις για υδροληπτικές γεωτρήσεις, δεδομένου ότι η περιοχή τροφοδοτείται με μεγάλους όγκους γλυκού νερού. Μέσω της γεωφυσικής έρευνας, έγινε προσπάθεια να καθοριστούν οι μηχανισμοί των υπαρχουσών πηγών και να δικαιολογηθεί η υφαλμύρυση τους, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Πολύ σημαντικά στοιχεία για την υπεδαφική γεωλογική δομή της λεκάνης προέκυψαν από την αξιολόγηση των δεδομένων της γεωηλεκτρικής έρευνας (βλ. § 3.4.α.4.). Από τις γεωλογικές – γεωφυσικές τομές, που κατασκευάστηκαν για την περιοχή (εικόνα 3.29), φαίνεται να διασαφηνίζεται σε μεγάλο βαθμό ο μηχανισμός των πηγών SP1 και SP2.

Ο υδροφόρος ορίζοντας, αποτελείται κυρίως από καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους (με ειδικές αντιστάσεις <500 Ohm.m), των οποίων υπέρκειται, στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης, ο αδιαπέρατος σχηματισμός Ci-s. Ο σχηματισμός αυτός είναι ουσιαστικά αποθέσεις αποσαθρωμένων υλικών του σχηματισμού των κλαστικών (Ci). Το αδιαπέρατο αυτό κάλυμμα, εμποδίζει την άνοδο του νερού στην επιφάνεια, κάτι που γίνεται εφικτό μόνο κοντά στη γεωηλεκτρική βαθοσκόπηση D04, στην πηγή SP1, όπου και χάνεται ο αδιαπέρατος αυτός σχηματισμός και πάνω στον υδροφόρο ασβεστόλιθο επικάθονται τα ημιπερατά αλλούβια. Ουσιαστικά ο μηχανισμός της πηγής υπό πίεση.

Βάσει των ανωτέρω στοιχείων, δικαιολογείται και η είσοδος του θαλασσινού νερού, στην περιοχή των πηγών, αφού εκεί ο αδιαπέρατος σχηματισμός *Ci-s* δεν εντοπίζεται.

Πιθανόν, εάν το ρήγμα *P1* προεκτείνεται προς τη θάλασσα, να λειτουργεί ως δίοδος θαλασσινού νερού εντός της λεκάνης.

Επιπλέον, η αξιολόγηση της ποσοτικής επεξεργασίας των ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων (βλ. § 4.4.α.2.), κατέδειξε τον πιθανό τρόπο τροφοδοσίας των πηγών της λεκάνης με τους τεράστιους όγκους νερού. Μέσω των τομών ποσοτικής ερμηνείας των τομών VLF, μπορεί να σκιαγραφηθεί σαφώς η πιθανή προέκταση της ρηξιγενής ζώνης P2 (εικόνα 5.1), μέσα στη λεκάνη των αλλούβιων. Η προέκταση της ρηξιγενής ζώνης και πέραν της περιοχής όπου έχουμε στοιχεία από τα ηλεκτρομαγνητικά, καταλήγει οδηγεί περίπου στη θέση της πηγής SP1, δικαιολογώντας την τροφοδοσία της. Για την υποπαράλληλη της ρηξιγενή ζώνη P3, δεν έχουμε στοιχεία από την επεξεργασία των VLF, ότι προεκτείνεται εντός της λεκάνης.

Επιπλέον τροφοδοσία της πηγής, φαίνεται να παρατηρείται και από το ρήγμα *P1*, δεδομένου ότι η τομή 0080, που διασχίζει το ρήγμα, καταδεικνύει σε αυτές τις θέσεις αγώγιμη περιοχή (βλ. εικόνα 4.70).

Στην Εικόνα 3.30, διαφαίνεται η δομή του υποβάθρου της λεκάνης, όπου παρατηρείται η σχετικά απομονωμένη μικρότερη λεκάνη στα νοτιοδυτικά. Η απομονωμένη αυτή δομή, σε συνάρτηση με τα προαναφερθέντα στοιχεία (ύπαρζη και έκταση αδιαπέρατου καλύμματος, τροφοδοσία πηγών από τη ρηζιγενή ζώνη P2), οδήγησαν στην πρόταση πραγματοποίησης δύο υδροληπτικών γεωτρήσεων, εντός αυτής της περιοχής, στις θέσεις που απεικονίζονται στο χάρτη της Εικόνας 5.1. Σε αυτές τις θέσεις αναμένονται μεγάλες ποσότητες καθαρού νερού λόγω της διέλευσης της ρηξιγενής ζώνης (P2) τροφοδοσίας της πηγής SP1, με μικρό κίνδυνο υφαλμύρυνσης, αφού η είσοδος του θαλασσινού νερού εμποδίζεται από το αδιαπέρατο κάλυμμα ιζημάτων.

Οι γεωτρήσεις που προτάθηκαν, πραγματοποιήθηκαν λίγο πριν την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και στέφτηκαν με επιτυχία. Δυστυχώς δοκιμαστικές μετρήσεις δεν πρόλαβαν να πραγματοποιηθούν, αλλά τα πρώτα στοιχεία αναφέρουν παροχές της τάξεως των 50 μ<sup>3</sup>/ώρα για κάθε μια γεώτρηση, βάθος διάτρησης 18 και 24μ. (με τη στάθμη να ανέρχεται στα 4μ. βάθος) και χλωριόντα περίπου 64 ppm, καθιστώντας το νερό ιδιαίτερα καθαρό και με αξιόλογες παροχές.

Άλλη μια γεώτρηση, προτάθηκε εκτός της λεκάνης, πιο δυτικά, από στοιχεία που προέκυψαν από τις VLF τομές 0090 και 0100, σε συνδυασμό με την ύπαρξη δυο τεμνόμενων ρηξιγενών ζωνών.



Εικόνα 5.1: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Δελφινίου με τις προτεινόμενες θέσεις γεωτρήσεων και την προέκταση του ρήγματος P2, από τα γεωφυσικά αποτελέσματα.

#### 5.2. ПЕРІОХН КОРАКАРН

Αρχικά, στην περιοχή του Μεσοβουνίου, από την αξιολόγηση των γεωηλεκτρικών δεομένων, προέκυψαν χρήσιμα στοιχεία για την υπεδαφική γεωλογική δομή της λεκάνης (βλ. § 3.4.β.4.).

Πιο συγκεκριμένα, σκιαγραφήθηκε η κλίση του γεωηλεκτρικού (και πιθανόν γεωλογικού) υποβάθρου προς νότο (εικόνες 3.38 και 3.39), κάτι που παρατηρείται και στις επιφανειακές εμφανίσεις. Επιπλέον, παρατηρείται η αποσφήνωση προς βόρεια, του αδιαπέρατου σχηματισμού *Tr m2* (*Τομή IV – Εικόνα 3.38*), που φαίνεται να εντοπίζεται ακριβώς κάτω από τα επιφανειακά κορήματα, εμποδίζοντας την κατείσδυση του νερού. Επομένως, η τροφοδοσία των υδατοπερατών σχηματισμών του υποβάθρου της περιοχής, καθίσταται δυνατή από το βόρειο τμήμα της περιοχής, αν λάβουμε κιόλας υπόψη τη κλίση προς Νότο.

Με αυτά τα δεδομένα προτάθηκε η πραγματοποίηση υδροληπτικής γεώτρησης, στη θέση που απεικονίζεται στο χάρτη της Εικόνας 5.2. Κατά τη διαδικασία ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε η γεώτρηση και εντοπίστηκε υδροφορία σε βάθος 70 μέτρων, μέσα στο ανθρακικό υπόβαθρο.

Στην περιοχή της Αγ. Παρασκευής, η ποσοτική επεξεργασία των τομών VLF που πραγματοποιήθηκαν, ανέδειξε κάποιες αγώγιμες ζώνες. Αξιολογώντας τις ζώνες αυτές, σε συνδυασμό με τη γεωλογική δομή της περιοχής (πιθανή υδροφορία του ρήγματος *P4*), καταδείχτηκε μια θέση γεώτρησης (εικόνα 5.2), η οποία δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί. Παρότι, εντοπίστηκαν και δύο αγώγιμες ζώνες στα πρώτα 150 μέτρα της τομής *0100ag*, δεν προτάθηκε κάποια γεώτρηση, μην όντας δυνατό να ερμηνευτούν γεωλογικά.



Εικόνα 5.2: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Κορακάρη, με τις προτεινόμενες θέσεις γεωτρήσεων.

#### 5.3. ПЕРІОХН КАТРАРН

Στην περιοχή του Κατράρη, δεδομένης της μη ύπαρξης πηγών στην περιοχή, ο στόχος περιορίστηκε στον εντοπισμό πιθανών υδροφόρων τεκτονικών ζωνών στη περιοχή, με τη χρήση κυρίως της μεθόδου VLF.

Η ποσοτική επεξεργασία των ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων (βλ. § 4.4.γ.2.), σε συνδυασμό με τη γεωηλεκτρική βαθοσκόπηση που πραγματοποιήθηκε, ανέδειξαν κάποιες αγώγιμες περιοχές, που πιθανόν να οφείλονται σε προέκταση του ρήγματος P5 (εικόνα 5.3) μέσα στην κοίτη του ποταμού Κατράρη, η οποία πιθανόν να υδροφορεί. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω προτάθηκαν δύο θέσεις υδροληπτικών γεωτρήσεων (εικόνα 5.3). Δυστυχώς, σε αυτές τις θέσεις δεν εντοπίστηκε υδροφορία, κάτι που δικαιολόγησε τις επιφυλάξεις για έντονη παρουσία αργιλικών υλικών στην περιοχή, που την καθιστά αγώγιμη μεν, αλλά αδιαπέρατη.

Στη λεκάνη του Άνυδρου, έγινε προσπάθεια εντοπισμού υδροφόρων ρηξιγενών ζωνών με τη μέθοδο VLF. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας (βλ. § 4.4.γ.2.), καταδεικνύουν μια αγώγιμη ζώνη, που φαίνεται να ταυτίζεται με τη προέκταση του ρήγματος *P6* (εικόνα 5.3). Δεδομένης της πιθανής τροφοδοσίας της ρηξιγενούς ζώνης από τα NA, προτείνεται θέση υδροληπτικής γεώτρησης επί αυτής της προέκτασης (εικόνα 5.3).

Επιπλέον, ενδείξεις αντίστοιχες προκύπτουν από την επεξεργασία της τομής 0303, που διασχίζει τη ρηξιγενή ζώνη P7. Δεδομένου του μικρού όγκου στοιχείων για τη συγκεκριμένη ρηξιγενή περιοχή, δεν προτείνεται πραγματοποίηση γεώτρησης, αλλά περαιτέρω διερεύνηση με παράλληλες τομές VLF, για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.3: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Κατράρη, με τις προτεινόμενες θέσεις γεωτρήσεων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abem, (1989). Abem Wadi VLF instrument – Instruction Manual, 41o., Bromma.

Αλεξόπουλος, Ι., (1998). Συμβολή των γεωφυσικών μεθόδων στη διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών του οροπεδίου της Τρίπολης. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, 310σ., Αθήνα.

Αλεξόπουλος, Ι., (2008). Ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης. Σημειώσεις Εργαστηρίου Γεωφυσικής, 28σ., Αθήνα.

Assereto, R., (1974). Aegean and Bithynian: proposal for two new Anisian substages. *Schrift. Erdwiss. Komm.*, 2, pp.23-29.

Assereto, R., Jacosbshagen, V., Kauffman, G., Nicora, A., (1980). The Scythian / Anisian boundary in Chios Greece. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia, 85 (1979)*, pp. 715-736.

**Baker, H.A., Myers, J.O.**, (1980). A topographic correction for the VLF-EM profiles based on model studies. *Geoexploration, 18*, pp. 135-144.

Beamish, D., (1994). Two-dimensional, regularized inversion of VLF data. *Journal of Applied Geophysics, 32*, pp. 357-374.

Beamish, D., (2000). Quantitative 2D VLF data interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, 45, pp. 33-47.

Bender, H., (1970). Der Nachweiss von Unter-Anis ("Hydasp") auf der Insel Chios. Annales Geol. Pays Hell., 19 (1967), pp. 412-467.

Besenecker, H., Durr, S., Herget, G., Jacosbshagen, V., Kauffman, G., Ludktke, G., Roth, W., Tietze, K.V., (1968). Geologie von Chios (Agais). *Geologica et Paleontologica, 2*, pp. 121-150, Marburg.

Besenecker, H., Durr, S., Herget, G., Kauffman, G., Ludktke, G., Roth, W., Tietze, K.V., (1971). Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδος, Φύλλο Χίος. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), Αθήνα.

**Chouteau, M., Zhang, P., Chapellier, D.**, (1996). Computation of apparent resistivity profiles for high resolution mapping of karst structures. *Geophysical Prospecting, 44*, pp. 215-232.

**Degroot-hedlin, C., Constable, S.C.**, (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics, 55*, pp. 1613-1624.

**Dorbin, B.M., Savit H.C.**, (1988). Introduction to geophysical prospecting. *McGraw-Hill International Editions*, 846p.

Eberle, D., (1981). A method of reducing terrain relief effects from VLF-EM data. *Geoexploration, 19,* pp. 103-114.

Flathe, H., (1963). Five-layer master curves for the hydrogeological interpretation of geoelectrical resistivity measurements above a two-storey aquifer. *Geophysical Prospecting, XI, 4,* pp. 471-508.

Fraser, D.C., (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics, Vol. 34, No. 6,* pp. 958-967.

Gaetani, M., Jacobshagen, V., Nicora, A., Kauffman, G., Tselepidis, V., Fantini Sentini, N., Mertmann, D., Skourtsis-Coroneou, V., (1992). The Early-Middle Triassic boundary at Chios (Greece). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, *98*, pp. 181-204.

Groves, J.R., Larghi, C., Nicora, A., Rettori, R., (2003). Mississippian (Lower Carboniferous) microfossils from the Chios Mélange (Chios Island, Greece). *Geobios*, *36*, pp. 379-389.

Interpex Limited, (2007). IXVLF Instruction manual, Version 1.0. 32p., USA.

Jacobshagen, V., Gaetani, M., Nicora, A., Tselepidis, V., Kauffman, G., Mertmann, D., Skourtsis-Coroneou, V., Fantini Sentini, N., (1993). The Early/Middle Triassic boundary on Chios Island; preliminary results of a reinvestigation.  $\Delta \epsilon \lambda \tau io \tau \eta \varsigma E \lambda \lambda \eta v \kappa \eta \varsigma \Gamma \epsilon \omega \lambda o \gamma \kappa \eta \varsigma E \tau \alpha i \rho \epsilon i \alpha \varsigma, T \delta \mu o \varsigma XXVIII / 3, \sigma. 25-38.$ 

Kaikkonen, P., Sharma, S.P., (1998). 2-D nonlinear joint inversion of VLF and VLF-R data using simulated annealing. *Journal of Applied Geophysics, 39*, pp. 155-176.

Karous, M., (1979). Effect of relief in EM methods with very distant source. *Geoexploration*, 17, pp. 33-42.

Karous, M., Hjelt, S.E., (1983). Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, *31*, pp. 782-794.

Kauffman, G., (1969). Die Geologie von Nordost-Chios (Agais). Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Marburg, Γερμανία.

**Κτένας, Κ**., (1928). Έκθεσις περί των γεωλογικών ερευνών εις την νήσον Χίο κατά το θέρος 1927. Πρακτικά Ακαδημίας Αθηνών, 3, σ. 702-715, Αθήνα.

Merrick, N.P., (1977). A computer program for the inversion of Schlumberger sounding curves in the apparent resistivity domain. *New South Wales Water Resources Commission, Hydrological report No 1977/5*, 36p., Sydney.

**Monteiro Santos, F.A**., (2006). Instructions for running PrepVLF and Inv2DVLF; 2-D inversion of VLF-EM single frequency programs Version 1.0. 12p., Lisboa.

Monteiro Santos, F.A., (2007). New features PrepVLF and Inv2DVLF, Version 1.1, 6p., Lisboa

Monteiro Santos, F.A., Almeida, E.P., Gomes, M., Pina, A., (2006). Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods. *Journal of African Earth Sciences*, 45, pp.421-430. Monteiro Santos, F.A.,

**Mateus, A., Figueiras., J., Concalves, M.A.**, (2006). Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – A case study. *Journal of Applied Geophysics, 60*, pp. 115-125.

**Μπάνος, Χ., Παρασχούδης, Β., Πιππίδης**, Μ., (1995). Αναμόρφωση υδατικού ισοζυγίου νήσου Χίου – ενιαία διαχείριση υδατικών πόρων. Πρακτικά 3<sup>ου</sup> υδρογεωλογικού συνέδριου, σ. 428-442, Ηράκλειο Κρήτης.

Muttoni, G., Kent, D.V., Gaetani, M., (1995). Magnetostratigrphy of a Lower-Middle Triassic boundary section from Chios (Greece). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *92*, pp. 245-260.

Nissen, J., (1986). A versatile electromagnetic modeling program for 2-D structures. *Geophysical Prospecting*, *34*, pp1099-1110.

**Ogilvy, R.D., Lee, A.C.**, (1991). Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudosection. *Geophysical Prospecting*, *39*, pp. 567-580.

**Orellana, E. & Mooney, H.M**, (1966). Master table and curves for vertical electrical sounding over layered structures. *Interciencia*, 193p., Madrid.

**Παπαδόπουλος, Τ.**, (2004). Σημειώσεις επί των γεωηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης. 68σ., Αθήνα.

**Papadopoulos T.D., Alexopoulos J.D., Dilalos, S., Pippidis, M.J.**, (2008). Resistivity and VLF measurements for spring mechanism determination at NE Chios Isl. Πρακτικά  $8^{ov}$  διεθνούς υδρογεωλογικού συνέδριου της Ελλάδας, σ. 337-346, Αθήνα.

**Papanikolaou, D., Sideris, C.**, (1983). Le Paleozoique de l'autocthone de Chios: une formation a blocs de type wildflysch d'age Permian (pro parte). *Comptes Rendus de l' Academie des Sciences de Paris, 297*, pp. 603-606.

**Papanikolaou, D., Sideris, C.**, (1989). Contribution to the Paleozoic of the Egean area. *Rendiconti de la Societa Geologica Italiana, 12,* pp. 349-358.

Παπαζάχος, Β., (1986). Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική. 321 σ.

Parasnis, D.S., 1986). Principles of applied Geophysics. Chapman & Hall, 395p.

**Pe-Piper, G., Kotopouli, C.N.**, (1994). Paleozoic volcanic rocks of Chios, Greece: record of a Palaeotethyan suture. *N.Jb. Miner. Monatshefte, 1*, pp.23-29.

**Pirttijarvi, M.**, (2004). Manual of the KHFFILT program; Karous-Hjelt and Fraser filtering of VLF measurements, Version 1.1a. *University of Oulu*, 6p., Finland.

**Robertson, A.H.F, Pickett, E.A**, (2000). Paleozoic-Early Tertiary Tethyan evolution of mélanges, rift and passive margin units in the Karaburun Peninsula (western Turkey) and Chios Island (Greece). In: *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area* (Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D., Eds). *Geological Society of London, Special Publishing, 173*, pp. 43-82.

Sasaki, Y., (1989). Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipoledipole resistivity data. *Geophysics*, *54*, pp. 254-262.

Sasaki, Y., (1994). 3-D resistivity inversion using the finite element method. *Geophysics*, 59,11, pp. 1839-1848.

Sasaki, Y., (2001). Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. *Journal of Applied Geophysics, 46*, pp. 45-54.

Serway, R., (1990). Physics for scientists & engineers, Τόμος II – Ηλεκτρομαγνητισμός (Απόδοση στα ελληνικά από Ρεσβάνη Λ.). Saunders College Publishing, Third Edition, 358 σ., Αθήνα.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A., (1990). Applied Geophysics. *Cambridge Univ. Press*, 843p.

Teller, F., (1880). Geologische Beobacthungen auf der Insel Chios. Denkscchr k. Ak. Wiss. Wien.

**Τζάνης, Α.**, (2005). Στοιχεία από τον Γεωηλεκτρομαγνητισμό (Προ-διάθεση 3<sup>ης</sup> αναθεώρησης). *Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας*, 177σ., Αθήνα.

**Yungul, S.H.**, (1966). Electrical methods in geophysical exploration of deep sedimentary basin. *Chapman & Hall*, 197p.

Zanchi, A., Garzanti, E., Larghi, C., Angiolini, L., Gaetani, M., (2003). The Variscan orogeny in Chios (Greece): Carboniferous accretion along a Paleotethyan active margin. *Terra Nova*, *15*, pp. 213-223.

**Ζεληλίδης, Α., Αβραμίδης, Π.**, (2001). Η ιζηματολογική και στρωματογραφική διάρθρωση της νήσου Χίου στην κατεύθυνση επίλυσης των υπαρχόντων υδρογεωλογικών προβλημάτων. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Τόμος XXXIV / 5, σ. 1811-1818, Αθήνα.

Zohdy, A.A.R., (1974). Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves. *Geol. Sur. Bull. 1313E. U.S. Government Printing Office*, 71 pp., Washington.

**Zohdy, A.A.R.**, (1989). A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner soundings curves. *Geophysics, vol.54, 2:* pp.245-253.

Walen P.A., (2003). RAMAG – Instruction manual Version 2.2, 19o.

Whittles, A.B.L., (1969). Prospecting with radio frequency EM-16 in mountainous regions. *Western Miner*, *42*, pp.51-56.

# ПАРАРТНМА

Γεωηλεκτρικά Δεδομένα

























































